

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Juliana Bezerra Rodrigues

**OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E
VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDE DE UM SOLO DA
CIDADE DE CRUZ ALTA/RS**

Santa Maria, RS

2019

Juliana Bezerra Rodrigues

**OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E
VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDE DE UM SOLO DA
CIDADE DE CRUZ ALTA/RS**

Trabalho final de graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil, Departamento de Transportes da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção de título de **Engenheira Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Magnos Baroni

Santa Maria, RS
2019

Juliana Bezerra Rodrigues

**OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E
VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDE DE UM SOLO DA
CIDADE DE CRUZ ALTA/RS**

Trabalho final de graduação apresentado
ao Curso de Engenharia Civil,
Departamento de Transportes da
Universidade Federal de Santa Maria
(UFSM, RS) como requisito parcial para
obtenção de título de **Engenheira Civil.**

Aprovado em 18 de julho de 2019:

Magnos Baroni, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Talles Augusto Araujo, Me. (UFSM)

Paula Taiane Pascoal, Eng. Civil. (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

Dedico este trabalho a quem esteve comigo todos os dias da minha vida: meus pais, Claudia e Sergio, e meus avós, Ezidra e Delfino.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus pelas pessoas que colocou em minha vida.

À minha família e amigos tenho um agradecimento muito especial porque acreditaram em mim desde o primeiro instante. Sou quem sou porque vocês estiveram e estão sempre ao meu lado.

Deixo um agradecimento especial ao meu orientador e a mestrande Paula Pascoal pelo incentivo e pela dedicação do seu escasso tempo ao meu projeto de pesquisa.

Aos professores Carlos José Antônio Kümmel Félix e Talles Augusto Araujo pela grande importância nesta trajetória.

RESUMO

OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDE DE UM SOLO DA CIDADE DE CRUZ ALTA/RS

AUTORA: Juliana Bezerra Rodrigues

ORIENTADOR: Magnos Baroni

Este estudo busca avaliar a estabilidade do declive da estrada de acesso ao norte via RS 342 para a cidade de Cruz Alta, centro-norte do estado do Rio Grande do Sul. A obra consiste em um declive de aterro de 14,20 m em solo de 1,0 V: 1,5 H, com 95% de espalhamento e compactação. O solo utilizado, localizado nas coordenadas 28°37'39.40 "sul e 53°37'30.50" oeste, apresenta três horizontes distintos, sendo o horizonte C utilizado para compor o corpo do aterro sanitário, objeto de estudo deste trabalho. Após a determinação da umidade e densidade ótimas para as energias normal e intermediária, testes de cisalhamento direto foram realizados a partir de amostras compactadas em laboratório, em ambas as energias, testadas na umidade ótima e na condição de inundação. Além disso, eles foram extraídos com amostras indeformadas que foram testadas na umidade natural e na condição inundada. Com o ângulo de atrito e os dados de coesão do solo, foi possível simular a inclinação do trabalho com auxílio de software computacional. A inclinação foi analisada quanto à estabilidade usando os métodos Bispo Simplificado, Janbu Simplificado e Janbu Corrigido.

Palavras-chave: Estabilidade de Talude, Resistência do solo, Cisalhamento direto.

ABSTRACT

OBTAINING RESISTANCE PARAMETERS AND VERIFYING THE TALUD STABILITY OF A CRUZ ALTA / RS CITY SOIL

AUTHOR: Juliana Bezerra Rodrigues

ADVISOR: Magnos Baroni

This study seeks to evaluate the stability of the road slope of the northern access work via RS 342 to the city of Cruz Alta, central-north of the state of Rio Grande do Sul. The construction work consists of a 14.20 m slope of landfill embankment in soil of 1.0V: 1.5H, with 95% spreading and compaction. The ground used, located in the coordinates 28°37'39.40 "south and 53°37'30.50" west, presents three distinct horizons, and the C horizon was used to compose the body of the landfill, object of study of this work. After determination of the optimal humidity and density for the normal and intermediate energies, direct shear tests were performed from laboratory compacted samples in both energies, tested in the optimal humidity and in the flooded condition. Also, they were extracted with undisturbed samples that were tested in the natural humidity and in the flooded condition. With the friction angle and soil cohesion data, it was possible to simulate the slope of the work with the aid of computational software. The slope was analyzed for stability using Bishop Simplified, Janbu Simplified and Janbu Corrected methods.

Keywords: Slope Stability, Soil Strength, Direct Shear.

SUMÁRIO

| | | |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 10 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 10 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 10 |
| 1.2 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 11 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 12 |
| 2.1 | SOLO | 12 |
| 2.2 | COMPACTAÇÃO | 13 |
| 2.3 | RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS..... | 14 |
| 2.4 | ESTABILIDADE DE TALUDES | 16 |
| 2.4.1 | Método das Fatias | 18 |
| 2.4.1.1 | <i>Métodos de Equilíbrio limite para superfícies de rotura circular</i> | 18 |
| 2.4.1.1.1 | Método de Bishop Simplificado | 19 |
| 2.4.1.2 | <i>Métodos de Equilíbrio limite para qualquer tipo de superfícies de rotura</i> | 20 |
| 2.4.1.2.1 | Método de Janbu Simplificado | 21 |
| 2.4.1.2.2 | Método de Janbu Generalizado | 22 |
| 2.4.2 | Métodos Computacionais | 22 |
| 3 | MÉTODOS E MATERIAIS | 23 |
| 3.1 | MATERIAIS | 23 |
| 3.1.1 | Solo | 23 |
| 3.2 | MÉTODOS | 24 |
| 3.2.1 | Compactação e moldagem dos corpos de prova | 24 |
| 3.2.2 | Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto | 30 |
| 3.2.3 | Modelagem dos Perfis Típicos | 32 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 36 |
| 4.1 | COMPACTAÇÃO DO SOLO | 36 |
| 4.2 | RESISTÊNCIA CISALHANTE, ÂNGULO DE ATRITO E INTERCEPTO COESIVO..... | 36 |
| 4.2.1 | Solo Natural sem presença de água | 36 |
| 4.2.2 | Solo Natural Saturado | 38 |
| 4.2.3 | Solo Compactado na Energia Normal sem água | 40 |
| 4.2.4 | Solo Compactado na Energia Normal Saturado | 41 |
| 4.2.5 | Solo Compactado na Energia Intermediária sem água | 44 |
| 4.2.6 | Solo Compactado na Energia Intermediária Saturado | 46 |
| 4.2.7 | Comparação entre os resultados de tensão cisalhante, intercepto coesivo e ângulo de atrito | 48 |
| 4.3 | ESTABILIDADE DOS TALUDES EM ESTUDO..... | 50 |
| 4.3.1 | Análise da Estabilidade de Taludes Naturais | 50 |
| 4.3.2 | Análise da Estabilidade de Taludes Compactados na Energia Normal | 56 |

| | | |
|-------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.3 | Análise da Estabilidade de Taludes Compactados na Energia Intermediária..... | 61 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 66 |
| | REFERÊNCIAS | 68 |

1 INTRODUÇÃO

Todas as obras de engenharia civil se apoiam sobre o solo ou o utilizam como elemento de construção, como no caso de barragens e aterros de estradas. A estabilidade, comportamento funcional e estético destes, depende do desempenho do material utilizado no maciço terroso, sendo estudados na disciplina de mecânica dos solos. Um dos pontos desta disciplina é o problema da determinação da resistência aos esforços cisalhantes, sendo este, um passo fundamental e indispensável para a análise de estabilidade das obras civis. O tema “Estabilidade de taludes” foi escolhido devido sua relevância à utilização de um material considerado como base para a maior parte das obras de Engenharia, que em muitas delas é necessário taludes de corte originados de escavações, ou taludes artificiais devido a aterros para o nivelamento do solo.

Esse tema demanda uma quantidade enorme de estudos porque as condições de estabilidades variam e são distintas para os diversos materiais que compõem o solo e tamanho dano que uma ruptura por cisalhamento poderia causar perdas econômicas e de vidas humanas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o ganho de resistência ao cisalhamento de um solo laterítico extraído de uma jazida em Cruz Alta/RS através da compactação nas energias normal, intermediária do ensaio Proctor e de amostras indeformadas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Obter a resistência ao cisalhamento para o solo em seis situações: natural, compactado na energia normal e intermediária, sendo estes na condição natural e saturada para fins de comparação;

- Construir taludes de aterros típicos em rodovias com estes parâmetros e dimensões propostas e verificar a estabilidade dos taludes de aterros típicos de rodovias com o auxílio da versão educacional do Software GeoSlide.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos, como descrito abaixo:

Capítulo 1 – Apresenta a introdução, o tema, delimitação do tema, problema, objetivo geral, objetivos específicos e a estrutura do trabalho.

Capítulo 2 – Exibe a revisão bibliográfica desenvolvida para o embasamento teórico para realização da pesquisa, com a apresentação de tópicos que permitem a determinação de fatores de segurança de taludes ao escorregamento com a influência da pressão neutra.

Capítulo 3 – Apresenta os materiais e métodos que foram utilizados, a localização da jazida, o material utilizado bem como os métodos e ensaios aplicados para o desenvolvimento da pesquisa

Capítulo 4 – Constam os resultados obtidos dos ensaios compactação, cisalhamento direto e a modelagem dos perfis de rodovias com solo natural e compactado na energia normal e intermediária. Analisam-se as modificações dos parâmetros e são realizadas comparações entre o solo natural e compactado.

Capítulo 5 – Apresenta as considerações finais referentes aos resultados obtidos no trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

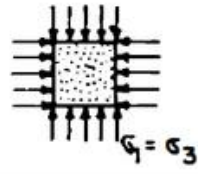
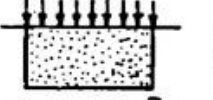
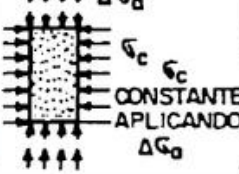
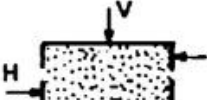
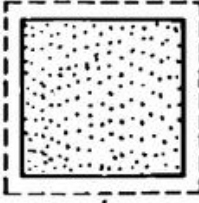
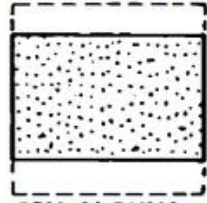
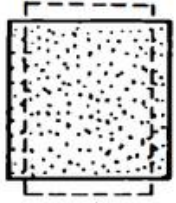

Com o objetivo de fornecer discussões relevantes que contribuam para o desenvolvimento e análise da metodologia que será aplicada no Capítulo 3, é apresentado a seguir revisão de literatura focada em pesquisas que envolvem a formação, classificação e resistência dos solos.

2.1 SOLO

Os solos são materiais que resultam, segundo Ortigão (2007), do intemperismo das rochas por desintegração mecânica, através de agentes como água, temperatura, vegetação e vento, formando os pedregulhos, areias, siltes, e, raramente as argilas, ou por decomposição química, quando há modificação química ou mineralógica das rochas de origem. Neste, o principal agente é a água e os mecanismos de ataque mais importantes são a oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos da vegetação, sendo as argilas o último produto do processo de decomposição.

As dimensões das partículas do solo são muito variáveis sendo designadas pelas frações: pedregulho, areia, silte e argila (FRANÇA, 2003). Conforme Pinto (2000), os problemas ocorrentes em projeto e execução das fundações e obras de terra, diferem aos referentes à deformações do solo, com estudo dos recalques das obras e aos que consideram a ruptura de uma massa de solo, que envolve as questões relativas à capacidade de carga do solo, estabilidade de maciços terrosos e empuxos de terra. A Figura 1 esquematiza, segundo Pinto (2006), os mais comuns tipos de ensaios utilizados para a avaliação do comportamento tensão-deformação dos solos.

Figura 1 - Esquema de ensaios para o comportamento tensão-deformação dos solos

| ENSAIO | COMPRESSÃO ISOTRÓPICA | ADENSAMENTO | COMPRESSÃO TRIAXIAL | CISALHAMENTO DIRETO |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CONDIÇÕES BÁSICAS |  $\sigma_1 = \sigma_3$ |  DEFORMAÇÃO HORIZONTAL NULA |  CONSTANTE APLICANDO $\Delta\sigma_a$ |  V CONSTANTE, APLICANDO H |
| TIPO DE DEFORMAÇÃO |  VOLUMÉTRICA |  VOLUMÉTRICA PRINCIPALMENTE EMBORA COM ALGUMA DISTORÇÃO |  DISTORÇÃO E VOLUMÉTRICA |  DISTORÇÃO PRINCIPALMENTE COM CERTA DEFORMAÇÃO VOLUMÉTRICA |
| FINALIDADE | ESTUDO DE DEFORMAÇÕES VOLUMÉTRICAS PURAS | MUITO SIMPLES; APROXIMA-SE DAS CONDIÇÕES DE CAMPO | O ENSAIO MAIS UTILIZADO PARA ESTUDOS TENSÃO-DEFORMAÇÃO E PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA | ENSAIO SIMPLES PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO |

Fonte: Pinto (2006)

2.2 COMPACTAÇÃO

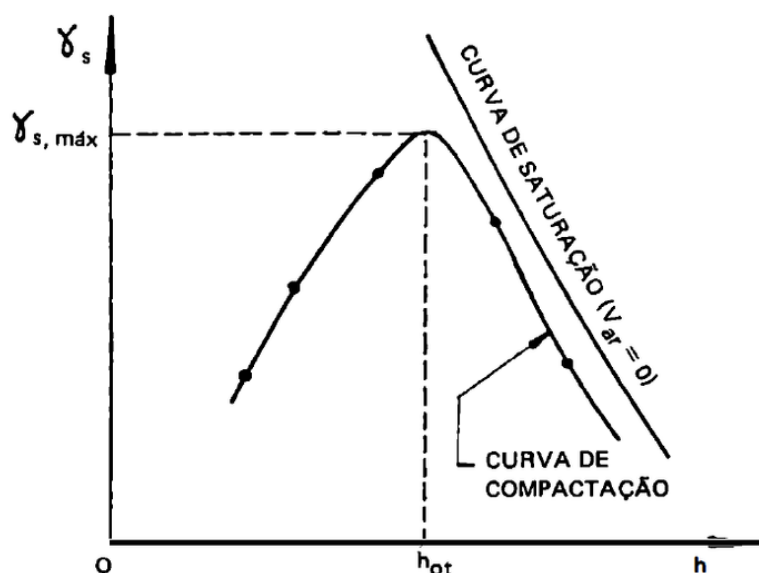
Segundo Caputo (1975) é um procedimento que pode ser tanto manual como mecânico que tem como finalidade diminuir o volume de seus vazios a fim de aumentar sua resistência à carga para deixar o solo mais estável, eliminando o recalque do solo, expulsando o ar e reduzindo o teor de umidade através da drenagem.

Pinto (2006) afirma ser uma ação simples e de grande importância devido aos grandes efeitos sobre a estabilização de maciços terrosos, tendo então forte relação com os problemas na pavimentação e de barragens de terra. Nos estudos do engenheiro norte-americano Proctor (1933), pioneiro no estudo da aplicabilidade da compactação em obras da engenharia, relata-se que o aumento do peso específico do solo está relacionado com a quantidade de água acrescentada para a compactação, sendo a qualidade desta influenciada pelo tipo de solo, teor de umidade e pelo esforço de compactação necessário. Ao realizar a compactação de

um solo submetido à certa energia de compactação e sob determinada umidade, obtém-se a curva de variação dos pesos específicos (γ_s), em função da umidade (h), com o formato representado na Figura 2.

Esta comprova que para um ponto de peso específico aparente máximo, a umidade correspondente a ele é denominada umidade ótima (h_{ot}), sendo variável conforme o tipo de solo e energia de compactação utilizada (PINTO, 2006).

Figura 2 – Curva de Compactação



Fonte: Pinto (2006)

2.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS

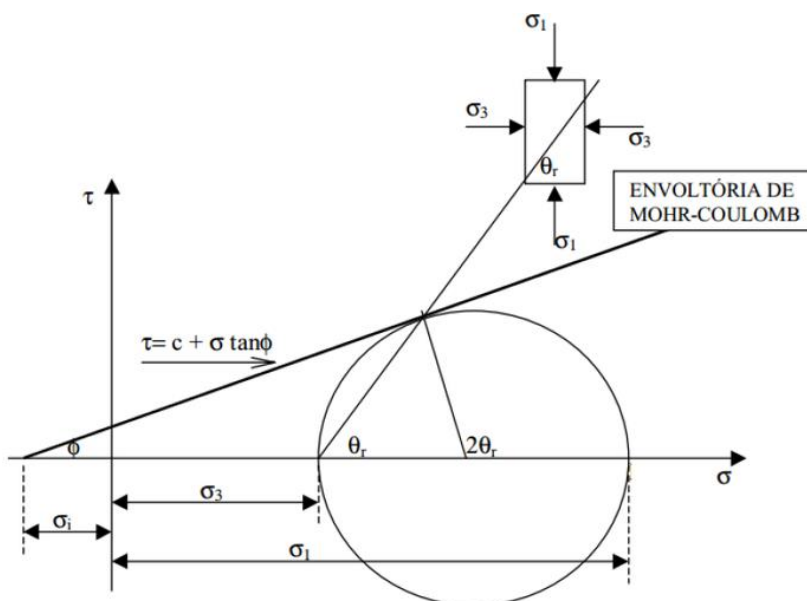
A resistência ao cisalhamento dos solos é estabelecida pelas características coesivas e friccionais entre as partículas do solo, sendo definida como a tensão máxima cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura (PINTO, 2000) e os fatores que influenciam a essa resistência são a distribuição de partículas do solo, a densidade, a estrutura e o teor de água no solo (MCKYES et al., 1994).

Segundo Pinto (2006), a ruptura do solo será sempre por cisalhamento, exceto quando houver ruptura por tração. Gerscovich (2010) destaca que o momento da ruptura se caracteriza pela formação de uma superfície de cisalhamento contínua na massa de solo e com essa camada de solo que perde suas características durante o processo de ruptura, localizada em torno da superfície

de cisalhamento, forma-se a zona cisalhada, que posteriormente gera a superfície de cisalhamento.

Os critérios de ruptura para Pinto (2000) são representações na intenção de simular as condições as quais levariam a ruptura dos materiais, com destaque ao critério de ruptura de Mohr-Coulomb, o qual é representado graficamente pela tensão cisalhante (τ) versus a tensão normal efetiva (σ'), como é possível observar na Figura 3. Para representar os estados de tensões na ruptura, traça-se uma reta tangenciando o semicírculo, simbolizando a envoltória de resistência de Coulomb. Onde c' e Φ' são os parâmetros efetivos do intercepto coesivo e ângulo de atrito, σ_1 e σ_3 a máxima e mínima tensão normal.

Figura 3 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb



Fonte: Sachetti (2014)

Assim, a tensão cisalhante do solo, varia linearmente com a tensão normal, como mostra na Equação 1, dependendo também do intercepto coesivo efetivo e do ângulo de atrito interno efetivo.

$$\tau = c' + \sigma_n \tan(\Phi') \quad (1)$$

Pinto (2000) define o critério de Coulomb como: “Não há ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar um valor dado pela Equação 1, sendo c' e θ' constantes do material e σ a tensão normal existente no plano de cisalhamento”. E o

critério de Mohr é definido como: “Não há ruptura enquanto o círculo representativo do estado de tensões se encontrar no interior de uma curva, que é a envoltória dos círculos relativos a estados de ruptura, observados experimentalmente para o material.”

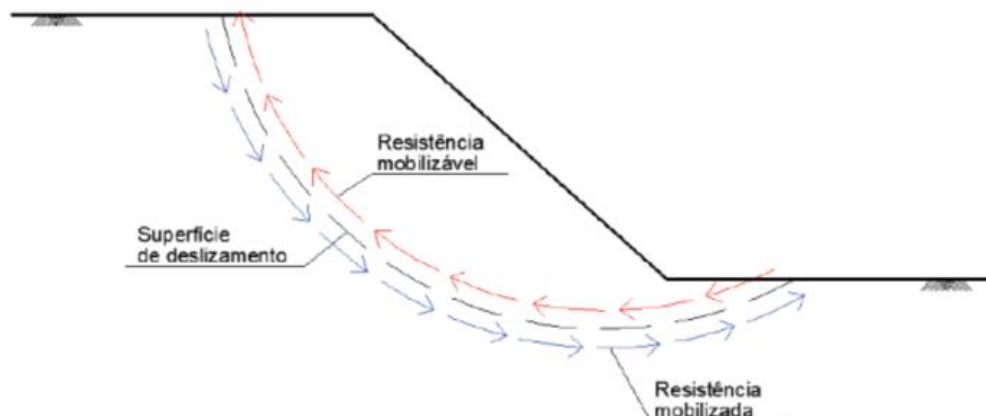
Com base no critério de Mohr-Coulomb, o ensaio mais antigo, simples e comum utilizado para esta obtenção é o Cisalhamento Direto. Porém, ele apresenta algumas desvantagens como a geração de um plano de ruptura na zona onde a caixa de cisalhamento é dividida e a falta de controle das poropressões, sendo necessário ainda controlar a velocidade do ensaio para os resultados gerados estarem na condição de tensão efetiva (CAPUTO, 2011; CRAIG, 2011).

2.4 ESTABILIDADE DE TALUDES

Segundo Caputo (1988), taludes são definidos como superfícies inclinadas que delimitam um maciço de terra, de rocha ou de terra e rocha, que podem ser naturais ou como neste estudo, artificiais, como os taludes de cortes e aterros, sendo estes mais apropriados para as teorias desenvolvidas para as análises de estabilidade, pois apresentam maior homogeneidade em sua composição.

Para analisar sua estabilidade é preciso saber qual o aumento de sollicitação (diferença da resistência mobilizável que é resistência ao corte máxima que aquele solo específico consegue oferecer quando atuado e a resistência mobilizada, que seria a necessária expender para equilibrar o conjunto de cargas atuantes) que suporta antes de se transformar num mecanismo, fato que ocorre quando as tensões de corte máximas mobilizáveis pelo solo ao longo de uma superfície forem ultrapassadas. A Figura 4 apresenta o mecanismo descrito anteriormente, representando as grandezas: resistência mobilizável é a força que se opõe ao movimento, resistência mobilizada é a força que origina o movimento.

