

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Itallo Dayron Borda Nebenzahl

**AVALIAÇÃO DOS RECALQUES DA FUNDAÇÃO DE UM
ATERRO DE RESÍDUOS NO MUNICÍPIO DE CAPELA DE
SANTANA/RS**

Porto Alegre
julho 2019

ITALLO DAYRON BORDA NEBENZAHL

**AVALIAÇÃO DOS RECALQUES DA FUNDAÇÃO DE UM
ATERRO DE RESÍDUOS NO MUNICÍPIO DE CAPELA DE
SANTANA/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador/a: Luiz Antônio Bressani

Porto Alegre

julho 2019

ITALLO DAYRON BORDA NEBENZAHL

**AVALIAÇÃO DOS RECALQUES DA FUNDAÇÃO DE UM
ATERRO DE RESÍDUOS NO MUNICÍPIO DE CAPELA DE
SANTANA/RS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 03 de julho de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luiz Antônio Bressani (UFRGS)
Ph.D University of London
Orientador

Prof. Cesar Alberto Ruver(UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng. Eduardo Bonow Simões
Engenheiro pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng. Gabriel Grassioli Schreinert
Engenheiro pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente aos meus pais, por sempre conseguirem encher meu coração de amor a cada ligação telefônica. Muito obrigado pelo apoio incondicional e por tudo que fizeram e deixaram de fazer para o meu desenvolvimento pessoal e profissional, não tenho palavras para descrever minha eterna gratidão. À minha irmã, por toda cumplicidade e parceria na maior parte do tempo que morei em Porto Alegre e pelo entusiasmo ao ouvir minhas conquistas. Vocês são meu eterno porto seguro e a principal razão por eu ser quem sou hoje, por isso dedico a vocês este trabalho.

Muito obrigado aos meus avós Luiz e Ondina, por sempre me auxiliarem da maneira que podiam. À vó Terezinha, obrigado por sempre cuidar de todos nós e ser a matriarca da nossa família. Ao vô Miguel (in memoriam).

À Rafaela, namorada, parceira, amiga, orientadora, geóloga, psicóloga etc. Obrigado por todos papéis que tu desempenhaste ao meu lado, tu foste essencial na reta final desta etapa da minha vida e no meu desenvolvimento profissional. Muito obrigado por todo amor e por me mostrar que o mundo é pequeno para quem tem a pessoa certa ao lado.

Ao Thales e Brunno, pela amizade sincera, risadas e parceria de estudos. Aos amigos já Engenheiros Químicos, que estiveram ao meu lado no início de jornada.

Ao meu orientador, professor Bressani, pelo apoio na reta final e paciência que me instruiu com seu talento profissional notável. Quem sempre me lembrarei por sua paixão pela área da engenharia geotécnica.

Ao Eduardo, por todo auxílio e explicações prestadas durante a maior parte da produção deste trabalho. Ao Jair pelo auxílio nos ensaios realizados, e aos demais colegas do laboratório LAGEOTEC.

Resiliência é a capacidade de se recuperar de situações de crise e aprender com ela. É ter a mente flexível e o pensamento otimista, com metas claras e com a certeza de que tudo passa.

Autor desconhecido

RESUMO

Este trabalho versa sobre a análise da deformação vertical da camada de solo residual de arenito da fundação de um novo setor do aterro de resíduos industriais situado no município de Capela de Santana/RS. A partir da revisão da literatura sobre os métodos de destinação final dos resíduos e a relevância da impermeabilização do aterro com a finalidade de reduzir e/ou sanar impactos ao meio ambiente, foram estudadas as deformações previstas da fundação do aterro, as propriedades de comportamento de um solo residual de arenito, suas características de estruturação e a forma de ocorrência da deformação vertical em ensaios de laboratório. Foram utilizados os valores experimentais para avaliar os recalques futuros do aterro que será construído. As investigações do sub-solo foram avaliadas de modo a definir as seções estratigráficas de análise da fundação, foram definidas as áreas mais críticas quanto ao recalque. Utilizando o programa SIGMA, foram realizadas duas simulações para obter a deformação vertical da fundação e analisar se os recalques diferenciais são excessivos em face da possibilidade de ruptura da impermeabilização inferior (geomembrana) do aterro. Foi observado que as regiões com maior deformação da superfície coincidem com as áreas onde a camada de solo residual de arenito é mais espessa e a sobrecarga é maior. As magnitudes dos recalques diferenciais não são significativas para a ruptura da camada impermeabilizante inferior.

Palavras-chave: Solo residual de arenito, recalque e impermeabilização.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Método de vala..... | 17 |
| Figura 2 – Método da rampa..... | 17 |
| Figura 3 – Método da área..... | 18 |
| Figura 4 – Perfil representativo para locais com solo residual..... | 22 |
| Figura 5 – Características provenientes da rocha mãe. | 24 |
| Figura 6 – Tipos de recalque: (a) uniforme, (b) diferencial e (c) desuniforme. | 27 |
| Figura 7 – Analogia mecânica do processo de adensamento idealizada por Terzaghi..... | 28 |
| Figura 8 – Imagem esquemática da câmara do ensaio edométrico | 29 |
| Figura 9 – Gráficos característicos de ensaios realizados em solo arenoso e argiloso..... | 30 |
| Figura 10 - Mapa de localização da área de estudo..... | 31 |
| Figura 11 - Mapa geológico da região da área de estudo, no município de Capela de Santana/RS. | 33 |
| Figura 12 – Perfil esquemático da célula de aterro (sem escala)..... | 36 |
| Figura 13 – Detalhamento sem escala da estrutura impermeabilizante inferior..... | 36 |
| Figura 14 – Detalhamento sem escala da estrutura impermeabilizante superior. | 37 |
| Figura 15 – Distribuição granulométrica do solo. | 38 |
| Figura 16 – Fluxograma das etapas. | 39 |
| Figura 17 – Mapa de alocação do ponto de sondagem..... | 40 |
| Figura 18 – Amostra indeformada com solo em excesso..... | 41 |
| Figura 19 – Amostra indeformada já com moldagem concluída..... | 42 |
| Figura 20 – Prensas utilizadas para o ensaio edométrico. | 42 |
| Figura 21 – Localização do empreendimento com os furos SPT demarcados..... | 44 |
| Figura 22 –Relatório parcial de sondagem do SPT30. | 47 |
| Figura 23 – Curvas tensão <i>versus</i> variação no índice de vazios..... | 51 |
| Figura 24 – Curvas tensão <i>versus</i> variação no índice de vazios comparando com ensaio característico..... | 52 |
| Figura 25 – Gráfico relacionando tensão <i>versus</i> variação na altura. | 53 |
| Figura 26 – Gráfico comparativo com os valores referentes a cada ensaio. | 55 |
| Figura 27 –Seção estratigráfica A e B..... | 56 |
| Figura 28 – Seção estratigráfica C e D. | 57 |
| Figura 29 – Localização das regiões consideradas mais críticas quanto ao recalque..... | 58 |
| Figura 30 – Modelo da seção A..... | 59 |
| Figura 31 – Modelo da seção C..... | 59 |
| Figura 32 – Análise da seção C quanto o recalque no eixo do dique..... | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 33 – Gráfico relacionando cota altimétrica com o recalque no eixo do dique na camada do solo objeto do estudo..... | 60 |
| Figura 34 – Análise da seção C quanto o recalque na fundação. | 61 |
| Figura 35 – Gráfico relacionando a deformação da membrana com a posição horizontal na seção C. | 62 |
| Figura 36 – Análise da seção A quanto o recalque na fundação. | 62 |
| Figura 37 – Gráfico relacionando a deformação da membrana com a posição horizontal na seção A. | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Distribuição granulométrica. | 38 |
| Tabela 2 – Corpo de prova e carga mantida até a estabilização. | 43 |
| Tabela 3 – Classificação das camadas de solo conforme o Nspt..... | 45 |
| Tabela 4 – Pontos de sondagem considerados nas seções estratigráficas. | 45 |
| Tabela 5 – Tabela com valores medidos dos corpos de prova. | 50 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Valores obtidos para a tensão inicial..... | 53 |
| Quadro 2 - Valores obtidos para a tensão final. | 54 |
| Quadro 3 – Recalque total da camada com os dados do ensaio 1 | 54 |
| Quadro 4 – Recalque total da camada com os dados do ensaio 2 | 54 |
| Quadro 5 – Recalque total da camada com os dados do ensaio 3 | 54 |
| Quadro 6 – Recalque total da camada com os dados do ensaio 4 | 55 |

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP – Corpo de Prova

EIA – Interpolímero Etileno Alloy

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo

NBR – Norma Brasileira

NSPT – Número de golpes a cada 30 metros de sondagem da SPT

PEAD – Polietileno de alta densidade

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade

PVC – Policloreto de Polivinila

RS – Rio Grande do Sul

RSI – Resíduo Sólido Industrial

SPT – Standard Penetration Test

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UV – Radiação ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

H – altura da amostra

H_0 – altura inicial da amostra

α – ângulo limite de atuação da sobrecarga

k – condutividade hidráulica

π – constante pi

ρ – deformação vertical (recalque)

H_1 – espessura da camada avaliada

g – gramas

e – índice de vazios

kPa – kilo Pascal

kN – kilo Newtons

m – metros;

mm – milímetros;

γ – peso específico;

γ_s – peso específico real;

u – pressão neutra

Q – sobrecarga

σ_v' – tensão vertical efetiva

σ_v – tensão vertical total

Δ – variação

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 1.1 | QUESTÃO DA PESQUISA | 13 |
| 1.2 | OBJETIVOS DA PESQUISA..... | 14 |
| 1.3 | HIPÓTESES..... | 14 |
| 1.4 | DELIMITAÇÕES | 14 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 15 |
| 2.1 | RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS | 15 |
| 2.1.1 | Aterros industriais..... | 16 |
| 2.1.1.1 | Camada Natural..... | 19 |
| 2.1.1.2 | Geomembrana de PEAD | 19 |
| 2.1.2 | Demais formas de tratamento | 20 |
| 2.2 | SOLO RESIDUAL..... | 20 |
| 2.2.1 | Definição..... | 21 |
| 2.2.2 | Intemperismo | 22 |
| 2.2.3 | Estrutura e composição mineralógica | 23 |
| 2.2.4 | Comportamento tensão x deformação..... | 25 |
| 2.2.5 | Solo residual de arenito..... | 25 |
| 2.3 | RECALQUE..... | 26 |
| 2.3.1 | Avaliação do recalque | 29 |
| 3 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... | 31 |
| 3.1 | CONTEXTO GEOLÓGICO | 32 |
| 3.1.1 | Formação Pirambóia..... | 34 |
| 3.1.2 | Formação Botucatu | 34 |
| 3.1.3 | Formação Serra Geral | 35 |
| 3.2 | ATERRO INDUSTRIAL..... | 35 |
| 3.3 | SUBSOLO DO ATERRO | 37 |
| 4 | METODOLOGIA..... | 39 |
| 4.1 | ENSAIO EDOMÉTRICO | 40 |
| 4.1.1 | Preparação da amostra e execução do ensaio..... | 40 |
| 4.2 | ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO VERTICAL DO SOLO | 43 |
| 4.2.1 | Sondagem SPT..... | 44 |
| 4.2.2 | Seção estratigráfica | 44 |
| 4.2.3 | Cálculo analítico e simulação | 45 |

| | | |
|----------|-----------------------------------|-----------|
| 4.2.3.1 | Método analítico..... | 45 |
| 4.2.3.2 | Método por elementos finitos..... | 48 |
| 5 | RESULTADOS E ANÁLISE | 50 |
| 5.1 | ENSAIO EDOMÉTRICO | 50 |
| 5.2 | MÉTODO ANALÍTICO | 53 |
| 5.3 | SIMULAÇÃO | 55 |
| 6 | CONCLUSÕES | 64 |

1 INTRODUÇÃO

Aterros são obras geotécnicas utilizadas para destinação final de resíduos sanitários ou industriais. Devido a composição química destes materiais, para a segurança da sua operação, recomenda-se a utilização de estruturas impermeabilizantes tanto no seu limite superior, quanto no inferior. A principal funcionalidade desta medida é isolar o material aterrado do meio onde está inserido, visando mitigar o risco de contaminação do solo e/ou recursos hídricos.

Para evitar a possível ocorrência de ruptura da membrana impermeabilizante inferior, torna-se imprescindível a caracterização do solo quanto à deformação vertical e a verificação dos pontos críticos de recalque na área estudada.

Neste contexto, este trabalho visa avaliar a deformação vertical do solo de fundação de um aterro industrial situado no município de Capela de Santana/RS a fim de verificar a compatibilidade dos recalques com a solução de impermeabilização prevista.

A avaliação teve como ponto de partida a realização de ensaios edométricos com amostras de solo para obtenção dos parâmetros de deformação. Com isso, foi realizada a modelagem das seções críticas e análise por meio de *softwares*, verificando assim a magnitude desta deformação e as suas consequências para a camada impermeabilizante inferior, comparando com a capacidade de deformação limite desta membrana.

O presente estudo foi dividido em distintas etapas, tais como: revisão bibliográfica, onde realizou-se a pesquisa acerca do tema proposto, resíduos industriais, estrutura de impermeabilização, solo residual de arenito e recalque. Em seguida, foram executados os ensaios edométricos para a definição da curva de compressão unilateral de corpos de prova indeformados. Por último, foram modeladas duas seções e com os dados do solo e condições de contorno introduzidos, realizada a análise da seção e verificação da deformação da superfície da fundação do aterro.

1.1 QUESTÃO DA PESQUISA

Qual o impacto do recalque do solo de fundação do aterro industrial do município de Capela de Santana, Rio Grande do Sul, na estrutura de impermeabilização de fundo do aterro?

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo deste estudo é avaliar o recalque da fundação do aterro industrial do município de Capela de Santana no estado do Rio Grande do Sul, visando a análise da simulação quanto a compatibilidade do sistema de impermeabilização com os recalques previstos a partir dos ensaios. E possui objetivos secundários:

- a) Execução de ensaios edométricos para avaliar a deformação vertical do solo;
- b) Cálculo analítico do recalque no eixo de um dique de contenção, a fim de validar as simulações;
- c) Análise da simulação quanto aos pontos de maior recalque em função do carregamento do aterro;

1.3 HIPÓTESES

Parte-se da hipótese de que o recalque do solo de fundação do aterro industrial do município de Capela de Santana, Rio Grande do Sul não possui magnitude suficiente para causar o rompimento da impermeabilização inferior do novo setor do aterro.

1.4 DELIMITAÇÕES

Para a realização deste trabalho foram utilizados dados coletados durante as campanhas de sondagem e amostras indeformadas retiradas de uma única trincheira próxima ao furo de sondagem SPT 29.

O recalque avaliado foi apenas da camada de solo residual de arenito considerada de baixa resistência, onde o N_{spt} era de 4 a 6.

O *software* utilizado em sua versão estudantil limitou a precisão da simulação, visto o número máximo de três layers para a caracterização do subsolo e da malha de elementos finitos de 500 pontos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi dividida em três etapas: a primeira descreve de maneira geral os resíduos sólidos industriais e as formas de destinação final mais utilizadas, a segunda sobre a formação dos solos residuais, com ênfase nos solos residuais de arenito; e a última sobre recalque, explanando as suas principais definições.

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

O aumento significativo da utilização dos recursos naturais provoca um aumento na geração de resíduos sólidos, de maneira que os mesmos necessitem de tratamento e de destinação final ambientalmente adequada. Segundo a NBR 10004/04 (ABNT, 2004), a classificação destes resíduos se dá conforme a sua origem, que pode ser classificada em industrial, doméstica, comercial, agrícola de serviços ou varrição, bem como aos seus constituintes.

Os resíduos sólidos industriais (RSI) são os materiais gerados pela atividade industrial e classificados em: Classe 1 – contaminantes e tóxicos; Classe 2 – possivelmente contaminantes e Classe 3 – não contaminantes, conforme a NBR 10004/04 (ABNT, 2004). No geral, estes resíduos apresentam uma significativa diversidade em suas características, pois são gerados por diversos tipos de produtos manufaturados.

Para cada tipo de resíduo industrial, existe uma destinação final recomendada. As principais formas de tratamento e destinação são os aterros industriais, coprocessamento e incineração energética.

Krugel (2013) considera que o aterro industrial é a destinação final de resíduos industriais mais utilizada em função das vantagens econômicas que oferece. Por outro lado, a necessidade de uma ampla área para a total operacionalização é um dos pontos negativos desta opção.

2.1.1 Aterros industriais

O aterro industrial baseia-se em um aterro sanitário tradicional, mas com cuidados especiais, principalmente quanto à impermeabilização. Missiaggia (2002) afirma que a utilização de critérios de engenharia e normas operacionais garantem um confinamento ambientalmente seguro.

Segundo Krugel (2013), a necessidade de uma grande área para a operacionalização desta destinação, traz à tona a importância da implantação de medidas que visem diminuir a quantidade de resíduos a serem destinados. Além disso, a sua execução de acordo com os critérios normativos para a realização do aterro leva a um ótimo aproveitamento de espaço e mitiga as chances de ocorrerem problemas ambientais.

