

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MAICON ROBERTO RIZZON

ESTABILIDADE DOS SOLOS NA ESCAVAÇÃO DE VALAS

São Leopoldo

2021

MAICON ROBERTO RIZZON

ESTABILIDADE DOS SOLOS NA ESCAVAÇÃO DE VALAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil, pelo Curso de
Engenharia Civil da Universidade do Vale
do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Felipe Gobbi Silveira

São Leopoldo

2021

RESUMO

Dentre as atividades relacionadas com construção civil no Brasil a escavação de valas está presente, sem dúvida, na maioria delas, haja visto a necessidade de implantação de tubulações de água e esgoto nas edificações ou em qualquer obra de infraestrutura que, dentre outros, escave valas para drenagem, fundações e assentamento de tubulações diversas. Associado a esta importante atividade não são incomuns as notícias veiculadas sobre acidentes de trabalho com perdas humanas e materiais. Diante deste contexto, o trabalho pretende aprimorar os conhecimentos sobre estabilidade de taludes, realizando análises de instabilidade paramétricas, levando em consideração algumas configurações de valas e parâmetros geomecânicos do solo que mais influenciam no fator de segurança associado à escavação. As variações adotadas para as valas foram baseadas na alteração da profundidade de um metro até três metros e na inclinação das paredes, entre 63° e 90° em relação ao fundo. Já os parâmetros avaliados foram a coesão do solo, o ângulo de atrito interno entre as partículas do solo, o peso específico aparente natural e a poropressão. As simulações realizadas demonstraram a importante relevância e consequente interferência no fator de segurança de parâmetros como a coesão do solo, a presença de água no maciço terroso, a variação na profundidade da vala e sua configuração geométrica na atividade de escavação de valas sem solo.

Palavras-chave: escavação de valas; fator de segurança; poropressão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resistência ao cisalhamento pelo arranjo das partículas do solo	22
Figura 2 – Exemplo de rastejo.....	24
Figura 3 – Exemplo de corrida	25
Figura 4 – Exemplo de escorregamento circular ou rotacional.....	26
Figura 5 – Exemplo de escorregamento planar ou translacional.....	27
Figura 6 – Exemplo de escorregamento do tipo em cunha	27
Figura 7 – Ilustração de colapso	28
Figura 8 – Movimentos de queda envolvendo fragmentos de rocha	29
Figura 9 – Tombamento de blocos.....	29
Figura 10 – Rolamento de blocos ou matacões	30
Figura 11 – Forças atuantes em uma fatia segundo o método do Talude Infinito.....	31
Figura 12 – Parâmetros envolvidos na análise do método da espiral ou Rendulic ...	32
Figura 13 – Método do círculo de atrito ou de Taylor	32
Figura 14 – Método das fatias de Fellenius, relação de parâmetros	33
Figura 15 – Método de Bishop para deslizamento rotacional.....	34
Figura 16 – Escoramento do tipo pontaleamento	36
Figura 17 – Escoramento do tipo descontínuo	37
Figura 18 – Escoramento do tipo contínuo.....	38
Figura 19 – Escoramento especial	39
Figura 20 – Blindagem metálica em uso como escoramento de vala	40
Figura 21 – Recorte de imagem gerada no programa <i>Slide</i> mostrando uma das configurações de vala utilizadas (vala reta de 2m).....	44
Figura 22 – Recorte de imagem gerada no programa <i>Slide</i> mostrando uma das configurações de vala utilizadas (vala inclinada 1H:2V de 3m).....	45
Figura 23 – Recorte de imagem gerada no programa <i>Slide</i> mostrando o resultado de uma simulação (vala reta de 1m)	46
Figura 24 – Recorte de imagem gerada no programa <i>Slide</i> mostrando o resultado de uma simulação (vala inclinada de 2m)	46
Figura 25 – Projeto de escoramento utilizado para determinar as solicitações exercidas pelo solo na vala	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – FS para variação do ângulo de atrito interno e peso específico do solo vala de 1m	48
Gráfico 2 – FS para variação do ângulo de atrito interno e peso específico do solo vala de 2m	49
Gráfico 3 – FS para variação do ângulo de atrito interno e peso específico do solo vala de 3m	50
Gráfico 4 – FS para variação do ângulo de atrito interno e peso específico do solo vala de 1m com inclinação das paredes de 63°	51
Gráfico 5 – FS para variação do ângulo de atrito interno e peso específico do solo vala de 2m com inclinação das paredes de 63°	52
Gráfico 6 – FS para variação do ângulo de atrito interno e peso específico do solo vala de 3m com inclinação das paredes de 63°	53
Gráfico 7 – Fatores de segurança para variação da coesão	54
Gráfico 8 – Fatores de segurança para variação da coesão	55
Gráfico 9 – Fatores de segurança para variação da coesão	55
Gráfico 10 – Variação do FS por parâmetro - vala de 1m	56
Gráfico 11 – Variação do FS por parâmetro - vala de 2m	57
Gráfico 12 – Variação do FS por parâmetro - vala de 3m	57
Gráfico 13 – Ficha mínima, em metros, para variação da coesão do solo	59
Gráfico 14 – Ficha mínima, em metros, para variação da coesão do solo	60
Gráfico 15 – Solicitação de tensão horizontal na linha de estroncas do escoramento	61
Gráfico 16 – Solicitação de tensão horizontal na linha de estroncas do escoramento	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na segunda avaliação do fator de segurança.....	47
Tabela 2 – Parâmetros utilizados para avaliação do fator de segurança	54
Tabela 3 – Parâmetros geomecânicos utilizados no dimensionamento de um tipo de estrutura de escoramento	58

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ART	Anotação de Responsabilidade Técnica
FS	Fator de Segurança
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira
NR	Norma Regulamentadora
PIB	Produto Interno Bruto
SESI	Serviço Social da Indústria
SPT	Standart Penetration Test
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	Resistência ao cisalhamento
σ_h'	Tensão efetiva horizontal
σ_v	Tensão do solo até o ponto de análise
σ_v'	Tensão efetiva horizontal do solo
σ	Tensão de cisalhamento
γ_n	Peso específico aparente natural do solo
ϕ	Ângulo de atrito interno entre as partículas do solo
c	Coesão do solo
dh	Varição da altura ou profundidade
k	Tensão horizontal na ruptura por descarregamento lateral
u	Tensão exercida pela poropressão
Δ	Varição do parâmetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	11
1.1.1 Objetivo geral	11
1.1.2 Objetivos específicos	11
1.2 JUSTIFICATIVA	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 SEGURANÇA.....	13
2.2 REFERÊNCIAS NORMATIVAS	18
2.3 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES	21
2.3.1 Resistência ao cisalhamento dos solos	21
2.3.2 Estabilidade de taludes	23
2.3.2.1 Rastejos	24
2.3.2.2 Corridas	24
2.3.2.3 Escorregamentos	25
2.3.2.4 Subsidências e colapsos	28
2.3.2.5 Movimentos de blocos rochosos	28
2.3.3 Métodos de Cálculo na Estabilidade de Taludes	30
2.3.3.1 Talude infinito	31
2.3.3.2 Método da espiral logarítmica para ruptura circular	31
2.3.3.3 Método de Taylor para ruptura circular.....	32
2.3.3.4 Ábacos de Taylor para ruptura circular.....	33
2.3.3.5 Método sueco ou das fatias em seção circular.....	33
2.3.3.6 Método de Bishop para ruptura curva	34
2.4 MÉTODOS DE ESCORAMENTO DE VALAS.....	34
3 METODOLOGIA	41
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
4.1 INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ATRITO E PESO ESPECÍFICO APARENTE NATURAL DO SOLO	47
4.1.1 Valas com ângulo de 90° das paredes em relação ao fundo (1H:1V)	47
4.1.2 Valas com ângulo de 63° das paredes em relação ao fundo (1H:2V)	51
4.2 INFLUÊNCIA DA COESÃO DO SOLO.....	53
4.3 CÁLCULO DE ESCORAMENTO	58

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....63
REFERÊNCIAS.....65

1 INTRODUÇÃO

A construção civil no Brasil promove um importante papel no desenvolvimento econômico e social, pois sozinha ela absorve uma expressiva parcela da mão-de-obra brasileira, além de representar 1,6% do Produto Interno Bruto (PIB) do país, ano de referência 2019 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2021). Infelizmente, atrelado a este importante setor econômico também há acidentes de trabalho, sendo que, em 2019, foram 3.925 acidentes, o que representou 4,07% do total ocorrido no ano (BRASIL, 2021).

