



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TÁCIO ARAÚJO SALES

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM UMA
ESCAVAÇÃO PARA EXECUÇÃO DA FUNDAÇÃO DE UM
EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS**

Palmas-TO
2025

TÁCIO ARAÚJO SALES

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM UMA
ESCAVAÇÃO PARA EXECUÇÃO DA FUNDAÇÃO DE UM
EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Civil para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Ribeiro e Souza

Palmas/TO
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- S163a Sales, Tácio Araújo.
Análise de Estabilidade de Taludes em uma Escavação para Execução da Fundação de um Edifício de Múltiplos Pavimentos. / Tácio Araújo Sales. – Palmas, TO, 2025.
68 f.
Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Civil, 2025.
Orientador: Marcus Vinicius Ribeiro e Souza
1. Geotecnia. 2. Mecânica dos Solos. 3. Análise de Estabilidade. 4. Taludes. I. Título

CDD 624

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

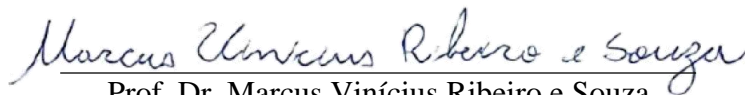
TÁCIO ARAÚJO SALES

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM UMA ESCAVAÇÃO PARA EXECUÇÃO DA FUNDAÇÃO DE UM EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS

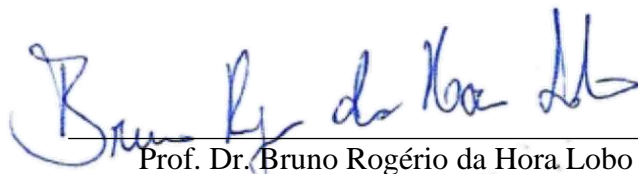
Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Civil para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 09 / 12 / 2025

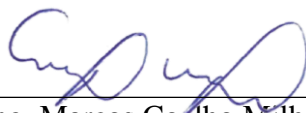
Banca Examinadora



Prof. Dr. Marcus Vinícius Ribeiro e Souza
Orientador, UFT – Universidade Federal do Tocantins



Prof. Dr. Bruno Rogério da Hora Lobo
Examinador, UFT – Universidade Federal do Tocantins



Eng. Marcos Coelho Milhomem
Examinador, GEOSLOPE GEOTECHNICS

Palmas/TO
2025

AGRADECIMENTOS

A primeira pessoa a quem dedico a conclusão dessa etapa - que sem dúvidas é uma das mais importantes da minha vida - não poderia ser outra, obrigado meu pai, José Alácio de Cerqueira Sales, você é o motivo do alcance dos meus objetivos, porque sempre me apoiou e me deu forças para continuar. Mesmo após a sua partida, você sempre estará nos nossos corações.

À minha mãe Rozilene, pelo amor de sempre, por cuidar de mim e me dar apoio nas horas mais difíceis. Agradeço às minhas irmãs, Rosana e Morgana, aos meus sobrinhos Laysa Sofhia e Ycaro José, por serem o alicerce da minha vida.

À minha namorada Gisele Sousa, por todo o amor e carinho, por me acompanhar e deixar a minha vida mais feliz e completa.

Aos professores Marcus Vinicius e Bruno Lobo, bem como o engenheiro Marcos Milhomem, pela ajuda na concretização desse trabalho e por regerem essa banca com primor.

À Universidade Federal do Tocantins e todos os professores do curso de Engenharia Civil, por terem me dado a oportunidade de seguir a jornada da graduação e cumprirem o seu dever educacional com excelência.

Aos meus amigos de infância e juventude para a vida toda, Marielto, Kauê, Marina, José Vitor, Luis Felipe e Mateus Vitor, pelo companheirismo, conversas e tantos momentos de alegria.

Aos meus colegas de curso que se tornaram amigos do peito, Caio Cardoso, Aline Freire, Reginaldo Rodrigues, Thaline Melo e Jeiel Nascimento, obrigado por estarem presentes durante essa trajetória, tornarem ela mais leve e contribuírem para que ela chegasse a um bom fim.

À Liga de Engenharia de Estruturas – Liest, pelos anos de cooperação mútua e projetos bem sucedidos.

A toda a equipe da Prumus Engenharia, por terem acreditado em mim e por terem me dado a oportunidade de participar de uma obra grandiosa como o Excalibur Residence. um ambiente riquíssimo em conhecimento e colaboração.

Sem me esquecer da OBMEP e do PIC Jr, em especial os professores Paulo Cleber e Gilmar Novaes, obrigado pelos ensinamentos e por me permitirem fazer parte da olimpíada que mudou a minha vida.

RESUMO

Este trabalho analisa a estabilidade de taludes gerados pela escavação para execução da fundação de um edifício de múltiplos pavimentos no bairro Orla 14, em Palmas-TO. Trata-se de um estudo de caso que visa avaliar os fatores de segurança durante as fases de execução da obra, considerando as características geotécnicas locais de solo arenoso com lençol freático elevado. A metodologia integrou levantamento de campo, caracterização geotécnica laboratorial do solo (ensaios de limites de Atterberg, granulometria e cisalhamento direto) e modelagem computacional por equilíbrio-limite no software GeoStudio (SLOPE/W). Foram simulados três cenários: geometria intermediária da escavação, geometria final com descontinuidade e cenário final com acréscimo de carga na crista do talude, aplicando-se os métodos de Fellenius, Bishop Simplificado e Morgenstern-Price. Os resultados dos ensaios classificaram o solo como areia siltosa (SM), com baixa coesão (1,70 kPa) e ângulo de atrito de 22,69°. As simulações indicaram fatores de segurança inferiores a 1,0 em todos os cenários e métodos, configurando condição de instabilidade e risco iminente de ruptura. Conclui-se que o talude nas configurações analisadas apresenta estabilidade crítica, necessitando de intervenções de contenção. O método de Morgenstern-Price apresentou resultados mais equilibrados, enquanto a análise comparativa reforçou a sensibilidade do maciço a variações geométricas e de carregamento, destacando a necessidade de planejamento rigoroso e monitoramento em obras semelhantes em solos granulares com presença de água.

Palavras-chaves: Estabilidade de taludes. Análise geotécnica. Escavação. Solo arenoso. Modelagem computacional.

ABSTRACT

This study investigates the slope stability conditions arising from the excavation required for the foundation of a multi-story building located in the Orla 14 district of Palmas, TO. Developed as a case study, the research evaluates safety factors throughout different construction stages, considering the geotechnical characteristics of the local sandy soil and the presence of a high water table. The methodology involved field surveys, laboratory geotechnical characterization (Atterberg limits, grain-size distribution, and direct shear tests), and limit-equilibrium computational modeling using GeoStudio (SLOPE/W). Three scenarios were simulated: an intermediate excavation geometry, a final geometry with discontinuity, and a final scenario with an additional load at the slope crest, applying Fellenius, Simplified Bishop, and Morgenstern-Price methods. Test results classified the soil as silty sand (SM), with low cohesion (1.70 kPa) and a friction angle of 22.69° . Numerical analyses indicated safety factors below 1.0 for all scenarios and methods, revealing instability and imminent failure risk. The study concludes that the slope configurations present critical stability conditions, requiring containment measures. The Morgenstern-Price method produced more balanced results, and comparative analysis highlighted the sensitivity of the soil mass to geometric and loading variations, emphasizing the need for rigorous planning and continuous monitoring in similar excavations in granular soils with groundwater presence.

Keywords: Slope stability; Geotechnical analysis; Excavation; Sandy soil; Computational modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenvolvimento do bairro Orla 14 de 2009 (A) a 2025 (B)	14
Figura 2 - Escavação do terreno	14
Figura 3 - Modelos de sapatas	18
Figura 4 - Modelos de Fundações Profundas	19
Figura 5 - Modelo da solução de radier estaqueado	20
Figura 6 - Ruptura por quedas ou desprendimentos	22
Figura 7 - Ruptura por tombamento	23
Figura 8 - Deslizamento circular de massa de solo	24
Figura 9 - Ruptura por fluxo.....	25
Figura 10 - Lamela de Fellenius	29
Figura 11 - Lamela de Bishop	30
Figura 12 - Esquema simplificado de um muro de arrimo	34
Figura 13 - Exemplo de estabilização com tela metálica e argamassa ou concreto	35
Figura 14 - Fluxograma das fases do trabalho.....	36
Figura 15 - Mapa de Situação de Palmas-TO.....	37
Figura 16 - Localização da Obra no Bairro Orla 14.....	37
Figura 17 - Escavação e taludamento	38
Figura 18 - Primeira geometria do talude	39
Figura 19 - Segunda geometria do talude	40
Figura 20 - Configuração final do talude pós escavação.....	40
Figura 21 - Extração das amostras indeformadas.....	42
Figura 22 - Amostras de solo extraídas.	43
Figura 23 - Secagem das amostras ao ar.	44
Figura 24 - Destorroamento.....	44
Figura 25 - Quarteamento.....	44
Figura 26 - Resfriamento dos picnômetros em banho de água.....	45
Figura 27 - Ensaio de LL no aparelho de Casagrande.....	46
Figura 28 - Sedimentação	47
Figura 29 - Peneiramento mecânico	47
Figura 30 - Procedimento do ensaio de LP	51
Figura 31 - Cenário de análise 1: método de Morgenstern-Price	55

Figura 32 - Cenário de análise 1: método de Bishop.....	56
Figura 33 - Cenário de análise 1: método de Fellenius	56
Figura 34 - Cenário de análise 2: método de Morgenstern-Price	57
Figura 35 - Cenário de análise 2: método de Bishop.....	57
Figura 36 - Cenário de análise 2: método de Fellenius	58
Figura 37 - Cenário de análise 3: método de Morgenstern-Price	58
Figura 38 - Cenário de análise 3: método de Bishop.....	59
Figura 39 - Cenário de análise 3: método de Fellenius	59
Quadro 1 - Etapas para Análise da Estabilidade de Taludes segundo Gerscovich (2016).....	26
Quadro 2 - Cenários de análise de estabilidade	49
Quadro 3 - Faixas de Fator de Segurança.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos	27
Tabela 2 - Resultados dos ensaios de limites de Atterbergh	52
Tabela 3 - Análise granulométrica.....	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Problema de pesquisa.....	13
1.1.1	Delimitação de Escopo	15
1.1.2	Justificativa.....	15
1.2	Objetivos.....	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	Classificação e Execução de Fundações.....	17
2.1.1	Radier estaqueado e necessidade de escavações	19
2.2	Aspectos Gerais dos Movimentos de Massa.....	21
2.2.1	Mecanismos de ruptura	21
2.2.1.1	Ruptura por quedas ou desprendimentos	21
2.2.1.2	Ruptura por tombamento.....	22
2.2.1.3	Ruptura por deslizamento.....	23
2.2.1.4	Movimentos de fluxo.....	24
2.3	Análise de Estabilidade de Talude	25
2.3.1	Etapas de Análise de estabilidade de talude	25
2.3.2	Fator de Segurança do Talude	26
2.3.3	Métodos de Análise de Estabilidade de Talude.....	28
2.3.3.1	Método de Fellenius	28
2.3.3.2	Método de Bishop Simplificado.....	29
2.3.3.3	Método de Morgenstern & Price	31
2.4	Determinação das Características dos Materiais	31
2.4.1	Coleta e preparação de amostras	31
2.4.2	Ensaio de caracterização física e granulométrica	32
2.4.3	Sondagens em campo	33
2.5	Obras de Contenção	33
3	METODOLOGIA	36
3.1	Levantamento de Dados da Obra	36
3.1.1	Localização da obra.....	36

3.1.2	Identificação do tipo de fundação executada	38
3.1.3	Definição da geometria dos taludes e cenários de análise.....	38
3.1.4	Investigação Geotécnica de Campo	41
3.2	Caracterização geotécnica do solo	41
3.2.1	Coleta e preparação das amostras.....	42
3.2.2	Ensaio laboratoriais	45
3.3	Modelagem Computacional da Estabilidade	48
3.3.1	Escolha do <i>software</i> e parâmetros	48
3.3.2	Aplicação dos métodos de equilíbrio-limite.....	49
3.3.3	Interpretação dos fatores de segurança obtidos	49
4	RESULTADOS E ANÁLISES	50
4.1	Ensaio laboratoriais.....	50
4.2	Simulações de estabilidade dos taludes no software.....	54
4.3	Análise comparativa entre métodos de equilíbrio limite	59
5	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE A – LAUDO DE SONDAAGEM.....	66

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização, a humanidade tem enfrentado o desafio de modificar e estabilizar maciços de solo para atender às necessidades de construção e desenvolvimento urbano. A ação humana sobre os solos naturais gera desafios de estabilização bastante complexos, que demandam uma abordagem integrada entre diferentes áreas do conhecimento. Embora pertença ao campo da engenharia, a Mecânica dos Solos ultrapassa os limites da mecânica pura ao incorporar fundamentos da química, da física coloidal e da geologia, essenciais para a compreensão do comportamento desses materiais. Essa complexidade se deve ao caráter particulado do solo, em que as interações entre sólidos, água e ar formam um sistema dinâmico e multifásico, distinto dos materiais sólidos convencionais.

No contexto da engenharia civil contemporânea, a necessidade de trabalhar com maciços de solo alterados tornou-se cada vez mais frequente, especialmente em áreas urbanas em expansão. O presente trabalho concentra-se especificamente nos problemas de estabilidade decorrentes de cortes no terreno, que geram as configurações conhecidas como taludes. Essas estruturas são comuns em diversas aplicações da construção civil, desde a conformação de greides rodoviários e adequação de encostas naturais até aterros sanitários e, particularmente, escavações para fundações de edifícios - foco principal desta investigação.

O município de Palmas, Tocantins, oferece um cenário geotécnico relevante para este estudo, devido às suas características singulares de solo e expansão urbana acelerada. O bairro Orla 14, em particular, vem experimentando intenso desenvolvimento imobiliário nos últimos anos, com a construção de numerosos edifícios verticais dotados de estruturas subterrâneas. Essa expansão urbana enfrenta desafios geotécnicos singulares decorrentes da proximidade do Lago de Palmas, que resulta em nível freático elevado e solos com predominância arenosa - características que implicam em baixa coesão, alta suscetibilidade à erosão e colapso. Conforme demonstrado por Nogueira (2010) em estudo similar realizado em Lisboa, taludes artificiais em áreas urbanas exigem monitoramento contínuo e métodos de análise que considerem cuidadosamente parâmetros locais específicos, particularmente no que diz respeito à resistência ao cisalhamento e permeabilidade do solo.

Dessa forma, o presente trabalho visa analisar a estabilidade do talude gerado pela escavação para fundações de um edifício de múltiplos pavimentos no bairro Orla 14. A abordagem metodológica combina ensaios geotécnicos laboratoriais com a aplicação de metodologias convencionais de cálculo de estabilidade, permitindo uma caracterização detalhada do solo local e uma avaliação de sua resistência mecânica. Os resultados esperados

incluem não apenas a compreensão do comportamento específico do maciço em estudo, mas também contribuições para o desenvolvimento de práticas executivas mais eficientes e seguras em obras de fundação e solos de edifícios altos em condições geotécnicas similares.

1.1 Problema de pesquisa

Com o mercado da construção civil em alta atividade, em especial a comercialização de apartamentos, cada vez mais empreendimentos vêm sendo concebidos na capital do estado do Tocantins. Tais edifícios, por sua vez, tendem a seguir o ritmo intenso de verticalidade da cidade e alcançam patamares cada vez mais altos, a partir disso surge a necessidade intrínseca de se dimensionar e executar fundações de grande porte para atender às altas cargas dessas edificações.

Segundo Henneberg (2013), a concepção e construção de fundações são etapas cruciais para qualquer edificação, sendo dimensionadas conforme as características do solo local e as cargas estruturais previstas. A autora ressalta que a fase executiva apresenta particular vulnerabilidade, onde falhas nos procedimentos de segurança podem comprometer tanto a estabilidade da obra quanto a integridade dos trabalhadores envolvidos, expostos a diversos riscos ocupacionais ao longo do processo construtivo.

No bairro Orla 14 em Palmas-TO diversas obras de múltiplos pavimentos tem se desenvolvido ao longo dos últimos anos, isso pode ser observado a partir da análise de imagens de satélite ao longo de duas décadas. Na Figura 1 (A), em junho de 2009, nota-se que a região se encontrava pouco explorada por empreendimentos. Todavia, na Figura 1 (B), em maio de 2025, fica claro que o bairro passou a abrigar numerosos e elevados edifícios, ficando evidente o aumento da incidência de obras no local.

Figura 1 - Desenvolvimento do bairro Orla 14 de 2009 (A) a 2025 (B)



Fonte: Adaptado Google Earth Pro (2025)

Com isso, a implementação dessas edificações gera a necessidade de se escavar terrenos para garantir a plena execução de fundações. Tal processo tem por consequência a formação de taludes, bem como pode ser observado na Figura 2. Diante disso, é evidente que a estabilidade dessas escavações em solo seja verificada, bem como o seu fator de segurança.

Figura 2 - Escavação do terreno



Fonte: Autor (2024)

Dessa forma, esse trabalho buscará responder as perguntas: Quais são os valores de fator de segurança desse corte durante as fases de execução da obra? Quais são as diferenças entre os resultados encontrados considerando as características geotécnicas específicas e os métodos de cálculo em equilíbrio limite tradicionais?