Figura 4 - Resistência Mobilizável e Resistência Mobilizada



Fonte: Silva (2009)

Os métodos para análise de estabilidade são divididos em métodos determinísticos, onde a medida da segurança do talude é feita em termos de um fator de segurança e métodos probabilísticos, feita em termos da probabilidade ou ainda do risco de ocorrer a ruptura (GEORIO, 2000). No presente trabalho são abordados e utilizados apenas os métodos determinísticos.

Segundo Vargas (1977) para um maciço de terra estar em equilíbrio é necessário que a tensão de cisalhamento seja igual ou menor que a resistência ao cisalhamento do material, respeitando sempre o fator de segurança adotado, resultante da Equação 2.

$$FS = \frac{\tau_{(Mobilizável)}}{\tau_{(mobilizada)}} \quad (2)$$

Onde: τ é a tensão cisalhante.

Segundo Massad (2010), os métodos para a análise da estabilidade de taludes, atualmente em uso, baseiam-se na hipótese de haver equilíbrio numa massa de solo, tomada como corpo rígido-plástico, na iminência de entrar em um processo de escorregamento. Daí a denominação geral de “métodos de equilíbrio-limite”. Para o estudo do método de equilíbrio-limite alguns pressupostos como, o coeficiente de segurança é uma constante ao longo da linha de ruptura, ou seja, desprezam-se possíveis rupturas progressivas.

Para a avaliação dos parâmetros de segurança, para o projeto de taludes, devem seguir a Norma Técnica ABNT NBR 11682/1991 – Estabilidade de taludes, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Utilização de Modelos Matemáticos - Fator de Segurança

| Grau de segurança necessário ao local | Métodos baseados no equilíbrio-limite | Tensão-deformação |
|---------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Padrão: fator de segurança mínimo ¹ | Padrão: deslocamento máximo |
| Alto | 1,50 | Os deslocamentos máximos devem ser compatíveis com o grau de segurança necessário ao local, à sensibilidade de construções vizinhas e à geometria do talude. Os valores assim calculados devem ser justificados. |
| Médio | 1,30 | |
| Baixo | 1,15 | |

¹ Podem ser adotados fatores diferentes, desde que justificados
 Fonte: ABNT (1991)

Segundo Rogério (1977) os valores de saturação, para solos argilosos ou muito argilosos varia entre 20% e 40%, devendo-se utilizar o valor médio de 25%.

2.4.1 Método das Fatias

No método das fatias, a massa de solo acima da superfície potencial de deslizamento é dividida em fatias, segundo planos verticais, fatias para as quais poderão ser definidas diferentes larguras. A base de cada fatia será representada por um segmento de reta em vez de uma curva, permitindo assim uma simplificação da quantificação do peso próprio, portanto quanto menor for a largura das fatias, menor será o erro introduzido no resultado.

O fator de segurança do talude será definido pelo quociente entre o momento resistente total (MR), dependente da coesão (c') e do ângulo de atrito interno (Φ'), e o momento instabilizador (MS), que será igual para todas as fatias, acarretando a existência de forças de interação entre fatias (FREITAS, 2010).

2.4.1.1 Métodos de Equilíbrio limite para superfícies de rotura circular

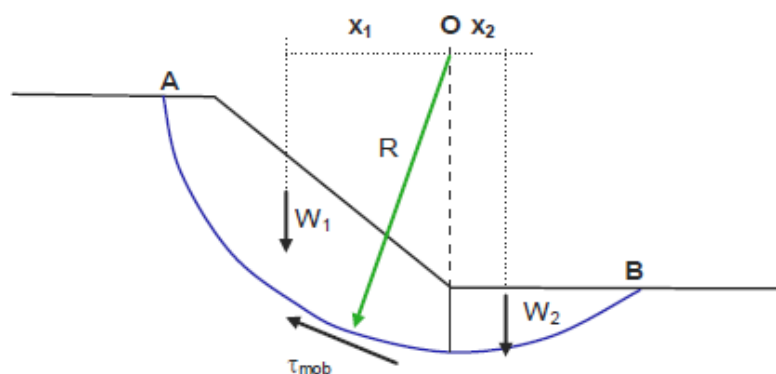
Os escorregamentos em taludes de características mecânicas homogêneas tem a forma semelhante à de uma concha, observações estas que levaram

ao desenvolvimento de métodos que consideram superfícies de rotura de forma circular. Isto permite a avaliação da estabilidade através do equilíbrio dos momentos em relação ao centro de superfície de rotura, sendo nulo o braço das forças normais a esta e constante o das forças de corte. Os resultados são conservativos em termos de fator de segurança, pois só é analisada a superfície crítica, desprezando-se o efeito tridimensional da resistência mobilizada nas extremidades laterais da superfície de deslizamento (FREITAS, 2010).

2.4.1.1.1 Método de Bishop Simplificado

Encontra-se dentro do método das fatias, que segundo Gerscovich (2012), é a forma mais utilizada em estudos de estabilidade devido a ausência de restrições quanto à homogeneidade do solo, geometria do talude e tipo de análise. Largamente utilizado, o método de Bishop (1958) considera a superfície de ruptura como sendo circular e que as forças entre as partes são horizontais. A figura 5 mostra os momentos gerados pelo maciço (GERSCOVICH, 2012; CRAIG, 2011).

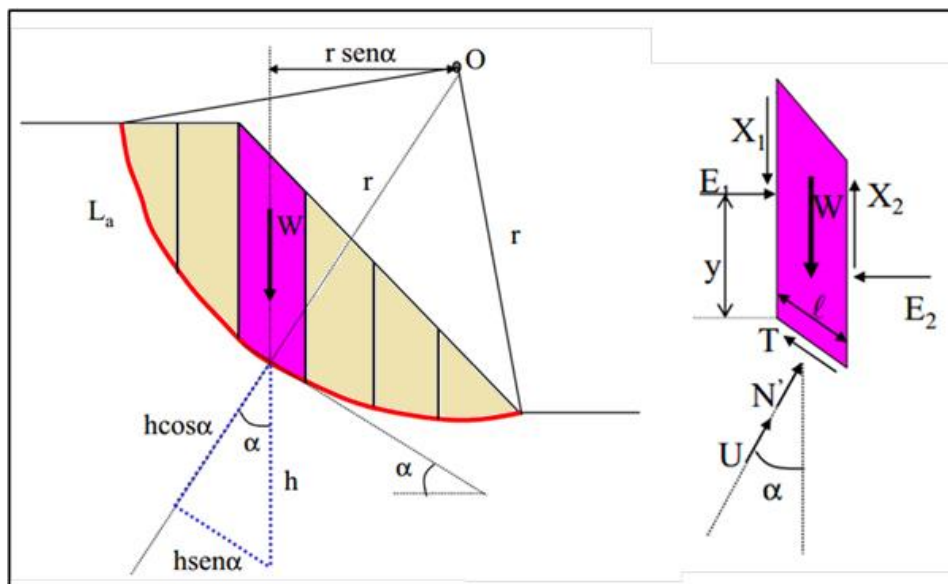
Figura 5 – Geometria do escorregamento de um talude



Fonte: Gerscovich (2012)

A Figura 6 demonstra a ruptura de forma circular e as forças atuando em cada fatia.

Figura 6 – Forças atuantes nas fatias do maciço



Fonte: Adaptado de Gomes (2013)

Com o equilíbrio das forças na vertical obtém-se o fator de segurança por meio iterativo levando em consideração o arco, onde deve se proceder da seguinte maneira: admite-se um valor inicial para FS_1 e, substitui se na equação 6 e, com isto é obtido um valor FS_2 , que é comparado com o primeiro valor do coeficiente de segurança FS_1 . Conforme a precisão necessária é realizada novas repetições, no entanto, de modo geral, três interações já bastam para que se obtenha o término do processo iterativo, com o fator de segurança calculado igual ao adotado (FS_1).

2.4.1.2 Métodos de Equilíbrio limite para qualquer tipo de superfícies de rotura

Quanto aos métodos de equilíbrio limite para qualquer superfície de rotura, a situação mais usual é a resistência ao corte não ser uniforme no talude. Então a superfície crítica não é necessariamente circular e a sua forma passa a depender do modo como a resistência ao corte se distribui em profundidade. Na maioria dos casos a geometria da superfície crítica é condicionada pela existência de estratos de baixa resistência e de reduzida espessura, portanto a adoção de superfícies circulares pode proporcionar resultados não fidedignos.

A análise de estabilidade realizada pelo método das fatias é, neste caso, mais complexa que para a de superfícies circulares. Isto se deve ao fato de que qualquer que seja o ponto em relação ao qual se expressem as equações de momentos é sempre necessário considerar as forças normais à base, pois o braço do momento

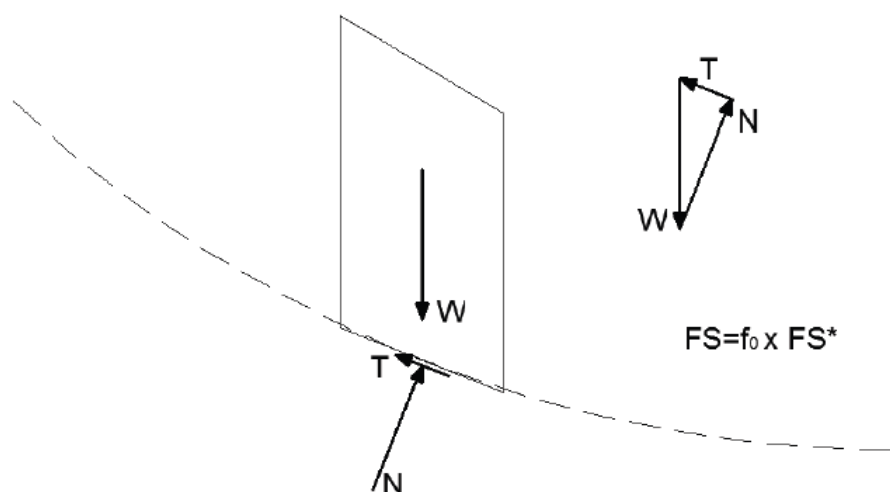
deixa de ser nulo e o braço do momento das forças tangenciais deixa de ser constante.

O problema é indeterminado, sendo necessário assumir algumas hipóteses para definir o fator de segurança associado ao talude. São essas hipóteses que constituem a principal diferença entre os vários métodos de análise (FREITAS, 2010).

2.4.1.2.1 Método de Janbu Simplificado

O método Janbu (1954) considera que a resultante das forças que atuam entre as fatias é horizontal e, que se aplica um fator de correção (f_0) para as forças cisalhantes atuantes, sendo este fator para equivaler as forças de interação que o método negligencia (GERSCOVICH, 2012; SILVA, 2011). Ou seja, o método considera o equilíbrio das forças horizontais global e não para o caso do equilíbrio dos momentos (BARBOSA, 2008). As forças atuantes nas fatias para o método de Janbu estão descritas na Figura 7.

Figura 7 – Fatia genérica e polígono das forças



Fonte: Silva (2011)

A Figura 7 mostrou as forças que estão atuando na fatia, estando onde atua o peso da fatia (W), a reação do solo (N) e o força resistente de cisalhamento do solo (T).

2.4.1.2.2 Método de Janbu Generalizado

O método de Janbu (1957) generalizado considera as forças entre as fatias, tanto a força normal como tangencial e admite uma linha arbitrária para determinar uma relação entre estas.

Este método satisfaz as condições de equilíbrio de forças e de momentos. O equilíbrio de momentos para a massa global de escorregamento está satisfeito considerando uma largura de fatia infinitesimal e considerando momentos sobre o ponto médio da base da fatia (JANBU, 1957).

2.4.2 Métodos Computacionais

A análise da estabilidade dos taludes pode ser realizada com o auxílio de softwares computacionais, como por exemplo, o Geo Slide e o Geo Slope. Neste trabalho será utilizada a versão educacional do Geo Slide, do grupo RocScience.

O software Slide possui vários métodos de cálculo, levando em consideração os métodos de Bishop Simplificado, Janbu Simplificado e Janbu Generalizado, dentre outros. Dando a possibilidade de efetuar cálculos com uma grandeza de detalhes, com vários tipos de materiais, efeitos da água sobre o maciço, tipos de estruturas e análises probabilísticas, que geram uma grande confiabilidade no software (ROCSCIENCE, 2013).

O software é de fácil aplicação, sendo necessário informar a geometria do talude, o peso específico dos materiais, ângulo de atrito, intercepto coesivo e nível d'água. Se necessário é possível informar mecanismos que foram utilizados para auxiliar na estabilidade do maciço, como tirantes e geotêxtis (ROCSCIENCE, 2013). O Slide gera e destaca o fator de segurança crítico com base em múltiplas análises, sendo mais eficiente que o processo manual.

3 MÉTODOS E MATERIAIS

Serão descritos a seguir os procedimentos realizados para obtenção de parâmetros para a realização dos métodos computacionais, os quais nas suas várias formas de incluir as solicitações que são submetidos os taludes estão incluídas as variações da pressão neutra em função da pressão vertical, com base na saturação do solo. Assim para as simulações de rupturas dos taludes por escorregamentos fez-se a variação do R_u de 0 e 25%. Sendo este o valor médio para solos argilosos, visto que seu valor extremo de 40% não seria necessário se tratando de um talude rodoviário.

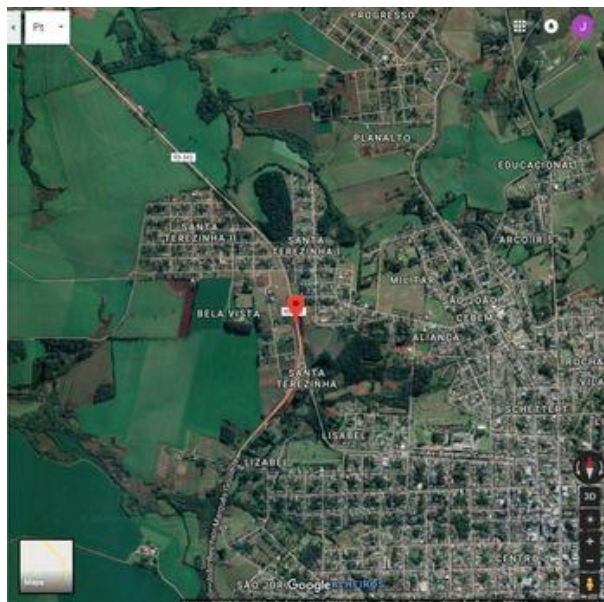
3.1 MATERIAIS

Os materiais que foram utilizados na pesquisa são solo e água. Onde a água utilizada foi a destilada proveniente do laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM e, o solo conforme especificação a seguir.

3.1.1 Solo

O solo que foi utilizado na pesquisa foi coletado do horizonte C da Jazida na cidade de Cruz Alta, localizada nas coordenadas 28°37'54.00" Sul e 53°37'31.50" Oeste, como mostra a Figura 8, diretamente no corpo do aterro de uma obra rodoviária. Os ensaios de caracterização, compactação e cisalhamento direto foram realizados no laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria. A análise completa dos parâmetros geotécnicos representativos do subsolo local e de seus diferentes horizontes estão sendo desenvolvidas por Pascoal (2020), com previsão de defesa prevista para março de 2020.

Figura 8 – Localização do Aterro em Estudo



Fonte: Autora (2019)

Para a realização deste trabalho de conclusão de curso, a autora acompanhou a realização dos ensaios de caracterização e compactação do solo. Serão exibidos neste trabalho, somente os parâmetros do solo necessários para o dimensionamento dos taludes, foco do presente estudo.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Compactação e moldagem dos corpos de prova

Foram elencados três tipos de amostras a serem preparadas para o ensaio de cisalhamento direto: as amostras naturais e as compactadas, na energia normal e intermediária. A amostra indeformada foi obtida a partir de cortes no solo coletado no corpo do aterro.

Já para as compactadas, o preparo foi realizado segundo os preceitos da Norma DNIT 134/2018, realizando a compactação em cilindro tripartido devido à compactação ter sido realizada no mesmo molde. O processo inicia com a secagem natural do material passante na peneira 4.8 mm, que foi destorroado em almofariz com pilão de ponta recoberto por borracha. Como é solo sem pedregulhos, usa-se o

cilindro tripartido de dimensões internas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Cilindro tripartido utilizado para a moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autora (2019)

Conhecidas as condições de umidade ótima e densidade máxima determinadas na curva de compactação, utilizando a energia normal, determinou-se a umidade higroscópica da amostra, para calcular a quantidade de água a ser acrescida em uma amostra recomendada pela norma de 4.000 gramas, como mostra na Tabela 2.

Tabela 2 - quantidade de água a ser adicionada para a amostra atingir a umidade ótima

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| Umidade higroscópica da amostra | 6,50% |
| Umidade Ótima | 34,70% |
| Peso do Solo na Umidade Higroscópica | 4.000 g |
| Peso do Solo na Umidade Ótima | 5.059,6 g |
| Total de água (5.059,6-4.000) | 1.091,4 g |

Fonte: Pascoal (2020), a ser publicado.

Portanto, a quantidade de água a adicionar é 1.091,4 gramas para amostra atingir a umidade ótima da energia normal de compactação, ver Figura 10.

Figura 10 - Processo de Homogeneização da Mistura na Umidade Ótima



Fonte: Autora (2019)

Com a umidade ótima obtida, inicia-se a compactação que se dá com a montagem do molde tripartido untado internamente com desmoldante, preso a duas braçadeiras de aço envolvendo o cilindro tripartido, apertadas por meio de parafusos, de modo que as partes do molde não se afastem durante a compactação. O cilindro juntamente com as braçadeiras é preso por três parafusos a uma base de aço, como mostra a figura 11(a).

Figura 11 - Moldagem dos corpos de prova no cilindro tripartido. (a) Compactação; (b) Corpo de prova moldado.



Fonte: Autora (2019)

A quantidade de golpes por camada depende do tamanho do corpo de prova, da energia de compactação, do peso do soquete e da altura de queda do soquete, conforme a Figura 12.

Figura 12 - Condições de compactação de corpo de prova em cilindro tripartido para ensaio de módulo de resiliência

| Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Volume (cm ³) | Energia (kgf.cm/cm ³) | Nº de camadas | Altura de queda (cm) | Peso do soquete (kgf) | Nº de golpes por camada | |
|---------------|-------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|----|
| 10 | 20 | 1570,8 | Normal 6 | 10 | 30,5 | 2,5 | 12 | |
| | | | | | 45,7 | 4,53 | 5 | |
| | | | | | 30,5 | 4,53 | 7 | |
| | | | | | 45,7 | 2,5 | 8 | |
| | | | Intermediária 13 | | 30,5 | 2,5 | 27 | |
| | | | | | 45,7 | 4,53 | 10 | |
| | | | | | 30,5 | 4,53 | 15 | |
| | | | | | 45,7 | 2,5 | 18 | |
| | | | | | Modificada 27,3 | 30,5 | 2,5 | 56 |
| | | | | | | 45,7 | 4,53 | 21 |
| | | | | | | 30,5 | 4,53 | 31 |
| | | | | | | 45,7 | 2,5 | 38 |

Fonte: DNIT (2018)

A compactação foi realizada com 10 camadas, conforme normatizado pelo DNIT (2018).

Tabela 3 - Densidade Aparente Seca

| | |
|--------------------------|--------------------------|
| Volume amostra | 1570 cm ³ |
| Molde+solo+água: | 9848 g |
| Peso do molde: | 7174 g |
| Peso (solo+água): | 2674 g |
| Densid. solo úmido: | 1703,2 kg/m ³ |
| Densid. solo seco: | 1264,4 kg/m ³ |

Fonte: Pascoal (2020), a ser publicado.

Após a compactação de 12 golpes em 10 camadas, pesa-se o corpo de prova, no molde, com as braçadeiras e sem a base de aço (P2), e calcular a massa do corpo de prova úmido, que é a diferença entre essa massa P2 e o P1, tendo uma P3, a qual dividida pelo volume interno do cilindro (cm³), obtém-se a massa específica úmida do corpo de prova. Após, remover os parafusos das braçadeiras e retirar cada uma das partes do molde, chegam-se no corpo de prova que será retirado as amostras, como mostra a figura 11(b).

O corpo de prova na energia intermediária foi obtido através do mesmo processo. Com o material preparado na umidade ótima de 36,6% efetuou-se a compactação do material dividido em 10 camadas iguais com 27 golpes cada.

Para moldagem das amostras que foram utilizadas no ensaio de cisalhamento direto, foi utilizado o molde quadrado de 5 x 5 cm com 2 cm de altura. Pressionando o molde levemente a fim de penetrar na amostra, com o auxílio de uma espátula, desbasta-se o solo ao redor do mesmo. Prosseguindo até que o solo se sobressaia ao molde metálico, como na Figura 13.

Figura 13 - Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Autora (2019)

Em seguida, rasa-se o topo do vazador e destaca-se a base, rasando também do outro lado. Assim, o corpo de prova estará pronto para o ensaio de cisalhamento direto, como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Amostra pronta para o ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Autora (2019)

3.2.2 Ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado em um aparelho da empresa Solotest (Figura 15) no Laboratório de Materiais e Construção Civil da UFSM, com coleta de dados manual.

Figura 15 – Aparelho utilizado para o ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Autora (2019)

A amostra preparada conforme o item anterior foi colocada em uma caixa bipartida com os acessórios (Figura 16), onde foi aplicado um carregamento normal e, uma carga cisalhante na parte inferior da caixa que desliza sobre trilhos, enquanto a parte superior foi mantida fixa e medida a tensão cisalhante e deslocamento horizontal da amostra.

Figura 16 - Itens da caixa bipartida e acessórios



Fonte: Autora (2019)

Para os ensaios foram aplicados três carregamentos verticais: 50, 100 e 200 kPa, conforme mostra a figura 17, com uma velocidade constante de duração de aproximadamente 2 horas de ensaio. Essa velocidade foi aplicada para que o ensaio fosse realizado em condições drenadas.

Figura 17 – Carregamentos verticais utilizados no ensaio de cisalhamento direto

| Carregamento a ser Utilizado na Prensa de Cisalhamento Direto | | |
|---------------------------------------------------------------|--------------------|---------|
| ANEL PEQUENO = 25 cm ² | | |
| TENSÃO kg/cm ² | PÓRTICO SIMPLES | BRAÇO |
| 0,50 | 6,25 kg | - |
| 1,00 | Sem peso | 2,00 kg |
| 2,00 | Sem peso | 7,00 kg |
| Constante da Máquina (k) = 0,1626545 | | |

Fonte: Solotest (2019)

Com os três pontos gerados pela tensão normal x tensão cisalhante o programa gerou a envoltória de resistência, informando juntamente os parâmetros de ângulo de atrito e intercepto coesivo.

