UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
JULIANA GOULART MORAES

ANÁLISE DA TENSÃO X DEFORMAÇÃO E SUAS POSSÍVEIS INTER-RELAÇÕES NO LEITO ESTRADAL DA RODOVIA DE ACESSO NORTE DO MUNICÍPIO DE TUBARÃO, A PARTIR DE CARREGAMENTOS LIMÍTROFES

Tubarão
2019

JULIANA GOULART MORAES

ANÁLISE DA TENSÃO X DEFORMAÇÃO E SUAS POSSÍVEIS INTER-RELAÇÕES NO LEITO ESTRADAL DA RODOVIA DE ACESSO NORTE DO MUNICÍPIO DE TUBARÃO, A PARTIR DE CARREGAMENTOS LIMÍTROFES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Esp. Ismael Medeiros

Tubarão

2019

JULIANA GOULART MORAES

ANÁLISE DA TENSÃO X DEFORMAÇÃO E SUAS POSSÍVEIS INTER-RELAÇÕES NO LEITO ESTRADAL DA RODOVIA DE ACESSO NORTE DO MUNICÍPIO DE TUBARÃO, A PARTIR DE CARREGAMENTOS LIMÍTROFES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 28 de novembro de 2019.

Professor e orientador Ismael Medeiros, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Gercino Preve, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Eng. Manuela Mateus de Bona Cargnin, Esp
Centro Universitário Barriga Verde – UNIBAVE

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Nesta fase importante que entrego meu trabalho de conclusão de curso para, finalmente, conseguir formar-me no curso que escolhi, faz-se necessário agradecer as pessoas especiais que estiveram comigo durante esse período. Este percurso acadêmico foi de muito estudo, dificuldades, choros, noites mal dormidas, felicidades, conquistas, superação e, por fim, a realização desse meu grande sonho.

Desse modo, primeiramente, agradeço a Deus, por ser alicerce de força e ânimo para superar as dificuldades e, também, por toda saúde recebida, que permitiu alcançar esta etapa tão importante da minha vida.

Agradeço aos meus amigos e à minha família, em especial aos meus pais, meu irmão e meu namorado, por não permitirem que eu desistisse do meu sonho em meio as dificuldades. Por todo o apoio nas horas difíceis e pela compreensão de minha ausência pelo tempo dedicado aos estudos e à minha formação, vocês sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço, em especial, também, ao meu avô Manoel Goulart. Embora, sua presença física não tenha sido possível até os momentos finais desta graduação, ele contribuiu muito no início dessa minha caminhada, com apoio, conselhos e ao acreditar no meu potencial.

Sou grata, também, a Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL) e a todos os professores pelo esforço, dedicação, paciência e por terem deixado suas marcas registradas ao longo do curso ao transmitirem seu conhecimento adquirido ao longo de suas vidas.

Agradeço, especialmente, ao meu Orientador Professor Ismael Medeiros, por todo o auxílio na elaboração desta pesquisa, por toda a atenção e paciência oferecida durante esse ano, sempre ajudando da melhor forma possível. Agradeço, também, os professores Gilson Rocha Reynaldo e Rennan Medeiros, pelas horas disponibilizadas para assessoramento e até manutenção do trabalho, que foram indispensáveis para a conclusão do mesmo.

Agradeço, também, a Manuela de Bona por toda a atenção e, principalmente, por disponibilizar seu tempo para me ajudar nas dificuldades encontradas durante os cinco anos da graduação.

Por fim, agradeço aos colegas, amigos que estiveram presentes em minha vida durante essa caminhada de cinco anos, me apoiando e deixando suas marcas em minha formação.

.

“Dizem que a vida é para quem sabe viver, mas ninguém nasce pronto. A vida é para quem é corajoso o suficiente para arriscar e humilde o bastante para aprender”.

(Clarice Lispector).

RESUMO

Este trabalho refere-se a análise da tensão e deformação dos solos da região limítrofe a Rodovia de Acesso Norte do Munícipio Tubarão e dos possíveis recalques que podem ocorrer caso a região do entorno da Rodovia for ocupada imediatamente ao término da obra. Com acesso as características da área de estudo, foi verificado que o solo mole encontrado na região, antes ocupado pelo cultivo de arroz e pastagem, passou a ceder lugar para a construção de uma extensa rodovia, que além de desafogar o trânsito, facilitará o tráfego e trará um grande desenvolvimento regional para a localidade. Com o intuito de analisar o comportamento desse tipo de solo em relação a mudança de ocupação e tipo de carregamento, foram estudadas características de compressibilidade e seus processos de adensamento e cisalhamento e possibilidade de recalques. Assim, por meio de uma investigação de abordagem quantiqualitativo, do tipo pesquisa de campo, com fundamentação bibliográfica e nível exploratório, foram realizados estudos de carregamento para o solo do entorno, utilizando a Teoria de Adensamento de Terzaghi, perfil estratigráfico, laudos de sondagens e as jazidas de aterro do município, juntamente com a variação de altura da camada de argila presente no solo, para o cálculo do recalque. Ao realizar os cálculos e as verificações necessárias, concluiu-se que, antes de construir na região limítrofe à Rodovia, deve-se elaborar um plano de carregamento geotécnico e proporcionar um comportamento não drenado para a argila a fim de manter a estabilidade dos solos do entorno e minimizar os possíveis recalques. Desse modo, garante-se a estabilidade da Rodovia de Acesso Norte do Município de Tubarão bem como seu uso pleno e o desenvolvimento regional que esta proporcionará com a ocupação em seu entorno.

Palavras-chave: Entorno. Solos Moles. Recalque.

ABSTRACT

The work presented refers to the analysis of the stress and deformation of the soils of the neighboring region of the Tubarão North Access Highway and the possible consolidation that may occur if the region surrounding the highway is occupied immediately at the end of the work. With access to characteristics of the study area, it was found that the soft soil found in the region, formerly occupied by rice cultivation and pasture, now gives way to the construction of an extensive highway, which in addition to releasing the car flow, will facilitate traffic and will bring great regional development to the locality. In order to analyze the behavior of this type of soil in relation to the change of occupation and type of load, compressibility characteristics, their densification, shear processes and the possibility of consolidation were studied. Thus, by means of an investigation of quantitative and qualitative approach, the field research type with bibliographic basis and exploratory level were carried out the loading studies for the surrounding soil, using the Terzaghi Consolidation Theory, stratigraphic profile, survey reports and municipal landfill deposits, together with the height variation of the clay layer present in the soil, to calculate the consolidation. Through the necessary calculations and checks, it was concluded that before constructing in the region bordering the highway, a geotechnical loading plan should be prepared and the undrained behavior of the clay to be maintained in order to maintain the stability of the surrounding soils and minimize possible consolidation. Not compromising thus the stability of the North Access Highway of the City of Tubarão as well as its full use and the regional development that it will provide with the occupation in its surroundings.

Keywords: Surroundings. Soft Soils. Consolidation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Processo de formação dos solos. 23
Figura 02 – Perfil geotécnico típico de argila mole 23
Figura 03 – Preenchimento dos vazios devido ao adensamento. 28
Figura 04 – Analogia do sistema água-mola de Terzaghi (1936) 29
Figura 05 – Resistência ao cisalhamento. 32
Figura 06 – Condição de estabilidade do talude em função do coeficiente de segurança. 35
Figura 07 – Tipos de ruptura. 36
Figura 08 – Ruptura em cunha plana. 37
Figura 09 – Características geométricas e forças na ruptura em "cunha plana" 38
Figura 10 – Divisão em lamelas. 40
Figura 11 – Lamela "isolada" e esquema de forças atuantes. 41
Figura 12 – Fluxograma da metodologia do estudo 45
Figura 13 – Localização da área de estudo 47
Figura 14 – Proposta de Ocupação IMA 49
Figura 15 – Perfil Estratigráfico Longitudinal 51
Figura 16 – Granulometria das Jazidas da Região de Tubarão 52
Figura 17 – Distribuição Granulométrica 53
Figura 18 – Teor de Umidade pelo Peso Esp. Apar. Seco 53
Figura 19 – Distribuição Normal dos Recalques 58
Figura 20 – Curva de Compressibilidade do Solo 60
Figura 21 – Recalque x Tempo 64
Figura 22 – Aterro da Rodovia sem Carregamento Externo 66
Figura 23 – Aterro da Rodovia com Carregamento Externo 67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cálculo Recalque Condição 1 62
Tabela 2 – Cálculo Recalque Condição 2 62
Tabela 3 – Cálculo Recalque Condição 3 63
Tabela 4 – Cálculo Recalque Condição 4 63
Tabela 5 – Parâmetros Aplicados para cada Tipo de Solo 66
Tabela 6 – Fatores de Segurança Mínimos 66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1– Relevo e Solos - Uso Atual e Recomendado - 2000 48
Quadro 2 – Histogramas de Classe 55
Quadro 3 – Modelos 56

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
DER – Departamento de Estradas de Rodagem
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMA – Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
PMT – Prefeitura Municipal de Tubarão

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Lei Fundamental que Rege o Fenômeno do Adensamento 30
Equação 2 – Resistência ao Cisalhamento Regida pela Lei de Coulomb 1 32
Equação 3 – Resistência ao Cisalhamento Regida pela Lei de Coulomb 2 32
Equação 4 – Estabilidade de um Talude 1 37
Equação 5 – Estabilidade de um Talude 2 38
Equação 6 – Lei dos Senos 1 38
Equação 7 – Lei dos Senos 2 38
Equação 8 – Derivação da Equação 7 39
Equação 9 – Inclinação Crítica da Superfície de Ruptura 39
Equação 10 – Coeficiente de Segurança Relacionado à Resistência do Solo e a Tensão Atuante 39
Equação 11 – Coeficiente de Segurança 39
Equação 12 – Coeficiente de Segurança Mínimo 39
Equação 13 – Fator de Segurança Relacionado ao Momento da Força Resistente com o Momento das Forças Atuantes 41
Equação 14 – Pressões Neutras Atuantes 41
Equação 15 – Momento Atuante 41
Equação 16 – Momento Resistente 42
Equação 17 – Coeficiente de Segurança Obtido a Partir do Somatório dos Momentos 42
Equação 18 – Momento Atuante 42
Equação 19 – Pressões Neutras Atuantes 42
Equação 20 – Coeficiente de Segurança 1 42
Equação 21 – Coeficiente de Segurança 2 42
Equação 22 – Cálculo do Recalque – Caso I 61
Equação 23 – Cálculo do Recalque – Caso II 61
Equação 24 – Cálculo do Recalque – Caso III 61
Equação 25 – Tempo de Recalque 65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **17**
1.1 JUSTIFICATIVA 17
1.2 OBJETIVO 19
1.2.1 Objetivo geral **19**
1.2.2 Objetivos específicos **19**
1.3 RELEVÂNCIA SOCIAL E CIENTÍFICA 19
2 REVISÃO DE LITERATURA **21**
2.1 SOLOS 21
2.1.1 Processo de formação dos solos **22**
2.1.2 Solos moles **24**
2.2 COMPRESSIBILIDADE DE SOLOS MOLES 25
2.2.1 Processo de Adensamento **27**
2.2.2 Analogia mecânica de Terzaghi **29**
2.2.3 Cisalhamento dos solos **31**
2.3 ATERROS SOBRE SOLOS MOLES 33
2.4 SUPERFÍCIES DE RUPTURA 35
2.4.1 Método de cunha **37**
2.4.2 Método sueco **40**
2.5 COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE ATERROS SOBRE SOLOS MOLES 43
3 METODOLOGIA **44**
4 RESULTADOS E DISCUSÕES **47**
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 47
4.2 PERFIL ESTRATIGRÁFICO 50
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS JAZIDAS DA REGIÃO DE TUBARÃO 52
4.4 MODELO ESTATÍSTICO DE COMPORTAMENTO DO SOLO A PARTIR DO CARREGAMENTO 54
4.5 ESTUDO DO RECALQUE DA REGIÃO LIMÍTROFE 58
4.5.1 Cálculo do tempo de recalque **64**
4.5.2 Demonstração dos recalques **65**
5 CONCLUSÃO **68**
REFERÊNCIAS **70**
ANEXOS **72**

ANEXO A – IMAGENS DA ÁREA DE ESTUDO..... 73
APÊNDICES..... 74
APÊNDICE A – CÁLCULO DO RECALQUE CONDIÇÃO 1 75
APÊNDICE B – CÁLCULO DO RECALQUE CONDIÇÃO 2..... 76
APÊNDICE C – CÁLCULO DO RECALQUE CONDIÇÃO 3 77
APÊNDICE D – CÁLCULO DO RECALQUE CONDIÇÃO 4 78
APÊNDICE E – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL DOS RECALQUES..... 79

1 INTRODUÇÃO

Para a construção de uma obra de engenharia civil, é de fundamental importância o conhecimento das camadas de solo da localidade que a mesma será implantada. Dessa forma, os solos devem ser estudados e analisados por meio de sondagens e ensaios em laboratório e in loco para o conhecimento de suas propriedades e particularidades perante a seu comportamento e as tensões por ele suportadas.

Com a necessidade da implantação da obra da Rodovia de Acesso Norte do Munícipio de Tubarão, foram realizadas sondagens e os devidos ensaios de compressibilidade, adensamento, cisalhamento e outros e concluiu-se que o solo mole predominava na região. Um tipo de solo sedimentar e argiloso que exige maiores cuidados durante as obras que serão executadas sobre ele e um monitoramento adequado para a prevenção dos recalques que podem ocorrer com a aplicação de cargas sobre o mesmo.

Este foi o mesmo solo encontrado no entorno da rodovia e que será estudado e analisado a relação de seus carregamentos e suas possíveis interferências ao longo do seu leito estradal. Busca-se determinar possíveis fragilidades e propor modelos geotécnicos de ocupação para esses solos que não afetem a estabilidade desse novo acesso do munícipio de Tubarão que irá desafogar o trânsito e desenvolver ainda mais o município e a região como um todo.

1.1 JUSTIFICATIVA

No mundo atual, a busca crescente por desenvolvimento socioeconômico é uma das maiores preocupações dos países. Assim, para desbravar o mundo afora, uma das primeiras construções realizadas foram as rodovias a partir do século XIX, inicialmente nos países mais desenvolvidos e, posteriormente, nos demais países, especialmente com a ascensão da indústria de automóvel, no século XX. Rapidamente estas rodovias foram utilizadas para proporcionar segurança e rapidez ao tráfego como, também, para contribuir para o desenvolvimento da infraestrutura, turismo, crescimento e movimentação econômico-financeiro.

A construção civil, área responsável por esses empreendimentos, está presente nesse exponencial desenvolvimento e é ela que faz com que haja movimentação econômica, ao contribuir na geração, elevação das taxas de emprego e demandas no mercado, facilitando o desenvolvimento de uma região como um todo.

Para atestar as afirmações, podemos citar três das dez maiores rodovias do mundo. A maior do mundo é a *Rota Panamericana*, um conjunto de rodovias que somam quarenta e

oito mil quilômetros no total, ligando Ushuaia, no extremo Sul da Argentina, até a baía de Prudhoe, no Alasca, extremo Norte do continente passando por catorze países. Já a segunda maior rodovia do mundo é a rodovia *Highway 1* na Austrália com uma extensão de 14.500 quilômetros servindo como um anel rodoviário que permite interligar o país inteiro. O Brasil também possui uma classificação nesse ranking em décimo lugar com a famosa rodovia *BR-101*, com 4.772 quilômetros de extensão, ao costear o Brasil de Norte a Sul, passando por nove estados.

A implantação de uma nova rodovia é geralmente realizada a fim de proporcionar um maior desenvolvimento regional ou municipal como também com a finalidade de aliviar os longos congestionamentos e desafogar o trânsito.

Entretanto, a construção da Rodovia de Acesso Norte do Município de Tubarão a ser estudada nesta monografia, está sendo realizada em uma região disposta sobre um trecho de solo mole em toda a sua extensão trazendo consigo grandes dificuldades devido à baixa capacidade de suporte desses solos e das incertezas quanto ao seu comportamento no presente momento e após carregamentos limítrofes advindos da planta de uso e ocupação dos solos do corpo estradal da rodovia, considerando o Zoneamento Urbano.

Para a segurança quanto a ruptura na rodovia, foram utilizadas diversas técnicas construtivas existentes para lidar com grandes recalques, longos tempos de adensamento e baixa capacidade do material. Além disso, houve acompanhamento contínuo durante sua execução por meio de uma instrumentação, através de medidas de deslocamentos verticais e horizontais, por opressões e distorções, capaz de prever e denunciar possíveis rupturas, possibilitando medidas corretivas.

Dessa forma, visto que o uso e ocupação dos solos limítrofes ao corpo estradal da rodovia será realizado imediatamente ao término da obra, possivelmente, em função de diversos interesses, acontecerá uma rápida ocupação. Isso poderá gerar elevadas tensões nos solos, incompatíveis com os parâmetros geotécnicos da localidade.

Ainda neste contexto, o acréscimo de tensões nos solos em regiões geotecnicamente frágeis, corrobora com cenários de rupturas e/ou colapsos de aterros. Destarte, ao considerar os fatores geotécnicos e condicionantes de investimentos dos setores industrial e comercial, a questão central desta investigação fica estabelecida do seguinte modo: **O que poderá ocorrer com a estabilidade do corpo estradal da rodovia, a partir dos carregamentos limítrofes advindos da planta de uso e ocupação dos solos, ao considerar o Zoneamento Urbano?**

1.2 OBJETIVO

Nesse item serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos da presente pesquisa.

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a relação de carregamentos limítrofes à rodovia e suas possíveis interferências ao longo do leito estradal na busca por determinar possíveis fragilidades e indicar, caso existam, métodos restaurativos e/ou preventivos.

1.2.2 Objetivos específicos

a) Identificar a vocação quanto ao uso e ocupação dos solos;
b) Elaborar modelagem relativas as cotas de alagamento para delimitação de altura de aterros;
c) Elaborar modelos geotécnicos a partir das relações Tensões X Deformações para a base de dados gerada.

1.3 RELEVÂNCIA SOCIAL E CIENTÍFICA

Mostra-se evidente a elevada importância que a malha rodoviária apresenta para o Brasil. Ao refletir como o modal de transporte brasileiro é o rodoviário, é por meio das rodovias que há a circulação e o deslocamento de passageiros, como, também, o transporte e distribuição de grande parte dos produtos e cargas diversas. Desse modo, a implantação de uma rodovia caracteriza-se como grande berço de desenvolvimento econômico e social para o país e por toda sua região abrangente.

A implantação do novo Acesso Norte no Município de Tubarão com cerca de cinco quilômetros de extensão, da mesma maneira dar-se-á como um novo patamar de desenvolvimento para a cidade, ao proporcionar para a região a expansão de seus negócios e a consequente diminuição do trânsito em seus acessos.

Portanto, a relevância social está voltada para a manutenção quanto ao uso pleno da rodovia, já que foram investidos cinquenta e dois milhões de reais em sua construção. Além de desafogar o trânsito de seus acessos, a rodovia facilitará a mobilidade urbana para os moradores da cidade, para os moradores dos municípios de Gravatal e demais municípios da região.

A rodovia tem como funções estratégicas, melhorar o tráfego no sentido do Norte do estado, em direção aos municípios de Gravatal e aos que ligam a região serrana do estado e também, facilitar a ligação do bairro São Martinho ao centro de Tubarão desviando o trânsito pesado de um dos principais acessos ao município.

Além dessas funções, esse grande empreendimento trará muitos benefícios e consequente crescimento para Tubarão. Espera-se que, posteriormente a finalização deste empreendimento, em seu entorno, grandes empresas sejam instaladas ou loteamentos industriais e residenciais por parte da iniciativa privada utilizem desta região para sua instalação, o que gerará empregos para a população e desenvolvimento para a cidade.

Pensando nisso, o estudo de seu entorno e os estudos dos carregamentos limítrofes advindos da planta de uso e ocupação dos solos é indispensável tanto para as pessoas que pretendem ocupar a região com suas residências, quanto para a área empreendedora da região sul as responsáveis por construir e investir em empresas, indústrias e comércios nessa região.

