

Universidade de São Paulo
Instituto de Geociências

**AVALIAÇÃO DE TEORES DE UMIDADE DE SOLOS DE JAZIDAS PARA FINS DE
COMPACTAÇÃO**

Trabalho de Formatura

TF-18/32

Aluna: Mariana Oliveira Barbosa

Orientador: Prof. Fernando A. M. Marinho

São Paulo
2018

“To me, being perfect is not about that scoreboard out there. It's not about winning.
It's about you and your relationship to yourself and your family and your friends.

Being perfect is about being able to look your friends in the eye and know that you didn't let them down, because you told them the truth. And that truth is that you did everything that you could. There wasn't one more thing that you could've done.

Can you live in that moment, as best you can, with clear eyes and love in your heart?

With joy in your heart?

If you can do that, gentlemen, then you're perfect.”

(Coach Gaines – Friday Night Lights, 2004)

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu irmão Guilherme, por SEMPRE me incentivar a estudar e buscar o meu lugar dentro da ciência. Por todas as conversas e momentos compartilhados. Obrigada aos meus pais por todas as condições que me fizeram estar onde estou. Pai e mãe, obrigada por sempre me defenderem, me ensinarem a ética e estarem disponíveis para estar comigo, independente de tudo. Vocês três são fundamentais na minha educação e criação do meu eu, muito obrigada por tudo que vocês me proporcionam (momentos, risadas, carinho, bronca, responsabilidades) e, com certeza, todo esse estímulo foi fundamental para mim. Eu amo vocês. Obrigada a Narceja, minha companheirinha.

Quero agradecer também ao meu parceiro Bone, obrigada por ser tão companheiro e sempre me estimular a ir atrás do que eu quero. É muito bom dividir os momentos com você.

Obrigada ao professor Fernando que me orientou e auxiliou na produção deste trabalho. Obrigada pela sua compreensão. Obrigada aos técnicos do laboratório de mecânica de solos da Escola Politécnica da USP: Val, e principalmente, Antônio por toda a atenção e ajuda dedicados a mim e aos meus experimentos. Mari e Spock, obrigada por terem me ajudado compartilhando parte do conhecimento de vocês e me alertando sobre os prazos.

Um obrigada mais que especial para as meninas que foram fundamentais durante a graduação: Mila, Maria e Pinga. Com vocês eu dividi momentos sem iguais e de extrema importância para com quem eu sou hoje. Além disso, agradecimento especial ao Bago que sempre esteve ao meu lado nos momentos difíceis para me tirar um sorriso, além dos momentos bons também que compartilhamos. Obrigada mais que especial à Porka, Xica, Furunka, Peps, Gari, Jade, Blá, Nômada, Lomba Bolovo, Mett, Letícia, Dana, Urso, Qualquer e Amansa que em diferentes fases foram de importância para mim. Agradeço também a amizade do americanense Cainho, que desde o ensino médio está comigo. Um agradecimento mais que especial para a Sandra, mulher que dedicou boa parte do seu tempo comigo e sempre dividiu os momentos de estudos comigo. Obrigada aos meus colegas rondonistas que dividiram essa experiência incrível comigo e aos amigos rochedenses, foi um prazer conhecê-los.

Os professores que passaram por mim desde o ensino fundamental até os dias de hoje também tiveram fundamental importância para que eu tenha descoberto e continue procurando o propósito para a minha vida e são eles: Rogério, Didoné, Jaú, Mario Campos, Adriana, Egydio, Ninguém, Caetano, André, Alexandra Torrinha, Edmilson e Virgínia. Até mesmo àqueles que fizeram eu duvidar de mim mesma, o meu muito obrigada.

Gostaria de agradecer a todos os funcionários do Instituto de Geociências: Totó e Dedé sempre dispostos a dar um bom dia com um sorriso no rosto, os outros porteiros, o pessoal da limpeza e manutenção e os técnicos dos laboratórios. Obrigada por fazerem esse instituto acontecer.

Obrigada a Universidade de São Paulo que proporcionou essa oportunidade única e totalmente revolucionária em nossas vidas. Espero ainda o dia em que a maior parte das pessoas consigam o acesso nas universidades públicas e deem o devido valor a ela.

RESUMO

A ampliação e manutenção da infraestrutura pública e privada é fundamental para uma sociedade. A construção civil é um ramo fundamental para o desenvolvimento, e grande parte das obras de infraestrutura envolvem o solo, tanto no seu estado natural quanto na forma de aterros compactados. No caso dos solos compactados, estes são tratados como materiais de construção e o seu uso pressupõe características conhecidas e previamente determinadas e estabelecidas durante o projeto. Além de outros aspectos, o processo de compactação exige condições específicas para o teor de umidade na qual o solo será compactado. O teor de umidade na jazida, o ajuste de umidade na praça de compactação e a interferência climática afetam a eficiência do processo de compactação. Desta forma, um dos aspectos que é importante entender é o processo de evaporação. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o processo de evaporação de modelos físicos de camadas de solo, preparados em laboratório, e tentar modelar este processo por meio de análise numérica. Os modelos físicos utilizaram um solo residual de gnaiss e uma mistura com cal hidratada, sob duas condições de densidade. O teor de umidade foi monitorado ao longo da camada e no tempo. A modelagem numérica foi feita utilizando o software de domínio público denominado Hydrus 1D. Além do modelo físico e dos estudos numéricos foram obtidas informações geotécnicas dos materiais utilizados determinando-se a distribuição granulométrica, a condutividade hidráulica, curva de compactação e curva de retenção de água. O estudo conclui que a adição de cal gera uma queda na velocidade de secagem.

ABSTRACT

The expansion and maintenance of public and private infrastructure are fundamental for a society. Civil construction is a fundamental branch of development, and much of the infrastructure works involve the soil, both in its natural state and in the form of compacted landfills. In the case of compacted soils, these are treated as building materials and their use presupposes known and previously determined characteristics. These are established during the design project. In addition to other aspects, the compaction process requires specific conditions for the moisture content at which the soil will be compacted. The moisture content in the reservoir, the humidity adjustment in the compaction square and the climatic interference affect the efficiency of the compaction process. In this way, one of the aspects that is important to understand is the evaporation process. The present work has as objective to evaluate the evaporation process of physical models of soil layers, prepared in the laboratory, and try to model this process by means of numerical analysis. The physical models used a residual soil of gneiss and a mixture with hydrated lime, under two density conditions. The moisture content was monitored along the time. Numerical modeling was done using public domain software called Hydrus 1D. In addition to the physical model and numerical studies, geotechnical information was obtained from the materials used, determining the grain size distribution, hydraulic conductivity, compaction curve and water retention curve. The study concluded that the addition of lime generates a decrease in drying rate.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METAS E OBJETIVOS	1
3. MATERIAIS E MÉTODOS	2
3.1. Local de obtenção do solo	2
3.2. Ensaio de caracterização do solo	3
3.3. Ensaio de compactação.....	4
3.4. Condutividade hidráulica saturada.....	4
3.5. Curva de retenção de água	5
3.6. Modelo físico	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
4.1. Geologia da região metropolitana da cidade de São Paulo.....	8
4.2. Compactação	8
4.3. O Processo de Compactação no Campo.....	10
4.3.1. Controle de compactação.....	11
4.3.2. Dificuldades de Compactação Associadas ao Teor de Umidade	12
5. RESULTADOS	15
5.1. Caracterização do solo	15
5.2. Modelo Físico	19
5.2.1. Preparação das amostras.....	19
5.2.2. Caixa 01	20
5.2.3. Caixa 02	20
5.2.4. Caixa 03.....	21
5.2.5. Caixa 04.....	22
5.1. Análise Numérica.....	23
5.1.1. Parâmetros adotados	24
5.1.2. Condições de contorno adotadas	27
5.1.3. Resultados da análise numérica.....	29
6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	32
7. CONCLUSÕES.....	37
8. REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

Neste texto é apresentada a monografia desenvolvida durante a disciplina 0440500/2018 - Trabalho de Formatura referente ao curso de Geologia da Universidade de São Paulo pela aluna Mariana Oliveira Barbosa e seu orientador Fernando A. M. Marinho.

Para a execução de obras de engenharia fundamentais a nossa existência - como, por exemplo, instalações hidráulicas, aterros, terraplenagem, barragens e construções civis - é necessário atingir um nível de estabilidade, resistência e erodibilidade do solo no qual serão instaladas. Para tanto, a quantidade de água é um fator determinante nessas propriedades do solo a ser compactado e, muitas vezes, torna-se necessária à adequação do teor de umidade por meio de alguns procedimentos antes do início da construção de diversas obras. Dependendo do tipo de solo e do clima local surgem dificuldades para se obter o teor de umidade adequado a compactação, comprometendo os prazos e a qualidade do aterro

O estudo consiste em uma análise sobre o processo de redução do teor de umidade de um solo siltoso de forma natural, ou seja, por evaporação. Esse solo foi submetido a diferentes condições de compactação, além de também ter sido adicionado a cal hidratada para verificar em como ela influencia no processo de evaporação. Para isso, toda a atividade será monitorada de modo a se avaliar as variáveis que afetam este processo.

2. METAS E OBJETIVOS

Este trabalho tem como meta final entender o processo de evaporação de água em diferentes condições de compactação e de adição de produtos (como no caso de adição da cal) no solo siltoso utilizado, em camadas de solo. Os objetivos do trabalho são:

- Apresentar uma revisão bibliográfica sobre o tema.
- Determinar a porcentagem de cal adequada para que os efeitos sejam relevantes para melhoria do comportamento do solo
- Caracterizar geotecnicamente os materiais utilizados
- Determinar a condutividade hidráulica saturada do material.
- Determinar as curvas de retenção de água das amostras.

- Montar os modelos físicos em laboratório
- Desenvolver habilidades para manejo do software Hydrus
- Determinar as velocidades de evaporação ao longo de camadas de solo e solo/cal.
- Avaliar o comportamento do processo de evaporação por meio de análise numérica.
- Ajustar os parâmetros do modelo numérico aos dados e avaliar eficiência da previsão de comportamento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Local de obtenção do solo

O início do desenvolvimento deste projeto ocorreu com uma compilação de artigos e livros sobre compactação, métodos e testes de caracterização do solo (granulometria, limites de plasticidade e liquidez, umidade ótima, curva de retenção d'água), métodos de secagem de solo, diferentes teores de umidade e seus comportamentos para que se tenha um embasamento satisfatório do assunto. Esses livros e artigos puderam ser encontrados nas bibliotecas do Instituto de Geociências e da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, além do acervo encontrado a partir de pesquisas em sites de busca.

O solo utilizado neste estudo foi coletado pelo laboratório de mecânica de solos da escola politécnica da Universidade de São Paulo. O local de retirada fica situado próximo à portaria 03 da Universidade de São Paulo no campus Butantã, zona oeste da cidade de São Paulo - SP, Brasil. Este é referente a um solo residual do embasamento encontrado na geologia da cidade de São Paulo - SP.



Figura 01: Apresenta a localização da retirada do material utilizado neste estudo.

3.2. Ensaios de caracterização do solo

Para a realização da caracterização granulométrica do solo, é necessário que uma porção do material seja passada pela peneira 10 (abertura de 2,0 mm). O material retido é pesado. O material que passa é deixado em repouso por 24h em uma solução com hexametáfosfato de sódio (NaPO_3)₆ para que todas as partículas sejam separadas. Após o tempo necessário, essa solução é colocada em uma proveta de 1000,0 ml (sendo preenchida totalmente com água destilada) e todo o material é misturado durante um minuto. A partir do primeiro instante, medidas de densidade e temperatura são lidas durante os intervalos de: 30 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 4 minutos, 8 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas e 24 horas. Por fim, os cálculos são feitos para relacionar os tempos de sedimentação com as proporções dos grãos. Para a determinação da massa de grãos entre 0,075mm e 1,20mm (ou seja, frações entre silte, areia fina, média e grossa), é necessário lavar o material restante na peneira 200 (abertura de 0,075mm) e o que restar, após de seco, é passado pelas peneiras de aberturas 1,20mm, 0,60mm, 0,42mm, 0,30mm, 0,15mm e 0,075mm e o material retido é pesado. Conforme todo esse processo estabelecido segundo normas do laboratório e da ABNT, é possível montar uma curva das diferentes granulometrias do solo.

Para a determinação do limite de plasticidade, segundo a norma ABNT NBR 7180, é necessário determinar a umidade do solo em que uma amostra começa a fraturar ao ser moldada com a mão (sobre uma placa permeável) com o formato de um cilindro de 3,0mm de diâmetro. Já o limite de liquidez é reconhecido pela umidade do solo em que a ranhura feita na porção de solo colocada na concha de Casagrande (como mostrada

na figura abaixo) seja fechada com 25 golpes. Para tanto, é realizada uma curva de gráfico representando número de golpes por umidade. Este último é realizado segundo a norma ABNT NBR 6459.

3.3. Ensaio de compactação

Para obtenção dos parâmetros de compactação foi utilizada a norma brasileira NBR 7182. Basicamente, este ensaio é realizado a partir de uma amostra de solo, no qual, é recomendável atingir uma umidade de, aproximadamente, 5% inferior a umidade ótima. Então, um corpo de prova deve ser montado dentro de um molde com três camadas e cada uma compactada com um soquete de 2,5kg. Após essa construção, essa amostra é retirada, pesada (para definir a densidade) e a parte central é coletada para que a umidade seja medida pelo método da estufa. O resto do corpo de prova é misturado com o material inicial e um novo procedimento é iniciado, - sem o acréscimo de qualquer material além do inicial - mas com uma umidade maior.

O fundamental deste procedimento é atingir ao menos dois pontos nos quais a umidade seja inferior a umidade ótima, dois pontos nos quais a umidade seja superior a umidade ótima e outro ponto próximo a umidade ótima. Com esses dados, junto às densidades dos corpos de prova é possível montar um gráfico referente a curva de compactação onde pode-se estabelecer de modo criterioso a umidade ótima e a densidade máxima seca.

3.4. Condutividade hidráulica saturada

Para a realização das análises numéricas é necessária a determinação da condutividade hidráulica do material. Existem três procedimentos para obtenção deste parâmetro: ensaio com carga constante, com carga variável e vazão constante.

No presente estudo optou-se pelo procedimento de carga variável. Por questões operacionais o ensaio foi realizado em uma célula de adensamento. No primeiro estágio, o procedimento realizado consiste em montar o corpo de prova com o material na condição desejada de densidade e teor de umidade. O segundo estágio é o carregamento do material com uma carga vertical. O terceiro estágio é a indução de um fluxo através do corpo de prova de modo a se determinar a condutividade hidráulica. Os corpos de prova foram submetidos as seguintes tensões verticais: 5 kPa, 10 kPa, 20 kPa e 30 kPa. O procedimento foi aplicado ao solo siltoso puro e com o solo siltoso+cal. O sistema possui uma bureta que permite a determinação da vazão ao longo do tempo e ao mesmo tempo da altura da carga hidráulica. A bureta é

preenchida, e quando essa é aberta, a água passa pelo corpo de prova. Determina-se então as variações das alturas obtendo-se a condutividade hidráulica por meio da equação:

$$K = 2.3 \frac{aL}{A\Delta t} \log \left(\frac{h_0}{h_1} \right) \quad (\text{Equação 01})$$

Onde:

a – é a área interna da bureta (cm²).

A – Área da seção transversal do corpo de prova

L – Altura do corpo de prova

h₀ – distância inicial entre a medida da bureta e a saída da água

h₁ – distância após o tempo t entre a medida da bureta e a saída da água

Δt – Intervalo de tempo considerado

3.5. Curva de retenção de água

Para a realização da análise numérica é também necessária a determinação da curva de retenção de água do solo. A curva de retenção foi obtida por meio de duas metodologias: placa de sucção e placa de pressão. Estes métodos são descritos em detalhes por diversos autores (e.g. Fredlund and Rahardjo, 1993, Marinho et al. 2015, entre outros).