Dentre as inúmeras atividades construtivas que englobam o setor da construção civil, uma significativa parcela necessita realizar algum tipo de escavação de vala, seja para instalação de tubulações de água, esgoto, drenagem, gás, iluminação, alguns tipos fundação, energia, entre outras. Conforme a Norma Brasileira (NBR) 12.266:1992, a definição de vala é a abertura feita no solo, por processo mecânico ou manual, com determinada seção transversal, destinada a receber tubulações (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1992).

A falta de bibliografia e conteúdo específico que abordem de forma prática e de fácil leitura, a estabilidade de valas, especificamente o colapso de suas paredes, foi o principal motivador para o desenvolvimento deste trabalho. Vários são os fatores que podem influenciar na estabilidade de uma escavação do tipo vala: a exemplo do comportamento dos constituintes do solo, seus parâmetros geomecânicos, a profundidade da escavação, a configuração geométrica da vala, as construções e ocupações próximas, o nível do lençol freático, entre outros.

Ainda associado a casos de colapso de paredes, cabe citar a falta de conhecimento e a baixa instrução dos profissionais envolvidos, a negligência com os aspectos de segurança da atividade, a não realização de investigação geotécnica e/ou cadastro para determinar fatores de influência próximos, a não execução de projeto e outros. Assim sendo, esta monografia pretende estudar os fatores e índices do solo que devem, primordialmente, ser considerados, a fim de se promover escavações de valas que possam ser executadas mantendo-se um coeficiente de segurança mínimo aceitável.

Salienta-se que este estudo versa sobre a escavação de valas em solos, não sendo abordado outros tipos de escavações e nem outros materiais, como em rocha, por exemplo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo do trabalho é determinar quais parâmetros geomecânicos do solo mais influenciam a estabilidade das paredes em uma escavação de vala em solo, bem como a interferência de sua configuração geométrica e presença ou não de umidade no maciço terroso.

Este trabalho limitar-se-á no desenvolvimento de simulações baseadas no uso de um programa computacional de geotecnia. Assim sendo, envolvendo alguns parâmetros geomecânicos do solo para avaliar suas influências, quanto ao fator de segurança, no que tange a estabilidade das paredes de alguns tipos de valas escavadas em solos homogêneos.

1.1.2 Objetivos específicos

A fim de alcançar o objetivo geral, faz-se necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

- a) avaliar o comportamento do fator de segurança na estabilidade das paredes para a escavação de valas em solo;
- b) identificar os principais índices e parâmetros geomecânicos do solo que mais influenciam na estabilidade das valas;
- c) determinar a interferência da presença ou não de água na sensibilidade do fator de segurança na escavação de valas; e
- d) estudar diferentes configurações geométricas de valas e avaliar seu comportamento quanto a estabilidade de suas paredes.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os riscos de acidentes envolvendo vidas humanas associados à escavação de valas são bem consideráveis, quase sempre há a necessidade de os trabalhadores terem que acessar o fundo da vala para realizar os trabalhos.

Mesmo no ambiente acadêmico, a nível de graduação, as grades curriculares são restritas de informações relacionadas a análise de risco quanto a estabilidade de

escavações. Quando estende-se este horizonte para o meio operacional, ou seja, na obra, a falta de conhecimento dos profissionais envolvidos é bastante evidente. Ainda para corroborar vê-se comumente as avaliações geotécnicas serem negligenciadas nas obras envolvendo escavação, em maior número nas pequenas e médias empresas e/ou construtoras.

Infelizmente, são comuns as notícias relacionadas a acidentes com vítimas fatais provocados por colapso de paredes em valas ou escavação, nas referências bibliográficas, conforme descrito no item 2.1 segurança, onde estão apresentados alguns fatos mais recentes veiculados sobre acidentes.

Segundo dados do Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho de 2017, os acidentes de trabalho na construção civil chegaram a 30.025, equivalente a 5,46% de todos os casos. Já o número de afastamentos ao trabalho neste setor, por mais de 15 dias, atingiu 8,3% correspondente a 11.894 casos (BRASIL, 2017).

Tendo em vista o elevado histórico de acidentes em uma atividade comum, como a escavação de valas, é justificável um estudo que aprofunde os conhecimentos neste assunto, visando apontar a necessidade de diretrizes para estas atividades. Bem como, o resultado deste trabalho pode subsidiar profissionais que atuam neste ramo da construção civil a otimizar seus recursos, priorizando a verificação de determinados parâmetros e poderem alcançar maiores índices de segurança com menores investimentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A escavação de valas é uma etapa comum em diversos tipos de obras lineares como as de implantação de redes de água e esgoto, gasodutos e drenagem pluvial. Em obras de pequeno e médio porte como construção de prédios, casas ou instalações industriais, as valas são geralmente escavadas para instalação dos sistemas hidrossanitários ou fundações.

Outra considerável parcela das escavações realizadas em valas é utilizada para a manutenção das estruturas referidas acima.

2.1 SEGURANÇA

Medidas de segurança no ambiente de trabalho sempre devem ser tratadas como prioridade. Nas atividades relacionadas a escavação de valas, elas jamais podem ser negligenciadas. A preservação da integridade física dos profissionais envolvidos deve ser tratada como pilar principal num projeto de escavação, as questões técnico-financeiras devem buscar soluções que contemplem isso.

O número de casos de lesões e perdas de vidas humanas atribuídas ao colapso de taludes com consequente soterramentos são bem expressivas, como pode ser visto pelas matérias publicadas a seguir:

Na zona norte de Porto Alegre, em 29 de julho de 2020, foi noticiada a morte de um operário após acidente, com possível soterramento, em escavação de canteiro de obras (OPERÁRIO, 2020).

Segundo notícia veiculada na Rádio Itatiaia de Minas Gerais (KIFER, 2020), trabalhador foi soterrado em escavação de vala em obra de uma casa na Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Outra notícia associada ao soterramento foi no Oeste de Santa Catarina quando um idoso ficou coberto por, aproximadamente, quatro metros cúbicos de terra enquanto realizava trabalhos de escavação em uma vala (IDOSO..., 2020).

Na zona rural em escavação de vala, para assentamento de tubulação no estado do Paraná, o Instituto de Criminalística envolvido no caso relatou que não fizeram uso de nenhum tipo de escoramento e que as normas de segurança não haviam sido cumpridas. O Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Paraná

também informou, para este caso, que a obra não possuía projeto ou engenheiro responsável (INSTITUTO, 2019).