A relevância científica desta pesquisa consiste em analisar a viabilidade de construção e investimento na região, estudando a cota apropriada para o aterro, o tipo de aterro e as diversas características do solo mole do entorno da rodovia. Esse estudo será imprescindível, para a adequação da ocupação do entorno de acordo com o suporte de carregamentos em um solo mole, para que a cidade de Tubarão possa crescer com segurança, melhorar a qualidade de vida, a mobilidade urbana dos seus moradores e, ainda, sem prejudicar esse empreendimento que é a Rodovia de Acesso Norte no Município de Tubarão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Para a compreensão dos principais temas e termos científicos que serão abordados no presente estudo, a revisão bibliográfica servirá de diretriz e alicerce, abordando os assuntos e hipóteses de acordo com autores que confirmam os embasamentos técnicos que foram usados de referência para a realização da obra.

2.1 SOLOS

A definição do que são os solos é caracterizada, em muitos casos, dependendo das diferentes áreas de conhecimento que os estudam e os utilizam, como geologia, geotecnia, agronomia, geografia e engenharia civil. Tal situação, consequentemente, originou diversas definições e classificações de acordo com o objetivo de estudo de cada uma dessas áreas anteriormente citadas. Para a fundamentação da presente monografia, serão utilizadas as definições de Solos propostas pela engenharia, juntamente com as definições da geotecnia.

Para fins de engenharia, o solo é definido pela NBR 6502 como "material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica" (ABNT, 1995, p. 11), ou seja, o solo é um agregado não-cimentado utilizado junto aos outros materiais de construção, muito importante para a Engenharia Civil.

Portanto, o solo é o material da crosta terrestre que serve de suporte e apoio, como também pode ser escavado e perfurado. Sendo assim, é amplamente utilizado na construção das obras de Engenharia Civil, reagindo sob as fundações, atuando sobre arrimos, coberturas e deformando-se para resistir aos esforços nos aterros e taludes, causando influências nas obras, devido as suas propriedades e seu comportamento (VARGAS, 1977).

Na construção das rodovias, ou seja,

> [...] no meio rodoviário, o solo é considerado genericamente como material terroso natural, que compõe a parte superficial da crosta terrestre, e que pode ser escavado mecanicamente (por pá, picareta e máquinas de terraplanagem), sem necessidade de uso de explosivos (DER SP, 1991, p. 48).

Logo, a compreensão do solo como um agente integrante da estrutura como agente dissipador de carga, concomitante na melhor análise quanto ao comportamento da estrutura em função dos adensamentos decorrentes da relação tensão x deformação dos solos.

2.1.1 Processo de formação dos solos

Para compreender a existência de diferentes tipos de solo e o tipo de solo da localidade que será estudada nessa monografia, é de fundamental importância conhecer seu processo de formação e entender que "todo solo tem sua origem imediata ou remota na decomposição das rochas pela ação das intempéries." (VARGAS, 1977, p. 04).

Desse modo, "os solos são materiais que resultam do intemperismo ou meteorização das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química." (CAPUTO, 1988, p. 14). Desse modo, os solos são formados a partir da ação do tempo por meio da deterioração das rochas e de dois tipos de intemperismo: o intemperismo químico e o intemperismo mecânico.

> O primeiro está relacionado com os vários processos químicos que alteram, solubilizam e depositam os minerais de rocha, transformando-a em solo. Esse tipo é mais frequente nos climas quentes e úmidos e, portanto, muito comum no Brasil. O segundo é proveniente da ação mecânica desagregadora de transporte da água, do vento e da variação de temperatura. Muitas vezes ocorre a ação conjunta de vários agentes do intemperismo (ORTIGÃO, 2007, p. 12).

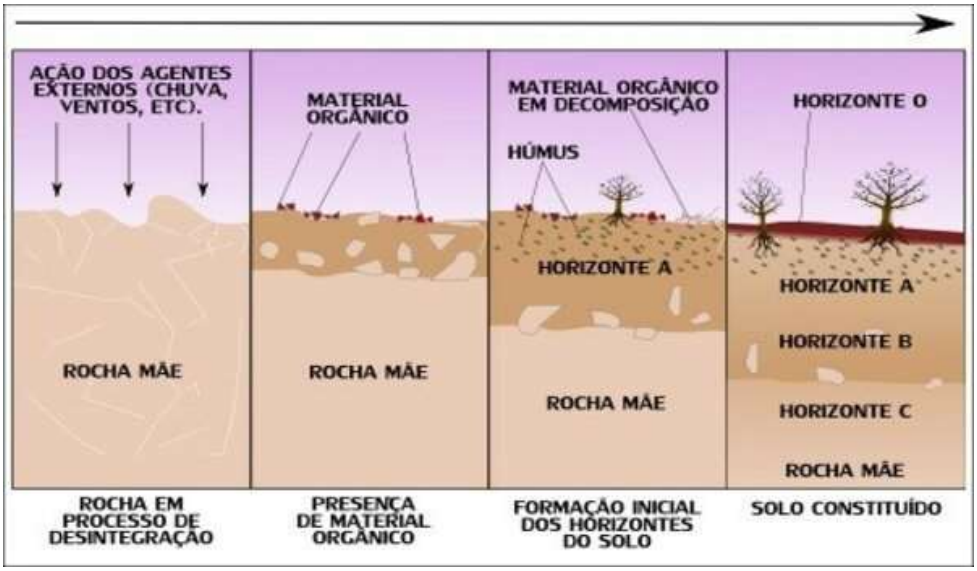
Pode-se acrescentar, ainda, que quando há desintegração mecânica, formam-se os pedregulhos e areias (solos de partículas grossas), os siltes (partículas intermediárias) e somente em condições especiais, as argilas (partículas finas). Já pela decomposição química onde o principal agente é a água e os mais importantes mecanismos de ataque são a oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos da vegetação, as argilas representam o último produto do processo de decomposição (CAPUTO, 1988).

De acordo com esse processo de formação, os solos apresentam características diversas que os diferem uns dos outros e, ainda, consistências distintas que estão relacionadas diretamente com o perfil de intemperismo que os deu origem.

> O solo é constituído de camadas ou horizontes de compostos minerais e/ou orgânicos, com variadas espessuras, que formam seu perfil de intemperismo. Os horizontes do solo, são geralmente inconsolidados, mas alguns contém suficientes porções de sílica, carbonatos ou óxidos de ferro para cimentá-los, ou então, preservam estruturas da rocha de origem que lhes conferem maior consistência (DER SP, 1991, p.48).

Neste contexto, a figura a seguir apresenta a decomposição da rocha e o processo de formação dos solos:

Figura 01 – Processo de formação dos solos.

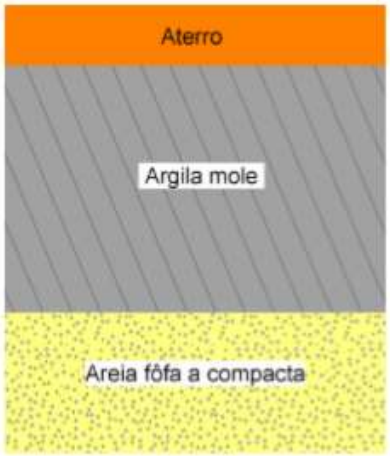


Fonte: Moderna Engenharia, 2019.

Quando a rocha se decompõe e há a formação dos solos, os solos resultantes desse processo de decomposição que permanecem no próprio local, são denominados como solos residuais. Já, quando os solos se formam e, em seguida, são carregados pelas águas de enxurradas, rios, vento, gravidade ou pela ação simultânea de todos esses agentes, os solos são denominados como sedimentares ou transportados (VARGAS, 1914).

A figura a seguir mostra um perfil típico de solo sedimentar muito comum no litoral brasileiro devido à sedimentação do transporte fluvial no ambiente marinho das baías e restingas. Neste solo, a camada superficial de argila mole é muito fraca e a construção sobre este tipo de terreno é sempre problemática, o que requer a realização de estudos especiais por engenheiro geotécnico experiente (ORTIGÃO, 2007).

Figura 02 – Perfil geotécnico típico de argila mole.



Fonte: (Ortigão, 2007).

Esse perfil geotécnico composto de aterro, argila mole e areia fofa compactada, é o perfil de Solo que foi encontrado durante a implantação da Rodovia de Acesso Norte no Município de Tubarão. As obras rodoviárias linearmente extensas como essa, exigem um cuidadoso reconhecimento geotécnico da região para a prevenção de eventuais dificuldades e êxito nos resultados obtidos prevendo custo e tempo de obra (CAPUTO, 1988), ou seja, uma certa viabilidade para a construção tanto da própria rodovia como em seu entorno.

A presença de uma camada grande de argila na composição do solo torna-o um solo mole e exige maiores cuidados durante as obras que serão executadas sobre ele. Desse modo, serão explicadas, a seguir, as principais características desse tipo de solo, seu comportamento e suas principais propriedades.

2.1.2 Solos moles

Entende-se por Solos Moles, os solos sedimentares com baixa resistência à penetração e com valores de SPT menores a quatro golpes, onde a fração de argila contém características de solo coesivo e compressível, em geral argilas moles ou areias argilosas fofas, formadas recentemente. (MASSAD, 2010).

De acordo com o Manual DNIT/IPR (2006), os Solos Moles argilosos são solos de granulação fina, com grãos de formas lamelares, alongadas e tubulares. Sua constituição principal é de minerais argílicos como caulinita, ilita e montmorilonita, isto é, silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. Essas partículas que constituem o solo, têm dimensões menores que 0,002 mm e apresentam coesão e plasticidade. (ABNT NBR 6502, 1995).

> Devido à finura, forma e composição mineralógica de seus grãos, o comportamento geral das argilas varia sensivelmente com a quantidade de água que envolve tais grãos. Assim, apresentam esses solos em determinada gama de umidade, características marcantes de plasticidade, permitindo a mudança de forma (moldagem) sem variação de volume. Sob a ação de certo esforço. Sua coesão é função do teor de umidade: quanto menos úmidas (mais secas), maior a coesão apresentada, podendo variar o valor da coesão (do estado úmido ao seco), numa dada argila, entre limites bem afastados (MANUAL DNIT, 2006, p. 27).

A deposição dos sedimentos formadores do solo mole pode ocorrer em variados ambientes de formação, podendo ser encontrados em depósitos fluviais, marinhos, lacustres incluindo lagunas e baias, em água doce, salgada ou salobra e em várzeas ou planícies de inundação, praia, canais de mar e outros. A formação desses solos depende, ainda, da área de

erosão, clima, forma de transporte dos sedimentos e, também, das condições ambientais que variam no espaço e no tempo (MASSAD, 2010).

De acordo com Massad (2010), existem alguns fatores que afetam a sedimentação dos solos, são eles: a velocidade das águas, a quantidade e a composição da matéria em suspensão na água, a salinidade e a floculação de partículas e a presença de matéria orgânica, tais como húmus, detritos vegetais, conchas e outros. O último fator citado imprime ao solo uma cor escura e um cheiro característico (MASSAD, 2010).

> Os pântanos, uma subcategoria dos ambientes de deposição, caracterizam-se por abundante presença de águas rasas, paradas. A ação das bactérias e fungos é truncada pela ausência de oxigênio e pela presença de ácidos, o que preserva os detritos vegetais e orgânicos, dando origem a depósitos orgânicos nas bordas de lagos e lagunas e em áreas planas atingidas pela preamar (planícies de maré) ou pelas cheias dos rios (planícies de inundação). Muitos depósitos formados desse modo encontram-se hoje soterrados, constituindo as camadas de argilas orgânicas turfosas, pretas, subsuperficiais [...]. (MASSAD, 2010, p. 115).

De acordo com essas características, o solo mole é um solo argiloso transportado e pode ser considerado também como orgânico, pois quando é transportado o mesmo é misturado com quantidades variáveis de matéria orgânica decomposta.

2.2 COMPRESSIBILIDADE DE SOLOS MOLES

A compressibilidade é uma propriedade que o solo possui para mudar sua forma e volume quando há aplicações de forças externas. Devido sua constituição ser composta por um esqueleto de grãos sólidos, que constituem sua macroestrutura, com a presença de partes porosas compostas por água e ar (VARGAS, 1977), quando há a ação de cargas aplicadas sobre o solo saturado e confinado lateralmente, o mesmo diminui o seu volume possibilitando, principalmente, recalques na estrutura por adensamento ou consolidação (CAPUTO, 1988).

Esse conceito de compressibilidade é confirmado e também definido pela NBR 6502 (ABNT, 1995) como: “Propriedade de um solo relativa à sua suscetibilidade de diminuir de volume sob efeito da aplicação de uma carga, que pode ser externa ou interna” (ABNT, 1995, p. 11).

Na execução de uma obra de engenharia, devido a compressibilidade, o solo sofre deformações, devido a variação no estado de tensões, como a aplicação de cargas, por exemplo, sendo o sistema comprimido.

De acordo com Holtz e Kovacs (1981), as deformações dos solos resultam de:

- Deformação das partículas dos solos;
- Compressão do ar e da água nos vazios;
- Expulsão de água ou ar dos espaços vazios.

Desse modo, segundo Gerscovich (2008), as deformações podem ser divididas em três categorias distintas, sendo elas: Elásticas, Plásticas e Viscosas. Estas categorias caracterizam-se conforme explicação a seguir:

- Deformações elásticas: são as deformações reversíveis do solo associadas a variações volumétricas que podem ser totalmente recuperadas após a remoção do carregamento, causando pequenas variações no índice de vazios do solo (GERSCOVICH, 2008).
- Deformações plásticas: induzem a variações volumétricas permanentes e irreversíveis, onde após o descarregamento, o solo não recupera seu índice de vazios inicial (GERSCOVICH, 2008).
- Deformações viscosas: denominadas como fluência, também são irreversíveis e associadas a variações volumétricas sob estado de tensões constante (GERSCOVICH, 2008).

Diferentemente de qualquer outro material que possa deformar com a aplicação de uma carga, o problema é mais complexo quando trata-se das deformações dos solos estudadas pela engenharia de fundações. Além de serem comparativamente maiores que a dos demais materiais de construção, as diversas deformações que os solos são submetidos não são verificadas instantaneamente com a aplicação da carga, mas, sim, em função do tempo (CAPUTO, 1988).

Desse modo, sempre que são projetadas estruturas sobre solos compressíveis ou deformáveis como solos moles formados principalmente por argila, por exemplo, é fundamental que se faça uma previsão das deformações, dos possíveis recalques e a sua evolução conforme o tempo submetido para não comprometer as estruturas que assentam sobre esse tipo de solo (GERSCOVICH, 2008).

Para avaliar a sua repercussão sobre a estrutura e decidir como trabalhar perante as situações que, possivelmente, podem ser geradas devido a esse carregamento, é necessário o estudo de estimativa da ordem de grandezas dos recalques por adensamento, além do conhecimento sobre o subsolo (GERSCOVICH, 2008).

> Para a estimativa da ordem de grandeza dos recalques por adensamento, além do reconhecimento do subsolo, que nos dará a conhecer a espessura, posição e natureza das camadas que o constituem, bem como os níveis d'água, necessita-se ainda conhecer: a) a distribuição das pressões produzidas em cada um dos pontos do terreno pela carga da obra. b) as propriedades dos solos que interessam ao problema em exame. (CAPUTO, 1988, p. 79).

De acordo com Vargas (1977), o solo necessita ser identificado e classificado. Sendo assim, abaixo serão explicadas as propriedades principais como também a distribuição das pressões e tensões sobre o solo mole. Para isso, faz-se necessário considerar que esse material é compressível e facilmente deformado devido a presença de argila mole na sua composição.

Para a análise do solo dessa pesquisa, será estudado o processo de adensamento e será realizada uma analogia de seu comportamento por meio da analogia mecânica de Terzaghi no quesito aplicação de carga em função do tempo de sua ocupação.

2.2.1 Processo de Adensamento

O processo de adensamento ocorre quando há uma redução progressiva do volume de massa de um solo ao longo do tempo. Essa redução é resultante da diminuição do volume de vazios do solo quando há expulsão de ar ou água, causada por efeito do peso próprio ou acréscimo de tensão externa (ABNT NBR 6502, 1995).

No momento em que uma camada de argila compressível saturada é submetida a um aumento de tensão, a poropressão aumenta repentinamente e o recalque elástico ocorre imediatamente (DAS, 2007).

> Como a condutividade hidráulica da argila é significadamente menor do que a da areia, o excesso de poropressão gerado pelo carregamento gradualmente se dissipa, durante um longo período. Assim, a mudança de volume associada (ou seja, o adensamento) na argila pode continuar por um longo tempo após o recalque elástico. O recalque provocado pelo adensamento na argila pode ser várias vezes maior que o recalque elástico. (DAS, 2007, p. 251).

Quando aplicada uma pressão externa à camada de argila, ela é transferida para a água no primeiro momento, a qual, devido a pressão, tende a escoar por meio dos espaços vazios do solo. À medida que a água escoa, a pressão é transferida para o esqueleto de grãos e o mesmo vai deformando-se e preenchendo o volume de vazios do solo. A água deixa de escoar apenas quando toda a pressão externa é transferida para os grãos (VARGAS, 1977).

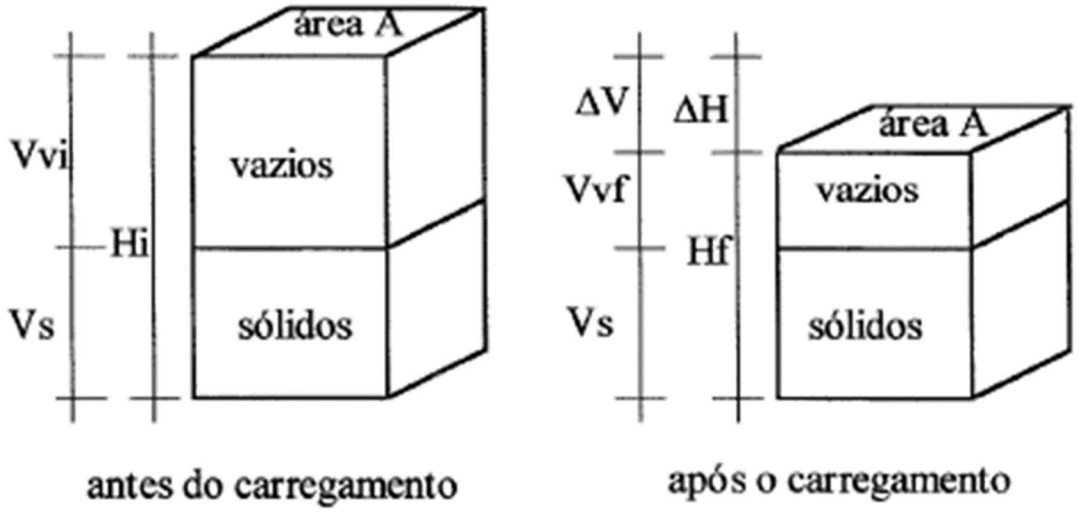
> Com essa variação do índice de vazios, a camada de argila contrair-se-á de um volume exatamente igual as da variação do volume dos poros e, se a camada é totalmente saturada, igual ao volume de água que escapa durante o adensamento. Supondo que não há deformação lateral essa variação de volume corresponderá a uma diminuição de altura da camada. Ora bem, essa diminuição de altura corresponde ao recalque. (*id ibid.,* p. 257).

Como visto, o processo de adensamento ocasiona variação do índice de vazios nas camadas de argilosas quando submetidas a carregamentos permanentes, causando os chamados recalques por adensamento que se prolongam ao longo do tempo em largos períodos.

> O recalque por adensamento é aquele que ocorre devido à expulsão da água do interior dos vazios do solo. Quando um solo saturado é carregado superficialmente, a carga é inicialmente suportada pela água em seus vazios. A água submetida a pressão, passa então a percolar em direção as faces de saída, passando a tensão aplicada a se transferir, gradativamente, da água (pressão neutra), para a estrutura do solo (tensão efetiva). Simultaneamente, ocorre uma diminuição de volume do solo (e, portanto, recalque), igual ao volume de água drenada [...] (DER SP, 1991, p. 315).

A ilustração a seguir apresenta o preenchimento dos vazios e a diminuição da altura da camada de solo que corresponde ao recalque:

Figura 03 – Preenchimento dos vazios devido ao adensamento.



Fonte: (ORTIGÃO, 2007).