1.1.1 Delimitação de Escopo

Este projeto de pesquisa tem como foco o estudo da estabilidade do talude gerado durante a execução de uma obra de múltiplos pavimentos no bairro Orla 14 em Palmas-TO. A análise será realizada mediante a aplicação de métodos de equilíbrio limite de cálculo de estabilidade, complementados por ensaios geotécnicos para caracterização do solo e determinação de seus parâmetros de resistência ao cisalhamento.

A pesquisa se concentrará apenas na análise da estabilidade do maciço de solo durante a fase executiva da obra, por meio da obtenção dos fatores de segurança nas configurações de análise, fornecendo dados técnicos relevantes sobre a estabilidade do talude criado durante a escavação para execução da fundação do edifício, sendo esse o escopo a que a pesquisa se propõe.

1.1.2 Justificativa

A execução de fundações profundas em edifícios altos exige escavações que geram taludes instáveis, especialmente na Orla 14, onde o lençol freático raso, agrava os riscos de desmoronamentos. Um trágico exemplo ocorreu no dia 15 de setembro de 2017, quando um operário veio a óbito após o desabamento de um talude durante escavações para um prédio de 34 andares na região, conforme noticiado.

Trabalhar próximo a cortes de terra em solos arenosos e úmidos representa alto risco, tanto para os trabalhadores quanto para o andamento da obra. Acidentes como esse evidenciam a necessidade de estudos que avaliem a estabilidade desses taludes, garantindo maior segurança durante a execução das fundações.

Este trabalho busca analisar a estabilidade do solo na Orla 14, fornecendo dados essenciais para evitar acidentes e interrupções nas obras. Além do aspecto técnico, a pesquisa tem relevância social, contribuindo para a segurança dos trabalhadores e para um desenvolvimento urbano mais seguro em Palmas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a estabilidade de taludes da escavação de solo para execução da fundação de uma obra de múltiplos pavimentos situada no bairro Orla 14, em Palmas - TO.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Obter valores para o fator de segurança do talude considerando diferentes cenários presentes nas fases escavação e execução da obra em estudo.
2. Realizar a análise comparativa entre os métodos de equilíbrio limite, utilizando para isso um programa computacional (GeoStudio) para modelagem do talude, simulações e cálculos de estabilidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo consolida os referenciais teóricos para a análise da estabilidade de taludes em escavações para fundações profundas, com ênfase no contexto geotécnico do bairro Orla 14 em Palmas-TO. A revisão está organizada em quatro eixos principais: classificação de fundações e escavações, abordando desde sistemas rasos, profundos e mistos, com destaque para o radier estaqueado e discutindo a necessidade de escavações e execução de taludes em todas elas; mecanismos de ruptura em taludes (queda, tombamento, deslizamento, espalhamento e fluxo), conforme classificações de Cruden e Varnes (1996); métodos de análise de estabilidade (Fellenius, Bishop Simplificado e Morgenstern-Price); e técnicas de caracterização geotécnica do solo, incluindo ensaios laboratoriais e de campo.

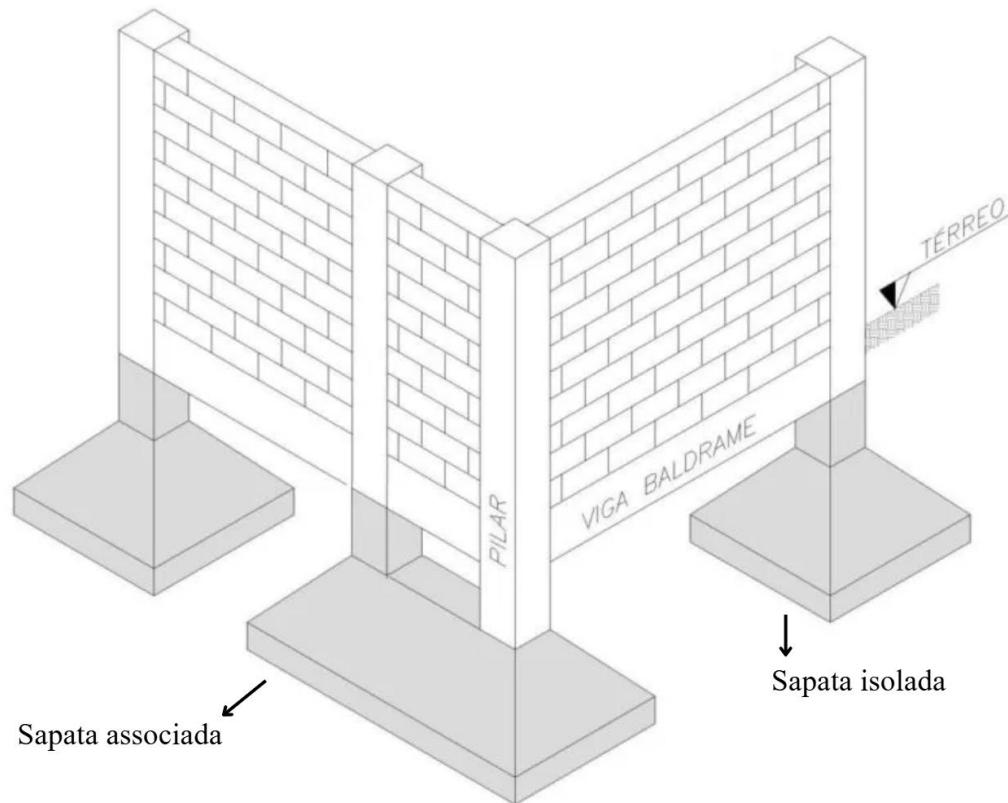
A fundamentação prioriza estudos aplicados a taludes urbanos em solos arenosos, alinhando-se ao caso de estudo. São examinados critérios normativos (NBR 11682:2009) para cálculo do fator de segurança, além de metodologias consolidadas na literatura sempre correlacionando os conceitos com os desafios práticos de escavações para fundações em áreas com lençol freático elevado e solos de baixa coesão. Essa estrutura visa fornecer subsídios técnicos para a análise do talude em estudo.

2.1 Classificação e Execução de Fundações

As fundações têm como principal função transmitir ao solo as cargas provenientes das estruturas, garantindo estabilidade e evitando recalques que comprometam o desempenho da edificação. Essa transferência deve considerar a capacidade resistente do terreno e o comportamento geotécnico local, o que influencia diretamente a escolha entre fundações rasas ou profundas. De acordo com Cintra e Aoki (2011), a classificação depende sobretudo da profundidade de assentamento e da forma como as cargas são distribuídas, sendo essencial que o sistema adotado assegure desempenho seguro e durável ao edifício.

No âmbito das fundações rasas, destacam-se as sapatas isoladas, associadas, corridas e os radiers, amplamente utilizados quando o solo superficial apresenta condições favoráveis, a Figura 3 mostra alguns modelos de sapatas usualmente aplicadas na construção civil. Bowles e Guo (1996) descrevem que as sapatas isoladas atendem bem a pilares individuais, enquanto as sapatas corridas distribuem cargas linearmente sob paredes ou alinhamentos estruturais. Para solos pouco resistentes, os radiers tornam-se alternativa eficiente por distribuírem as cargas de forma uniforme, reduzindo riscos de recalques diferenciais.

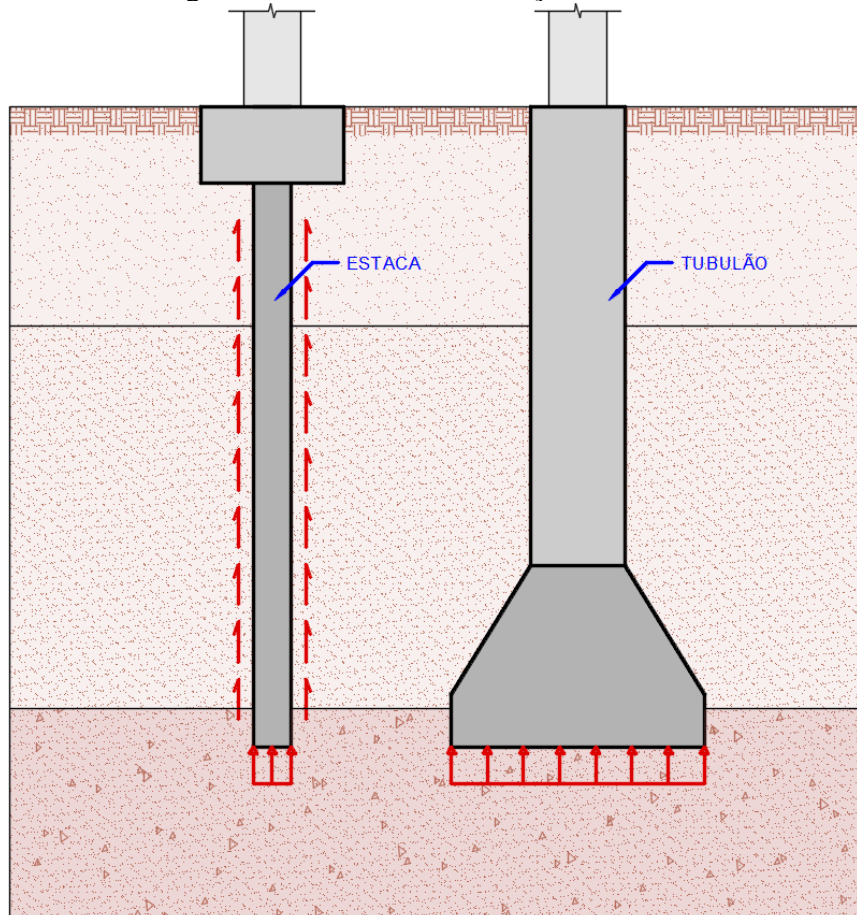
Figura 3 - Modelos de sapatas



Fonte: CIVILIZAÇÃO ENGENHEIRA (2018).

Entre as fundações profundas, as estacas representam a solução mais empregada devido à capacidade de alcançar camadas competentes em maior profundidade e ao controle eficaz de deslocamentos. Falconi et al (2013) ressaltam a eficiência da estaca hélice contínua em ambientes urbanos, pois reduz vibrações e impactos no entorno, ao mesmo tempo em que oferece boa capacidade de carga e segurança na execução. Métodos tradicionais, como tubulões, também podem ser aplicados, embora exijam controles rigorosos devido aos riscos de instabilidade durante a escavação. Alguns exemplos de fundações podem ser observados na Figura 4 a seguir.

Figura 4 - Modelos de Fundações Profundas

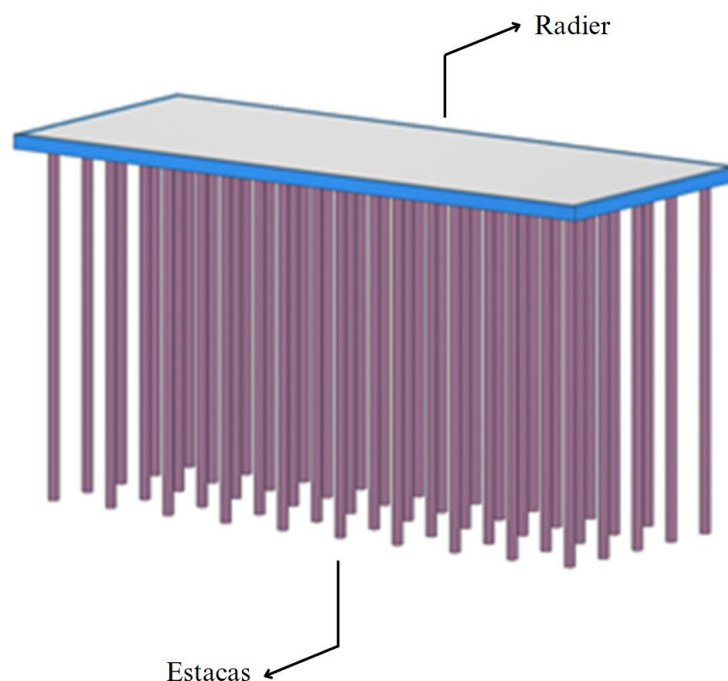


Fonte: Estude Engenharia (2025)

2.1.1 Radier estaqueado e necessidade de escavações

O radier estaqueado tem se destacado como solução eficiente para edificações altas em ambientes urbanos com limitações de espaço, pois combina a capacidade de carga das estacas com a boa distribuição de esforços proporcionada pela placa de fundação, conforme descrito por Souza (2010). Essa solução é especialmente vantajosa quando há elevada concentração de pilares centrais, típica de torres com núcleos rígidos de contraventamento, permitindo integrar o comportamento conjunto das estacas e do radier, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Modelo da solução de radier estaqueado



Fonte: TQS Informática (2021)

Souza (2010) ressalta que, nesse sistema, parcela significativa das cargas é transferida diretamente ao solo pelo contato da placa com o terreno, enquanto as estacas têm papel complementar no controle de recalques e no aumento da capacidade resistente. Essa interação solo-estrutura torna possível otimizar o dimensionamento, reduzindo o consumo de materiais sem prejuízo da segurança. Entretanto, a adoção dessa solução exige cuidadosa investigação geotécnica, uma vez que os parâmetros obtidos em sondagens — como perfil estratigráfico, resistência dos solos e nível do lençol freático — são fundamentais para o planejamento adequado da profundidade de escavação e do tipo de fundação a ser adotado.

O processo de escavação, indispensável para a execução de qualquer fundação, constitui uma intervenção significativa no equilíbrio natural do terreno e deve seguir rigorosamente as normas técnicas, considerando que perturbações no maciço podem gerar instabilidades, conforme alertado por Rousselet e Falcão (1999). No caso específico do radier estaqueado, a necessidade de grandes escavações para alcançar a cota inferior do bloco de coroamento tende a aumentar os desafios de estabilidade, sobretudo em solos arenosos ou com presença elevada de água subterrânea, onde a profundidade da escavação pode comprometer temporariamente a integridade dos taludes e do maciço ao redor.

2.2 Aspectos Gerais dos Movimentos de Massa

Os deslocamentos gravitacionais de materiais geológicos referem-se aos fenômenos naturais que envolvem o transporte descendente de solos e fragmentos rochosos ao longo de vertentes, impulsionados principalmente pela força da gravidade. Esses eventos englobam diversos tipos de processos, dentre os quais os deslizamentos de terra se destacam como um dos mais significativos. No cenário geológico brasileiro, particularmente, os deslizamentos representam um dos mecanismos mais relevantes na transformação da paisagem e na modelagem do relevo.

2.2.1 Mecanismos de ruptura

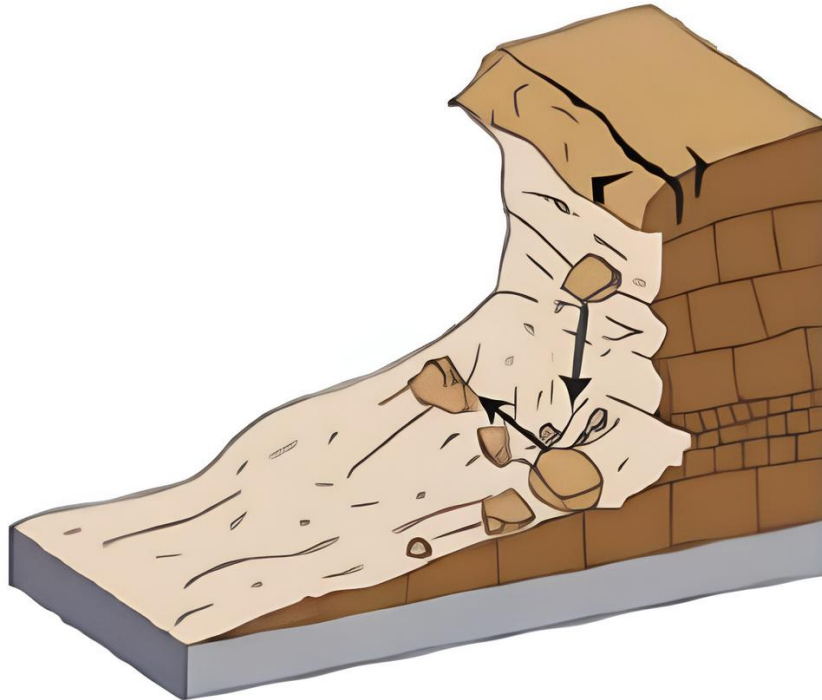
A fim de que se entenda o comportamento físico dos movimentos de massa, é cabível que se discuta como ocorre o seu colapso. Segundo Dyminski (2007), os mecanismos de ruptura de taludes referem-se aos processos que provocam o desequilíbrio entre as forças atuantes e a resistência do material, levando à falha do maciço. O autor explica que esses mecanismos podem ocorrer tanto pelo aumento das solicitações (como ações gravitacionais ou carregamentos externos) quanto pela redução da resistência ao cisalhamento do solo. Naturalmente, a tendência do material é movimentar-se sob efeito da gravidade, sendo contida apenas pela sua capacidade resistente, que quando ultrapassada, resulta na ruptura do talude.

De acordo com Cruden e Varnes (1996), os mecanismos de ruptura em taludes são classificados em quatro tipos principais com base em sua cinemática: queda, tombamento, deslizamento e fluxo. Essa classificação contribui para definir estratégias de contenção adequadas a cada caso.

2.2.1.1 Ruptura por quedas ou desprendimentos

Cruden e Varnes (1996) consideram que a ruptura por quedas ou desprendimentos ocorre quando blocos de solo ou rocha se desprendem abruptamente de encostas íngremes, movendo-se principalmente por queda livre, saltos ou rolamento, conforme evidenciado na Figura 6. Esse tipo de ruptura é caracterizado por velocidade elevada e geralmente acontece em taludes com inclinação superior a 76° .