O ensaio foi realizado na condição inundado (Figura 18) e também sem a presença de água na caixa para fins de comparação. Com os três pontos gerados pela tensão normal x tensão cisalhante o programa gerou a envoltória resistência, informando juntamente os parâmetros de ângulo de atrito e intercepto coesivo.

Figura 18 – Aparelho Montado para o ensaio de Cisalhamento Direto



Fonte: Autora (2019)

3.2.3 Moldagem dos Perfis Típicos

Para a modelagem dos perfis utilizados no software Slide, algumas variáveis foram consideradas, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Variáveis utilizadas na modelagem dos perfis típicos de rodovia

| Variável | Valor | Referência |
|------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------|
| Acostamento | 2.50 m | Pimenta, Oliveira (2004) |
| Largura da Faixa de Tráfego | 3.60 m | |
| Abaulamento | 2,0 % | |
| Ru (Saturação do solo) | 0 e 25% | ----- |
| Software | Geo Slide, versão educacional | Slide, 2009 |
| Altura do Talude | 14.20 m | ----- |
| Fator de Segurança Mínimo | 1.5 | Gerscovich (2012) |
| Declividade do Talude | 1(V):1.5(H) | ----- |
| Solo Natural | Coesão = 8.4, ângulo de atrito = 21.8° | ----- |
| Solo Compactado na Energia Normal | Coesão = 22.5, ângulo de atrito = 28.18° | ----- |
| Solo Compactado na Energia Intermediária | Coesão = 67, ângulo de atrito = 44° | ----- |
| Solo de fundação (resistente) | Coesão = 40, ângulo de atrito = 30° | ----- |

Fonte: Autora (2019)

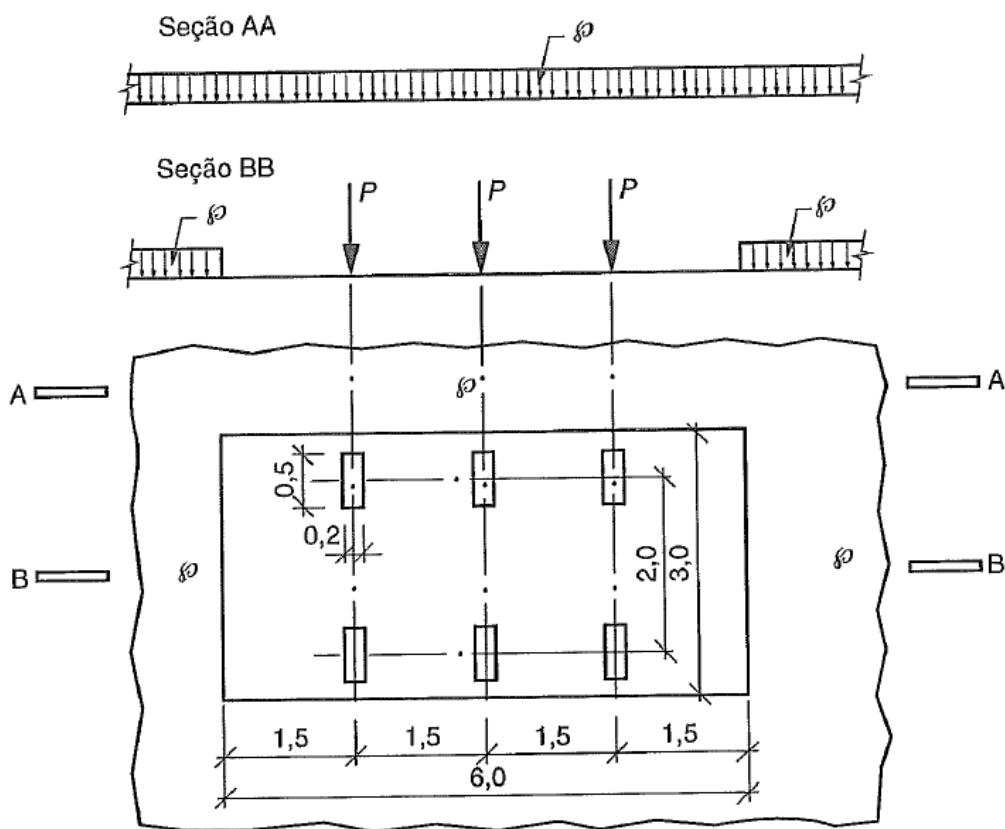
A largura da faixa de tráfego é formada pela largura do veículo-padrão acrescida dos espaços de segurança. Sendo esse espaço diretamente proporcional a segurança, conforto da estrada, bem como seu custo. Com o uso de um veículo comercial padrão com 2.60 m de largura e espaços de segurança de 0.5 m, chega-se a largura de 3.6 m, onde são consideradas seguras e confortáveis (Pimenta, Oliveira, 2004).

Para o carregamento a ser utilizado no topo do talude, considerou-se a carga devida ao peso da pavimentação, de 24 kN/m³, acrescida de uma carga adicional de 2 kN/m² para atender a um possível recapeamento, conforme a ABNT NBR 7187/2003 - Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido - Procedimento. A carga móvel rodoviária padrão TB-450, Figura 19, definida por um veículo tipo de 450 KN, com seis rodas, P = 75 KN, três eixos de carga afastados entre si em 1,5 m, com área de ocupação de 18,0 m², circundada por uma carga uniformemente distribuída constante $p = 5$ KN/m², segundo a ABNT NBR 7188/2013 – Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. A carga móvel assume posição qualquer em toda a pista rodoviária com as rodas na posição mais desfavorável, inclusive em acostamento e a carga distribuída deve ser aplicada na posição mais desfavorável, independentemente das faixas rodoviárias.

O fator de segurança de Gersovich (2012) é de 1.5 para situações mais graves, como o caso em estudo, pois há risco eminente de vida e perdas materiais significativas. A modelagem padrão do talude se encontra na Figura 20, onde estão

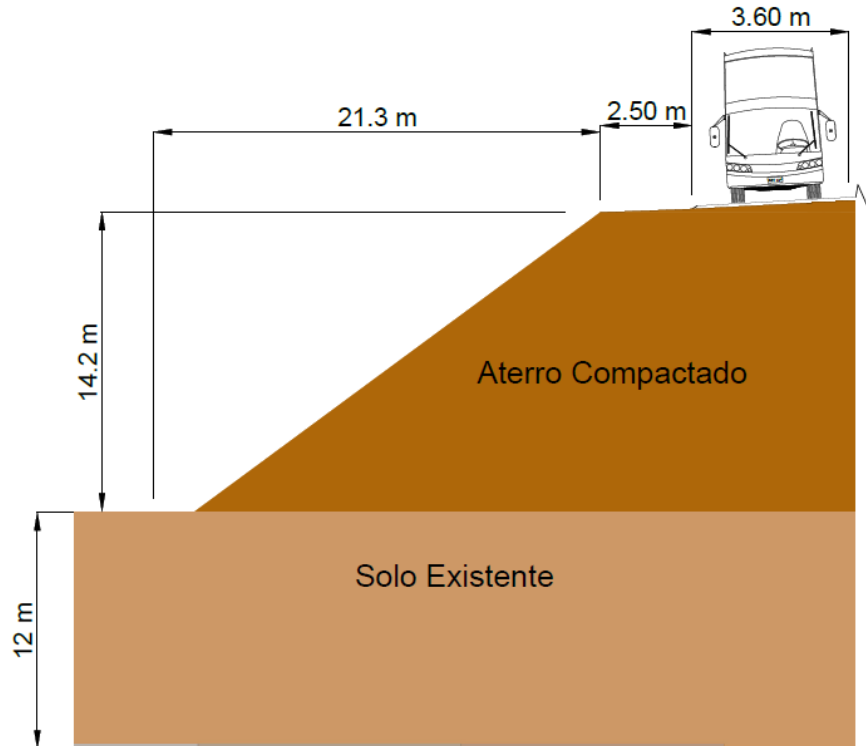
cotadas as medidas que serão utilizadas no projeto real e simuladas neste trabalho, sendo considerado altos valores de ângulo de atrito e coesão no solo de fundação denominado de “solo existente” para que a ruptura ocorresse no corpo do talude para avaliar o solo em estudo e na Figura 21, esta representado o carregamento do topo do talude.

Figura 19 – Disposição das Cargas Estáticas



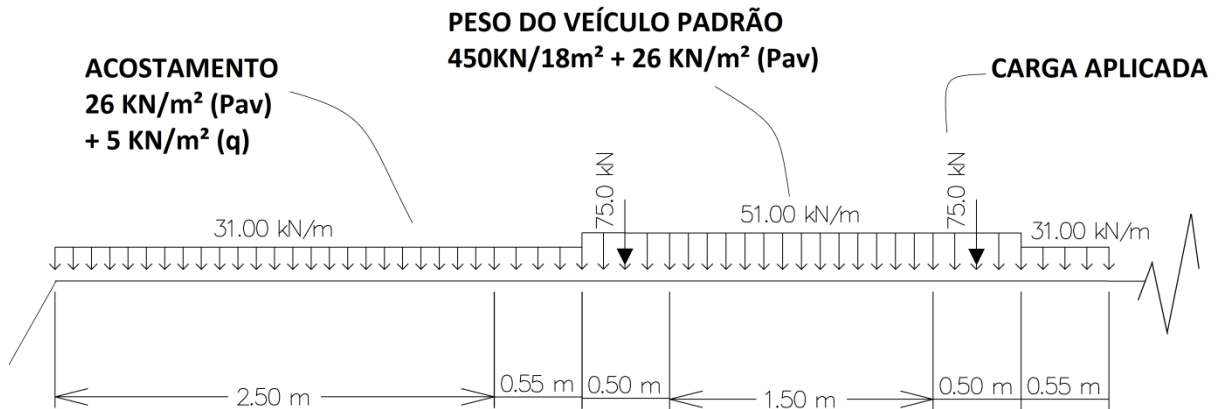
Fonte: ABNT (2013)

Figura 20 – Modelagem padrão do Talude de Projeto



Fonte: Autora (2019)

Figura 21 – Carregamento do topo do talude rodoviário



Fonte: Autora (2019)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 COMPACTAÇÃO DO SOLO

Os valores resultantes da compactação, utilizados para moldar os corpos de prova na umidade ótima, utilizados no ensaio de cisalhamento direto, encontram-se na Figura 22.

Figura 22 - Resultados Energias de Compactação

| Resultados - ENERGIA NORMAL | | |
|---------------------------------------------|-------------|-------------------------|
| Massa Específ. Aparente Seca Máxima: | 1264 | kg/m³ |
| Teor de Umidade Ótima: | 34,7 | % |
| Resultados - ENERGIA INTERMEDIÁRIA | | |
| Massa Específ. Aparente Seca Máxima: | 1458 | kg/m³ |
| Teor de Umidade Ótima: | 34,1 | % |

Fonte: Pascoal (2020), a ser publicado.

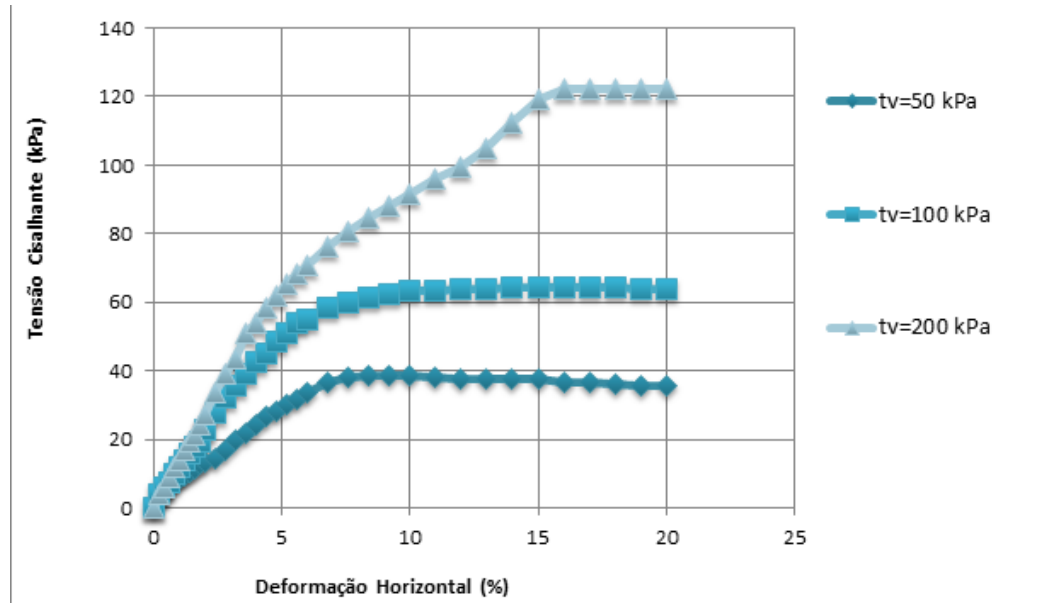
4.2 RESISTÊNCIA CISALHANTE, ÂNGULO DE ATRITO E INTERCEPTO COESIVO

A seguir serão apresentados os resultados oriundos dos ensaios de cisalhamento direto, realizados em amostras naturais imersas em água, naturais sem presença de água, e amostras compactadas imersas em água e sem presença de água.

4.2.1 Solo Natural sem inundação

O solo natural apresentou valores de resistência cisalhante conforme a Figura 23, com a aplicação das tensões normais de 50, 100 e 200 KPa.

Figura 23 - Tensão Cisalhante x Deformação do Solo Natural

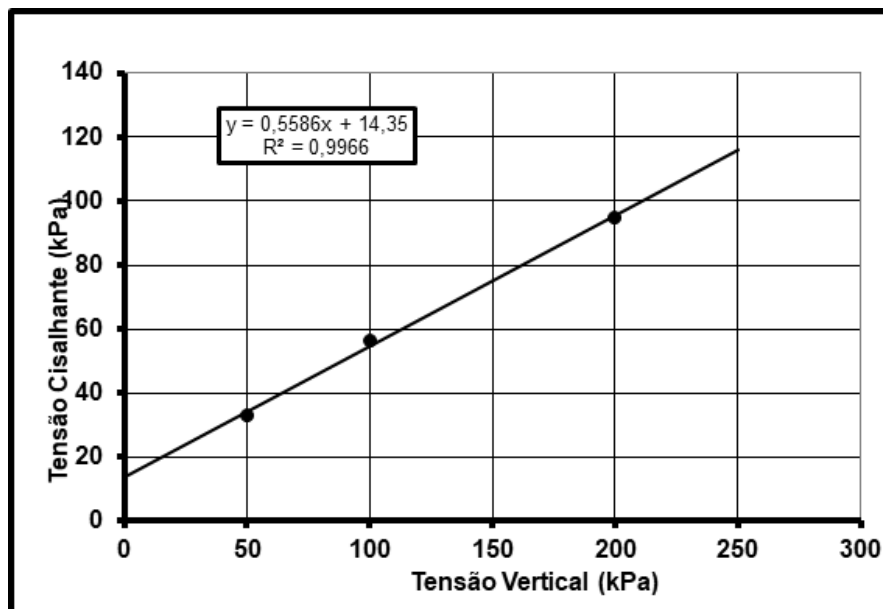


Fonte: Autora (2019)

A Figura 23 demonstra o comportamento de um solo sem elevada resistência cisalhante, não apresentando resistência de pico.

Com a Figura 24 temos a relação entre a tensão cisalhante e tensão normal, que gera a envoltória de resistência do solo, onde o ângulo desta reta é correspondente ao ângulo de atrito e a constante desta reta representa o intercepto coesivo do material.

Figura 24 - Tensão Cisalhante x Tensão Normal do Solo Natural



Fonte: Autora (2019)

A equação 12 representa a envoltória de resistência para o solo em seu estado natural e, para obtenção do parâmetro do intercepto coesivo o valor para “x” deverá ser igual à zero.

$$Y = 0,5586 x + 14,35 \quad (12)$$

Desta forma, para $x = 0$ temos que $y = 0,5586 \times 0 + 14,35 = 14,35$ assim o valor do intercepto coesivo (c') será aproximadamente 14,35 kPa.

O valor do ângulo de atrito pode ser obtido pela derivada primeira que corresponde ao coeficiente angular da reta e, o arctg deste valor será a inclinação da reta (envoltória de resistência).

Deste modo:

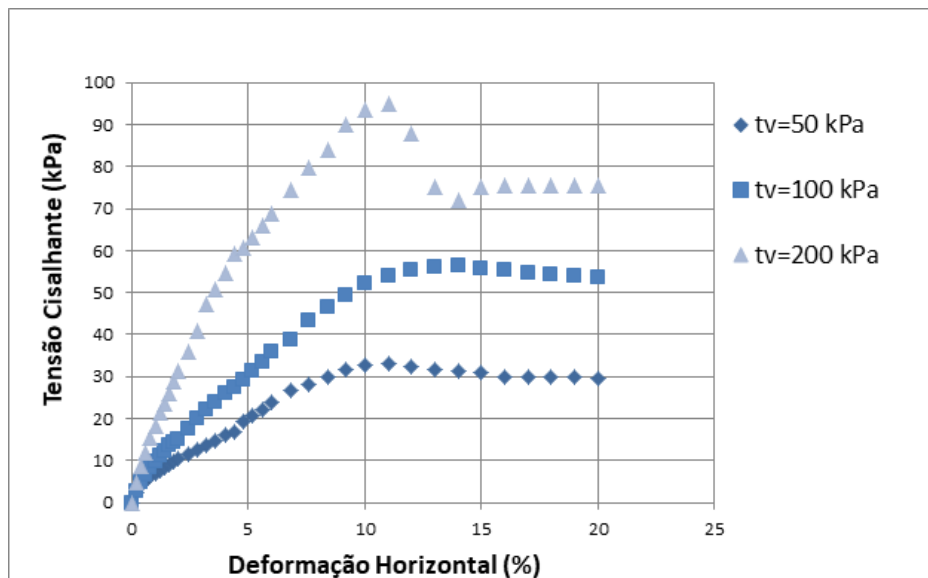
$$y' = 0,5586 + 0 = 0,5586$$

$\tan^{-1}(0,5586) \cong 29,18^\circ$, valor correspondente ao ângulo de atrito do solo em seu estado natural.

4.2.2 Solo Natural Saturado

O solo natural saturado apresentou valores de resistência cisalhante conforme a Figura 25, com a aplicação das tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.

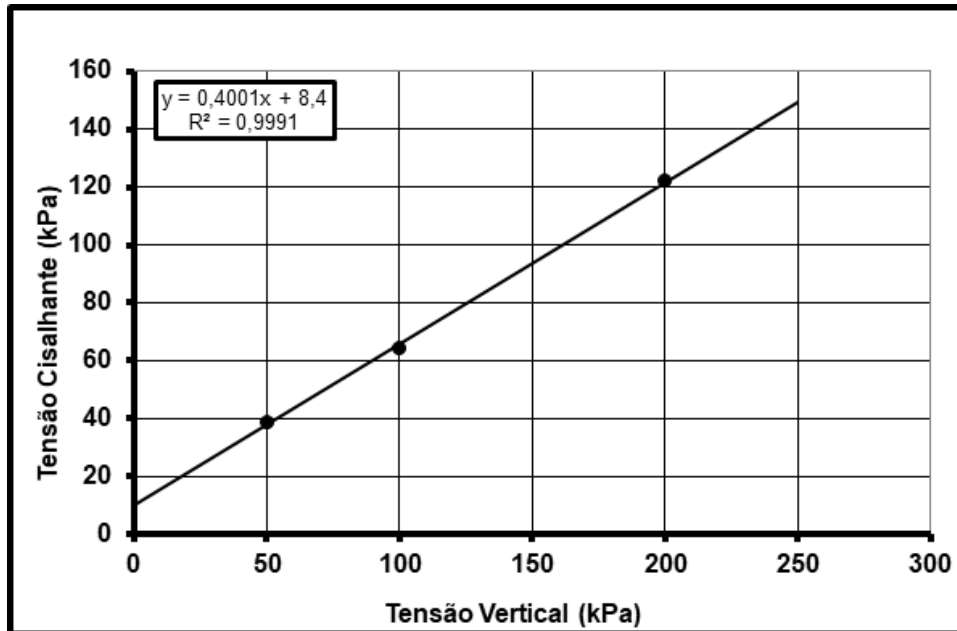
Gráfico 25 - Tensão Cisalhante x Deformação do Solo Natural Saturado



Fonte: Autora (2019)

Com a Figura 26 temos a relação entre a tensão cisalhante e tensão normal, que gera a envoltória de resistência, onde o ângulo desta reta é correspondente ao ângulo de atrito e a constante desta reta representa o intercepto coesivo do material.

Figura 26 - Tensão Cisalhante x Tensão Normal do Solo Natural Saturado



Fonte: O autor (2019)

A equação 13 representa a envoltória de resistência para o solo em seu estado natural e, para obtenção do parâmetro do intercepto coesivo o valor para "x" deverá ser igual à zero.

$$Y = 0,4001x + 8,4 \quad (13)$$

Desta forma, para $x = 0$ temos que $y = 0,4001 \times 0 + 8,4 = 8,4$ assim o valor do intercepto coesivo (c') será aproximadamente 8,4 kPa. O valor do ângulo de atrito pode ser obtido pela derivada primeira que corresponde ao coeficiente angular da reta e, o arctg deste valor será a inclinação da reta (envoltória de resistência).