O procedimento utilizado para o ensaio foi a partir de uma placa porosa saturada. Ela é colocada em um suporte ligado a um recipiente com água. Acima dela são colocadas amostras do material compactado e solto. Num primeiro momento, a placa porosa+amostras são colocadas na mesma altura do recipiente com água para que as amostras também sejam saturadas. No caso da placa de sucção a sucção é aplicada por meio da diferença de nível entre a placa porosa e a saída de água. Para a placa de pressão utiliza-se a técnica da translação de eixos, onde a pressão do ar é aumentada de modo a induzir a saída de água devido à diferença entre a pressão do ar e da água (que é a sucção). Na placa de sucção foram utilizadas as seguintes sucções: 0,5kPa, 1,0 kPa, 2,0kPa, 5,0kPa, 10,0kPa, 15,0kPa, 20,0kPa e 30,0kPa. Para a placa de pressão utilizou-se as sucções de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa 400 kPa e 500 kPa.

3.6. Modelo físico

Os ensaios para simular a perda de água por evaporação foram realizados utilizando-se caixas de madeira com as dimensões apresentadas na Figura 02.

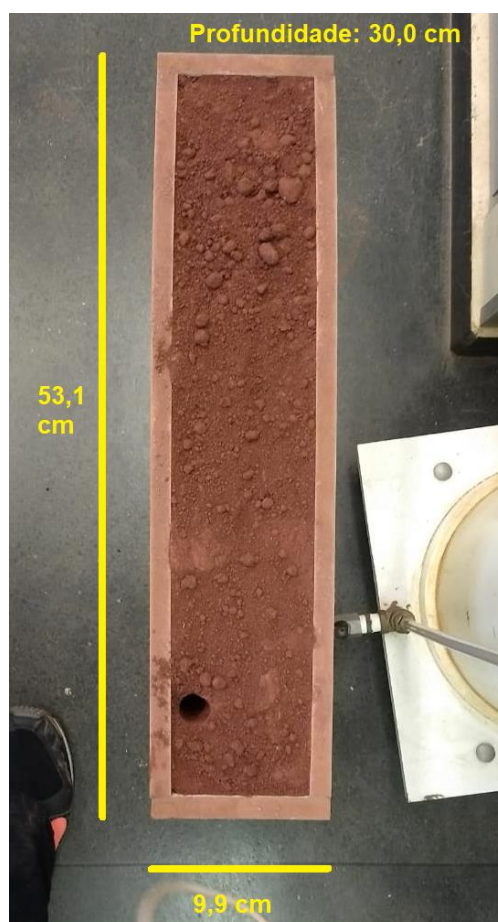


Figura 02. Detalhes das caixas utilizadas nos modelos físicos

Os ensaios de evaporação foram realizados após o solo ser compactado. Durante o processo foram monitoradas a temperatura e a umidade relativa do ar. A Tabela 3 apresenta uma descrição das quatro caixas ensaiadas.

Caixa/solos	Condição de lançamento do solo	Processo de secagem
1/solo siltoso	Compactado na umidade ótima com 30,0cm de espessura	Evaporação
2/solo siltoso	Lançado com 30,0cm de espessura	Evaporação
3/solo siltoso + cal	Compactado na umidade ótima com 30,0cm de espessura	Evaporação
4/ solo siltoso + cal	Lançado com 30,0cm de espessura	Evaporação

Tabela 01 – Ensaios de evaporação e os processos.

Em cada caixa, durante o processo de secagem por evaporação natural, foram obtidas amostras para determinação do teor de umidade. Nas caixas com o solo lançado foram obtidas amostras em três profundidades e no caso do solo compactado apenas de duas devido a dificuldades de amostragem. A frequência de coleta de amostras foi de três vezes por semana. Análise numérica

Será utilizado o software Hydrus 1D (Simunek et al., 2008) de modo a simular o processo de evaporação. O software permite a simulação numérica de fluxo em meio não saturado devido a evaporação.

Os parâmetros requeridos para uso do software envolvem aspectos meteorológicos, características do solo e as condições que ele está exposto. Em primeiro lugar, os campos meteorológicos envolvem condições de exposição ao sol ou não, a temperaturas médias máximas e mínimas, umidade do ar relativa, velocidade do vento, além de uma caracterização da latitude e altitude do local de estudo para realização da modelagem. Os aspectos característicos do solo envolvem umidade residual, umidade de saturação, além de outros dois parâmetros obtidos também na curva experimental de retenção de água que são α e n – o primeiro é associado a pressão de entrada de ar, enquanto a segunda variável é relacionada às características do próprio solo e estimativas de condutividade hidráulica (Burdine 1953, Tormela et al., 1999, Van Alphen et al., 2001) – e a permeabilidade hidráulica (k). Por fim, as condições expostas ao modelo são: material de transporte (no caso, água), informações geométricas (como a profundidade perfil observado), tempo a se calcular o modelo, o modelo hidráulico usado, as profundidades do perfil para se modelar e as condições expostas na base e topo do experimento.

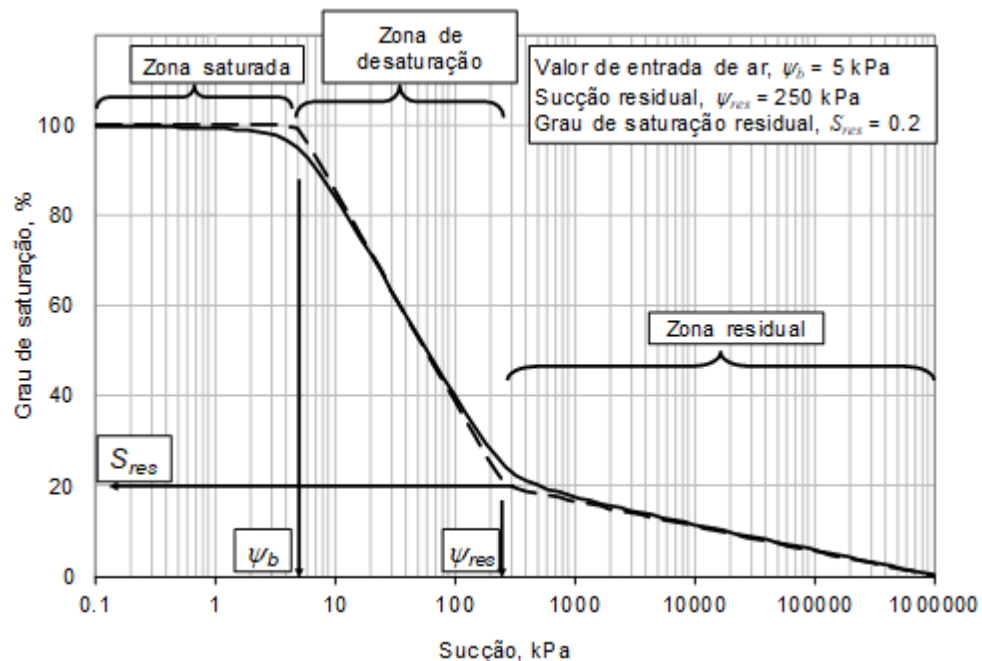


Figura 03: Exemplo de curva de retenção. Retirado de Gitirana et al (2015))

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Geologia da região metropolitana da cidade de São Paulo

A região metropolitana de São Paulo é constituída pelo embasamento da Bacia de São Paulo formado por terrenos policíclicos referentes ao Cinturão de Dobramentos Ribeira (Hasui et al., 1975), pertencente ao Província Mantiqueira (Almeida et al 1977, 1981), proveniente da Orogenia Brasileira (Almeida 1969,1977) - Neoproterozóico - que formou o paleocontinente Gondwana. Esse arcabouço é formado, sobretudo, por rochas metamórficas, migmatitos e granitóides. Sobre essas formações, há a sedimentação de sedimentos cenozóicos das Bacias de São Paulo, Taubaté, além de sedimentos aluviais e coluviais do Quaternário.

Especificamente, a região de estudo, aflora um solo residual referente ao Complexo Embu (Hasui & Sadowski, 1976), pertencente ao embasamento da Bacia de São Paulo. Este Complexo está localizado na porção centro-sul do Município de São Paulo e é constituído por xistos, filitos, migmatitos, gnaisses, quartzitos, anfibolitos e rochas calcissilicáticas.

4.2. Compactação

A compactação é um processo manual ou mecânico de redução dos espaços que contêm ar entre os grãos que compõe o solo, diminuindo assim o índice de vazios (e). Esse processo tem como objetivo uma homogeneização do solo, fazendo com que haja uma resistência ao cisalhamento maior, redução na quantidade de recalque quando exposto às cargas, além da redução de compressibilidade, permeabilidade, erodibilidade e absorção de água para que haja uma maior estabilidade. Todas essas funções exercem uma grande importância nas construções de obras de engenharia.

O engenheiro mecânico Ralph Proctor foi o primeiro estudioso a desenvolver um teste de compactação que relaciona o teor de umidade (w) e o peso específico seco (γ_s), sendo assim chamado de ensaio de Proctor (Proctor, 1933) ou AASHTO Standard, que no Brasil foi padronizado como método MB-33 da ABNT.

Este ensaio, é realizado utilizando-se um molde cilíndrico de compactação que possui um volume de $1000,0\text{cm}^3$. O solo é compactado, com um determinado teor de umidade, em três camadas de mesma espessura, que são compactadas utilizando-se um soquete de 2,5 kg caindo de uma altura de 30,5 cm. São aplicados a cada camada 26 golpes deste soquete. Para que seja gerada a chamada curva de compactação, conforme ilustrado na Figura 04, é necessária a repetição deste procedimento descrito

para amostras com diferentes teores de umidade (w), gerando diferentes valores de peso específico seco (γ_d). A curva obtida está associada a energia utilizada que no caso descrito anteriormente é conhecida como energia do Proctor normal. A curva de compactação permite se obter a densidade seca máxima ($\gamma_{d\text{-máxima}}$) e o teor de umidade ótimo ($w_{\text{ótimo}}$) associado a densidade determinada. No caso de um mesmo solo, mas com o aumento da energia de compactação, a curva se desloca para a esquerda e para cima, reduzindo o teor de umidade ótimo e a densidade seca máxima. Observa-se que a curva da compactação não toca a curva de saturação, uma vez que é impossível a total expulsão do ar.

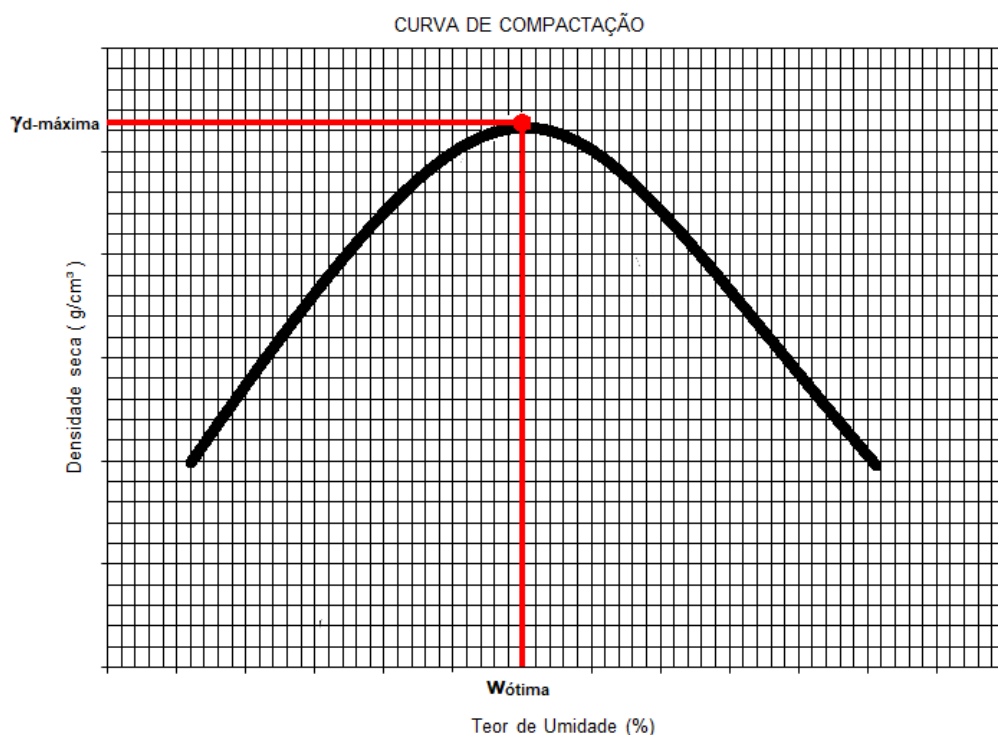


Figura 04: Curva de compactação

Em alguns casos utiliza-se outras energias de compactação denominadas: ensaio de Proctor modificado (maior energia de compactação aplicada) e ensaio de Proctor Intermediário (média energia de compactação aplicada) que apresentam as características mostradas na Tabela 02.

Energia	Volume do cilindro (cm ³)	Número de camadas	Soquete		Número de golpes por camada
			Peso (kg)	Altura de queda (cm)	
Normal	1000	3	2,50	30,5	26
Intermediária	1000	3	4,54	45,7	21
Modificada	1000	5	4,54	45,7	27

Tabela 02: Comparação das características dos ensaios de compactação (Gonçalves et al., 2014)

4.3. O Processo de Compactação no Campo

Obras que exigem a compactação de solos (e.g. barragens, estradas e aterros, dentre outras) exigem que as especificações do solo compactado atendam as características mecânicas, hidráulica e de compressibilidade para garantir o adequado funcionamento da estrutura.

Desta forma, há um controle de compactação de campo que pretende garantir que o solo compactado seja homogêneo e atenda as especificações de projeto.

Utiliza-se a curva de compactação, anteriormente descrita, como referência de densidade e teor de umidade a ser atingido no campo. Contudo, o processo de compactação não é o mesmo, já que no campo utilizam-se equipamentos pesados e com características variadas em função da empresa executora.

Os equipamentos que podem ser utilizados (brevemente descrito a seguir) devem ser calibrados para garantir uma energia semelhante a que é aplicada em laboratório. Além disto o teor de umidade durante a compactação deve estar na faixa das especificações de projeto. Se a compactação for realizada com teores de umidade muito abaixo do teor de umidade ótima, ou seja, do lado seco da curva de compactação não se atingirá a densidade desejada. Da mesma forma acontecerá se um teor de umidade muito acima do ótimo for usado. No caso do material está com um teor de umidade muito acima do teor ótimo haverá uma dificuldade maior na compactação pois o solo estará próximo a saturação. Quando isto acontece a energia da compactação é absorvida pela água e o ar não sairá impedindo o ganho de densidade.

Para a realização da compactação, as especificações devem ser fornecidas pelo projetista conforme as necessidades do projeto, como por exemplo, o grau de compactação (quociente entre o peso específico medido em campo e o peso específico seco máximo definido em laboratório) e o desvio de umidade máximo (diferença

máxima entre o valor de umidade do solo compactado em campo e a umidade ótima medida nos ensaios em laboratório).

As camadas a serem compactadas são lançadas horizontalmente com alturas entre 15 e 30 cm. Após o lançamento os equipamentos de compactação passam sobre o solo aplicando uma energia conforme o número de passadas e características do equipamento.