Conforme a NBR 13896/97 (ABNT, 1997), para a definição do local de instalação do aterro com o menor impacto ambiental com maior aceitação da população, estando de acordo com o zoneamento do município e maior disponibilidade de uso por um longo período, é necessário avaliar principalmente os seguintes critérios:

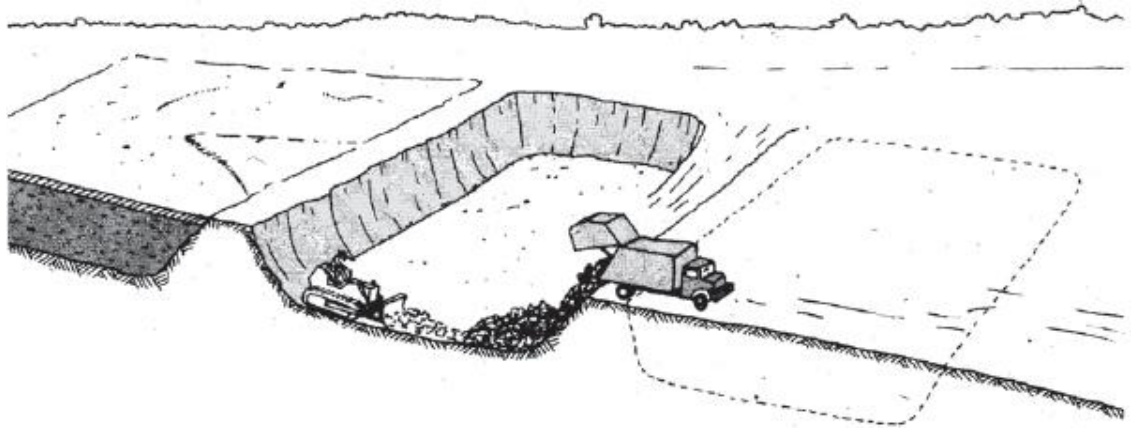
- a) Topografia: é o fator determinante para a definição do tipo de geometria. Recomenda-se locais com declividade entre 1% a 30%;
- b) Geologia e tipo de solo: avaliação da velocidade de infiltração e espessura das camadas do solo. Recomenda-se um subsolo de material homogêneo com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-7} cm/s;
- c) Recursos hídricos: avaliação da influência do aterro na qualidade e uso das águas subterrâneas. Recomenda-se uma distância mínima de 200 metros de cursos de água.
- d) Áreas inundáveis: não deve ser instalado em regiões sujeitas a inundações, com período de recorrência inferior a 100 anos;
- e) Nível do lençol freático: recomenda-se a existência de uma camada natural de solo superior a 1,5 m entre a base do aterro e o nível mais alto do lençol freático.

Após a escolha do local para a instalação da estrutura, parte-se para a definição da geometria do aterro, que está relacionada diretamente à topografia da área.

Existem três geometrias comumente empregadas na execução de aterros industriais: método da trincheira ou vala, método da rampa e método da área (Manual de Gerenciamento Integrado, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT, 1995).

O método da vala (Figura 1) é utilizado onde há profundidade adequada para a escavação da vala e sua posterior cobertura. É inviável em locais onde o nível do lençol freático é próximo à superfície.

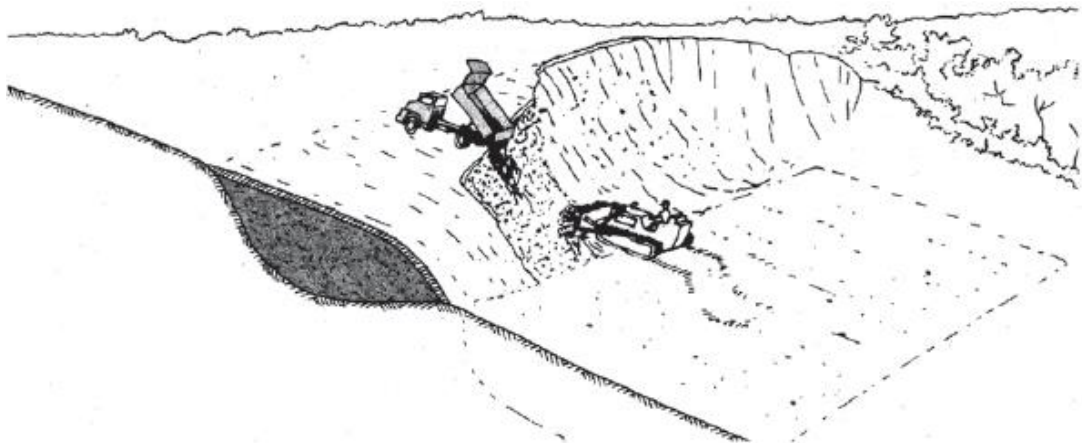
Figura 1 – Método de vala



(fonte: Manual de Gerenciamento Integrado, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT, 1995)

O método da rampa (Figura 2), segundo Guimarães (2000), é indicado para áreas com depressões naturais, como ribanceiras, ravinas e poços. A técnica de colocação e compactação é definida em função da geometria do local.

Figura 2 – Método da rampa



(fonte: Manual de Gerenciamento Integrado, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT, 1995)

O método da área (Figura 3) é utilizado para locais onde não há disponibilidade para escavações. O resíduo é espalhado ao longo de uma área definida (GUIMARÃES, 2000).

Figura 3 – Método da área



(fonte: Manual de Gerenciamento Integrado, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT, 1995)

Sobre a impermeabilização, destaca-se que esta etapa tem como principal função a separação do aterro do contato direto com o solo ou com o ar, a fim de evitar a contaminação. O sistema visa garantir a estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica e às intempéries as quais o aterro está submetido, podendo ser separado em camada superior e inferior.

A impermeabilização superior é executada como fechamento de cada célula do aterro, devendo garantir que a taxa de infiltração da estrutura seja a menor possível. Consiste em um sistema duplo com uma camada de manta sintética e uma camada de argila compactada de coeficiente de permeabilidade determinado (PINTO, 2011).

Ainda segundo o mesmo autor, a impermeabilização inferior consiste em um sistema também duplo, com uma camada de argila compactada, com permeabilidade inferior a $1,0 \times 10^{-7}$ cm/s com espessura mínima de 60 cm e uma camada de manta sintética (geomembrana). É necessário ter o devido cuidado na manutenção da distância mínima de 1,5 metros entre a superfície inferior e o nível do lençol freático.

2.1.1.1 Camada Natural

Esta camada é constituída por solo argiloso ou argila compactada, com permeabilidade inferior a $1,0 \times 10^{-7}$ e com espessura mínima de 60 cm (MANUAL DE GERENCIAMENTO INTEGRADO, INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO – IPT, 1995). A sua execução deve estar sob rigoroso controle de compactação (PINTO, 2011), a fim de ser coerente com as especificações do projeto.

2.1.1.2 Geomembrana de PEAD

As geomembranas são barreiras físicas formadas por camadas de membranas sintéticas que garantem a impermeabilização da área. São comumente utilizadas em obras de engenharia, Polietileno de alta densidade (PEAD) lisa ou rugosa, Polietileno de baixa densidade (PEBD), policloreto de polivinila (PVC) e interpolímero etileno alloy (EIA) (LUKIANCHUKI, 2007).

É constituída essencialmente por polímeros (REBELO,2009), mas podem ser incorporados alguns aditivos com a finalidade de incrementar as propriedades. Daniel & Koerner (1995) apud Rebelo (2009) citam como os principais aditivos os plastificantes, cuja finalidade é o aumento da flexibilidade, *fillers* e negro de fumo, para o aumento da rigidez e retardo da degradação por raios UV, fungicidas e antioxidantes.

As geomembranas de PEAD possuem relevantes características de resistência química, mecânica e durabilidade. Por este motivo, são as mais utilizadas para a impermeabilização de aterros de resíduos. (REBELO, 2009). Além da vantagem de proporcionarem uma camada impermeabilizante fina, porém eficiente.

As características que merecem ser analisadas para a correta definição do material da estrutura, elencadas por PINTO (2011), são:

- a) Resistência química: aos resíduos que serão dispostos no aterro, ao envelhecimento causado pela radiação, e pelos microrganismos;
- b) Resistência às intempéries;
- c) Resistência à tração, flexibilidade e alongamento;
- d) Resistência à laceração, abrasão e punção de materiais cortantes que possam estar presentes no resíduo;
- e) Facilidade para execução de emendas e reparos em campo.

Koerner (1998) apud Lodi (2003), afirma que nos casos onde a geomembrana é utilizada na cobertura, há o surgimento de tensão de tração devido a solicitações não planares abaixo das geomembranas. Este tipo de tensão de tração também pode ocorrer na geomembrana utilizada na impermeabilização da base do aterro, pois dependendo das características do solo, o recalque diferencial deve ser analisado. Estas tensões originadas de recalques e outras deformações devem ser minimizadas através das definições do projeto (LOUREIRO, 2005 *apud* PINTO, 2011), para assim evitar a ruptura da membrana.

2.1.2 Demais formas de tratamento

Segundo Rocha (2011) o coprocessamento do resíduo sólido industrial baseia-se na queima do resíduo em forno rotativo de clínquer em condições especiais. Geralmente as características dos resíduos geram uma ótima mistura de gases e produtos, e a alta temperatura é capaz de destruir os resíduos perigosos. Ainda segundo o mesmo autor, esta forma de destinação de resíduo sólido industrial vem se tornando cada vez mais usual, por ter um caráter ambiental e socialmente mais adequado que as demais destinações finais.

A incineração possui como ponto positivo a significativa diminuição do volume e do peso através da queima do resíduo, e conversão térmica através de reaproveitamento. Ao solucionar a questão do espaço, por outro lado, a incineração gera gases nocivos à saúde e possui altos custos de manutenção dos incineradores (DIAS, 2006).

2.2 SOLO RESIDUAL

Segundo McCarthy (2014), rochas podem ser definidas como agregados naturais de minerais conectados por forças atrativas ou por uma forte conexão, enquanto o solo é o material resultante da decomposição destas rochas pela ação de intempéries (VARGAS, 1981) na rocha mãe. McCarthy (2014, p. 2) ainda cita que:

Solo é um **material particulado**, o que significa que sua massa consiste no acúmulo de partículas que estão ligadas por forças mecânicas ou atrativas, forças não tão fortes quanto das rochas. Nos solos (e na maioria das rochas), existem espaços entre as partículas que podem ser preenchidos por líquidos (geralmente água) ou gás (geralmente ar). Desta forma, depósitos de solo são frequentemente considerados um material ou sistema trifásico (sólido, líquido e gasoso).

A classificação dos solos utilizada em uma parte da região Centro-Sul do Brasil (VARGAS, 1981) dá-se em função do processo de formação pelo qual o solo foi submetido. Sendo elas, solo transportado, orgânico e residual.

Segundo Mitchell & Soga (2005), uma das diferenças entre os solos transportados sedimentares e residuais, é que os últimos se formam como resultado das condições relativas ao material de origem, clima, topografia e drenagem, existindo a possibilidade de reter elementos estruturais da rocha mãe. Enquanto isso, os solos transportados não estão sobre a rocha que lhes deu origem, podendo ser aluviais, eólicos ou coluvionares.

Os solos orgânicos são originados pela ação de agentes orgânicos sobre solos residuais ou transportados, possuindo como principal constituinte a matéria orgânica.

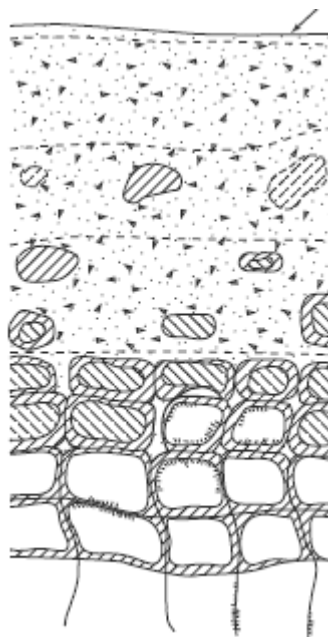
Os solos residuais são aqueles que permanecem no local de sua formação, quando mantêm algumas características da rocha mãe, são chamados de saprolíticos, sendo o solo que será enfatizado neste trabalho.

2.2.1 Definição

Solo residual saprolítico é o material derivado do processo de alteração e decomposição *in situ* do maciço rochoso que não foi alterado de seu local de origem. McCarthy (2014) afirma que o principal gerador deste solo é o intemperismo químico da rocha, sendo o clima o maior influenciador desta transformação. Este intemperismo químico resulta em uma ampla variedade de minerais e elevado índice de vazios no solo (VAUGHAN, 1988).

Em locais onde são encontrados solos residuais é comum visualizar uma sequência de camadas constatando a relação da alteração provocada pelo intemperismo com a profundidade, como demonstra McCarthy (2014) no perfil apresentado na Figura 4. Observa-se ascendentemente a rocha sã, levemente alterada, moderadamente alterada, altamente alterada, completamente alterada e solo.

Figura 4 – Perfil representativo para locais com solo residual



(fonte: Essentials of Soil Mechanics and Foundation – Basic Geotechnics – David F.McCarthy, 2014)

2.2.2 Intemperismo

A desintegração das rochas é ocasionada pelos processos de intemperismo biológico, químico ou físico. Os processos químico e biológico causam as alterações nas propriedades físicas e químicas do material (MITCHELL, 1976), enquanto o processo físico diminui o tamanho das partículas e aumenta a superfície de contato, onde sua ocorrência depende das propriedades químicas da rocha matriz (GROTZINGER E JORDAN, 2013).

Segundo Mitchell (1976) e Grotzinger e Jordan (2013), o intemperismo físico pode ocorrer por diversas causas:

- a) Zonas naturais de fraqueza e descarregamento: as rochas muitas vezes possuem zonas de fraqueza que, ao sofrerem descarregamento, natural ou artificial, são alargadas em função da liberação da tensão ao qual estavam submetidas. este alargamento da zona de fraqueza abre caminho para, no longo prazo, ocorrer a esfoliação da rocha e conseqüente alteração física nestes locais de uma forma mais acentuada;
- b) Expansão e contração térmica: rochas submetidas a repetitivos congelamentos seguidos por descongelamento e insolação. este mecanismo gera a expansão e contração da água, que resulta na abertura ou expansão de fissuras. é o principal intemperismo de locais desérticos;
- c) Atividade dos organismos: nas fissuras da rocha, há o desenvolvimento de algas e plantas que geram um produto ácido que promove o intemperismo químico;

Já o intemperismo químico tem a indispensável presença de água para a ocorrência dos mecanismos de degradação, a partir dos seguintes processos, segundo os mesmos autores:

- a) Hidrólise: é o processo mais significativo e consiste na reação entre os íons H^+ do mineral e íons $(OH)^-$ de um fluxo de água. Um dos minerais alterados por esta reação é o feldspato, que é transformado em caulinita, material argiloso com fraca aderência e separados grãos minerais;
- b) Quelação: complexação e remoção de íons metálicos;
- c) Troca catiônica: substituição do hidrogênio, influencia no tipo de argila formada e na permeabilidade a partir da concentração e tipo de íons presentes;
- d) Oxidação e redução: perda e ganho de elétrons para os cátions e ânions, onde é essencial a existência de oxigênio dissolvido na água para a ocorrência da reação;
- e) Carbonatação: combinação de íons de carbonato com os minerais do solo.

Estas reações químicas resultam em minerais inalterados, que possuem alta resistência ou foram expostos ligeiramente ao intemperismo e recentemente alterados, com a estrutura similar ou então diferente (MITCHELL, 1976).

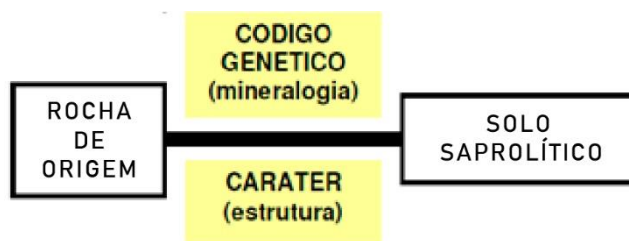
Os efeitos do clima, topografia, rocha mãe, tempo e meio biótico também são relevantes para a análise da pedogênese do solo. Entre estes fatores, o clima tem influência a partir da quantidade e distribuição da pluviometria, temperatura e profundidade do nível de água do local.

A desintegração de uma rocha arenítica, através do intemperismo químico, gera o solo residual de arenito, que é objeto de estudo deste trabalho.

2.2.3 Estrutura e composição mineralógica

A forma na qual as partículas estão arrançadas é denominada fábrica e a combinação dos efeitos desta fábrica, aliado à composição textura e às forças existentes entre as partículas é chamada de estrutura (MITCHELL, 1976). A estrutura do solo possui as três fases de materiais (VARGAS, 1981), pois os espaços vazios (poros) existentes em função do arranjo dos grãos (fase sólida) podem ser preenchidos por componentes das fases líquida e gasosa. Estas características estão diretamente ligadas à rocha mãe do solo (Figura 5).

Figura 5 – Características provenientes da rocha mãe.



(fonte: Modelagem micro-mecânica discreta de solos residuais - Juan Pablo Ibañez, 2008, modificado, p. 41)

Outra característica decorrente da rocha formadora é o comportamento mecânico, que é consequência direta da mineralogia, formato e tamanho das partículas e da microestrutura (FUTAI et al. 2013). Este fato evidencia ainda mais a importância do conhecimento da rocha originária do solo.

Segundo Ibañez (2008), os minerais secundários que compõem o solo residual são uma forma mais estável do mineral do qual é derivado (rocha de origem). São os influenciadores diretos, como já citado acima, da granulometria, tipo e porcentagem de argilominerais, presença de materiais cimentantes e resistência dos grãos.

A cimentação é originada da seguinte forma (IBAÑEZ, 2008, p. 43):

[...] processos de lixiviação e re-deposição envolvem a remoção de minerais de sílica e alcalinos, acontecendo a consequente acumulação de óxidos, hidróxidos e sesquióxidos. Os minerais lixiviados são transportados e re-depositados mais tarde, dependendo das condições de fluxo interno. A laterização responde a este processo, onde minerais lixiviados e re-depositados são lugar à camadas de solos cimentados de alta resistência mecânica perto da superfície.