Deste modo:

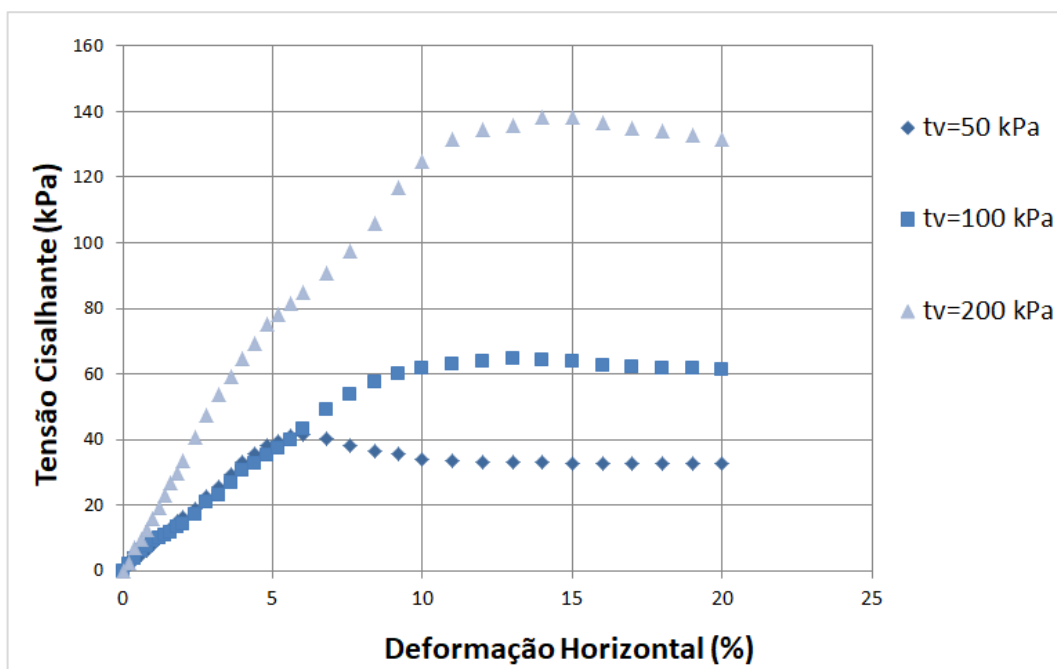
$$y' = 0,4001 + 0 = 0,4001$$

$\tan^{-1}(0,4001) \cong 21,80^\circ$, valor correspondente ao ângulo de atrito do solo em seu estado natural.

4.2.3 Solo Compactado na Energia Normal sem inundação

Este solo apresentou valores de resistência cisalhante conforme a Figura 27, com a aplicação das tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.

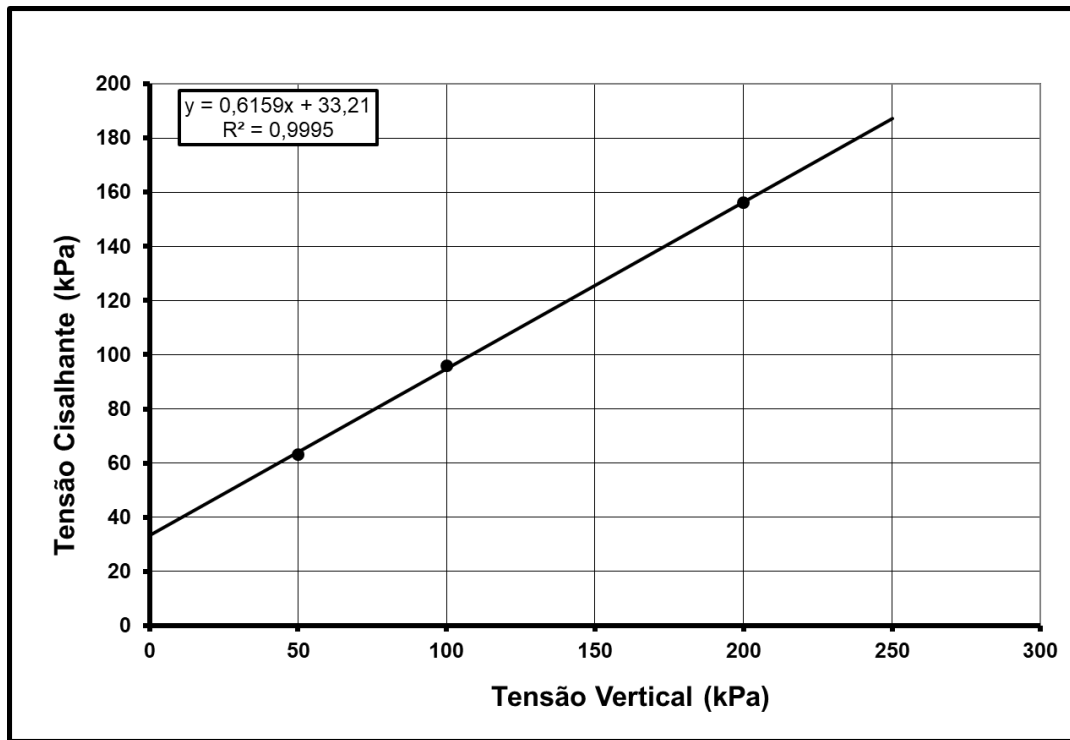
Figura 27 - Tensão Cisalhante x Deformação do solo Compactado na Energia Normal



Fonte: Autora (2019)

Com a Figura 28 temos a relação entre a tensão cisalhante e tensão normal, que gera a envoltória de resistência, onde o ângulo desta reta é correspondente ao ângulo de atrito e a constante desta reta representa o intercepto coesivo do material.

Figura 28 - Tensão Cisalhante x Tensão Normal do Solo Compactado na Energia Normal



Fonte: Autora (2019)

A equação 14 representa a envoltória de resistência do solo e, para obtenção do parâmetro do intercepto coesivo o valor para “x” deverá ser igual à zero.

$$y = 0,6159x + 33,21 \quad (14)$$

Desta forma, para $x = 0$ temos que $y = 0,6159 \times 0 + 33,21 = 33,21$ assim o valor do intercepto coesivo (c') será aproximadamente 33,2 kPa. O valor do ângulo de atrito pode ser obtido pela derivada primeira que corresponde ao coeficiente angular da reta e, o arctg deste valor será a inclinação da reta (envoltória de resistência).

Deste modo:

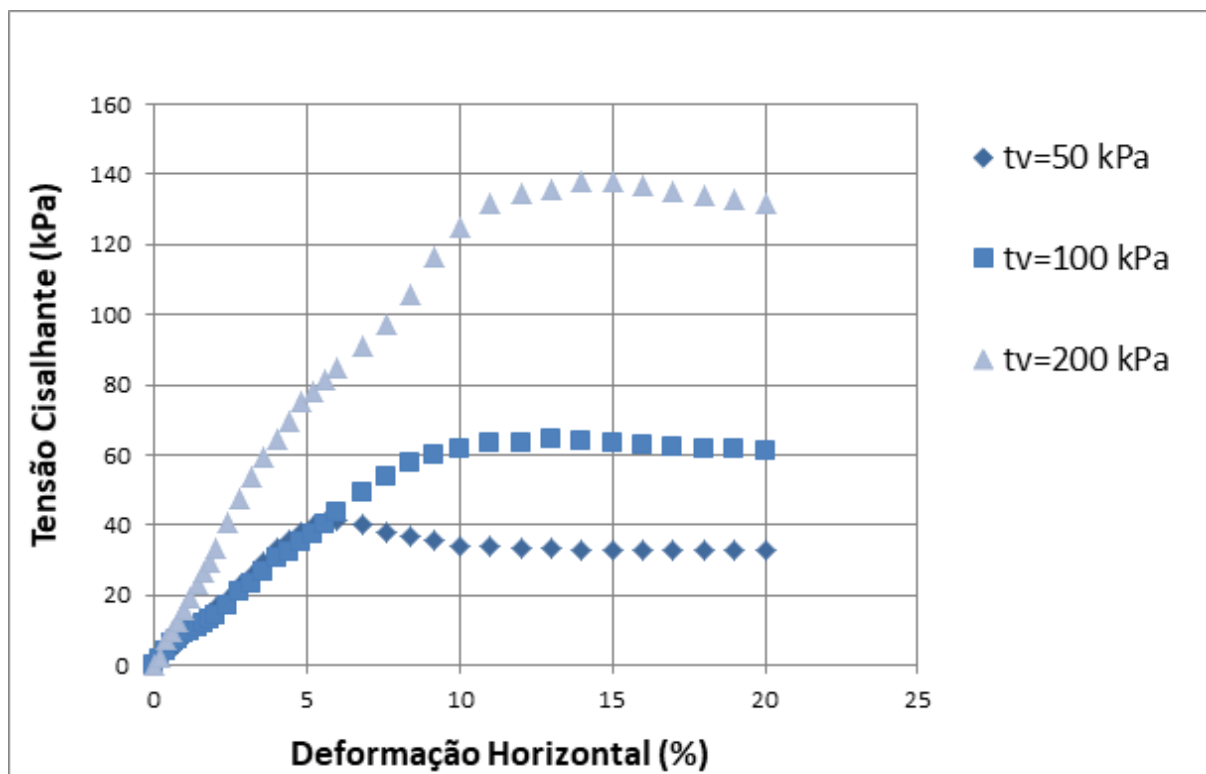
$$y' = 0,6159 + 0 = 0,6159$$

$\tan^{-1}(0,6159) \cong 31,63^\circ$, valor correspondente ao ângulo de atrito do solo em seu estado natural.

4.2.4 Solo Compactado na Energia Normal Saturado

Este solo apresentou valores de resistência cisalhante conforme a Figura 29, com a aplicação das tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.

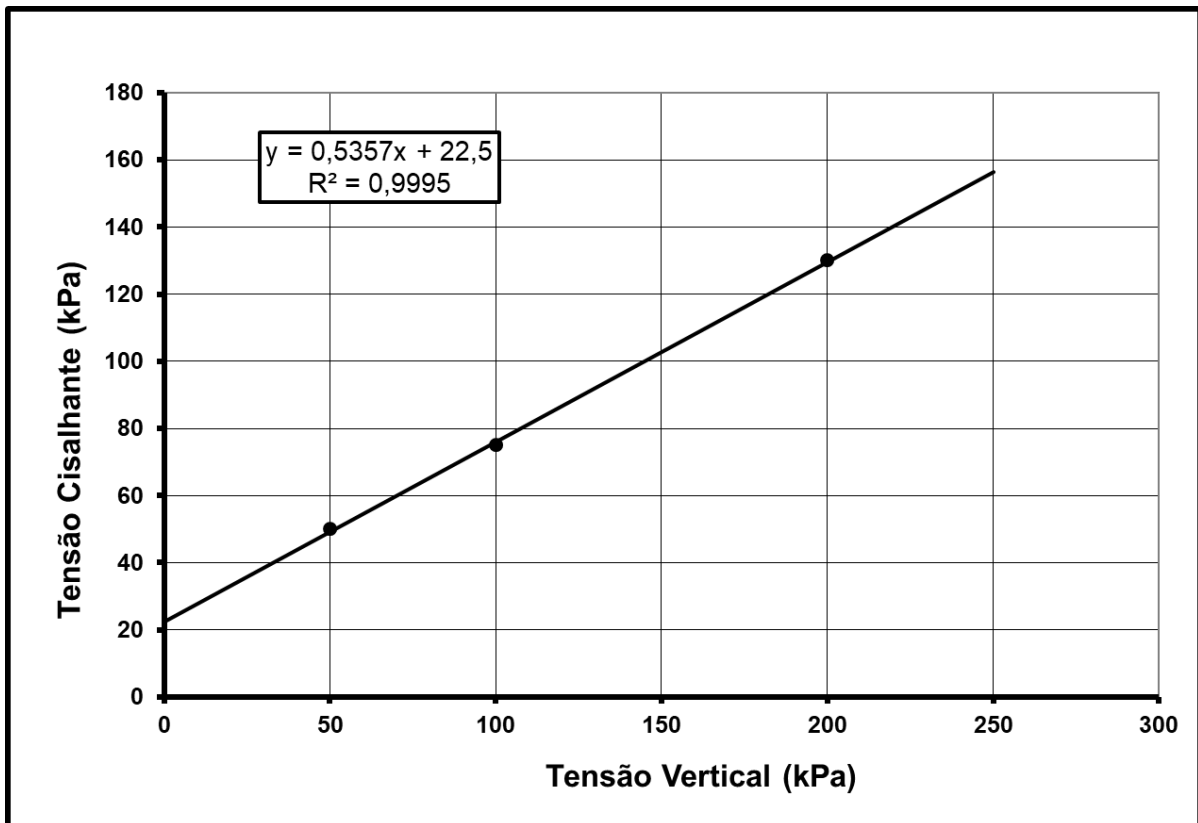
Figura 29 - Tensão Cisalhante x Deformação do Solo Compactado na Energia Normal Saturado



Fonte: Autora (2019)

Com a Figura 30 temos a relação entre a tensão cisalhante e tensão normal, que gera a envoltória de resistência, onde o ângulo desta reta é correspondente ao ângulo de atrito e a constante desta reta representa o intercepto coesivo do material.

Figura 30 - Tensão Cisalhante x Tensão Normal do Solo Compactado na Energia Normal Saturado



Fonte: Autora (2019)

A equação 15 representa a envoltória de resistência para o solo em seu estado natural e, para obtenção do parâmetro do intercepto coesivo o valor para “x” deverá ser igual à zero.

$$Y = 0,5357 x + 22,5 \quad (15)$$

Desta forma, para $x = 0$ temos que $y = 0,5357 \times 0 + 22,5 = 22,5$ assim o valor do intercepto coesivo (c') será aproximadamente 22,5 kPa. O valor do ângulo de atrito pode ser obtido pela derivada primeira que corresponde ao coeficiente angular da reta e, o arctg deste valor será a inclinação da reta (envoltória de resistência).

Deste modo:

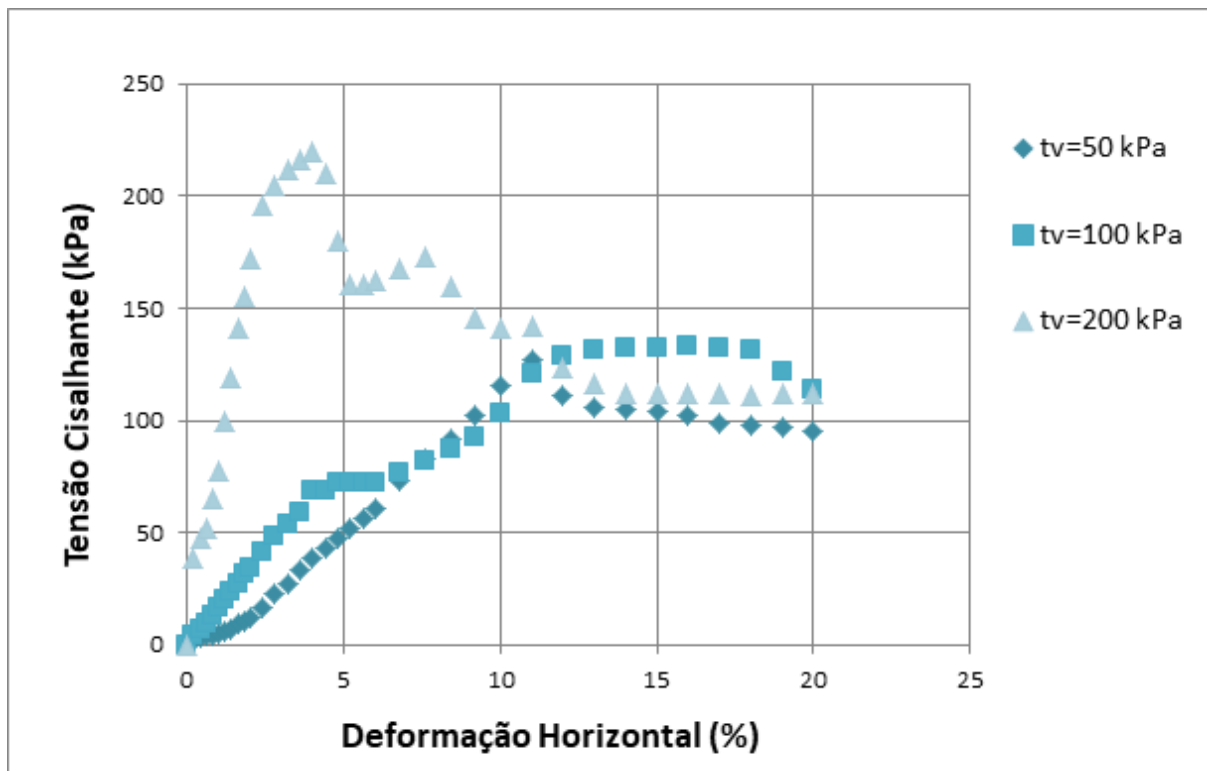
$$y' = 0,5357 + 0 = 0,5357$$

$\tan^{-1}(0,5357) \cong 28,1779^\circ$, valor correspondente ao ângulo de atrito do solo em seu estado natural.

4.2.5 Solo Compactado na Energia Intermediária sem inundação

Este solo apresentou valores de resistência cisalhante conforme a Figura 31, com a aplicação das tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.

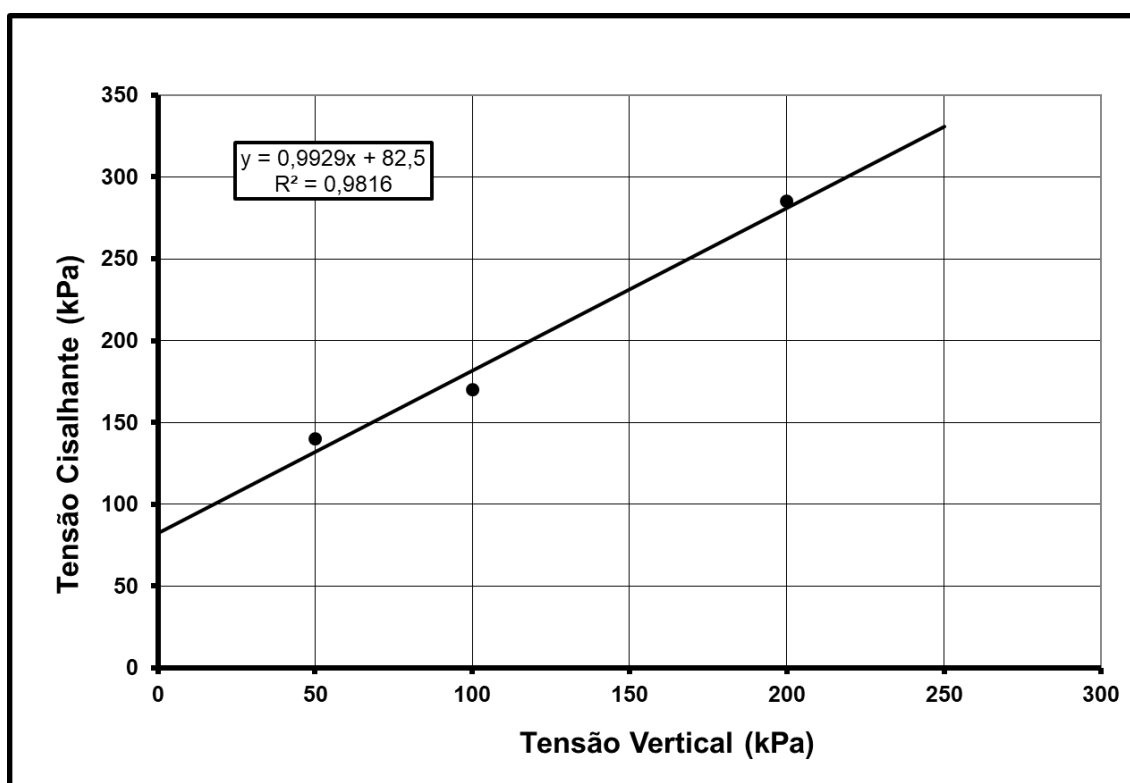
Figura 31 - Tensão Cisalhante x Deformação do Solo Compactado na Energia Intermediária



Fonte: Autora (2019)

Com a Figura 32 temos a relação entre a tensão cisalhante e tensão normal, que gera a envoltória de resistência, onde o ângulo desta reta é correspondente ao ângulo de atrito e a constante desta reta representa o intercepto coesivo do material.

Figura 32 - Tensão Cisalhante x Tensão Normal do Solo Compactado na Energia Intermediária



Fonte: Autora (2019)

A equação 16 representa a envoltória de resistência para o solo em seu estado natural e, para obtenção do parâmetro do intercepto coesivo o valor para “x” deverá ser igual à zero.

$$y = 0,9929x + 82,5 \quad (16)$$

Desta forma, para $x=0$ temos que $y = 0,9929 \times 0 + 82,5 = 82,5$ assim o valor do intercepto coesivo (c') será aproximadamente 82,5 kPa. O valor do ângulo de atrito pode ser obtido pela derivada primeira que corresponde ao coeficiente angular da reta e, o arctg deste valor será a inclinação da reta (envoltória de resistência).

Deste modo:

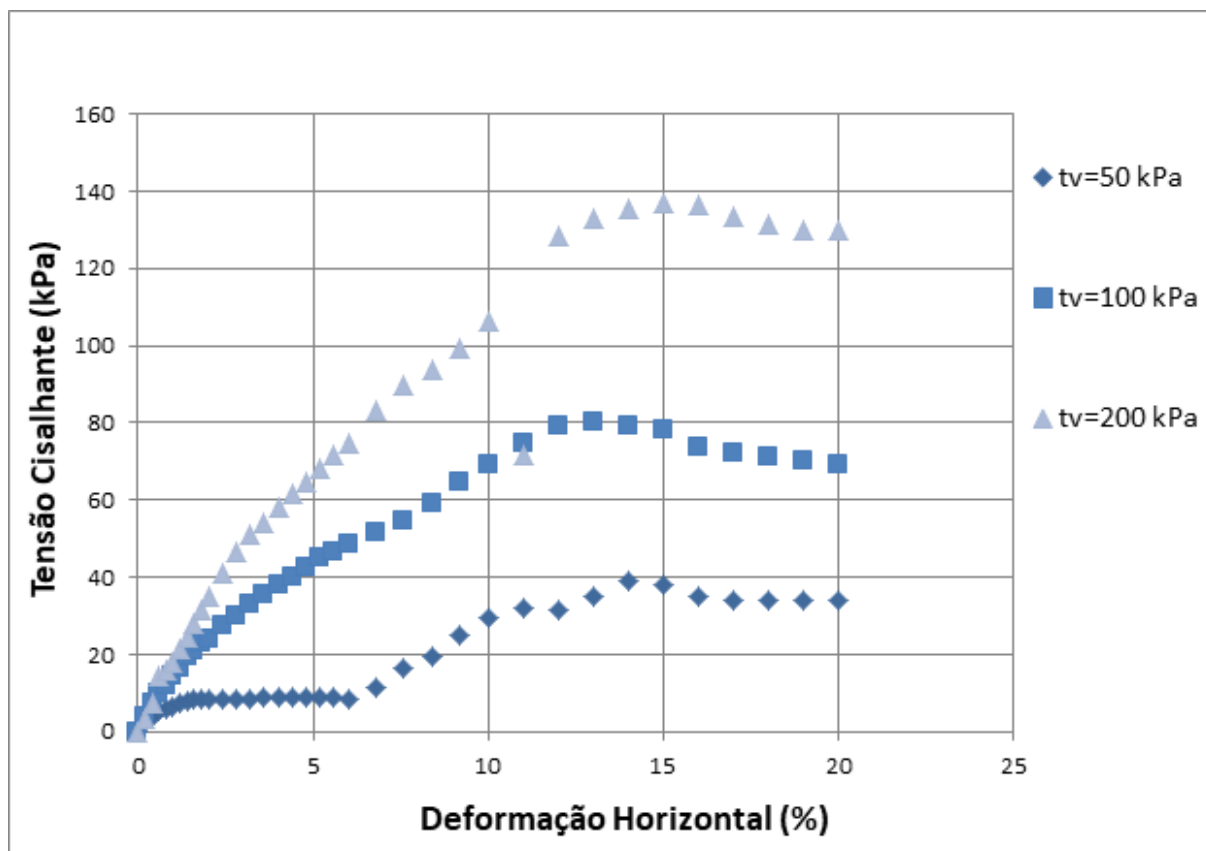
$$y' = 0,9929 + 0 = 0,9929$$

$\tan^{-1}(0,9929) \cong 44,79^\circ$, valor correspondente ao ângulo de atrito do solo em seu estado natural.