De forma geral existem três classes de equipamentos de compactação, quais sejam:

- a) Equipamentos de compactação estáticos: A energia é transferida por conta do peso do equipamento, o número de passadas e a forma do rolo (liso, “pé de carneiro” ou pneumático). Além disto a velocidade de passagem do equipamento também influencia no resultado obtido.
- b) Equipamentos vibratórios: são aqueles que utilizam rolos que vibram com uma determinada frequência e amplitude, transferindo energia para o solo. Este tipo de rolo compactador é em geral utilizado em solos granulares.
- c) Equipamentos de impacto: são aqueles que se utilizam da energia potencial para aplicar esforços à camada a ser compactada. Por exemplo, soquetes manuais (apenas usado em regiões pequenas ou de difícil acesso) ou que de peso de alturas elevadas.

4.3.1. Controle de compactação

Durante o processo de compactação, há a necessidade do controle do grau de compactação para avaliar se o material atingiu as especificações de projeto. Salienta-se que as especificações são baseadas no comportamento do material e o controle deve garantir que o material se comporte como previsto. Como não é viável a realização de ensaios para obtenção de parâmetros de resistência, deformabilidade e condutividade hidráulica a cada camada compactada, é necessário se utilizar procedimentos de controle de campo que indiretamente garantam a qualidade do material compactado.

Existem duas abordagens para o controle de compactação: uma que verifica o resultado da compactação (determinando a densidade seca e o desvio de umidade) e outra que estabelece um procedimento, com base no equipamento utilizado, determinando a espessura camada lançado, o número de passadas e a velocidade de compactação. Não faz parte do escopo deste trabalho detalhar os procedimentos de

controle, porém um dos aspectos mais importantes e limitadores do resultado é o teor de umidade.

O teor de umidade é definido como sendo a relação entre a massa de água do solo em relação a massa seca. Um grande fator limitador para uma determinação rápida do teor de umidade é a dificuldade de se remover a água do solo para se obter a massa seca. Na Tabela 03 estão apresentados alguns procedimentos para determinação do teor de umidade.

Método	Breve descrição	Limitação
Estufa	Após amostragem determina-se a massa úmida e a amostra é levada para estufa (a 105°) por no mínimo 8h para se determinar a massa seca.	O tempo para obtenção da massa seca impede o uso deste procedimento para controle de campo.
Queima ao álcool	Após a determinação da massa úmida o material é colocado em uma panela metálica e misturado com álcool e queimado. A queima induz a evaporação da água permitindo a determinação da massa seca.	A queima pode também induzir a perda de eventual matéria orgânica, induzindo um erro. Além disto a temperatura atingida e o tempo de queima podem não ser suficiente para eliminar a água no mesmo nível do procedimento em estufa.
O uso do "speedy"	Esse método consiste em usar um aparelho com esferas de aço e uma ampola de carbureto de sódio com fechamento hermético. A amostra de solo úmido é colocada no equipamento e este é agitado até a amostra se misturar ao composto químico. Com isso, é liberado o composto acetileno gasoso que é proporcional ao teor de umidade do solo.	

Tabela 03: Métodos de determinação de umidade de um solo.

4.3.2. Dificuldades de Compactação Associadas ao Teor de Umidade

Como visto anteriormente o teor de umidade do solo no momento da compactação possui um importante papel no resultado obtido. Quando o teor de umidade está abaixo do teor especificado em projeto a adição de água é simples e eficiente. Contudo, quando o material, na jazida ou mesmo na praça de compactação, apresenta um teor de umidade acima do especificado, diversos problemas surgem. Além da dificuldade ou mesmo impossibilidade de se efetuar a compactação tem-se problemas relacionados com custos e prazos.

Como visto no item 5.1 secar o solo não é uma tarefa fácil, mesmo em se tratando de pouca quantidade. No campo a dificuldade é ampliada pelo volume de material envolvido e por se estar sujeito às condições climáticas do local. Para tentar contornar este problema que leva a atrasos e custos adicionais a diversas obras alguns procedimentos são utilizados, como descritos a seguir.

4.3.2.1. Mistura de solos

A secagem do solo ocorre devido à mistura de solos com um menor teor de umidade até chegar ao valor adequado.

4.3.2.2. Adição de cal

A cal é produto final oriundo de rochas calcárias (calcários ou dolomitos) que passam por alguns processos físico-químicos. A obtenção da cal virgem é realizada a partir de um processo chamado de calcinação, ou seja, a rocha calcária é moída, selecionada e submetida a temperaturas de até 1000°C. A equação 01 mostra a reação que ocorre durante o processo:



No entanto, para obter-se a cal hidratada é necessário realizar um processo físico-químico a mais que é a hidratação da cal virgem. Essa reação pode ser observada na equação 02.



O método para estímulo da secagem do solo consiste na adição de grãos de cal, que dependendo da concentração e composição da argila do solo, pode gerar uma drenagem eficaz. A reação basicamente gera uma liberação da água com ligação mais frágil e um aumento da qualidade das propriedades do solo.

Além disso, outras propriedades físicas (mas que também estão relacionadas a drenagem) são alteradas em geral, como por exemplo, melhora na plasticidade, trabalhabilidade, resistência e características de tensão-deformação. No entanto, também é importante salientar que essas alterações também dependem de diversos fatores além do teor e tipo de cal inserido, como por exemplo, o tipo de solo e energia de compactação.

Quando a cal é incorporada na mistura solo-cal é possível notar um aumento no limite de plasticidade (ou seja, o teor de umidade no qual o solo atinge um estado no qual perde a capacidade de ser moldado e fica quebradiço), além de uma alteração no limite de liquidez (isto é, o teor de umidade do solo no qual ele inicia o comportamento de um líquido) dependendo do tipo de material trabalhado (Herrin e Mitchell, 1961).

Outra característica notória é que quando há a mistura da cal, há uma redução na expansibilidade além de um aumento na contração do solo-cal. Em 1964, Mateos (apud Núñez, 1991) mostrou em seus estudos que a adição de cal também proporciona uma redução no peso máximo específico, além de um teor de umidade ótima elevado. A resistência do solo também é aumentada, sendo que há uma evolução contínua deste processo com o tempo.

Para a dosagem adequada de cal na mistura com o solo, alguns métodos podem ser utilizados e são eles:

- Método do pH (Eades e Grim, 1966) propõem utilizar uma quantidade suficiente de cal para assegurar o pH de 12,4. Para tanto, amostras de solo com diferentes concentrações de cal são misturadas com água deionizada até atingir uma completa homogeneização. Após isso, o medidor de pH é colocado na solução para verificar as medidas encontradas. Quando o menor teor de cal atinge o pH de 12,4, diz-se que este é o teor necessário para estabilizar o solo, ou seja, todas as reações necessárias conseguem consumir a cal. No entanto, em alguns solos tropicais é impossível alcançar esse nível de pH, limitando o método desenvolvido em 1966.
- Método do lime fixation point (LFP) foi desenvolvido por Hilt e Davidson em 1960. O ensaio para a determinação do LFP é realizado a partir do ensaio do limite de plasticidade aumentando o teor de cal até que o LP atinja um valor máximo - teores acima fazem com que o solo ganhe resistências, no entanto, sem alterações da sua trabalhabilidade e índices de liquidez e plasticidade. A partir de então, são adicionados mais 4% no teor de cal para a estabilização.
- Método de Thompson (Thompson, 1966) diz que a dosagem de cal necessária é associada ao acréscimo de pelo menos 345kPa na resistência à compressão simples (RCS) após 28 dias de cura a 22,8°C, sendo que solos reativos e não-reativos possuem diferentes procedimentos para tanto.

- Método do ICL (initial consumption of lime) é proposto por Rogers et al., 1997 e é uma variação inspirado no método do pH. O teor mínimo de cal é quando o pH atinge um valor máximo constante.

4.3.2.3. *Evaporação*

Segundo Rodin (1964) este método de diminuição volumétrica é eficaz em alguns solos de com baixo índice de plasticidade, no entanto, necessita de um período sem chuvas - além de possui alguns fatores limitantes como as diferentes variáveis de condição do solo e evaporação, e, o tempo necessário para isso.

5. RESULTADOS

5.1. Caracterização do solo

Para o início de um melhor entendimento sobre o solo – disponível no laboratório de mecânica de solos da EPUSP - é necessária uma caracterização básica deste para que os procedimentos a seguir tenham uma orientação mais adequada.

Para tanto, iniciou-se medindo uma umidade média de 0,9% para o solo siltoso, a partir do método da secagem simples. Também pode-se medir a densidade dos grãos que é de 2,735g/cm³.

Já a mistura do solo siltoso com a cal, apresenta uma umidade média de 1,01% e a densidade dos grãos é de 2,772g/cm³.

A determinação da granulometria foi realizada a partir de ensaios de peneiramento por peneiras de diferentes aberturas a seco para se distinguir porções grossas (pedregulhos) e finas (areia grossa, média e fina). Por fim, utilizando o método da sedimentação – o qual envolve a leitura de densidade da solução solo+água ou solo+cal+água em diferentes tempos – pode-se verificar as concentrações de porções mais finas (silte e argila). Todos esses dados podem ser observados nas figuras a seguir:

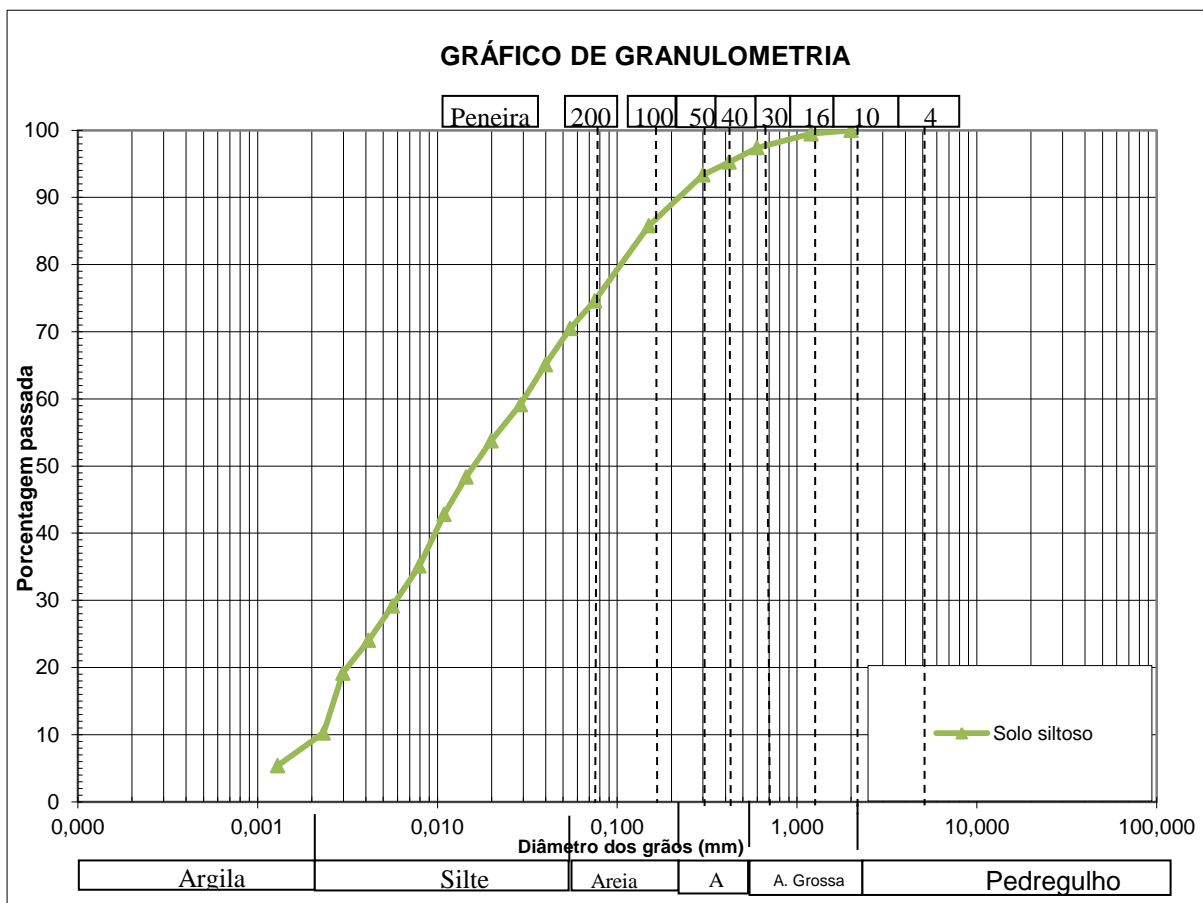


Figura 05: Curva de granulometria do solo siltoso.

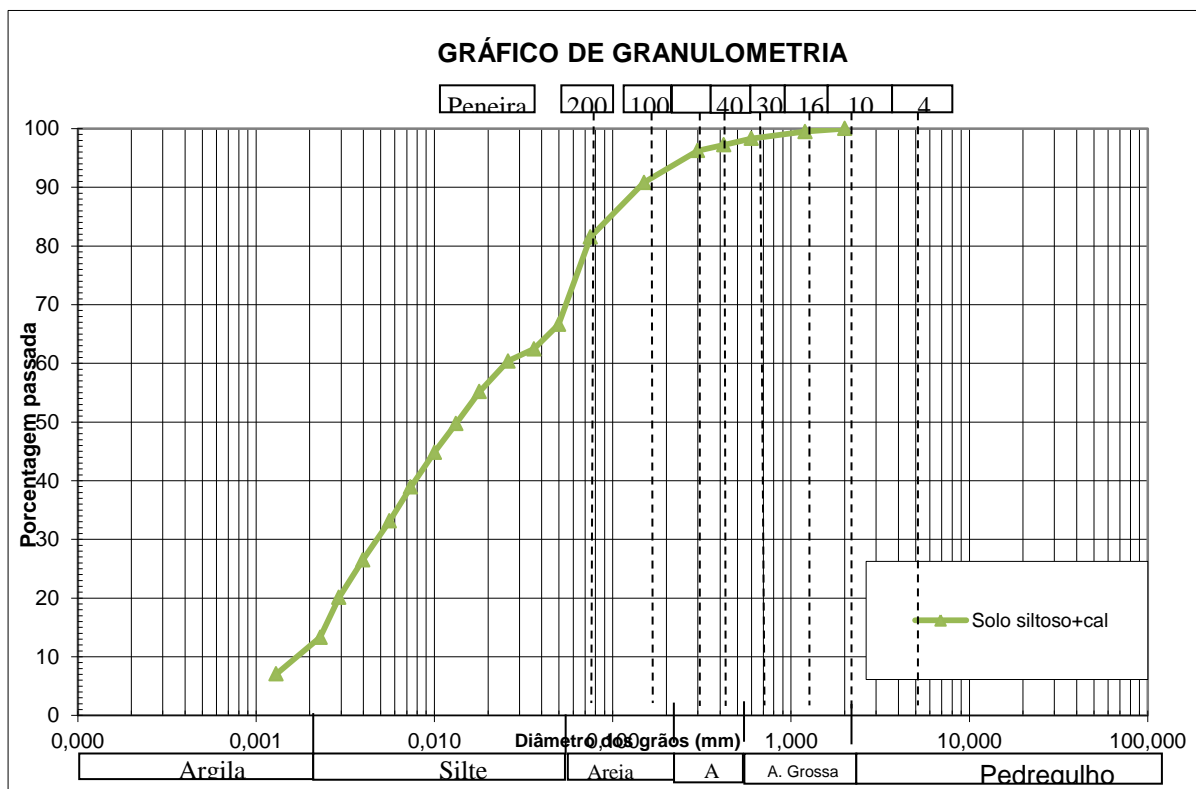


Figura 06: Curva de granulometria do solo siltoso mais a cal.