Os vínculos formados pela cimentação podem ser constituídos por um material composto de óxido de ferro, carbonato de cálcio, gipsita e sais (DUDLEY, 1970 e EL-SOHBY et al., 1989 apud DAVIES, 2000).

Desta maneira, pode-se concluir que a estrutura do solo é definida pela combinação do efeito do arranjo dos grãos e da cimentação existente entre as partículas (LEROUEIL AND VAUGHAN, 1990).

2.2.4 Comportamento tensão x deformação

A cimentação existente entre as partículas do solo residual confere um comportamento elástico ao solo na etapa inicial do carregamento, o que resulta em uma resistência coesiva significativa.

A tensão de plastificação, também denominada de cedência, é semelhante à tensão de pré-adensamento que é observada em solos sedimentares, onde relaciona-se ao histórico de tensões e em solos residuais se deve à cimentação (VAUGHAN, 1988).

Assim que a tensão de plastificação do solo é ultrapassada, ocorre uma redução acentuada da rigidez (IBAÑEZ, 2008). Após este evento, e com o carregamento continuado, Vaughan (1988) comenta que a estrutura é progressivamente destruída, quando o índice de vazios diminui de maneira relevante.

2.2.5 Solo residual de arenito

O solo residual de arenito é o solo proveniente do intemperismo químico de uma rocha arenítica. Este solo mantém a estrutura, mas com a mineralogia alterada (k-feldspato transformado em caulinita), apresenta também um comportamento sob tensão diferenciado.

A rocha sedimentar arenítica é formada por partículas de areia, silte e conchas de organismos. (GROTZINGER E JORDAN, 2013). Desta forma, os minerais comumente encontrados são o quartzo, argilominerais, feldspato, entre outros. O mesmo autor cita os principais tipos de rochas areníticas:

- a) Quartzo-Arenito: constituído mais de 90% por grãos de quartzo bem selecionados e arredondados;
- b) Arcósio: com mais de 25% de feldspato e grãos menos selecionados que os quartzarenitos;
- c) Arenito lítico: com muitos fragmentos de rochas com textura fina;
- d) Grauvaca: mistura de fragmentos rochosos e grãos angulares de quartzo e feldspato.

O solo residual de arenito, objeto deste trabalho, possui fábrica porosa, resultando em uma condutividade hidráulica mediana ($k > 10^{-7}$ m/s) (MARTINS et al., 2004). O mesmo autor

ainda cita que a composição deste solo residual é de, principalmente monocristais de quartzo (29,8%), policristais de quartzo (12,8%) e matriz de poros e argila secundária (29,5%).

Como já citado, a composição mineralógica e estrutural do solo residual está significativamente vinculada às características de resistência, compressibilidade e deformabilidade (IBAÑEZ, 2008). Neste contexto, a deformação, devido às tensões verticais deste tipo de solo difere significativamente da deformação em solos originados por diferentes meios.

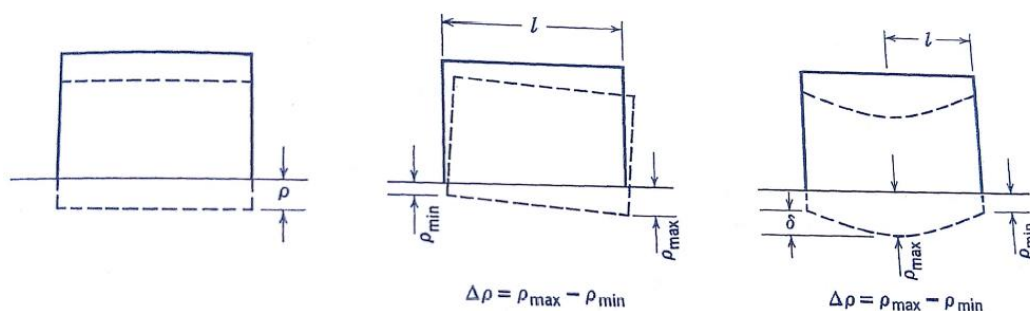
2.3 RECALQUE

Quando forças são aplicadas, ou o peso próprio das camadas de solo superiores provoca a expulsão da água ou diminuição dos espaços vazios do solo, ocorre um deslocamento vertical para baixo que é o fenômeno conhecido como recalque (OLIVEIRA, 2012). Deformações rápidas ocorrem em solos arenosos, ou argilosos não saturados, enquanto deformações lentas ocorrem em solos argilosos saturados, visto que é necessária a saída da água dos vazios do solo (PINTO, 2009).

Segundo Lambe e Whitman (1969), é importante observar o recalque devido às suas possíveis consequências quanto à aparência, utilidade e danos a estrutura. O recalque tolerado por uma estrutura depende de fatores como o tipo, tamanho, localização e uso da estrutura, entre outros.

Ainda segundo Lambe e Whitman (1969) existem 3 tipos de recalque, que podem ser observados na Figura 6.

Figura 6 – Tipos de recalque: (a) uniforme, (b) diferencial e (c) desuniforme.



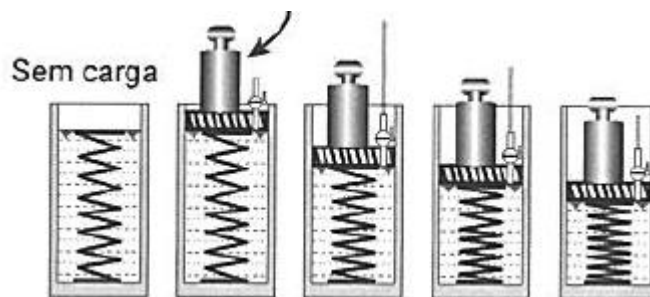
(fonte: Soil Mechanics – Lambe e Whitman, 1969)

O recalque diferencial, que é o tipo que merece atenção neste estudo, decorre da diferença de deformações sobre a base de uma área, ocasionando esforços adicionais que são prejudiciais à estrutura. Para o correto desenvolvimento do projeto, é necessário o conhecimento da grandeza dos recalques por adensamento, explica Caputo (2015), através do conhecimento das seguintes informações:

- a) Reconhecimento do subsolo;
- b) Níveis d'água;
- c) Distribuição das pressões produzidas pela carga da obra;
- d) Propriedades do solo.

A analogia mecânica desenvolvida por Terzaghi é um bom instrumento para o pleno entendimento do fenômeno de adensamento que o solo está sujeito. Deve-se considerar uma mola como sendo a estrutura sólida do solo, cuja deformação será proporcional à carga situada acima dela, localizada dentro de um cilindro cheio de água (Figura 7), sendo o êmbolo furado para a saída da água (PINTO, 2009).

Figura 7 – Analogia mecânica do processo de adensamento idealizada por Terzaghi.



(fonte: Curso básico mecânica dos solos – Pinto, 2009, adaptado de Taylor, 1948)

No instante logo após a aplicação da carga, não há deformação da mola, pois ainda não houve saída de água. Nos outros instantes, a água é percolada para a parte externa do pistão, deixando de suportar, juntamente à mola, a carga aplicada (TAYLOR, 1948).

Para tanto, o desenvolvimento da Teoria de adensamento baseia-se nas seguintes hipóteses (CRAIG, 2012):

- a) O solo é homogêneo;
- b) O solo está completamente saturado;
- c) As partículas sólidas e a água são incompressíveis;
- d) A compressão e o fluxo são unidimensionais;
- e) As deformações são pequenas;
- f) A lei de Darcy é válida para todos os gradientes hidráulicos;
- g) O coeficiente de permeabilidade e o coeficiente de compressibilidade volumétrica permanecem constantes ao longo de todo processo;
- h) Há um relacionamento peculiar, independente do tempo, entre o índice de vazios e a tensão efetiva;
- i) Há fluxo de água vertical.

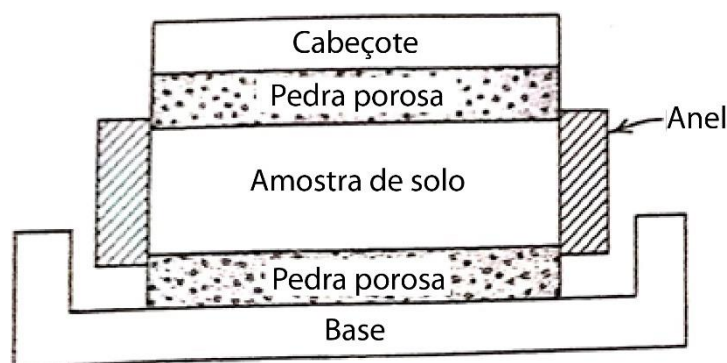
Segundo o mesmo autor, as duas principais limitações da teoria de Terzaghi são de que a compressão é unidimensional e que a variação do índice de vazios com a tensão é independente do tempo, fato este que já foi provado o contrário através de resultados experimentais.

2.3.1 Avaliação do recalque

O comportamento do solo submetido ao carregamento pode ser expresso por correlação à parâmetros obtidos por meio de ensaios realizados (PINTO, 2009). O ensaio de adensamento lateralmente confinado é um dos possíveis meios para determinar os parâmetros necessários para a avaliação do recalque (CRAIG, 2012).

O ensaio de compressão edométrica simula o comportamento de um solo em uma grande área quando o mesmo é comprimido pela ação de um peso depositado acima dele (PINTO, 2009). A Figura 8 ilustra a câmara do ensaio.

Figura 8 – Imagem esquemática da câmara do ensaio edométrico



(fonte: Soil Mechanics – Lambe e Whitman, 1969)

Craig (2012, p. 186) explica o funcionamento do aparato:

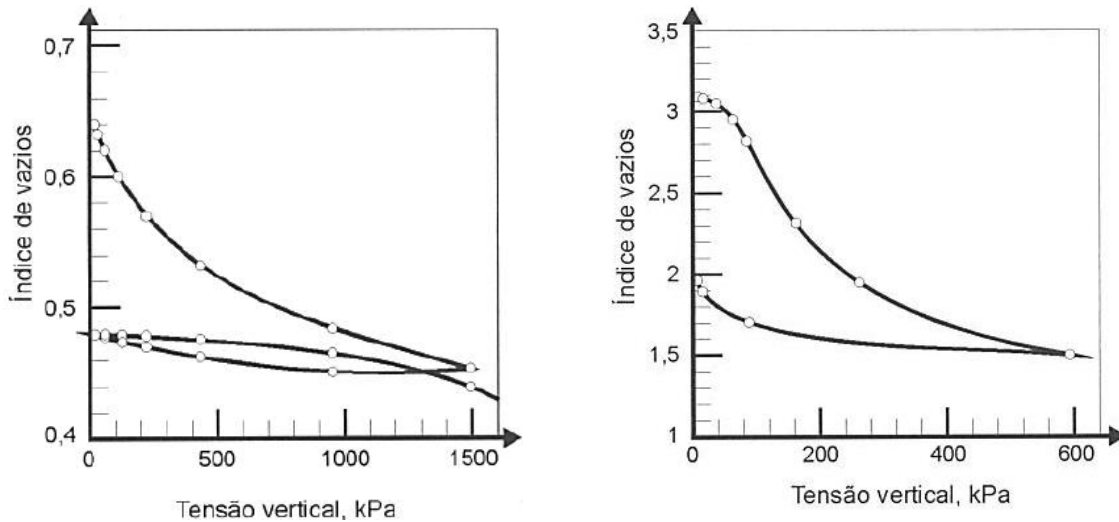
O corpo de prova tem a forma de um disco, colocado dentro de um anel de metal e entre duas pedras porosas. A pedra porosa superior, que pode se mover no interior do anel com uma pequena folga, está presa abaixo de uma placa de carregamento superior através da qual a pressão pode ser aplicada ao corpo de prova. Todo aparato localiza-se dentro de uma célula aberta de água à qual a água dos poros do corpo ensaiado tem livre acesso.

Utilizando uma prensa, é realizado um carregamento por etapas, ao passo que as deformações são registradas em diversos intervalos de tempo para cada etapa do carregamento (PINTO, 2009). Craig (2009, p.187) ainda comenta sobre a análise dos dados obtidos:

Os resultados são apresentados em um gráfico que mostra a espessura (ou a variação percentual da espessura) do corpo-de-prova ou o índice de vazios no final de cada período de incremento em relação à tensão efetiva correspondente. A tensão efetiva pode ser colocada em um gráfico de escala natural ou logarítmica.

Existem dois tipos de recalques (Figura 9), os imediatos, que ocorrem em solos granulares logo após serem submetidos ao carregamento e os diferidos, que podem ser observados em solos argiloso e evoluem ao decorrer do tempo (VARGAS, 1981).

Figura 9 – Gráficos característicos de ensaios realizados em solo arenoso e argiloso.



(fonte: Curso Básico Mecânica dos Solos – Pinto, 2009)

O recalque imediato, em solos não coesivos, ocorre em função da diminuição do volume e da compressão primária (MCCARTHY, 2014). Já em solos coesivos, o recalque diferido ocorre com uma lentidão proporcional ao tempo necessário para a água permear do corpo do solo para fora (VARGAS, 1968). O solo arenoso objeto deste estudo não teve comportamento de adensamento.

Para estimar o recalque, um dos métodos analíticos é por meio da analogia edométrica, onde é analisado o gráfico proveniente do ensaio edométrico, e os parâmetros necessários são utilizados na seguinte equação (PINTO, 2009):

$$\rho = H_1 \cdot \frac{(e_1 - e_2)}{(1 + e_1)} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

ρ = recalque;

H_1 = espessura da camada de solo;

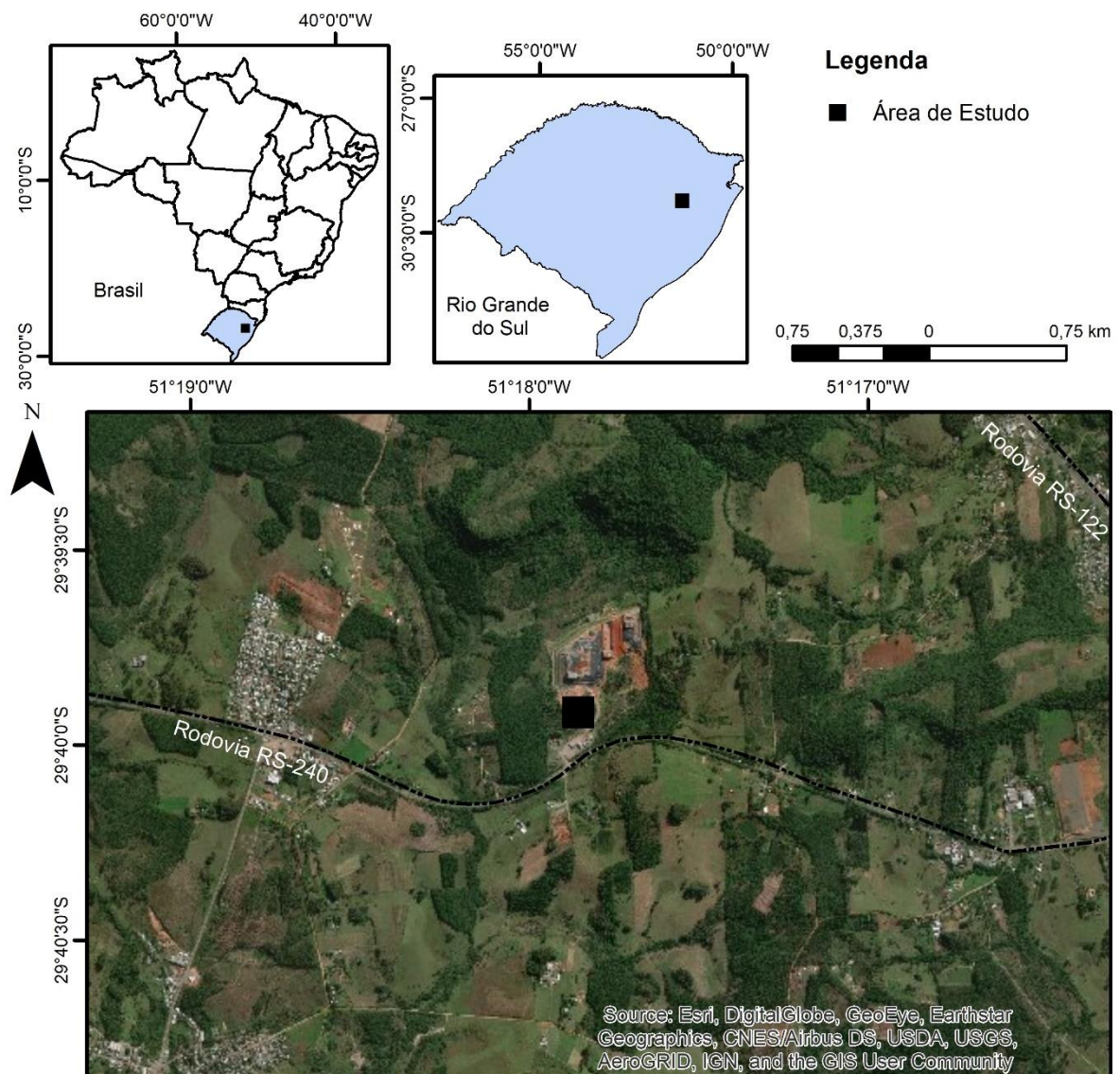
e_1 = número de vazios da carga inicial;

e_2 = número de vazios da carga inicial;

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está situada na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, junto ao município de Capela de Santana, como pode ser visualizado na Figura 10. O local onde foi realizado este estudo trata-se de um aterro industrial, mais precisamente em uma zona de ampliação, para a instalação de um novo setor.