Por fim, a notícia da morte de um operário na Grande João Pessoa, no estado da Paraíba, onde o laudo elencou as principais causas do acidente, quais foram: a vala de escavação já possuía indícios de desmoronamentos pretéritos, evidenciados por sua variação na profundidade (entre 1,7 m e 2,5 m); o material removido da vala estava depositado nas bordas da escavação promovendo sobrecarga aos taludes; o transito de veículos e pessoas, por falta de sinalização, acontecia nas proximidades da escavação; o solo em todo perímetro da vala era visualmente não coeso e possuía variações significativas; a não execução de análises geológicas/geotécnicas do local; ausência de Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) da atividade de escavação; e não cumprimento das medidas de segurança aos trabalhadores (LAUDO, 2019).

Não tão importante como a perda de vidas humanas, porém também relevante, são as indenizações trabalhistas e embargos de obras que, dependendo do porte da empresa executora, é fator determinante para seu fechamento e falência.

As questões envolvendo segurança associados a estabilidade de taludes são uma problemática persistente das Engenharias Civil e Geotécnica. Em muitas obras a avaliação da segurança de taludes é o principal item a ser considerado no projeto (GERSCOVICH, 2016).

Conforma preconiza o Serviço Social da Indústria (SESI, 2019), segundo o Manual de Segurança e Saúde no Trabalho para escavação na indústria da construção as questões de segurança na escavação devem ter três pilares principais:

- a) o planejamento, que aborda a fase anterior a execução onde estão englobados o projeto, as recomendações e medidas de segurança a serem implantadas;
- b) a fase de execução, que deve implantar os itens planejados; e
- c) a verificação, que preconiza a implantação de ferramentas, na fase de execução, para acompanhar as medidas de segurança implantadas.

Na etapa de planejamento é fundamental que se identifique os fatores de risco associados as atividades relacionadas à escavação, estabelecendo medidas de controle que balizem ações e que tenham como objetivo conduzir os trabalhos de forma a promover a prevenção dos acidentes (SESI, 2019).

Para a etapa de verificação, a NBR 9.061:1985 define o conceito de acompanhamento, sendo a observação detalhada de sua execução; e a instrumentação, que é a utilização de instrumentos de medição para acompanhar com precisão e em tempo hábil a tomada de ações, e identificar possíveis alterações no estado de equilíbrio da área de escavação e de estruturas próximas (ABNT, 1985).

Outro fator importante é a plena integração, dentro das corporações, companhias e empresas, e formação de uma equipe multidisciplinar formada pelos profissionais das áreas de segurança e saúde do trabalhador, de planejamento e de projeto (SESI, 2019). Esta equipe deve ser a mais experiente possível neste processo construtivo.

O Ministério da Economia, através da Secretaria Especial de Previdência e Trabalho, regula as atividades de escavação relacionadas a indústria da construção por meio da Norma Regulamentadora NR-18, atualizada em fevereiro de 2021 (BRASIL, 2021). Segundo a mesma, o serviço de escavação, fundação e, ainda, o desmonte de rochas, deve sempre ser executado conforme projeto elaborado por profissional legalmente habilitado.

A NR-18:2021 ainda determina que, quando houver riscos, as áreas influenciadas por tal atividade devem ter sinalização de advertência, inclusive noturna, e barreira de isolamento em todo o seu perímetro, assim impedindo que pessoas e veículos não autorizados se ponham em risco.

Outra determinação muito importante da NR-18:2021 é a definição de que qualquer escavação que ultrapasse 1,25 metros de profundidade deve, obrigatoriamente, ser iniciada somente com a liberação e autorização de profissionais com habilitação legal para tal. O profissional deve considerar no projeto as características do solo, as cargas atuantes, escadas ou rampas como saída em caso de emergência, os riscos aos trabalhadores envolvidos e não menos importante as medidas de proteção contra acidentes.

Ainda norteado pela NR-18:2021, estão as recomendações de, sempre que possível, desviar o tráfego e ser tomadas medidas preventivas para eliminar o risco de acidentes quando de escavações terem interferência em cabos elétricos, dutos de gás, tubulações de água, esgoto ou drenagem e outros.

As principais causas de acidentes relacionados à execução de escavações, segundo SESI (2019) são: sobrecargas próximas as bordas dos taludes; execução de taludes inadequados; elevação ou redução na pressão exercida pela umidade do solo;

vibrações nas adjacências da escavação; escavações abaixo do lençol freático; escavações sob condições meteorológicas adversas; interferências de cabos elétricos, cabos de telefone, de redes de água, redes de esgoto, drenagem e redes de gás natural; ausência ou má sinalização das vias próximas; falta de espaço suficiente para a operação e movimentação de máquinas; operadores e/ou máquinas e equipamentos não qualificados/inadequados; desconhecimento das características da composição do solo a ser escavado e das condições das edificações no entorno da obra; ausência ou implantação inadequada de contenções; e, sequência executiva inadequada no processo de escavação e escoramento.

Importante ferramenta para auxiliar no processo de segurança dentro das incorporações/empresas é a criação de orientações, manuais, guias orientativos de boas práticas voltadas aos envolvidos em todo o processo com intuito de nivelar e dar ciência a todos da importância dos procedimentos de segurança no que tange a escavação de valas.

A NBR 9.061:1985 (ABNT, 1985) define que para execução de escavações é indispensável realizar um levantamento topográfico do terreno, cadastrar as edificações vizinhas contendo minimamente o tipo, cota de assentamento das fundações e distância da borda da escavação, levantar as redes de utilidade pública, além de obrigar que estes levantamentos e cadastros devem abranger uma faixa, de no mínimo, duas vezes a profundidade máxima da borda da escavação. Ainda recomenda que, caso seja necessária a remoção de obstáculos tais como raízes, árvores, blocos de rocha e fundações antigas, devem ser efetuados com precaução, principalmente quando da necessidade do uso de explosivos.

Tão importante quanto avaliar as questões que envolvem o entorno da escavação é realizar uma caracterização geotécnica no subsolo da região de interferência, através de seções geotécnicas-geológicas longitudinais e transversais, em número suficiente para perfeita caracterização da escavação (ABNT, 1985).

A caracterização de terrenos atravessados, com suas respectivas profundidades, descontinuidades superficiais de escorregamento, além de indicar o(s) nível(s) do lençol freático também solicitado na NBR 9.061:1985 (ABNT, 1985).

A estabilidade das paredes de uma escavação deve ser garantida durante todas as etapas de execução, devendo-se considerar a perda parcial de coesão entre as partículas do solo, podendo estas serem influenciadas, entre outras, pela expansibilidade, formação de fendas ou rachaduras e por ressecamento de solos

argilosos (ABNT, 1985). Ainda referente a estabilidade, a mesma norma preconiza que, a verificação dela deve atender aos casos de ruptura de fundo, ruptura hidráulica, além das rupturas gerais e localizadas dos taludes.

O conceito de fator de segurança foi criado para estabelecer uma relação entre o estado incipiente de ruptura do solo e o estado de segurança absoluta ao colapso deste mesmo solo (ABRAHÃO e VELLOSO, 1998). Este conceito está presente nos cálculos que subsidiam os projetos de escavação, contenção e escoramento de valas. Os métodos e processos de escavação escolhidos devem atingir o máximo fator de segurança quanto possível (ABNT, 1985). Mas, a NBR 9.061:1985 regulamenta que, para os casos gerais, este coeficiente seja no mínimo de 1,5, contudo podendo, até chegar, em condições de uso, a 1,2 quando as justificativas relacionadas as características geotécnicas, geológicas e hidrológicas dos terrenos sejam comprovadamente adequadas.