Por fim, o limite de liquidez foi definido a partir do uso do aparelho de Casagrande com um teor de umidade de 47% (solo siltoso) e 45,4% (solo siltoso misturado com a cal). O limite de plasticidade não foi possível ser medido quando só utilizado o solo siltoso, pois com uma quantidade pequena de argila não foi possível chegar ao objetivo do método.

O ensaio de compactação foi realizado como descrito por Proctor (1933). Para tanto, foi necessário 3,0kg do solo estudado. A partir de alguns cálculos da umidade do solo, foi acrescentado 500,0 ml de água misturados homogeneamente no material. Após isso, foram montadas 03 camadas de solo no molde, sendo que cada camada foi compactada com 26 golpes da pá de Proctor. Após isso, o corpo de prova é pesado e uma amostra é retirada do centro deste para que seja medido o teor de umidade.

Esse processo foi repetido até que fosse conseguido um gráfico com cinco pontos distintos, ou seja, um próximo do vértice (onde encontra-se a umidade ótima e a densidade máxima seca), dois à esquerda e dois à direita do vértice.

Após o tratamento dos dados adquiridos foi possível atribuir a umidade ótima em 23,1% e a densidade máxima seca em 1,594 g/cm³ para o solo siltoso. A seguir, pode-se observar a curva de compactação estabelecida pelo experimento com 5 pontos.

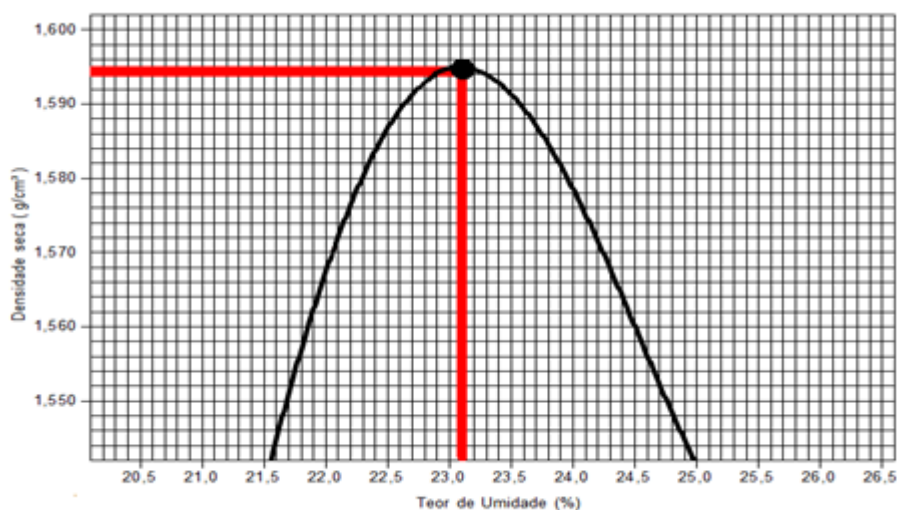


Figura 07: Curva de compactação do solo siltoso, dando destaque a densidade seca e teor de umidade ótima.

Já o solo siltoso com a cal apresentou a curva de compactação um pouco diferente, na qual a umidade ótima é de 23,4% e a densidade máxima seca de 1,576g/cm³ (figura 08).

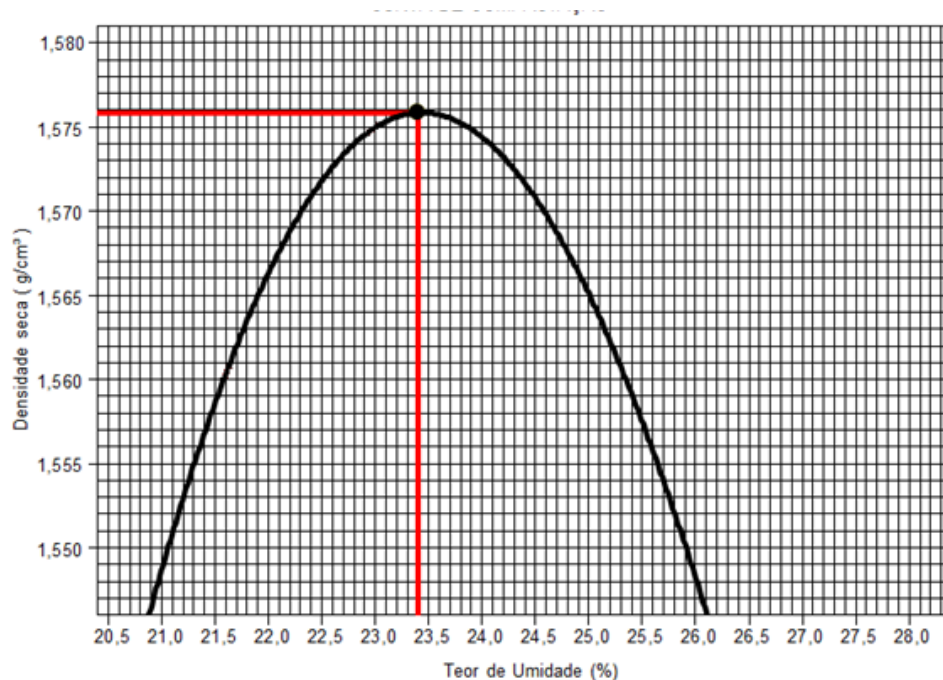


Figura 08: Curva de compactação do solo siltoso+cal, dando destaque a densidade seca e teor de umidade ótima.

No laboratório de resíduos e áreas contaminadas (LRAC) do IPT (instituto de pesquisas tecnológicas) foi determinada através do equipamento phmetro DM-22 o pH das diferentes concentrações de cal no solo siltoso (corrigidas para 25°C), para que os próximos testes sejam adequados conforme estudos de Eades e Grim, 1966. A cal utilizada é a hidratada com pH de 12,746.



Figura 09: Phmetro DM-22 utilizado para medições das soluções de água deionizada+solo+cal.

A seguir são apresentados os resultados obtidos em forma de gráfico:

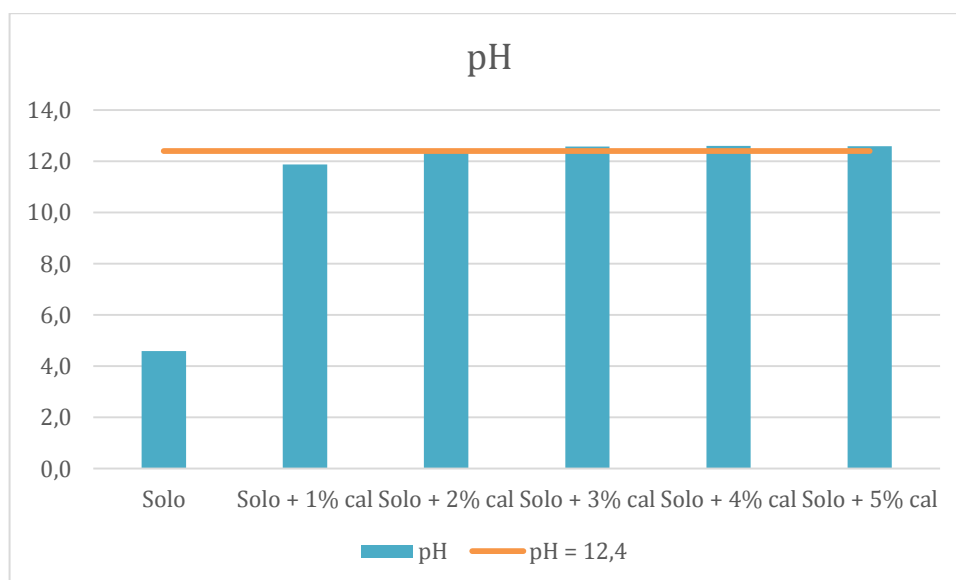


Figura 10: Resultado das medições de pH e a meta exigida pelo artigo de Eades e Grim, 1966

Pode-se observar que a concentração de cal mais próxima do produto desejado é a de 2%, de acordo com Eades e Grim, 1966.

5.2. Modelo Físico

5.2.1. Preparação das amostras

As amostras foram preparadas em algumas caixas de madeira com o volume de aproximadamente 15823,0cm³, nas quais a profundidade de 30,0cm seja o principal foco.

O material a ser utilizado, quer seja o solo siltoso ou o solo siltoso misturado com 2% de cal hidratada, foi misturado com água até ou próximo a umidade ótima e no momento da colocação do solo nas caixas, este foi compactado com soquetes manuais até a densidade máxima seca. Essas foram as caixas montadas 01 e 04, solo siltoso e solo siltoso+cal, respectivamente.

Já as caixas 02 e 03 (siltoso e siltoso+cal, respectivamente), são preparadas a partir da adição de água até uma umidade calculada acima da umidade ótima. Quando os materiais são colocados nas caixas, não há compactação, mas sim, só lançados.

A seguir há uma tabela nas quais são mostradas as umidades, densidades e pH das amostras com cal atingidas no momento iniciais nas caixas.

Número da caixa	Umidade inicial (%)	Densidade (g/cm ³)	pH
Caixa 01	22,9	1,594	-
Caixa 02	25,1	1,139	-
Caixa 03	26,0	1,003	12,4
Caixa 04	22,4	1,576	12,4

Tabela 04: Apresentação dos teores de umidade utilizados, Ph medidos nas amostras com cal e densidades utilizadas.

5.2.2. Caixa 01

A caixa 01 é definida para realizar o modelo físico de uma secagem do solo siltoso compactado na sua densidade máxima seca e a umidade ótima. Devido à dificuldade de penetração do coletor de amostra, apenas duas profundidades foram observadas: 0,0cm e 10,0cm.

Esta primeira caixa foi acompanhada durante 45 dias (entre 21/08 até 05/10) com uma oscilação de temperatura linear e pouco acentuada entre 20,°C e 23,5°C. A variação de umidade do ar é mostrada no gráfico a seguir. A linha verde relaciona o processo de secagem medida com amostras de até 4,0 cm de espessura, ou seja, entre as profundidades de 0,0 e 4,0cm. A linha vermelha é associada a profundidade de 10,0cm com amostras de até 4,0cm, ou seja, a profundidades entre 10,0 e 14,0 cm.

Ambas as linhas de tendência (linhas pontilhadas) das diferentes profundidades apresentam um mesmo coeficiente angular, ou seja, no geral, apresenta uma mesma variação de secagem.

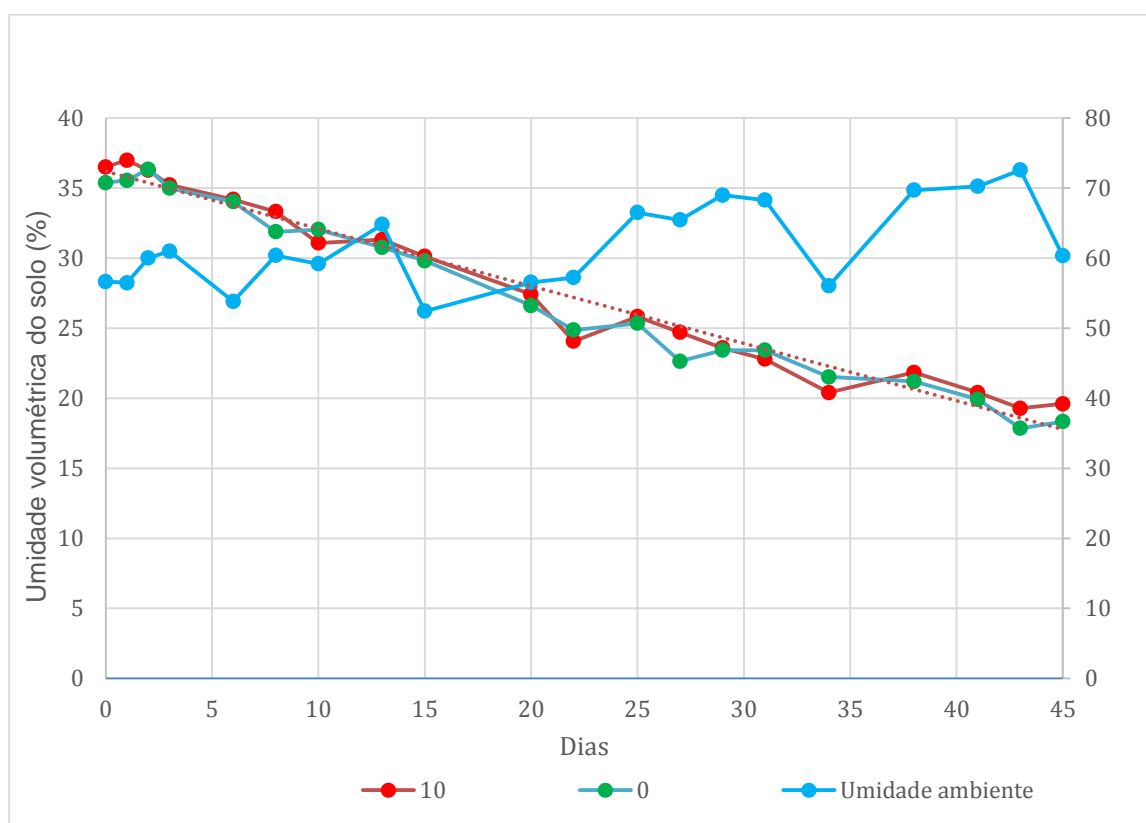


Figura 11: Apresentação da secagem da caixa 01 nas profundidades de 0,0cm (linha verde) e 10,0cm (linha vermelha). A umidade do ar também é representada pela linha azul.

5.2.3. Caixa 02

A caixa 02 é definida para realizar o modelo físico de uma secagem do solo siltoso apenas lançado com uma densidade bem inferior à densidade máxima seca e com uma umidade acima da ótima. As profundidades nas quais o processo de secagem foi acompanhado são: 0,0cm, 10,0cm e 20,0cm.

Esta caixa também foi acompanhada por, aproximadamente, 45 dias (entre 20/08 até 03/10) com uma oscilação de temperatura linear e pouco acentuada entre 20,°C e

23,5°C. A variação de umidade do ar é mostrada no gráfico a seguir. A linha verde relaciona o processo de secagem medida com amostras de até 4,0 cm de espessura, ou seja, entre as profundidades de 0,0 e 4,0cm. A linha vermelha é associada a profundidade de 10,0cm com amostras de até 4,0cm, ou seja, a profundidades entre 10,0 e 14,0 cm. A linha rosa é associada a profundidade de 20,0cm com amostras de até 24,0cm, ou seja, a profundidades entre 20,0 e 24,0 cm.

As linhas de tendência das duas profundidades mais rasas possuem um coeficiente angular muito próxima e ambas prosseguem com uma variação, inclusive chegando a se sobrepor. Já a linha que representa a profundidade de 20,0cm apresenta uma velocidade de secagem um pouco inferior às outras.