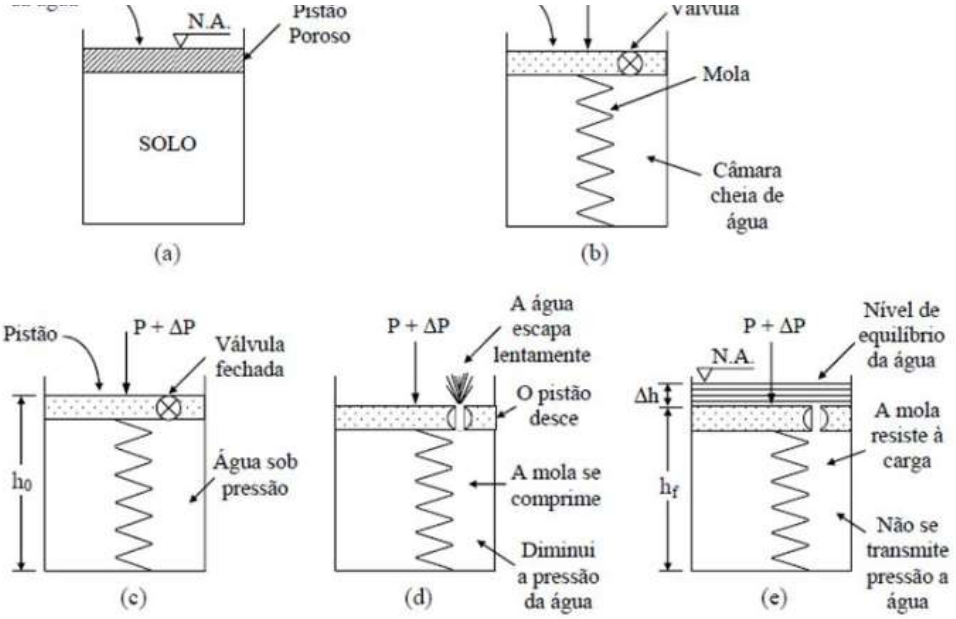
Dessa maneira, o denominado adensamento ou consolidação, foi estudado por Terzaghi a partir de 1914, quando ainda era professor da Universidade de Istambul. Terzaghi desenvolveu a denominada teoria do adensamento de Terzaghi (ORTIGÃO, 2007).

2.2.2 Analogia mecânica de Terzaghi

Para a compreensão do mecanismo da transferência de pressões no solo por meio do adensamento, se faz necessário o estudo da Analogia mecânica de Terzaghi (1936). A mesma é usada para calcular, prever recalques e estudar as pressões neutras que aparecem, como, também, a progressão dos recalques devido ao adensamento que as camadas argilosas são impostas quando aplicadas tensões sobre elas.

Na Analogia mecânica de Terzaghi (1936), as molas representam o "esqueleto sólido" do solo, e os furos capilares nos êmbolos, os seus vazios, onde a pressão nas molas aumenta à medida que a água escapa pelos furos ou então através dos poros do material (CAPUTO, 1988).

Figura 04 – Analogia do sistema água-mola de Terzaghi (1936).



Fonte: (TERZAGHI, 1936).

A figura mostra o modelo físico denominado Analogia do sistema água-mola de Terzaghi composto de um cilindro indeformável, um pistão sendo sustentado por uma mola e uma válvula para controlar o fluxo de água onde "o cilindro é preenchido pela água, cuja compressibilidade é admitida como sendo nula, a água do cilindro corresponde à água intersticial da amostra de solo e a permeabilidade é representada pela abertura parcial da válvula e a deformação do esqueleto sólido, pela mola." (ORTIGÃO, 2007, p. 177).

> Escapando-se a água intersticial da camada compressível considerada, o volume dos seus vazios vai diminuindo e, consequentemente, o seu volume total. Como a camada está confinada lateralmente, a diminuição de volume se dará por diminuição de altura. Esta diminuição de altura é que se denomina recalque por adensamento. (CAPUTO, 1988, p.82).

Para a previsão desses recalques por adensamento, a teoria de adensamento unidimensional foi desenvolvida e estudada durante um longo período por Terzaghi juntamente com Frohlich em 1936. De acordo com analogias realizadas, estes estudiodos estabeleceram algumas hipóteses que devem ser consideradas como embasamento para a análise da compressão dos solos durante o tempo. São elas:

> A camada compressível tem espessura constante, é lateralmente confinada e o solo que a constitui é homogêneo; todos os vazios estão saturados d'água; tanto a água como as partículas sólidas são incompressíveis; o escoamento da água obedece à lei de Darcy (com coeficiente de permeabilidade constante) e se processa unicamente na direção vertical; uma variação na pressão efetiva no solo causa uma variação correspondente no índice de vazios (CAPUTO, 1988, p.85).

De acordo com essas características, verifica-se que um solo argiloso sofrerá recalque devido a variação dos seus índices de vazios. Quando a carga é aplicada no solo mole, a água e o ar que preenchem os vazios escapam do solo devido a pressão que a carga impõe sobre ele. Isto fará com que a camada argilosa seja adensada e como a mesma encontra-se confinada lateralmente, irá sofrer a diminuição da altura da camada, gerando recalques por adensamento.

A lei fundamental que rege o fenômeno do adensamento das camadas de solo, é demonstrada pela equação (1), de acordo com Caputo (1988):

$$\rho_o = \rho + \mu \tag{1}$$

Onde:

ρ_o = pressão no solo saturado

μ = pressão neutra

ρ = pressão efetiva

2.2.3 Cisalhamento dos solos

Uma das propriedades que os solos possuem é a de suportar cargas e conservar sua estabilidade. Essa propriedade depende da resistência ao cisalhamento do solo, pois quando esta resistência é excedida, toda a massa de solo rompe-se posteriormente (CAPUTO, 1988).

A resistência ao cisalhamento, de acordo com a ABNT NBR 6502 (1995), é a "máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura", ou seja, é a resistência interna por área unitária que um solo pode oferecer para resistir a rupturas e aos deslizamentos que ele é submetido ao longo de qualquer plano em seu interior (DAS, 2007).

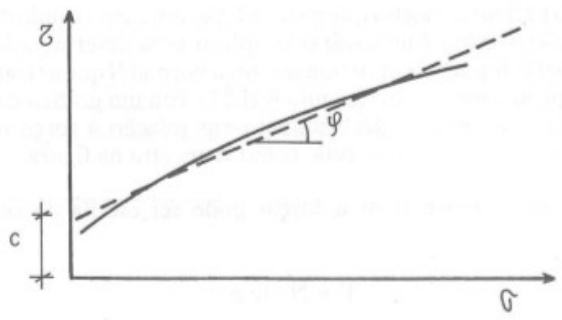
A resistência ao cisalhamento de um solo depende de fatores como: "[...] o valor da tensão normal efetiva, as condições de drenagem, a trajetória das tensões (sequência de carregamento), a história das tensões (pressão de pré-adensamento) e a estrutura e outras características do solo." (MASSAD, 2010, p. 72).

> Das características de resistência ao cisalhamento dependem importantes problemas de engenharia de solos e fundações. A estabilidade de taludes (aterros, cortes e barragens), empuxos de terra sobre paredes de contenção e túneis, capacidade de carga de sapatas e estacas, são problemas a serem examinados. A correta determinação da resistência ao cisalhamento dos solos é um dos problemas mais complexos da Mecânica dos Solos. (CAPUTO, 1988, p.158).

A determinação da resistência de cisalhamento é muito importante para a execução de todas as obras de engenharia, pois antes de submeter o solo a uma determinada carga, deve-se estudar se o mesmo suportará essa carga, sem que ocorra ruptura do mesmo. Isto fará com que esse fator não venha a prejudicar a obra que será implantada sobre esse solo.

De acordo com o Manual DNIT/IPR (2006) a ruptura das massas de solo ocorre devido ao cisalhamento que o mesmo sofre, ou seja, pela deformação distorcional.

Figura 05 – Resistência ao cisalhamento.



Fonte: (DER SP, 1991).

Foram estabelecidos, então, um critério de ruptura de Mohr-Coulomb onde a resistência ao cisalhamento é definida pela Lei de Coulomb juntamente com a teoria de ruptura de Mohr (DAS, 2007). Segundo Coulomb (1776), "para a maioria dos problemas de mecânica dos solos, é suficiente aproximar a tensão de cisalhamento no plano de ruptura para uma função linear da tensão normal." (COULOMB, 1776 apud DAS, 2007, p. 301).

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT/IPR de 2006, a resistência ao cisalhamento é regida pela Lei de Coulomb cuja a expressão pode ser escrita como:

(2)

$$\tau = \sigma_e tg\ \varphi + c$$

(3)

$$\tau = (\sigma_t - u) tg\ \varphi + c$$

Onde:

τ = Resistência ao cisalhamento (ou corte);

φ = Angulo de atrito interno;

σ_e = Pressão efetiva normal ao plano de cisalhamento;

σ_t = Pressão total normal ao plano de cisalhamento;

u = Pressão neutra (não contribui para a resistência ao cisalhamento) ou pressão nos poros (ar e água);

c = Coesão (resistência ao cisalhamento quando a pressão efetiva σ_e é nula, ou φ = 0).

Os tratamentos das pressões totais ou efetivas apresentam equivalência. A pressão efetiva é o conceito mais correto e se baseia na hipótese de que as pressões neutras se manifestam ao longo da linha de ruptura e por meio dela, já a pressão total admite que as pressões neutras se desenvolvem nos ensaios triaxiais e simulam condições de carregamento e drenagem de campo como iguais às que existirão no maciço de terra. (MASSAD, 2010).

A resistência ao cisalhamento de um solo (τ) é influenciada por fatores extrínsecos e os fatores intrínsecos. O primeiro depende da velocidade de aplicação dos esforços e a maior ou menor facilidade de escoamento do fluído contido nos poros, condicionando os tipos clássicos de ensaios de cisalhamento que são rápido, rápido-adensado e lento, executados em laboratórios de solos, nos aparelhos de compressão simples e triaxial, e de cisalhamento direto. (Manual DNIT/IPR, 2006).

Os fatores intrínsecos por sua vez, dividem-se em físicos e físico-químicos e dependem da pressão e coesão do solo.

Na argila esses fatores se manifestam na coesão como físico-químicos, visto que é nas frações coloidais que as forças intergranulares são significativas em relação as massas das partículas e resultam das atrações intermoleculares, nos pontos mais próximos de contato e das repulsões eletrostáticas dos íons que estão dispersos na dupla camada que envolve as partículas coloidais, onde a água é absorvida, apesar da viscosidade elevada que possui, não aumentando a coesão, mas sim reduzindo a mesma. (Manual DNIT/IPR, 2006).

Assim como as argilas fazem parte do conjunto de solos coesivos, fatores como estado de adensamento do solo, a sensibilidade da sua estrutura, as condições de drenagem e a velocidade de aplicação de cargas, influenciam em sua resistência ao cisalhamento. Quando há a aplicação de pressões maiores a argila funciona como solo não coesivo, porém quando não há drenagem os índices de vazios continuam sendo os mesmos e consequentemente a resistência ao cisalhamento permanecerá a mesma.

2.3 ATERROS SOBRE SOLOS MOLES

De acordo com a NBR 6502 (1995) o aterro é um “depósito artificial de qualquer tipo de solo ou de outros materiais.”

Para a execução de uma fundação de um aterro é indispensável o conhecimento do subsolo que terá de suportar sua carga, bem como o reconhecimento da disposição, natureza e espessura das suas camadas fazendo o uso de métodos como a abertura de poços de exploração, execução de sondagens e ensaios diversos in loco (CAPUTO, 1988).

"A decisão, por um ou por outro tipo de amostra, é função da heterogeneidade do subsolo, da natureza das camadas que o compõem e, ainda, da importância da obra que se vai executar." (CAPUTO,1988, p. 190).

Quando os aterros são executados sobre argilas moles ou em pântanos, geralmente são encontrados problemas devidos sua ruptura e sua compressibilidade e a ocorrência de aterros sobre esses solos apresentam ainda três condições em comum: situam-se em zonas planas, são formados por solos finos ou orgânicos e apresentam má drenagem. (HIGASHI, 2006).

> Para os aterros construídos sobre argilas moles, costuma-se fazer as análises de estabilidade em termos de tensões totais. Há uma base empírica para esse procedimento, mais ou menos sólida, elaborada ao longo de anos de experiência em vários países. Modernamente, os esforços concentram-se nas análises em termos de tensões efetivas, com estimativas de pressões neutras baseadas em observações de aterros experimentais, levados a ruptura. (MASSAD, 2010, p.74).

Nas argilas moles, quando é necessário a construção de aterros, é necessário avaliar alguns parâmetros de estabilidade, juntamente com a análise das tensões que serão transmitidas a esse solo pelo aterro e se o solo não irá romper com essa carga de aterro sobre ele como também se essa carga não gerará recalque na camada de solo mole.

De acordo com Medeiros (2017), alguns problemas precisam ser investigados antes da construção de aterros sobre camadas de solo mole, são elas:

– Avaliação dos recalques diferenciais do pavimento, em decorrência da camada de solo mole, pelo efeito do peso do aterro;

– Estimativa do tempo necessário para que os recalques se efetivem;

– Indicação de eficácia dos processos executivos para assegurar a estabilidade do aterro, reduzir os recalques ou acelerar o tempo de ocorrência.

2.4 SUPERFÍCIES DE RUPTURA

Na Engenharia Rodoviária uma das principais aplicações da geotecnia é no estudo da estabilidade de taludes e análise de formas de ruptura, incluindo os cálculos de estabilidade e análises de estabilidade.

Quando a superfície de solo é exposta formando um ângulo com a superfície horizontal, é chamada de talude não restrito, podendo o talude por sua vez, ser natural ou superficial. Caso a superfície do solo não seja horizontal, a componente da gravidade tenderá a mover o solo para baixo. Se essa componente da gravidade for grande o suficiente, pode ocorrer a ruptura do talude, ou seja, a massa do solo poderá deslizar para baixo e a força motriz superar a resistência ao cisalhamento do solo ao longo da superfície de ruptura (DAS, 2007).

> Entende-se por cálculo ou análise de estabilidade de um talude o conjunto de procedimentos de cálculo matemático destinado a determinar o parâmetro que permita quantificar o quão estável ou instável está o talude em questão, nas condições às quais está sujeito (fluxo d´água, sobrecarga etc). Geralmente o parâmetro utilizado para isto é o Coeficiente ou Fator de Segurança (indicado por CS, ou FS, ou simplesmente F). (DER SP, 1991, p. 352).

O quadro abaixo mostra as condições de estabilidade de um talude em função do coeficiente de segurança citado anteriormente:

Figura 06 – Condição de estabilidade do talude em função do coeficiente de segurança.

Coeficiente de Segurança (CS)	Condição do talude
CS < 1,0	Talude instável; caso o talude venha a ser implantado (corte ou aterro) nestas condições, deverá sofrer ruptura.
CS = 1,0	Condição limite de estabilidade associada à iminência de ruptura; também condição adotada geralmente nos cálculos de retro-análise.
CS > 1,0 (pouco maior)	Condição .estável; quanto mais próximo de 1,0 for o CS, mais precária e frágil será a condição de estabilidade do talude.
CS >> 1,0 (muito maior)	Condição estável; quanto maior for o CS, menores serão as possibilidades do talude vir a sofrer ruptura quando submetido a condições críticas (de percolação d'água etc.).

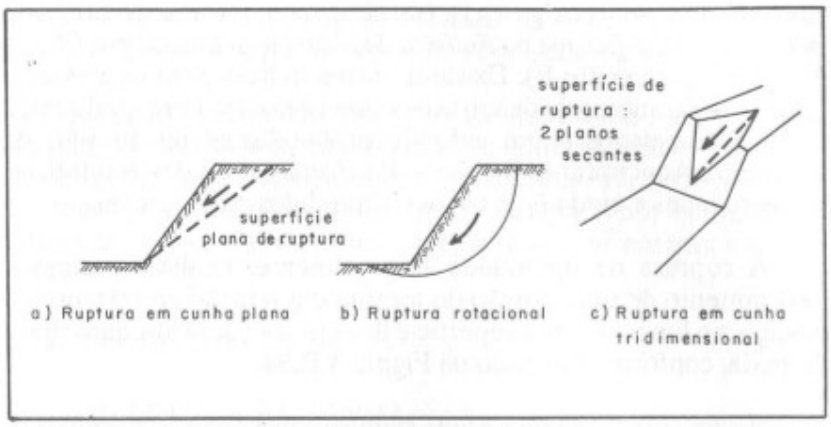
Fonte: (DER SP, 1991).

Esse Coeficiente ou Fator de Segurança “é, nesses casos, estabelecido como a relação entre o esforço resistente e o esforço atuante na massa passível de sofrer deslizamento.” (*id bid*., p. 353).

Essa verificação de estabilidade ou instabilidade, ou seja, a segurança dos taludes naturais, taludes de escavações e dos aterros compactados, ainda “[...] envolve a determinação da tensão de cisalhamento desenvolvida ao longo da superfície de ruptura mais provável e a comparação dela com a resistência do solo ao cisalhamento, sendo a superfície de ruptura mais provável a superfície crítica que tem o fator de segurança mínimo.” (DAS, 2007, p. 430).

Quando há um rompimento de um talude, são analisados a porção que sofreu deslizamento em relação ao restante do maciço ao longo da superfície de ruptura, no qual a análise considerará a porção que sofreu o deslizamento como um corpo rígido, adotando um desenvolvimento das tensões por meio das deformações do tipo rígido-plástico para simplificar o comportamento real de um solo (DER SP, 1991).

Figura 07 – Tipos de ruptura.



Fonte: (DER SP, 1991).

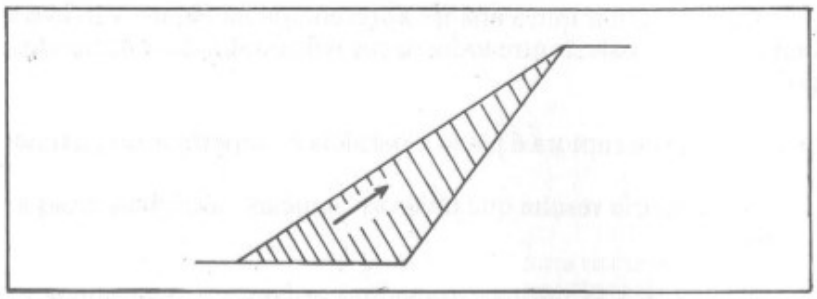
A análise da estabilidade é muito complexa e de difícil realização, então são usados alguns artifícios para simplificar tal análise, ao verificar algumas variáveis como a estratificação do solo, resistência ao cisalhamento no local, a percolação através do talude e a escolha da superfície potencial de deslizamento (DAS, 2007).

Desse modo, “dir-se-á que um talude é estável quando o esforço resistente for superior ao atuante e que ele é instável se ocorrer o inverso” (DER SP, 1991, p. 355).

2.4.1 Método de cunha

Uma das análises realizadas para a verificação da estabilidade de taludes é a chamada análise de estabilidade de rupturas em cunhas planas. Essa análise é bastante comum nos taludes de cortes quando a inclinação do talude é elevada, podendo ser maior que 60° fazendo com que a ruptura ocorra ao longo das superfícies planas, de maneira que a massa instável assume a forma de uma cunha. (DER SP, 1991). A figura 08 ilustra a ruptura em cunha plana de um talude:

Figura 08 – Ruptura em cunha plana.



Fonte: (DER SP, 1991).

Além dessas rupturas ocorrerem nos taludes de cortes, "Este tipo de ruptura também ocorre em taludes heterogêneos, com estratificação ou xistosidade mergulhado em ângulo inferior ao do corte, como ocorre em certos maciços rochosos de filitos, xistos e folhelhos ou seus respectivos saprolitos." (*id bid*., p.359).

Essa análise de ruptura em cunha plana pode ser realizada pelo método de Culmann:

> A análise de Culmann tem como base a hipótese de que a ruptura de um talude ocorre ao longo de uma plano quando a tensão média de cisalhamento que tende a causar o deslizamento é maior que a resistência ao cisalhamento do solo. Além disso, o plano mais crítico é aquele que tem uma relação mínima entra a tensão média de cisalhamento que tende a causar ruptura e a resistência ao cisalhamento do solo. (DAS, 2007, p. 438).