A NBR 11.682:2009 (ABNT, 2009) também traz em seu conteúdo a definição sobre fator de segurança, fazendo a relação entre os esforços resistentes, ou seja, a tensão máxima cisalhante do solo, e a resistência que um solo pode mobilizar e assim mantando-se estável ao longo de uma superfície de ruptura.

As medidas protetivas, definidas pela NBR 9.061:1985 (ABNT, 1985), utilizadas nas paredes de uma escavação, devem servir para dar segurança e evitar acidentes com danos materiais e humanos e são classificadas, segundo a mesma norma, em três tipos, a saber: quanto a forma da proteção; quanto ao tipo de apoio que recebem as cortinas e quanto a rigidez estrutural das cortinas.

Tendo em vista que o foco deste projeto é estudar a escavação de valas em solo, as informações do item 9 da NBR 9.061:1985 (ABNT, 1985) se fazem fundamentais e trazem a recomendação de que sejam realizadas seções transversais, ao sentido da vala, que tragam as informações do tipo e qualidade do material a ser escavado.

Como medida de segurança também, a NBR supracitada recomenda que os acessos para permitir a circulação das máquinas e operários devam ser amplos e permitirem durante todo o tempo a vazão dos trabalhadores em caso de emergência. Outras instruções são dadas pela mesma norma, como transporte do material escavado, reaterro e compactação que não terão enfoque neste trabalho.

Ainda, no que tange à escavação de valas em solo, a NBR 9.061:1985 (ABNT, 1985) alerta sobre ser realizada a verificação da ruptura hidráulica e o carreamento

de partículas finas se tratando de solos arenosos e da estanqueidade das proteções adotadas quando a escavação estiver acontecendo em solos argilosos muito moles.

2.2 REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Neste item serão listadas as principais normas nacionais, tanto de cunho obrigatório (Normas Regulamentadoras – NRs) como aquelas que preconizam pela qualidade e desempenho (NBRs), que trazem em seu arcabouço informações relevantes no tocante a estabilidade de taludes em solo.

Inicialmente será abordado o conteúdo da NBR 11.682:2009 – Estabilidade de Encostas e de Taludes (ABNT, 2009) que tem como seu principal objetivo fixar as condições no estudo e controle da estabilidade de encostas considerando sempre a minoração dos efeitos causadores de instabilidade. A saber, a supracitada norma também rege sobre as condições de estudos e projetos, na etapa de implantação/execução, no acompanhamento e na manutenção destas obras ou serviços.

As obras lineares, segundo a NBR 11.682:2009 (ABNT, 2009), onde inclusive se enquadram as valas que são o âmago deste trabalho, além de estradas, dutovias e ferrovias devem levar em conta em seus estudos e projetos a geologia, geomorfologia, direção e mergulho de rochas, presença de colúvios, dentre outras em todo o traçado a ser executado.

Ainda na NBR 11.682:2009 (ABNT, 2009) tem-se a abordagem sobre as sete atividades que, cronologicamente, podem ser adotadas no processo de estabilização de encostas ou na diminuição dos efeitos gerados por suas instabilidades, sendo: a etapa de procedimentos preliminares a primeira, seguido da etapa de investigação e coleta de dados para embasar investigações topográficas, geotécnicas, geológicas, hidrogeológicas e geomorfológicas; a etapa de projeto; a etapa compreende as atividades relacionadas a execução da obra; a etapa de acompanhamento; a etapa de manutenção; e pôr fim a etapa de monitoramento.

Os fatores de segurança considerados pela NBR 11.682:2009 (ABNT, 2009), preconizam o enquadramento de um projeto segundo dois grupos a saber: nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas e nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais. Ambos dividem em nível de segurança alto, médio e baixo.

Outra norma brasileira com conteúdo importante a ser considerada neste trabalho é a NBR 8.044:1983 (ABNT, 1983), que tem como objetivo fixar as mínimas condições a serem observadas nos estudos e serviços para execução de projetos geotécnicos que, primordialmente, façam parte do desempenho de obras de Engenharia Civil.

Cabe também destacar acerca da NBR 8.044:1983 (ABNT, 1983) que são necessárias investigações geotécnicas, a fim de determinarem as características do local onde se pretende trabalhar, e avaliando capacidade do solo quanto a sua resistência a colapso ou instabilidades. Estas investigações devem compreender levantamentos sobre cartografia, geologia, pedologia, geomorfologia, hidrologia, hidrografia para tanto devem ser realizadas prospecção geofísica, sondagens mecânicas, ensaios “*in situ*” e ensaios de laboratório.

Ainda ao tocante tema deste trabalho cita-se os tipos de sondagens que podem ser utilizadas para realizar uma investigação geotécnica, sendo elas: poços exploratórios e trincheiras; sondagens a trado; sondagens de simples reconhecimento do tipo *Standart Penetration Test* (SPT), sondagens para extração de amostras indeformadas e ainda sondagens rotativas que se destinam a solos e principalmente a rochas, o que não é foco deste trabalho (ABNT, 1983).

Segundo a NBR 9.061:1985 (ABNT, 1985) as cargas e carregamentos atuantes que contribuem na geração de instabilidades são distribuídas em duas categorias: as estáticas, compreendendo o empuxo lateral do solo, a pressão hidrostática e as cargas provenientes de escavações próximas ou de acúmulo de material deixado na borda da escavação; e as relacionadas ao tráfego de veículos, máquinas e equipamentos como sendo carregamentos dinâmicos.

Tratando-se das condições de estabilidade das paredes de uma escavação, como é o caso das paredes de uma vala, a NBR 9.061:1985 (ABNT, 1985) descreve que esta estabilidade deva ser garantida em todas as fases de uma obra, ou seja, da execução ao uso, não esquecendo de considerar, entre outros, a perda de coesão entre as partículas de solo. Para complementar, esta norma ainda define que a verificação da estabilidade dessas paredes deva considerar as rupturas localizadas, as rupturas de cunho geral do conjunto, as rupturas de fundo e as rupturas hidráulicas. Ademais preconiza que para essa verificação sejam utilizados os métodos de análises das tensões, métodos de equilíbrio limites ou outros que sejam consagrados pela mecânica dos solos.

Escorregamento, por definição da NBR 9.061:1985 é o deslocamento ao longo de uma superfície de deslizamento de uma massa de solo, rocha ou um composto de ambos, que predominantemente se apresentam de dois tipos: rotacional e translacional (ABNT, 1985). Os movimentos de massa em valas de escavação tendem a ser do tipo rotacional.

Quando as características de um solo forem favoráveis é possível a realização de serviços de escavações com até 1,5 m de profundidade, mesmo para escavações com paredes na vertical, sem que haja medidas protetivas. Já as escavações que excederem esse patamar devem, de modo geral, serem protegidas com escoramento ou inclinando os seus taludes (ABNT, 1985).

Nas escavações de valas a serem realizadas em logradouros públicos ou vias urbanas é recomendada a manutenção delas secas, desde sua abertura, passando pela fase em que ela fica aberta para as instalações, até o seu fechamento. Essa instrução segundo a NBR 9.061:1985 (ABNT, 1985) visa garantir a estabilidade de suas paredes.

A NBR 12.266:1992 (ABNT, 1992) que fixa as condições de projeto na execução de valas para assentamento de tubulação de água, esgoto ou drenagem ainda estabelece critérios, prevendo a instabilidades das paredes, para o dimensionamento do escoramento.