Figura 6 - Ruptura por quedas ou desprendimentos



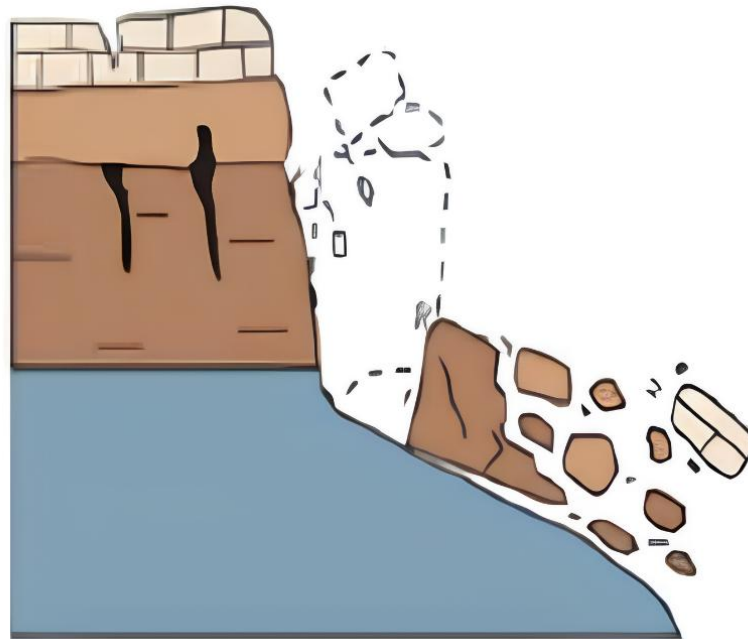
Fonte: Das (2016)

O impacto do material contra o talude pode fragmentá-lo, reiniciando ciclos de queda e rolamento. Fatores como erosão na base do talude ou desgaste natural contribuem para a ocorrência desse fenômeno.

2.2.1.2 Ruptura por tombamento

A ruptura por tombamento ocorre quando massas de solo ou rocha sofrem uma rotação em torno de um eixo localizado abaixo de seu centro de gravidade, provocando o deslocamento da estrutura para frente (Figura 7). Esse mecanismo é comum em maciços com descontinuidades verticais ou inclinadas, onde blocos rochosos perdem estabilidade devido à ação da gravidade ou a pressões laterais. Como destacado por Das (2016), o tombamento envolve um movimento de rotação característico, frequentemente associado a encostas íngremes ou cortes em rochas estratificadas.

Figura 7 - Ruptura por tombamento



Fonte: Cruden e Varnes (1996)

Conforme Cruden e Varnes (1996), o processo pode ser acelerado por fatores como erosão na base do talude, vibrações ou alterações nas condições hidrológicas. O tombamento difere de outros tipos de ruptura, como deslizamentos, por sua dinâmica rotacional e pela formação de fraturas tensionais na parte superior do bloco.

2.2.1.3 Ruptura por deslizamento

De acordo com Dyminski (2007), o deslizamento consiste no movimento descendente de uma massa de solo ou rocha ao longo de uma superfície de ruptura bem definida (circular ou planar), caracterizando-se pelo deslocamento do material sobre um plano de cisalhamento pré-existente ou formado durante o processo. Diferentemente do tombamento, o centro de rotação situa-se acima do centro de gravidade da massa deslizante, resultando em um movimento mais linear. A Figura 8 demonstra como esse fenômeno ocorre.

Figura 8 - Deslizamento circular de massa de solo



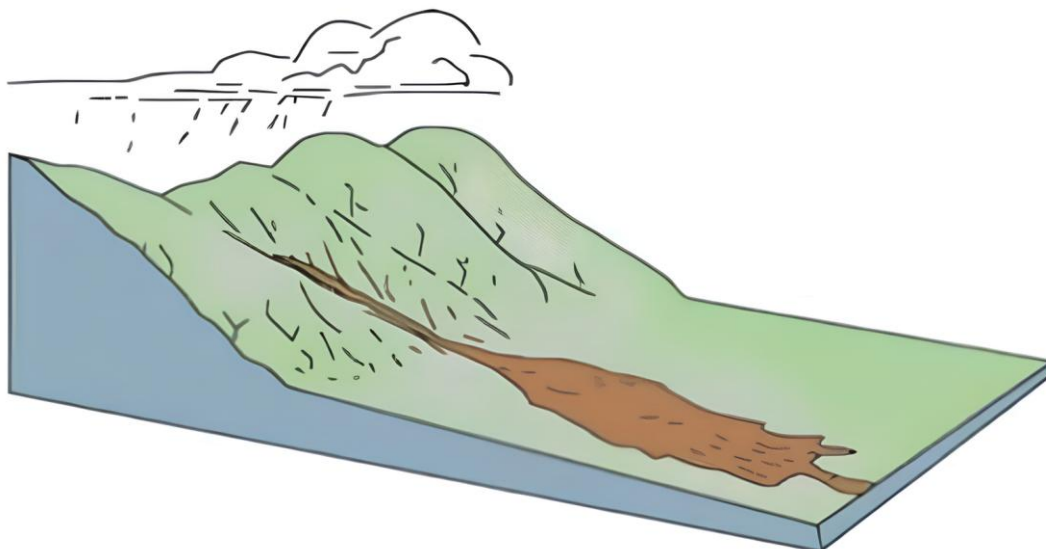
Fonte: Cruden e Varnes (1996)

Dyminski (2007) ainda evidencia que quando ocorre de forma lenta e progressiva, esse fenômeno é denominado rastejo (*creep*), comum em solos argilosos ou em encostas sob tensão contínua. O escorregamento pode ser desencadeado por fatores como saturação hídrica, sobrecargas ou erosão na base do talude, exigindo intervenções como drenagem ou reforço estrutural para estabilização.

2.2.1.4 Movimentos de fluxo

Segundo Cruden e Varnes (1996) o processo de movimento de fluxo ocorre quando solos ou detritos se comportam como fluidos, movendo-se rapidamente encosta abaixo. Esse fenômeno inclui corridas de lama (solos argilosos saturados) e fluxos de materiais granulares secos (Figura 9). A velocidade varia conforme saturação, tipo de material e inclinação do terreno. Durante o movimento, o solo perde sua estrutura original, formando depósitos homogêneos. Esse tipo de ruptura é altamente destrutivo devido à sua rapidez e capacidade de percorrer grandes distâncias.

Figura 9 - Ruptura por fluxo



Fonte: Cruden e Varnes (1996)

2.3 Análise de Estabilidade de Talude

A análise de estabilidade de taludes é um processo essencial na engenharia geotécnica, visando garantir a segurança e a durabilidade de obras em encostas naturais ou cortes artificiais. Conforme Gerscovich (2016), essa análise requer uma abordagem sistemática, que integre investigações de campo, ensaios laboratoriais e métodos de dimensionamento para avaliar as condições de resistência e deformabilidade do maciço. A qualidade dos resultados depende diretamente da precisão dos dados coletados e da interpretação adequada dos parâmetros geotécnicos, considerando diferentes cenários críticos ao longo da vida útil da obra.

2.3.1 Etapas de Análise de estabilidade de talude

Para garantir uma análise adequada da estabilidade de taludes, é necessário seguir uma sequência de etapas técnicas bem definidas. Conforme destaca Gerscovich (2016), essas etapas envolvem desde a coleta e interpretação de dados geotécnicos até a aplicação de modelos de dimensionamento. A seguir, o Quadro 1 apresenta de forma sistematizada as principais fases do processo.

Quadro 1 - Etapas para Análise da Estabilidade de Taludes segundo Gerscovich (2016)

Etapa	Descrição
1. Levantamento de Campo	Definição da topografia, identificação das sobrecargas, elementos estruturais e do nível freático. Seleção de pontos para coleta de amostras indeformadas.
2. Identificação de Condições Críticas	Consideração de fatores sazonais como chuvas intensas ou elevação do lençol freático, que podem comprometer a estabilidade do maciço.
3. Ensaaios Laboratoriais	Realização de testes para determinação da resistência ao cisalhamento e deformabilidade dos solos.
4. Definição de Parâmetros de Projeto	Interpretação dos dados laboratoriais para obtenção de parâmetros geotécnicos confiáveis, fundamentais para o dimensionamento seguro.
5. Modelagem e Dimensionamento	Aplicação de métodos de equilíbrio-limite ou modelos numéricos para estimar o fator de segurança sob diferentes cenários de carregamento e saturação.
6. Avaliação de Estabilidade Final	Análise da estabilidade considerando possíveis variações nos parâmetros de resistência, garantindo segurança e desempenho da estrutura a longo prazo.

Fonte: Autor (2025)

2.3.2 Fator de Segurança do Talude

O cálculo do fator de segurança (FS) constitui etapa fundamental na avaliação da estabilidade de taludes, assim como aborda Silva (2023). Essa análise compara as tensões cisalhantes atuantes com a resistência ao cisalhamento disponível no maciço, sendo o FS um indicador quantitativo da margem de segurança. Valores superiores a 1,0 demonstram condição estável, enquanto FS igual a 1,0 representa o limiar de ruptura. Situações com FS inferiores a 1,0, embora matematicamente possíveis, carecem de significado físico prático, pois indicam que as solicitações já ultrapassaram a capacidade resistente do solo, caracterizando instabilidade iminente.

O fator de segurança FS é definido por Das (2016) por meio da Equação 1, onde τ_f é a resistência média ao cisalhamento do solo e τ_d é a tensão média de cisalhamento desenvolvida ao longo da superfície potencial de ruptura.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (1)$$

A NBR 11682 (2009) estabelece que o fator de segurança (FS) está diretamente relacionado à resistência ao cisalhamento dos materiais que compõem o talude. Conforme o

documento, "um maior valor de FS corresponde a uma segurança maior contra a ruptura" (ABNT NBR 11682, 2009). No entanto, a norma alerta que a variabilidade natural dos solos e rochas pode reduzir significativamente essa margem de segurança, aumentando o risco potencial de ruptura. Essa abordagem reconhece que as análises tradicionais não consideram as deformações progressivas que ocorrem naturalmente nos taludes.

A metodologia proposta pela norma considera diferentes níveis de risco, incluindo a possibilidade de perda de vidas humanas, danos materiais e impactos ambientais. Os valores de FS devem ser determinados para todas as condições de carregamento previstas, abrangendo variações do nível d'água, sobrecargas, modificações geométricas e ações sísmicas. A norma enfatiza a necessidade de avaliar tanto as condições atuais quanto as futuras, considerando toda a vida útil do talude em estudo.

A NBR 11682:2009 estabelece, por meio da Tabela 1, os fatores de segurança mínimos para análise de taludes - como os de escavação - diferenciando entre estabilidade interna (rupturas localizadas em zonas contidas, como entre elementos de contenção) e externa (rupturas globais do maciço). A norma enfatiza que estes valores complementam, mas não substituem, os requisitos de outras normas técnicas para elementos estruturais de contenção, sendo essencial sua correta interpretação para garantir a segurança tanto durante a execução quanto na fase de estabilização definitiva do talude.

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

NOTA 1: No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima devem ser majorados em 10%. Alternativamente, pode ser usado o enfoque semiprobabilístico indicado no Anexo D.

NOTA 2: No caso de estabilidade de lascas/blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros γ , ϕ , c , em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser justificado pelo engenheiro civil geotécnico.

NOTA 3: Esta tabela não se aplica aos casos de rastejo, voçorocas, ravinas e queda ou rolamento de blocos.

Fonte: ABNT (2009)

2.3.3 Métodos de Análise de Estabilidade de Talude

Na engenharia geotécnica, diversos métodos são utilizados para a análise da estabilidade de taludes. Segundo Massad (2010), os métodos de equilíbrio-limite, amplamente empregados nessa área, fundamentam-se na suposição de que o solo apresenta comportamento rígido-plástico, rompendo-se de forma abrupta e sem deformações expressivas. A análise consiste na comparação entre as tensões de cisalhamento mobilizadas e a resistência ao cisalhamento do solo, sendo assim possível determinar o fator de segurança (FS). Além disso, considera-se que o FS é constante ao longo da superfície de ruptura, embora, na prática, o processo de ruptura possa envolver aspectos dinâmicos e progressivos.

Os métodos de equilíbrio-limite apresentam diversas formulações, entre as quais se destacam Fellenius, Bishop simplificado e Morgenstern-Price. O método de Fellenius, desenvolvido inicialmente para rupturas circulares observadas em taludes naturais, considera apenas o equilíbrio de momentos. Em seguida, o método de Bishop foi proposto com simplificações que permitem maior precisão sem aumento significativo da complexidade computacional. Já o método de Morgenstern-Price, por sua vez, apresenta uma abordagem mais completa ao considerar simultaneamente o equilíbrio de forças e momentos, sendo amplamente adotado como referência em análises comparativas, conforme discutido por Duncan, Wright e Brandon (2014).

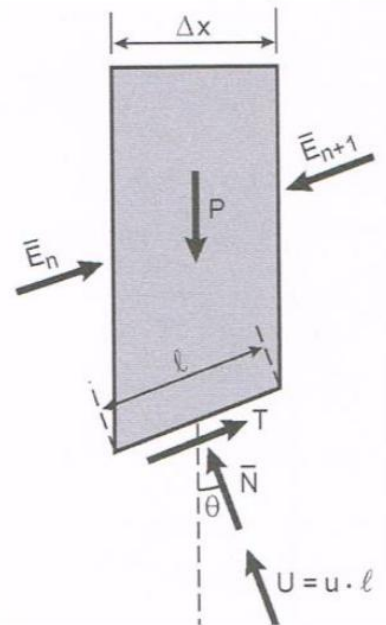
A escolha do método adequado depende das características do talude e do tipo de superfície de ruptura esperada. Embora a maioria dos métodos assumam superfícies circulares de ruptura - como no caso dos escorregamentos analisados por Fellenius - situações específicas, como rupturas planares em solos estratificados, exigem abordagens diferenciadas. Essas considerações são fundamentais para garantir análises precisas, especialmente em obras de terra e barragens, onde a estabilidade do maciço é crítica.

2.3.3.1 Método de Fellenius

O método de Fellenius, amplamente reconhecido entre as técnicas clássicas de equilíbrio-limite, adota uma superfície de ruptura circular como hipótese básica e foi inicialmente formulado para análises em solos saturados, sendo depois aplicado a diversas condições de taludes, conforme discutido por Das (2016). Essa abordagem simplificada divide o maciço em lamelas verticais e considera que as forças laterais entre elas (E_n e E_{n+1}) são paralelas à base de cada lamela, conforme ilustrado na Figura 10. O equilíbrio é analisado

apenas em termos de momentos, desprezando-se as forças de interação entre as lamelas, o que facilita o cálculo do fator de segurança (F).

Figura 10 - Lamela de Fellenius



Fonte: Massad (2010)

A expressão para determinação de F (Equação 2) combina a coesão efetiva (c'), o ângulo de atrito (ϕ'), o peso da lamela (P), bem como a sua largura (l), a poropressão (u) na base de cada segmento e o ângulo da força normal na base da fatia (θ). Conforme Massad (2010), essa formulação é particularmente útil para análises preliminares, embora possa subestimar F em taludes com elevada pressão de água nos poros ou solos heterogêneos. O método mantém relevância por sua simplicidade computacional e aplicabilidade em projetos de obras de terra e barragens.

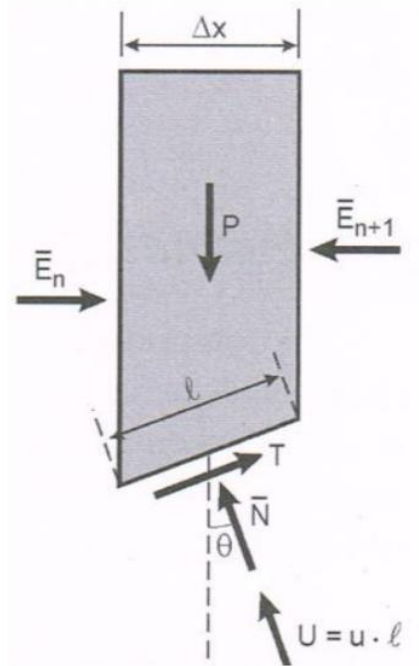
$$F = \frac{\sum [c' \cdot l + (P \cdot \cos \theta - u \cdot \Delta x \cdot \sec \theta) \cdot \tan \phi']}{\sum (P \cdot \sin \theta)} \quad (2)$$

2.3.3.2 Método de Bishop Simplificado

O método de Bishop Simplificado constitui um avanço importante em relação ao método de Fellenius ao incorporar as forças horizontais atuantes nas faces das lamelas (Figura 11), aprimorando a representação do equilíbrio e aumentando a precisão das análises, conforme

discutido por Lambe e Whitman (1969). Essa abordagem mantém a premissa de superfície de ruptura circular, mas introduz maior rigor ao equilíbrio de forças verticais, resultando em valores de fator de segurança (F) mais precisos.

Figura 11 - Lamela de Bishop



Fonte: Massad (2010)

A expressão para cálculo de F (Equação 3) incorpora a coesão efetiva (c'), o ângulo de atrito (ϕ'), o peso da lamela (P), e a poropressão (u), resolvida iterativamente devido à interdependência entre N e F .

$$F = \frac{\sum[(P - u \cdot \Delta x - c' \cdot \Delta x) \cdot \tan \phi' / \cos \theta]}{\sum(P \cdot \sin \theta)} \quad (3)$$

Massad (2010) afirma que embora o método de Bishop Simplificado seja mais confiável que o de Fellenius, ele apresenta limitações em taludes com superfícies de ruptura muito inclinadas próximo ao pé. A simplificação de desconsiderar forças de interação entre lamelas verticais mantém a eficiência computacional, mas pode exigir complementação com métodos mais rigorosos (como Morgenstern-Price) em casos complexos. Sua aplicação é amplamente difundida em projetos de barragens e cortes em solos homogêneos ou estratificados.