Dessa maneira de acordo com o DER SP (1991), a estabilidade de um talude é calculada pela sequência de equações a seguir:

(4)

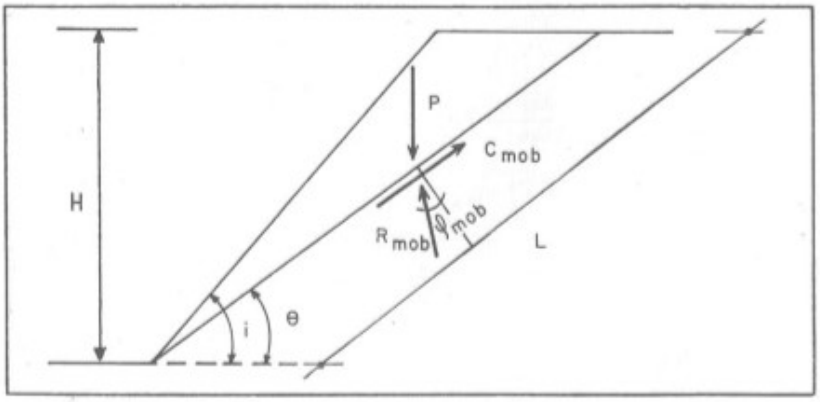
$$P = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H \cdot L \cdot \frac{sen(i - \theta)}{sen\ i}$$

(5)

$$C_{mob} = c_{mob} \, . L$$

Com o polígono das forças, obtém-se o resultado apresentado na figura 9.

Figura 09 – Características geométricas e forças na ruptura em "cunha plana".



Fonte: (DER SP, 1991).

Utilizando a “Lei dos Senos”, pode-se escrever:

(6)

$$\frac{C_{mob}}{sen\,(\theta - \varphi_{mob})} = \frac{P}{sen(90° + \varphi_{mob})}$$

Substituindo, tem-se:

(7)

$$\frac{c_{mob}}{\gamma \, . H} = \frac{1}{2} \frac{sen(\theta - \varphi_{mob}) . sen(i - \theta)}{sen\, i \, . cos\, \varphi_{mob}}$$

O primeiro fator da fórmula representa o “número de estabilidade” utilizado em cálculo de estabilidade em geral.

“Os parâmetros c, φ e γ são admitidos como constantes para um determinado maciço; logo para cada inclinação do talude (i) e altura do corte (H), haverá um determinado valor de ângulo (θ) que conduzirá à condição mais crítica.”(DER SP, 1991, p. 361).

A expressão é obtida com a derivação da equação 7:

(8)

$$\frac{c_{mob}}{\gamma \,.\, H\frac{P}{\theta} = \theta_{cr}} = \frac{1 - con(i - \varphi_{mob})}{4\,.sen\; i\,.cos\;\varphi_{mob}}$$

(9)

$$\theta_{cr} = \frac{1}{2}(i + \varphi_{mob})$$

Dessa maneira, o coeficiente de segurança é a relação entre a resistência do solo e a tensão atuante:

(10)

$$FS = \frac{c_{disp}}{c_{mob}} = \frac{(tg\;\varphi)disp}{(tg\;\varphi)mob}$$

Para obter o FS utiliza-se os valores inicias, resultando em:

(11)

$$FS_2 = \frac{c_{disp}}{c_{mob2}}$$

Se o FS_2 for igual ao FS_1 , o problema estará resolvido. Caso contrário, calcula-se um FS_3 , intermediário entre FS_1 e FS_2. É necessário repetir o calcula até se obter a coincidência, ou seja, o valor de FS desse talude.

> A inclinação crítica da superfície de ruptura θ_{cr} também não será obtida por uma expressão analítica derivada, mas por tentativas , calculando-se o FS para várias cunhas com ângulo de $\theta_p, \theta_2\, e\, \theta_a$ de onde resultará o FS do talude como mínimo entre os valores obtidos.(DER SP, 1991, p.363)

(12)

$$FS = mín.[FS_i(\theta_i)]$$

2.4.2 Método sueco

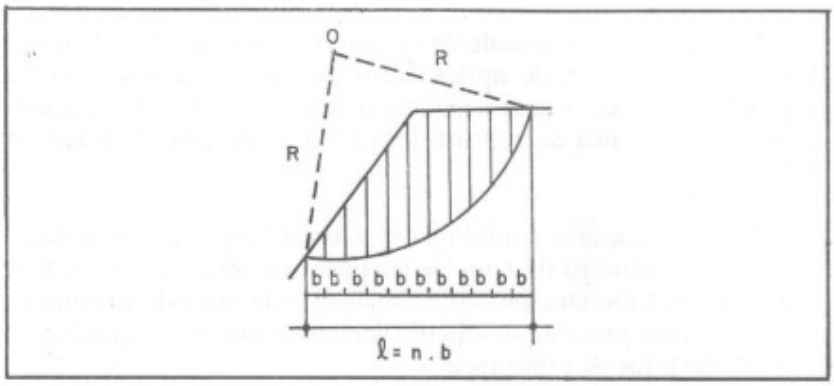
Um outro método conhecido e tradicional para análise de estabilidade de taludes é a análise de estabilidade de rupturas rotacionais, onde a massa instável é associada ao formato de um segmento cilíndrico. Há vários métodos disponíveis para os cálculos que são realizados, geralmente procurando associar à ruptura do talude com uma fórmula geométrica conhecida, ou seja, com a diretriz circular ou espiral logarítmica e foram estudados por Fellenius, Taylor, Bishop, Spencer, Rendulic, Janbu e outros (DER SP, 1991).

Grande parte dos métodos utiliza a técnica de subdividir o maciço de solo em fatias ou "lamelas" verticais, para o cálculo das somatórias de forças ou momentos das lamelas. Dentre os métodos mais utilizados encontra-se o Método Sueco ou de Fellenius, o método mais simples que utiliza as lamelas para a verificação das rupturas rotacionais de um maciço de solo. (DER SP, 1991).

> Estudos feitos na Suécia com relação a vários escorregamentos havidos em cortes ferroviários, cujos resultados foram utilizados por Fellenius para desenvolver seu método de cálculo, publicado em 1936, mostraram que as superfícies de ruptura observadas em taludes rompidos se aproximavam bastante de circulares (VARGAS, 1977, p. 372).

Para o cálculo do método de Fellenius, quando tem-se uma superfície de ruptura circular, divide-se a massa da superfície de ruptura em um certo número de lamelas verticais de largura constante, no qual, geralmente, com o uso de cerca de 10 lamelas, já obtém-se uma precisão de cálculo aceitável em relação ao fator de segurança (DER SP, 1991), conforme a figura 10.

Figura 10 – Divisão em lamelas.



Fonte: (DER SP, 1991).

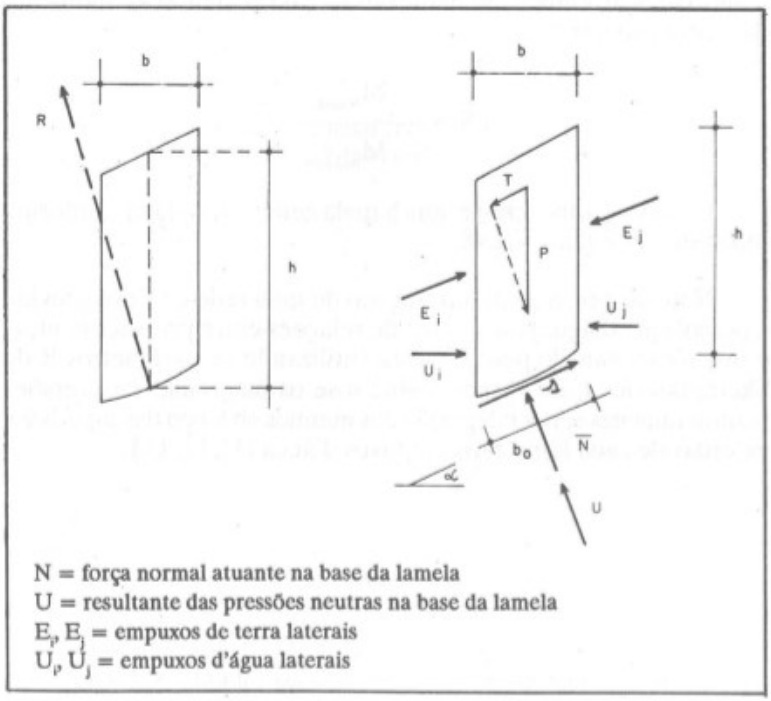
Para a obtenção do fator de segurança (FS), relaciona-se o momento da força resistente com o momento das forças atuantes, conforme abaixo:

(13)

$$FS = \frac{M_{Resist.}}{M_{Atuante}}$$

Então a lamela genérica é isolada, conforme a figura 11:

Figura 11 – Lamela "isolada" e esquema de forças atuantes.



Fonte: (DER SP, 1991).

Com a rede de fluxo traçada ou a partir das relações de pressões neutras ou totais, obtém-se o diagrama de pressões neutras atuantes, devido sua integração ao longo das superfícies externas de cada lamela, os empuxos d´água, sendo o cálculo feito a partir do equilíbrio das forças atuantes, conforme equação abaixo:

(14)

$$\bar{N} = P \,.\, cos\ a - U$$

Os momentos serão:

(15)

$$M^{\bullet}_{atuante} = T \,.\, R = P \,.\, sen\ a \,.\, R$$

(16)

$$M_{resistente} = (c \,.\, b_o + \bar{N} \,.\, tg\ \varphi).R$$

Cada lamela irá fornecer um conjunto de momentos atuante e resistente, de maneira que o coeficiente de segurança será obtido a partir do somatório desses:

(17)

$$FS = \frac{\sum c \,.\, b_o + \sum \bar{N} \,.\, tg\ \varphi}{\sum P \,.\, sen\ a}$$

Sendo que:

(18)

$$P = \gamma \,.\, b \,.\, h$$

(19)

$$\bar{N} = P \cos a - U = \gamma \,.\, b \,.\, h \,.\, \cos a - U = (\gamma \,.\, b \,.\, h \,.\, \cos a - \bar{u} \,.\, b_o)$$

Obtém-se então:

(20)

$$FS = \frac{\sum c \,.\, b_o + \sum(\gamma \,.\, b \,.\, h \,.\, \cos a \,.\, \bar{u} \,.\, b_o) \,.\, tg\ \varphi}{\sum \gamma \,.\, b \,.\, h \,.\, sen\ a}$$

Podendo ser apresentada como a equação abaixo:

(21)

$$FS = \frac{\frac{1}{\gamma \,.\, b}\sum c \,.\, b_o + \sum\left(h \,.\, \cos a - \frac{\bar{u} \,.\, b_o}{\gamma \,.\, b}\right) \,.\, tg\ \varphi}{\sum h \,.\, sen\ a}$$

Qualquer uma das equações pode ser utilizada para o cálculo. Obtendo-se o FS associado a situação adotada, esse pode ou não ser o círculo crítico, de modo a ser calculado

para vários círculos, adotando-se ao final uma estimativa do valor FS , para o círculo mais crítico analisado com o menor valor de FS. (DER SP, 1991).

2.5 COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE ATERROS SOBRE SOLOS MOLES

Para analisar a estabilidade e o comportamento geotécnico dos aterros sobre solos moles, são aplicados os métodos de equilíbrio limite considerando a resistência ao cisalhamento em termos das tensões totais. (MASSAD, 2010).

Quando um solo é carregado ele deforma-se. Essas deformações podem ocorrer imediatamente depois do carregamento, sendo chamadas de deformações imediatas ou podem ocorrer deformações, aquelas que dependem da saída de água dos vazios do solo, retardadas pela permeabilidade, são as deformações por adensamento que ocorrem nas argilas saturadas. Caso a deformação por adensamento não ocorra, nas argilas as deformações se prolongam por muito tempo, sendo lentas por adensamento secundário e o rastejo (CAPUTO, 1988).

De acordo com as propriedades dos solos moles, a execução de aterro sobre esses solos é realizada com base em algumas alternativas como a remoção da camada mole, a construção lenta do aterro dentre outras, para fazer com que esse solo adquira resistência para suportar as cargas que ele será submetido. (MEDEIROS, 2017).

Antes da aplicação dessas alternativas, deve-se verificar a viabilidade de cada uma, pois quando a espessura da camada de solo mole é relativamente grande, a primeira alternativa que consiste na remoção dessa camada não se torna viável e deve-se construir um aterro sobre esse solo, já que a camada a ser removida seria muito grande. (MEDEIROS, 2017).

Dessa maneira, a opção mais viável é a construção do aterro sobre a camada, visto que “[...] está construção pode-se dar em uma única etapa, caso o fator de segurança quanto à ruptura seja aceitável, ou em várias etapas, caso seja desejável permitir o contínuo ganho de resistência da camada de argila mole durante cada etapa.” (MEDEIROS, 2017, p.19).

3 METODOLOGIA

A presente monografia tem como objetivo principal analisar a relação de carregamentos limítrofes à rodovia e suas possíveis interferências ao longo do leito estradal, na busca por determinar possíveis fragilidades por meio da identificação da vocação quanto ao uso e ocupação dos solos.

Para o cumprimento do objeto proposto, a investigação realizada caracterizou-se como de abordagem quanti-qualitativa e procedimento do tipo pesquisa de campo com fundamentação bibliográfica e nível exploratório. Os estudos quantiqualitativo são relevantes porquanto possibilitam a ascensão dos envolvidos para o patamar interpretativo, o que não ocorre com a estrutura tradicional de ensino existente.

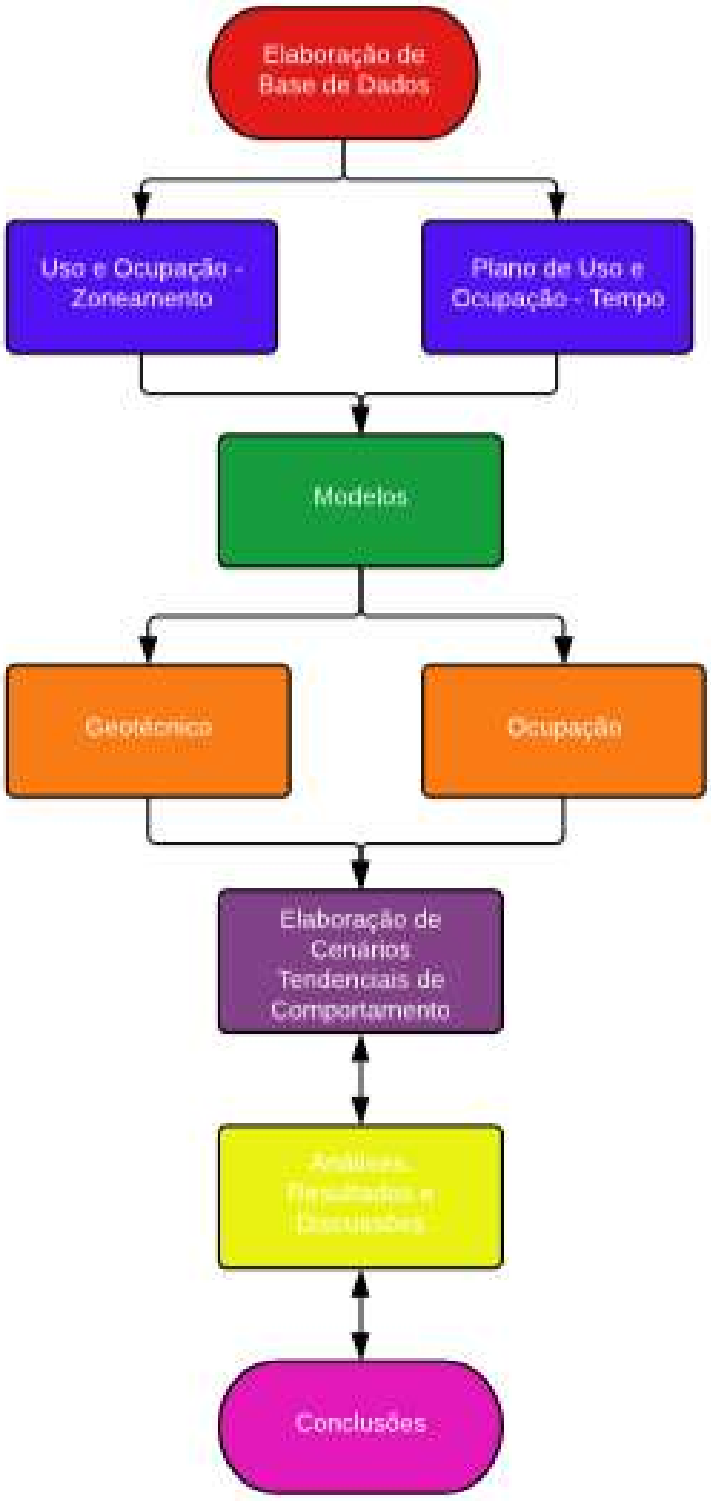
Demo (2012) afirma que a pesquisa deve ser envolta por sofisticação e especialidade, entretanto, não pode se esgotar nisso. A essência dela é o questionamento crítico, criativo e sistemático com a incorporação da intervenção consciente na realidade posta.

O método de procedimento foi o estudo de campo, neste caso, imprescindível, considerando-se que o objeto de estudo foi a região limítrofe de uma rodovia localizada no município de Tubarão e a percepção da realidade pela observação direta, tornou-se o principal instrumento de coleta de dados. Assim, escolhido pela pesquisadora que, amparada na descrição de Spink (2003) percebeu ser este tipo de estratégia a mais adequada para o estudo realizado.

O nível do estudo realizado foi exploratório pois, este, determinou a necessidade de aprofundamento da temática pela pesquisadora e, ao mesmo tempo, em função da abordagem e procedimento da pesquisa, houve descrição e manipulação de variáveis.

Operacionalmente, a metodologia proposta para o desenvolvimento deste trabalho é sintetizada na figura 12.

Figura 12 – Fluxograma da metodologia do estudo



Fonte: Elaborado pela Autora (2019).

Dessa forma, essas etapas demonstradas por meio do fluxograma da metodologia do estudo, podem ser detalhadas conforme descrito a seguir:

a) Elaboração de base de dados: a partir de inspeções de campo, com base em informações disponibilizadas por órgãos públicos, foram identificadas as possíveis áreas de ocupação a serem futuramente ocupadas e loteadas.
b) Uso e ocupação - zoneamento: foram realizadas consultas junto a diversos órgãos (público e privado), de forma a melhor fomentar as características principais do solo da localidade de implantação da rodovia e dados de desempenho do mesmo, por meio dos laudos de sondagem, dentre outras informações pertinentes ao cumprimento dos objetivos dessa análise.
c) Plano de uso e ocupação – tempo: foram consultadas as legislações estaduais e municipais referentes aos elementos urbanísticos e de usos e ocupação dos solos para compreender o zoneamento da localidade e o plano de ocupação que futuramente será proposto para o entorno da rodovia.
d) Modelos: foram feitos modelos de acordo com o tipo de zoneamento definido conforme a coleta de dados realizada, juntamente com o estudo produzido no referencial teórico que relata o tipo de solo da localidade do estudo e suas particularidades referentes ao suporte das cargas da rodovia e da ocupação de seu entorno, sendo definidos modelos geotécnicos conceituais e cotas de aterros recomendadas durante a futura ocupação.
e) Elaboração de cenários tendenciais de comportamento: com o auxílio de um software de estatística, foram elaborados cenários tendenciais de comportamento baseados nas variações de dados realizadas, bem como a determinação do grau de confiabilidade dos possíveis modelos propostos.
f) Análises, resultados e discussões: serão analisados os modelos geotécnicos e de ocupações elaborados, verificando os resultados e discutindo suas aplicações durante a ocupação do solo do entorno da rodovia, e viabilidade conforme as conclusões obtidas, a partir de metodologias clássicas regionalizadas.

4 RESULTADOS E DISCUSÕES

A partir da revisão bibliográfica, tornou-se possível abranger os parâmetros geotécnicos fundamentais sobre os solos moles, bem como seus diferentes comportamentos quando submetidos a tensões originadas da aplicação da carga de aterro sobre eles. Destarte, será possível o entendimento dos dados que serão discutidos nesse capítulo.

A área de estudo será abordada com suas diversas características juntamente com o método e com o tratamento de dados que foram realizados para o desenvolvimento desse trabalho e o alcance dos resultados e discussões.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Tubarão, também conhecido como Cidade Azul, foi criado em 27 de maio do ano de 1870 após desmembrar-se do munícipio de Laguna. Tubarão está localizado na região Sul de Santa Catarina, sendo cortado pelo rio de mesmo nome, que os habitantes primitivos batizaram com o nome de Tubarão. (PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO, 2014).

Figura 13 – Localização da área de estudo

Fonte: Google Maps (2019).