Outra norma brasileira que converge assuntos referentes a estabilidade dos taludes é a NBR 6.502:1995 (ABNT, 1995) que conceitua inúmeros termos ou ensaios que estão envolvidos no comportamento das partículas de solo quanto a sua resistência. Os mais relevantes conceitos são: atrito interno que é a parcela da resistência ao cisalhamento de um solo; coesão que é a resistência do solo provocada pela atração físico-química ou de cimentação entre as partículas; coesão aparente semelhante a coesão mas considera solo granular úmido; ensaios de cisalhamento e compressão que levam um corpo de prova até a ruptura e avalia-se sua resistência; e a poropressão que é a pressão da água que exerce sobre os vazios do solo.

A NBR 6.484:2001 (ABNT, 2001) se faz importante no contexto deste trabalho pois nela está apresentado o método de simples reconhecimento do solo com SPT, método este muito consolidado e que resulta na determinação dos tipos de solo e suas respectivas profundidades de ocorrência, nível do lençol freático e os índices do solo a penetração.

Como última fonte de dados normatizados tem-se a NR-18 (BRASIL, 2021) que regulamenta a altura máxima de 1,25 m para escavações sem a necessidade de se implantar estruturas de contenção. Salienta-se que esta norma tem cunho de aplicação obrigatório segundo as instruções da Secretaria do Trabalho adjunta, atualmente, ao Ministério da Economia.

2.3 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES

Primeiramente cabe destacar a definição, segundo a primeira edição da NBR 11.682:1991 (ABNT, 1991) de talude estável que são os taludes que não mostram indícios de instabilidade tais como: trincas, sulcos, erosão, abatimentos, surgências anormais de água, cicatrizes, rastejo, ou ainda que provoquem rachaduras em estruturas próximas.

2.3.1 Resistência ao cisalhamento dos solos

Para solos saturados segundo Gerscovich (2016), adota-se a equação de Mohr-Coulomb que lineariza a envoltório original de Mohr transformando a envoltória de resistência em uma reta definida pela equação (eq. 01) que segue. A equação 01 apresenta a resistência ao cisalhamento.

$$\tau = c + \sigma \cdot tg\phi \quad (\text{eq. 01})$$

Onde: τ = resistência ao cisalhamento;
 σ = tensão de cisalhamento;
 c = coesão do solo; e
 ϕ = ângulo de atrito entre as partículas do solo.

A equação acima também é referida por Fiori e Carmignani (2001) para ser utilizada em materiais coesivos, pois com o aumento do valor da tensão há um consequente aumento da resistência ao atrito e somente ocorre a ruptura após a parcela considerada pela coesão for vencida.

Os maciços terrosos são formados de partículas ou grãos de solo, as forças que atuam neles podem ter qualquer direção, sendo as aplicadas perpendicularmente ao plano as ditas forças normais, e as que atuam paralelamente ao plano são as responsáveis pela ruptura ou corte dos materiais e por isso denominadas de forças cisalhantes ou de cisalhamento (FIORI e CARMIGNANI, 2001).

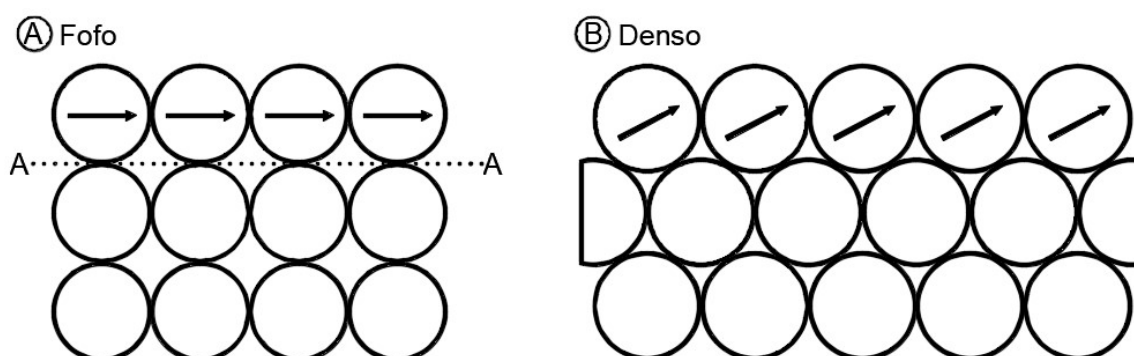
Quando a coesão entre as partículas de um maciço terroso for zero a estabilidade de um talude estará vinculada ao ângulo de atrito entre suas partículas, ou seja, o deslizamento de uma massa de solo ou a ruptura de um talude poderá acontecer assim que o ângulo de inclinação interno do plano de apoio ultrapasse o ângulo de atrito interno (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

Na mesma linha Gerscovich (2016) afirma que a capacidade do solo de resistir aos esforços de cisalhamento, que por sua vez possibilitam que cargas sejam aplicadas a eles sem que haja eventos de instabilidades, está associada a resistência no contato entre os grãos e pela interferência dada pelo arranjo estrutural entre as partículas.

Ainda segundo Gerscovich (2016), a resistência ao cisalhamento dos solos está fundamentada em duas componentes: a primeira denominada resistência entre as partículas que depende do atrito entre os grãos e da coesão que nada mais é que as ligações físico-químicas entre as partículas; e a segunda refere-se a resistência adicional gerada pelos diferentes arranjos entre as partículas deste solo, esta por sua vez chamada de imbricamento.

Para ampliar os conceitos descritos no parágrafo anterior, pode-se dizer que o imbricamento entre as partículas é mais elevado quanto mais denso for o solo, conseqüentemente mais resistente será este solo, pois gera-se uma persistência ao movimento adicional pelo empilhamento dos grãos, conforme a Figura 1B, se comparado ao arranjo dos grãos de um solo fofo (Figura 1A). No entanto, a resistência entre as partículas deriva de relações que envolvem o peso e a área de contato das partículas, do mecanismo de coesão, além do ângulo de atrito, que, por sua vez, depende, não somente, mas principalmente, do tipo de solo e de sua compactidade (GERSCOVICH, 2016).

Figura 1 – Resistência ao cisalhamento pelo arranjo das partículas do solo



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Gerscovich (2016, p. 79).

Sobre a coesão, visto que juntamente com o ângulo de atrito são as propriedades do solo mais significativas no que tange os estudos sobre estabilidade de taludes, é interessante saber que seu mecanismo é semelhante a uma cola, pois predominam sobre as partículas o equivalente a ligações efetivas que são predominantes em solos argilosos (argilominerais) e em solos cimentados (GUIDICINI e NIEBLE, 1983; e GERSCOVICH, 2016).

O comportamento, relativamente linear, que acontece quando avaliadas somente porções de solo não se repetem quando são analisadas amostras que tenham solo em contato com rocha. Nestes casos, segundo Kanji (1972) *apud* Guidicini e Nieble, (1983) a ruptura ocorre geralmente no contato rocha-solo e os valores observados de resistência ao cisalhamento menores quanto mais lisa e regular for a superfície rochosa.

Outra influência que deve ser considerada na resistência ao cisalhamento dos solos é a sua condição de umidade, ou seja, a influência da água, pois segundo Guidicini e Nieble, (1983) o teor de umidade atua principalmente na redução da coesão, portanto nas análises de estabilidade de taludes devam ser adotados valores de coesão obtidos através de ensaios considerando as superfícies saturadas, assim trabalhando a favor da segurança.

2.3.2 Estabilidade de taludes

A instabilidade de encostas naturais é uma atividade inerente a sua existência, pois com o avanço dos processos físico-químicos de alteração das rochas, intemperismo entre outros aliados a determinadas condições topográficas desencadeiam na menor resistência dos materiais gerando assim, condições propícias para ocorrência de rupturas e movimentos de massa (GERSCOVICH, 2016).