4.2.6 Solo Compactado na Energia Intermediária Saturado

Este solo apresentou valores de resistência cisalhante conforme a Figura 33, com a aplicação das tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.

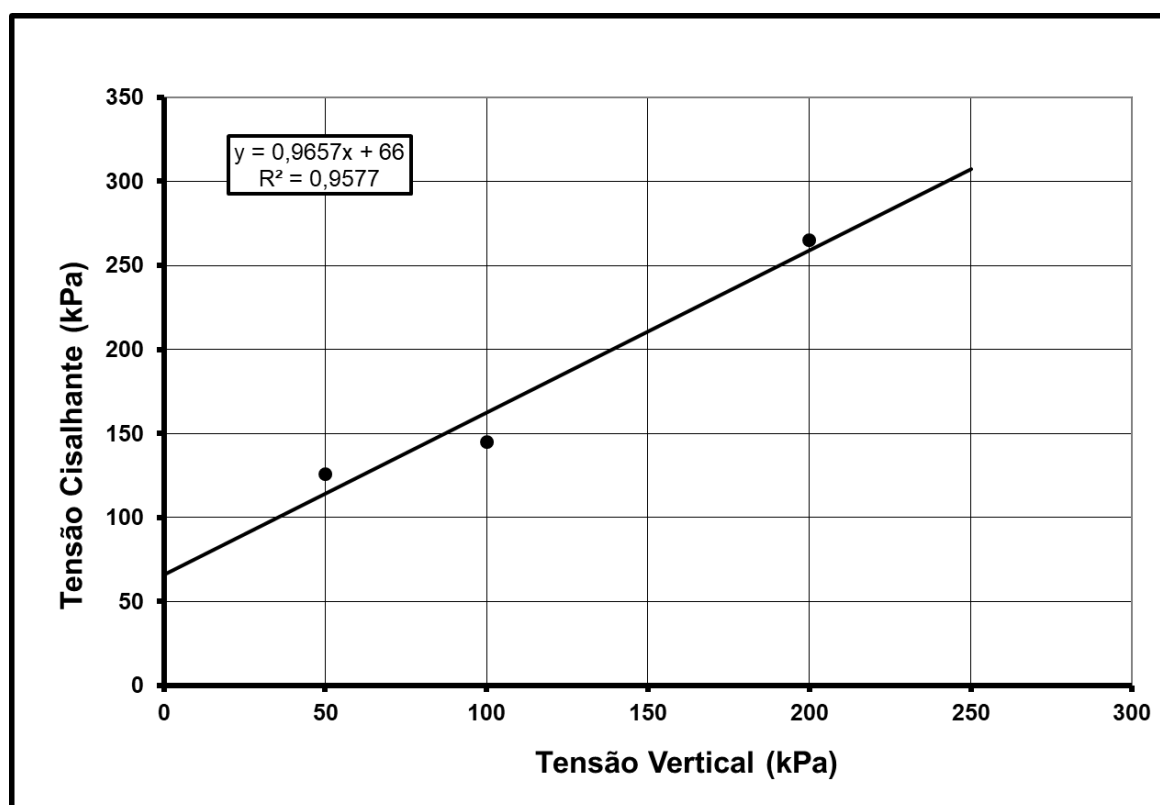
Figura 33 - Tensão Cisalhante x Deformação do Solo Compactado na Energia Intermediária Saturado



Fonte: Autora (2019)

Com a Figura 34 temos a relação entre a tensão cisalhante e tensão normal, que gera a envoltória de resistência, onde o ângulo desta reta é correspondente ao ângulo de atrito e a constante desta reta representa o intercepto coesivo do material.

Figura 34 - Tensão Cisalhante x Tensão Normal do Solo Compactado na Energia Intermediária Saturado



Fonte: Autora (2019)

A equação 17 representa a envoltória de resistência para o solo em seu estado natural e, para obtenção do parâmetro do intercepto coesivo o valor para “x” deverá ser igual à zero.

$$Y = 0,9657 x + 66 \quad (17)$$

Desta forma, para $x = 0$ temos que $y = 0,9657 \times 0 + 66 = 66$ assim o valor do intercepto coesivo (c') será aproximadamente 66 kPa. O valor do ângulo de atrito pode ser obtido pela derivada primeira que corresponde ao coeficiente angular da reta e, o arctg deste valor será a inclinação da reta (envoltória de resistência).

Deste modo:

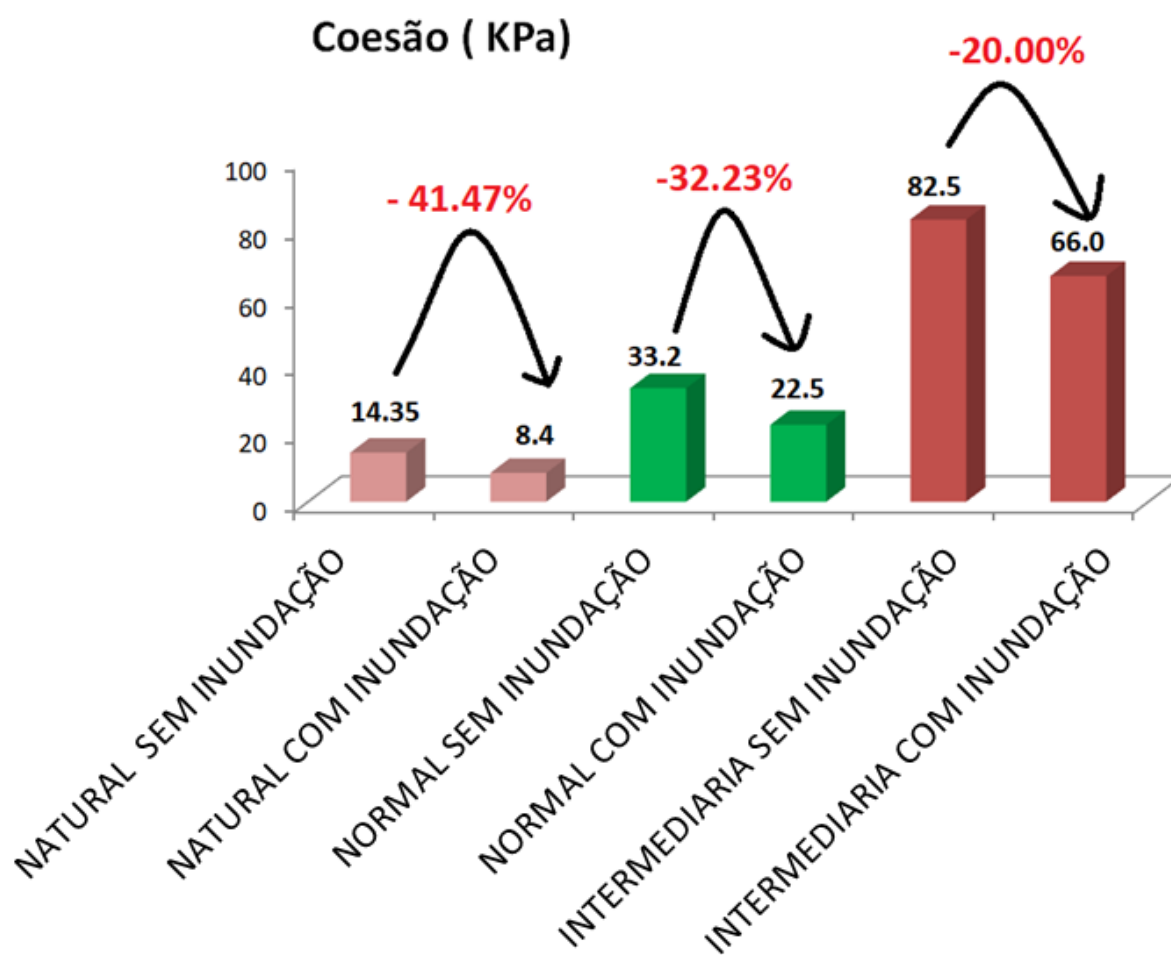
$$y' = 0,9657 + 0 = 0,9657$$

$\tan^{-1}(0,9657) \cong 44^\circ$, valor correspondente ao ângulo de atrito do solo em seu estado natural.

4.2.7 Comparação entre os resultados de tensão cisalhante, intercepto coesivo e ângulo de atrito

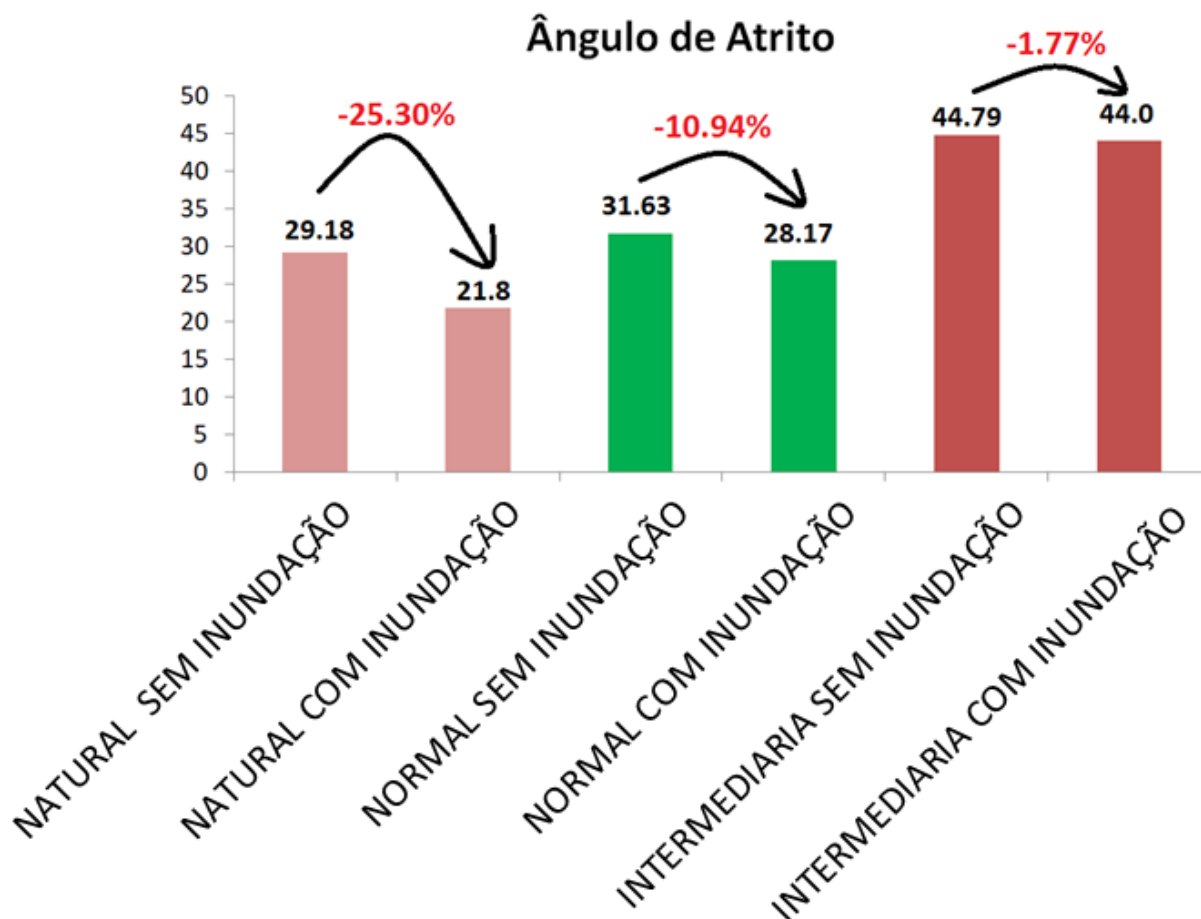
A Figura 35 mostra os valores de tensão cisalhante em função da tensão normal do solo em estudo nas seguintes condições: natural e natural saturado; compactado nas energias normal e intermediária com e sem água; e a Figura 36, mostra a comparação do ângulo de atrito das amostras.

Figura 35 – Comparação do intercepto coesivo das diferentes amostras



Fonte: Autora (2019)

Figura 36 – Comparação dos ângulos de Atrito



Fonte: Autora (2019)

A partir da análise dos gráficos acima, conclui-se que na condição mais crítica, ou seja, de saturação, o solo compactado na energia intermediária apresentou maior valor de coesão e ângulo de atrito em comparação ao solo normal e ao compactado na energia normal. Além disso, o solo compactado na energia intermediária obteve a menor perda em porcentagem na comparação entre o ensaio sem água e o realizado na condição de saturação.

Comparando a quantidade de golpes envolvida nas compactações, tem-se aumentando de 12 para 27 golpes por camadas, há um ganho de 43.5 KPa na coesão e um aumento de 56.2 % no ângulo de atrito. O elemento crucial para a escolha do solo a ser usado é o fator de segurança gerado a partir destes parâmetros, o que será visto no capítulo seguinte.

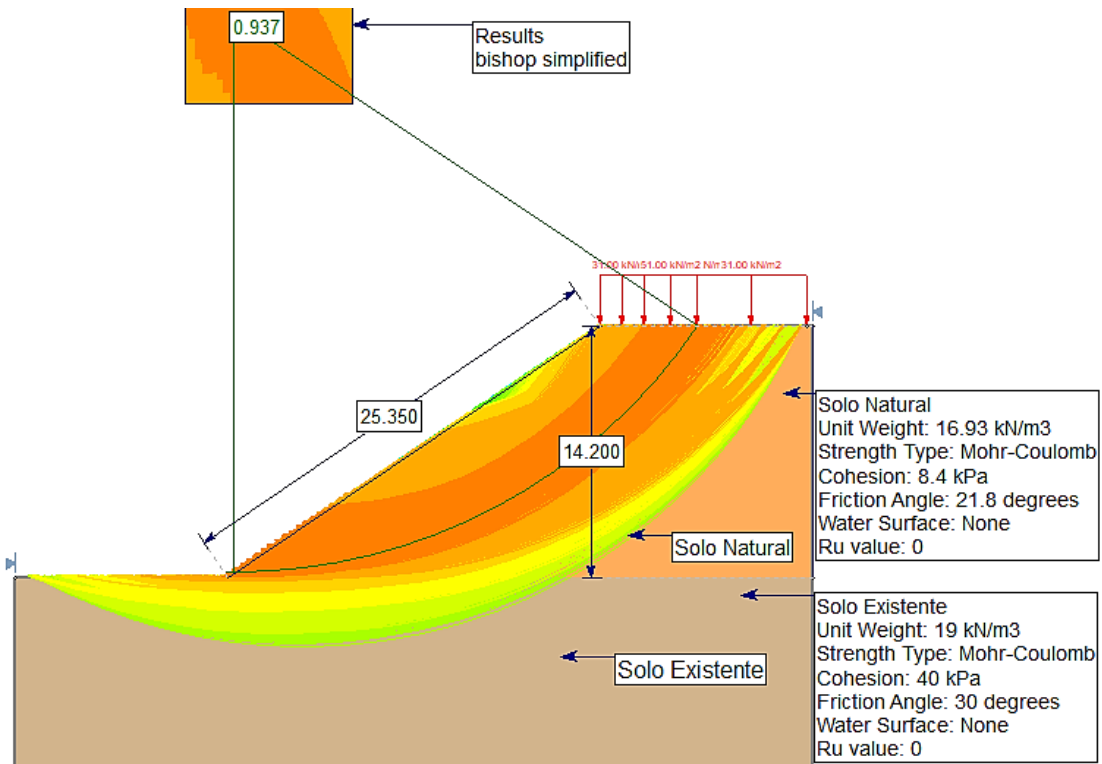
4.3 ESTABILIDADE DOS TALUDES EM ESTUDO

Foi utilizado para modelagem dos taludes e obtenção dos seus respectivos fatores de segurança, parâmetros de ângulo de atrito, intercepto coesivo e peso específico resultantes dos ensaios de cisalhamento direto saturado. A estabilidade do corpo do talude foi analisada pelos três métodos descritos em 2.4, com os valores de R_u 0% e 25%, utilizando as dimensões e carregamentos do item 3.2.3.

4.3.1 Análise de Estabilidade de Taludes Naturais

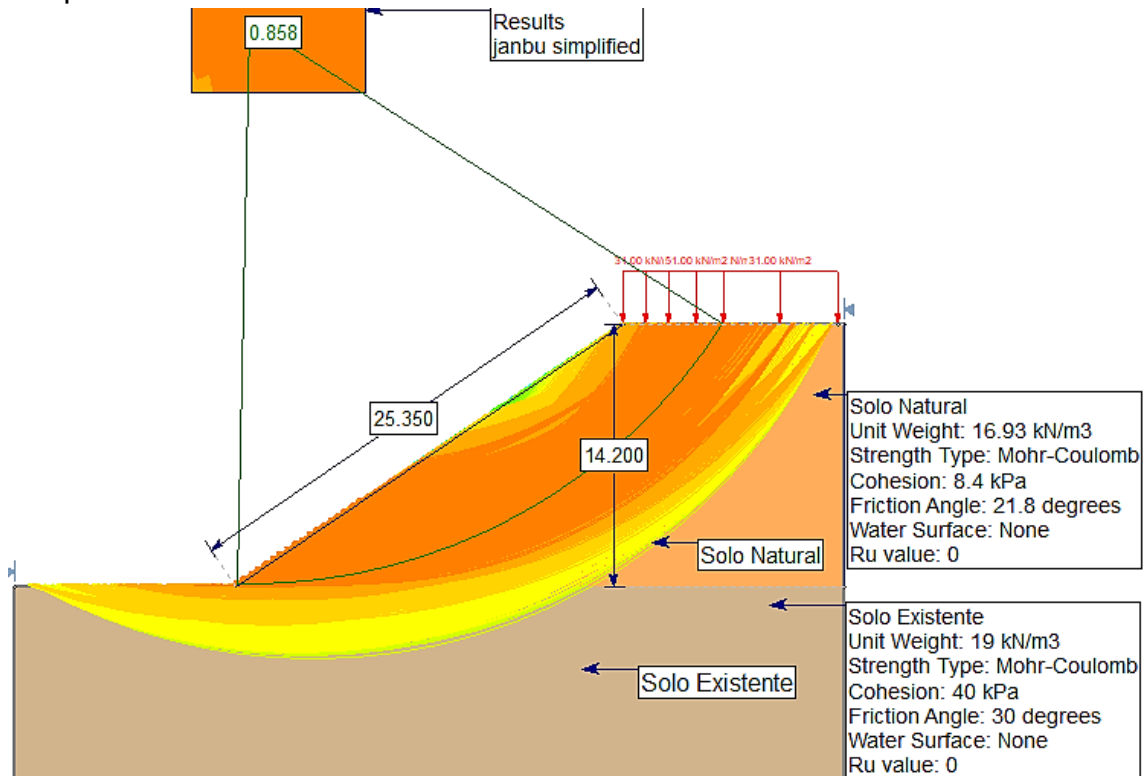
Nas Figuras 37 a 45 são apresentadas as simulações de análises de estabilidade de taludes de cortes com inclinação da ordem de 1V:1,5H para os solos naturais da região dos estudos. Nessas análises feitas a partir do programa Geo Slide, a simulação da variação da relação da pressão neutra (R_u) foi de 0 e 25%. Nessas simulações, em todas as hipóteses de cálculo, a fundação do corte (solo existente) apresenta os seguintes parâmetros: peso específico de 19 KN/m³, coesão de 40 KPa e ângulo de atrito de 30°. Já o corte propriamente dito, adota-se como parâmetro os seguintes valores: peso específico de 16,96 KN/m³, coesão de 8,4 KPa e ângulo de atrito de 21,8°.