A figura 13 ilustra o mapa da cidade, a localização da área de estudo e local onde o município é cortado pelo Rio Tubarão.

A presença do Rio Tubarão no município, fez com que os primeiros imigrantes realizassem o povoamento da cidade nos arredores do mesmo, para que pudessem dedicar-se a pesca e a lavoura, acompanhando a via natural que se oferecia como um caminho aberto ao interior e que proporcionava a eles as terras férteis e produtivas do seu vale. (PREFEITURA MUNICIPAL DE TUBARÃO, 2014).

A Emprapa, em meio a um Levantamento de Reconhecimento de Solo de Alta Intensidade de Santa Catarina, realizado no ano de 2000, revela os aspectos do relevo e dos solos do munícipio de Tubarão, bem como o uso dos solos no ano de 2000 recomendado.

Quadro 1– Relevo e Solos - Uso Atual e Recomendado - 2000

RELEVO E SOLOS	**ÁREA (ha)**	**USO DOS SOLOS**	
		Atual	**Recomendado**
6% solos planos hidromórficos Gleissolos (Gleis) (14.095 ha) Organossolos (4.020 ha)	18.115	Lavoura de arroz irrigado e pastagem	Lavoura de arroz irrigado e pastagem e possibilidade da criação de camarão nos Organossolos
26,6% solos suave-ondulados e ondulados - Cambissolos (48.030 ha) e Argilossolos (Podzólicos - 32.360 ha)	80.390	Culturas anuais e perenes, pastagens e reflorestamento	Culturas anuais e perenes, pastagens e reflorestamento
59,1% solos declivosos - Cambissolos (106.910 ha) e Argilossolos (Podzólicos - 72.035 ha)	178.945	Culturas anuais e perenes, pastagens e reflorestamento	Culturas perenes, pastagens, reflorestamento, preservação permanente
7,1% solos de elevada declividade, rasos - Neossolos (Litossolos e Solos Litólicos)	21.445	Reflorestamento, preservação permanente	Preservação permanente
1,2% outros solos, corpos de água e áreas urbanas	3.765	-	-
REGIÃO	302.660	-	-

Fonte: Empraba - Levantamento de Reconhecimento de Solo de Alta Intensidade de Santa Catarina (2000).

Porém, com a necessidade de desenvolver-se e com o crescimento da população, estimada em 2019 pelo IBGE de 105.686 pessoas, o uso e ocupação dos solos passou a sofrer mudanças. A terra fértil e os Solos argilosos que o Rio Tubarão proporcionava para o cultivo das diversas lavouras de arroz irrigado e pastagem, passou a ceder lugar para grandes construções de edifícios, industrias e rodovias.

A implantação da Rodovia de Acesso Norte do Município de Tubarão, conforme citado anteriormente, tem por objetivo diminuir os longos congestionamentos e desafogar o

trânsito, facilitando a mobilidade urbana para os moradores da cidade e para os moradores dos municípios de Gravatal e demais municípios que interligam a região.

Disposta sobre um trecho de solo mole em toda a sua extensão, a Rodovia de Acesso Norte de Tubarão, trouxe consigo grandes dificuldades devido à baixa capacidade de suporte desses solos. Foram usadas diversas técnicas construtivas para lidar com os grandes recalques e, inclusive, foram respeitados os longos tempos de adensamento devido à baixa capacidade do material, sempre com acompanhamento contínuo durante a execução da obra para prever e denunciar possíveis rupturas, possibilitando medidas corretivas imediatamente.

Além de diminuir os congestionamentos e desafogar o trânsito, a implantação da Rodovia proporcionará um grande desenvolvimento regional, ao conceber uma nova forma de ocupação em sua região limítrofe. Isto porque, a região, do ponto de vista urbanístico, é composta por zoneamento industrial, inclusive já existindo algumas propostas de ocupação em fase de aprovação junto aos diferentes órgãos. Apenas como forma elucidativa, a figura 14 apresenta uma das propostas de ocupação em fase de aprovação junto ao Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina – IMA.

Figura 14 – Proposta de Ocupação IMA

Fonte: Sig. IMA Adaptado (2019).

Ao considerar a região limítrofe da Rodovia de Acesso Norte o local de estudo, pode-se observar que os solos argilosos também estão presentes nesses locais, pois pertencem à mesma região, antes ocupada pelo cultivo das lavouras de arroz irrigado e pela pastagem.

Dessa maneira, foi estimado no decorrer desse presente estudo, como será o comportamento desses solos em relação as tensões e as deformações que os mesmos sofrem com o tempo, a medida em que são submetidos a determinadas cargas de aterro imediatamente, após o término da construção da Rodovia e o começo das obras industriais em seu entorno.

4.2 PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Para a compreensão do tipo de solo do município de Tubarão que foi encontrado na localidade em que a Rodovia de Acesso Norte foi construída, bem como o solo de sua região limítrofe analisado na presente monografia, contou-se com o perfil estratigráfico longitudinal.

O perfil estratigráfico longitudinal foi traçado após a realização das sondagens ao longo dos terrenos em que a rodovia seria construída, para a verificação do comportamento do solo presente, tanto vertical quanto horizontalmente. Assim, foi possível um conhecimento mais detalhado do subleito do solo, para que medidas fossem tomadas para a utilização da forma de drenagem adequada para toda a extensão.

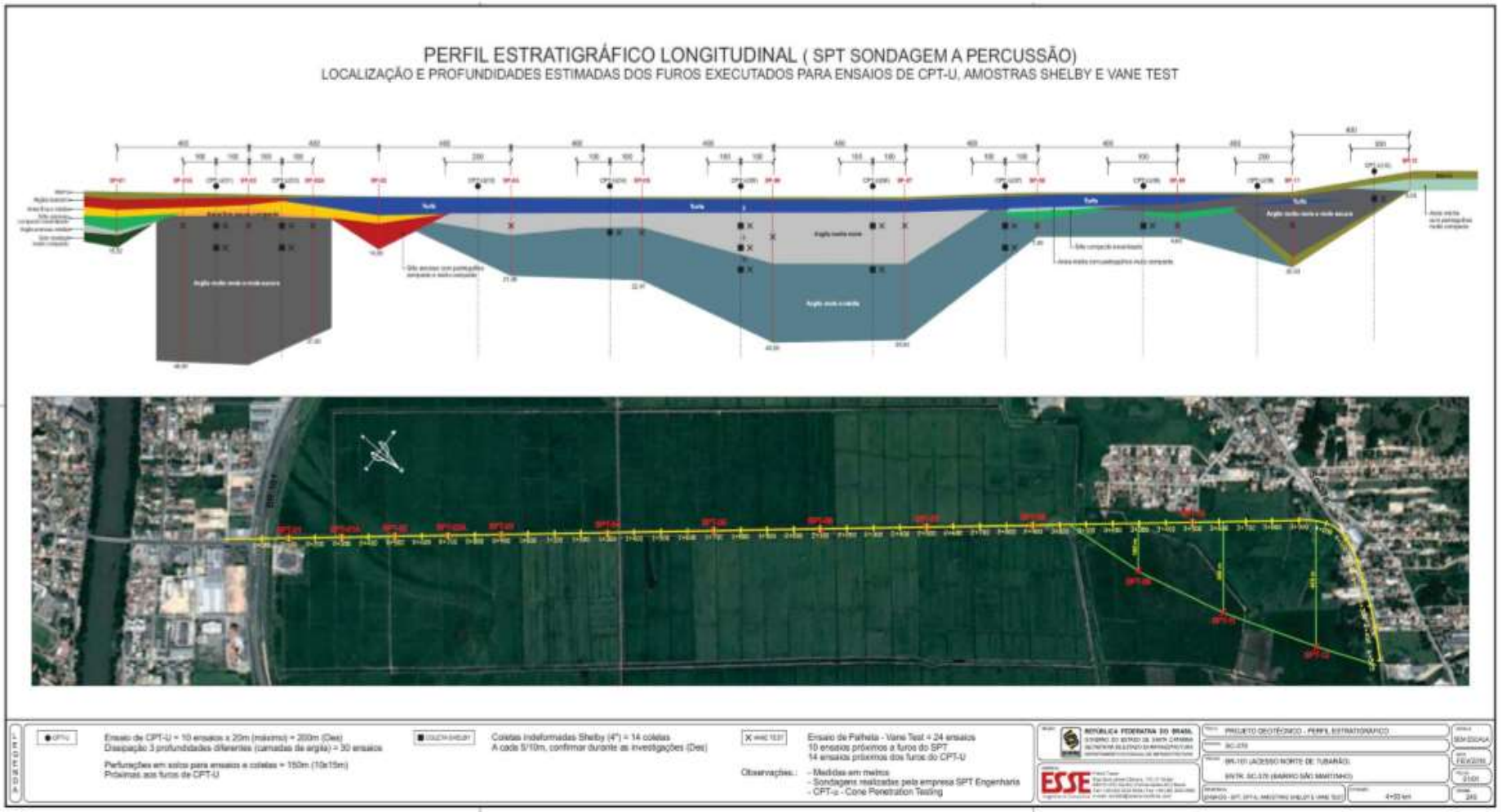
Assim como o perfil estratigráfico longitudinal permitiu uma melhor análise do solo durante a construção da Rodovia, ele proporcionou, também, a caracterização do solo da região limítrofe a ela, que se apresenta com o mesmo tipo de solo por encontrar-se na mesma região.

A figura 15 mostra o perfil estratigráfico longitudinal traçado após a realização das sondagens e apresenta que o subleito da região é formado predominantemente por argilas moles, médias e muito moles. Essa característica impediu a remoção dessa profunda camada, estabelecendo-se novas tecnologias de drenagem durante a construção da Rodovia de Acesso Norte. Somada a essa alternativa, a espera do adensamento adequado desse tipo de solo também foi de fundamental importância, a fim de não prejudicar a estabilidade da rodovia e para impedir os grandes recalques.

A partir desse estudo, verificou-se que na região limítrofe a rodovia, também se apresentava inviável a substituição do solo encontrado, sendo proposto então a aplicação de aterros de jazidas da região de Tubarão sob esses solos em seu entorno, que será ocupado imediatamente ao término da rodovia, sem a remoção das camadas de argila mole.

As jazidas encontradas na região de Tubarão, apresentam-se a seguir:

Figura 15 – Perfil Estratigráfico Longitudinal



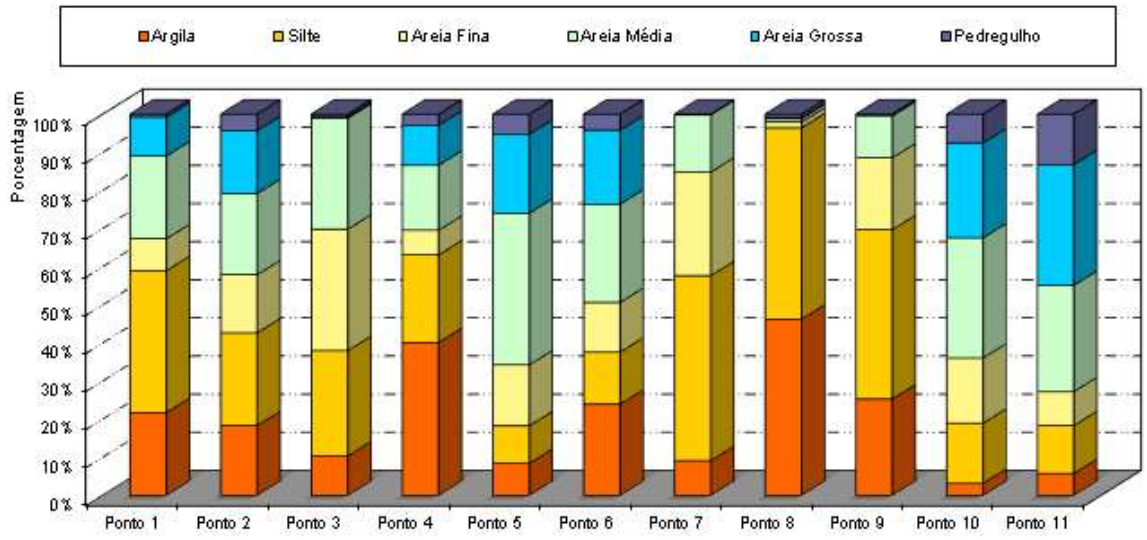
Fonte: ESSE (2019).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS JAZIDAS DA REGIÃO DE TUBARÃO

O município de Tubarão, geotecnicamente, é composto por solos residuais de granito, com textura afanítica e que delimitam uma bacia de argila mole de sedimentos marinhos. Logo, os solos provenientes das regiões graníticas, são em sua maioria, de origem câmbica, sendo utilizados como jazidas de solos para fins diversos, inclusive corpo de aterro para obras de Pavimentação.

Medeiros (2006), realizou uma série de ensaios de caracterização para fins de correlações com ensaios de compactação e dcp, sendo os resultados granulométricos apresentados na figura 16.

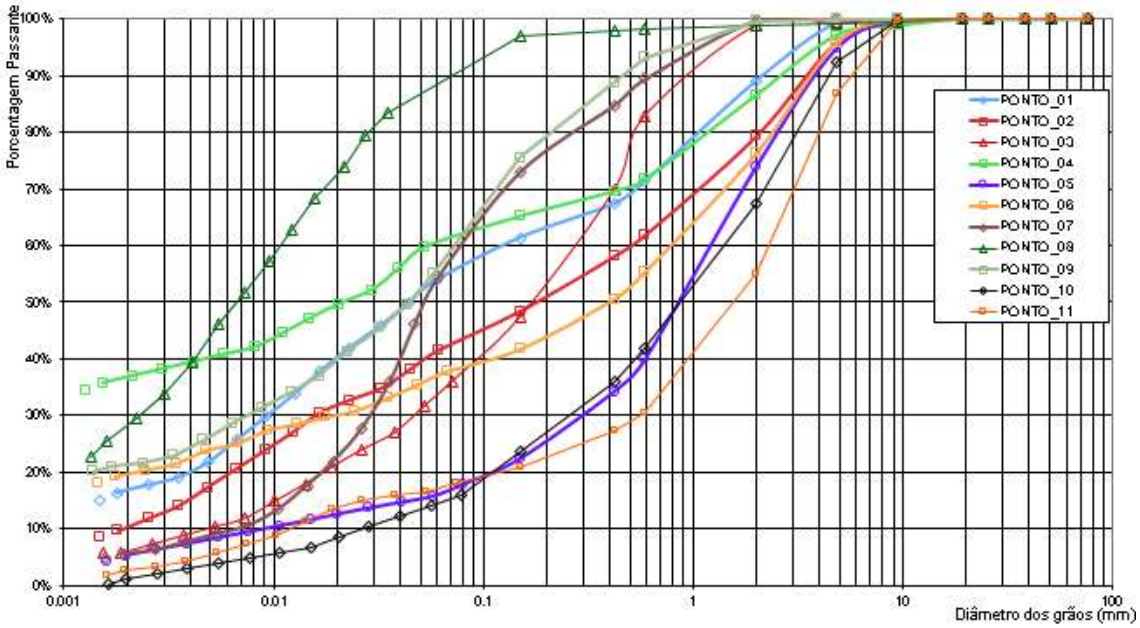
Figura 16 – Granulometria das Jazidas da Região de Tubarão



Fonte: MEDEIROS (2006).

A figura 16 apresenta as porcentagens de argila, silte, areia fina, areia média, areia grossa e pedregulho encontradas em onze pontos, em jazidas nas regiões de Fábio Silva, São Bernardo, Dehon e Termas do Gravatal. Essas jazidas foram utilizadas como uma suposição do fornecimento de aterro para região limítrofe a Rodovia estudada nessa monografia, para o cálculo do possível recalque dessa região. A distribuição granulométrica desses onze pontos das jazidas escolhidas é apresentada na figura 17:

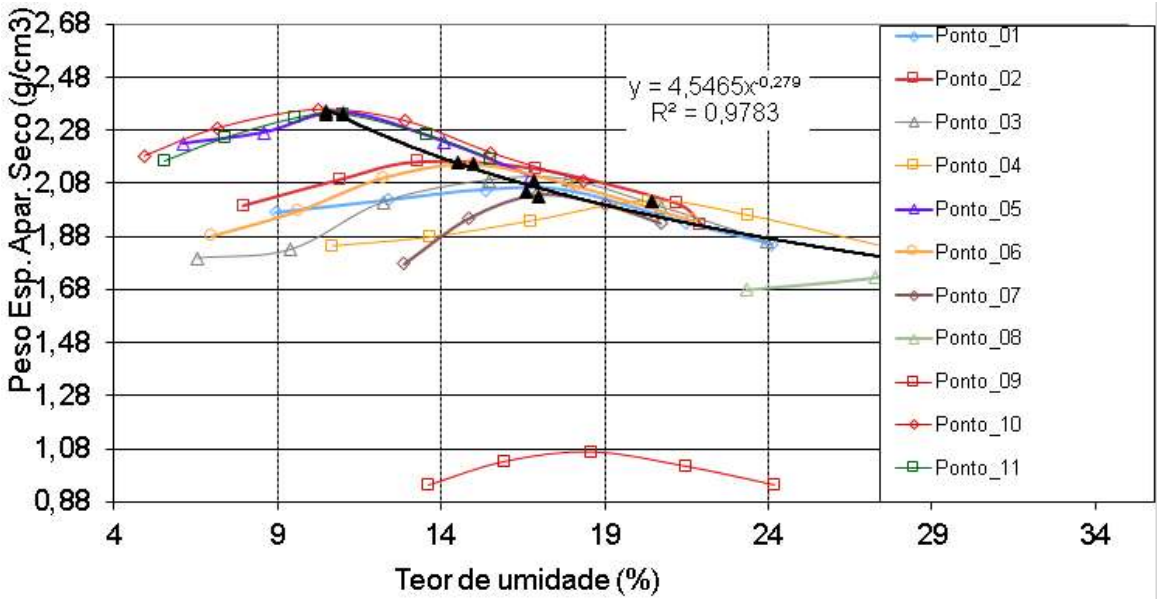
Figura 17 – Distribuição Granulométrica



Fonte: Medeiros (2006).

Dessa maneira, para a aplicação dessas jazidas analisadas como corpo de aterro da região limítrofe estudada, foi considerado a densidade desses solos já compactada para o carregamento imediato do entorno, conforme figura 18:

Figura 18 – Teor de Umidade pelo Peso Esp. Apar. Seco



Fonte: Medeiros (2006).

As densidades encontradas em cada um dos pontos serão detalhadas e apresentadas no decorrer do estudo do recalque da região limítrofe.

4.4 MODELO ESTATÍSTICO DE COMPORTAMENTO DO SOLO A PARTIR DO CARREGAMENTO

Após análise e caracterização da região de estudo e das jazidas encontradas na região de Tubarão propostas para o uso como aterro em toda a extensão da região limítrofe a Rodovia de Acesso Norte, foram propostas quatro condições de modelos de carregamento para essa região, variando os dados coletados conforme já detalhado ao longo deste trabalho.