Várias são as classificações já publicadas sobre os processos de instabilização, para Filho e Virgili (1998) as classificações mais recentes baseiam-se em critérios como: velocidade, direção e repetição dos deslocamentos; origem do material instabilizado podendo ser rocha, solo, material inconsolidado e detritos; geometria das massas movimentadas; e tipo do movimento ocorrido.

Na sequência estão apresentados, de forma sucinta, os principais mecanismos relacionados a movimentos de massa, com ênfase nos que ocorrem nos solos,

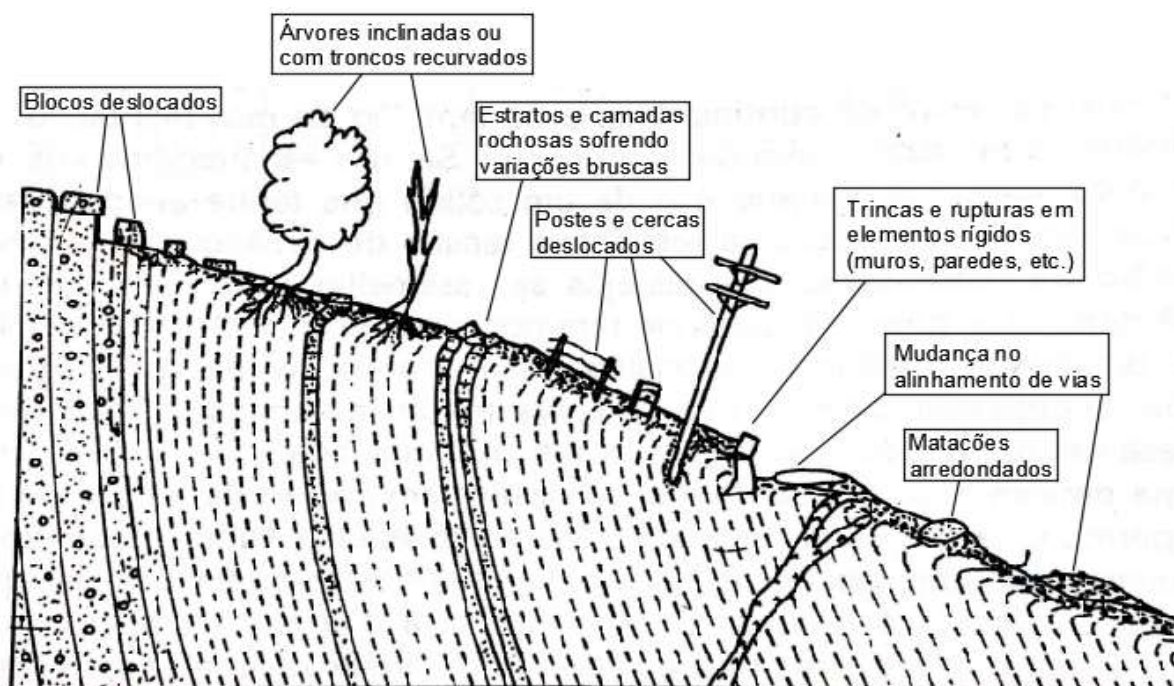
conforme alguns autores (INFANTI JR e FORNASARI FILHO, 1998), (GERSCOVICH, 2016) e (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

2.3.2.1 Rastejos

Rastejos são movimentos descendentes que ocorrem lentamente e de forma contínua não tendo uma geometria e nem uma superfície de ruptura muito definidas. Podem englobar grandes áreas e são invariavelmente associados aos efeitos provocados pela variação térmica, nem sempre é possível fazer a diferenciação da massa em movimento da estável (INFANTI JR. e FORNASARI FILHO, 1998; GERSCOVICH, 2016; e GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

A Figura 2 apresenta como se comportam os movimentos de massa do tipo rastejos.

Figura 2 – Exemplo de rastejo



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Sharpe (1938) *apud* Guidicini e Nieble (1983, p. 20).

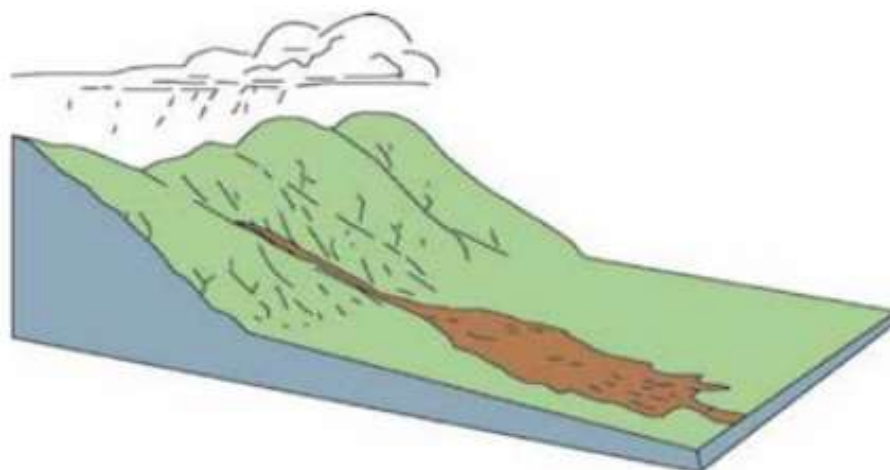
2.3.2.2 Corridas

As corridas são movimentos gravitacionais de grandes dimensões que podem ocorrer na terra, areia, lama ou detritos. Elas, são de caráter essencialmente hídrico,

acontecem de forma rápida e atingem extensões consideráveis, as vezes promovendo efeitos destrutíveis de grande escala. Esse tipo de mecanismo de movimento de massa ocorre, mais comumente, pela perda de atrito interno provocado pelo excesso de água, que por sua vez desmonta o sistema estrutural do solo. Também pode ser acionado pelo efeito de vibrações (terremotos, cravação de estacas, entre outras) e de amolgamentos (INFANTI JR. e FORNASARI FILHO, 1998; GERSCOVICH, 2016; e GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

A Figura 3 apresenta esquematicamente o comportamento geral dos movimentos de massa do tipo corridas.

Figura 3 – Exemplo de corrida



Fonte: Highland (2008) *apud* Riffel, Guasselli, Bressani (2016, p. 296).

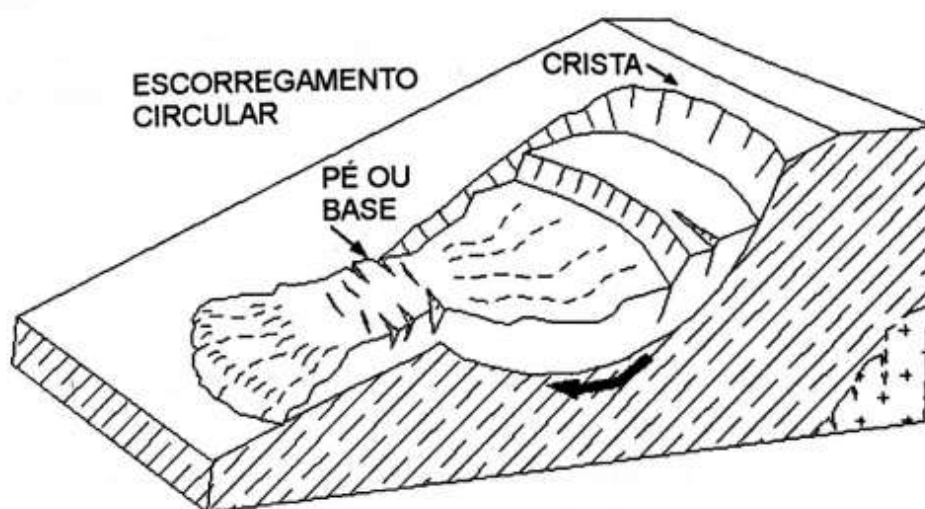
2.3.2.3 Escorregamentos

Os escorregamentos caracterizam-se por movimentos rápidos com duração relativamente curta e em sua maioria consegue-se definir a massa de solo envolvida no evento, sendo a linha de ruptura geralmente bem definida. O mecanismo envolvido nos escorregamentos, que leva os taludes naturais, de corte ou aterro ao cisalhamento ocorrem, em geral, pelo aumento das tensões atuantes ou queda da resistência do solo por períodos curtos de tempo. Igualmente as corridas podem provocar movimentos de massa de grandes proporções deflagrando catástrofes com perdas humanas e financeiras (INFANTI JR. e FORNASARI FILHO, 1998; GERSCOVICH, 2016; e GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