2.3.3.3 Método de Morgenstern & Price

Turra (2024) entende que o método de Morgenstern-Price tem destaque como uma abordagem rigorosa para análise de estabilidade de taludes, atendendo simultaneamente às condições de equilíbrio de forças e momentos. Diferentemente dos métodos de Fellenius e Bishop Simplificado, esta técnica permite a análise de superfícies de ruptura não-circulares, sendo particularmente útil em taludes com geometrias complexas ou solos heterogêneos. O método considera as forças entre lamelas (E e T) por meio de uma função arbitrária $f(x)$ - como senoidal ou trapezoidal - multiplicada por um fator λ determinado iterativamente. Essa abordagem flexível, combinada com a divisão do maciço em lamelas infinitesimais, exige o uso de softwares especializados para resolução dos sistemas de equações envolvidos.

Conforme Turra (2024), a principal vantagem do método Morgenstern-Price reside em sua capacidade de modelar cenários complexos, incluindo taludes com múltiplas camadas ou condições hidrológicas variáveis. No entanto, sua implementação prática é computacionalmente intensiva, demandando ferramentas numéricas avançadas. Apesar dessa complexidade, o método é amplamente reconhecido como referência para validação de resultados obtidos por técnicas simplificadas, especialmente em projetos de grande porte onde a precisão é crítica, como barragens e cortes profundos em áreas urbanas.

2.4 Determinação das Características dos Materiais

A caracterização geotécnica do solo é fundamental para a análise de estabilidade de taludes, fornecendo parâmetros essenciais como resistência ao cisalhamento, granulometria e plasticidade. Conforme Das (2016), esses ensaios permitem classificar o solo e prever seu comportamento sob diferentes condições de carregamento e umidade.

2.4.1 Coleta e preparação de amostras

Segundo a DNER-PRO 002/94, a coleta deve ser realizada de forma a evitar contaminação e alterações nas propriedades físicas e químicas do solo, empregando técnicas específicas para cada tipo de material e profundidade da sondagem. Amostras indeformadas devem ser preferencialmente obtidas quando se pretende analisar resistência e deformabilidade, enquanto amostras perturbadas são adequadas para ensaios de granulometria e limites de consistência.

A DNER-PRO 003/94 detalha os procedimentos de transporte, acondicionamento e identificação das amostras, enfatizando a necessidade de manter as condições naturais do solo até a realização dos ensaios. É recomendado o uso de embalagens impermeáveis, lacres de segurança e registro sistemático de dados como profundidade, data e localização da coleta, garantindo rastreabilidade e confiabilidade dos resultados. A norma também orienta sobre a quantidade mínima de material a ser coletado, de acordo com o tipo de ensaio a ser realizado, minimizando perdas ou alterações durante o transporte.

A preparação das amostras para ensaios de laboratório deve seguir critérios definidos na DNER-ME 041/94, que estabelece métodos de homogeneização, secagem, peneiramento e acondicionamento conforme a finalidade do ensaio. A norma orienta que solos destinados à determinação de peso específico, índice de vazios ou limites de consistência devem ser acondicionados de modo a preservar a umidade natural, evitando alterações que comprometam a precisão dos resultados.

2.4.2 Ensaios de caracterização física e granulométrica

A análise granulométrica, normatizada pela NBR 7181 (ABNT, 2016), determina a distribuição das partículas do solo por tamanho, classificando-o como arenoso, siltoso ou argiloso. Segundo Pinto (2002), esse ensaio é realizado por peneiramento (para frações grossas) e sedimentação (para frações finas), sendo crucial para entender a permeabilidade e a suscetibilidade à erosão do material. No caso de solos arenosos, a predominância de partículas entre 0,075 mm e 4,8 mm influencia diretamente sua baixa coesão e alta drenabilidade.

Os limites de Atterberg (limite de liquidez, plasticidade e contração), definidos pelas normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), avaliam a resposta do solo à variação de umidade. Conforme Das (2016), esses limites são determinados em laboratório através de ensaios de percussão (limite de liquidez) e moldagem (limite de plasticidade). O autor ainda destaca que, em solos arenosos, os valores são geralmente baixos, refletindo pouca plasticidade e alta sensibilidade à água, o que exige cuidados redobrados em taludes com nível freático elevado.

O ensaio de densidade real dos grãos do solo, normatizado pelo DNER ME 93/94, determina a massa específica das partículas sólidas que compõem o material, desconsiderando a presença de água e vazios. De acordo com Pinto (2002), esse ensaio é fundamental para caracterizar a natureza mineralógica do solo, servindo de base para cálculos indiretos como índice de vazios, porosidade e peso específico saturado. O procedimento consiste no uso de um

picnômetro, no qual se mede a variação de massa do conjunto solo-água em comparação ao volume deslocado, permitindo a obtenção da densidade real por meio da relação entre a massa dos sólidos e o volume efetivamente ocupado por eles.

O ensaio de cisalhamento direto, padronizado pela ASTM D3080 - 04, mede a resistência do solo ao deslizamento sob tensões normais pré-definidas. Conforme Das (2016), o método é particularmente útil para solos onde a resistência é governada principalmente pelo atrito entre partículas (ângulo de atrito interno, ϕ). A coesão (c) nesses solos é próxima de zero, exigindo reforços estruturais ou contenções para garantir estabilidade.

2.4.3 Sondagens em campo

A sondagem SPT (Standard Penetration Test), normatizada pela NBR 6484 (ABNT, 2020), fornece dados sobre a resistência do solo à penetração e o nível do lençol freático. O número de golpes (NSPT) obtido em cada metro de perfuração permite estimar a compactidade e a capacidade de carga do terreno. A interpretação dos resultados do SPT é essencial para avaliar o comportamento geotécnico do subsolo, uma vez que o ensaio permite identificar variações estratigráficas, detectar camadas mais resistentes ou mais compressíveis e estimar parâmetros empíricos utilizados em análises de fundações e estabilidade de taludes.

Conforme descrito por Décourt e Quaresma (1978), o NSPT pode ser correlacionado à compactidade de solos granulares e à consistência de solos finos, além de fornecer indícios importantes sobre a presença de camadas colapsíveis ou saturadas. Quando associado ao nível d'água identificado durante a perfuração, o SPT também auxilia na avaliação de poropressões e na identificação de zonas suscetíveis à redução de resistência, contribuindo diretamente para o planejamento seguro de escavações, obras de contenção e fundações.

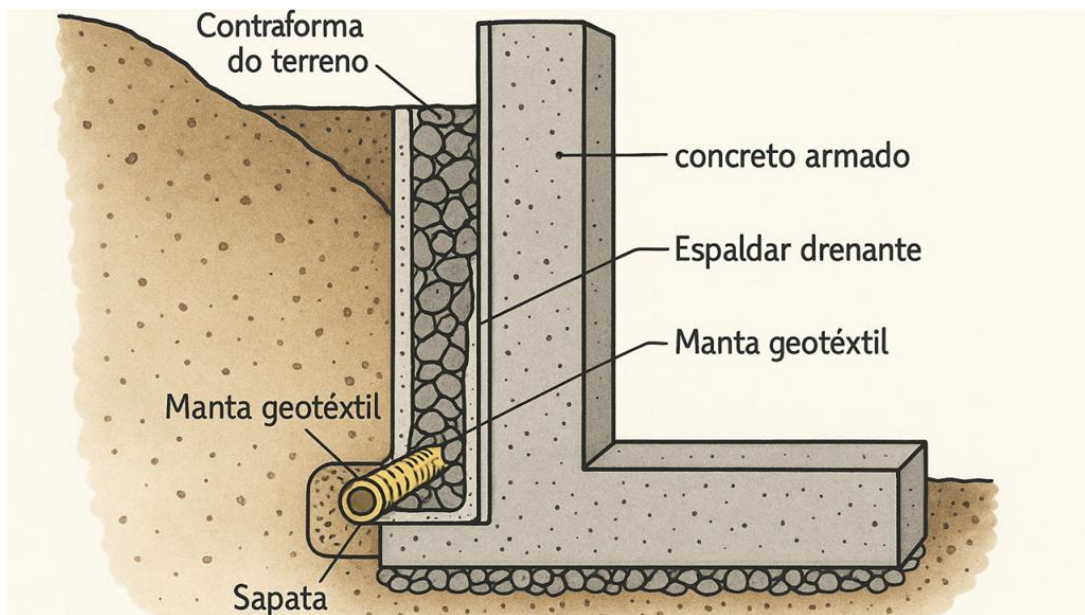
2.5 Obras de Contenção

As obras de contenção desempenham papel essencial na estabilização de taludes, sendo escolhidas conforme as características geotécnicas, geométricas e hidrológicas de cada situação. As soluções disponíveis abrangem intervenções estruturais, modificações geométricas e técnicas de controle da água, todas voltadas a restabelecer o equilíbrio do maciço e mitigar riscos associados a movimentos de massa. A escolha adequada entre retaludamento, estruturas de contenção, reforço do solo, drenagem ou proteção superficial depende de fatores como

espaço disponível, condições do terreno, custo e finalidade da obra, exigindo análise criteriosa para garantir desempenho e segurança.

O retaludamento é uma das soluções mais tradicionais para melhorar o fator de segurança, promovendo a redistribuição de pesos no talude ao reduzir cargas na crista e reforçar o pé com aterros, conforme Dutra (2013). Já os muros de arrimo (Figura 12) se destacam pela capacidade de resistir aos empuxos do terreno, oferecendo alternativas como muros de gravidade, gabiões e muros em concreto armado, cujo desempenho depende do tipo de solo, altura da contenção e eficiência dos dispositivos de drenagem, segundo Mattos (2009). Em situações que exigem maior rigidez e suporte em profundidade, as cortinas atirantadas surgem como solução eficiente, proporcionando elevada resistência ao deslocamento por meio de tirantes protendidos ancorados em camadas competentes do maciço.

Figura 12 - Esquema simplificado de um muro de arrimo



Fonte: CLARO (2025)

Além das soluções estruturais, o reforço com geossintéticos e as obras de drenagem apresentam papel fundamental na estabilidade a longo prazo. O solo reforçado, executado com geogrelhas, geotêxteis ou outros materiais sintéticos, aumenta a resistência interna do maciço e controla deformações ao longo das etapas construtivas, conforme explica Dyminski (2007). Os sistemas de drenagem, essenciais para o controle de poropressões e escoamento superficial, requerem manutenção rigorosa para evitar obstruções que poderiam comprometer sua funcionalidade, de acordo com Dutra (2013). Por fim, as obras de proteção superficial - como

telas metálicas galvanizadas, argamassa projetada ou concreto projetado (Figura 13) - reduzem a erosão e a infiltração de água, sendo especialmente relevantes em taludes arenosos, que apresentam maior vulnerabilidade a processos erosivos, conforme ressalta Mattos (2009).

Figura 13 - Exemplo de estabilização com tela metálica e argamassa ou concreto



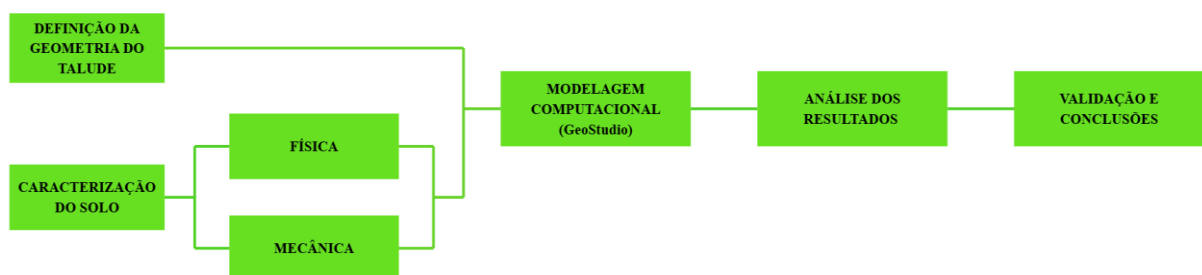
Fonte: ROXOR (2025).

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa adota uma abordagem metodológica integrada, dividida em eixos complementares para investigação da estabilidade de taludes. A fase inicial compreende trabalhos de campo para levantamento geométrico do talude e coleta seletiva de amostras. Em seguida, realizam-se ensaios laboratoriais para caracterização física e mecânica do material geotécnico. Por fim, procede-se a análise da estabilidade, com base em parâmetros normativos e na simulação computacional.

O fluxograma apresentado na Figura 14 ilustra a sequência lógica das atividades desenvolvidas do trabalho, garantindo uma abordagem sistemática e fundamentada tecnicamente.

Figura 14 - Fluxograma das fases do trabalho



Fonte: Autor (2025)

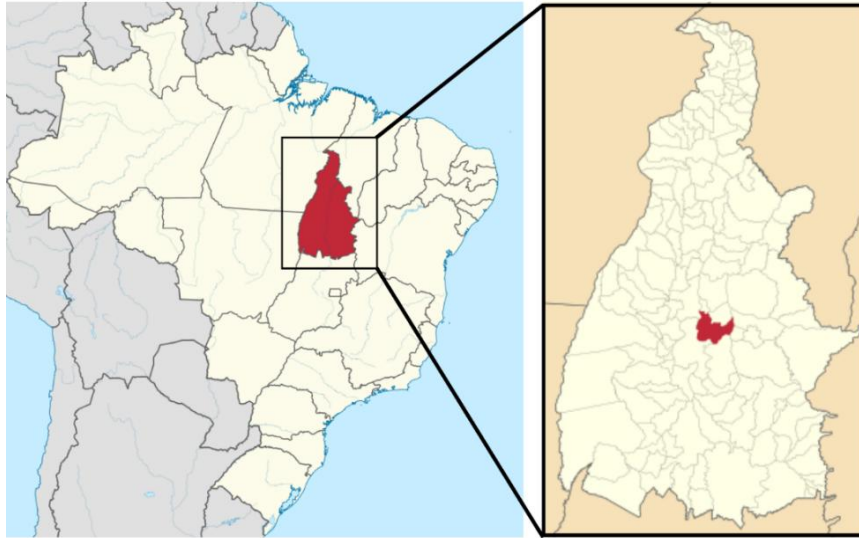
3.1 Levantamento de Dados da Obra

3.1.1 Localização da obra

A obra analisada está situada no bairro Orla 14, na região central da cidade de Palmas, Tocantins. Essa localidade tem se destacado nos últimos anos pelo crescimento expressivo do setor imobiliário, marcado pela verticalização e intensificação do uso do solo. O entorno imediato da obra é caracterizado pela presença de numerosos edifícios de múltiplos pavimentos, além de terrenos ainda disponíveis, com alto potencial construtivo, o que evidencia a pressão por ocupação intensiva da área.

A Figura 15 apresenta o mapa de situação de Palmas (Tocantins), em que é possível notar a posição geográfica em que a capital se encontra no território brasileiro.

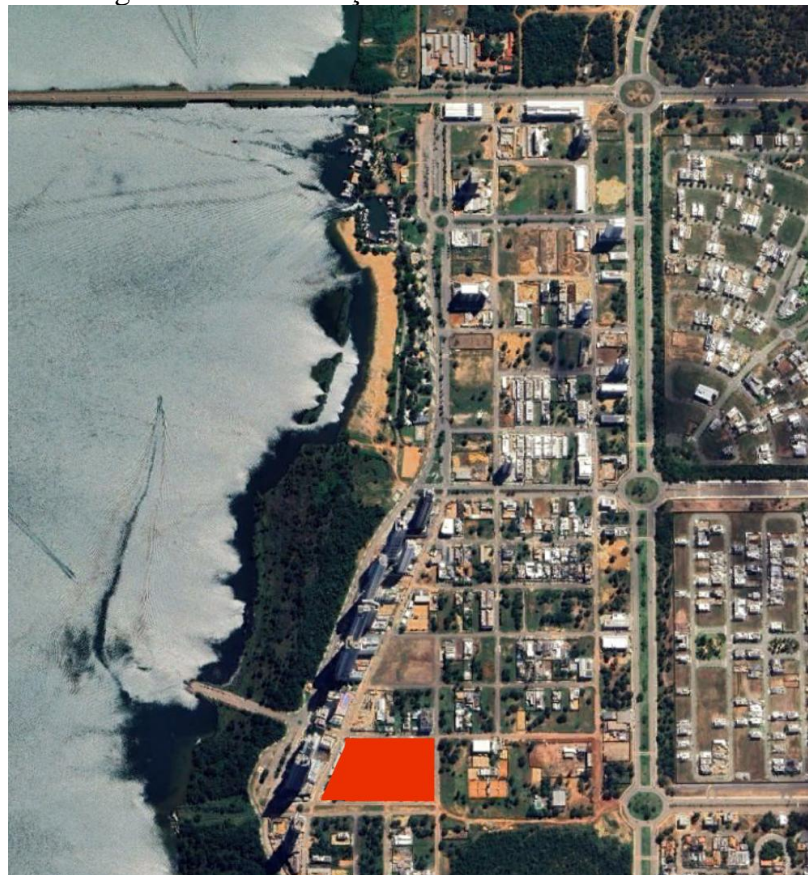
Figura 15 - Mapa de Situação de Palmas-TO



Fonte: Autor (2025)

Já na Figura 16 está indicada a localização da obra no bairro Orla 14, onde se observa sua inserção no tecido urbano consolidado da capital tocantinense.