Figura 37 – Estabilidade Solo Natural com Ru igual a 0%, pelo método de Bishop Simplificado



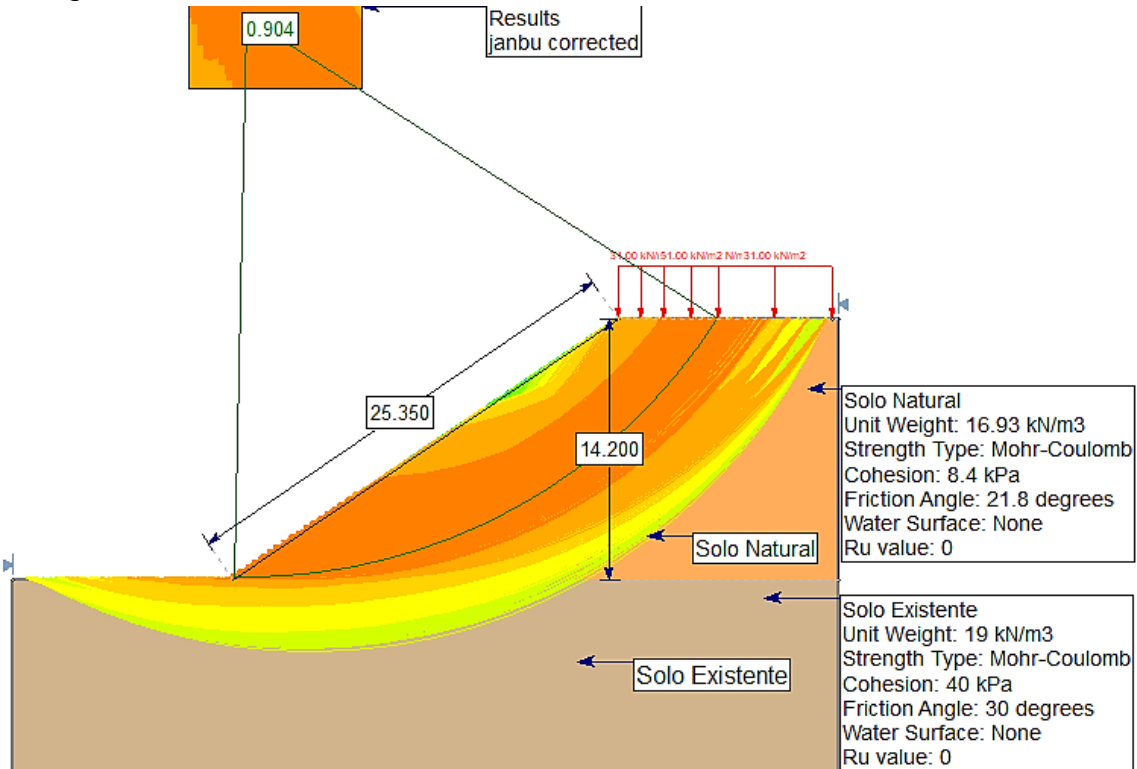
Fonte: Autora (2019)

Figura 38 – Estabilidade Solo Natural com Ru igual a 0%, pelo método de Janbu Simplificado



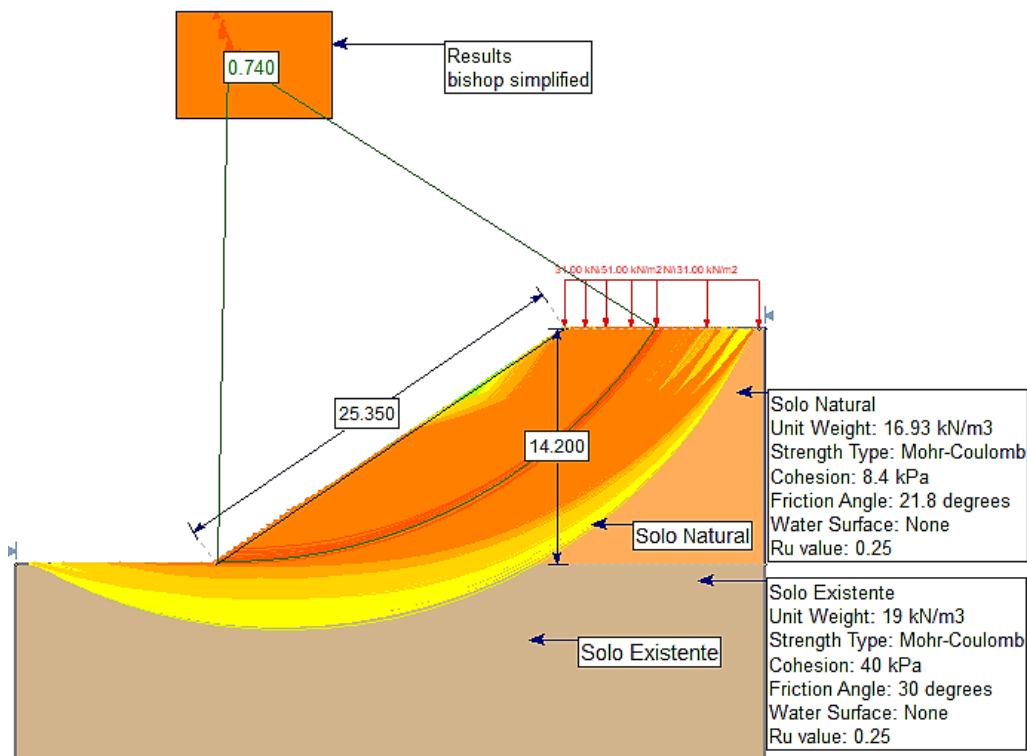
Fonte: Autora (2019)

Figura 39 – Estabilidade do Solo Natural com Ru igual a 0%, pelo método de Janbu Corrigido



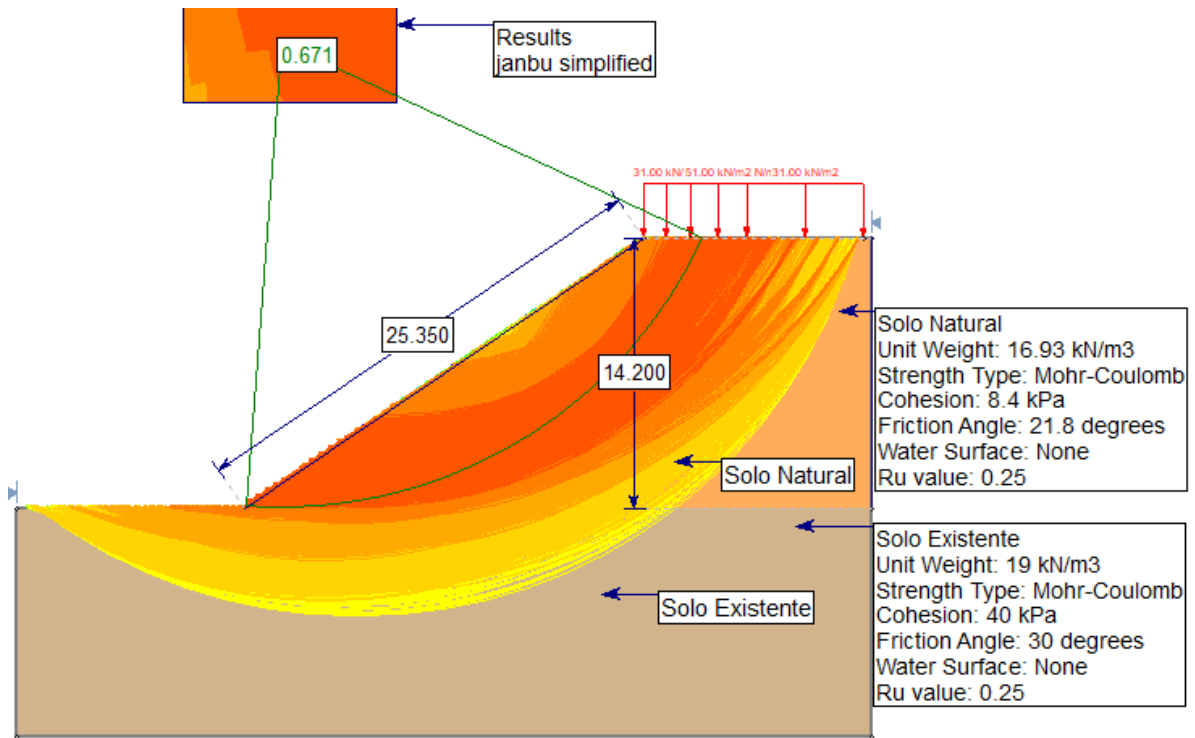
Fonte: Autora (2019)

Figura 40 – Estabilidade Solo Natural com Ru igual a 25%, pelo método de Bishop Simplificado



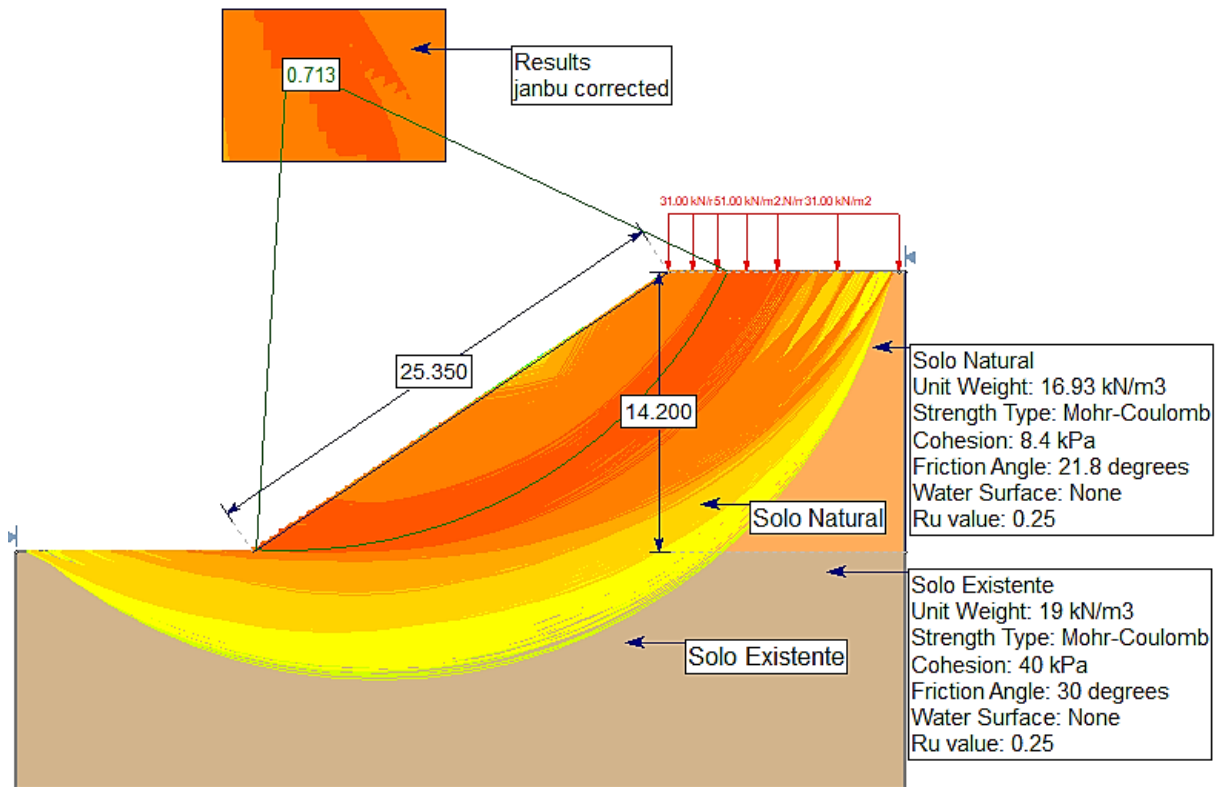
Fonte: Autora (2019)

Figura 41 – Estabilidade Solo Natural com Ru igual a 25%, pelo método de Janbu Simplificado



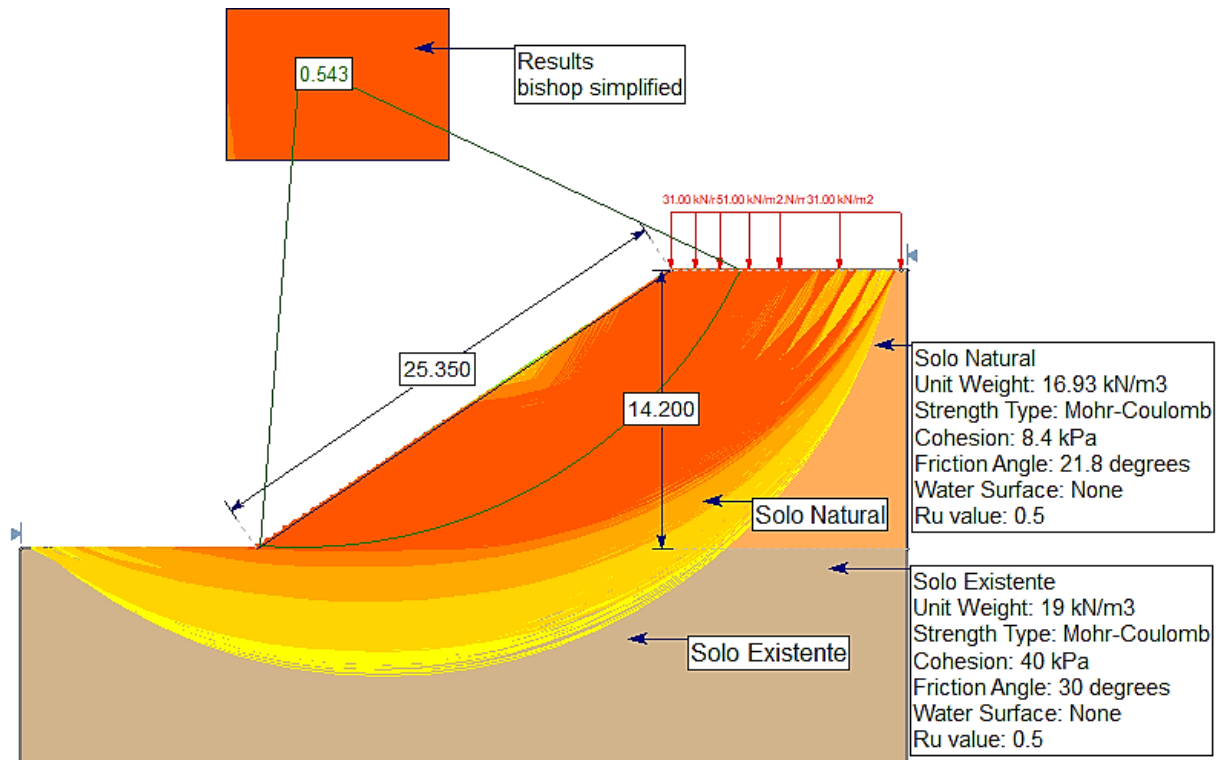
Fonte: Autora (2019)

Figura 42 – Estabilidade Solo Natural com Ru igual a 25%, pelo método de Janbu Corrigido



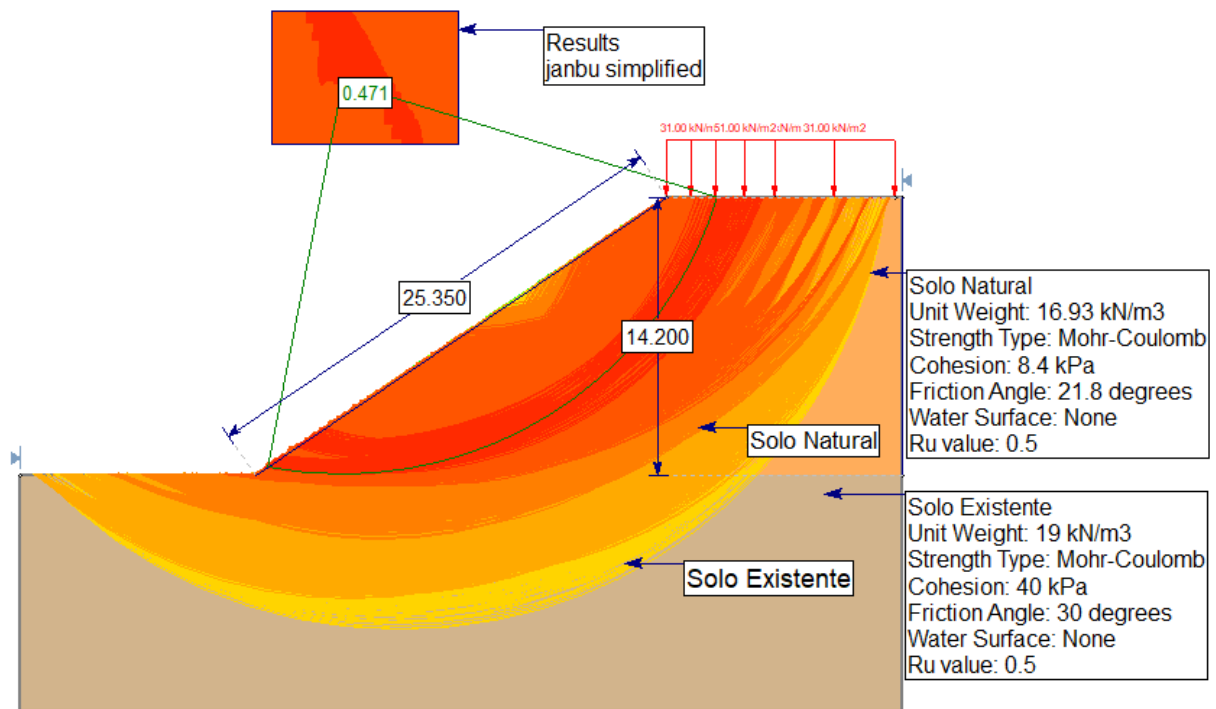
Fonte: Autora (2019)

Figura 43 – Estabilidade Solo Natural com Ru igual a 50%, pelo método de Bishop Simplificado



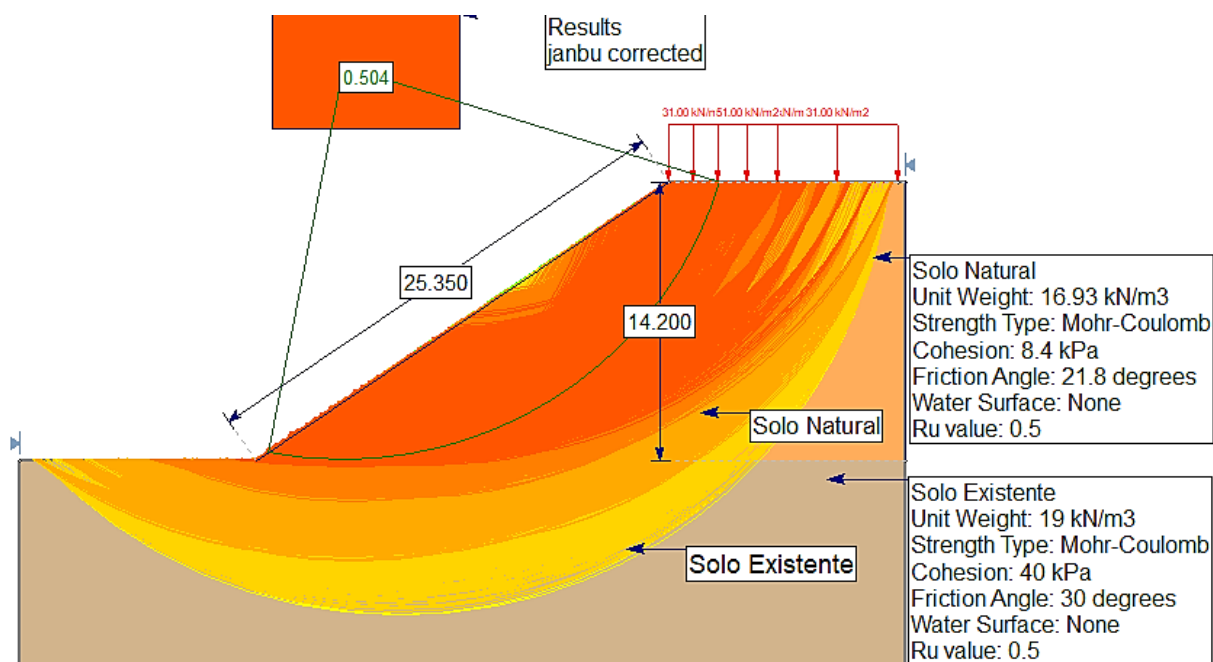
Fonte: Autora (2019)

Figura 44 – Estabilidade Solo Natural com Ru igual a 50%, pelo método de Janbu Simplificado



Fonte: Autora (2019)

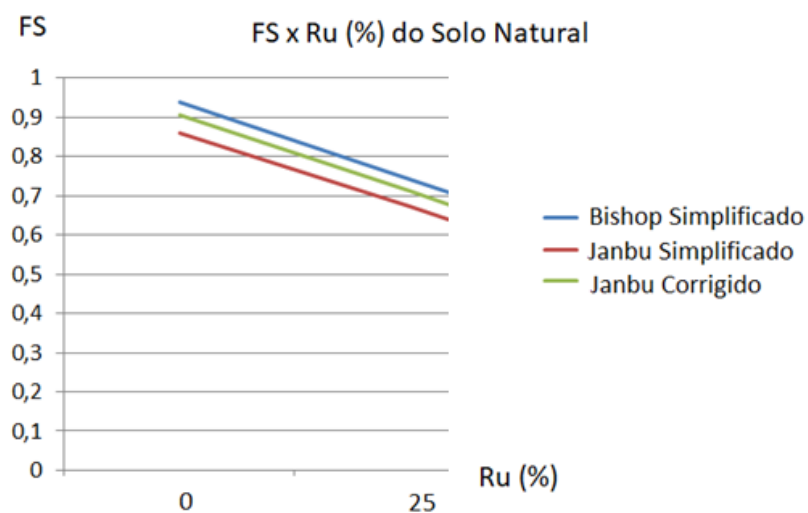
Figura 45 – Estabilidade Solo Natural com Ru igual a 50%, pelo método de Janbu Corrigido



Fonte: Autora (2019)

Quando o solo passa para uma condição de saturação de 0% para 25%, o fator de segurança cai em média 22%, chegando a atingir o valor de 0.671 pelo método de Janbu simplificado, valor três vezes menor que o mínimo para a segurança do projeto nas condições apresentadas. Os valores resultantes no fator de segurança para o solo em estado natural, representados na Figura 46, demonstram a fragilidade do solo e sua impossibilidade de utilização no projeto.