Os escorregamentos são diferenciados pela natureza do material mobilizado, por sua forma geométrica e por sua superfície de ruptura. Os escorregamentos ROTACIONAIS OU CIRCULARES estão associados a aterros, pacotes de solo ou depósitos mais espessos e, em geral, bem homogêneos (INFANTI JR. E FORNASARI FILHO, 1998; e GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

A Figura 4 ilustra como, de forma geral, ocorre o mecanismo de movimento de massa tipo rotacional ou circular.

Figura 4 – Exemplo de escorregamento circular ou rotacional

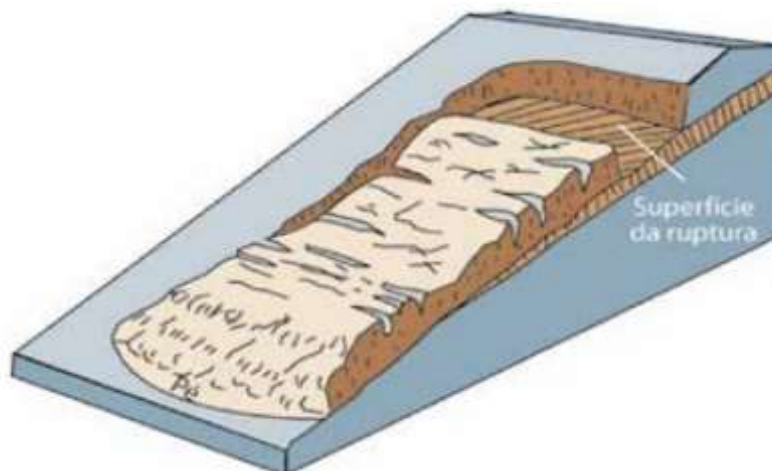


Fonte: Infanti Jr. E Fornasari Filho (1998, p. 138).

Os escorregamentos do tipo TRANSLACIONAIS OU PLANARES se caracterizam por movimentos ao longo de uma superfície plana, geralmente induzidos por feições geológicas (falhas, fraturas, xistosidade, foliação, entre outras) preexistentes no substrato e desfavoráveis a estabilidade. É comum ocorrerem em mantos de solo coluvionar pouco espessos e terem como limite o embasamento rochoso. Em geral, abrangem uma extensão maior que os escorregamentos rotacionais (INFANTI JR. e FORNASARI FILHO, 1998; GERSCOVICH, 2016; e GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

A Figura 5 exemplifica como os escorregamentos planares ou translacionais se comportam em taludes.

Figura 5 – Exemplo de escorregamento planar ou translacional

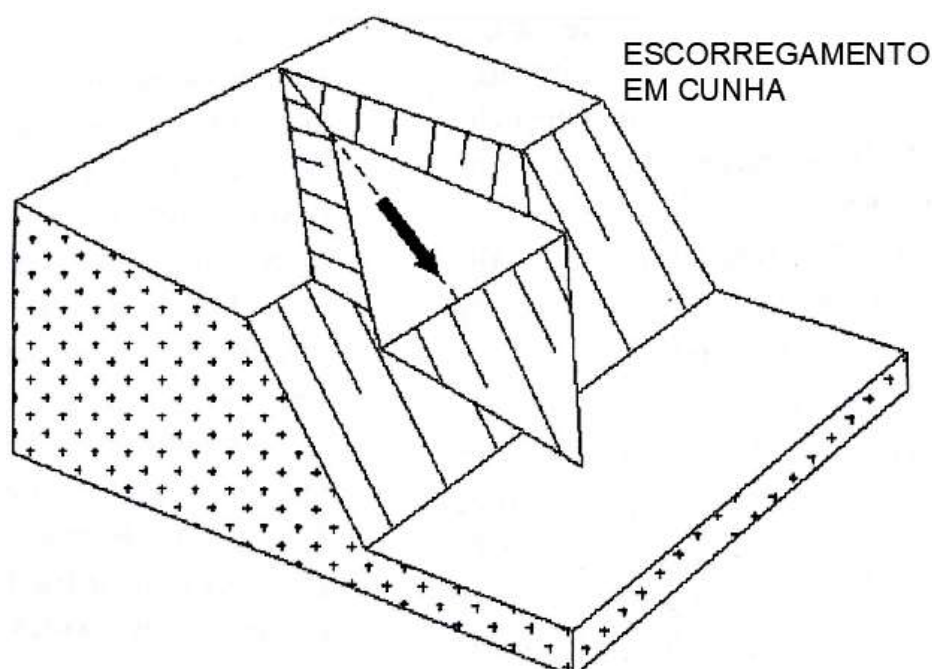


Fonte: Highland (2008) *apud* Riffel, Guasselli, Bressani (2016, p. 294).

Já os escorregamentos em CUNHA estão condicionados a existência de duas estruturas planares desfavoráveis, podendo ser duas camadas de menor resistência não paralelas a superfície do talude. Ocorrem comumente, onde há predominância de solos saprolíticos e maciços rochosos, e em taludes de corte ou em encostas que sofreram algum desconfinamento, antrópico ou natural. (INFANTI JR. e FORNASARI FILHO, 1998; e GERSCOVICH, 2016).

A Figura 6 apresenta o comportamento dos movimentos em cunha ao longo dos taludes.

Figura 6 – Exemplo de escorregamento do tipo em cunha



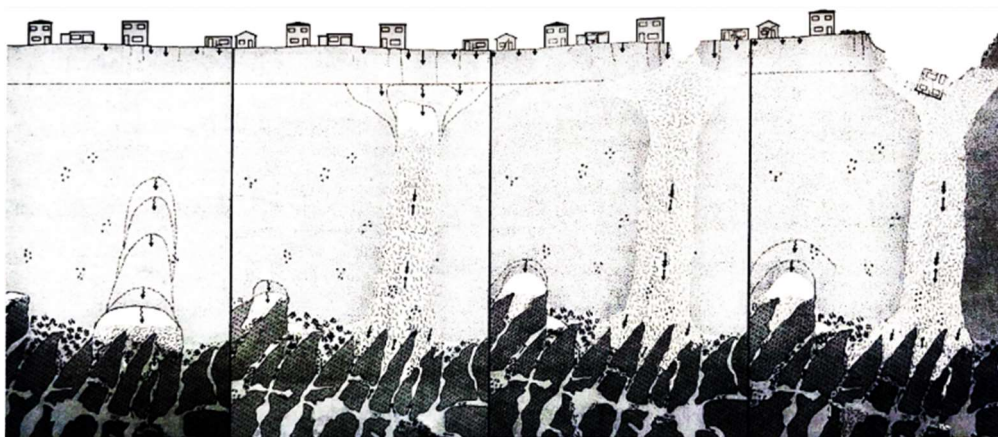
Fonte: Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998, p. 138).