Figura 10 - Mapa de localização da área de estudo.



(fonte: elaborado pelo autor)

O aterro industrial está situado na Rodovia Maurício Cardoso (RS 240), altura do Km 17, número 921, na cidade de Capela de Santana no Estado do Rio Grande do Sul. Localizado em torno de 50 km da capital, Porto Alegre.

Segundo o último censo, realizado em 2010, a cidade possui 11.612 habitantes e sua economia é voltada ao setor agropecuário.

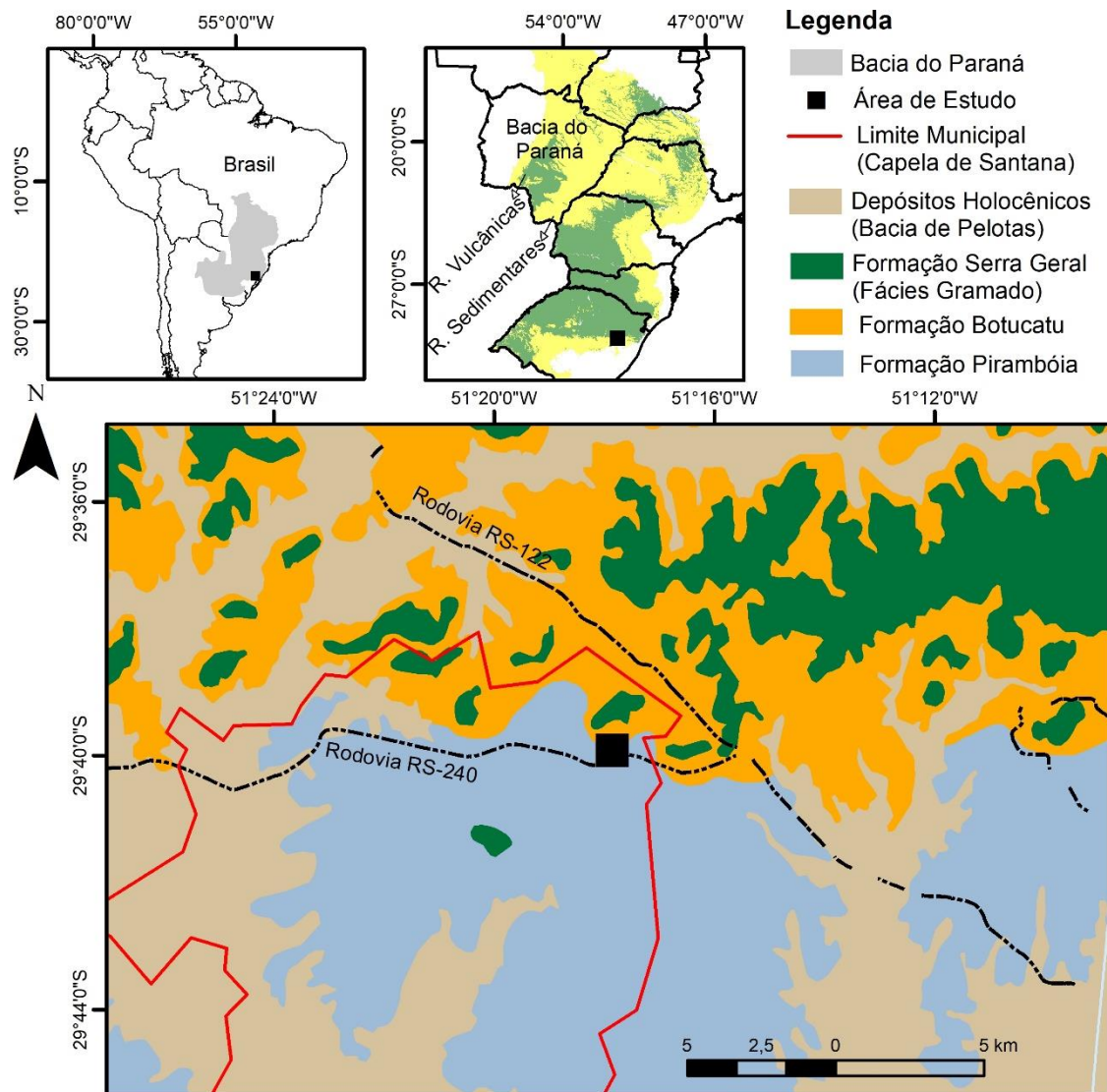
Quanto à hidrologia, a cidade está situada na bacia hidrográfica do Rio Caí, onde os principais usos estão relacionados a irrigação, setor industrial e abastecimento público.

3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

A região onde está localizada a área de estudo compreende a Escarpa Basáltica do Rio Grande do Sul, que representa a transição entre a Depressão Central e do Planalto Meridional. O mapa geológico, apresentado na Figura 11 representa a relação entre ambas as unidades, onde é comum a alternância entre as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e sedimentares da Formação Botucatu e Pirambóia, pertencentes à Bacia do Paraná. Em alguns locais, provavelmente relacionados aos recursos hídricos, registram-se os depósitos de origem holocênica, oriundos dos eventos de oscilação do nível do mar e pertencentes a Bacia de Pelotas.

Este estudo possui enfoque nos depósitos sedimentares da Formação Botucatu e Formação Pirambóia, predominantes na área, como visualiza-se na Figura 11.

Figura 11 - Mapa geológico da região da área de estudo, no município de Capela de Santana/RS.



(fonte: modificado de CPRM, 2006.)

A Bacia do Paraná é distribuída entre os territórios do Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai, caracterizando-se como uma bacia intracratônica, com área aproximada de 1.400.000,00 km² (ZALÁN et al., 1990). O conjunto de rochas sedimentares e vulcânicas que constituem a mesma, representa no mínimo em três diferentes períodos tectônicos, decorrentes da dinâmica das placas que conduziu a evolução do Gondwana, que atualmente está fragmentado na América do Sul, África, Antártica, Madagascar, Austrália e Índia. A evolução da Bacia do Paraná contou com eventos que afetaram desde as unidades Pré-Cambrianas (Escudo Sul-Rio-Grandense) até as unidades cretáceas (Formação Serra Geral) (FACCINI, 2000).

3.1.1 Formação Pirambóia

Até a década de 1970, a Formação Pirambóia era designada apenas como fácies, litotipo ou simplesmente Arenito Pirambóia e considerada como a porção inferior da Formação Botucatu. Sua área de ocorrência compreende os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina e região norte do Rio Grande do Sul (ROSA FILHO *et al.*, 2003), caracterizando-se como uma sedimentação arenosa flúvio-lacustre/eólica, depositada em ambiente de clima semi-árido (ROSA FILHO *et al.*, 2005).

Os subambientes da Formação Pirambóia são, em geral, de origem eólica, mas diferem-se em função de associações de fácies de dunas, de interdunas úmidas e aquosas, e *sandsheets*, cortadas por canais fluviais (CAETANO-CHANG & WU, 1992).

Os arenitos possuem coloração esbranquiçada, amarelada ou avermelhada, com granulometria média a muito fina, apresentando intercalações de argilitos, siltitos e localmente porções conglomeráticas com seixos de argila (SCHNEIDER *et al.*, 1974). Como estruturas sedimentares predominantes ocorrem estratificações cruzadas, acanaladas ou tabulares (CAETANO-CHANG & WU, 1992).

3.1.2 Formação Botucatu

A Formação Botucatu possui uma área total de aproximadamente 1.500.000,00 km² e ocorre na Argentina, Paraguai, Uruguai e por fim, no Brasil, onde estende-se por vários estados, do Rio Grande do Sul até o Mato Grosso. Sua idade é relativa entre o período Jurássico e Cretáceo, sendo que a sua área de afloramento é pequena, quando comparada à sua extensão, devido ao recobrimento dos derrames vulcânicos da Formação Serra Geral. A sua espessura é variável, sendo que em alguns locais é representada por uma única duna (SCHERER *et al.*, 2000) e em outros pode atingir até 100 metros.

Os arenitos eólicos da Formação Botucatu são constituídos predominantemente por minerais de quartzo, arredondados, com granulação fina a média em meio a cimento de sílica, carbonato ou limonita. No Estado do Rio Grande do Sul, são caracterizados como bimodais, com deposição eólica e com estratificação cruzada de grande porte e laminação plano-paralela (SCHERER, 1998).

O contato superior da Formação Botucatu, que ocorre com os basaltos da Fácies Gramado da Formação Serra Geral é concordante, sendo comum a intercalação destes derrames com camadas de arenitos, geralmente, com cerca de 10,00 m (REIS et al., 2014), denominados de arenitos *intertrapps*.

3.1.3 Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral (WHITE, 1908) é resultado do intenso vulcanismo fissural (SCHNEIDER et al., 1994), consequência da fragmentação do Gondwana Oeste e formação do Oceano Atlântico Sul. É integrante da Província Magmática Paraná-Entendeka, localizada na região centro-leste da América do Sul, sobre os territórios do Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina.

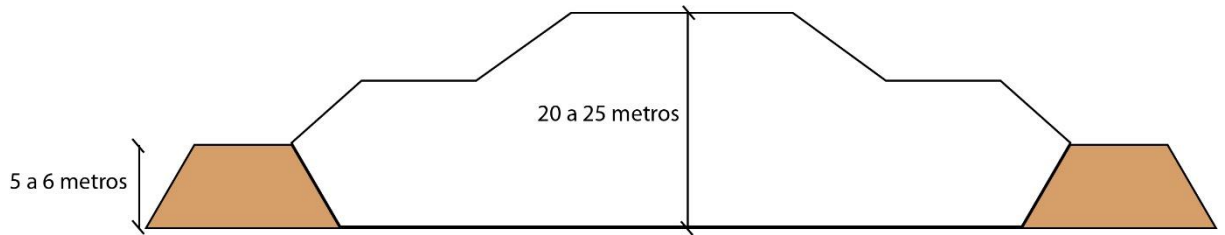
A Formação Serra Geral tem sua idade atribuída ao Cretáceo Inferior, em 120 a 130 milhões de anos (TURNER *et al.*, 1994) sendo que na maior parte dos locais, a mesma encontra-se sobreposta discordantemente à Formação Botucatu e em alguns, especialmente na porção nordeste da Bacia do Paraná, diretamente sobre o embasamento cristalino.

Os primeiros derrames da Formação Serra Geral são caracterizados pela fácies Gramado, de composição básica, que extravasaram sobre as zonas de interdunas e vales, constituintes do ambiente desértico da Formação Botucatu (WILDNER, *et al.*, 2004).

3.2 ATERRO INDUSTRIAL

Para a execução do aterro, objeto deste estudo, será utilizado o método de área com escavação, execução de diques de contenção e empilhamento. O dique de contenção é formado por material argiloso com peso específico (γ) em torno de 19,00 kN/m³ e com altura de 5,00 a 6,00 metros, localizado nos limites da área destinada ao aterro. Os resíduos serão distribuídos em camadas, até atingir uma altura máxima em torno de 20,00 a 25,00 metros, sendo o centro do aterro o ponto com maior altura. O peso específico (γ) do resíduo depositado no aterro, foi considerado como de 10,5 kN/m³. O perfil esquemático do futuro setor do aterro é ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Perfil esquemático da célula de aterro (sem escala).



(fonte: elaborado pelo autor)

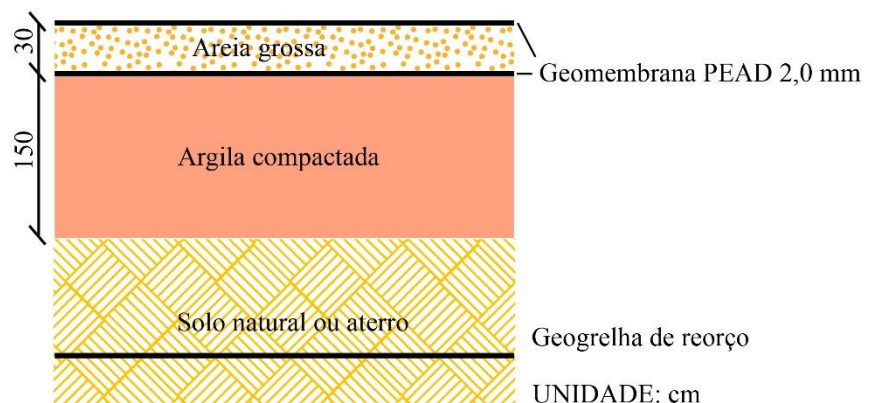
O estudo de uma possível solução na área contempla estruturas de impermeabilização inferior e superior. A impermeabilização inferior sendo executada com as seguintes camadas, a partir do solo natural:

- a) argila compactada com condutividade (k) inferior a 10^{-7} cm/s;
- b) geomembrana PEAD de 2,0 mm;
- c) areia grossa;
- d) geomembrana PEAD de 2,0 mm.

Nesta solução, está prevista a utilização de uma Geogrelha de reforço a 1,5 metros da superfície na camada de argila compactada, com resistência a tração de 65 kN/m^2 .

A Figura 13 ilustra o detalhamento simplificado da estrutura impermeabilizante inferior.

Figura 13 – Detalhamento sem escala e simplificado da estrutura impermeabilizante inferior.



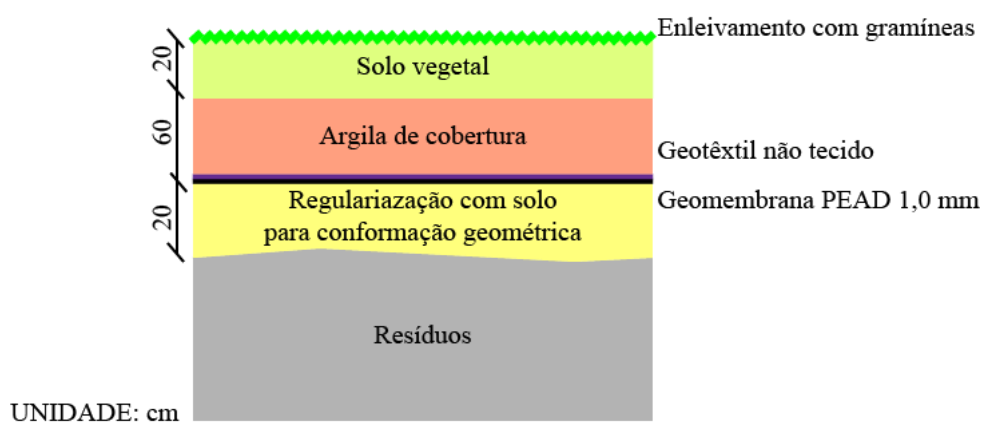
(fonte: elaborado pelo autor)

Já em relação à impermeabilização superior, atua como uma estrutura de fechamento e é composta pelas seguintes camadas, a partir do resíduo:

- a) solo para regularização geométrica;
- b) geomembrana PEAD de 1,0 mm;
- c) geotêxtil não tecido 300g/m²;
- d) argila de cobertura;
- e) solo vegetal;
- f) enleivamento.

A Figura 14 ilustra o detalhamento da estrutura impermeabilizante superior.

Figura 14 – Detalhamento sem escala da estrutura impermeabilizante superior.



(fonte: elaborado pelo autor)

3.3 SUBSOLO DO ATERRO

A camada identificada neste trabalho como de baixa resistência, consiste em um solo residual de arenito com alta porosidade (SIMÕES, 2019). O mesmo autor ainda caracterizou as propriedades físicas do solo a partir de ensaios de laboratório de amostras retiradas do local de estudo.

O peso específico real das partículas (γ_s) médio, determinado a partir de 6 ensaios pelo método do picnômetro, é de 26,27 kN/m³.

O resultado do ensaio de granulometria está apresentado na Figura 15. O solo residual de arenito é predominantemente composto por areia fina, seguido de areia média e silte (Tabela 1).

Figura 15 – Distribuição granulométrica do solo.