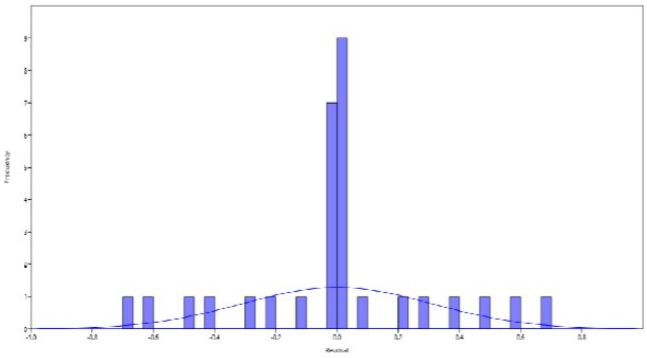
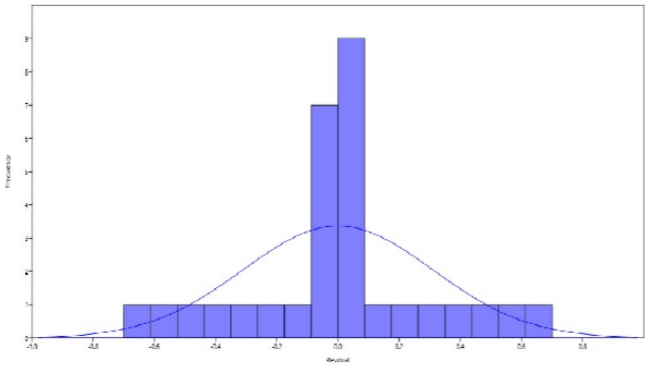
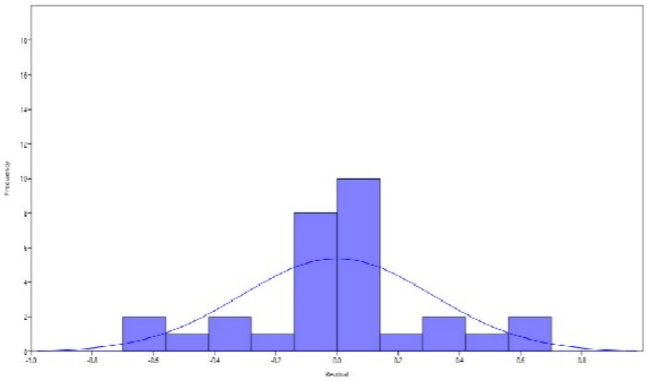
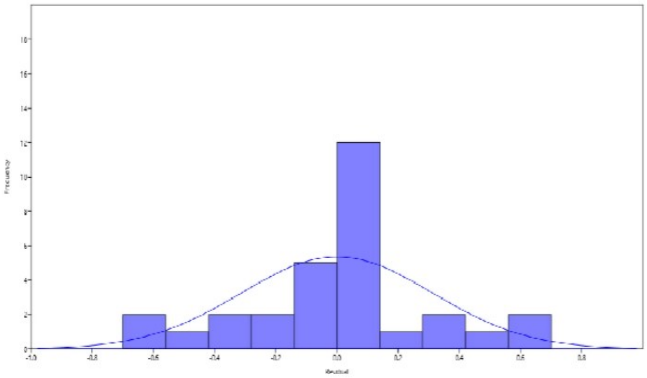
No primeiro modelo, o peso específico do aterro e altura da camada de argila permaneceram constantes, já nos demais modelos os mesmos variaram. Para os pesos específicos do aterro, foram admitidos daqueles aterros citados anteriormente coletados nas jazidas do município de Tubarão, já as alturas variaram de 10 metros a 16,50 metros.

Juntamente com a variação de dados, foram realizadas análises estatísticas de forma a determinar o grau de confiabilidade dos possíveis modelos propostos. Para isto, os diferentes testes de hipóteses foram realizados com o auxílio do software “Past 3”. A escolha por esta ferramenta fez-se em função de ser uma ferramenta de plataforma do tipo *Open Source*.

A primeira análise estatística foi realizada através da representação gráfica em Histogramas de Classes, correlacionando-os a distribuição normal ou curva de Gauss.

O quadro 2 apresenta os histogramas de classes para a verificação da distribuição normal dos dados gerados com as variações nos quatro modelos de análise de recalques que foram propostos.

Quadro 2 – Histogramas de Classe

Histograma de Classe	Análise
	Histograma de Classe 1 sem variação. Peso específico do aterro e altura da camada de argila constantes.
	Histograma de Classe 2 com variação. Peso específico do aterro variando de acordo com os encontrados nas jazidas de aterro nas regiões do município de Tubarão e altura da camada de argila constante.
	Histograma de Classe 3 com variação. Peso específico do aterro variando de acordo com os encontrados nas jazidas de aterro nas regiões do município de Tubarão e altura da camada de argila variando de 10 a 16,50 metros.
	Histograma de Classe 4 com variação. Peso específico do aterro constante e altura da camada de argila variando de 10 a 16,50 metros.

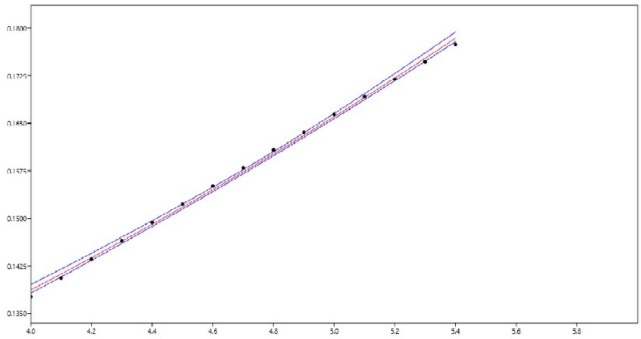
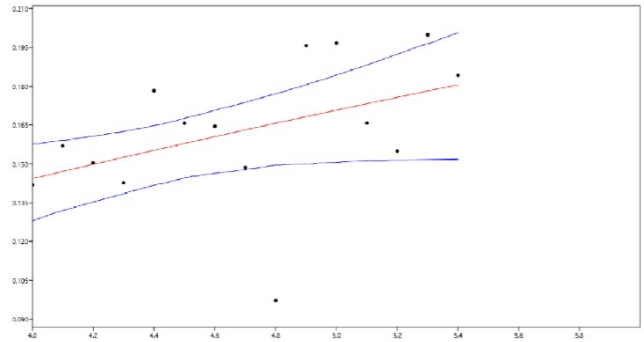
Fonte: Elaborado pela autora (2019).

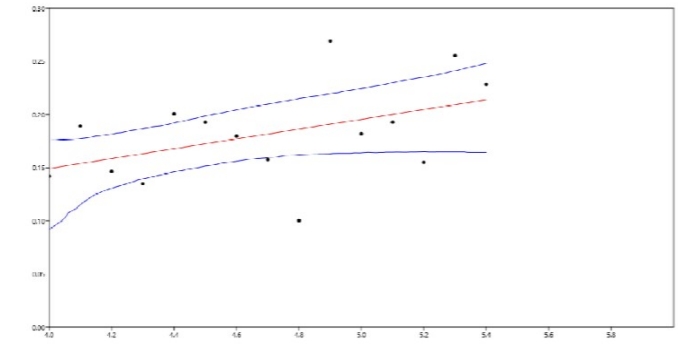
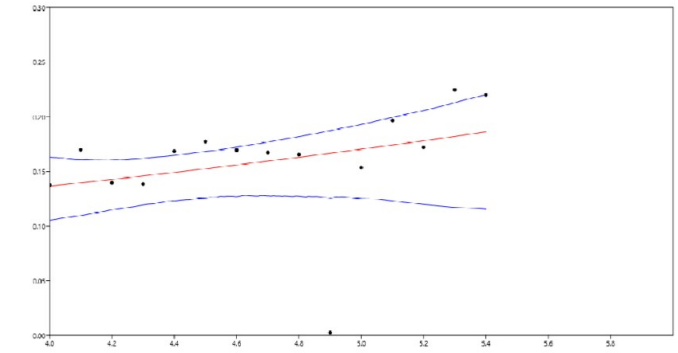
Essa opção foi escolhida com a finalidade de análise e representação dos dados gerados, dando subsídios para a conclusão de que os valores que foram obtidos com a criação dos modelos pudessem ser utilizados, pois de acordo com os histogramas de classes, os valores podem ser relacionados entre si. Juntamente com a curva de Gauss, pode-se verificar, também, que os valores que foram encontrados apresentam uma distribuição normal, ou seja, formam uma curva simétrica, mostrando que a maior concentração dos dados gerados se encontra em maior parte no centro da curva, garantindo alta confiabilidade nesses dados.

Após realizar os testes dos dados nos Histogramas de Classes, optou-se por gerar modelos representativos de comportamento de cada variação proposta, definindo a melhor variação para cada um desses modelos como também e equação que o define.

O quadro 3, traz a representação gráfica de cada modelo, sua variação e respectiva equação que o define:

Quadro 3 – Modelos

Modelo	**Variação**	**Equação que define o modelo.**
	Modelo 1 sem variação. Peso específico do aterro e altura da camada de argila constantes.	Exponencial y = 0,06753*exp. (0,17993x)
	Modelo 2 com variação do Peso específico do aterro e altura da camada de argila constante.	Michaelis y = 0,64392x/(13,851+x)

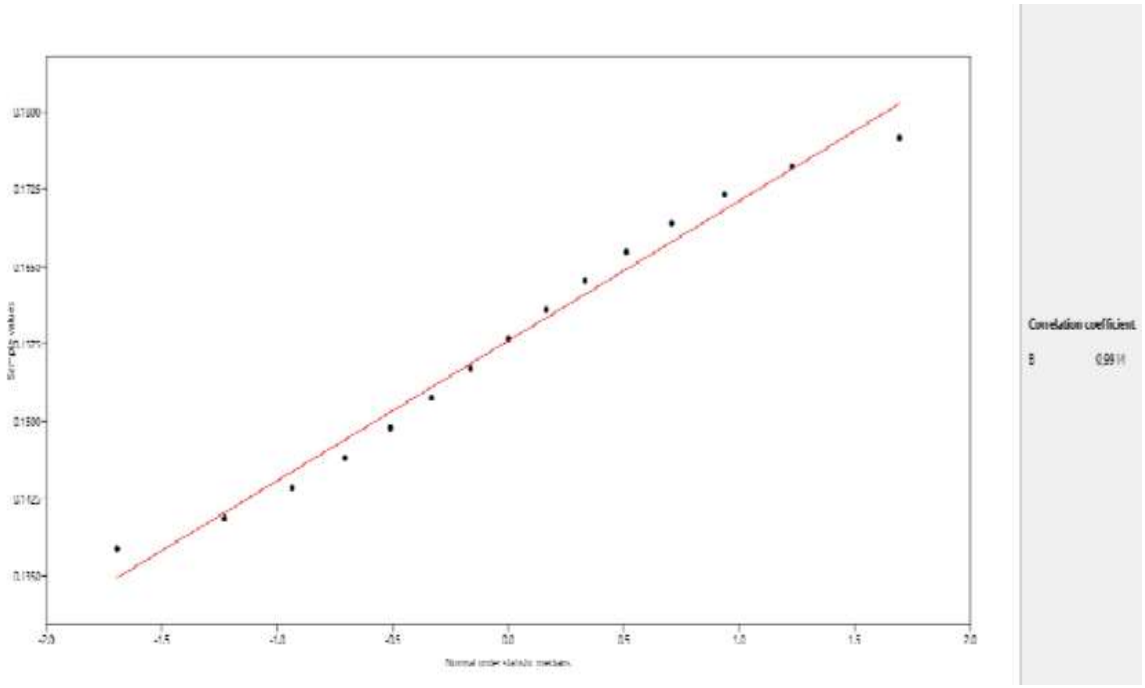
	Modelo 3 com variação do Peso específico do aterro e altura da camada de argila.	Von Bertalanffy y = 3,5721*(1-1,0118*exp(-0,01361x))
	Modelo 4 com variação altura da camada de argila e Peso específico do aterro constante.	Exponencial y = 0,056309*exp.(0,22144x)

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Pôde-se observar que a variação predominante foi definida pelo modelo exponencial. Dessa maneira, em meio aos quatros modelos propostos, realizou-se um último teste estatístico para verificação da distribuição dos recalques.

Nos testes estatísticos para verificação da distribuição normal dos recalques em relação a todos os modelos gerados, verificou-se semelhanças no comportamento dos mesmos. Por esse motivo resolveu-se adotar para demostrar nesse capítulo, apenas a distribuição normal dos recalques do primeiro modelo que foi gerado (Figura 18), os demais serão apresentados no apêndice dessa pesquisa.

Figura 19 – Distribuição Normal dos Recalques



Fonte: elaborado pela autora (2019).

Conforme a figura 19, em todos os testes realizados, foi verificado que a distribuição do recalque se apresenta de forma linear, ou seja, que o recalque aumenta, linearmente, em relação à altura de aterro.

4.5 ESTUDO DO RECALQUE DA REGIÃO LIMÍTROFE

Após o conhecimento da região de estudo e do perfil estratigráfico da mesma, verificou-se que o local onde, possivelmente, será ocupado após o término da construção da Rodovia de Acesso Norte, também apresenta um solo argiloso característico da região de Tubarão. A região analisada, também era destinada a lavouras de arroz e pastagens, sendo assim um solo adequado para essas atividades.

Conforme foi observado no perfil estratigráfico longitudinal da rodovia, a camada de solo mole existente está presente em toda a sua extensão do subleito e em grande quantidade, excluindo a possibilidade de remoção dessa camada, tanto para a construção da rodovia, quanto para a ocupação de seu entorno.

Sabe-se que, durante a implantação da Rodovia de Acesso Norte do Município de Tubarão foram utilizadas novas tecnologias de construção, incluindo técnicas novas de drenagens para a aceleração de recalques, como também período de espera durante o

adensamento das camadas de solos moles dessa região para não prejudicar a estabilidade da rodovia como, também, prever os recalques.

Com base nesses fatores, após excluída a possibilidade de remoção do Solo Mole do entorno da rodovia, resolveu-se propor modelos de carregamentos para toda a extensão da região limítrofe a fim de analisar os recalques.

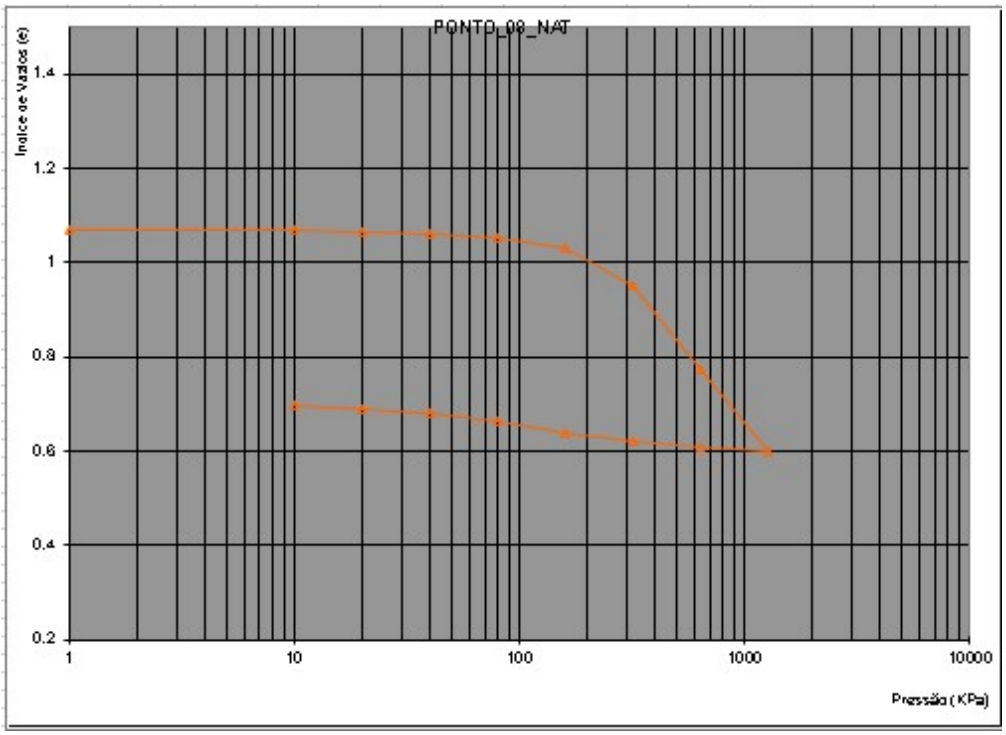
Desse modo, aplicou-se o carregamento, ou seja, uma camada de aterro sobre solo mole do entorno, para analisar as interferências que a tensão proporcionada causaria no comportamento deste, quanto a compressibilidade, seu adensamento e cisalhamento, bem como as deformações e consequentemente o possível recalque.

Essas análises do recalque foram realizadas com base na Teoria do Adensamento da Analogia Mecânica de Terzaghi. Essa teoria explica, como citado anteriormente, que quando aplica-se um carregamento em um solo saturado, os recalques evoluem com o tempo.

Isso ocorre porque o recalque final que uma estrutura vai sofrer, será composto de outras parcelas, como, por exemplo, o recalque imediato e o recalque elástico, isso explica a espera do adensamento na construção da Rodovia. O adensamento trata o cálculo do recalque total que um solo sofrerá no campo, que processam-se no decorrer do tempo, e que deve-se a uma expulsão de água dos vazios do solo.

Para calcular o recalque da região limítrofe a Rodovia de Acesso Norte do Município de Tubarão, utilizou-se como base, os resultados dos ensaios de compressibilidade já realizados do local onde a rodovia foi construída para tornar possível o desenvolvimento dos modelos de tendências comportamentais para os diferentes cenários criados em relação ao entorno. A figura 20, demonstra a curva de compressibilidade do solo da localidade estudada:

Figura 20 – Curva de Compressibilidade do Solo



Fonte: Medeiros (2006).

A partir da curva de compressibilidade do solo, foi possível a obtenção de alguns valores necessários para a aplicação da Teoria do Adensamento da Analogia Mecânica de Terzaghi como a tensão efetiva de pré-adensamento e os índices de compressão e recompressão.

A tensão efetiva de pré-adensamento (σPa') é o valor que consiste na máxima tensão efetiva que o solo já foi submetido em toda a sua história e corresponde ao limite de dois trechos da curva de compressibilidade, o trecho de recompressão (Cr) e o trecho de compressão (Cc). O valor da tensão efetiva de pré-adensamento do solo da região limítrofe da Rodovia é de 250kPa e os valores dos índices de compressão e de recompressão são de 0,5075 e 0,00567, respectivamente.

Para o cálculo do recalque com a utilização da Teoria de Terzaghi, nos casos em que a tensão final do solo foi menor que a tensão efetiva de pré-adensamento utilizou-se o índice de recompressão (Cr). Já, quando a tensão efetiva de pré-adensamento apresentou-se entre os valores das tensões iniciais e finais, ambos os índices (Cc e Cr) foram utilizados no cálculo. Por fim, quando a tensão inicial foi maior que a tensão efetiva de pré-adensamento, utilizou-se apenas o índice de compressão (Cc) no cálculo dos recalques. A seguir, foram demonstradas todas as equações utilizadas para o cálculo do recalque do solo da região limítrofe a Rodovia de Acesso Norte do Município de Tubarão:

(22)

$$\sigma f < \sigma Pa' = \frac{h.Cr}{1+e}\, x \log \frac{\sigma f}{\sigma i}$$

(23)

$$\sigma i < \sigma Pa' < \sigma f = \frac{h.Cr}{1+e}\, x \log \frac{\sigma Pa'}{\sigma i} + \frac{h.Cc}{1+e}\, x \log \frac{\sigma f}{\sigma Pa'}$$

(24)

$$\sigma i > \sigma Pa' = \frac{h.Cc}{1+e}\, x \log \frac{\sigma f}{\sigma i}$$

Partindo dessas condições demonstradas pelas equações, foram calculados os recalques da região limítrofe a Rodovia de Acesso Norte do Município de Tubarão, fazendo a utilização dos índices de compressão (Cc) e recompressão (Cr) de acordo com a curva de compressibilidade.

Os cálculos realizados encontram-se nas tabelas 1,2, 3 e 4 que serão apresentadas a seguir. As tabelas demonstram como foram calculados os recalques levando em consideração quatro condições. Todas as condições foram calculadas com a utilização dos dados coletados na curva de compressibilidade de tensão efetiva de pré-adensamento (σPa'), índice de compressão (Cc) e índice de recompressão (Cr), sendo variados os pesos específicos e as alturas das camadas de aterro e argila, consistindo em tensões iniciais, finais e resultantes de recalques diferentes.

Na primeira condição apresentada pela tabela 1, o recalque foi calculado com a utilização dos valores de peso específico de aterro e altura da camada de argila constantes, representando a condição atual de pesos específicos e altura das camadas de aterro e argila encontradas de acordo com os dados da construção da Rodovia de Acesso Norte do Município de Tubarão.