Figura 46 – Comparação dos fatores de segurança obtidos para o solo natural



Fonte: Autora (2019)

O gráfico ressalta a hierarquia dos resultados, apresentando em ordem decrescentes para o fator de segurança, na ordem: Bishop Simplificado, Janbu Corrigido e por fim, Janbu Simplificado, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Resumo dos fatores de segurança obtidos para o solo natural

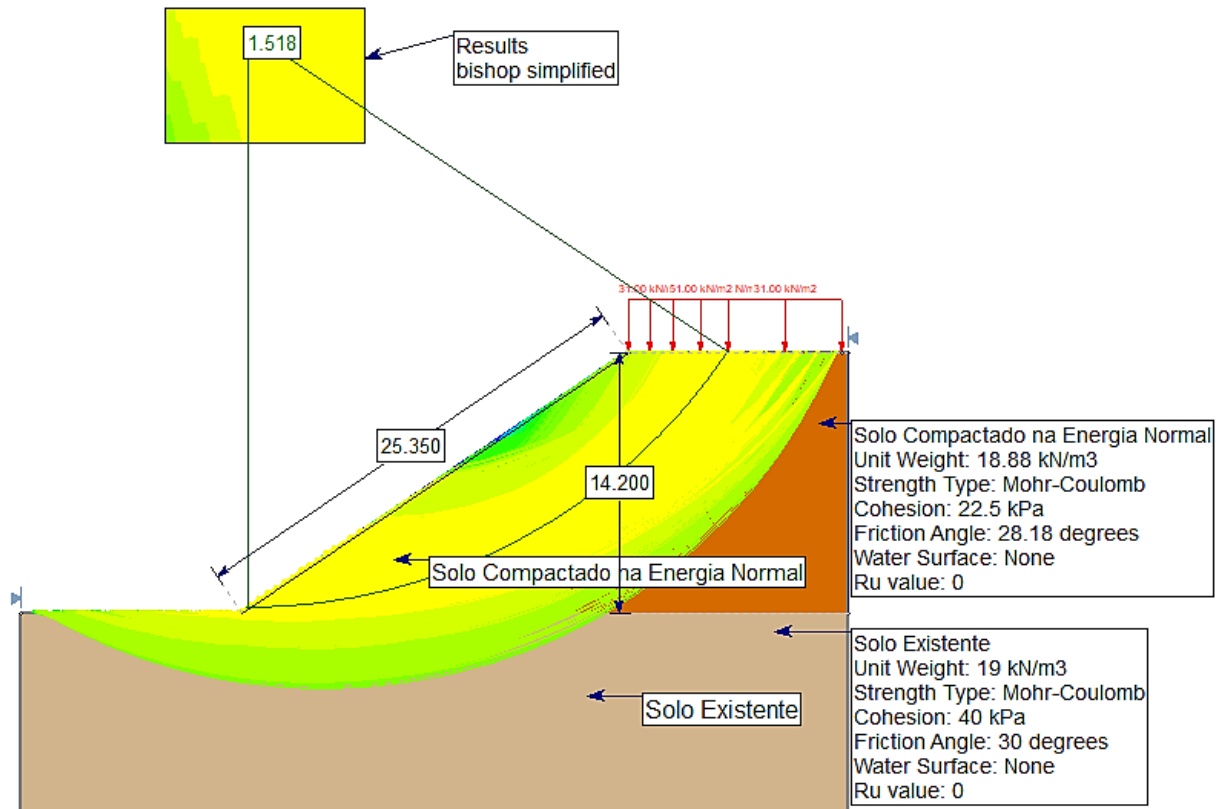
| | Bishop Simplificado | Janbu Simplificado | Janbu Corrigido |
|-----|---------------------|--------------------|-----------------|
| 0% | 0,937 | 0,858 | 0,904 |
| 25% | 0,74 | 0,671 | 0,713 |

Fonte: Autora (2019)

4.3.2 Análise de Estabilidade de Taludes Compactados na Energia Normal

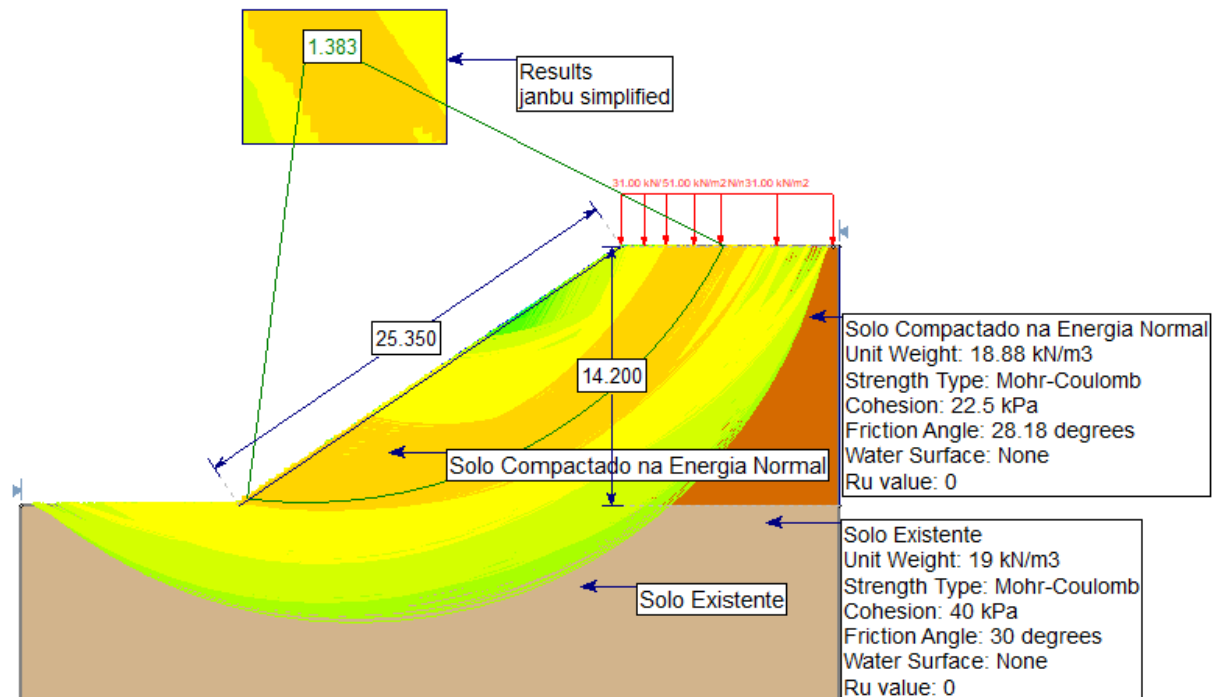
Nas Figuras 47 a 52 são apresentadas as simulações de análises de estabilidade de taludes de cortes do mesmo modelo dos anteriores, o que difere são os parâmetros do solo de corte propriamente dito, que adota-se como parâmetro os seguintes valores: peso específico de 18,88 KN/m³, coesão de 22,5 KPa e ângulo de atrito de 28,18°.

Figura 47 - Estabilidade do Solo Compactado na Energia Normal com Ru igual a 0%, pelo método de Bishop Simplificado



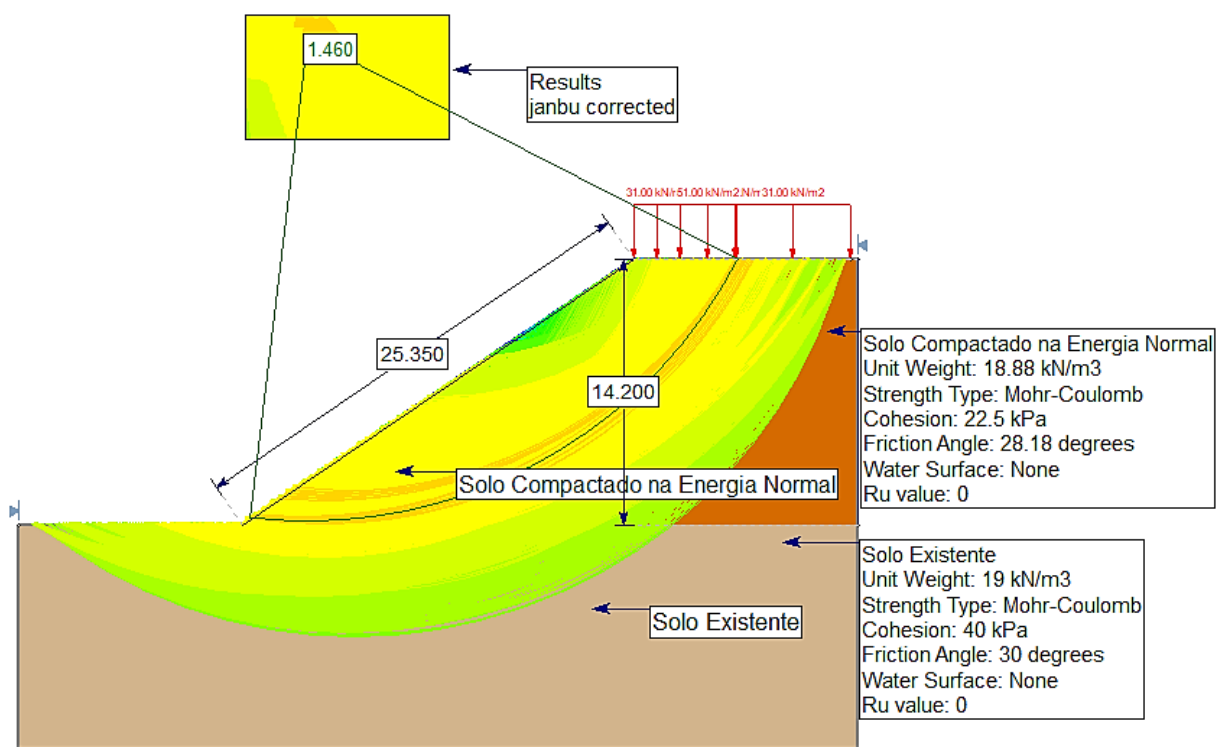
Fonte: Autora (2019)

Figura 48 - Estabilidade do Solo Compactado na Energia Normal com Ru igual a 0%, pelo método de Janbu Simplificado



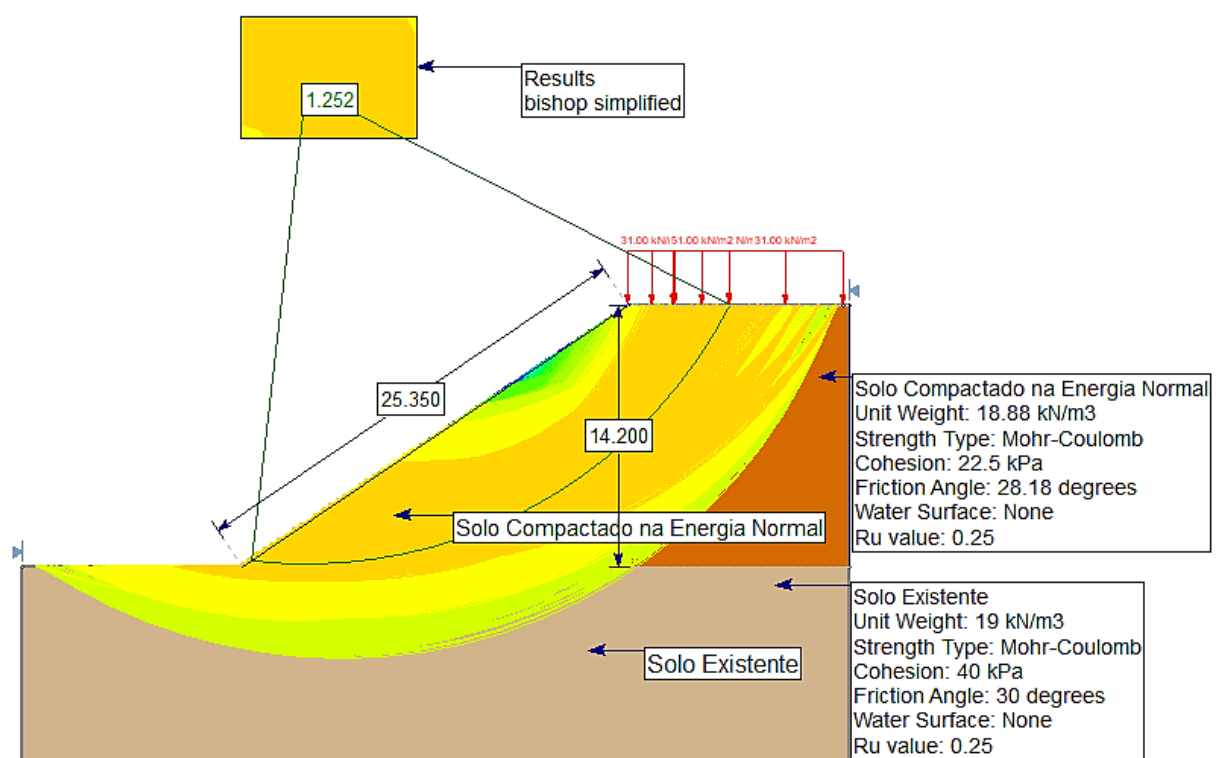
Fonte: Autora (2019)

Figura 49 - Estabilidade do Solo Compactado na Energia Normal com R_u igual a 0%, pelo método de Janbu Corrigido



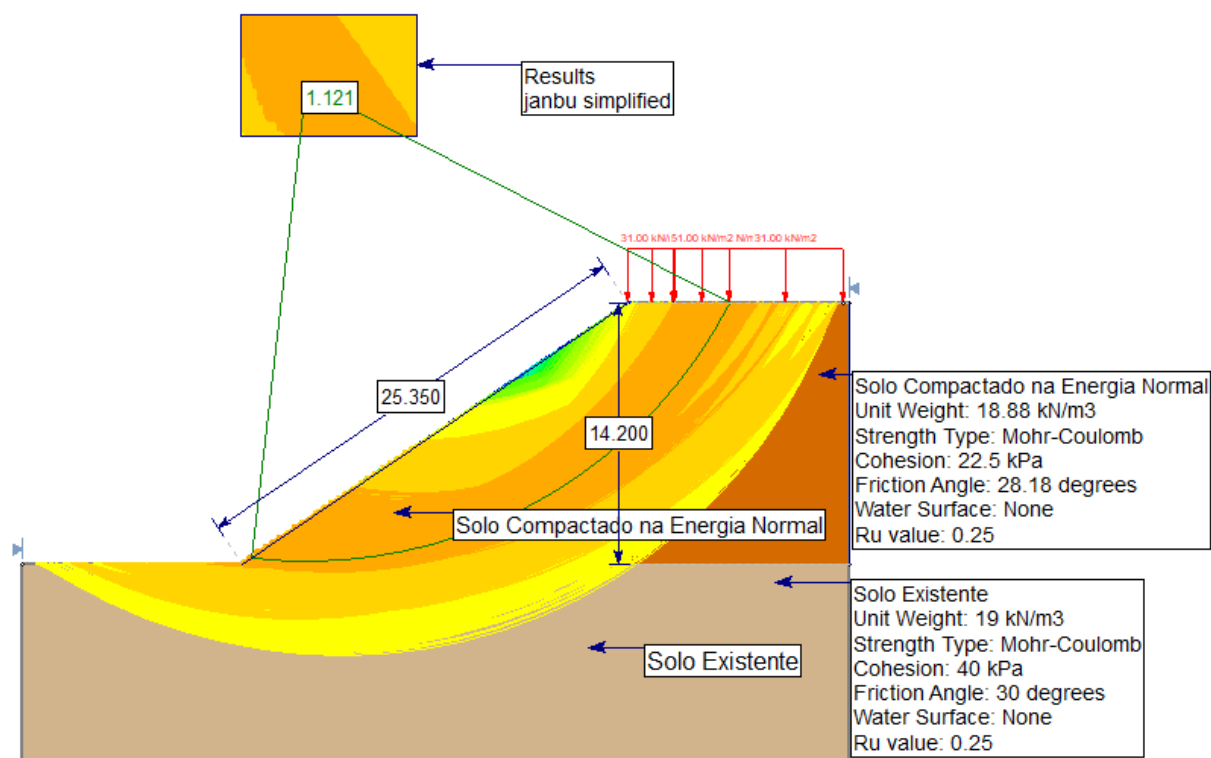
Fonte: Autora (2019)

Figura 50 - Estabilidade do Solo Compactado na Energia Normal com R_u igual a 25%, pelo método de Bishop Simplificado



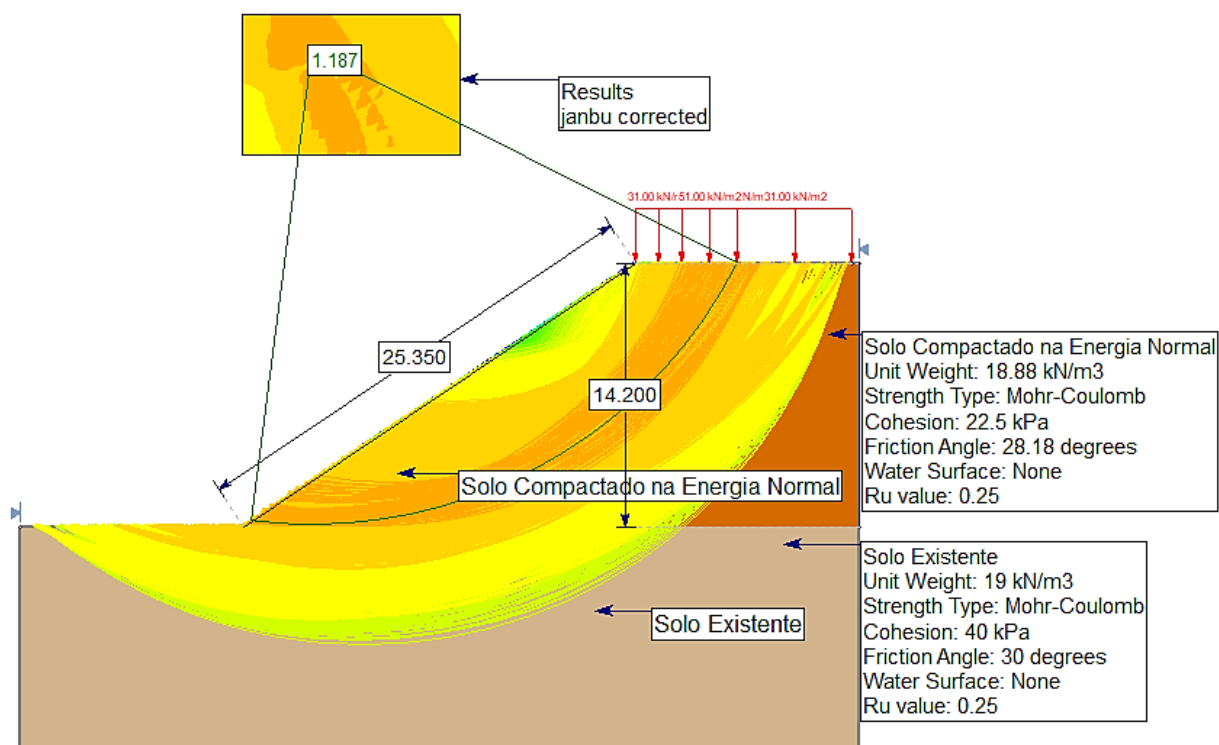
Fonte: Autora (2019)

Figura 51 - Estabilidade do Solo Compactado na Energia Normal com R_u igual a 25%, pelo método de Janbu Simplificado



Fonte: Autora (2019)

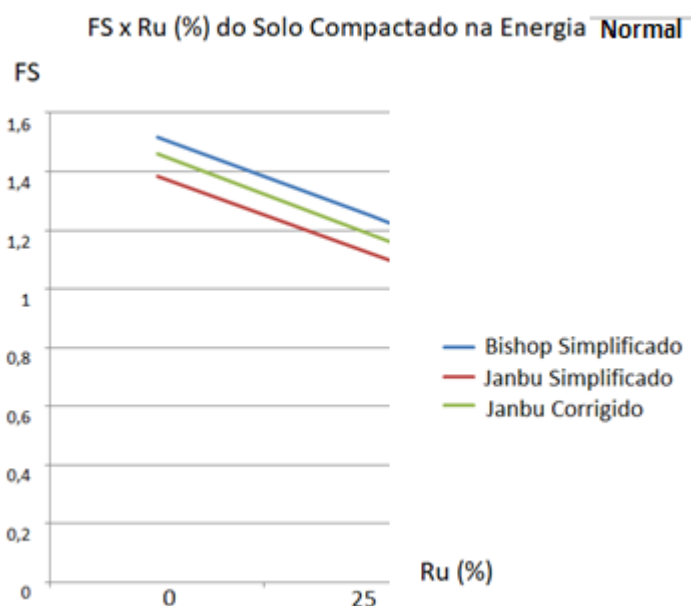
Figura 52 - Estabilidade do Solo Compactado na Energia Normal com R_u igual a 25%, pelo método de Janbu Corrigido



Fonte: Autora (2019)

Os valores resultantes no fator de segurança para o solo compactado nesta energia, representados na Figura 53, expõe a impossibilidade de uso do mesmo para este projeto, visto que só se mostrou apta a primeira simulação com Ru do solo igual a zero e pelo método de Bishop Simplificado. Quando o solo passa para uma condição de saturação de 0% para 25%, o fator de segurança cai em média 23%, chegando a atingir o valor de 1,121 pelo método de Janbu simplificado, atingindo quase 25% do valor mínimo para a segurança do projeto nas condições estabelecidas.