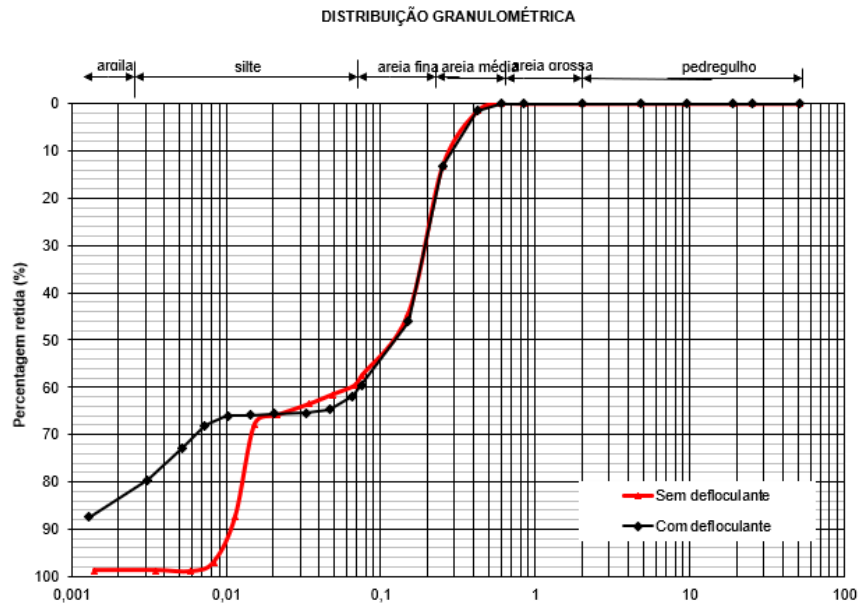


Tabela 1 – Distribuição granulométrica.

| FRAÇÃO | Teor (%) |
|-------------|----------|
| Areia fina | 35 |
| Areia média | 28 |
| Silte | 21 |
| Argila | 16 |

(fonte: elaborado pelo autor)

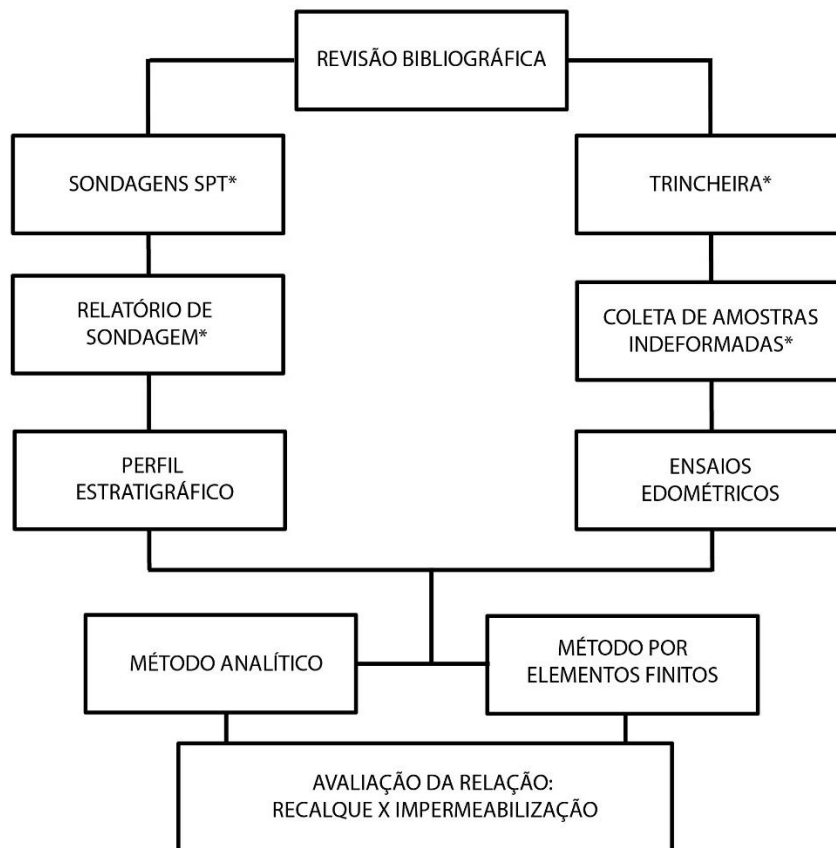
Como é possível observar na Figura 15, há diferença no resultado da granulometria quando é utilizado um agente defloculante. Neste caso a porcentagem de silte e argila aumentam significativamente, o que indica a existência de grumos, por provável cimentação entre as partículas do solo.

4 METODOLOGIA

Inicialmente foi realizada a contextualização do tema acerca dos assuntos relacionados a este estudo, tais como: resíduos sólidos industriais, com enfoque em aterros, solos residuais de arenito e recalques.

A partir disso, as etapas posteriores foram realizadas para a avaliação da deformação e sua consequência na estrutura impermeabilizante, como podem ser visualizadas no fluxograma, ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma das etapas.



(fonte: elaborado pelo autor)

As etapas marcadas com o asterisco foram realizadas por terceiros.

4.1 ENSAIO EDOMÉTRICO

O ensaio de compressão confinada, consiste no carregamento sequencial da amostra utilizando uma prensa específica para ensaios edométricos. Este tipo de ensaio permite a obtenção de informações sobre o comportamento do solo quando o mesmo é submetido a tensão.

No estudo de solos moles, este ensaio caracteriza os coeficientes de compressão, adensamento e pré-adensamento. Já no estudo de solos residuais, estes parâmetros são denominados de virtuais (HEIDEMANN, 2011), pois não são gerados pelo pré-carregamento como nos solos argilosos, mas são originados por outros processos, incluindo a cimentação.

4.1.1 Preparação da amostra e execução do ensaio

A extração das amostras indeformadas foi realizada em uma trincheira com profundidade de 3,5 metros localizada próximo ao local do furo de sondagem SPT 29 (Figura 17). Os corpos de prova foram moldados com o anel utilizado para o ensaio. Após a extração, as amostras foram colocadas em sacos plásticos para manter a umidade natural.

Figura 17 – Mapa de alocação do ponto de sondagem.



(fonte: elaborado pelo autor)

No laboratório, as amostras indeformadas foram preparadas para o início do ensaio. No primeiro momento, foi feita a moldagem da amostra de solo do anel (Figura 18 e Figura 19). Em seguida, após a coleta de alguns dados, as amostras foram colocadas nas prensas (Figura 20). No total, foram ensaiadas quatro amostras, sendo divididas em dois grupos de dois ensaios cada.

Figura 18 – Amostra indeformada com solo em excesso.



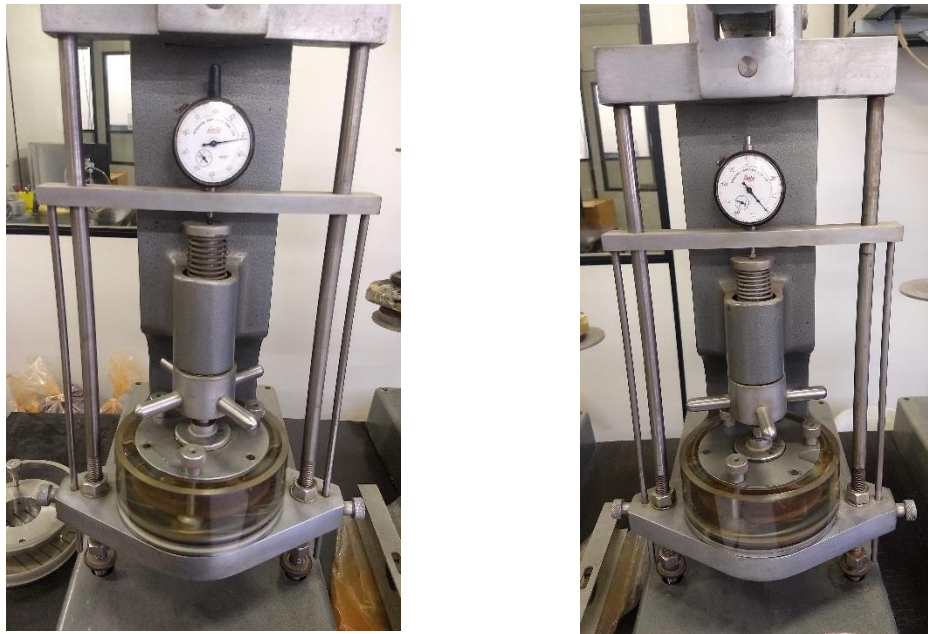
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 19 – Amostra indeformada já com moldagem concluída.



fonte: elaborado pelo autor)

Figura 20 – Prensas utilizadas para o ensaio edométrico.



fonte: elaborado pelo autor)

Antes do início do ensaio propriamente dito, foram obtidos os dados para determinação da umidade e peso do corpo de prova.

Na prensa, as amostras foram inundadas e então o carregamento foi iniciado na seguinte ordem: 12,5, 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa para o CP01 e CP03, na ordem de 12,5, 25, 50, 100, 300, 500 e 800 kPa para o CP02 e na ordem de 12,5, 25, 50, 100, 200, 500 e 800 kPa

para o CP04 , sendo o incremento de carga feito a cada 24 horas. As medidas do defletômetro foram tomadas periodicamente nos períodos de 0,12; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 15; 30; 60; 120; 240; 480 e 1440 minutos a partir de cada novo carregamento. Após atingir a carga de 800 kPa, foi realizado o descarregamento. Com as leituras do defletômetro, foi possível definir a altura da amostra e por consequência o índice de vazios para cada instante.

Cada corpo de prova ensaiado teve a manutenção da carga em um certo patamar (Tabela 2) até ser observada a estabilização do valor do defletômetro (estudo de possível efeito de fluência). Este procedimento se deu para aproximar o ensaio à situação real do empreendimento, onde é feito o empilhamento dos resíduos por etapas e verificar se o solo possui uma alteração no comportamento em função da carga constante.

Tabela 2 – Corpo de prova e carga mantida até a estabilização.

| Corpo de prova | Carga (kPa) |
|----------------|-------------|
| CP 01 | 200 |
| CP 02 | 300 |
| CP 03 | 400 |
| CP 04 | 500 |

(fonte: elaborado pelo autor)

Com os dados obtidos nestes ensaios e o auxílio de planilhas eletrônicas, foram plotados os gráficos da curva de deformação de cada amostra, a fim de observar a variação de vazios durante os estágios de carregamento.

4.2 ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DO SOLO DE FUNDAÇÃO

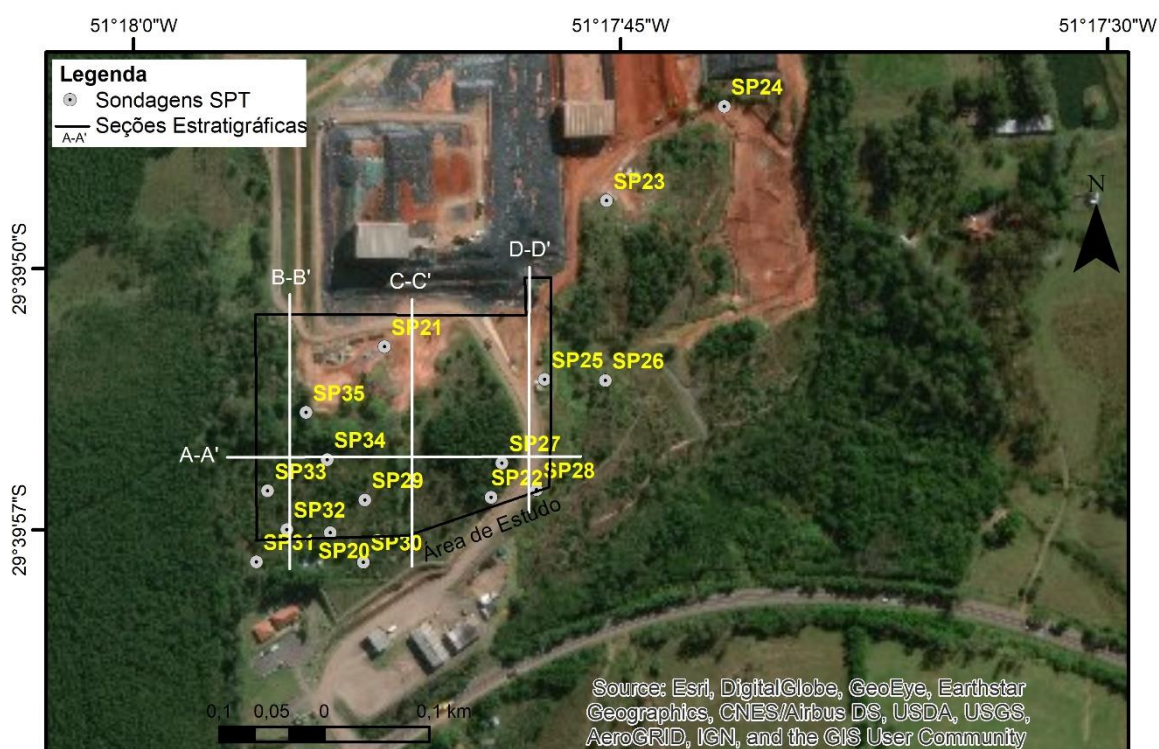
A análise da deformação do solo foi realizada a partir da definição e modelagem de duas seções da área de estudo. Inicialmente, foram desenhadas 4 seções com as informações dos relatórios das sondagens. Em seguida, a partir de um cálculo analítico, foi realizada a verificação da magnitude do recalque da simulação em um determinado ponto. Por fim, foi executada a análise da deformação diferencial na superfície do aterro em duas seções definidas como as mais críticas.

4.2.1 Sondagem SPT

As sondagens tipo SPT foram realizadas em 3 campanhas e executadas pela empresa Estasul – Sondagens Geotécnicas e Ambientais. A Campanha 1 possui 5 pontos de sondagem, a Campanha 2 com 6 pontos de sondagem e a Campanha 3 com 5 pontos de sondagem. A profundidade máxima da sondagem foi determinada a pedido do cliente.

A Figura 21 representa o local de estudo com os pontos das sondagens alocados, a figura foi montada com o *software ArcMap 10.4*.

Figura 21 – Localização do empreendimento com os furos SPT demarcados.



(fonte: elaborado pelo autor)

4.2.2 Seção estratigráfica

A importância da geração de seções estratigráficas de uma determinada área dá-se pela necessidade de conhecer a espessura das camadas do solo que está sendo estudado. Visando isto, foram definidas 4 seções da área, sendo uma na direção Leste-Oeste e as demais na direção Norte-Sul. A Figura 21 apresenta as 4 seções definidas para a análise.

A classificação estratigráfica utilizada foi baseada no número Nspt de cada camada, sendo dividido conforme a Tabela 3, abaixo.

Tabela 3 – Classificação das camadas de solo conforme o Nspt.

| RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO | Número de golpes |
|--------------------------|------------------|
| Entre 4 a 6 | 4 - 6 |
| Entre 8 a 12 | 8 - 12 |
| Entre 15 a 20 | 15 - 20 |
| Maior que 20 | > 20 |

(fonte: elaborada pelo autor)

Foram geradas quatro seções da área de estudo. A Tabela 4 apresenta os pontos de sondagem que foram utilizados para a geração de cada seção.

Tabela 4 – Pontos de sondagem considerados nas seções estratigráficas.

| SEÇÃO ESTRATIGRÁFICA | Pontos de sondagem considerados |
|----------------------|---------------------------------|
| A – A' | 33, 34, 29, 27 e 28 |
| B – B' | 35, 33 e 32 |
| C – C' | 21, 29 e 30 |
| D – D' | 25, 27 e 28 |

(fonte: elaborada pelo autor)

4.2.3 Cálculo analítico e simulação

O cálculo da deformação vertical de um certo ponto, através do método analítico, foi realizado a fim de validar a simulação do recalque através do método por elementos finitos (modelagem numérica).

4.2.3.1 Método analítico

Foi realizado o cálculo da deformação vertical da camada de faixa do Nspt de 4 a 6 do furo SPT30, localizada na frente sul do dique de contenção do aterro. Foi escolhido este ponto para

a validação da simulação, por possuir uma sobrecarga conhecida e geometria passível de simplificação.

As simplificações consideradas para este cálculo foram as seguintes: a posição do furo de sondagem ser exatamente no eixo do dique e a estrutura possuir comprimento de base de 20,0 metros, altura constante de 5,5 metros. As camadas inferiores à camada estudada não sofrem deformação vertical quando submetidas ao carregamento.

O perfil estratigráfico da sondagem SPT30 é observado na Figura 22, sendo a espessura da primeira camada de 2,0 m, da camada de solo residual de arenito de 12,6 m e o nível de água está localizado a 4,35 m de profundidade.

Figura 22 –Relatório parcial de sondagem do SPT30.

| PERFIL DE SONDAAGEM | | | | COORDENADAS (m): E: 471159,753 N: 6718178,432 | | | |
|---|---------|----|----|---|-------------------|----------------------------------|---|
| SONDAAGEM SP30 | | | | COTA 74,45 | | INÍCIO 23/10/2017 FIM 23/10/2017 | |
| GOLPES PARA PENETRAÇÃO DE 30 cm DO AMOSTRADOR | | | | PROFUN. DA CAMADA (m) | COTA DE NÍVEL (m) | PESO. AMOS. TRA (g) | N.A. (m) |
| N.º DE GOLPES | GRÁFICO | | | PERFIL GEOLÓGICO | CONS.* OU COMP.** | CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL | |
| | 10 | 20 | 30 | | | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 73,45 | | |
| 30 | 15 | 15 | 15 | 2 | 72,45 | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 71,45 | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 4 | 70,45 | | |
| 2 | 3 | 3 | 3 | 5 | 69,45 | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 6 | 68,45 | | |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 7 | 67,45 | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 8 | 66,45 | | |
| 2 | 3 | 2 | 2 | 9 | 65,45 | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 10 | 64,45 | | |
| 2 | 2 | 3 | 3 | 11 | 63,45 | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 12 | 62,45 | | |
| 2 | 2 | 3 | 3 | 13 | 61,45 | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 60,45 | | |
| 1 | 2 | 4 | 4 | 15 | 59,45 | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 16 | 58,45 | | |
| 2 | 3 | 3 | 3 | 17 | 57,45 | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 18 | 56,45 | | |
| 1 | 2 | 4 | 4 | | | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | | | | |
| 2 | 3 | 3 | 3 | | | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | | | | |
| 3 | 3 | 3 | 3 | | | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | | | | |
| 2 | 3 | 4 | 4 | | | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | | | | |
| 3 | 4 | 5 | 5 | | | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | | | | |
| 4 | 5 | 6 | 6 | | | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | | | | |
| 4 | 5 | 8 | 8 | | | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | | | | |
| 5 | 7 | 9 | 9 | | | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | | | | |
| 5 | 7 | 9 | 9 | | | | |
| 15 | 15 | 15 | 15 | | | | |
| GRAU DE FRATU R AÇÃO | | | | Leitura | Intervalo | N.A.(m) | Método |
| RECUPERAÇÃO (%) | | | | 1 | 24h | 4,35 | T. Cavadeira |
| Lavagem por tempo (10 min.) Início (m):-- | | | | 2 | -- | -- | T. Espiral |
| Estágios: 1.º -- cm - 2.º -- cm - 3.º -- cm | | | | 3 | -- | -- | Lavagem |
| | | | | | | | OBS. |
| | | | | | | | Avanço a seco até 2,45m sem encontrar água. |

(fonte: relatório de sondagem da Estasul)

Foram tomados 3 pontos igualmente espaçados na camada de solo residual para o cálculo do recalque, este procedimento foi realizado a fim de aumentar a precisão do resultado. Para cada ponto, foram calculadas a tensão inicial, decorrente do peso das camadas de solo acima do ponto e a tensão final, onde é somado o valor referente à carga do dique de contenção.