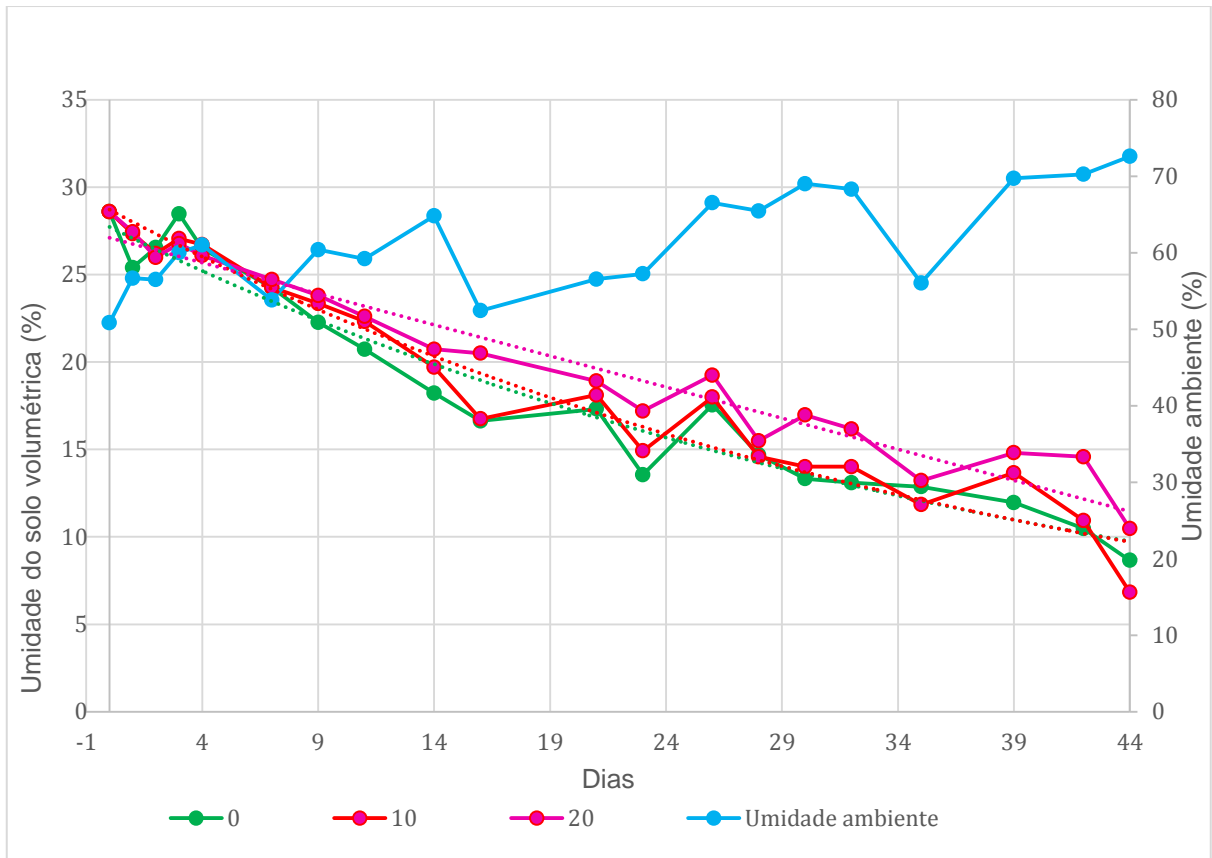


Figura 12: Apresentação da secagem da caixa 02 nas profundidades de 0,0cm (linha verde), 10,0cm (linha vermelha), 20,0cm (linha rosa). A umidade do ar também é representada pela linha azul.

5.2.4. Caixa 03

A caixa 03 é definida para realizar o modelo físico de uma secagem do solo siltoso misturado com 2% de cal apenas lançado com uma densidade bem inferior à densidade máxima seca e com uma umidade acima da ótima. As profundidades nas quais os processos de secagem foram acompanhados são: 0,0cm, 10,0cm e 20,0cm. Esta caixa foi acompanhada por 15 dias (entre 04/10 até 19/10) com uma oscilação de temperatura linear e pouco acentuada entre 22°C e 23,5°C. A variação de umidade do ar é mostrada no gráfico a seguir. A linha verde relaciona o processo de secagem medida com amostras de até 4,0 cm de espessura, ou seja, entre as profundidades de 0,0 e 4,0cm. A linha vermelha é associada a profundidade de 10,0cm com amostras de até 4,0cm, ou seja, a profundidades entre 10,0 e 14,0 cm.

A linha rosa é associada a profundidade de 20,0cm com amostras de até 24,0cm, ou seja, a profundidades entre 20,0 e 24,0 cm.

As linhas de tendência possuem coeficientes diferentes, sendo que a que apresenta maior é a de menor profundidade. Enquanto as de maiores profundidades apresentam um coeficiente parecido.

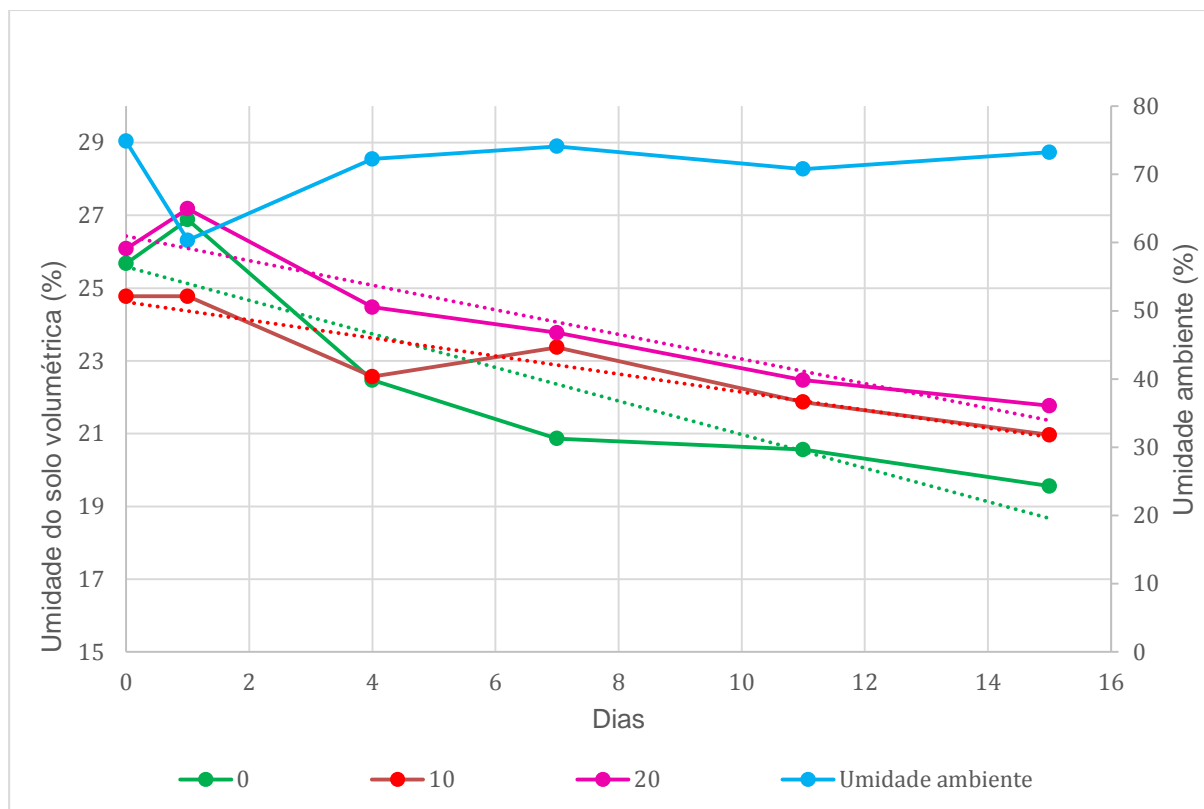


Figura 13: Apresentação da secagem da caixa 03 nas profundidades de 0,0cm (linha verde), 10,0cm (linha vermelha) e 20,0 (linha rosa). A umidade do ar também é representada pela linha azul.

5.2.5. Caixa 04

A caixa 03 é definida para realizar o modelo físico de uma secagem do solo siltoso misturado com 2% de cal compactado a densidade máxima seca e com a umidade ótima. As profundidades nas quais os processos de secagem foram acompanhados são: 0,0cm e 10,0cm.

Esta caixa também foi acompanhada por 15 dias (entre 04/10 até 19/10) com uma oscilação de temperatura linear e pouco acentuada entre 22°C e 23,5°C. A variação de umidade do ar é mostrada no gráfico a seguir. A linha verde relaciona o processo de secagem medida com amostras de até 4,0 cm de espessura, ou seja, entre as profundidades de 0,0 e 4,0cm. A linha vermelha é associada a profundidade de 10,0cm com amostras de até 4,0cm, ou seja, a profundidades entre 10,0 e 14,0 cm.

As linhas de tendência possuem coeficientes muito parecidos, com uma maior inclinação reconhecida na camada mais superficial.

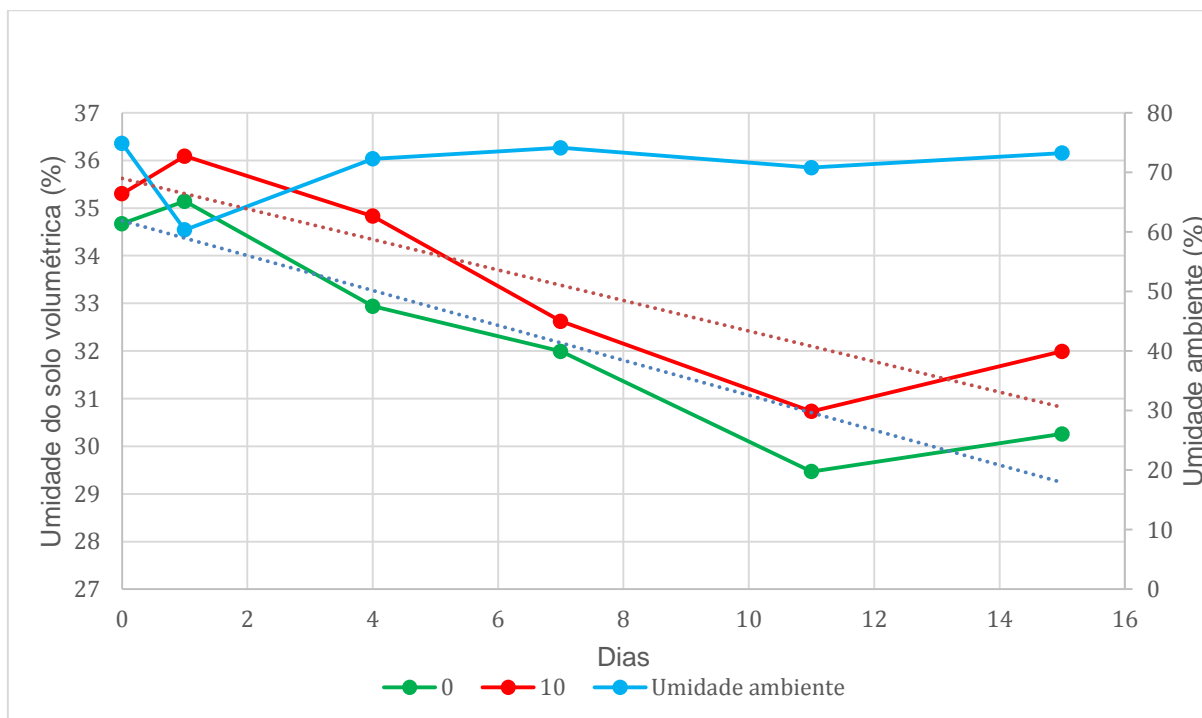


Figura 14: Apresentação da secagem da caixa 04 nas profundidades de 0,0cm (linha verde) e 10,0cm (linha vermelha). A umidade do ar também é representada pela linha roxa.

Com isso, pode-se compilar em uma tabela os diferentes coeficientes lineares e as médias de velocidades de secagem para uma melhor visualização. A seguir esses parâmetros podem ser observados:

	MODELO FÍSICO									
	SEM CAL					COM CAL				
	CAIXA 01 - lançado		CAIXA 02 - compactado			CAIXA 04 - lançado		CAIXA 03 - compactado		
Profundidade	0	10	0	10	20	0	10	0	10	20
Velocidade média de secagem (%/dia)	0,4	0,4	0,42	0,43	0,34	0,35	0,33	0,47	0,23	0,3
Coeficiente angular	-0,40	-0,40	-0,42	-0,43	-0,34	-0,35	-0,33	-0,47	-0,23	-0,30

Tabela 05: velocidades médias de secagem e coeficientes lineares das linhas de tendência dos gráficos obtidos com a modelagem física.

5.1. Análise Numérica

Para avaliar e permitir prever o comportamento de camadas de solo, compactadas e lançadas, com e sem adição de cal, serão feitas análises numéricas que simulam o comportamento da água quando submetida a um processo de evaporação sob condições unidimensionais. O estudo foi realizado utilizando-se o software de domínio público denominado Hydrus 1D.

5.1.1. Parâmetros adotados

Conforme descrito anteriormente são necessários os seguintes parâmetros para efetuar a análise numérica: a condutividade hidráulica saturada e a curva de retenção de água.

5.1.1.1. Condutividade hidráulica saturada

Para o início da medição da condutividade hidráulica, o material foi colocado na umidade ótima e na densidade máxima seca dentro de um molde. A partir disso, o corpo de prova foi colocado a um adensamento de 5kPa até que fosse estabilizado, para início do teste de condutividade hidráulica.

Para cada carga, foi realizado três vezes o teste de condutividade hidráulica que consistiu em uma bureta com 50,0ml de água ligada por um tubo ao corpo de prova. Conforme o esforço da carga hidráulica vertical ia agindo, a água ia passando pelo corpo de prova (adensado com as cargas já mencionadas). As leituras da quantidade de água passada eram feitas com intervalo de 05 minutos e eram realizadas a partir da verificação do nível d'água na escala marcada da bureta (figura 14).



Figura 14: Apresentação da montagem do equipamento para medição de condutividade hidráulica. O corpo de prova está posicionado na parte inferior e a bureta colocada acima conectados por tubos.

O método para medição da condutibilidade hidráulica mostrou uma pequena falha, de que quando era medido a exposição de uma pressão de 5,0 kPa, o resultado era menor do que as pressões de 10,0, 20,0 e 30,0 kPa, o que não era esperado. Mas o que pode-se concluir é que a esta pressão, o que ocorre é que o material não consegue ficar contida no molde e acaba escapando como é mostrado na foto abaixo. No entanto, quando as pressões de adensamento aumentam, a curva de condutibilidade ocorre segundo o esperado, quanto maior a pressão de adensamento, menos a condutibilidade hidráulica.



Figura 15: Problema ocorrido durante o teste de condutibilidade hidráulica mesmo diminuindo a carga hidráulica pela metade.

A partir da análise e cálculos obtidos a partir da equação 01, foi possível definir os valores de condutividade hidráulica. Na tabela 06 pode-se observar os resultados do solo siltoso sem a mistura da cal. As condutividades foram medidas com o corpo de prova compactado expostos às pressões de 5,0 e 10,0 kPa e o corpo de prova com o solo apenas lançado, as condutividades hidráulicas foi medida com o corpo de prova submetido às pressões de 5,0, 10,0, 20,0 e 30,0 kPa.

Carga vertical (kPa)	Condutividade hidráulica solo siltoso compactado (cm/s)	Condutividade hidráulica solo siltoso lançado (cm/s)
5,0	$2,33 \times 10^{-5}$	$1,24 \times 10^{-3}$
10,0	$3,21 \times 10^{-5}$	$1,34 \times 10^{-3}$
20,0	-	$1,29 \times 10^{-3}$
30,0	-	$1,23 \times 10^{-3}$

Tabela 06: Resultados do experimento para determinação da condutividade hidráulica do solo siltoso.

Já a tabela 07 mostra os resultados obtidos nos experimentos com o solo siltoso misturado à cal. O corpo compactado foi submetido à apenas o adensamento de 5,0 kPa, enquanto o corpo de prova apenas lançado foi submetido às pressões de 5,0, 10,0, 20,0 e 30,0 kPa.

Carga vertical (kPa)	Condutividade hidráulica solo siltoso+cal compactado (cm/s)	Condutividade hidráulica solo siltoso+cal lançado (cm/s)
5,0	$2,58 \times 10^{-5}$	$1,41 \times 10^{-3}$
10,0	-	$1,46 \times 10^{-3}$
20,0	-	$1,46 \times 10^{-3}$
30,0	-	$1,31 \times 10^{-3}$

Tabela 07: Resultados do experimento para determinação da condutividade hidráulica do solo siltoso com a cal.