Figura 16 - Localização da Obra no Bairro Orla 14



Fonte: Adaptado Google Earth Pro (2025)

3.1.2 Identificação do tipo de fundação executada

A fundação adotada na obra em estudo é classificada como mista, composta por estacas do tipo hélice contínua moldadas in loco, interligadas por um bloco único de coroamento, configurando um sistema do tipo radier estaqueado. Essa concepção estrutural é comumente empregada em edificações de múltiplos pavimentos situadas em solos de baixa coesão e com presença de lençol freático elevado, como ocorre no bairro Orla 14, em Palmas-TO. Para viabilizar a concretagem do bloco de coroamento, foi necessária a escavação do terreno até a cota de implantação do radier, mostrada na Figura 17, o que resultou na formação de um talude íngreme e exposto, cuja estabilidade constitui o principal objeto de análise deste trabalho.

Figura 17 - Escavação e taludamento



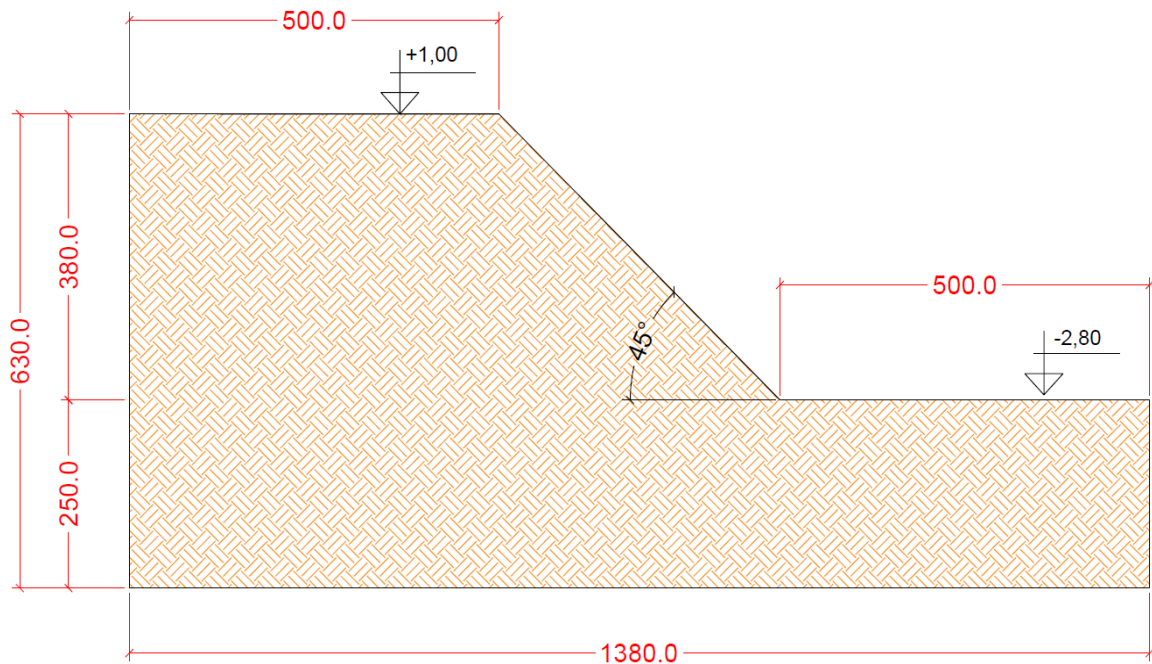
Fonte: Autor (2024)

3.1.3 Definição da geometria dos taludes e cenários de análise

A seção do talude em estudo foi extraída do projeto de fundações da obra estudada, sendo que para a abordagem do presente trabalho ela segue duas configurações principais. A

primeira, mostrada na Figura 18, com uma configuração padrão e inclinação de 45° com o pé do corte de solo, esse formato representa uma etapa intermediária de execução, objetivando uma observação da segurança durante os trabalhos de escavação.

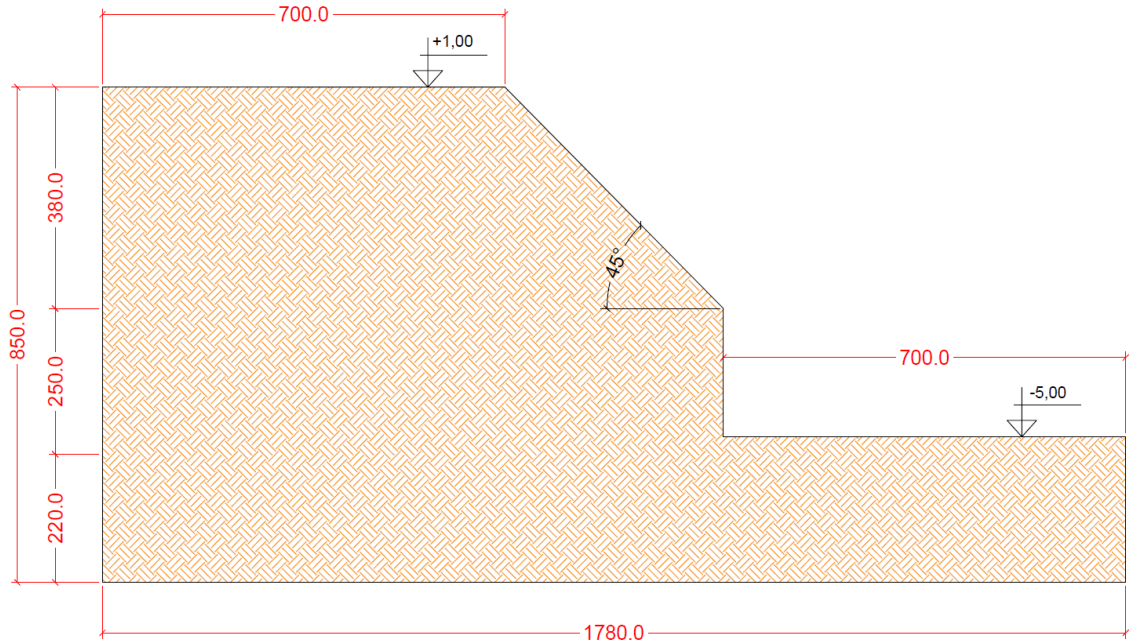
Figura 18 - Primeira geometria do talude



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2024)

Já a segunda tem um formato trapezoidal, conforme evidenciado na Figura 19. A angulação apresentada é de 45° , com algumas variações de pequenas dimensões na configuração em campo. Além disso, o corte inclinado ainda é descontínuo a uma cota de -2,80 m, chegando ao fundo a escavação, essa transição abrupta contribui para a concentração de tensões e favorece condições de instabilidade no maciço. Tal caracterização geométrica descrita se configura como a final do talude.

Figura 19 - Segunda geometria do talude



Fonte: Adaptado de Guiotti Cintra Engenharia (2024)

A conformação executiva do talude pode ser observada na Figura 20. Para a obtenção do corte foram utilizados maquinários pesados, característicos para o porte da escavação, com isso, analisou-se também uma configuração com acréscimo de tensões na crista do talude, a fim de que se verificasse a situação crítica.

Figura 20 - Configuração final do talude pós escavação



Fonte: Autor (2024)

3.1.4 Investigação Geotécnica de Campo

A investigação geotécnica da área de estudo foi realizada por meio de quatro furos de sondagem mista (rotativa e percussiva), conforme relatório elaborado pela empresa Técnica Sondagem e Tecnologia Ltda (2023). Os procedimentos seguiram os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6484:2020, com complementações das normas NBR 6502:2022, NBR 13441:2021 e DNER-PRO 102/1997. O objetivo principal foi determinar a estratigrafia do subsolo, a profundidade do nível freático e os parâmetros de resistência do terreno, fundamentais para a análise de estabilidade do talude gerado durante a escavação.

A metodologia aplicada consistiu inicialmente na utilização de trado concha até 1 metro de profundidade, seguido por trado helicoidal até a detecção do nível d'água. A partir daí, a perfuração foi realizada com lavagem por circulação de água e revestimento metálico, utilizando amostradores padrão com diâmetro externo de 50,8 mm. Foram registrados os valores de resistência à penetração (SPT), caracterizando o solo quanto à compactidade e consistência. Os resultados, presentes no APÊNDICE A, indicaram predominância de solos arenosos, do tipo areia siltosa com pedregulhos de quartzo, apresentando variação de fofa a muito compacta, e nível freático entre 4,5 m e 5,1 m de profundidade. As amostras foram acondicionadas em caixas de madeira para posterior classificação tátil-visual. Esses dados subsidiaram a modelagem geotécnica e o cálculo do fator de segurança do talude escavado.

3.2 Caracterização geotécnica do solo

A caracterização do solo por meio de ensaios laboratoriais define os parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade. Esses ensaios foram realizados para avaliar a composição granulométrica, o estado de consistência, a densidade e a resistência ao cisalhamento do solo, conforme recomendações normativas.

A aplicação desses procedimentos assegura a confiabilidade dos parâmetros geotécnicos que serão utilizados na modelagem computacional e na análise de estabilidade do talude. Além disso, o rigor na coleta, no manuseio e na execução dos ensaios é garante que os resultados representem com fidelidade as condições reais do solo em campo. A integração desses dados ao modelo analítico permite uma avaliação mais precisa da segurança da obra em estudo.

3.2.1 Coleta e preparação das amostras

Para a obtenção de amostras de solo representativas do talude em estudo, realizou-se a abertura de uma trincheira de formato quadrado, com profundidade situada em uma faixa intermediária do talude (aproximadamente 1,20 m). Essa profundidade foi escolhida de modo a caracterizar adequadamente as condições geotécnicas médias da região analisada. A partir da trincheira, foram coletadas amostras para a execução dos ensaios de laboratório, permitindo a determinação das propriedades físicas e mecânicas do solo, conforme ilustrado nas Figuras 21 e 22.

A coleta foi realizada seguindo procedimentos normatizados, garantindo a fidedignidade e a representatividade das amostras. Para amostras indeformadas, empregou-se a norma DNER-PRO 002/94, que estabelece critérios para retirada e preservação do solo sem alteração de sua estrutura natural. Já para amostras deformadas, utilizou-se a norma DNER-PRO 003/94, adequada à coleta de solos cujo rearranjo é aceitável para os ensaios previstos, assegurando a padronização do procedimento conforme práticas adotadas em estudos geotécnicos similares.

Figura 21 - Extração das amostras indeformadas.



Fonte: Autor (2025)

Figura 22 - Amostras de solo extraídas.



Fonte: Autor (2025)

Após a coleta e o armazenamento hermético das amostras de solo, deu-se início à sua preparação em conformidade com os preceitos estabelecidos pela norma técnica DNER-ME 041/94, intitulada “Solos – preparação de amostras para ensaios de caracterização”. Este procedimento assegurou que as amostras apresentassem condições adequadas e representativas para os ensaios laboratoriais subsequentes, minimizando alterações de suas propriedades físicas e estruturais. As etapas do processo de preparação incluíram a secagem ao ar, o destorroamento e o quarteamento do solo, permitindo a obtenção de frações homogêneas e de tamanho adequado para os ensaios. Nas Figuras 23, 24 e 25, estão ilustradas, respectivamente, cada uma dessas etapas, evidenciando o cuidado adotado na manipulação das amostras para garantir a confiabilidade e a padronização dos resultados.

Figura 23 - Secagem das amostras ao ar.



Fonte: Autor (2025)

Figura 24 - Destorroamento



Fonte: Autor (2025)

Figura 25 - Quarteamento



Fonte: Autor (2025)

3.2.2 Ensaio laboratoriais

O primeiro ensaio de caracterização realizado foi a determinação da densidade real do solo, conduzida de acordo com a norma DNER-ME 093/94, intitulada “Solos – determinação da densidade real”. Para este fim, utilizou-se o método do picnômetro, aplicado em três porções distintas da amostra, com o objetivo de garantir maior precisão e confiabilidade no valor obtido. Na Figura 26, observa-se os picnômetros em processo de resfriamento, após o aquecimento em chapa quente, etapa necessária para a aferição precisa da massa.

Figura 26 - Resfriamento dos picnômetros em banho de água



Fonte: Autor (2025)

Paralelamente, para a determinação do peso específico natural do solo (γ_{nat}), realizou-se a pesagem de amostras indeformadas, cujo volume foi calculado a partir das dimensões do cilindro biselado utilizado na extração. Esse procedimento permitiu que as propriedades naturais do solo fossem consideradas, refletindo fielmente sua densidade no estado em que se encontra no talude. Adicionalmente, a umidade higroscópica (w) foi determinada conforme os métodos de cálculo e os procedimentos de ensaio estabelecidos pela ABNT NBR 6457, garantindo que o teor de água presente no solo, mesmo em pequenas frações, fosse corretamente avaliado e incorporado nos cálculos de propriedades físicas. Estes ensaios, em conjunto, forneceram os parâmetros iniciais essenciais para a caracterização física do solo estudado.

Ademais, foram realizados os ensaios para determinação dos limites de Atterberg, essenciais para a caracterização da consistência e plasticidade do solo. A Figura 27 ilustra o

teste de Casagrande, utilizado para a determinação do limite de liquidez (LL), conduzido conforme os procedimentos estabelecidos pela norma técnica ABNT NBR 6459.

Figura 27 - Ensaio de LL no aparelho de Casagrande



Fonte: Autor (2025)

Em sequência, procedeu-se à execução do ensaio destinado à determinação do limite de plasticidade (LP), regido pela norma ABNT NBR 7180. A combinação dos resultados obtidos nos limites de liquidez e plasticidade fornece parâmetros para a análise geotécnica do solo, permitindo a correta interpretação das características reológicas.

Para fins de caracterização física do solo quanto à distribuição do tamanho de suas partículas, realizou-se o ensaio de análise granulométrica. Este procedimento compreendeu duas etapas principais, fundamentais para a determinação da composição granulométrica do solo. A primeira etapa consistiu na sedimentação, ilustrada na Figura 28, na qual foram obtidos os dados referentes às partículas mais finas, como silte e argila, por meio do teste de sedimentação, que permite avaliar o comportamento das frações finas em suspensão e sua distribuição relativa.

Figura 28 - Sedimentação



Fonte: Autor (2025)

A segunda etapa envolveu o peneiramento (Figura 29), processo utilizado para quantificar a distribuição de tamanho das partículas mais grosseiras, incluindo a fração arenosa e eventuais pedregulhos. Por meio da passagem do solo por uma série de peneiras com malhas calibradas, foi possível determinar os percentuais de massa correspondentes a cada faixa de dimensão, fornecendo uma visão detalhada da composição do solo.

Figura 29 - Peneiramento mecânico



Fonte: Autor (2025)

A combinação das informações obtidas nas etapas de sedimentação e peneiramento permite a obtenção de um perfil granulométrico completo, essencial para a classificação do solo e para a análise de suas propriedades mecânicas e de compactação, fornecendo subsídios importantes para projetos de engenharia civil e geotécnica.

Por fim, foi realizado o ensaio de cisalhamento direto, conduzido em conformidade com os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 12092 (ABNT, 2011). Nesse ensaio, aplicaram-se ao corpo de prova tensões normais previamente definidas, com o objetivo de simular, de forma controlada, o estado de tensões existente no solo em condições de campo. O procedimento permitiu observar o comportamento do solo até o momento da ruptura, fornecendo informações essenciais sobre sua resistência ao cisalhamento.

A partir das resistências mobilizadas nos planos de ruptura, foram determinados os valores da coesão (c) e do ângulo de atrito interno (ϕ), determinados pela construção da reta envolvente de Mohr-Coulomb, permitindo a definição dos parâmetros geotécnicos de grande importância para a avaliação da estabilidade do talude.

3.3 Modelagem Computacional da Estabilidade

3.3.1 Escolha do *software* e parâmetros

Foi utilizado o software GeoStudio, desenvolvido pela GEOSLOPE International Ltd., devido à sua ampla aceitação acadêmica e profissional na análise geotécnica. O programa oferece ferramentas específicas para avaliação de estabilidade de taludes, como o módulo SLOPE/W, que permite análises de tensão no solo. A escolha deste software justifica-se pela sua capacidade de aplicar métodos de equilíbrio-limite consagrados (Bishop, Morgenstern-Price e Fellenius), além de permitir a modelagem de cenários críticos com condições de saturação e acréscimo de tensões, atendendo aos objetivos do estudo.

A geometria do talude foi modelada no SLOPE/W com base no projeto de fundações e escavação. A seção transversal foi representada em escala real, incluindo: altura e inclinação do talude (45° conforme projeto); nível do lençol freático posicionado conforme dados de sondagem, considerando o pior caso (4,5 m abaixo do nível do terreno).

A malha de elementos finitos foi ajustada para refinar a análise em zonas críticas, como o pé do talude e interfaces entre camadas. Os parâmetros geotécnicos determinados nos ensaios laboratoriais foram inseridos no software, incluindo: coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ), obtidos no ensaio de cisalhamento direto, e peso específico saturado (γ_{sat}).

3.3.2 Aplicação dos métodos de equilíbrio-limite

Foram aplicados os métodos de equilíbrio-limite disponíveis no SLOPE/W. Método de Bishop Simplificado para análises preliminares de superfícies circulares de ruptura. Método de Morgenstern-Price para avaliação iterativa de superfícies e maior precisão nos resultados. Método de Fellenius como referência comparativa, embora menos preciso em solos saturados. O fator de segurança (FS) e a superfície crítica (com menor FS), foram calculados e identificados de acordo com cada um dos cenários dispostos no Quadro 2, para avaliar a sensibilidade do talude a condições adversas de execução.