Tabela 1 – Cálculo Recalque Condição 1

Peso Específico Aterro (kN/m³)	Altura Aterro (m)	σf (kPa)	Peso Específico Argila (kN/m³)	Altura Camada de Argila (m)	σi (kPa)	σPa' (kPa)	Recalque (m)
19,0	4,0	293,5	14,5	15,0	217,5	250	**0,1376**
19,0	4,1	295,4	14,5	15,0	217,5	250	**0,1406**
19,0	4,2	297,3	14,5	15,0	217,5	250	**0,1435**
19,0	4,3	299,2	14,5	15,0	217,5	250	**0,1464**
19,0	4,4	301,1	14,5	15,0	217,5	250	**0,1493**
19,0	4,5	303,0	14,5	15,0	217,5	250	**0,1522**
19,0	4,6	304,9	14,5	15,0	217,5	250	**0,1551**
19,0	4,7	306,8	14,5	15,0	217,5	250	**0,1580**
19,0	4,8	308,7	14,5	15,0	217,5	250	**0,1608**
19,0	4,9	310,6	14,5	15,0	217,5	250	**0,1636**
19,0	5,0	312,5	14,5	15,0	217,5	250	**0,1664**
19,0	5,1	314,4	14,5	15,0	217,5	250	**0,1692**
19,0	5,2	316,3	14,5	15,0	217,5	250	**0,1720**
19,0	5,3	318,2	14,5	15,0	217,5	250	**0,1747**
19,0	5,4	320,1	14,5	15,0	217,5	250	**0,1774**

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Já na segunda condição admitiu-se os valores dos pesos específicos variáveis, onde foram utilizados um pouco de aterro de cada jazida com seus respectivos valores dos pesos específicos demonstrados anteriormente.

Tabela 2 – Cálculo Recalque Condição 2

Peso Específico Aterro (kN/m³)	Altura Aterro (m)	σf (kPa)	Peso Específico Argila (kN/m³)	Altura Camada de Argila (m)	σi (kPa)	σPa' (kPa)	Recalque (m)
19,6859	4,0	296,2	14,5	15,0	217,5	250	**0,1419**
21,6252	4,1	306,2	14,5	15,0	217,5	250	**0,1570**
20,0740	4,2	301,8	14,5	15,0	217,5	250	**0,1504**
18,4256	4,3	296,7	14,5	15,0	217,5	250	**0,1426**
23,4567	4,4	320,7	14,5	15,0	217,5	250	**0,1783**
21,0033	4,5	312,0	14,5	15,0	217,5	250	**0,1657**
20,3708	4,6	311,2	14,5	15,0	217,5	250	**0,1645**
17,6864	4,7	300,6	14,5	15,0	217,5	250	**0,1486**
10,6812	4,8	268,8	14,5	15,0	217,5	250	**0,0972**
23,5851	4,9	333,1	14,5	15,0	217,5	250	**0,1957**
23,2529	5,0	333,8	14,5	15,0	217,5	250	**0,1966**
18,5397	5,1	312,1	14,5	15,0	217,5	250	**0,1657**
16,7892	5,2	304,8	14,5	15,0	217,5	250	**0,1550**
22,3880	5,3	336,2	14,5	15,0	217,5	250	**0,1999**
19,8865	5,4	324,9	14,5	15,0	217,5	250	**0,1843**

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Na terceira condição, foram utilizados os pesos específicos das jazidas de aterro e as alturas das camadas de argilas foram também variadas.

Tabela 3 – Cálculo Recalque Condição 3

Peso Específico Aterro (kN/m³)	Altura Aterro (m)	σf (kPa)	Peso Específico Argila (kN/m³)	Altura Camada de Argila (m)	σi (kPa)	σPa' (kPa)	Recalque (m)
19,6859	4,0	296,2	14,5	15,0	217,5	250	**0,1419**
21,6252	4,1	262,7	14,5	12,0	174,0	250	**0,1891**
20,0740	4,2	309,1	14,5	15,5	224,8	250	**0,1463**
18,4256	4,3	311,2	14,5	16,0	232,0	250	**0,1349**
23,4567	4,4	291,7	14,5	13,0	188,5	250	**0,2005**
21,0033	4,5	275,8	14,5	12,5	181,3	250	**0,1927**
20,3708	4,6	289,5	14,5	13,5	195,8	250	**0,1796**
17,6864	4,7	286,1	14,5	14,0	203,0	250	**0,1576**
10,6812	4,8	261,5	14,5	14,5	210,3	250	**0,1002**
23,5851	4,9	260,6	14,5	10,0	145,0	250	**0,2691**
23,2529	5,0	355,5	14,5	16,5	239,3	250	**0,1819**
18,5397	5,1	275,8	14,5	12,5	181,3	250	**0,1928**
16,7892	5,2	304,8	14,5	15,0	217,5	250	**0,1550**
22,3880	5,3	278,2	14,5	11,0	159,5	250	**0,2554**
19,8865	5,4	274,1	14,5	11,5	166,8	250	**0,2283**

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Na quarta condição apenas a altura da camada de argila foi variada.

Tabela 4 – Cálculo Recalque Condição 4

Peso Específico Aterro (kN/m³)	Altura Aterro (m)	σf (kPa)	Peso Específico Argila (kN/m³)	Altura Camada de Argila (m)	σi (kPa)	σPa' (kPa)	Recalque (m)
19,0	4,0	293,5	14,5	15,0	217,5	250	**0,1376**
19,0	4,1	251,9	14,5	12,0	174,0	250	**0,1699**
19,0	4,2	304,6	14,5	15,5	224,8	250	**0,1395**
19,0	4,3	313,7	14,5	16,0	232,0	250	**0,1385**
19,0	4,4	272,1	14,5	13,0	188,5	250	**0,1686**
19,0	4,5	266,8	14,5	12,5	181,3	250	**0,1774**
19,0	4,6	283,2	14,5	13,5	195,8	250	**0,1695**
19,0	4,7	292,3	14,5	14,0	203,0	250	**0,1674**
19,0	4,8	301,5	14,5	14,5	210,3	250	**0,1654**
19,0	4,9	238,1	14,5	10,0	145,0	250	**0,0025**
19,0	5,0	334,3	14,5	16,5	239,3	250	**0,1535**
19,0	5,1	278,2	14,5	12,5	181,3	250	**0,1967**
19,0	5,2	316,3	14,5	15,0	217,5	250	**0,1720**
19,0	5,3	260,2	14,5	11,0	159,5	250	**0,2247**
19,0	5,4	269,4	14,5	11,5	166,8	250	**0,2202**

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Verificou-se, então, que a medida que os valores são variados o recalque muda, resultando em valores de recalque de 10cm à 25cm, conforme análise.

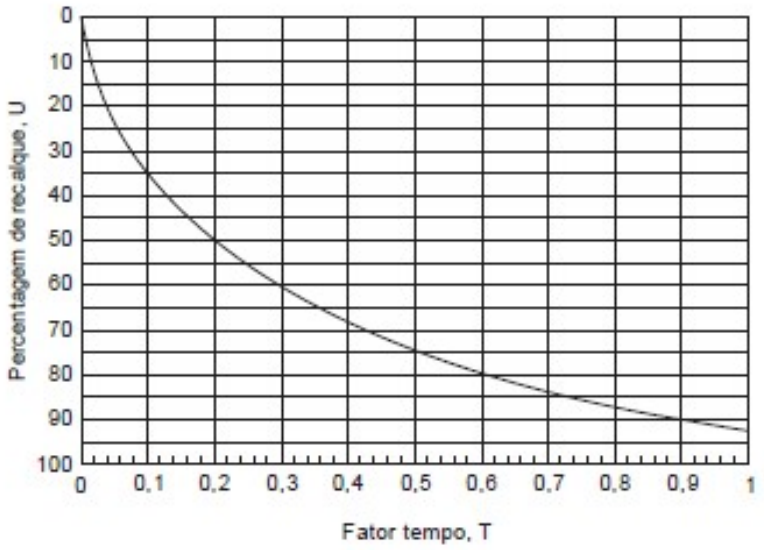
4.5.1 Cálculo do tempo de recalque

Conforme o estudo dos solos da região limítrofe a Rodovia de Acesso Norte do Município de Tubarão, verificou-se a presença de camadas de um solo extremamente mole em toda a sua extensão com fragilidades e propício a ocorrência de recalques.

Com a utilização da Teoria do Adensamento da Analogia Mecânica de Terzaghi, juntamente com a curva de compressibilidade, estimou-se o recalque que poderá ocorrer na região do entorno da rodovia, após a ocupação ser feita imediatamente ao término da obra.

Com os valores dos recalques calculados foi possível estimar um tempo médio em que esse solo sofrerá 60% do total de suas deformações, ou seja, foi estimado o tempo que ele levará para sofrer 60% do recalque previsto usando também os princípios da Teoria de Adensamento de Terzaghi. A figura 21 demonstra o recalque em relação ao tempo:

Figura 21 – Recalque x Tempo



Fonte: TERZAGHI (1943).

De acordo com os princípios da Teoria de Terzaghi, o fator tempo de recalque pode ser relacionado às características do solo através da tensão vertical em função do tempo (Tv), do coeficiente de adensamento (Cv), e às condições de drenagem através de h. De acordo com a curva, o recalque ocorre até certo tempo e depois estabiliza-se.

Com base nesses princípios apresentados, a equação 25 e sua resolução demonstra a estimativa do tempo médio em que o solo da região limítrofe a rodovia sofrerá 60% do total

de suas deformações. Onde Tv foi calculado para 60% das deformações, resultando em 0,2826, o h utilizado foi a média dos recalques resultantes das tabelas e o coeficiente de adensamento (Cv) foi obtido a partir da realização de ensaios em laboratório de uma localidade próxima ao início da rodovia, mais precisamente do outro lado da BR 101. A equação 25 demonstra o cálculo do tempo x recalque:

(25)

$$t = \frac{Tv\ x\ h^2(cm)}{cv(\frac{cm^2}{s})}$$

$$t = \frac{0{,}2826\ x\ 1350^2}{0{,}05198} \cong 115\ dias$$

De acordo com o cálculo realizado, em 115 dias acontecerão 60% das deformações previstas na região limítrofe a Rodovia de Acesso Norte do Município de Tubarão, após a liberação do seu pleno funcionamento.

4.5.2 Demonstração dos recalques

Para demonstrar os recalques calculados, foram criados modelos geotécnicos com a utilização do software chamado GeoSlope. Esse software permitiu a análise da estabilidade do aterro da rodovia atual, bem como a verificação da estabilidade desse aterro depois de sua suposta ocupação imediata após o término da obra.

Com a utilização desse software, foi possível obter o fator de segurança de cada modelo em relação a estabilidade do aterro calculado para uma altura de 5metros, tanto para a rodovia, quanto para a futura área de ocupação.

Para a criação desses modelos, foram utilizados alguns parâmetros apresentados na tabela 5:

Tabela 5 – Parâmetros Aplicados para cada Tipo de Solo

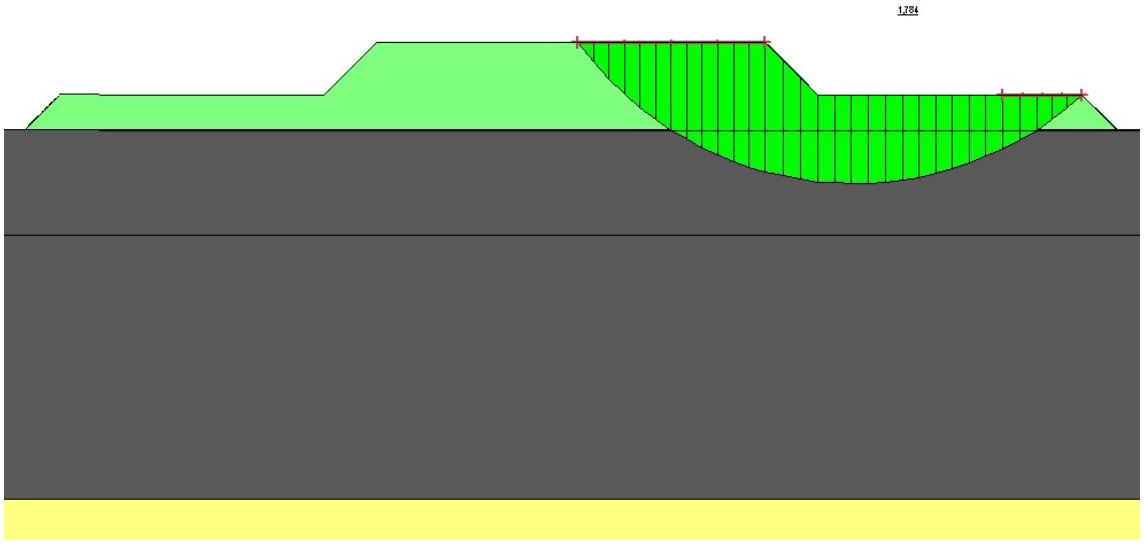
Tipo de Solo	Peso Específico (KN/m³)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)
Argila muito mole	14,5	-	7,2
Areia média a fina	19	25	-
Aterro	19	25	18
Turfa	14,5	-	7,2

Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Esses parâmetros foram utilizados para cada camada de solo. A camada de areia média a fina foi pintada em amarelo, a argila muito mole em cinza juntamente com a turfa, e o aterro foi apresentado na cor verde.

A figura apresenta o modelo criado apenas com o aterro presente na rodovia sem a aplicação do carregamento do aterro da futura ocupação do entorno:

Figura 22 – Aterro da Rodovia sem Carregamento Externo



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

De acordo com o modelo pode-se perceber que a rodovia se encontra estável sem a presença de carregamento em seu entorno de acordo com a DNER-PRO 381/98, apresentando um fator de segurança de 1,784.

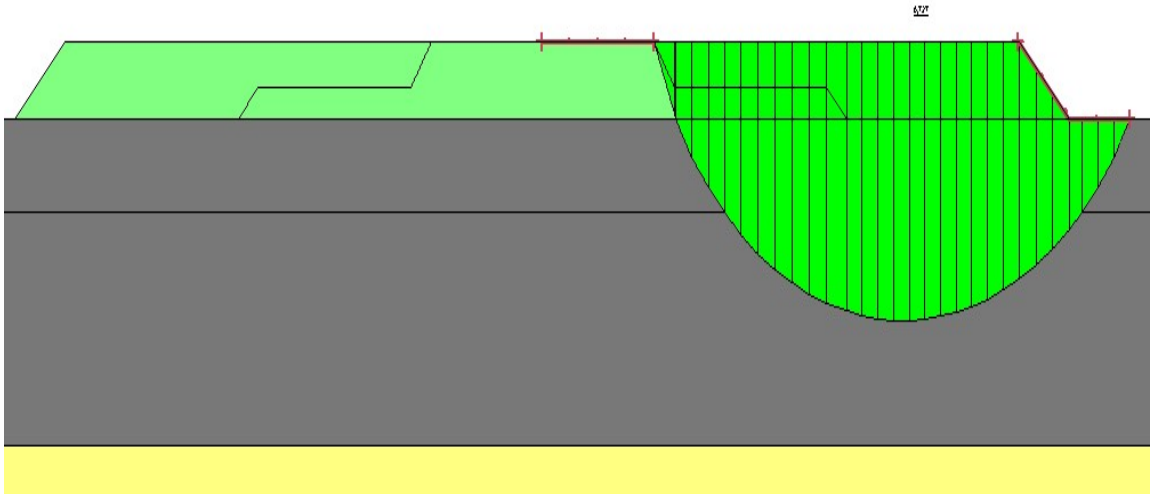
Tabela 6 – Fatores de Segurança Mínimos

Aterro Classe	FS mínimo
I	1,4
II	1,3
III	1,2

Fonte: DNER-PRO 381 (1998).

Após a aplicação dos carregamentos externos, ou seja, os carregamentos provenientes da possível futura ocupação do eixo marginal da rodovia, foi verificado que o fator de segurança reduziu de 1,784 para 0,727, não alcançando o fator de segurança mínimo de acordo com o DNER-PRO 381/98. Isso mostra que ela irá perder estabilidade após a futura ocupação do entorno, o que indica que, caso não sejam tomados os cuidados quanto a forma do carregamento (CC, CU e UU), poderá acarretar em um possível rompimento do corpo estradal conforme figura 23.

Figura 23 – Aterro da Rodovia com Carregamento Externo



Fonte: Elaborado pela autora (2019).

Dessa maneira, de acordo com os modelos gerados, para que a Rodovia de Acesso Norte do Município de Tubarão não seja prejudicada com a ocupação de seu entorno, é necessário que se elabore um plano de carregamento geotécnico para as áreas marginais à rodovia, como também um comportamento não drenado da argila, utilizando-se de tecnologias compatíveis existentes, semelhante às utilizadas durante sua construção.

5 CONCLUSÃO

O objetivo do estudo foi analisar a relação de carregamentos limítrofes à rodovia e suas possíveis interferências ao longo do leito estradal, buscando determinar possíveis fragilidades por meio da identificação da vocação quanto ao uso e ocupação dos solos. Para tal, utilizou-se abordagem do tipo quantiqualitativo e procedimento do tipo pesquisa de campo com fundamentação bibliográfica e nível exploratório.

A investigação foi realizada por meio da elaboração de base de dados, onde caracterizou-se a área de estudo verificando a vocação quanto ao uso e ocupação do solo atual e analisando como o mesmo viria a ser ocupado no futuro com embasamento em propostas de ocupação em fase de aprovação junto a órgãos públicos. Coletou-se também informações sobre a construção da rodovia em relação ao tipo de solo da localidade, tendo acesso as sondagens e ao perfil estratigráfico da mesma, além dos ensaios de compressibilidade do solo que haviam sido realizados durante sua construção. Para os testes de carregamento, foram utilizados aterros encontrados em jazidas do município de Tubarão delimitando suas cotas a partir da cota que a rodovia se encontra disposta. Juntamente, variou-se a altura da camada de argila presente no solo, para se chegar aos recalques de cada ponto e confeccionar os modelos geotécnicos após a realização de testes estatísticos e verificação da confiabilidade e homogeneidade dos valores dos dados utilizados.

Depois de realizada a caracterização do solo da região limítrofe a rodovia, foi verificado que o solo mole predominante em toda a sua extensão não poderia ser substituído, já que as camadas de argila mole, média e muito mole eram muito profundas. As características desse tipo de solo refletiram em deformações significativas após a aplicação da carga do aterro encontrados nas jazidas de Tubarão, correspondendo de 10cm a 25cm de recalque. À medida que se efetuou a aplicação das cargas sobre o solo, foi verificado que a distribuição do recalque se apresentou de forma linear, ou seja, que o recalque aumentava, linearmente, em relação à altura de aterro que estava sendo testada. Na prática verificou-se que no geral, quanto maior fosse a camada de aterro sobre o solo, maior seria o recalque. A partir desses recalques calculou-se o tempo para a ocorrência de 60% das deformações previstas para esse solo, resultando em aproximadamente 115 dias.

A Teoria do Adensamento da Analogia Mecânica de Terzaghi, foi fundamental para o estudo do comportamento do solo analisado, pois permitiu e colaborou, desde o início, na revisão bibliográfica, até a compreensão dos resultados obtidos em relação as tensões e

principalmente as deformações que um solo mole pode sofrer quando é carregado em sua totalidade imediatamente.

Foram identificados a vocação quanto ao uso e ocupação dos solos do entorno, verificando que o solo que antes era ocupado por lavouras de arroz irrigado e pastagem, irá sofrer mudanças para o zoneamento industrial, pois após o término da construção da rodovia, está previsto o surgimento de industrias em toda a sua extensão, o que contribuirá para desenvolvimento do município de Tubarão e região. Porém, após a elaboração das modelagens, verificou-se que além da região ser tomada por um solo argiloso, a mesma ainda exige altas cotas para impedir o alagamento, o que resultou em recalques significativos. Além de causar recalques na região do entorno, pode-se estimar que a partir do momento em que a obra da rodovia for concluída e que essas regiões do entorno começarem a ser ocupadas imediatamente, poderão causar interferências na estabilidade da Rodovia de Acesso Norte do Município de Tubarão, já que essa também foi construída sobre um solo mole.

Os modelos demonstram o comportamento típico de solos moles, apresentando maiores deformações ao longo do tempo. Assim, os modelos gerados, considerando o carregamento externo, ou seja, os carregamentos provenientes da ocupação do eixo marginal da rodovia indicam que, caso não sejam tomados os cuidados quanto a forma do carregamento (CC, CU e UU), poderá acarretar em um possível rompimento do corpo estradal.

Logo, fica evidente com este trabalho, a necessidade de elaboração de um plano de carregamento geotécnico para as áreas marginais à rodovia, todavia proporcionar um comportamento não drenado da argila. Como exemplo, pode-se citar a execução das novas tecnologias de drenagem para os solos e espera de adensamento dos mesmos com um carregamento em etapas utilizados durante a construção da rodovia. De acordo com eficácia dessas tecnologias empregadas, pode-se efetuar estudos para a aplicação de uma tecnologia semelhante em seu entorno, a fim de manter a estabilidade desses solos para não comprometerem o uso pleno da Rodovia de Acesso Norte do Município de Tubarão e o desenvolvimento regional que ela trará para a região.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Leonardo. **As 10 maiores rodovias do mundo.** São Paulo/SP, 16 mai. 2017. Disponível em: https://planetacaminhao.com.br/as-10-maiores-rodovias-do-mundo/. Acesso em: 15 mar. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

CABRAL, Gabriela. **Mundo educação: Rodovias.** Disponível em: https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/rodovias.htm. Acesso em: 15 mar. 2019.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1988. 234.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 561 p.