E para finalizar, a seguir é colocada a tabela que define os valores de condutividade hidráulica para que os seguintes processos adotem os seguintes valores para prosseguimento de análises e outros processos. Os valores adotados foram àqueles referentes à pressão de 5,0 kPa.

Condição	K_{sat} (cm/s)	Observação
Solo lançado	$1,24 \times 10^{-3}$	Determinado em ensaio de carga variável
Solo compactado	$2,33 \times 10^{-5}$	Determinado em ensaio de carga variável
Solo com cal lançado	$1,41 \times 10^{-3}$	Determinado em ensaio de carga variável
Solo com cal compactado	$2,58 \times 10^{-5}$	Determinado em ensaio de carga variável

Tabela 08 – Valores de condutividade hidráulica saturada adotados para análises do estudo.

5.1.1.2. Curva de sucção

Como já descrito, a curva de sucção se mostra importante para o reconhecimento de aspectos do solo como umidade residual, umidade de saturação, α e n importantes para caracterização do solo e modelagem do condutibilidade hidráulica intrínseco a ele e condições expostas. A seguir é apresentado o início da curva produzido para este estudo. A intenção é de atingir os parâmetros de pressão de sucção até o valor de 500,0 kPa.

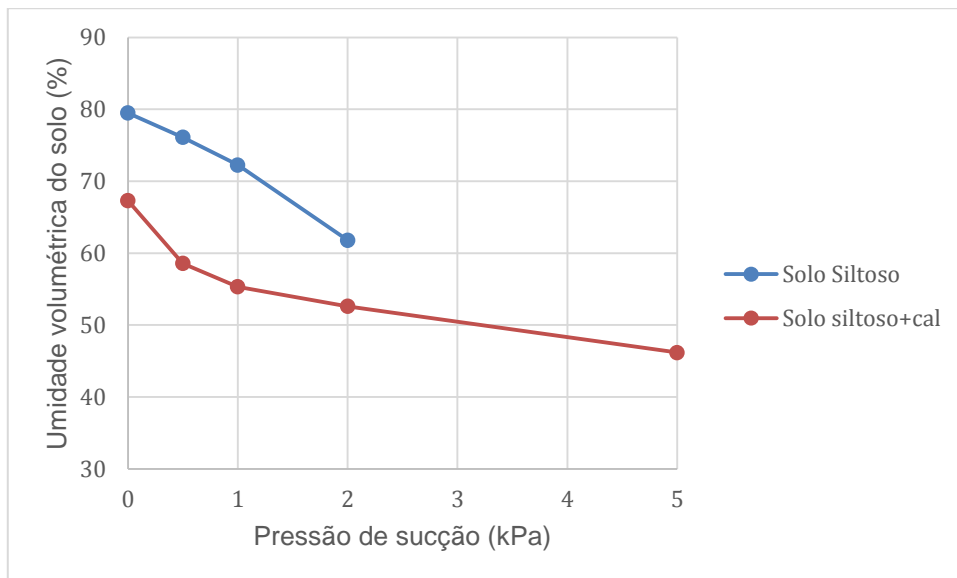


Figura 16: Curva de sucção.

5.1.2. Condições de contorno adotadas

As condições de contorno adotadas para os modelos numéricos para as caixas foram:

CONDIÇÕES METEREOLÓGICAS		
NÚMERO DAS CAIXAS	CAIXAS 01 E 02	CAIXAS 03 E 04
Exposição ao sol:	Nublado	Nublado
Temperatura mínima (°C):	20.5	22
Temperatura máxima (°C):	23.5	23.5
Umidade do ar relativa (%):	65	72
Velocidade do vento (cm/h):	0	0
Altitude:	780	780
Latitude:	-23.5	-23.5

Tabela 09: Condições meteorológicas utilizadas para modelagem das curvas de secagem.

CARACTERÍSTICAS DO SOLO				
NÚMERO DAS CAIXAS	CAIXA 01	CAIXA 02	CAIXA 03	CAIXA 04
Umidade residual	0	0,01	0,1	0,2
Umidade de saturação	0,41	0,43	0,3	0,4
α	0,003	0,036	0,003	0,002
n	1,19	1,56	1,2	1,45
Permeabilidade hidráulica (K) (cm/dia)	10	125	1,3	0,15

Tabela 10: Características do solo utilizadas para modelagem das curvas de secagem.

CONDIÇÕES DO MODELO				
NÚMERO DAS CAIXAS	CAIXA 01	CAIXA 02	CAIXA 03	CAIXA 04
Material do transporte	Água	Água	Água	Água
Profundidades observadas (cm)	4,0 e 14,0	4,0, 14,0 e 24,0	4,0, 14,0 e 24,0	4,0 e 14,0
Tempo (dias)	45	45	15	15
Modelo hidráulico	van Genuchten - Mualem	van Genuchten - Mualem	van Genuchten - Mualem	van Genuchten - Mualem
Profundidade total do perfil (cm)	30	30	30	30
Condições do topo do perfil	Condições atmosféricas	Condições atmosféricas	Condições atmosféricas	Condições atmosféricas
Condições da base do perfil	Drenagem livre	Drenagem livre	Drenagem livre	Drenagem livre

Tabela 11: Condições de modelo utilizadas para modelagem das curvas de secagem.

As condições do modelo e meteorológicas foram definidas a partir das condições expostas ao modelo físico. O modelo hidráulico van Genuchten-Mualem é definido em van Genuchten, 1980. As condições de solo foram determinadas a partir do método de tentativa e erro para adequar às curvas atingidas no modelo físico. As condutividades hidráulicas utilizadas foram escolhidas mais próxima com a realidade medida nos testes de condutibilidade hidráulica a 5 kPa de pressão. As mais próximas foram as caixas 01 e 02. Nas caixas 03 e 04 foram utilizados parâmetros K maiores do que os calculados no experimento.

CARACTERÍSTICAS DO SOLO		
NÚMERO DAS CAIXAS	CAIXA 03	CAIXA 04
Permeabilidade hidráulica calculada (K) (cm/dia)	122	2,23
Permeabilidade hidráulica obtida por retroanálise (K) (cm/dia)	1,3	0,15

Tabela 12: Comparação entre os valores de permeabilidade hidráulica calculada a partir do experimento e a permeabilidade hidráulica obtida a partir da retroanálise. Há uma diferença na dimensão dos valores.

As curvas de retenção de água estabelecidas pelas condições de contorno adotadas são:

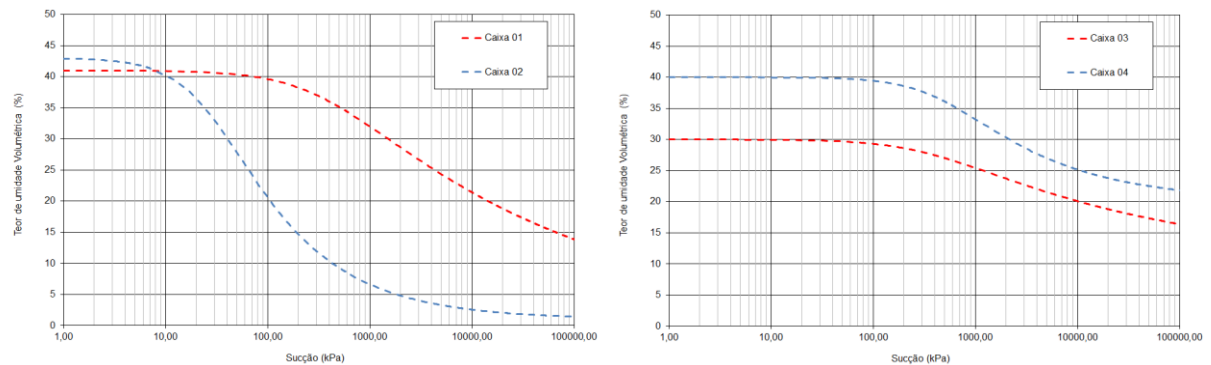


Figura 17: Apresentação das curvas de retenção de água da caixa 01 (solo siltoso compactado – linha vermelha) e caixa 02 (solo siltoso lançado – linha azul) à esquerda. As curvas de retenção de água da caixa 03 (solo siltoso+cal lançado – linha vermelha) e caixa 04 (solo siltoso+cal compactado – linha azul) aparecem na direita.

Com essa figura, pode-se observar que as curvas nas quais os materiais estão apenas lançados apresentam valores menores de α quando comparados com os respectivos materiais compactados.

5.1.3. Resultados da análise numérica

A seguir serão apresentadas as modelagens desenvolvidas a partir dos parâmetros já descritos para que curvas semelhantes estabelecidas no experimento físico fossem atingidas.

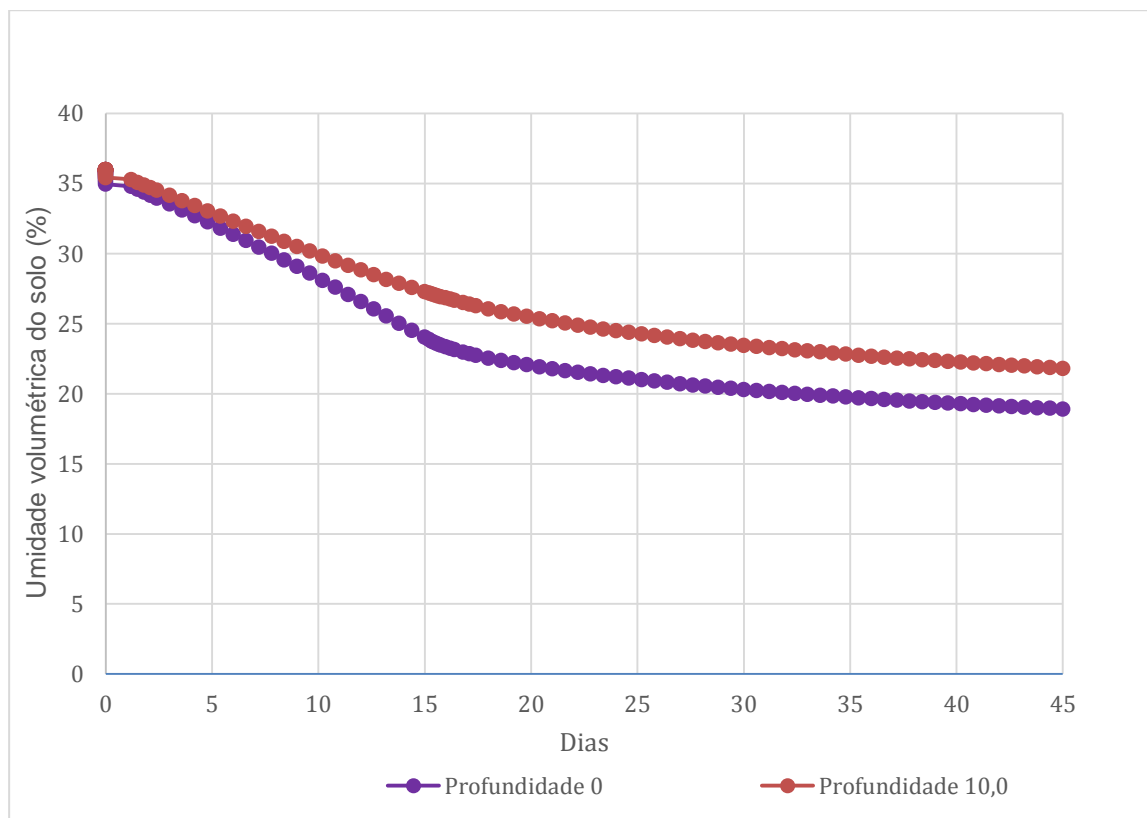


Figura 18: Modelo numérico estabelecido para a caixa 01.

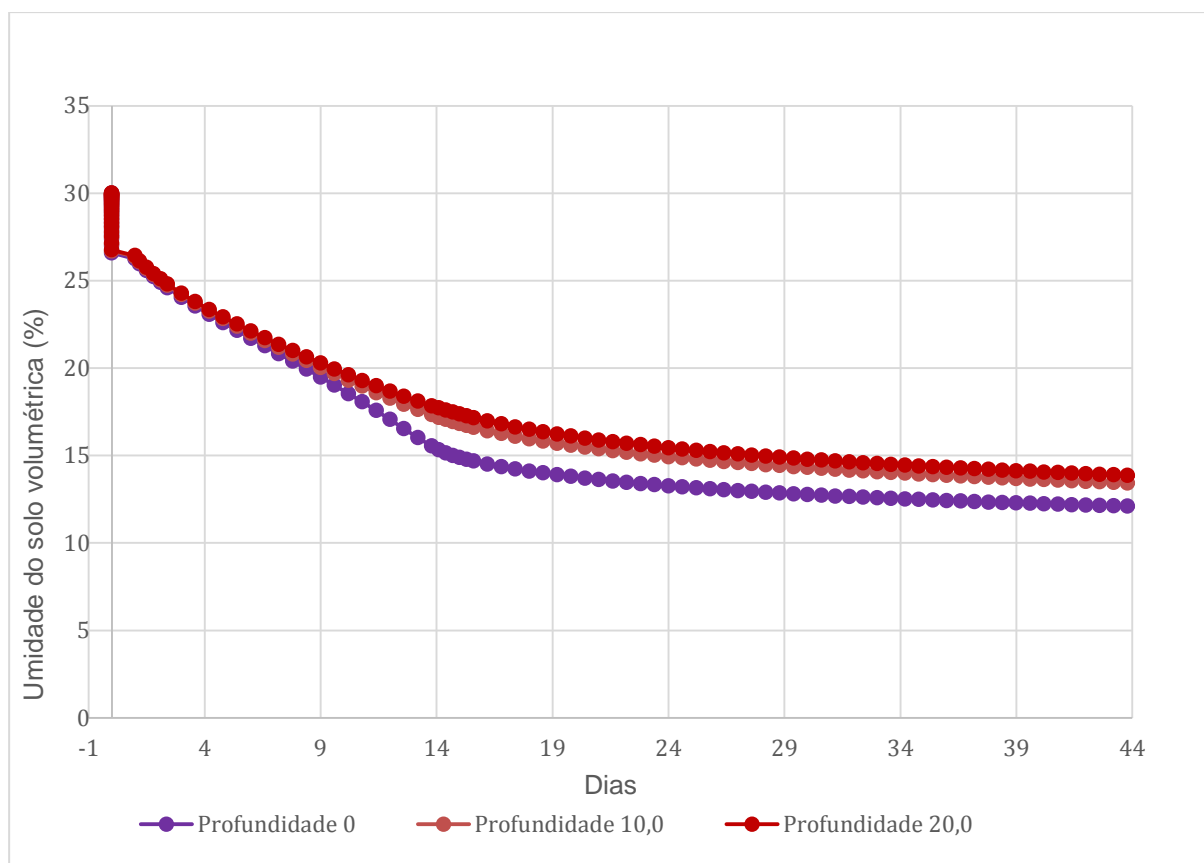


Figura 19: Modelo numérico estabelecido para a caixa 02.