Figura 53 - Comparação dos fatores de segurança obtidos para o Solo Compactado na Energia Normal



Fonte: Autora (2019)

O gráfico mostra em ordem decrescentes para o fator de segurança, na ordem: Bishop Simplificado, Janbu Corrigido e por fim, Janbu Simplificado como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo dos fatores de segurança obtidos para o solo natural

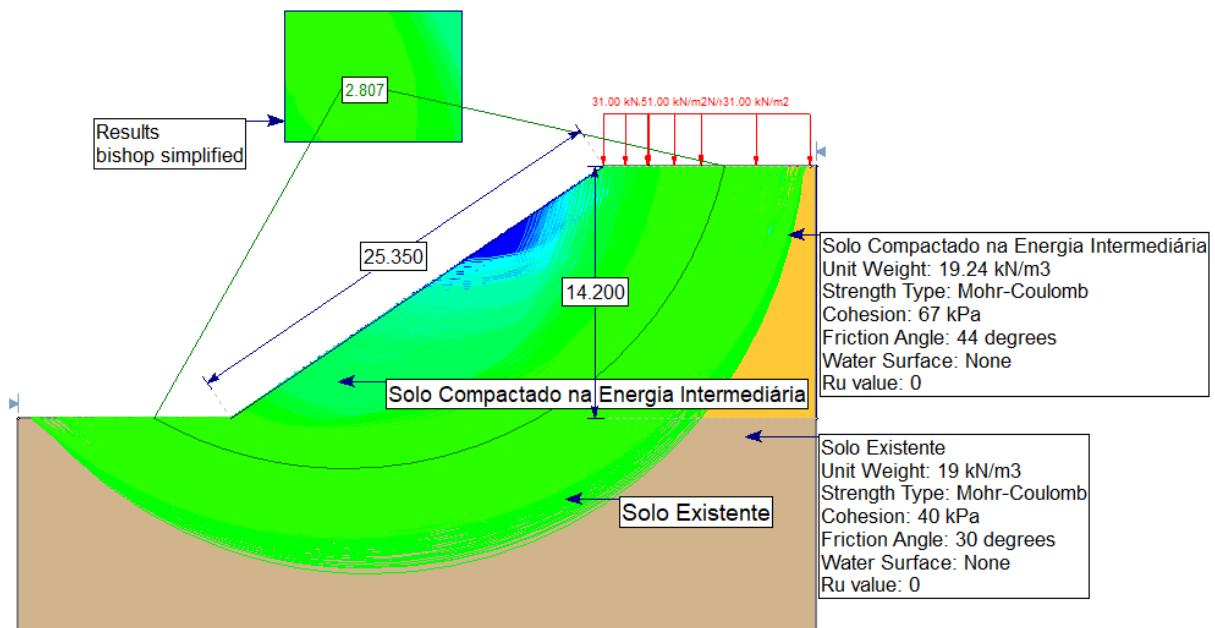
| | Bishop Simplificado | Janbu Simplificado | Janbu Corrigido |
|-----|---------------------|--------------------|-----------------|
| 0% | 1,518 | 1,383 | 1,46 |
| 25% | 1,252 | 1,121 | 1,187 |

Fonte: Autora (2019)

4.3.3 Análise de Estabilidade de Taludes Compactados na Energia Intermediária

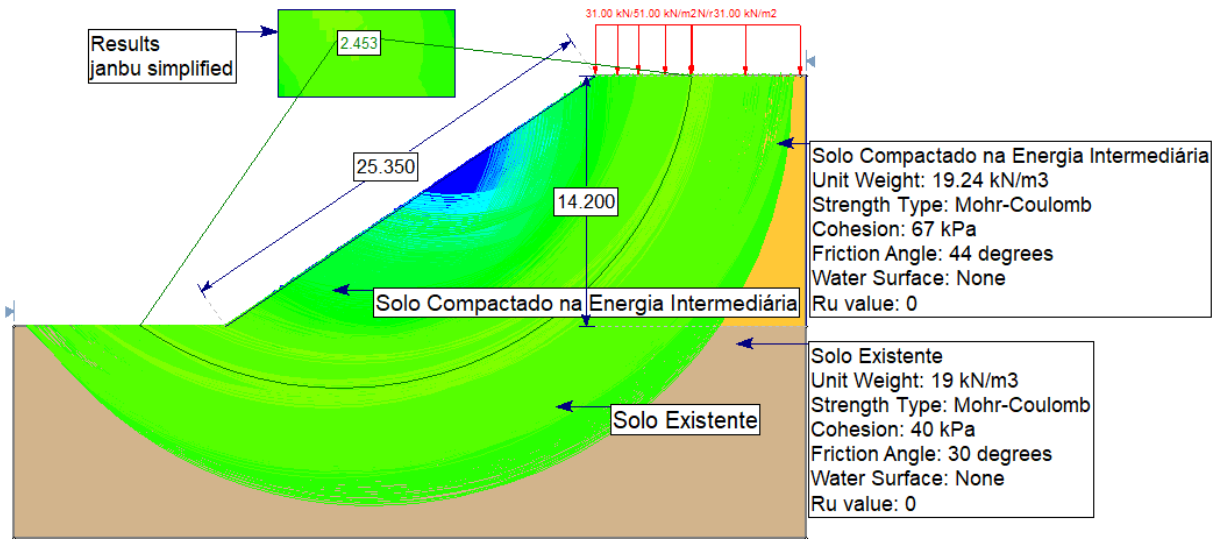
Nas Figuras 54 a 59 são apresentadas as simulações de análises de estabilidade de taludes de cortes do mesmo modelo dos anteriores, o que difere são os parâmetros do solo de corte propriamente dito, que se adota como parâmetro os seguintes valores: peso específico de 19,24 KN/m³, coesão de 67 KPa e ângulo de atrito de 44°.

Figura 54 - Estabilidade do Solo Compactado na Energia Intermediária com Ru igual a 0%, pelo método de Bishop Simplificado



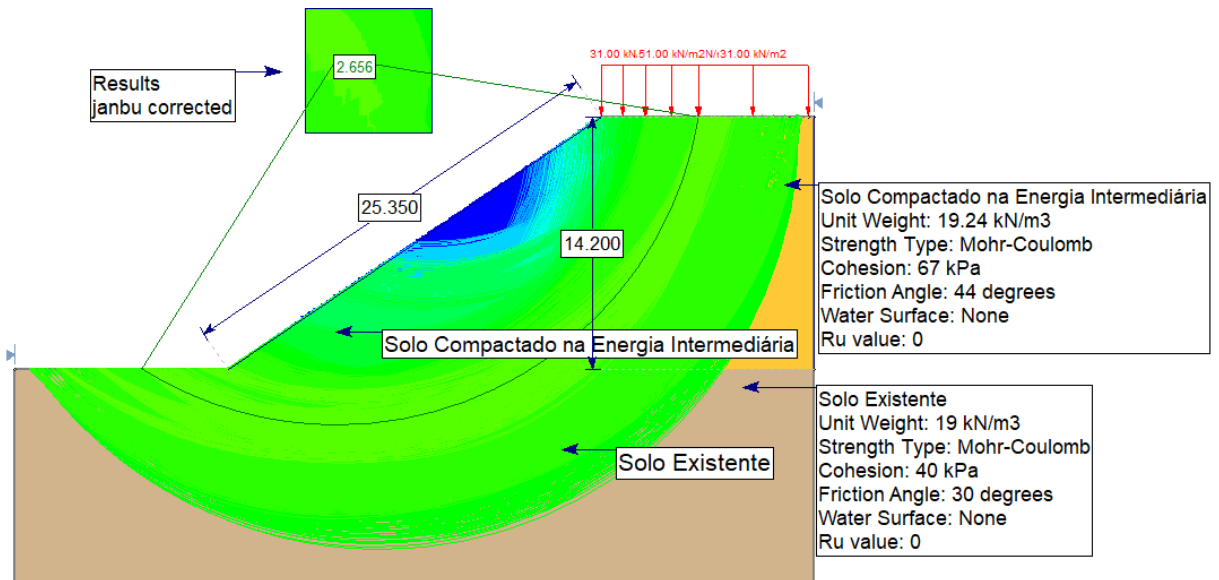
Fonte: Autora (2019)

Figura 55 - Estabilidade do Solo Compactado na Energia Intermediária com Ru igual a 0%, pelo método de Janbu Simplificado



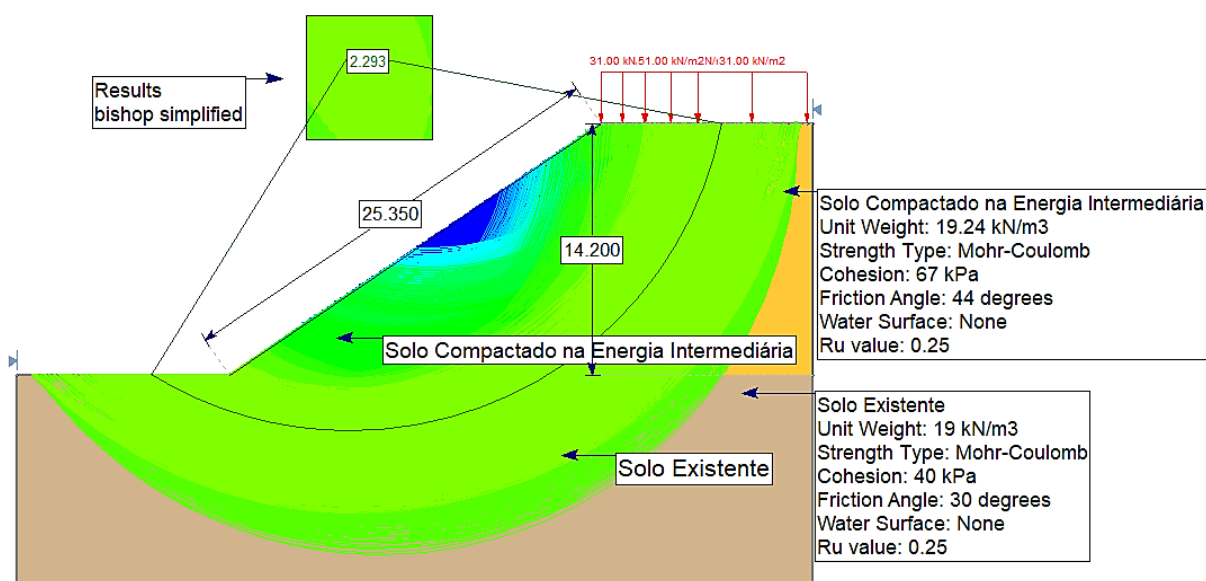
Fonte: Autora (2019)

Figura 56 - Estabilidade do Solo Compactado na Energia Intermediária com Ru igual a 0%, pelo método de Janbu Corrigido



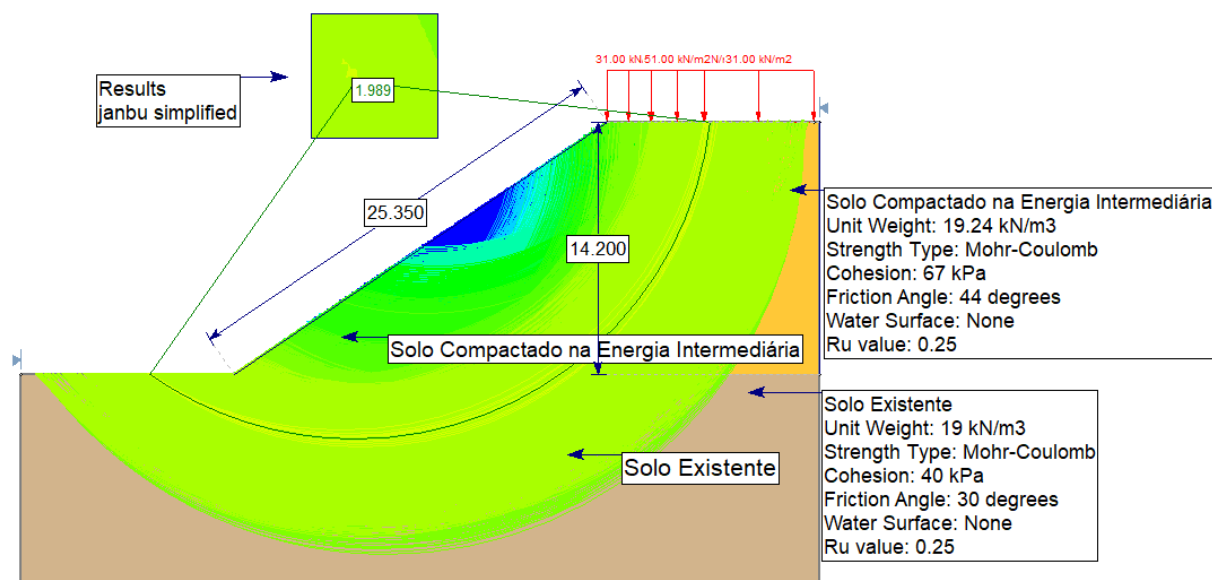
Fonte: Autora (2019)

Figura 57 - Estabilidade do Solo Compactado na Energia Intermediária com Ru igual a 25%, pelo método de Bishop Simplificado



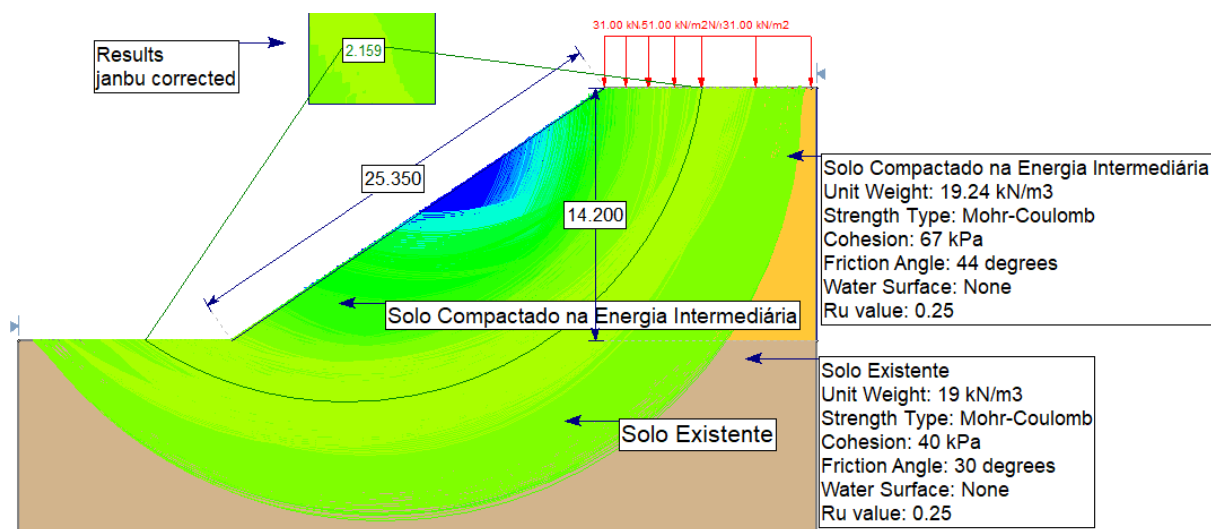
Fonte: Autora (2019)

Figura 58 - Estabilidade do Solo Compactado na Energia Intermediária com Ru igual a 25%, pelo método de Janbu Simplificado



Fonte: Autora (2019)

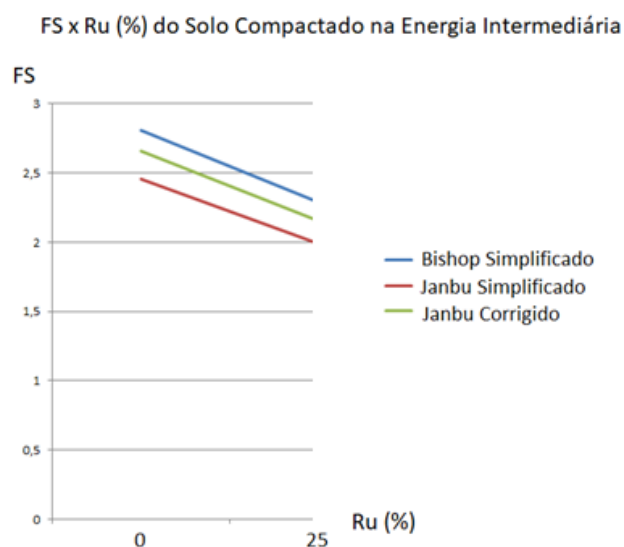
Figura 59 - Estabilidade do Solo Compactado na Energia Intermediária com Ru igual a 25%, pelo método de Janbu Corrigido



Fonte: Autora (2019)

Os valores resultantes no fator de segurança para o solo compactado nesta energia, representados na Figura 60, evidencia a possibilidade de uso do mesmo para este projeto, pois encontram-se todos acima de 1.5, portanto atende o FS mínimo para a segurança do Talude. Quando o solo passa para uma condição de saturação de 0% para 25%, o fator de segurança cai em média 17%, chegando a atingir o valor de 1,989 pelo método de Janbu simplificado, que foi o método resultante em menores fatores de segurança.

Figura 60 - Comparação dos fatores de segurança obtidos para o Solo Compactado na Energia Intermediária



Fonte: Autora (2019)

O gráfico enfatiza a ordem dos resultados, apresentando em ordem decrescente para o fator de segurança, na ordem: Bishop Simplificado, Janbu Corrigido e por fim, Janbu Simplificado, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 – Resumo dos fatores de segurança obtidos para o solo natural

| | Bishop Simplificado | Janbu Simplificado | Janbu Corrigido |
|-----|---------------------|--------------------|-----------------|
| 0% | 2,807 | 2,453 | 2,656 |
| 25% | 2,293 | 1,989 | 2,159 |

Fonte: Autora (2019)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme a metodologia utilizada e sob as condições em que o trabalho foi realizado se pode concluir que o solo do local no estado natural, não apresenta condições requeridas para a obra, sendo a compactação o método de estabilização escolhido para este trabalho, utilizando-se das energias normal e intermediária. Estas influenciam parâmetros como coesão, ângulo de atrito e peso específico, valores obtidos através do ensaio de cisalhamento direto. À medida que a energia de compactação aumenta, além de reduzir significativamente a diferença dos valores de coesão e ângulo de atrito para a condição natural e de saturação, há uma redução de 1.73% do teor de umidade ótimo bem como uma elevação de 15.35% do valor do peso específico seco máximo. Estas modificações acarretam em valores para os parâmetros de coesão e ângulo de atrito de respectivamente, 66 KPa e 44°, na condição de saturação para a compactação na energia intermediária, tornando este solo seguro para a construção do talude em estudo.

As cargas externas aplicadas são de grande importância para a simulação da utilização do talude, porém as simulações foram realizadas também sem elas e a diferença no fator de segurança não foi determinante para atingir o FS mínimo.

A elevação do nível d'água provoca aumento das pressões neutras, reduzindo as tensões normais efetivas e a resistência ao cisalhamento, podendo levar o talude à ruptura. Quando o R_u passa de 0% para 25% em ambas as energias, a redução do fator de segurança foi de 23% e 17% na energia normal e intermediária respectivamente. Considerando o pior caso de saturação em 25%, o solo compactado na energia normal não se mostrou suficiente seguro para sua utilização. Para a compactação na energia intermediária, o mesmo apresentou fatores de segurança maiores que 1.5, atendendo as exigências normativas e, portanto, não foram necessários os ensaios na energia modificada. Em todas as simulações o valor do fator de segurança em ordem crescente por método foi Janbu Simplificado, Janbu Corrigido e Bishop Simplificado. Com a diferença de aproximadamente 15% entre o maior e o menor FS, apenas na energia normal com R_u igual a 0% (sem pressão neutra) pelo método de Bishop Simplificado que o solo atingiu o FS mínimo, que teria dado diferença de aceitação entre os métodos. Em todas as outras simulações a diferença entre eles foi irrelevante.

Para este tipo de solo, taludes mais altos e mais íngremes são menos seguros, porém como sua geometria não pode ser alterada, a solução para sua estabilização é aumentar a resistência do solo através da energia de compactação intermediária ou abater os taludes ou buscar alternativas de projeto com tratamento com solo reforçado e melhoria das condições das fundações dos taludes de aterro.

Por fim, destaca-se que as simulações de cálculo de estabilidade de taludes e as determinações dos fatores de segurança analisados não tem nenhuma relação com as obras que estão em andamento no município de Cruz Alta, visto que não guardam relação com as condições geológico-geotécnicas dos terrenos de fundação dos aterros, sistemas de drenagem (internos e superficiais) e com os demais elementos técnicos básicos de um projeto executivo de um caso real.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7187**: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido - Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188**: Carga móvel rodoviária e de pedestre em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 2013.

BARBOSA, Carla Alexandra Fernandes. **Soluções para Estabilização de Taludes Sujeitos a Erosão Superficial**. Dissertação de mestrado. Universidade de Aveiro, 2008.

BISHOP, A. W. . **Test requirements for measuring the Coefficient of Earth Pressure at Rest**. In: CONFERENCE ON EARTH PRESSURE PROBLEMS. 1958, Proceedings, Brussels, Belgium, 1958. 2-14 p.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos**. Rio de Janeiro, RJ: Editora Livros Técnicos e Científicos S.S, v. 1, 1975.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**: Mecânica das Rochas – Fundações – Obras de Terra. 6. ed. Rio de Janeiro : LCT, v. 2, 2008.

CRAIG, Robert F. **Mecânica dos Solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 390 p.

FRANÇA, Fabrício Carlos. **Estabilização Química de Solos para Fins Rodoviários**: Estudo de Caso com o Produto “RBI Grade 81”. Minas Gerais, f. 104. Dissertação (Mestrado) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, 2003.

FREITAS, M.A.C. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos métodos de Morgenstern-Price e Correia**. Porto, Portugal, 2010. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

GERSCOVICH, Denise M. S. **Estabilidade de Taludes**: com exercícios resolvidos. 2. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2016. 192 p.

GOMES, Romero César. Método das Fatias das Análises de Estabilidade: Notas de aula Obras de Terra - Aula 03. **Academia.Edu**. Ouro Preto, MG. 27 p. Disponível em:

<https://www.academia.edu/15861202/Aula_3_M%C3%A9todo_das_Fatias_das_An

%C3%A1lises_de_Estabilidade_CIV_247_OBRAS_DE_TERRA_Prof._Romero_C%C3%A9sar_Gomes>. Acesso em: 18 mai. 2019.

JANBU, N. **Application of composite slip surfaces for stability analysis**. In: EUROPEAN CONF. ON STABILITY OF EARTH SLOPES. Stockholm Discussion 3. 1954.

JANBU, N. **Earth pressure and bearing capacity calculation by generalized procedure of slices**. In: INT. CONF. ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 4. London, n. 2, p. 207-212, 1957.

MASSAD, Façal. **Obras de Terra: curso básico de geotecnia - com exercícios resolvidos**. 2. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

MCKYES, E. ; NYAMUGAFATA, P. ; NYAMAPFENE, K.W. . **Characterization of cohesion, friction and sensitivity of two hardsetting soils from Zimbabwe**: Soil Till. Res: 29:357-366, 1994.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos S.A, 2007. 391 p.

PASCOAL, Paula Taiane. **Avaliação da Capacidade Resiliente e Deformação Permanente de Solos Utilizados em Subleito de Pavimentos do Rio Grande do Sul**. Santa Maria, RS. 77 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, 2020 (a ser publicado).

PIMENTA, Carlos R. T; OLIVEIRA, Márcio P. **Projeto Geométrico de Rodovias** . 2. ed. São Carlos : RiMa Editora , 2004.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 2. ed. São Paulo : Oficina de Textos, 2006.

ROCSCIENCE. **Slide**. 2013. Disponível em: <http://www.rocscience.com/products/8/Slide>. Acesso em: 20/06/2019.

SILVA, E. M. **Análise de Estabilidade de Taludes em solos de alteração de rochas metamórficas do quadrilátero ferrífero**. Minas Gerais. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, 2006.

SILVA, João Paulo Moreira da. **Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Taludes**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

SUPORTE SONDAgens E INVESTIGAÇÕES. Classificação MCT: Ensaio Geotécnicos - A Classificação de Solos Tropicais. **Suportesolos**. São Paulo / SP, 2018. 28 p. Disponível em: <<http://www.suportesolos.com.br/blog/classificacao-mct-ensaios-geotcnicos-a-classificacao-de-solos-tropicais/79/>>. Acesso em: 17 mai. 2019.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. 2. ed. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil, 1977. 509 p.