Quadro 2 - Cenários de análise de estabilidade

Cenário de Análise	Configuração
Cenário 1	Talude com a primeira geometria (intermediária).
Cenário 2	Segunda geometria (final do talude).
Cenário 3	Geometria final com acréscimo de tensões de 20kPa na crista.

Fonte: Autor (2025)

3.3.3 Interpretação dos fatores de segurança obtidos

Os resultados obtidos nas análises foram posteriormente confrontados com os valores mínimos de fator de segurança (FS) estabelecidos pela NBR 11682 (ABNT, 2009), de modo a verificar a conformidade das condições de estabilidade do talude com os critérios normativos, identificando situações de risco. O Quadro 4 resume as faixas de FS e suas implicações para a estabilidade do talude:

Quadro 3 - Faixas de Fator de Segurança

Fator de Segurança (FS)	Classificação	Implicações para o Talude
$FS \geq 1,5$	Estável	Condição segura, atendendo aos requisitos normativos para taludes permanentes.
$1,3 \leq FS < 1,5$	Marginalmente estável	Requer monitoramento e/ou medidas preventivas, como drenagem superficial.
$1,0 \leq FS < 1,3$	Potencialmente instável	Necessidade de intervenções estruturais para evitar ruptura progressiva.
$FS < 1,0$	Instável	Risco iminente de deslizamento; medidas de contenção urgentes são necessárias.

Fonte: Autor (2025)

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos ao longo do estudo, abrangendo a caracterização física e mecânica do solo e a execução das análises de estabilidade. São expostos os parâmetros determinados em laboratório, os produtos das modelagens, bem como os fatores de segurança resultantes das simulações realizadas, permitindo compreender o comportamento do maciço em diferentes condições avaliadas.

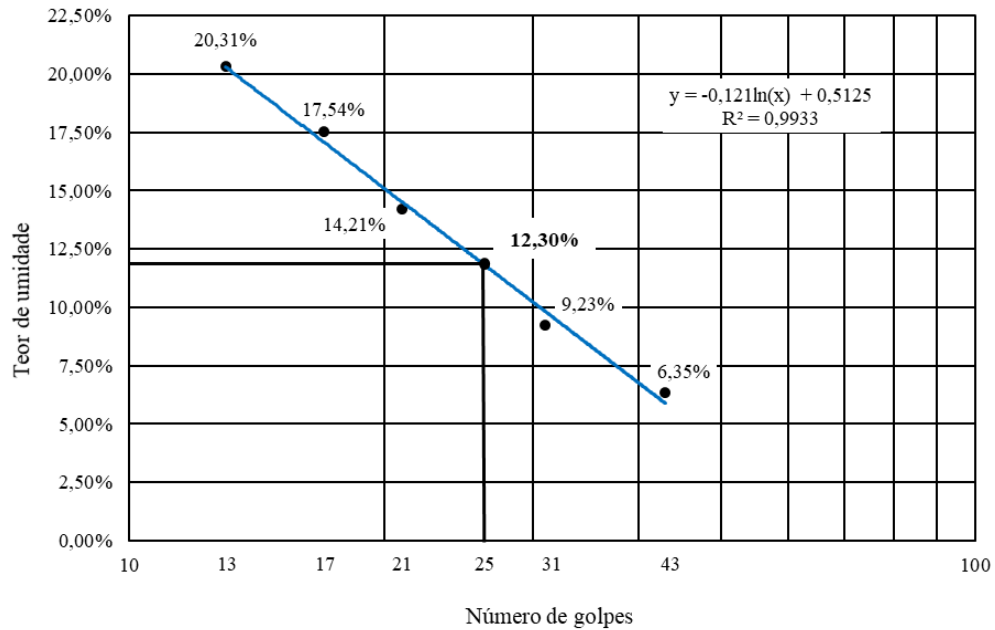
Além disso, expõem-se os resultados numéricos provenientes das análises numéricas executadas no software, possibilitando a comparação entre as metodologias de cálculo. Por meio dessa sistematização, identificam-se os fatores que mais influenciaram na estabilidade do talude, contribuindo para uma avaliação integrada e fundamentada do desempenho geotécnico da área estudada.

4.1 Ensaios laboratoriais

O produto obtido do ensaio de densidade real do solo (G_s) foi de 2,64, onde o valor resultante é a média dos dados obtidos dos três picnômetros ensaiados. O valor do peso específico natural do solo (γ_{nat}), encontrado por meio da pesagem volumétrica da amostra, foi de 14,82 kN/m³. Outrossim, a umidade higroscópica do material (w) foi calculada e resultou em 0,14%.

Nos ensaios de limites e Atterbegh, mais especificamente no ensaio de limite de liquidez, foram coletados os dados de número de golpes e retiradas as amostras para cálculo da umidade, tais valores foram compilados e serviram como parâmetro para produção do Gráfico 1, onde podemos concluir que a umidade do LL é de 12,30% para o solo em estudo.

Gráfico 1 - Ensaio de limite de liquidez (LL)



Fonte: Autor (2025)

Todavia, no ensaio de limite de plasticidade não foi possível realizar todo o procedimento especificado por norma, conforme evidenciado na Figura 30, em que o material apresenta fragmentação antes mesmo de atingir um cilindro de 3mm de diâmetro. Sendo assim, a ABNT NBR 7180 considera a amostra como não apresentando limite de plasticidade (NP) e, conseqüentemente, o índice de plasticidade anotado foi não plástico (NP). O resumo dos resultados dos limites de Atterbergh podem ser observados na Tabela 2.

Figura 30 - Procedimento do ensaio de LP



Fonte: Autor (2025)

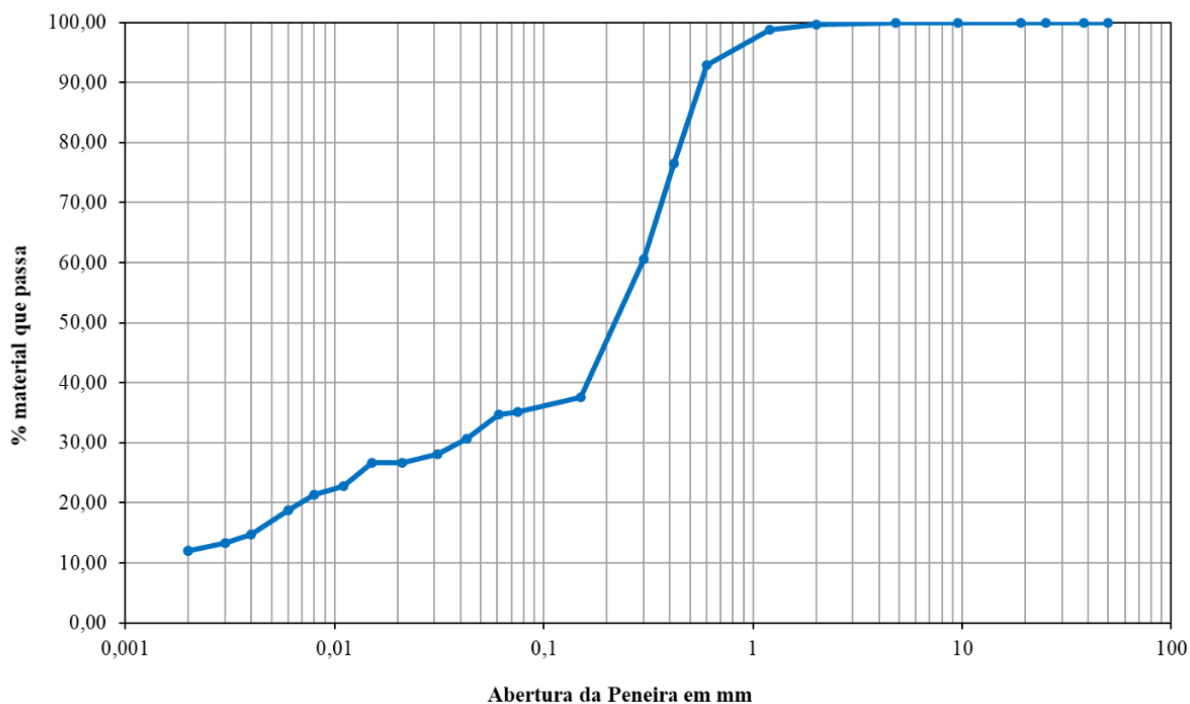
Tabela 2 - Resultados dos ensaios de limites de Atterbergh

Parâmetro	Resultado
Limite de Liquidez (LL)	12,30%
Limite de Plasticidade (LP)	NP
Índice de Plasticidade (IP)	NP

Fonte: Autor (2025)

A curva granulométrica do solo está demonstrada no Gráfico 2. A forma ascendente e suavemente inclinada da curva indica um solo composto majoritariamente por areia com frações finas distribuídas ao longo da granulometria, não se tratando de um material totalmente uniforme.

Gráfico 2 - Curva granulométrica do solo



Fonte: Autor (2025)

A partir da curva verificou-se que o solo apresenta predominância de frações arenosas, com 35,22% passando na peneira nº 200 (0,075 mm), caracterizando presença significativa de finos incorporados à matriz de areia. A distribuição das partículas mostrou uma variação contínua ao longo da faixa granulométrica, com os valores de D10, D30, D60 e resultados de coeficientes de uniformidade C_u e curvatura C_c evidenciados na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise granulométrica

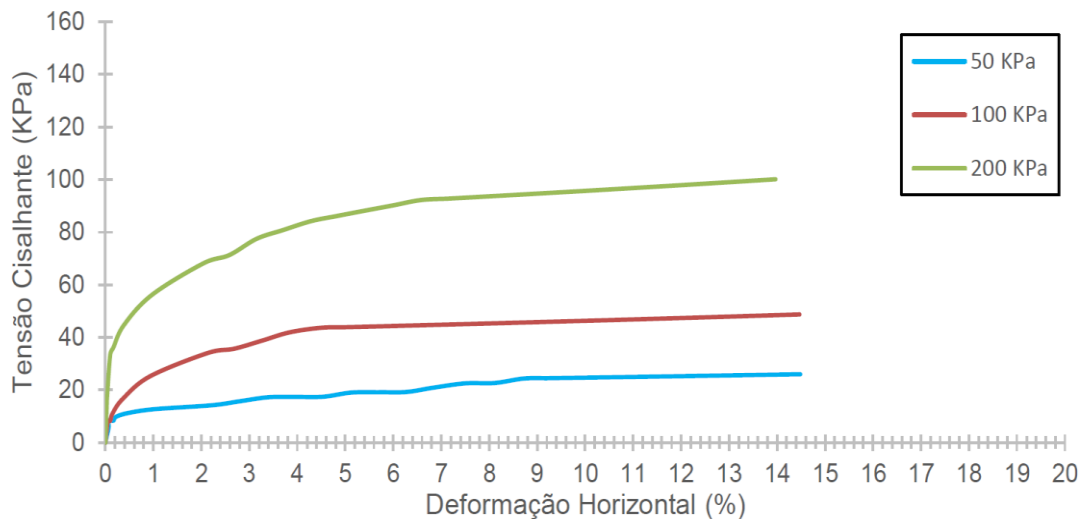
Parâmetros	Resultados
D10	0,002
D30	0,039
D60	0,290
Cu	145,00
Cc	2,62

Fonte: Autor (2025)

Esses valores demonstram um material bem graduado dentro da fração arenosa, apresentando ampla distribuição de tamanhos de partículas. Segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), é possível enquadrar esse material como uma areia siltosa (SM).

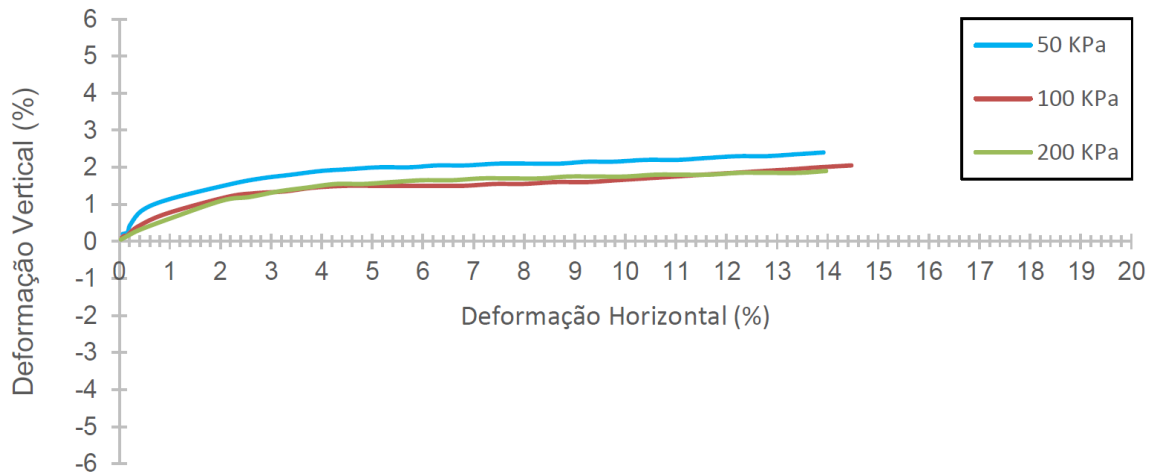
O ensaio de cisalhamento direto, realizado com aplicação das tensões normais de 50, 100 e 200kPa, permitiu a geração de três gráficos para análise do comportamento mecânico do solo, são eles: Gráfico 3 que mostra a relação entre a tensão cisalhante (kPa) e a deformação horizontal (%); Gráfico 4, no qual foram obtidas as relações entre as deformações verticais e horizontais; Gráfico 5 de tensão cisalhante por tensão normal em kPa.

Gráfico 3 - Tensão cisalhante x deformação horizontal



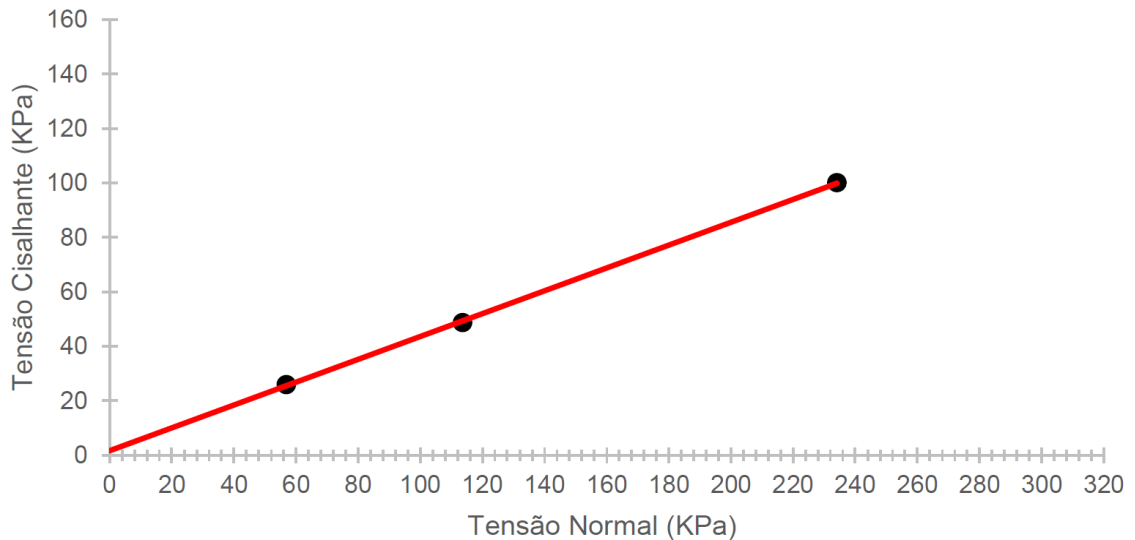
Fonte: SLOPEGEO GEOTECHNICS (2025)

Gráfico 4 - Deformação vertical x deformação horizontal



Fonte: SLOPEGEO GEOTECHNICS (2025)

Gráfico 5 - Tensão cisalhante x tensão normal



Fonte: SLOPEGEO GEOTECHNICS (2025)

A partir dos gráficos de tensão e deformação e da envoltória de resistência foi possível se obter o valor de $22,69^\circ$ para o ângulo de atrito do solo. Além disso, ainda foi determinada a coesão do material, igual a 1,70 kPa.

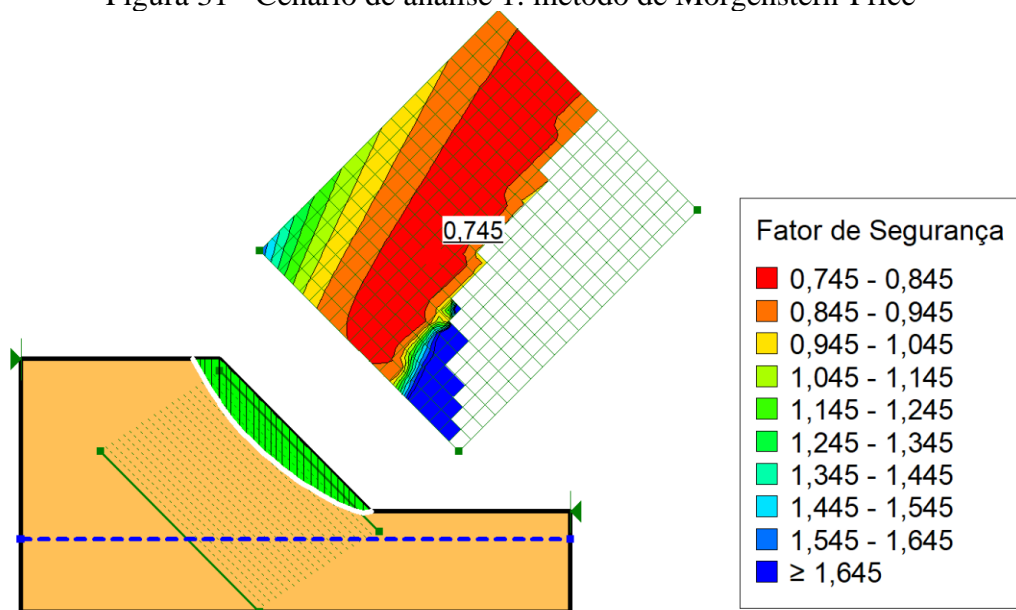
4.2 Simulações de estabilidade dos taludes no software

As análises das simulações numéricas obtidas no GeoStudio para os três cenários de estabilidade demonstram que todos os métodos empregados resultaram em fatores de segurança inferiores a 1,0, evidenciando condição de instabilidade e iminência de ruptura dos taludes em todas as situações avaliadas, até mesmo em fase de escavação parcial. Portanto, os resultados

obtidos nas simulações evidenciam que, nas condições adotadas, os taludes necessitariam de obras de contenção para evitar a ruptura. A seguir estão expostas as condições de análise inseridas no software, bem como os resultados de fatores de segurança (FS) para cada cenário e método de cálculo adotado.