A tensão inicial do ponto foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$\sigma'_v = \sigma_v - u$$

Onde:

σ'_v : tensão vertical efetiva

σ_v : tensão vertical total

u: pressão neutra

Já o método utilizado para o cálculo da sobrecarga (dique), foi o método de Carothers-Terzaghi.

$$\sigma_z = \frac{Q}{\pi} (\sin 2\alpha + 2\alpha)$$

Onde:

σ_z : é a tensão no ponto escolhido;

Q: é a sobrecarga;

α : é o ângulo entre o limite e o ponto central da atuação da sobrecarga.

Por fim, com os valores de tensão inicial e final (inicial + carregamento) encontrou-se no gráfico de compressão confinada o índice de vazios para cada tensão. E utilizando a equação abaixo, definiu-se o recalque para cada uma das 3 faixas da camada de solo estudada.

$$\rho = H_1 \cdot \frac{(e_1 - e_2)}{(1 + e_1)}$$

Os recalques das faixas foram somados, e então o recalque total foi calculado.

4.2.3.2 Método por elementos finitos

Foram modeladas as duas seções consideradas mais críticas quanto ao recalque diferencial. No primeiro momento foi simulado o carregamento do dique de contenção na região direita do perfil C, onde está localizado o furo SPT30 para a validação da magnitude de recalque da simulação com o recalque encontrado através do método analítico. Em seguida, foi realizada a análise da deformação na superfície do aterro nas seções A - A' e C - C'.

As considerações e simplificações para a simulação foram as seguintes:

- Foi utilizada a média do módulo edométrico obtido a partir do ensaio com os corpos de prova, e um coeficiente de Poisson de 0,3;
- Por limitações da versão do software utilizado, as camadas do solo de média e alta rigidez foram consideradas uma única camada com as mesmas propriedades;
- O carregamento do aterro ocorre em uma única etapa.

Para a inserção das propriedades de rigidez do solo na camada estudada, foi necessário plotar o gráfico de rigidez do solo, onde é relacionado o módulo de elasticidade com a tensão normalizada pelo peso específico do solo. Já para as demais camadas, foram arbitrados módulos de elasticidade constantes: para a camada de Argila de 4.000 kPa e para a camada inferior de 16.000 kPa. As simulações e análises elásticas foram realizadas com o *software Sigma/W 2019, Geostudio*.

5 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do ensaio de compressão confinada e demais dados referentes aos cálculos de recalque e simulação computacional realizada. Objetiva-se avaliar o processo de deformação vertical da camada de solo e os recalques diferenciais.

5.1 ENSAIO EDOMÉTRICO

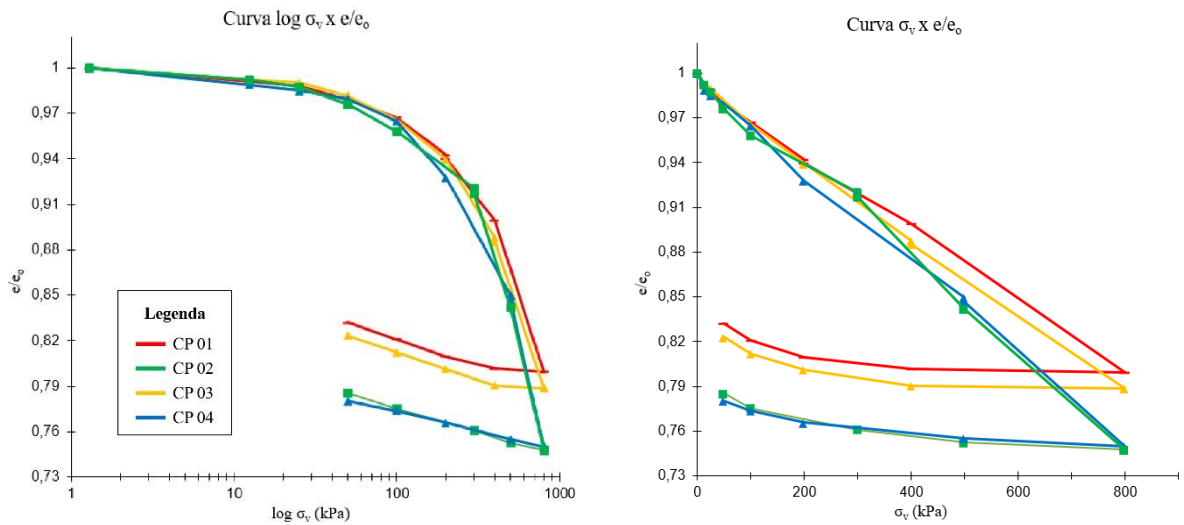
Os valores medidos dos corpos de prova utilizados nos ensaios edométricos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela com valores medidos dos corpos de prova.

| CORPO DE PROVA | Peso específico (kN/m ³) | Índice de vazios | Umidade (%) |
|----------------|--------------------------------------|------------------|-------------|
| CP01 | 18,33 | 0,7412 | 21,43 |
| CP02 | 17,63 | 0,7931 | 20,26 |
| CP03 | 18,77 | 0,7209 | 22,90 |
| CP04 | 17,86 | 0,7674 | 20,09 |

(fonte: elaborada pelo autor)

Na Figura 23 são apresentadas as curvas tensão vertical x variação do índice de vazios nas escalas semi-logarítmica e linear. O índice de vazios foi normalizado pelo índice de vazios inicial, a fim de possibilitar uma análise comparativa entre os ensaios.

Figura 23 – Curvas tensão *versus* variação no índice de vazios.

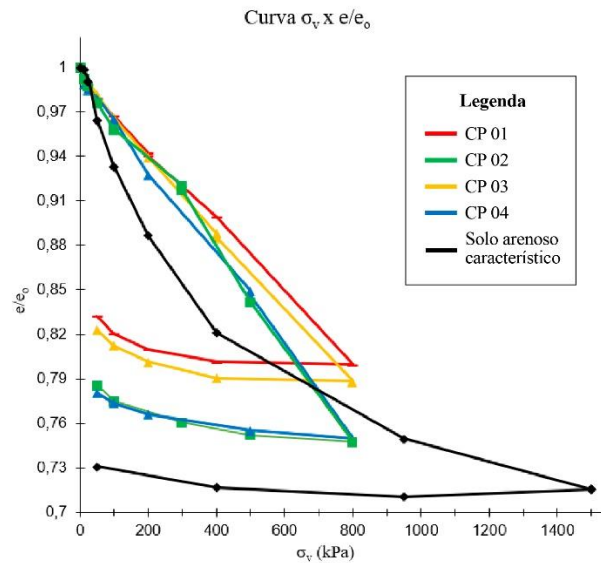
(fonte: elaborado pelo autor)

Os ensaios edométricos foram realizados em 2 conjuntos, sendo o primeiro conjunto os ensaios CP01 e CP03 e o segundo conjunto os ensaios CP02 e CP04. Visualizando-se os gráficos, é possível constatar uma divisão em dois grupos de curvas de variação no índice de vazios. Houve um comportamento semelhante entre os ensaios realizados em conjunto, o que pode ter ocorrido em função do período em que foram realizados os ensaios, mas não foi possível estabelecer uma causa clara. Nota-se que foi observada uma pequena alteração nas leituras do defletômetro quando o ar condicionado do laboratório era acionado (tipicamente da ordem de 0,4 mm).

Também foi possível constatar que não houve grandes efeitos de fluência, independente da carga utilizada nesta etapa do ensaio ou do tempo no qual a carga foi mantida. Foram observadas variações de 0,002 no índice de vazios independente da carga utilizada ao longo de 15 dias.

O gráfico da Figura 26 relaciona as curvas dos ensaios realizados neste trabalho com a curva do ensaio de um solo arenoso obtido na literatura (PINTO, 2009).

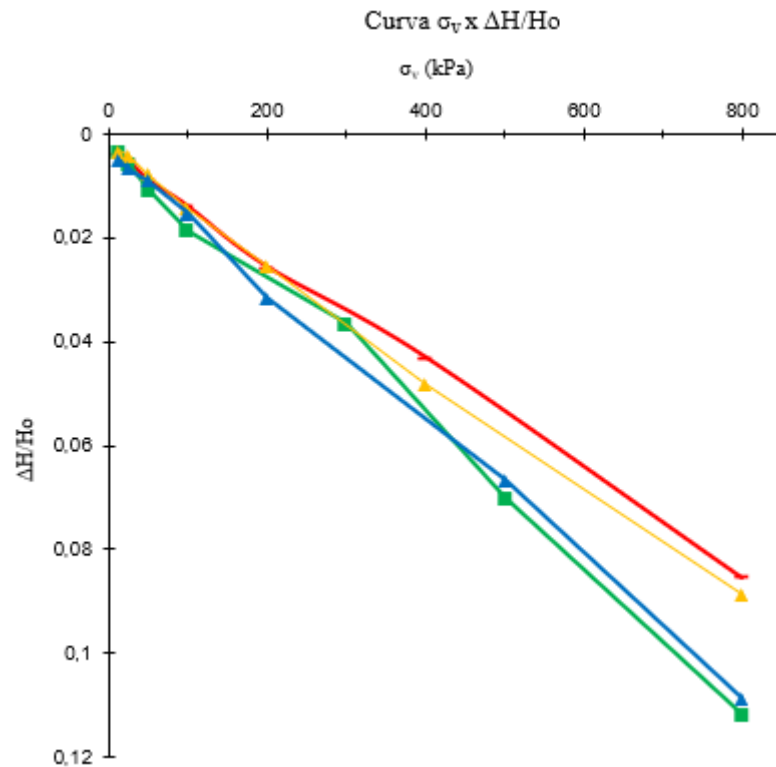
Figura 24 – Curvas tensão *versus* variação no índice de vazios comparando com ensaio característico.



(fonte: elaborado pelo autor)

É possível visualizar que as 4 curvas resultantes dos ensaios possuem uma taxa de diminuição do índice de vazios relativamente constantes até atingir o carregamento de 800 kPa. Por outro lado, a curva de um solo arenoso característico apresenta uma diminuição da taxa de índice de vazios já a partir da tensão vertical de 200 kPa, e a partir desse ponto a taxa diminui a cada novo carregamento, evidenciando o aumento da rigidez com o aumento da tensão efetiva. Nos ensaios realizados neste trabalho as curvas apresentam valores mais ou menos constantes, que parecem ser resultantes dos efeitos de uma microestrutura do solo.

Por último, a Figura 25 apresenta o gráfico relacionando a tensão com a variação da altura da amostra normalizada pela altura inicial.

Figura 25 – Gráfico relacionando tensão *versus* variação na altura.

(fonte: elaborado pelo autor)

5.2 MÉTODO ANALÍTICO

O Quadro 1 retrata os cálculos realizados para a definição do valor de tensão efetiva inicial dos três pontos no eixo do dique na camada de solo residual de arenito.

Quadro 1 - Valores obtidos para a tensão inicial.

| Ponto | H_{ponto} (m) | Argila σ' (kPa) | Solo residual de arenito | | | Inicial σ' (kPa) |
|----------|------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------|-----------------|----------------------------|
| | | | σ (kPa) | u (kPa) | σ' (kPa) | |
| A | 4,1 | 38 | 38,85 | 0 | 38,85 | 76,85 |
| B | 8,3 | 38 | 116,55 | 38,75 | 77,80 | 115,80 |
| C | 12,5 | 38 | 194,25 | 79,95 | 114,30 | 152,30 |

(fonte: elaborada pelo autor).

Já o Quadro 2 retrata os cálculos realizados para a definição da tensão da sobrecarga do dique e a conseqüente tensão final nos pontos já citados.

Quadro 2 - Valores obtidos para a tensão final.

| Ponto | Sobrecarga (dique) | | | Final |
|-------|--------------------|----------------|------------------|----------------|
| | cat. oposto | α (rad) | σ_z (kPa) | σ (kPa) |
| A | 10 | 1,182 | 95,14 | 171,99 |
| B | 10 | 0,878 | 85,00 | 200,80 |
| C | 10 | 0,675 | 72,16 | 224,46 |

(fonte: elaborada pelo autor).

Por fim, com os valores de tensão inicial e tensão final em mãos, buscou-se os valores de tensão nos gráficos dos ensaios. Foram obtidos os seguintes valores (Quadro 3, Quadro 4, Quadro 5 e Quadro 6):

Quadro 3 – Recalque total da camada com os dados do ensaio 1

| Faixa | Ensaio 1 | | | |
|-------|----------|-------|-------|------------|
| | H1 (m) | e1 | e2 | ρ (m) |
| A | 4,2 | 0,722 | 0,704 | 0,044 |
| B | 4,2 | 0,714 | 0,696 | 0,044 |
| C | 4,2 | 0,708 | 0,691 | 0,042 |
| Total | | | | 0,130 |

(fonte: elaborada pelo autor).

Quadro 4 – Recalque total da camada com os dados do ensaio 2

| Faixa | Ensaio 2 | | | |
|-------|----------|-------|-------|------------|
| | H1 (m) | e1 | e2 | ρ (m) |
| A | 4,2 | 0,766 | 0,748 | 0,043 |
| B | 4,2 | 0,757 | 0,741 | 0,038 |
| C | 4,2 | 0,752 | 0,738 | 0,034 |
| Total | | | | 0,115 |

(fonte: elaborada pelo autor).

Quadro 5 – Recalque total da camada com os dados do ensaio 3

| Faixa | Ensaio 3 | | | |
|-------|----------|-------|-------|------------|
| | H1 (m) | e1 | e2 | ρ (m) |
| A | 4,2 | 0,703 | 0,684 | 0,047 |
| B | 4,2 | 0,693 | 0,678 | 0,037 |
| C | 4,2 | 0,688 | 0,671 | 0,042 |
| Total | | | | 0,126 |

(fonte: elaborada pelo autor).

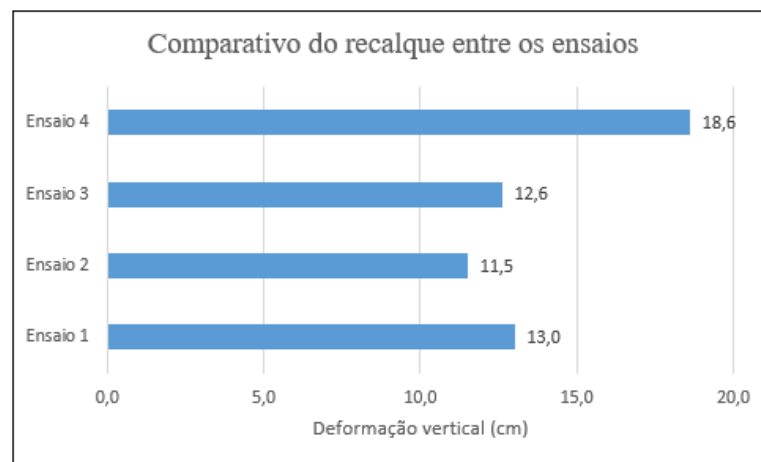
Quadro 6 – Recalque total da camada com os dados do ensaio 4

| Faixa | Ensaio 4 | | | |
|--------------|----------|-------|-------|--------------|
| | Hl (m) | e1 | e2 | ρ (m) |
| A | 4,2 | 0,748 | 0,721 | 0,065 |
| B | 4,2 | 0,737 | 0,711 | 0,063 |
| C | 4,2 | 0,729 | 0,705 | 0,058 |
| Total | | | | 0,186 |

(fonte: elaborada pelo autor).

A comparação entre os resultados para cada ensaio pode ser observada na Figura 26.

Figura 26 – Gráfico comparativo com os valores referentes a cada ensaio.