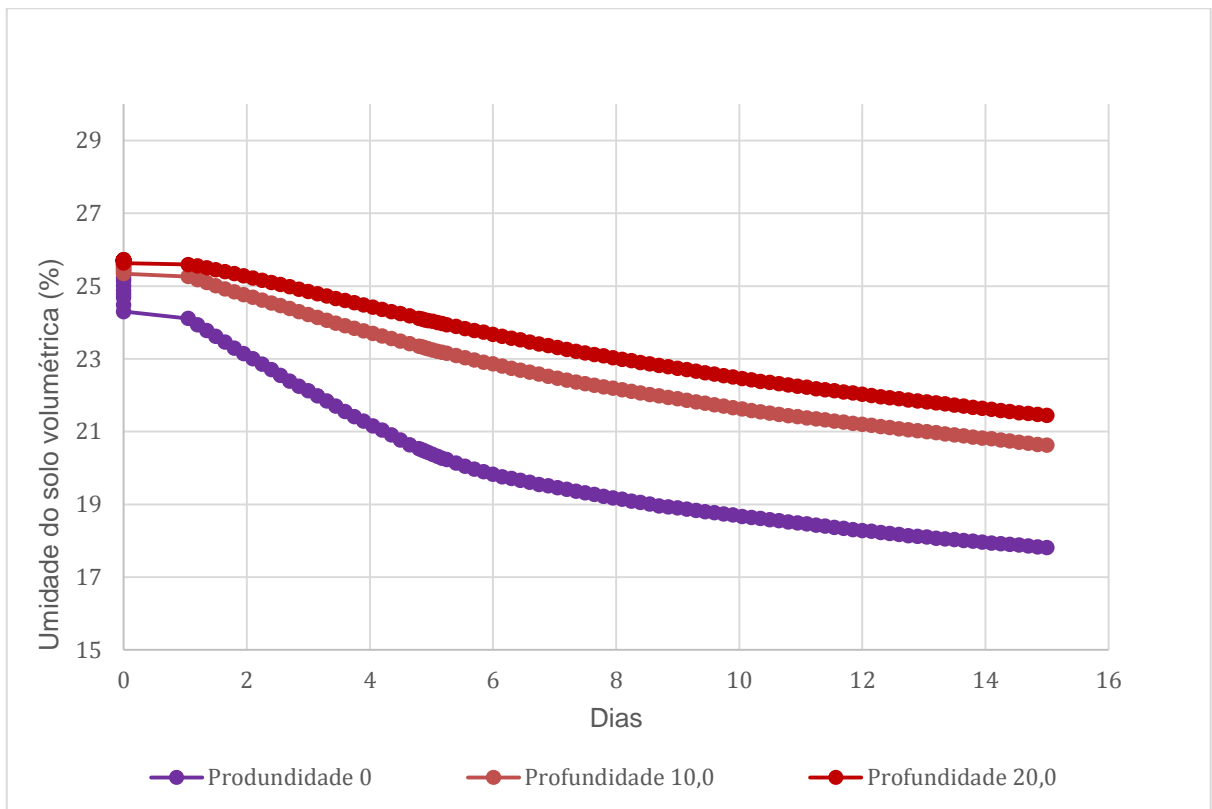


Figura 20: Modelo numérico estabelecido para a caixa 03.

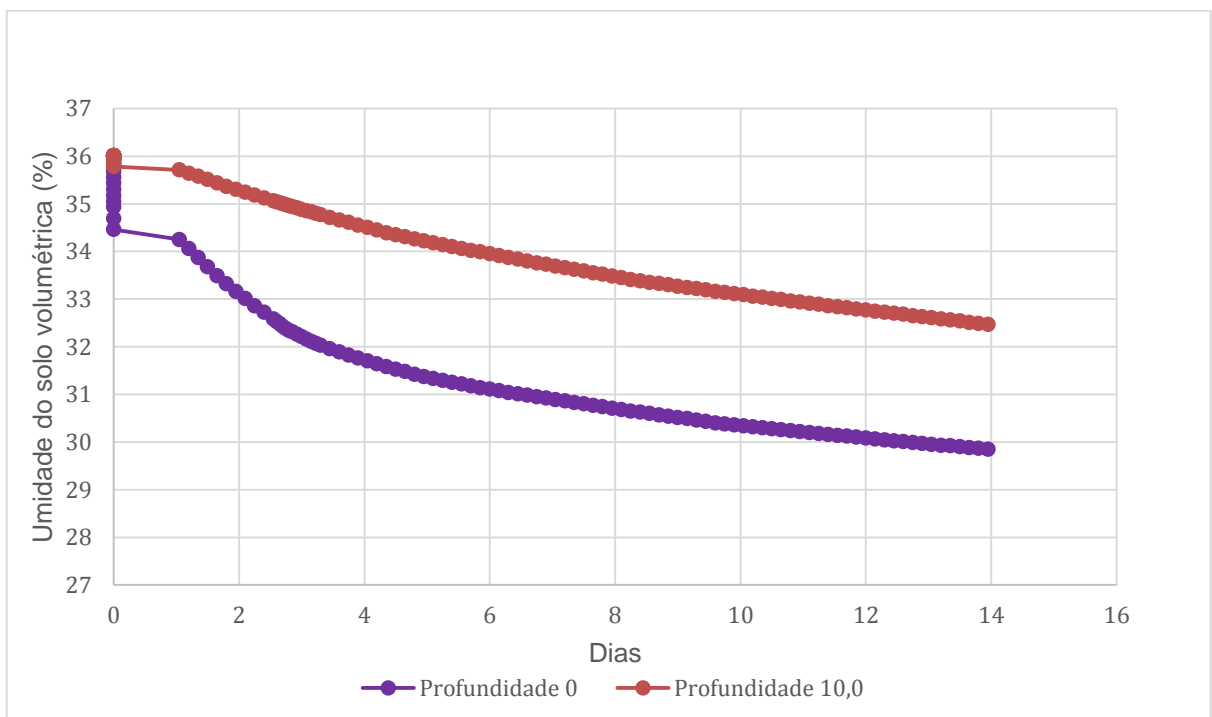


Figura 20: Modelo numérico estabelecido para a caixa 04.

Portanto, com esses modelos numéricos, podemos também definir um coeficiente angular das retas de tendência, além de uma velocidade média de secagem, e são elas:

	MODELO NUMÉRICO									
	SEM CAL					COM CAL				
	CAIXA 01 - lançado		CAIXA 02 - compactado			CAIXA 04 - lançado		CAIXA 03 - compactado		
Profundidade	0	10	0	10	20	0	10	0	10	20
Velocidade média de secagem (%/dia)	0,31	0,25	0,28	0,27	0,27	0,43	0,28	0,43	0,35	0,3
Coeficiente angular	-0,31	-0,25	-0,28	-0,27	-0,27	-0,43	-0,28	-0,43	-0,35	-0,30

Tabela 13: velocidades médias de secagem e coeficientes lineares das linhas de tendência dos gráficos obtidos com a modelagem numérica.

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O método escolhido para a quantidade necessária de cal hidratada para ser misturada no solo foi a de Eades e Grim (1966). Com isso, a umidade hidros cópica do material permaneceu a mesma, mas a densidade dos grãos aumentou 0,037g/cm³ quando a cal foi adicionada. Além disso, pelo gráfico de granulometria, pode-se observar que a porcentagem de argila do silte+cal aumentou 3% em relação ao gráfico de granulometria do gráfico do solo siltoso. As proporções das outras frações de partículas continuaram com a mesma proporção. Ambos os parâmetros se devem ao acréscimo da cal hidratada no tamanho de argila.

O limite de liquidez, ou seja, aquele teor de umidade a qual acima dele o material fica com caráter líquido diminuiu com a adição de cal. No entanto, isso é muito mais relevante pela adição de um material na fração argila do que o tipo de material usado.

Os ensaios de compactação apresentaram uma variação entre as umidades ótimas de acréscimo de 0,3% e diminuição de 0,018g/cm³ quando se acrescenta a cal hidratada. Essa baixa alteração mostra que a cal possui uma maior atuação quando os solos a qual é inserida possui uma proporção argiloso maior do que o solo utilizado neste estudo. Essa pequena diferença pode ter ocorrido devido a dois problemas: o primeiro foi que a cal usada era hidratada, o que diminui a intensidade das reações entre o material e a água presente no solo siltoso; e a proporção de argila no solo era muito baixa, o que faz com que a reação também seja baixa. Esse segundo fator ocorre, pois, a cal atua na água presente na superfície de contato dos grãos (Thomas, 1995) e com menos argila, há uma menor quantidade de superfície de contato para reação.

Além disso, pode-se observar que com a adição da cal, a condutibilidade hidráulica também fica prejudicada. Isso ocorre, pois, a presença maior da fração argila faz com que os poros e seus canais interporos fiquem em menor quantidade e menores.

Na caixa 01, o comportamento das duas curvas de secagem (ou seja, a 0,0 e 10,0cm de profundidade) se comportaram de maneira bem parecida, ou seja, saíram da umidade ótima até cerca de 18,5% de umidade volumétrica num mesmo período de tempo. Isso pode ter ocorrido pois cada vez que uma amostra era coletada, o buraco ficava aberto, fazendo com que as paredes dele interagissem com as condições atmosféricas da mesma forma que a superfície. Isso ocorreu com todas as caixas.

Além disso, nessa caixa pode ser observado que a modelagem superestima uma secagem até o dia 20, em relação ao modelo físico, e após isso ela começa a criar um patamar. Também é importante notar, que diferente do modelo físico, as curvas de

diferentes profundidades apenas começam com uma mesma inclinação – que é contínua apenas até o dia 5, aproximadamente – após isso, elas se afastam com uma diferença de até 3% de umidade no final da modelagem.

A caixa 04 que possui as mesmas condições geométricas que a caixa 01 de acordo com as suas características, também apresenta uma tendência de uma mesma inclinação, no entanto, desde o começo há uma diferença de 1% de umidade e no final essa diferença alcança os seus 2%. Ou seja, nessa segunda caixa a influência que a superfície apresenta na camada mais abaixo (10,0cm) apresenta-se sutilmente inferior. Também, pode-se perceber que o fluxo na camada mais inferior, também é menor do que a superior.

A modelagem nesse caso, também apresenta diferença que se inicia com 1% e finaliza com pouco mais de 2 %, além de uma inclinação parecida entre suas curvas - mas ambos os coeficientes angulares possuem uma inclinação inferior ao modelo físico, indicando uma subestimação na modelagem. Essa subestimação pode ser explicada pela necessidade de uso de uma condutividade hidráulica menos na modelagem em relação ao real. No entanto, esse erro é diminuído com tempo.

A caixa 02 apresentou um modelamento experimental no qual as duas profundidades mais acima (0,0 e 10,0cm) apresentaram um comportamento muito parecido, ambas sendo influenciadas da mesma forma pelas condições atmosféricas (mesmo coeficiente angular e mesmos valores de umidade volumétrica). A profundidade de 20,0, a mais inferior é a que apresenta uma diferença maior em relação as outras curvas, ou seja, sua velocidade de secagem e fluxo hidráulico são menores. É importante salientar, que as condições climáticas influenciam todas as camadas, e pode ser percebido em momentos de maior queda na umidade, por exemplo, é percebido em todas as camadas estudadas.

A modelagem realizada mostra que os comportamentos de todas as camadas são parecidos, no entanto, as camadas inferiores (10,0 e 20,0cm) parecem se interagir bem mais do que no modelo físico. Enquanto a camada mais superficial apresenta uma velocidade de secagem superior. É importante salientar que essa modelagem é muito mais parecida com o modelo real em comparação com o solo compactado.

Por fim, a caixa 03 apresentou uma modelagem apresentou um comportamento ideal dentro do esperado. As camadas mais inferiores apresentam uma melhor interação, pois as velocidades de secagem apresentam-se idênticas e diferenças entre as umidades das amostras são constante, sobretudo a partir do dia 04. Enquanto isso a cama mais superficial apresenta uma velocidade maior, devido ao maior contato com as condições atmosféricas.

A modelagem desta caixa apresenta um comportamento semelhante ao descrito no modelo físico. No entanto, há uma subestimação da secagem da camada superior, e isso pode ser explicado, pois no modelo houve a necessidade de utilizar uma permeabilidade inferior ao resultado empírico.

	MODELO FÍSICO									
	SEM CAL					COM CAL				
	CAIXA 01 - Compactado		CAIXA 02 – lançado			CAIXA 04 - Compactado		CAIXA 03 – lançado		
Profundidade	0	10	0	10	20	0	10	0	10	20
Velocidade média de secagem (%/dia)	0,4	0,4	0,42	0,43	0,34	0,35	0,33	0,47	0,23	0,3
Coefficiente angular	-0,40	-0,40	-0,42	-0,43	-0,34	-0,35	-0,33	-0,47	-0,23	-0,30
	MODELO NUMÉRICO									
	SEM CAL					COM CAL				
	CAIXA 01 - Compactado		CAIXA 02 – lançado			CAIXA 04 - Compactado		CAIXA 03 – lançado		
Profundidade	0	10	0	10	20	0	10	0	10	20
Velocidade média de secagem (%/dia)	0,31	0,25	0,28	0,27	0,27	0,39	0,28	0,43	0,35	0,3
Coefficiente angular	-0,31	-0,25	-0,28	-0,27	-0,27	-0,39	-0,28	-0,43	-0,35	-0,30

Tabela 14: Compilação dos valores de velocidades médias entre as diferentes profundidades das 04 caixas desenvolvidas durante este trabalho.

No geral, os modelos físicos apresentam uma velocidade de secagem maior do que os modelos numéricos.

No modelo físico, a velocidade de secagem nas caixas compactadas foram inferiores às velocidade de secagem nas caixas onde o solo foi apenas lançado. A única exceção é a comparação entre as caixas com cal, na profundidade de 10,0cm. Nesse ponto, a velocidade de secagem da caixa compactada é superior à da caixa com o material lançado. Isso se deve, pois a curva que representa essa profundidade está se adequando a curva da profundidade de 20,0cm.

No modelo numérico, assim como no modelo físico, a secagem apresenta uma maior velocidade nos modelos em que não há compactação em relação aos que possuem. Na caixa com cal, essa diferença é mais significativa do que na caixa que não possui a cal.