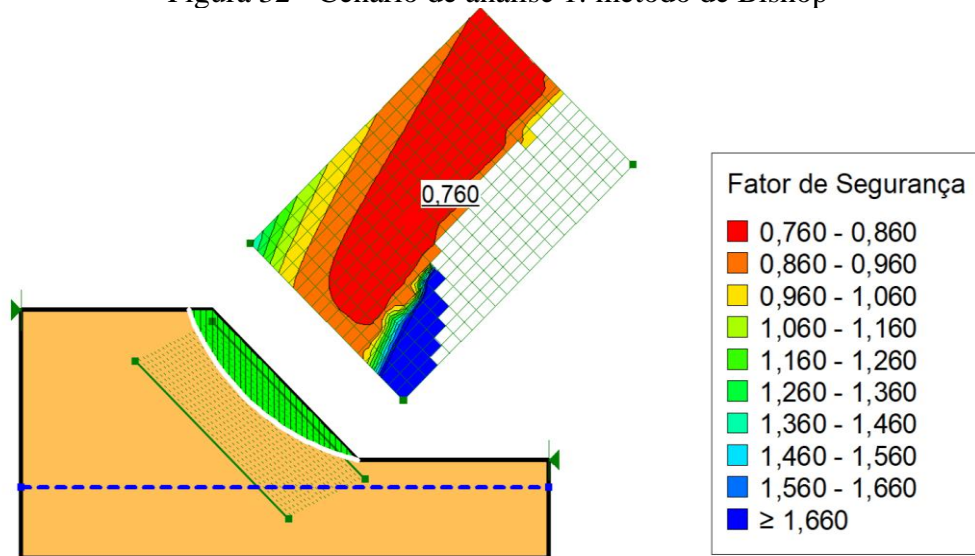
No primeiro cenário, correspondente à geometria intermediária executiva, os resultados mostraram superfícies de ruptura com formatos majoritariamente circulares nos métodos de Morgenstern-Price (Figura 31) e Bishop Simplificado (Figura 32), concentrando a ruptura entre a metade da altura do talude e o pé da encosta. O método de Fellenius (Figura 33), por sua vez, apresentou uma superfície de ruptura mais irregular, isso se deve provavelmente à simplificação das interações entre lamelas, o que tende a concentrar a superfície crítica em certas áreas da geometria. O método de Morgenstern-Price apresentou um resultado intermediário entre as análises, refletindo sua capacidade de considerar interações entre fatias e geometrias menos restritas.

Figura 31 - Cenário de análise 1: método de Morgenstern-Price



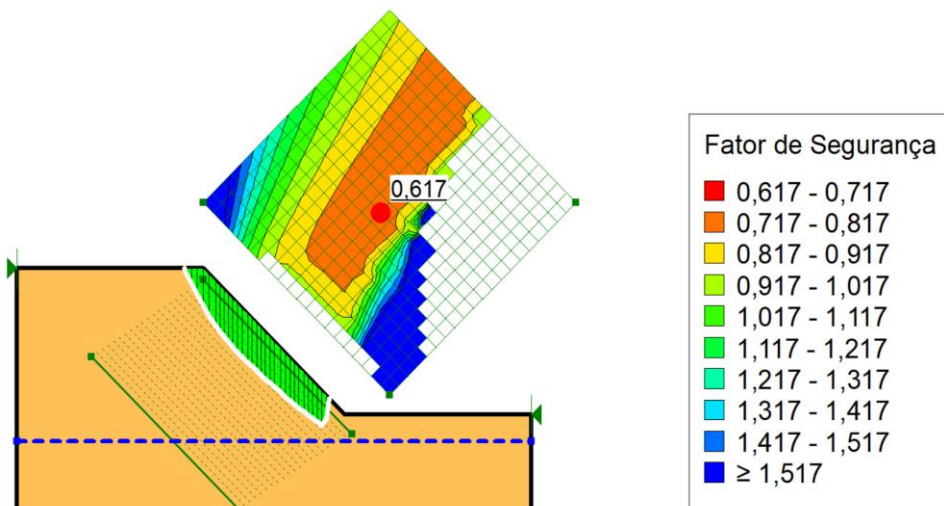
Fonte: GeoStudio (2025)

Figura 32 - Cenário de análise 1: método de Bishop



Fonte: GeoStudio (2025)

Figura 33 - Cenário de análise 1: método de Fellenius

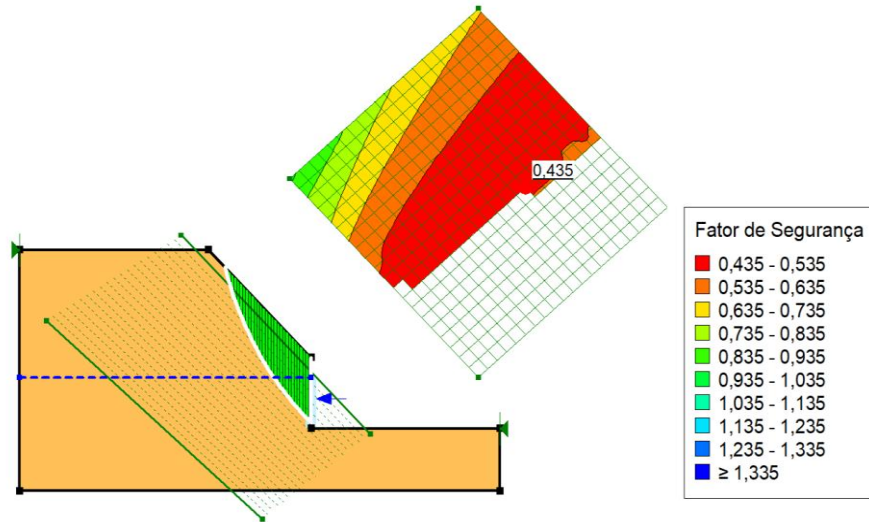


Fonte: GeoStudio (2025)

No segundo cenário, com o talude final em formato trapezoidal e apresentando a descontinuidade em aproximadamente -2,80 m, a distribuição de tensões passou a ser significativamente influenciada pela mudança geométrica da seção. Os métodos de Fellenius (Figura 36) e Bishop (Figura 35) e Morgenstern-Price (Figura 34) mostraram rupturas que tendem a atravessar diretamente a região dessa descontinuidade, concentrando tensões e produzindo superfícies de ruptura mais inclinadas e profundas. O método de Morgenstern-Price, por identificar rupturas mais suaves e distribuídas, resulta em formas não necessariamente circulares, sendo assim sua análise gerou um valor intermediário entre os

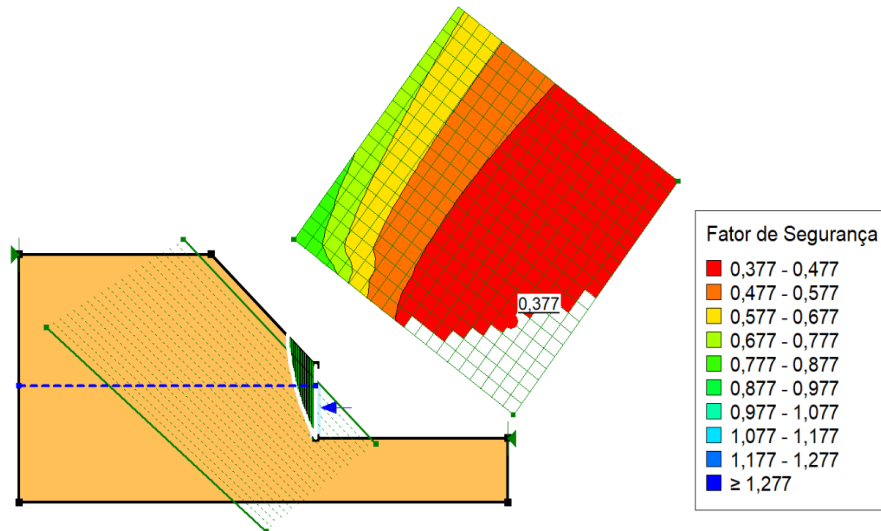
métodos, o que está alinhado com sua formulação mais completa de equilíbrio. Em todos os casos, os fatores de segurança permaneceram abaixo de 1,0.

Figura 34 - Cenário de análise 2: método de Morgenstern-Price



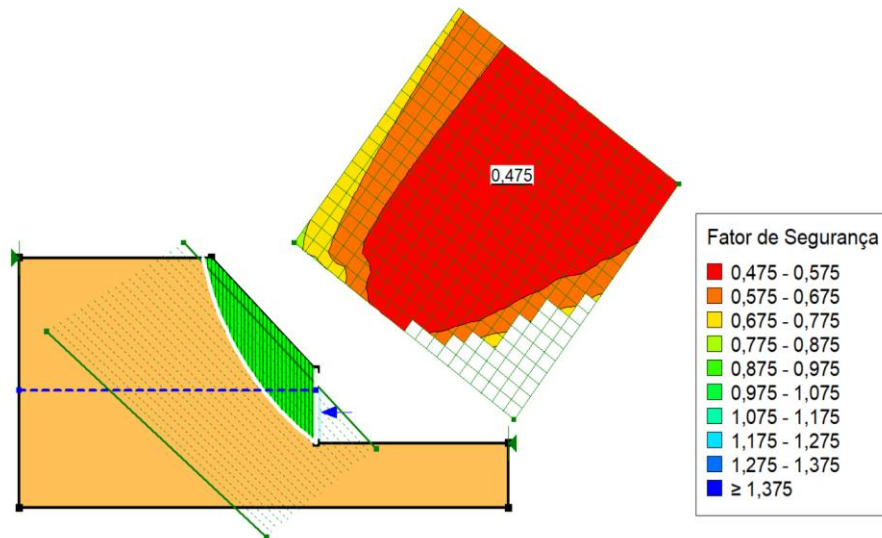
Fonte: GeoStudio (2025)

Figura 35 - Cenário de análise 2: método de Bishop



Fonte: GeoStudio (2025)

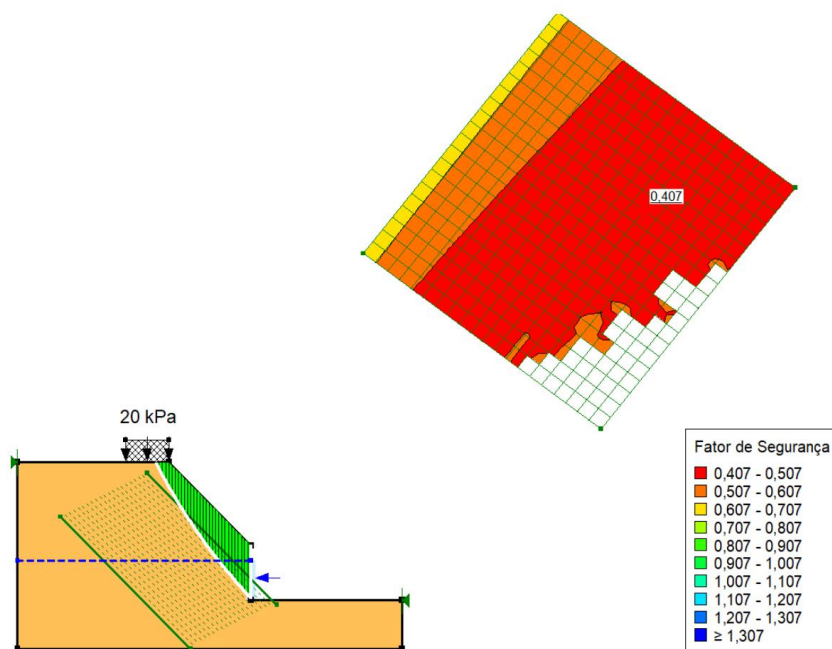
Figura 36 - Cenário de análise 2: método de Fellenius



Fonte: GeoStudio (2025)

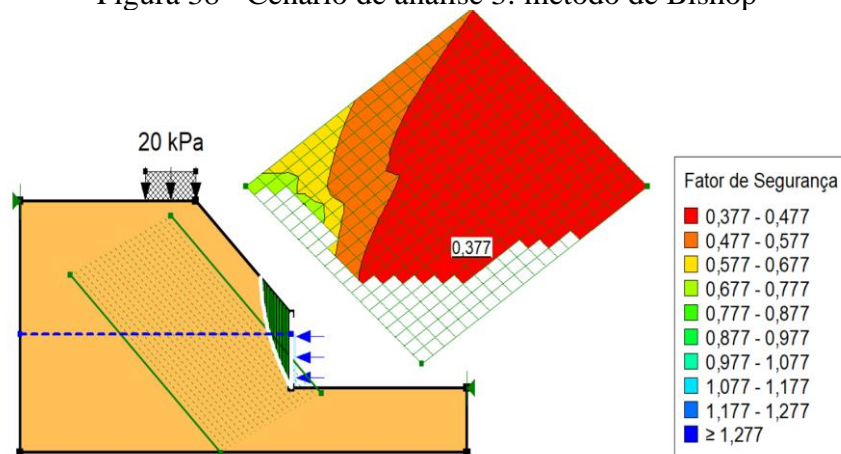
A inclusão da carga no terceiro cenário agravou a condição de estabilidade, reduzindo ainda mais os fatores de segurança obtidos. Os métodos de análise apresentaram deslocamento da superfície de ruptura para regiões mais profundas, indicando maior mobilização de tensões cisalhantes ao redor do pé do talude. Assim como nos cenários anteriores, todos os resultados se mantiveram abaixo do valor mínimo normativo, eles podem ser vistos nas Figuras 37, 38, e 39.

Figura 37 - Cenário de análise 3: método de Morgenstern-Price



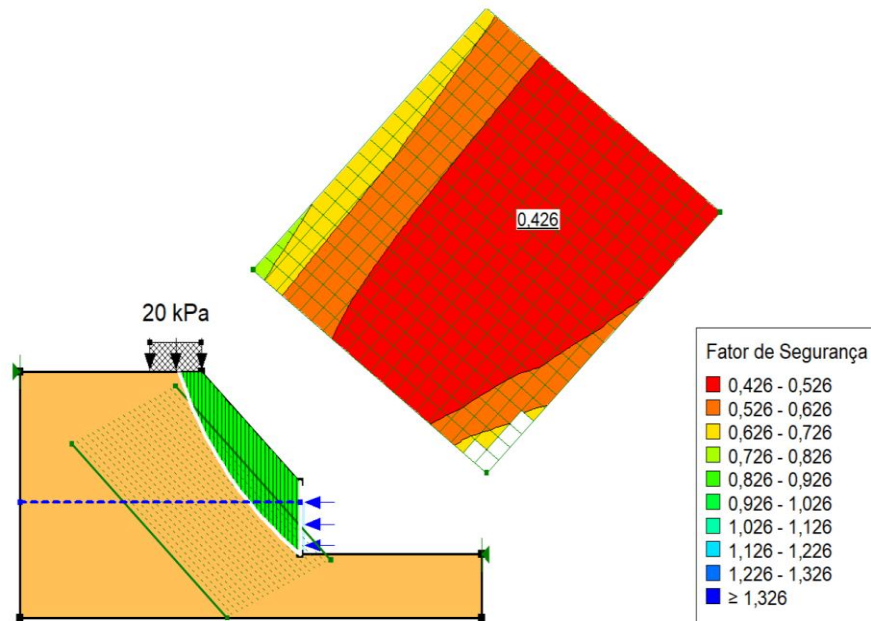
Fonte: GeoStudio (2025)

Figura 38 - Cenário de análise 3: método de Bishop



Fonte: GeoStudio (2025)

Figura 39 - Cenário de análise 3: método de Fellenius

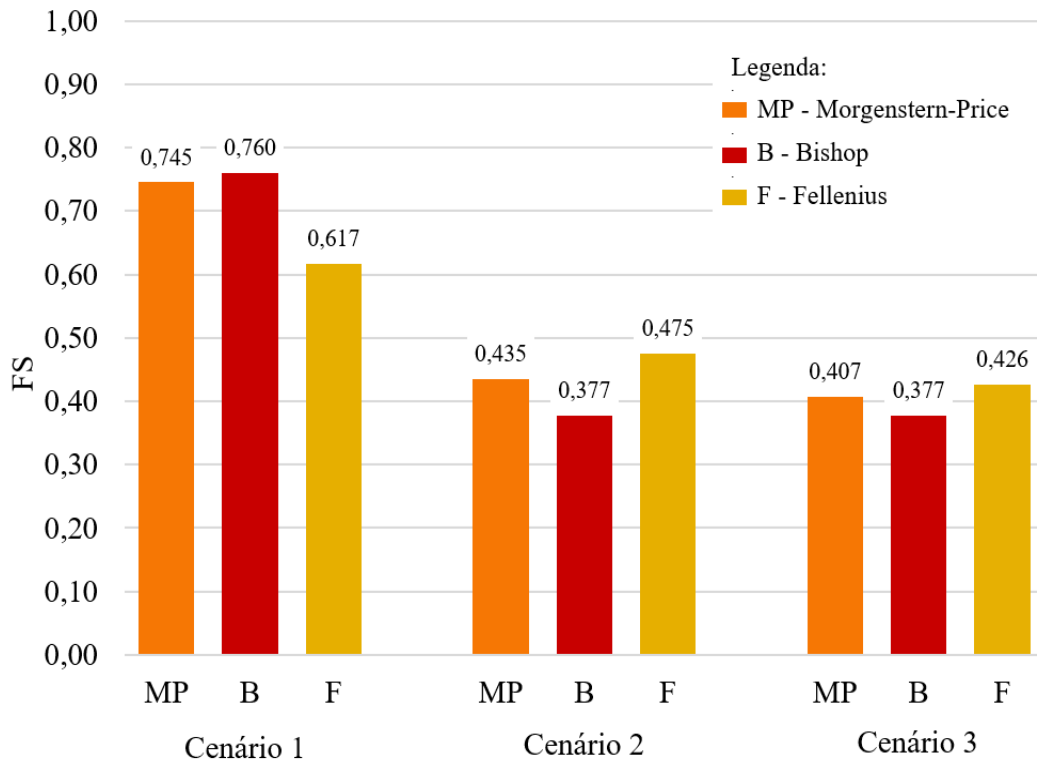


Fonte: GeoStudio (2025)

4.3 Análise comparativa entre métodos de equilíbrio limite

A interpretação final dos resultados consolida-se na análise do Gráfico 6, com o comparativo dos fatores de segurança, nele observa-se que todos os métodos forneceram valores inferiores a 1,0, caracterizando falha em todas as simulações. Em síntese, o solo de baixa coesão e resistência ao cisalhamento dependente essencialmente da tensão efetiva, mostrou comportamento compatível com os fatores de segurança obtidos nas simulações, acentuados pela condição de saturação e as poropressões no maciço.