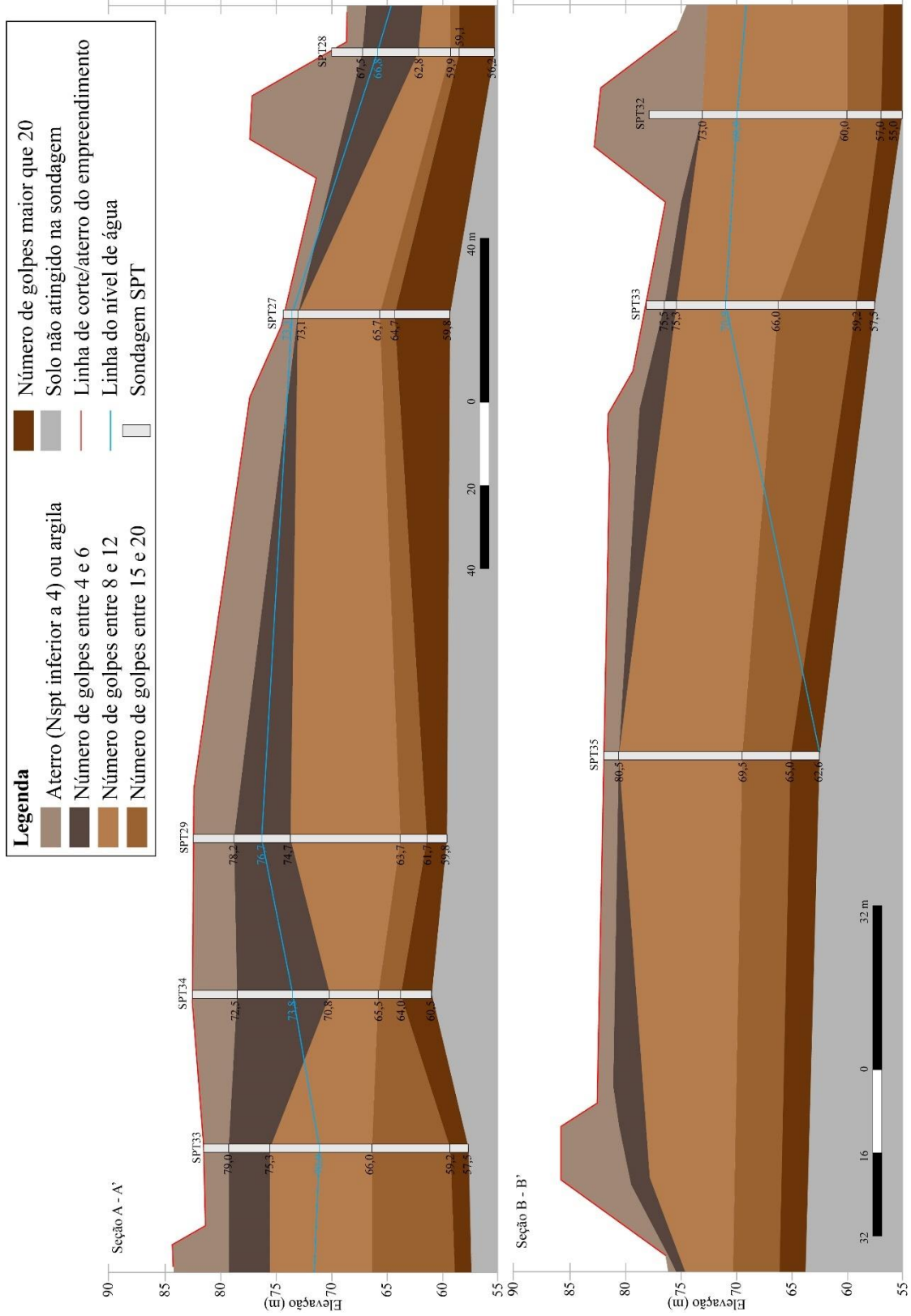
(fonte: elaborado pelo autor)

Essa variação entre os valores de deformação vertical calculados dá-se pela variabilidade inerente, tanto da coleta das amostras indeformadas, quanto da realização dos ensaios edométricos.

5.3 SIMULAÇÃO

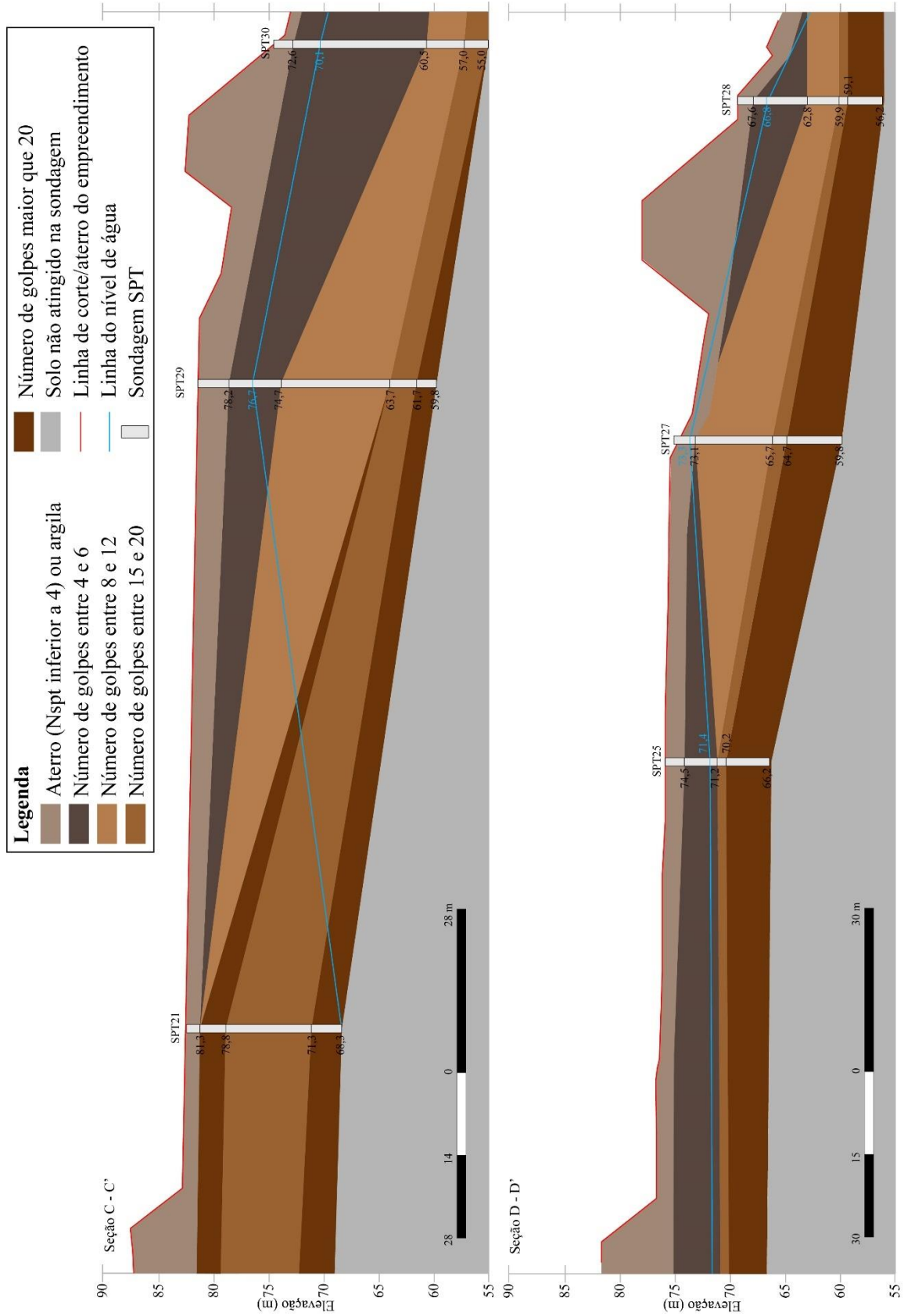
Os dados dos relatórios de sondagem, somados ao levantamento topográfico previamente realizado, resultaram nos seguintes perfis estratigráficos (Figura 27, Figura 28).

Figura 27 –Seção estratigráfica A e B.



(fonte: elaborado pelo autor).

Figura 28 – Seção estratigráfica C e D.



(fonte: elaborado pelo autor).

A seção onde é constatada uma espessura maior da camada de golpes entre 4 e 6 do solo sob o aterro é no ponto do SPT34 na seção A. Já a camada mais espessa sob o dique de contenção, é constatada na seção C, mais precisamente no SPT30.

Fazendo uma análise das quatro seções e dos relatórios de sondagens, conclui-se que as regiões com uma espessura maior da camada de solos com baixos valores de NSPT, e por consequência sujeitas a uma maior deformação vertical, estão localizados nas regiões sudoeste e sudeste do aterro (Figura 29).

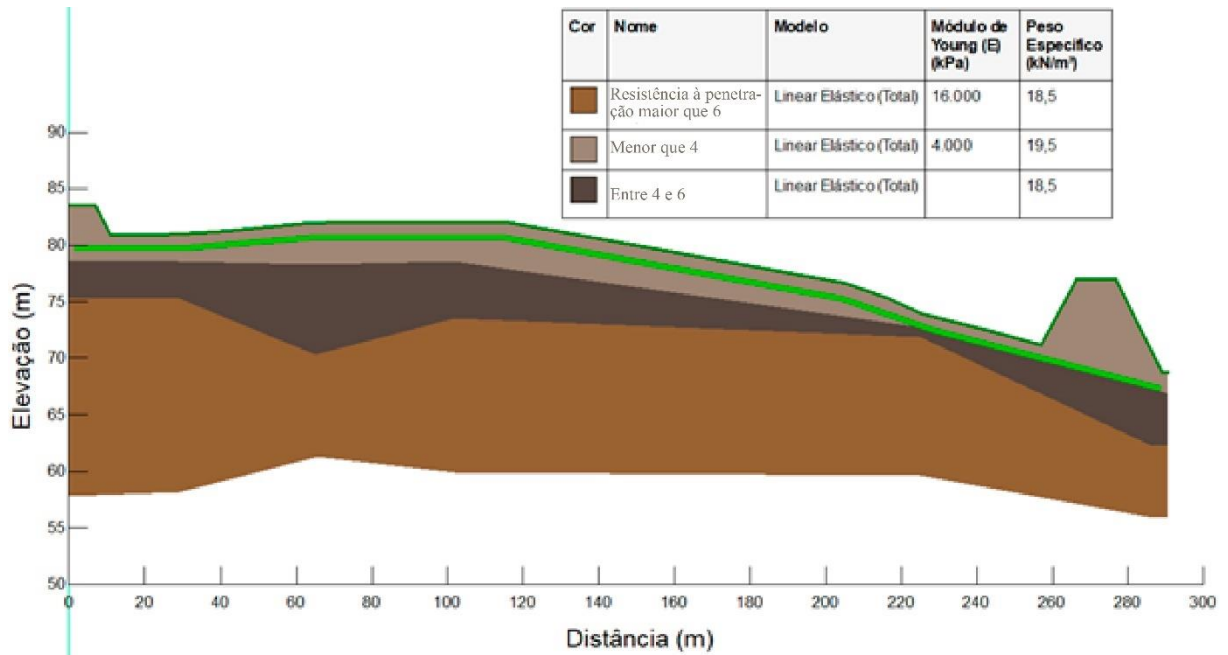
Figura 29 – Localização das regiões consideradas mais críticas quanto ao recalque.



(fonte: elaborado pelo autor)

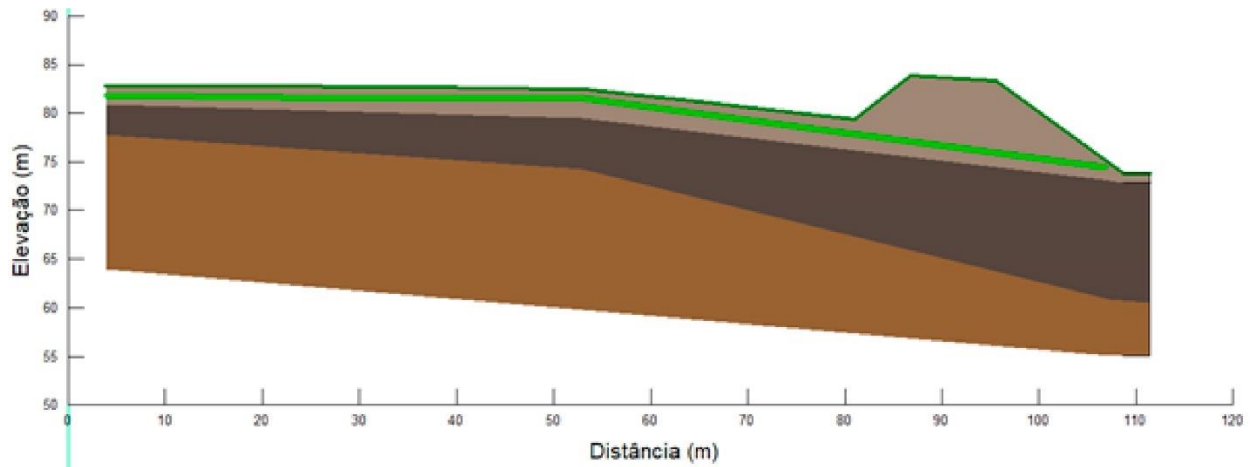
Visto isso, as seções escolhidas para realizar a simulação foram as seções A e C. Sendo a primeira etapa, a modelagem destas seções (Figura 30 e Figura 31). A marcação em verde representa a geogrelha de reforço da fundação, que está presente em todas análises realizadas:

Figura 30 – Modelo da seção A.



(fonte: elaborado pelo autor)

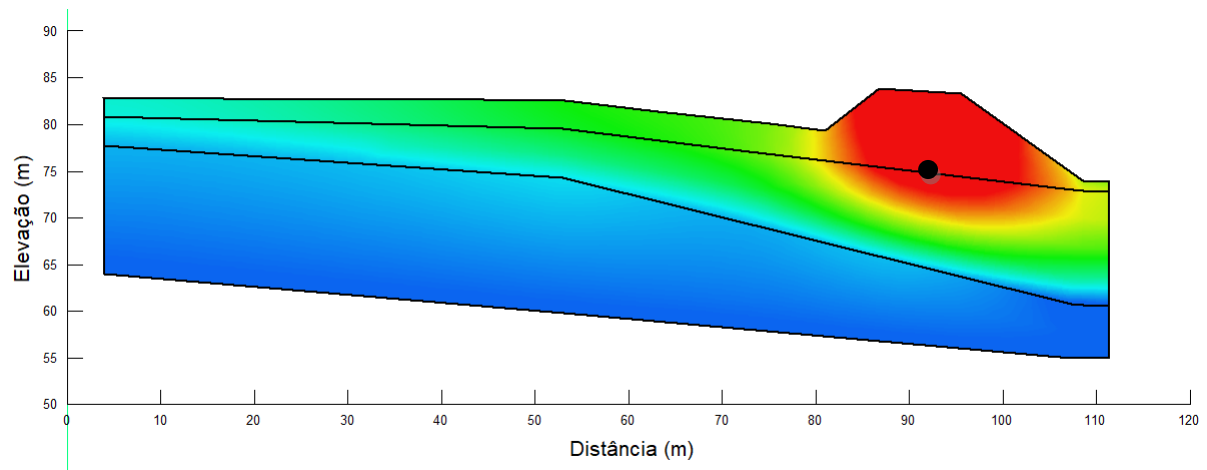
Figura 31 – Modelo da seção C.



(fonte: elaborado pelo autor)

O resultado da análise da seção C quanto ao recalque no eixo do dique está apresentado na Figura 32.

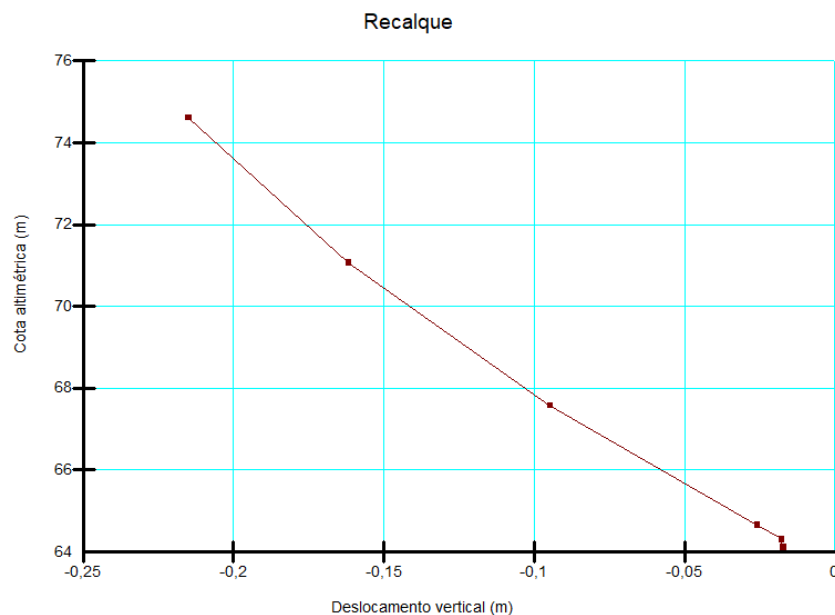
Figura 32 – Análise da seção C quanto o recalque no eixo do dique.



(fonte: elaborado pelo autor)

O valor do recalque obtido no ponto entre as camadas de argila e de solo residual de arenito junto ao eixo do dique, é de 22 cm (Figura 33). Este resultado vai de encontro com o resultado calculado por meio do método analítico para este mesmo ponto, levando em consideração as simplificações quanto à geometria da sobrecarga e as características do solo. Desta forma, é possível verificar que a simulação realizada está ajustada à situação real do subsolo da área.

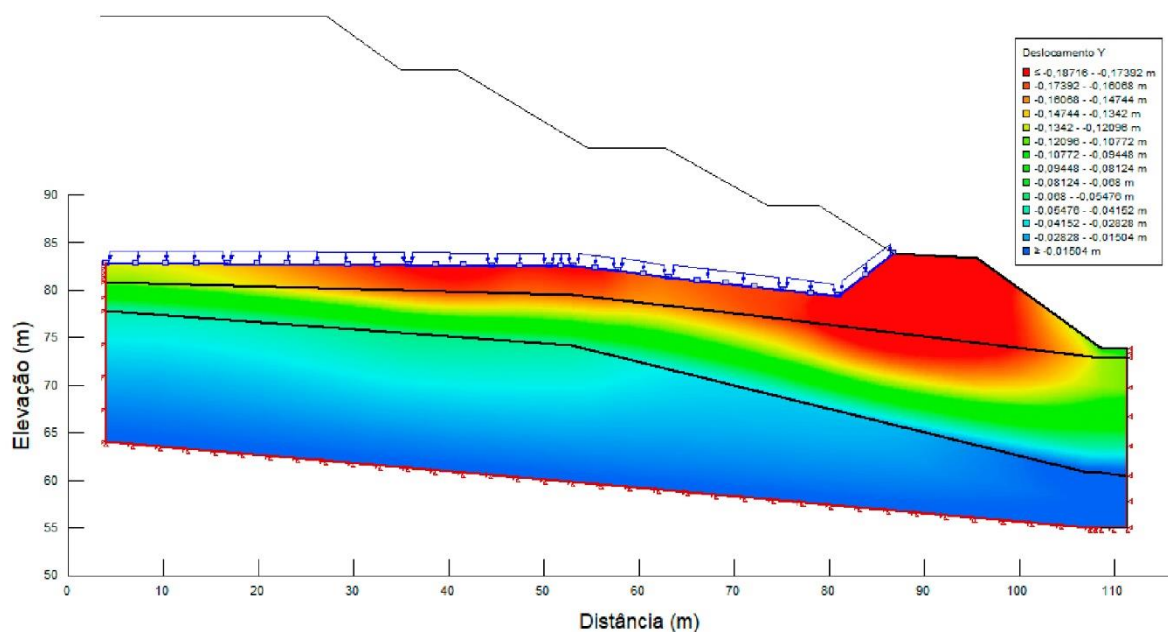
Figura 33 – Gráfico relacionando cota altimétrica com o recalque no eixo do dique na camada do solo objeto do estudo.