DEMO, Pedro**. Pesquisa e construção de conhecimento: metodologia científica no caminho de Habermas.** 7. ed. Rio de Janeiro: Tempo brasileiro, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Projeto de aterros sobre solos moles para obras viárias.** Rio de Janeiro: Norma rodoviária, 1998. 34 p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO – DER SP. Manual de geotecnia. **Taludes de rodovias: Orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas.** Publicação IPT – 1843. São Paulo, 1991. 206 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação.** Publicação IPR – 179. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

ENGENHARIA, Moderna. **Entenda o que é o estudo da Mecânica dos Solos e suas aplicações na Engenharia Civil.** Redação, jan. 2019. Disponível em: https://modernaengenharia.com/mecanica-dos-solos/. Acesso em: 19 abr. 2019.

GERSCOVICH. D. **Compressibilidade e Adensamento: Recalques em Solos Argilosos.** Programa de Pós-Graduação Eng. Civil UERJ – Mecânica dos Solos. 2008. 177f. Disponível em: http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/compressibilidadeadensamento.pdf. Acesso em: 19 abr. 2019.

HIGASHI, R. A. dos R. **Metodologia de Uso e Ocupação dos Solos de Cidades Costeiras Brasileiras Através de Sig com Base no Comportamento Geotécnico e Ambiental.** 2006. 486 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

HOLTZ. R. D.; KOVACS. W. D. **An Introduction to Geotechnical Engineering.** Rio de Janeiro: Editora Prentic-Hall do Brasil Ltda. 1981. 732p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Cidades.** Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/tubarao/panorama. Acesso em: 10 out.2019.

INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA – IMA. **Mapa Interativo**. Disponível em: http://geoseuc.ima.sc.gov.br/#/. Acesso em: 10 out. 2019.

NARDIKO, Leonardo. **Compressibilidade dos solos.** São Paulo, jun. 2004. Disponível em: https://www.ebah.com.br/content/ABAAAgyuwAH/compressibilidade-dos-solos#. Acesso em: 19 abr. 2019.

MARANGON, M. **Compressibilidade e Adensamento dos Solos.**: Faculdade de Engenharia – Nu Geo / Núcleo de Geotecnia – Mecânica dos Solos II. Ed. 2018. Minas Gerais. Disponível em:http://www.ufjf.br/nugeo/files/2013/06/Marangon-Cap%C3%ADtulo-03-Compressibilidade-e-Adensamento-2018-at%C3%A9-pag-84.pdf. Acesso em: 01 nov. 2019.

MASSAD, F. Obras de Terra – **Curso Básico de Geotecnia.** 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010. 216 p.

MEDEIROS, Ismael. **Aterro sobre solos moles.**: Graduação Eng. Civil UNISUL – Mecânica dos Solos. 2017. Notas de Aula. Arquivo Digital.

MEDEIROS, Ismael. **Determinação dos Parâmetros de Resistência no Estado Compactado dos Solos do Município de Tubarão através das correlações entre os ensaios de DCP e CBR.** Trabalho de Conclusão de Curso Graduação Eng. Civil – Universidade do Sul de Santa Catarina,2006.

NIETIEDT, Juliano A. **Aterros instrumentados sobre solos moles: Estudo de caso na BR-448.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, nov. 2014. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/110141. Acesso em: 15 mar. 2019.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos.** 3. ed. Rio de Janeiro: LTC Editores, 2007. 387 p.

PREFEITURA MUNICÍPIO DE TUBARÃO – PMT.: **Município.** Disponível em: https://www.tubarao.sc.gov.br/municipio/index/codMapaItem/16672. Acesso em: 20 set. 2019.

SPINK, Peter Kevin. **Pesquisa de campo em psicologia social: uma perspectiva pós-construcionista.** Psicol. Soc., Porto Alegre, v. 15, n. 2, p. 18-42, dez. 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-71822003000200003&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 20 abr. 2019.

TERZAGHI, K.; FRÖLICH, O. K. **Theorie der Setzung von Tonschichten.** Viena: Franz Deuticke, 1936.

VARGAS, Milton. **Introdução à mecânica dos solos.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo,1977. 509 p.

ANEXOS

ANEXO A – IMAGENS DA ÁREA DE ESTUDO

.

Fonte: Medeiros, (2019).

Fonte: Governo de Santa Catarina (2018).

APÊNDICES

APÊNDICE A – CÁLCULO DO RECALQUE CONDIÇÃO 1

Tabela completa do cálculo do recalque para a condição 1 proposta.

h (m)	Cc	Cr	Ei	Peso Específico Aterro (kN/m³)	Altura Aterro (m)	σf (kPa)	Peso Específico Argila (kN/m³)	Altura Camada de Argila (m)	σi (kPa	σPa' (kPa)	Recalque (m)	Caso I	Caso II	Caso III
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,0	293,5	14,5	15,0	217,5	250	**0,1376**	0,001537	0,074374	0,137605
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,1	295,4	14,5	15,0	217,5	250	**0,1406**	0,00157	0,077337	0,140568
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,2	297,3	14,5	15,0	217,5	250	**0,1435**	0,001603	0,080281	0,143512
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,3	299,2	14,5	15,0	217,5	250	**0,1464**	0,001636	0,083206	0,146437
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,4	301,1	14,5	15,0	217,5	250	**0,1493**	0,001669	0,086113	0,149344
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,5	303,0	14,5	15,0	217,5	250	**0,1522**	0,001701	0,089001	0,152232
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,6	304,9	14,5	15,0	217,5	250	**0,1551**	0,001733	0,091871	0,155103
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,7	306,8	14,5	15,0	217,5	250	**0,1580**	0,001765	0,094724	0,157955
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,8	308,7	14,5	15,0	217,5	250	**0,1608**	0,001796	0,097559	0,16079
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,9	310,6	14,5	15,0	217,5	250	**0,1636**	0,001828	0,100376	0,163608
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	5,0	312,5	14,5	15,0	217,5	250	**0,1664**	0,001859	0,103177	0,166408
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	5,1	314,4	14,5	15,0	217,5	250	**0,1692**	0,00189	0,10596	0,169191
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	5,2	316,3	14,5	15,0	217,5	250	**0,1720**	0,001921	0,108726	0,171958
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	5,3	318,2	14,5	15,0	217,5	250	**0,1747**	0,001952	0,111476	0,174708
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	5,4	320,1	14,5	15,0	217,5	250	**0,1774**	0,001982	0,11421	0,177441

APÊNDICE B – CÁLCULO DO RECALQUE CONDIÇÃO 2

Tabela completa do cálculo do recalque para a condição 2 proposta.

h (m)	Cc	Cr	Ei	Peso Específico Aterro (kN/m³)	Altura Aterro (m)	σf (kPa)	Peso Específico Argila (kN/m³)	Altura Camada de Argila (m)	σi (kPa	σPa' (kPa)	Recalque (m)	Caso I	Caso II	Caso III
10	0,5075	0,00567	3,8	19,6859	4,0	296,2	14,5	15,0	217,5	250	**0,1419**	0,001585	0,078646	0,141878
10	0,5075	0,00567	3,8	21,6252	4,1	306,2	14,5	15,0	217,5	250	**0,1570**	0,001754	0,09377	0,157001
10	0,5075	0,00567	3,8	20,0740	4,2	301,8	14,5	15,0	217,5	250	**0,1504**	0,001681	0,087195	0,150426
10	0,5075	0,00567	3,8	18,4256	4,3	296,7	14,5	15,0	217,5	250	**0,1426**	0,001594	0,0794	0,142631
10	0,5075	0,00567	3,8	23,4567	4,4	320,7	14,5	15,0	217,5	250	**0,1783**	0,001992	0,115084	0,178315
10	0,5075	0,00567	3,8	21,0033	4,5	312,0	14,5	15,0	217,5	250	**0,1657**	0,001851	0,102463	0,165694
10	0,5075	0,00567	3,8	20,3708	4,6	311,2	14,5	15,0	217,5	250	**0,1645**	0,001838	0,101271	0,164502
10	0,5075	0,00567	3,8	17,6864	4,7	300,6	14,5	15,0	217,5	250	**0,1486**	0,00166	0,08539	0,148621
10	0,5075	0,00567	3,8	10,6812	4,8	268,8	14,5	15,0	217,5	250	**0,0972**	0,001086	0,033956	0,097187
10	0,5075	0,00567	3,8	23,5851	4,9	333,1	14,5	15,0	217,5	250	**0,1957**	0,002186	0,132444	0,195676
10	0,5075	0,00567	3,8	23,2529	5,0	333,8	14,5	15,0	217,5	250	**0,1966**	0,002197	0,133405	0,196636
10	0,5075	0,00567	3,8	18,5397	5,1	312,1	14,5	15,0	217,5	250	**0,1657**	0,001852	0,102518	0,16575
10	0,5075	0,00567	3,8	16,7892	5,2	304,8	14,5	15,0	217,5	250	**0,1550**	0,001731	0,091727	0,154958
10	0,5075	0,00567	3,8	22,3880	5,3	336,2	14,5	15,0	217,5	250	**0,1999**	0,002234	0,136684	0,199915
10	0,5075	0,00567	3,8	19,8865	5,4	324,9	14,5	15,0	217,5	250	**0,1843**	0,002059	0,121027	0,184258

APÊNDICE C – CÁLCULO DO RECALQUE CONDIÇÃO 3

Tabela completa do cálculo do recalque para a condição 3 proposta.

h (m)	Cc	Cr	Ei	Peso Específico Aterro (kN/m³)	Altura Aterro (m)	σf (kPa)	Peso Específico Argila (kN/m³)	Altura Camada de Argila (m)	σi (kPa	σPa' (kPa)	Recalque (m)	Caso I	Caso II	Caso III
10	0,5075	0,00567	3,8	19,6859	4,0	296,2	14,5	15,0	217,5	250	**0,1419**	0,001585	0,078646	0,141878
10	0,5075	0,00567	3,8	21,6252	4,1	262,7	14,5	12,0	174,0	250	**0,1891**	0,002113	0,024548	0,189097
10	0,5075	0,00567	3,8	20,0740	4,2	309,1	14,5	15,5	224,8	250	**0,1463**	0,001634	0,097927	0,14627
10	0,5075	0,00567	3,8	18,4256	4,3	311,2	14,5	16,0	232,0	250	**0,1349**	0,001507	0,100976	0,134904
10	0,5075	0,00567	3,8	23,4567	4,4	291,7	14,5	13,0	188,5	250	**0,2005**	0,00224	0,072298	0,200504
10	0,5075	0,00567	3,8	21,0033	4,5	275,8	14,5	12,5	181,3	250	**0,1927**	0,002153	0,046689	0,192703
10	0,5075	0,00567	3,8	20,3708	4,6	289,5	14,5	13,5	195,8	250	**0,1796**	0,002007	0,068543	0,179613
10	0,5075	0,00567	3,8	17,6864	4,7	286,1	14,5	14,0	203,0	250	**0,1576**	0,001761	0,063044	0,157602
10	0,5075	0,00567	3,8	10,6812	4,8	261,5	14,5	14,5	210,3	250	**0,1002**	0,001119	0,021574	0,100198
10	0,5075	0,00567	3,8	23,5851	4,9	260,6	14,5	10,0	145,0	250	**0,2691**	0,003007	0,021804	0,269135
10	0,5075	0,00567	3,8	23,2529	5,0	355,5	14,5	16,5	239,3	250	**0,1819**	0,002032	0,161904	0,18186
10	0,5075	0,00567	3,8	18,5397	5,1	275,8	14,5	12,5	181,3	250	**0,1928**	0,002154	0,046752	0,192765
10	0,5075	0,00567	3,8	16,7892	5,2	304,8	14,5	15,0	217,5	250	**0,1550**	0,001731	0,091727	0,154958
10	0,5075	0,00567	3,8	22,3880	5,3	278,2	14,5	11,0	159,5	250	**0,2554**	0,002853	0,05131	0,255366
10	0,5075	0,00567	3,8	19,8865	5,4	274,1	14,5	11,5	166,8	250	**0,2283**	0,00255	0,044399	0,228272

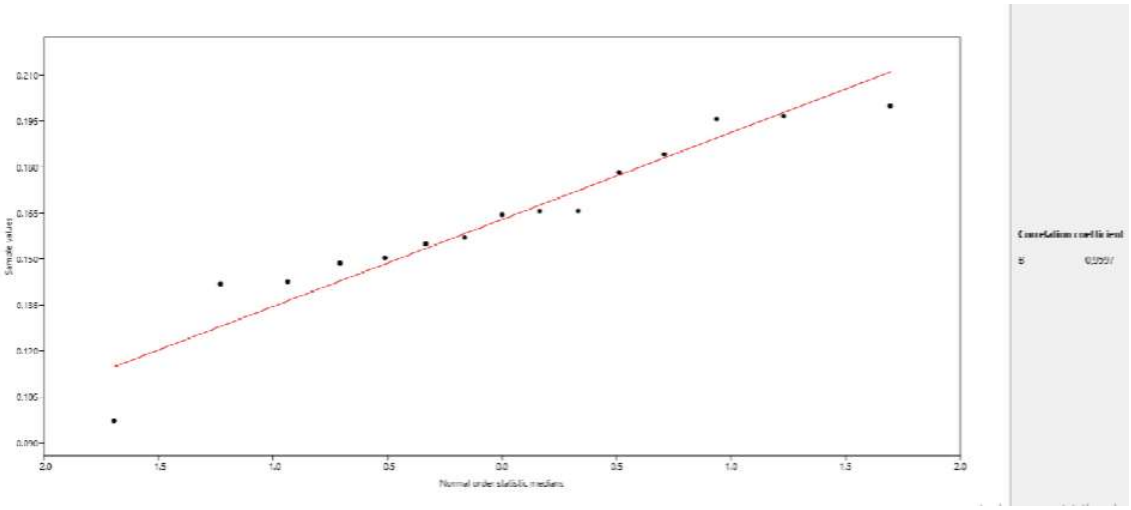
APÊNDICE D – CÁLCULO DO RECALQUE CONDIÇÃO 4

Tabela completa do cálculo do recalque para a condição 4 proposta.

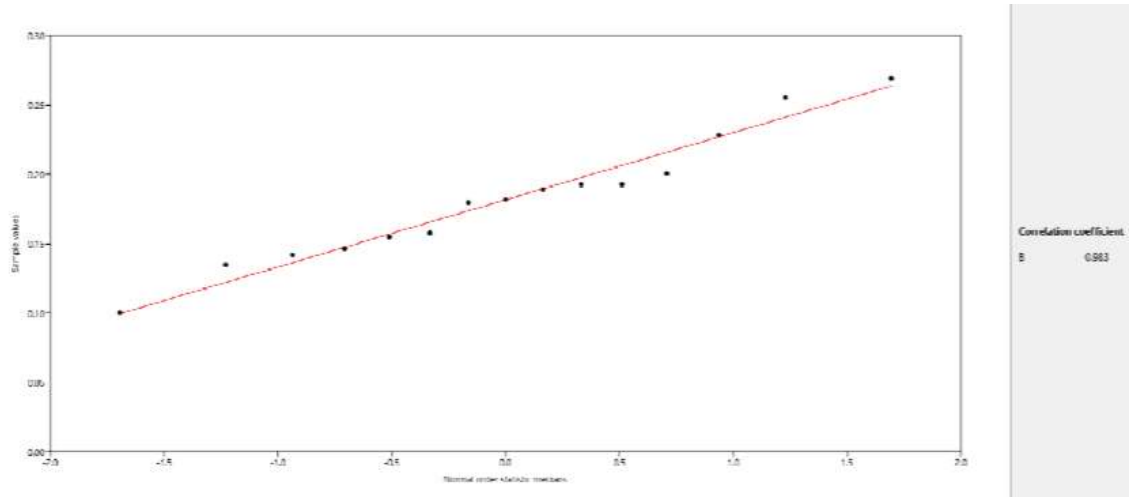
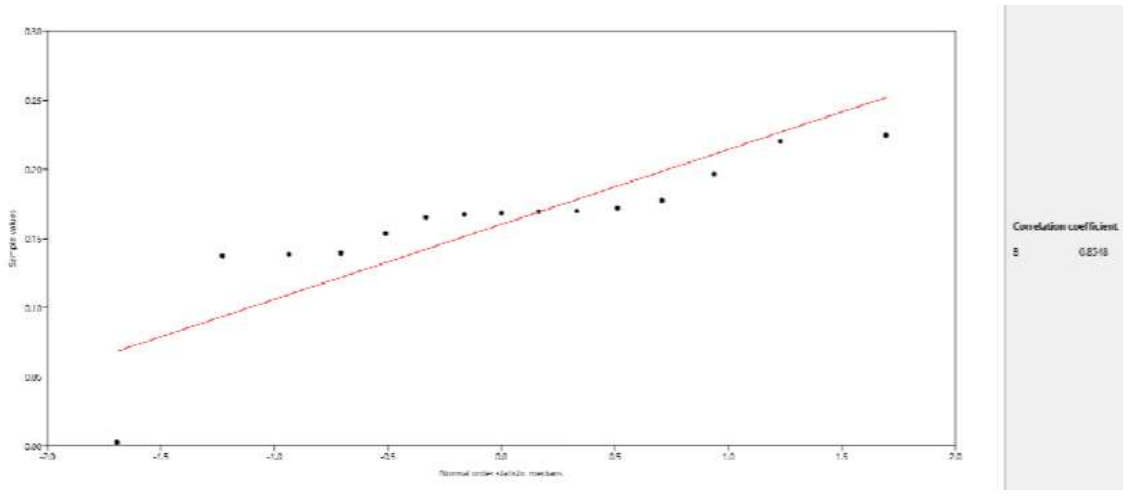
h (m)	Cc	Cr	Ei	Peso Específico Aterro (kN/m³)	Altura Aterro (m)	σf (kPa)	Peso Específico Argila (kN/m³)	Altura Camada de Argila (m)	σi (kPa	σPa' (kPa)	Recalque (m)	Caso I	Caso II	Caso III
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,0	293,5	14,5	15,0	217,5	250	**0,1376**	0,001537	0,074374	0,137605
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,1	251,9	14,5	12,0	174,0	250	**0,1699**	0,001898	0,005336	0,169884
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,2	304,6	14,5	15,5	224,8	250	**0,1395**	0,001559	0,091176	0,139519
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,3	313,7	14,5	16,0	232,0	250	**0,1385**	0,001548	0,104605	0,138533
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,4	272,1	14,5	13,0	188,5	250	**0,1686**	0,001883	0,040345	0,16855
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,5	266,8	14,5	12,5	181,3	250	**0,1774**	0,001982	0,031428	0,177441
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,6	283,2	14,5	13,5	195,8	250	**0,1695**	0,001894	0,05843	0,169499
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,7	292,3	14,5	14,0	203,0	250	**0,1674**	0,00187	0,072847	0,167404
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,8	301,5	14,5	14,5	210,3	250	**0,1654**	0,001848	0,08682	0,165444
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	4,9	238,1	14,5	10,0	145,0	250	**0,0025**	0,002544	-0,0196	0,227732
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	5,0	334,3	14,5	16,5	239,3	250	**0,1535**	0,001715	0,133583	0,153539
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	5,1	278,2	14,5	12,5	181,3	250	**0,1967**	0,002197	0,050644	0,196657
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	5,2	316,3	14,5	15,0	217,5	250	**0,1720**	0,001921	0,108726	0,171958
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	5,3	260,2	14,5	11,0	159,5	250	**0,2247**	0,002511	0,020668	0,224724
10	0,5075	0,00567	3,8	19,0	5,4	269,4	14,5	11,5	166,8	250	**0,2202**	0,00246	0,036309	0,220182

APÊNDICE E – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL DOS RECALQUES

Distribuição normal dos recalques para a condição 2.



Distribuição normal dos recalques para a condição 3.



Distribuição normal dos recalques para a condição 4.