Gráfico 6 - Fatores de segurança (FS) resultantes nos cenários de análise



Fonte: Autor (2025)

De forma concomitante, fica evidente pelo Gráfico 6 que método de Morgenstern-Price apresentou sistematicamente os valores menos extremos, ou seja, aqueles mais equilibrados entre resistência e carregamento, quando comparado aos métodos de Bishop e Fellenius, que produziram variações mais acentuadas de cenário para cenário. Tal comportamento decorre de sua formulação mais completa, que equilibra momentos e forças de forma simultânea, representando com maior realismo o comportamento tridimensional simplificado do talude modelado. Assim, ainda que o talude se encontre em condição de instabilidade em todos os casos, o método de Morgenstern-Price é o que melhor traduz a resposta física esperada.

5 CONCLUSÕES

Ao analisar o comportamento do talude formado durante a escavação para implantação do radier estaqueado no empreendimento localizado na Orla 14, em Palmas-TO, foi possível compreender a complexidade do conjunto de fatores que controlam a estabilidade de um maciço constituído predominantemente por solo arenoso com frações siltsosas, submetido a cortes profundos e à presença de nível freático relativamente raso. Ao longo do estudo observou-se que a integração entre investigação de campo, caracterização laboratorial e modelagem computacional permitiu estabelecer um diagnóstico sólido e coerente sobre o estado real da área e sua predisposição a rupturas.

Nesse sentido, o trabalho contribuiu ao reunir informações essenciais sobre as condições geotécnicas locais, consolidando dados fundamentais para análises futuras e decisões de engenharia. A avaliação da caracterização do solo e o tratamento dos resultados dos ensaios possibilitaram confirmar que a região apresenta solos pouco coesivos, granulares e suscetíveis à perda de resistência quando submetidos a variações de umidade e a geometrias de talude mais agressivas, como observado na obra. Desse modo, a análise permitiu confrontar a literatura geotécnica com a realidade específica do terreno, evidenciando que pequenas alterações na geometria ou nas cargas atuantes podem modificar significativamente o comportamento global do maciço.

Da inspeção da área, verificou-se que o talude executado apresentou descontinuidade em um dos patamares, o que contribuiu para intensificar tensões internas e favorecer superfícies potenciais de ruptura mais profundas. A presença desse patamar intermediário, aliada à inclinação acentuada do corte, tornou o talude mais vulnerável, principalmente diante de acréscimos de carga na crista, seja por equipamentos ou acúmulo de materiais. O levantamento geométrico realizado desempenhou papel fundamental para representar adequadamente no modelo as condições reais da obra, garantindo coerência entre campo e simulação.

A caracterização do solo reforçou sua natureza granular e a significativa passagem na peneira nº 200, confirmando a presença de frações finas responsáveis por alterar o comportamento hidráulico, mas sem conferir ligações efetivas entre as partículas. A baixa coesão observada, combinada ao valor moderado do ângulo de atrito interno, indicou que o solo, embora capaz de suportar esforços em condições drenadas, perde capacidade resistente quando exposto a cortes mais verticais ou a variações de umidade — cenário compatível com o encontrado na escavação. Assim, ficou clara a predominância do atrito como mecanismo principal de resistência, o que eleva a sensibilidade do maciço a qualquer perturbação.

A modelagem computacional no SLOPE/W permitiu visualizar com clareza as diferentes possibilidades de deslocamento do solo ao longo do talude. Nos cenários simulados — geometria intermediária, geometria final com descontinuidade e situação com carregamento adicional na crista — observou-se que os fatores de segurança permaneceram consistentemente abaixo de 1,0. Essa condição indica tendência à instabilidade, confirmando que o talude, nas configurações analisadas, não possui condições de equilíbrio adequado, sobretudo quando submetido a incrementos de tensão ou à presença de água no interior do maciço. Em particular, o cenário com carga adicional evidenciou maior mobilização de esforços de cisalhamento, demonstrando que o maciço opera muito próximo de suas condições limites.

Comparando os métodos de equilíbrio limite, verificou-se que cada formulação apresentou particularidades coerentes com suas hipóteses de cálculo. O método de Fellenius mostrou superfícies mais conservadoras e valores baixos de fator de segurança; Bishop Simplificado apresentou configurações circulares mais estáveis; já Morgenstern-Price, por equilibrar forças e momentos, forneceu resultados intermediários e mais adequados às irregularidades geométricas. Esses comportamentos reforçam que a adoção de apenas um método poderia induzir interpretações restritas, e que a análise comparativa, de fato, enriqueceu substancialmente o entendimento do problema.

Com base em todos esses elementos, conclui-se que o talude estudado apresenta condição de instabilidade nas configurações analisadas, sendo indispensável considerar medidas mitigadoras ou corretivas sempre que houver necessidade de novas escavações, permanência da geometria existente ou execução de estruturas próximas à borda. Tais medidas, aplicadas de forma combinada ou isolada conforme exigência do local, são capazes de restabelecer fatores de segurança compatíveis com a prática da engenharia geotécnica.

Por fim, o estudo demonstra que intervenções em solos granulares com finos, especialmente quando envolvem cortes profundos e presença de água, requerem planejamento adequado, controle rigoroso da geometria e constante monitoramento das condições do maciço. A análise desenvolvida neste trabalho contribui para essa compreensão ao apresentar uma avaliação detalhada e fundamentada, servindo como referência para futuras ações de projeto, execução e acompanhamento de obras que enfrentem desafios semelhantes.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Solo - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682: Estabilidade de Encostas.** Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12092: Solo - Ensaio de cisalhamento direto.** Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484: Solo - Sondagem de simples reconhecimento.** Rio de Janeiro, 2020.
- ASTM, D. 3-9 et al. **Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.** D3080/D3080M, v. 3, n. 9, 2011.
- AZEREDO, Hélio Alves de. **O edifício até sua cobertura.** São Paulo: Edgard Blucher, 1977.
- BOWLES, Joseph E.; GUO, Yingzhong. **Foundation analysis and design.** New York: McGraw-hill, 1996.
- CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson. **Fundações por estacas: projeto geotécnico.** Oficina de Textos, 2011.
- CIVILIZAÇÃO ENGENHEIRA. **Tipos de fundação: qual a melhor para cada obra?** Civilização Engenharia, 23 mar. 2018.
- CLARO, Andreyr. **Guia técnico essencial sobre muros de arrimo: projeto e execução.** LinkedIn. 2025.

CRUDEN, David Milne; VARNES, D. J. **Landslide types and processes**. Transportation Research Board, Special Report, n. 247, p. 36-75, 1996.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

DÉCOURT, Luciano; QUARESMA, Artur R. **Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Rio de Janeiro: ABMS, 1978. p. 45-53.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-PRO 002/94: **Coleta de amostras indeformadas de solos**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-PRO 003/94: **Coleta de amostras deformadas de solos**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 041/94: **Solo – Determinação da umidade**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 93/94: **Solo – Determinação da densidade real**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DUNCAN, J. Michael; WRIGHT, Stephen G.; BRANDON, Thomas L. **Soil strength and slope stability**. John Wiley & Sons, 2014.

DUTRA, Vinícius Araújo de Souza. **Projeto de estabilização de taludes e estruturas de contenção englobando dimensionamento geotécnico e estrutural**. 2013.

DYMINSKI, Andréa Sell. **Noções de estabilidade de taludes e contenções**. Curitiba: UFPR, 2007. (Notas de aula).

ESTUDE ENGENHARIA. **Fundações profundas: o que considerar em cada tipo**. Estude Engenharia, 2025.

FALCONI, Frederico et al. **Fundações: teoria e prática**. Editora Oficina de Textos. São Paulo, 1998.

GERSCOVICH, Denise M. S. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GUIOTTI CINTRA ENGENHARIA. **Projeto executivo de fundações**, Obra em Palmas–TO. Goiânia: Guiotti Cintra Engenharia, 2024.

HENNEBERG, Fernanda Aparecida. **Riscos em execução de fundações: roteiro para gestão de saúde e segurança em execuções de escavações e de fundações**. 2013.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. **Soil mechanics SI version**. John Wiley & Sons, 2008.

MASSAD, Faiçal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MATTOS, Kelly Cristina Andrade. **Processos de instabilização em taludes rodoviários em solos residuais arenosos: estudo na Rodovia Castello Branco (SP-280), Km 305 a 313**. 2009.

NOGUEIRA, Nuno Alexandre Castanheira Cruz. **Análise de estabilidade de taludes artificiais: técnicas e métodos para avaliação da estabilidade**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Lisboa, Lisboa.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

ROUSSELET, E. S.; FALCÃO, C. A. **Segurança na obra: manual técnico de segurança do trabalho em edificações prediais**. Rio de Janeiro: SENAI, 1999.

ROXOR. **Solo grampeado: a solução inteligente para estabilizar taludes e garantir segurança em obras**. ROXOR, 2025.

SILVA, Stefanny Lavínia da. **Análise de estabilidade dos taludes da barragem Santo Anastácio: estudo de caso**. 2023.

SOUZA, Ruiteir da Silva. **Análise dos fatores de interação entre estacas em radier estaqueado: comparação entre duas ferramentas numéricas**. 2010.

TÉCNICA SONDAGEM E TECNOLOGIA LTDA. **Relatório de sondagem mista Orla 14, Palmas-TO**. Palmas: Técnica Sondagem e Tecnologia Ltda, 2023. 12 p.

TQS INFORMÁTICA LTDA. **Curso de Fundações - Nível 1**. Disponível em: <https://www.tqs.com.br/us/tqscourses/details/184>. Acesso em: 8 jun. 2025.

TURRA, Matheus. **Análise de estabilidade global do talude do arroio dilúvio através do software Slide 2**. 2024.

APÊNDICE A – LAUDO DE SONDAGEM

Ext.: 50,8 mm Int.: 34,9 mm Ø Amostrador		Altura de queda: 75 cm Peso: 65 kgf Escala vertical: 1:100 Sistema: Manual		Cota da boca do furo: 100,05 m Revestimento: 16,00 m Nível d'água: 4,50 m		Coordenadas																
						Norte: 8.871.624,00 m																
						Este: 788.721,00 m																
						Fuso: 22S Datum:																
Perfuração: CR-Cravação TH-Trado Helicoidal Revestimento																						
N.A.	Rev. / Perf. (m)	SPT			Nº de Golpes Penetração 30 cm		Resistência à Penetração × Profundidade				Prof. (m)	Classificação do Material										
		1ª	2ª	3ª	1ª + 2ª	2ª + 3ª	1ª + 2ª	2ª + 3ª	Recuperação	RQD												
	Ø						0	10	20	30	40											
							0	25	50	75	100 (%)											
	1,00																					
		3	2	4	5	6								Areia siltosa, amarela, pouco compacta a fofa,								
		15	15	15																		
		4	3	1	7	4								Areia siltosa com pedregulhos médios de quartzo, amarela, pouco compacta a fofa,								
		15	15	15																		
		3	3	2	6	5								Areia siltosa com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, medianamente compacta a muito compacta,								
		15	15	15																		
		4	3	3	7	6								Areia siltosa com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, medianamente compacta a muito compacta,								
		15	15	15																		
		3	2	2	5	4								Areia com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, muito compacta,								
		15	15	15																		
		4	5	6	9	11								Areia com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, muito compacta,								
		15	15	15																		
		10	9	11	19	20								Areia com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, muito compacta,								
		15	15	15																		
		9	10	10	19	20								Areia com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, muito compacta,								
		15	15	15																		
		11	8	12	19	20								Areia com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, muito compacta,								
		15	15	15																		
		10	15	30	25	45/28								Areia com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, muito compacta,								
		15	15	13																		
		12	18	30	30	48/27								Areia com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, muito compacta,								
		15	15	12																		
		12	17	30	29	47/29								Areia com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, muito compacta,								
		15	15	14																		
		18	12	30	30	42/29								Areia com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, muito compacta,								
		15	15	14																		
		10	12	30	22	42/25								Areia com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, muito compacta,								
		15	15	10																		
		30	-	-	30/13	-								Areia com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, muito compacta,								
		13																				
		30	-	-	30/12	-								Areia com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, muito compacta,								
		12																				
ROD (%): 0 a 24 - Muito pobre (MP) 25 a 49 - Pobre (P) 50 a 74 - Regular (R) 75 a 89 - Boa (B) 90 a 100 - Excelente (E)				Alteração: A0 - Sã A1 - Pouco alterada A2 - Medianamente alterada A3 - Muito alterada A4 - Extremamente alterada				Consistência: C0 - Muito consistente C1 - Consistente C2 - Medianamente consistente C3 - Pouco consistente C4 - Sem consistência				Fraturamento: F0 - Ocasionalmente fraturada F1 - Pouco fraturada F2 - Medianamente fraturada F3 - Muito fraturada F4 - Extremamente fraturada		Inclinação: 90° <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Ø</th> <th>De (m)</th> <th>Até (m)</th> </tr> <tr> <td>NW</td> <td>0,00</td> <td>17,07</td> </tr> </table>			Ø	De (m)	Até (m)	NW	0,00	17,07
Ø	De (m)	Até (m)																				
NW	0,00	17,07																				

Ext.: 50,8 mm Int.: 34,9 mm		Altura de queda: 75 cm Peso: 65 kgf		Cota da boca do furo: 100,05 m Revestimento: 16,00 m		Coordenadas								
Ø Amostrador		Escala vertical: 1:100		Nível d'água: 4,50 m		Norte:	8.871.624,00 m							
Ø Revestimento: 63,5 mm		Sistema: Manual				Este:	788.721,00 m							
						Fuso: 22S	Datum:							
Perfuração: CR-Cravação TH-Trado Helicoidal														
N.A.	Rev. / Perf. (m)	SPT			Nº de Golpes Penetração 30 cm	Cota (m)	Resistência à Penetração × Profundidade					Prof. (m)	Classificação do Material	
		Golpes 15 cm												
		1ª	2ª	3ª			1ª + 2ª	2ª + 3ª	Recuperação	RQD				
						0	10	20	30	40				
						0	25	50	75	100 (%)				
	R:R:RW 17,07	30	-	-	30/7	-	17					17,07	Areia com pedregulhos grossos de quartzo, amarela, muito compacta, Obs.: Paralisada por definição do contratante ou seu preposto (5.2.4.1/6.2.4.1 NBR 6484:2020).	
							18							
							19							
							20							
							21							
							22							
							23							
							24							
							25							
							26							
							27							
							28							
							29							
							30							
							31							
							32							
							33							
RQD (%): 0 a 24 - Muito pobre (MP) 25 a 49 - Pobre (P) 50 a 74 - Regular (R) 75 a 89 - Boa (B) 90 a 100 - Excelente (E)			Alteração: A0 - Sã A1 - Pouco alterada A2 - Medianamente alterada A3 - Muito alterada A4 - Extremamente alterada			Consistência: C0 - Muito consistente C1 - Consistente C2 - Medianamente consistente C3 - Pouco consistente C4 - Sem consistência			Fraturamento: F0 - Ocasionalmente fraturada F1 - Pouco fraturada F2 - Medianamente fraturada F3 - Muito fraturada F4 - Extremamente fraturada			Inclinação: 90° Ø De (m) Até (m) NW 0,00 17,07		