(fonte: elaborado pelo autor)

O resultado da análise da seção C quanto ao recalque na fundação do aterro está apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Análise da seção C quanto o recalque na fundação.

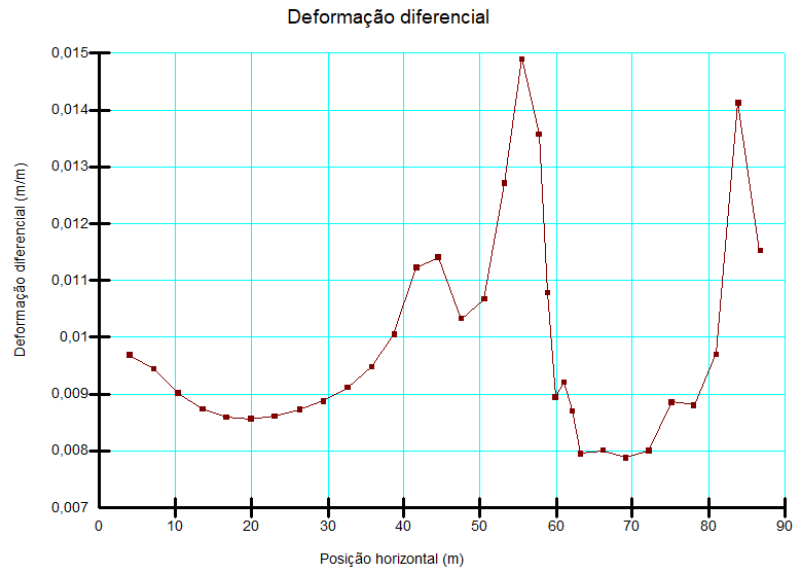


(fonte: elaborado pelo autor)

A partir da distância de 30 metros até 85 metros do ponto zero, onde há um aumento gradual da espessura da camada de solo residual de arenito, ocorre também uma diminuição da sobrecarga proveniente do aterro. A partir do resultado da análise desta situação, onde há uma relativa manutenção da deformação vertical, observa-se a existência de uma relação entre os dois parâmetros. Não é somente a espessura da camada que confere uma região mais crítica quanto à deformação, mas sim a união deste fator com a sobrecarga a qual a região está submetida.

Em relação à impermeabilização, é possível observar no gráfico da Figura 35 que existem duas regiões com maior taxa de deformação vertical entre dois pontos. A primeira região está localizada entre as distâncias de 50 m e 60 m, onde na seção é verificada uma alteração acentuada na superfície do solo. O segundo ponto está localizado entre as distâncias de 80 m e 90 m, próximo ao topo do dique. Este local foi submetido ao carregamento do dique antes de ocorrer o carregamento do aterro, desta forma sofreu um recalque proveniente ao primeiro carregamento, gerando um maior recalque diferencial entre a região que já ocorreu o recalque com a região que está sob o novo carregamento. As taxas de deformação de 1,5% e 1,4% são menores que a taxa de deformação suportada pela membrana (10%), segundo o guia de utilização do produto.

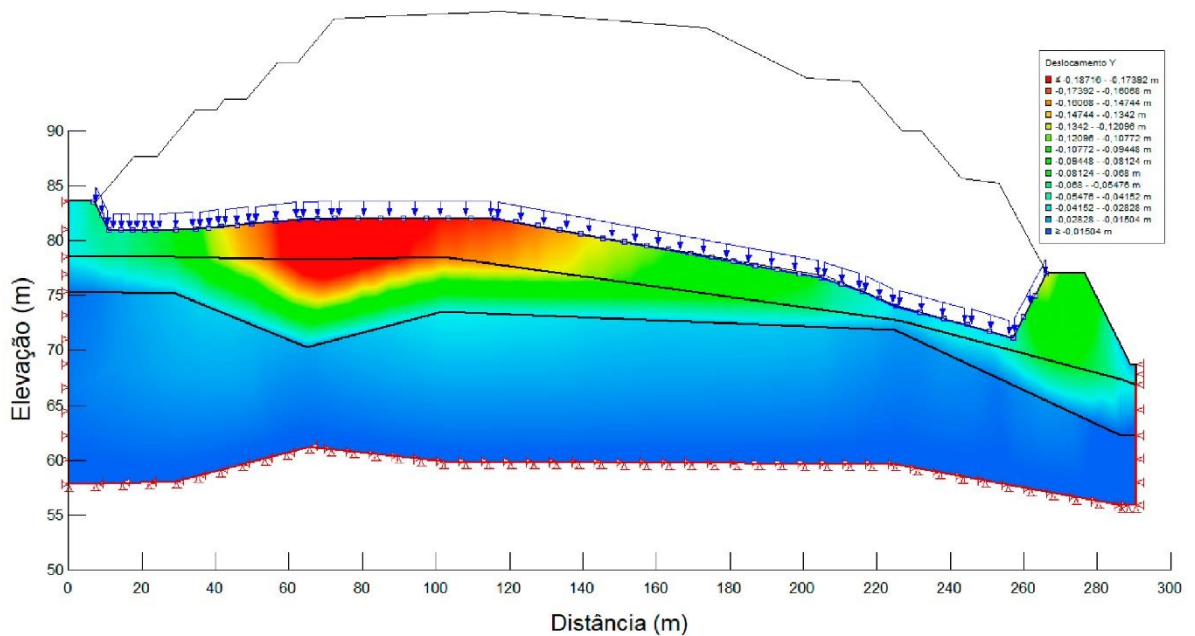
Figura 35 – Gráfico relacionando a deformação da membrana com a posição horizontal na seção C.



(fonte: elaborado pelo autor)

Após isto, foi executada a análise da seção A quanto ao recalque da fundação do aterro (Figura 36).

Figura 36 – Análise da seção A quanto o recalque na fundação.

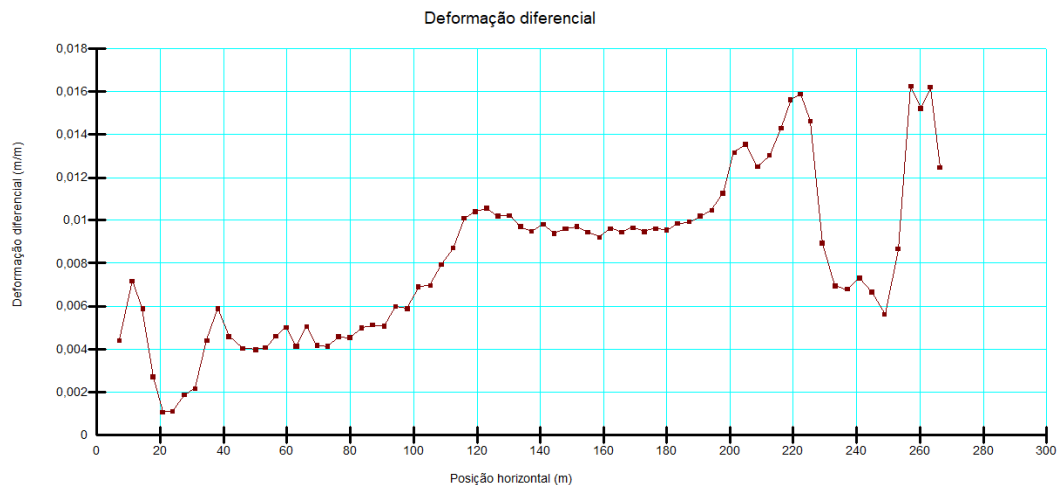


(fonte: elaborado pelo autor)

A seção A apresenta a região mais crítica quanto ao recalque na região entre as posições de 40 m a 140 m, justamente por esta região apresentar os dois parâmetros determinantes do recalque com seus maiores valores de toda seção.

De forma análoga à análise realizada na seção C, a seção A não apresenta uma maior deformação da membrana na região mais crítica quanto ao recalque, mas sim nas regiões com uma maior diferença na magnitude do recalque e na região do dique, onde ocorreu a deformação vertical do solo anteriormente ao carregamento do aterro, sendo o valor das deformações de 1,6% (Figura 37), também menores que a deformação suportada pela membrana.

Figura 37 – Gráfico relacionando a deformação da membrana com a posição horizontal na seção A.



(fonte: elaborado pelo autor)

6 CONCLUSÕES

Este trabalho estudou o impacto do recalque da camada de solo residual de arenito em uma possível solução na área quanto a impermeabilização de fundo de um aterro industrial situado no município de Capela de Santana/RS, uma vez que no caso de uma ruptura na impermeabilização, poderiam ocorrer danos ambientais severos para a região, visto que o aterro industrial possui materiais contaminantes.

Os ensaios de compressão confinada foram tratados por meio de gráficos relacionando o índice de vazios com a tensão a que o corpo de prova estava submetido, concluindo sobre a significativa porosidade do solo analisado. Além disso, o ensaio de compressão confinada com carga constante (fluência) permitiu verificar que não ocorreram alterações relevantes na estrutura do solo quando o mesmo era submetido a um carregamento constante ao longo do tempo.

Após a realização das simulações, foi possível concluir que a deformação vertical da fundação do aterro apresenta relação direta com a espessura da camada de solo residual de arenito e com a sobrecarga a qual o ponto está submetido.

Na análise da seção C, os dois pontos de maior deformação diferencial estão localizados em um ponto onde há acentuada irregularidade na superfície e outro, onde já ocorreu deformação vertical devido a um carregamento anterior, resultando em um recalque diferencial neste local. Ambos valores de deformação (1,5 % e 1,4 %) são inferiores ao máximo de deformação que a estrutura impermeabilizante pode absorver (10 %).

Para a seção A, os dois pontos de maior deformação diferencial também estão localizados em pontos de maior irregularidade na superfície e onde já ocorreu deformação vertical devido a um carregamento anterior, resultando também em um recalque diferencial neste local. Ambos valores de deformação (1,6 %) também são inferiores ao máximo de deformação que a estrutura impermeabilizante pode absorver.

Desta forma, a partir das análises realizadas neste estudo, foi possível concluir que a impermeabilização não sofrerá ruptura com os efeitos dos recalques aos quais a superfície da fundação está sujeita.

Para pesquisas futuras, sugere-se:

- Realizar ensaios edométricos de amostras retiradas de outros pontos do solo de fundação do aterro, a fim de aumentar e verificar a consistência da caracterização realizada a partir de um único ponto;
- No ensaio edométrico, realizar o recarregamento da amostra do solo indeformado e um carregamento em solo recompackado no mesmo índice de vazios, a fim de verificar a parcela de rigidez que é proveniente da estrutura da amostra.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.896**: aterros de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.
- CAETANO-CHANG, M. R.; WU, F. T. **Bacia do Paraná: Formações Pirambóia e Botucatu**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., São Paulo. 1992. p. 19.
- CAPUTO, H. P. *Mecânica dos Solos e Suas Aplicações – Fundamentos - Vol. 1*, Rio de Janeiro: 7 ed., LTC, 2015.
- CRAIG, R. F. *Mecânica dos Solos*, Rio de Janeiro: 7 Ed. LTC, 2012.
- DAVIES, G. I. **Análise e modelagem do comportamento colapsível de um solo arenoso**. 2000. 148 f. Dissertação (Mestre em geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- DIAS, F. P. **A incineração de resíduos sólidos: Análise custo benefício dos incinerador de resíduos sólidos do P-Sul – DF**. 2006. 81 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Econômica do Meio Ambiente) – Universidade de Brasília, Brasília.
- FACCINI, U. F. **Estratigrafia do Permo- Triássico do Rio Grande do Sul: Estilos Depositionais versus Espaço de Acomodação**. 2000. 297 f. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- FUTAI, M. M.; CECÍLIO JR. M. O.; ABRAMENTO M. **Shear strength and Deformability of Residual soils from São Paulo Metropolitan Area**. 2013. São Paulo: ABMB
- GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para entender a Terra** 6 ed., Porto Alegre: Bookman. 2013. 738 p.
- GUIMARÃES, L. T. **Utilização do sistema de informação geográfica (SIG) para identificação de áreas potenciais para disposição de resíduos na Bacia do Paquequer, Município de Teresópolis – RJ**. 2000. 185 f. Tese (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- HEIDEMANN, M. **Caracterização geotécnica de um solo residual de granulito envolvido em uma ruptura de talude em Gaspar - SC**. 2011. 178 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- IBAÑEZ, J. P. **Modelagem micro-mecânica discreta de solos residuais**. 2008. 394 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- KRUGEL, F. F. **Estudo da contração do percolado de aterro industrial por evaporação visando à redução da carga poluidora**. 2013. 120 f. Dissertação (Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**, New York: Ed. John Wiley & Sons, 1969

LEROUEIL, S. VAUGHAN, P. R. **The general congruent effects of structures in natural soils and weak rocks**. Geotechnique. 1990. p. 467-488.

Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. 4 ed. 2018. 316 p. CEMPRE – São Paulo.

LODI, P. C. **Aspectos de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de poli (Cloreto de vinila) (PVC)**. 2003. 284 f. Tese (Doutor em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

LUKIANCHUKI, J. A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante**. 2007. 124 f. Dissertação (Mestre em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

MCCARTHY, D. F. **Essentials of Soil Mechanics and Foundations: Basic Geotechnics**. 7 ed. Harlow: Pearson, 2014. 830 p.

MISSIAGGIA, R. R. **Gestão de resíduos sólidos industriais. Caso Springer Carrier**. 2002. 119 f. Dissertação (Mestre em Administração) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MITCHELL, J. K. **Fundamental of Soil Behavior**. 1 ed., New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1976. 422 p.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamental of Soil Behavior**. 3 ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 577 p.

OLIVEIRA, A. M. **Fissuras, trincas e rachaduras causadas por recalque diferencial de fundações**. 2012. 96 f. Monografia (Especialização em gestão em Avaliações e Perícias) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3 Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 367 p.

PINTO, D. P. S. **Contribuição à avaliação de aterros de resíduos industriais**. 2011. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

REBELO, K. M. W. **Avaliação de camadas de proteção para geomembranas de PVC e PEAD**. 2009. 247 f. Tese (Doutor em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos;

REIS, G. S.; MIZUSAKI, A. M.; ROISENBERG, A.; RUBERT, R. R. **Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira**. Pesquisas em Geociências, 41 (2). 2014. p. 155-168.

ROCHA, S. D. F.; LINS, V. F. C.; ESPÍRITO SANTO B. C. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. **Sanitary Engineering Journal**, n.1, p. 1-10, jan/mar, 2011.

ROSA FILHO E. F.; HINDI E. C.; ROSTIROLLA S. P.; FERREIRA F. J. F.; BITTENCOURT A. V. L. **Sistema Aquífero Guarani – Considerações preliminares sobre a influência do Arco de Ponta Grossa no fluxo das águas subterrâneas**. Revista Águas Subterrâneas, 17. 2003. p. 91-111.

ROSA FILHO E. F.; HINDI E. C.; BITTENCOURT, A. V. L.; ARAVENA R. **Caracterização Hidroquímica do Aquífero Guarani na porção centro-norte do Estado do Paraná, Brasil**. Águas Subterrâneas, v.19 n.1. 2005., p. 87-94.

SCHERER, C. M. S. **Análise estratigráfica e litofaciológica da Formação Botucatu (Neocomiano) no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS**. 1998. 208 f. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SCHERER, C. M. S., **Eolian dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in southernmost Brazil: morphology and origin**. Sedimentary Geology, 137. 2000. p. 63-84.

SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, R. A.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**. In: **Congresso Brasileiro De Geologia**, 28, SBG, v.1. 1974. p. 41-65.

SIMÕES, E. B.; **Análise da Fundação de um aterro de resíduos no município de Capela de Santana/RS**. 2019. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of Soil Mechanics**, New York: Ed. John Wiley & Sons, 1948.

TURNER, S. P.; REGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C., MANTOVANI, M. S. M. **Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ⁴⁰Ar – ³⁹Ar geochronology**. Earth and Planetary Science Letters, v. 121. 1984. p. 333- 348.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. 1 Ed São Paulo: Mcgraw-HILL do Brasil, 1981. 507 p;

VAUGHAN, P. R. **Characterising the mechanical properties of in-situ residual soil**. In: INTERNATIONAL CONF. ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS. 2 ed. Singapore. 1988. p.469-487.

WHITE, I. C. **Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil**. Rio de Janeiro, DNPM. 1908. Parte I, p.1-300; Parte II, p. 301-617.

WILDNER, W. **Estratigrafia do Magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná-Conceitos básicos e divisão faciológica**. Reunião aberta da Comissão Brasileira de Estratigrafia. SBG. Porto Alegre. 2004. p. 62-67.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T. e ZANOTTO, G. A. **Bacia do Paraná**. In: G.P. RAJA

GABAGLIA e E.J. MILANI. Origem e Evolução das Bacias Sedimentares. CENPESPETROBRÁS, 2ª ed. 1991. p. 135-168.