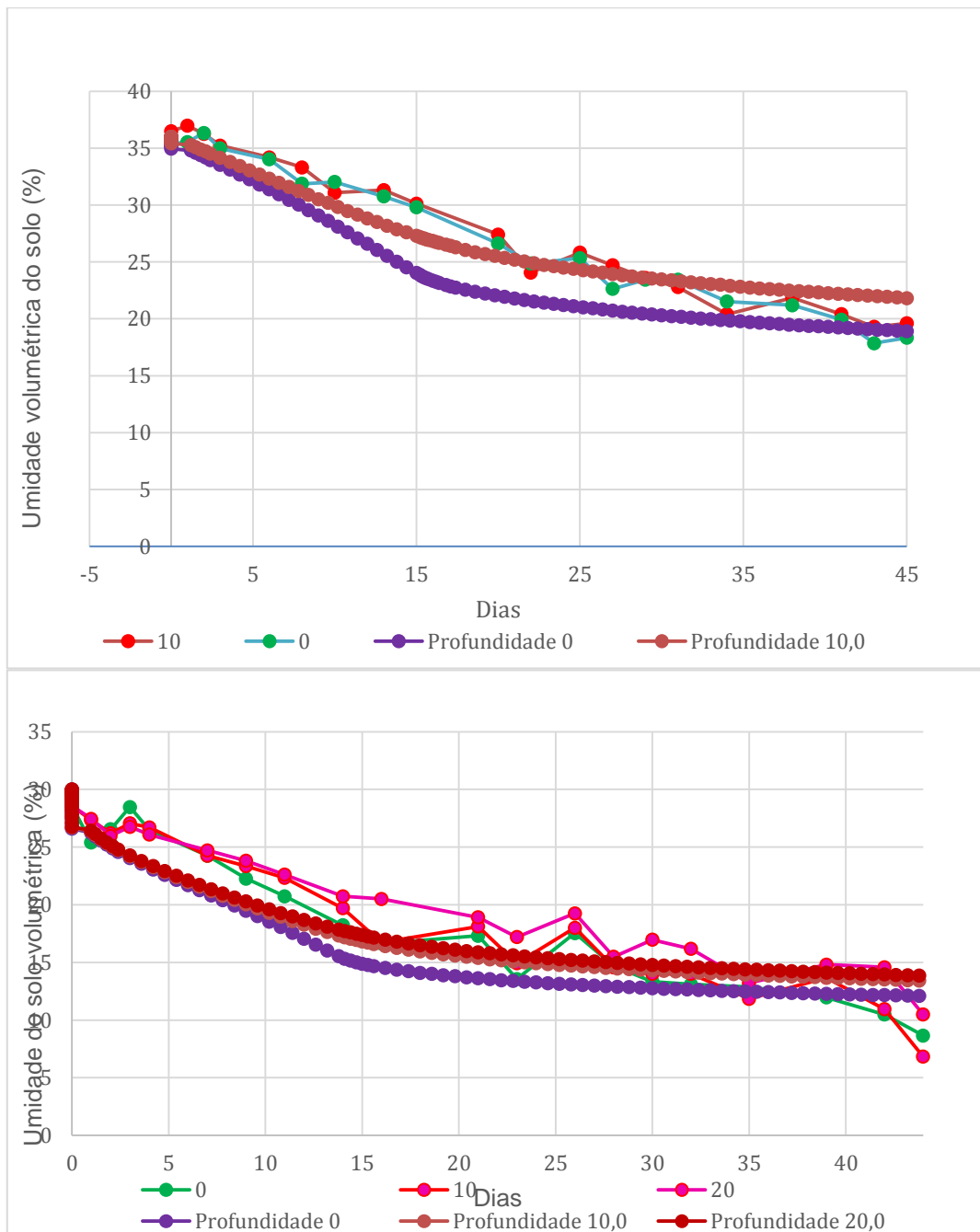


Figura 20: Gráficos dos modelos físicos (em linhas) e numéricos (pontilhados) sobrepostos. Na parte superior está a caixa 01 e na parte inferior referente à caixa 02.

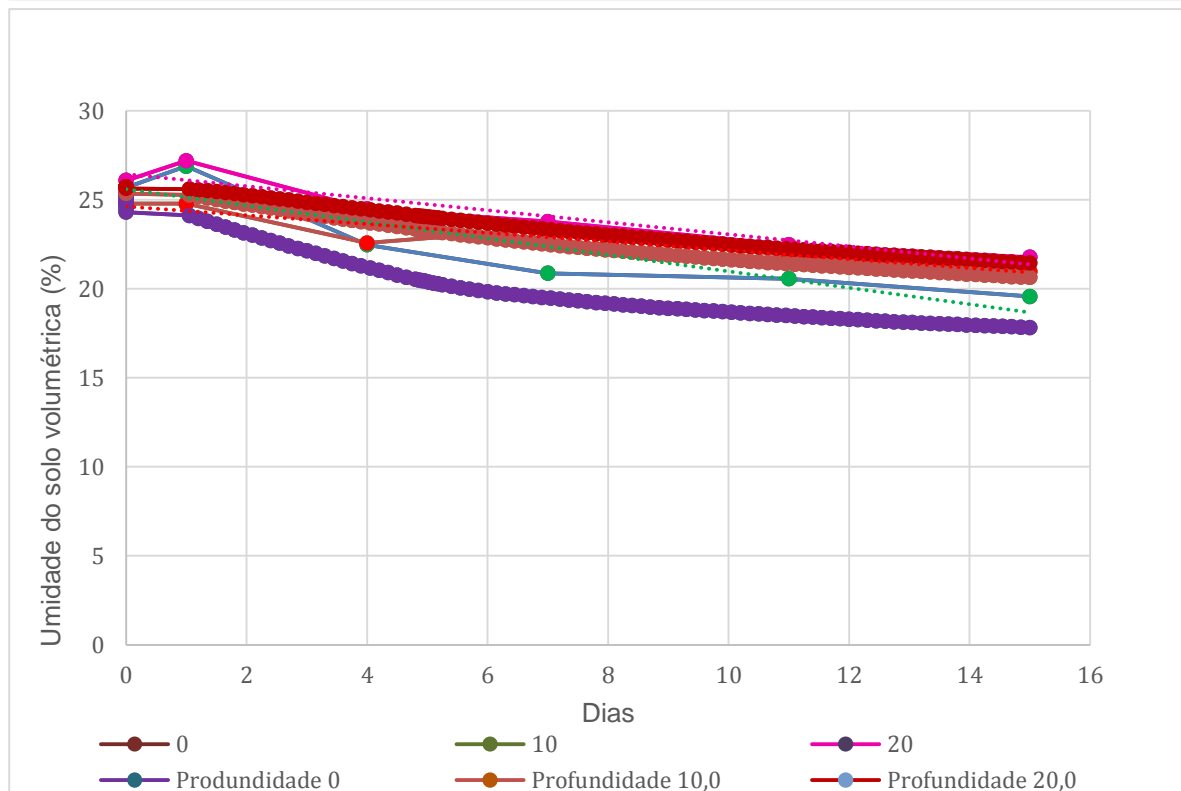
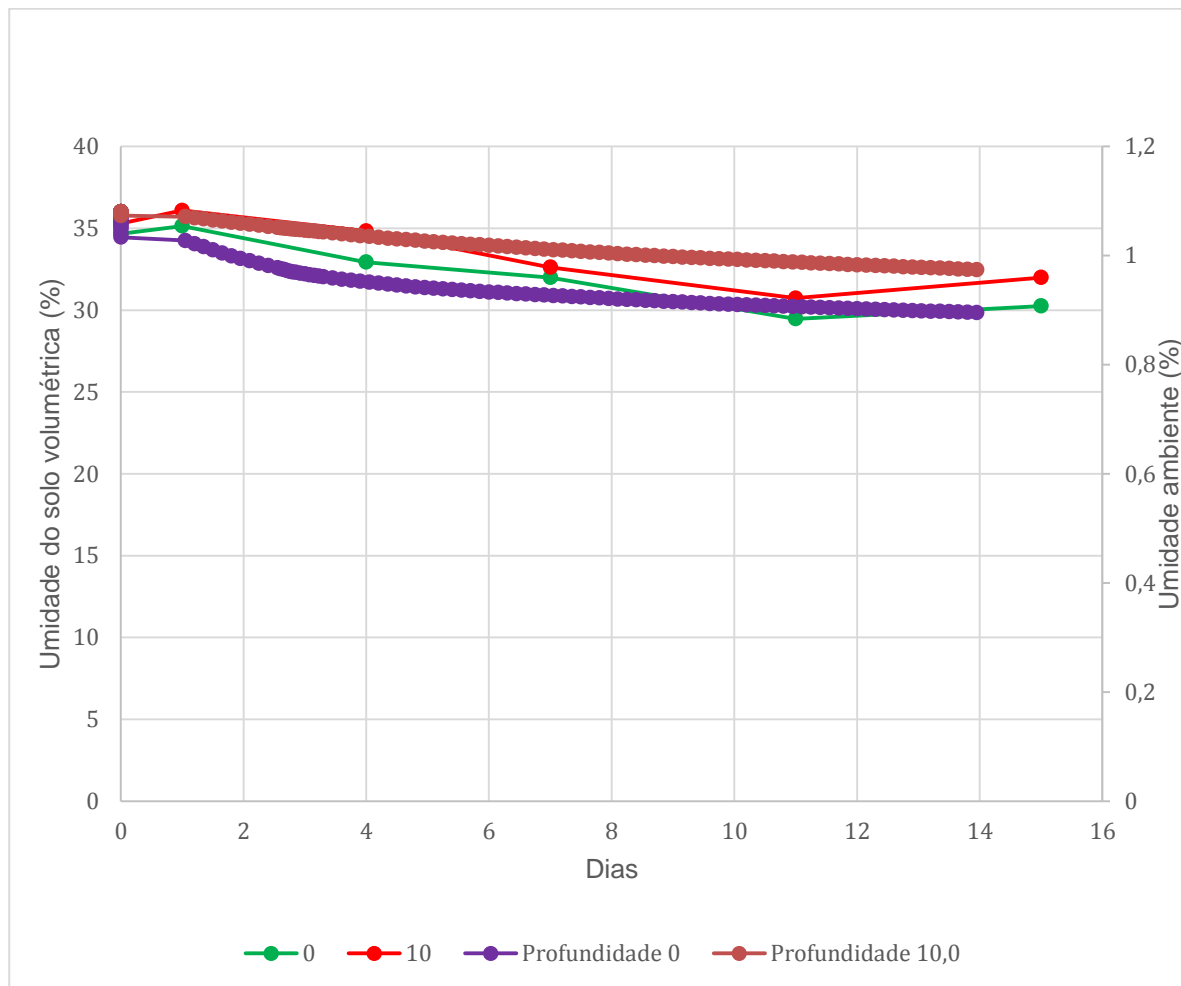


Figura 21: Gráficos dos modelos físicos (em linhas) e numéricos (pontilhados) sobrepostos. Na parte superior está a caixa 04 e na parte inferior referente à caixa 03.

7. CONCLUSÕES

Portanto, as conclusões que podemos relacionar a partir deste estudo são:

- a) Devido ao aumento da proporção de argila de cal hidratada, a densidade de grãos aumentou e o limite de liquidez diminuiu.
- b) Assim como definido na literatura, a umidade ótima aumenta e a densidade máxima seca diminui com o acréscimo de cal.
- c) A condutibilidade hidráulica diminui com o acréscimo de 2% da cal hidratada cerca de 25%.
- d) A umidade do ar é relevante no processo de secagem. Nos modelos físicos é possível observar que com o aumento da umidade, principalmente repentinamente, os níveis de secagem (e as vezes, até aumento da umidade do solo) são diminuídos.
- e) O software Hydrus funciona bem melhor para modelagem em modelos físicos não compactados.
- f) A modelagem apresentou um comportamento não observado no modelo experimental na caixa 02, no qual as camadas inferiores conversam-se bem mais do que a camada mais superficial (apenas observado no modelo físico da caixa 03).
- g) As caixas compactadas sem e com a cal apresentam uma velocidade de secagem semelhante. No entanto, em caixas em que o material foi apenas lançado, as caixas sem cal apresentaram uma velocidade maior.
- h) O lançamento de uma camada com teor de umidade acima do especificado para compactação pode inviabilizar o trabalho devido ao tempo necessário (entre 08 à 12 dias) para a umidade retornar ao valor correto (umidade ótima).
- i) A perda de umidade no solo lançado é de 0,43%/dia e para o material compactado de 0,4%/dia.
- j) A adição de cal faz com que as velocidades de secagem diminuam no modelo experimental, com exceção da camada mais superficial do solo+cal simplesmente lançado. No entanto esse fenômeno não é observado na modelagem.
- k) Ao observar o processo da secagem em solos compactados, é possível notar que mesmo depois de atingir a umidade ótima, a velocidade da secagem permanece constante. Para tanto, é impossível observar em obras civis os processos de secagem (que são também revertidos por processos de infiltração) para que se evite a produção de trincas ou outros problemas na construção.

8. REFERÊNCIAS

- Almeida F.F.M. de, Hasui Y., Brito-Neves B.B de, Fuck R. A. (1981). *Brazilian Structural Provinces: an introduction*. Earth-Sci. Rev., 78, 1-29.
- Almeida, F. F .M. de, (1969). Diferenciação tectônica da plataforma Brasileira. Anais, XXII! Congresso Brasileiro de Geologia (Salvador), 29-46.
- Almeida, F.F.M. de (1977). *O Cráton do São Francisco*. Revista Brasileira de Geociências, 7, 349-364.
- Bouyoucos, G. J. (1926). *Rapid determination of the moisture content of soils*. Soil Science, 24, 651-652.
- Bouyoucos, G. J. (1937). *Evaporating water with burning alcohol as a rapid means of determining moisture content of soils*. Soil Science, 44, 377-383.
- Caputo, H. P. (1988). *Mecânica dos solos e suas aplicações* (6ª edição, v. 1). Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e científicos editora S.A.
- Eades, J. L.; Grim, R. E. (1966). *A quick test to determine lime requirements for lime stabilization*. Highway research record. Washington, D. C. 262: 51-83.
- Ghelfi, H. F. (1988). *Estudo comparativo do método das pesagens e o método gravimétrico padrão para determinação do teor de umidade do solo*. Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 45(1), 99-108.
- Gibson, R.E., Shefford, C. (1968). *The efficiency of horizontal drainage layers for accelerating consolidation of clay embankments*. Geotechnique, 18, 327-335.
- Giltrana Junior, G. de F. N., Marinho, F.A.M, Soto, M.A. (2015). A curva de retenção de água de materiais porosos. Solos não saturados no contexto geotécnico, São Paulo : ABMS. 759 p.
- Gonçalves, H. H. S, Marinho, F. A. M, Futai, M. M. (2014). *Notas de aula revisadas*. São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - USP. Acesso em 21 de março de 2018 <<http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/pef0522/PEF0522-Notas%20de%20Aula.pdf>>.
- Grace, H., Green, P. A.(1979). *The use of wet fills for the construction of embankment for motoways*. Proceedings of the ICE Conference on Clay Fills. 113-118. London: Institute of civil engineers.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; COIMBRA, A.M. (1975) *The Ribeira folded belt*. Revista Brasileira de Geociências, 5(4), 257-266.
- HASUI, Y.; SADOWSKI, G.R. (1976). *Evolução geológica do Pré-Cambriano na região sudeste do Estado de São Paulo*. Revista Brasileira Geociências. 6 (3). 180-200

- Herrin, M., Mitchell, J. K. (1961). *Lime-soil mixtures*. Highway research board bulletin. Washington, D.C. 304: 99-121.
- Hilt, G. H.; Davidson, D. T. (1960). *Lime fixation in clayey soils*. Highway research board, Washington, D.C. 262: 20-32.
- Klar, A. E., Villa Nova, N. A., Marcos, Z. Z., Cervellini, A. (1966). *Determinação da umidade do solo pelo método das pesagens*. Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 23, 16-30.
- Moretti, J. F. (1962). *O tensiômetro no controle da água de irrigação*. Boletim técnico-científico da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 9, 8.
- Núñez, W. P. (1991). *Estabilização físico-química de um solo residual de Arenito Botucatu, visando ser emprego na pavimentação*. Dissertação (mestrado em engenharia). Curso de pós-graduação em engenharia civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- Oganesyan, A.P. (1958). *A simple field method for determining soil moisture*. Soviet Soil Science, 4.
- Papakadis, J. S. (1941). *A rapid method for determining soils moisture*. Soil Science, 51, 279-281.
- Proctor, R. R. (1933). *Fundamental principles of soil compaction*. Engineering News Records, 3, 20-28.
- Rodin, S. (1964). *Earthworks - some potential aspects in the United Kingdom - Part 2*. Bulk Handler, 34-41.
- Rogers, C. D. F.; Glendinning, S.; Roff, T. E. J. (1997). Lime requirement for stabilization. Transportation research board. 79th annual meeting. Washington, D.C.
- Simunek, J., van Genuchten, M.Th., Sejna, M. (2008). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media (versão 4.16.0110). Download em 21 de março de 2018 <<https://www.pc-progress.com/en/Download.aspx?back=Default.aspx%3fH1d-downloads>>.
- Terzaghi, K. (1925). *Principles of Soil Mechanics: I—Phenomena of Cohesion of Clays*. Engineering News-Record, 95(19), 742-746.

Thompson, M. R. (1966). *Lime reactivity of Illinois soils*. Journal of the soil mechanics and foundations division. ASCE. 92: 67-92.

Van Genuchten, M. Th., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal 44, 892-898, 1980.