2.3.2.4 Subsidiências e colapsos

São movimentos essencialmente verticais, contínuos ou instantâneos, que correspondem a deslocamentos, deformações ou afundamentos no terreno, sendo que as subsidiências ocorrem mais lentamente e os colapsos de forma abrupta. Estes movimentos podem se originar naturalmente por dissolução de rochas, acomodação de camadas do substrato ou movimentações seguindo planos e falhas geológicas e ainda ser provocado por ação antrópica em escavações de minas ou em decorrência de bombeamentos de águas subterrâneas. De maneira geral têm pouco a ver com a instabilidade de taludes (INFANTI JR. e FORNASARI FILHO, 1998; e GERSCOVICH, 2016).

A Figura 7 exemplifica como pode ocorrer um evento de colapso.

Figura 7 – Ilustração de colapso



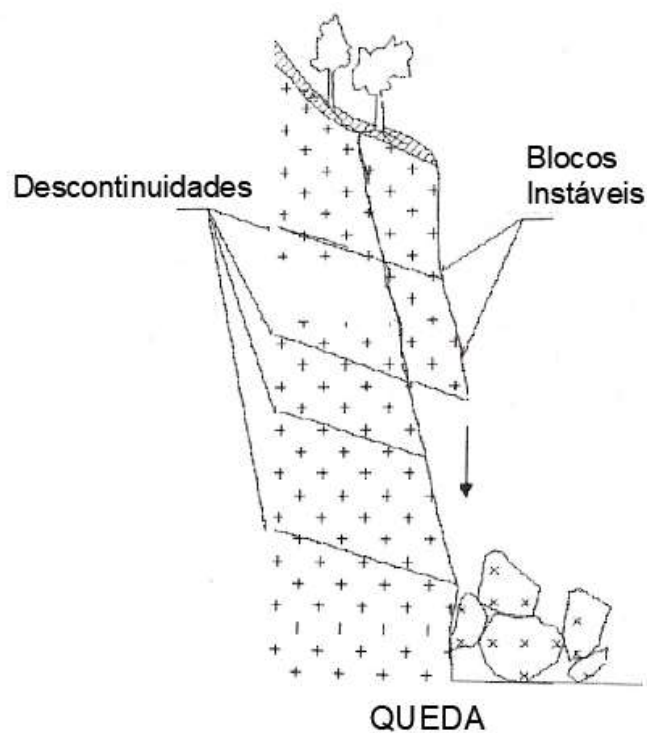
Fonte: Prandini et al. (1990) *apud* Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998, p. 144).

2.3.2.5 Movimentos de blocos rochosos

Os mecanismos de movimento de massa relacionados com rochas não serão aprofundados neste trabalho, mesmo assim uma abordagem superficial considera-se relevante. Segundo Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998) os movimentos gravitacionais de blocos rochosos podem ser classificados em vários tipos, porém a seguir estão ilustrados os mais relevantes.

A queda de blocos (Figura 8) nada mais é que o deslocamento, em queda livre, de materiais rochosos em taludes ou encostas.

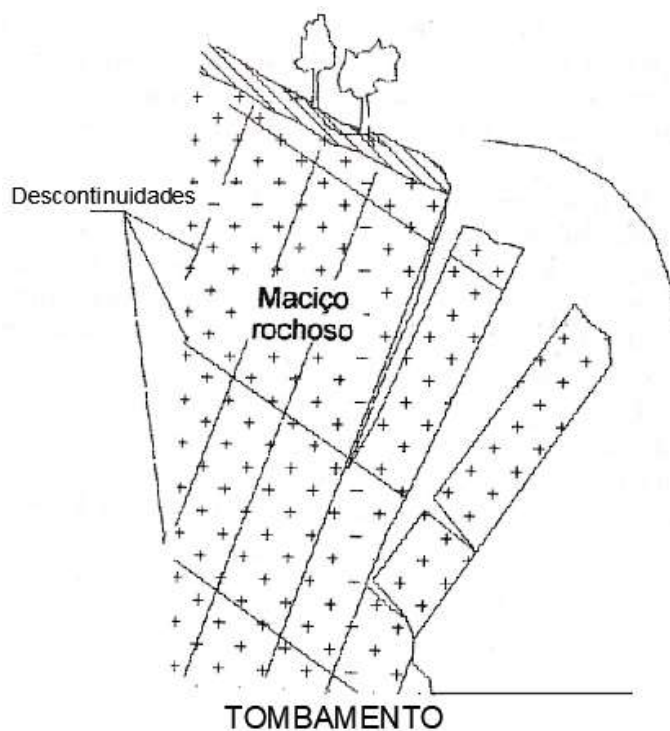
Figura 8 – Movimentos de queda envolvendo fragmentos de rocha



Fonte: Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998, p. 139).

Os movimentos, denominados pelo autor, como tombamento de blocos caracterizam-se por acontecerem pela rotação dos fragmentos, conforme Figura 9.

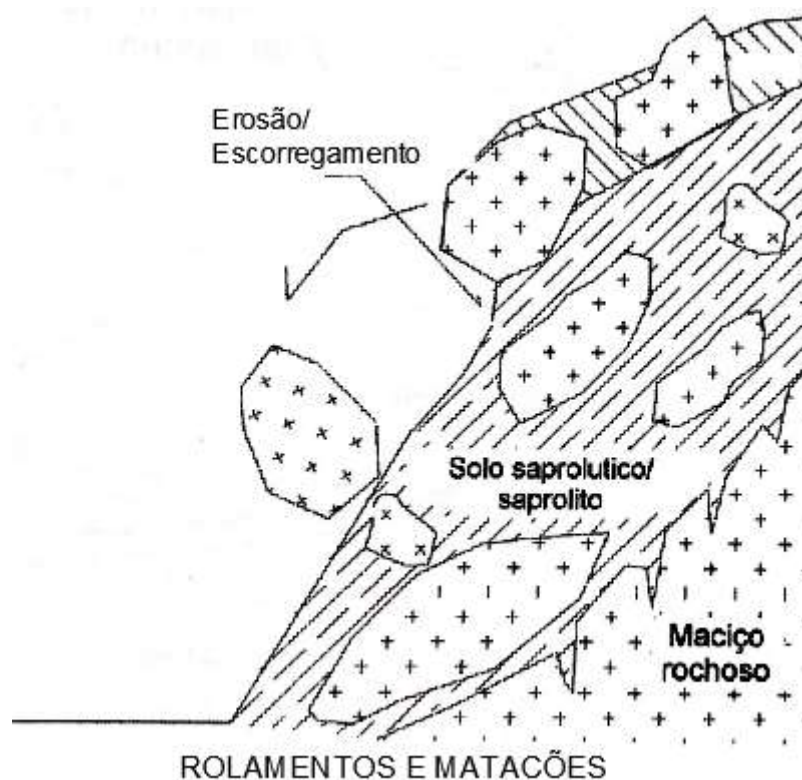
Figura 9 – Tombamento de blocos



Fonte: Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998, p. 139).

Por fim o rolamento de blocos ou matacões é o movimento que acontece dos fragmentos ao longo de taludes inclinados, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Rolamento de blocos ou matacões



Fonte: Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998, p. 139).

2.3.3 Métodos de Cálculo na Estabilidade de Taludes

Além de se ter conhecimento sobre os parâmetros que influenciam na estabilidade dos taludes, tais como resistência ao cisalhamento, ângulo de atrito, mecanismos pelo qual as instabilidades ocorrem, entre outros, é fundamental se ter informações à cerca de como pode ser estimada a capacidade de um talude permanecer estável.

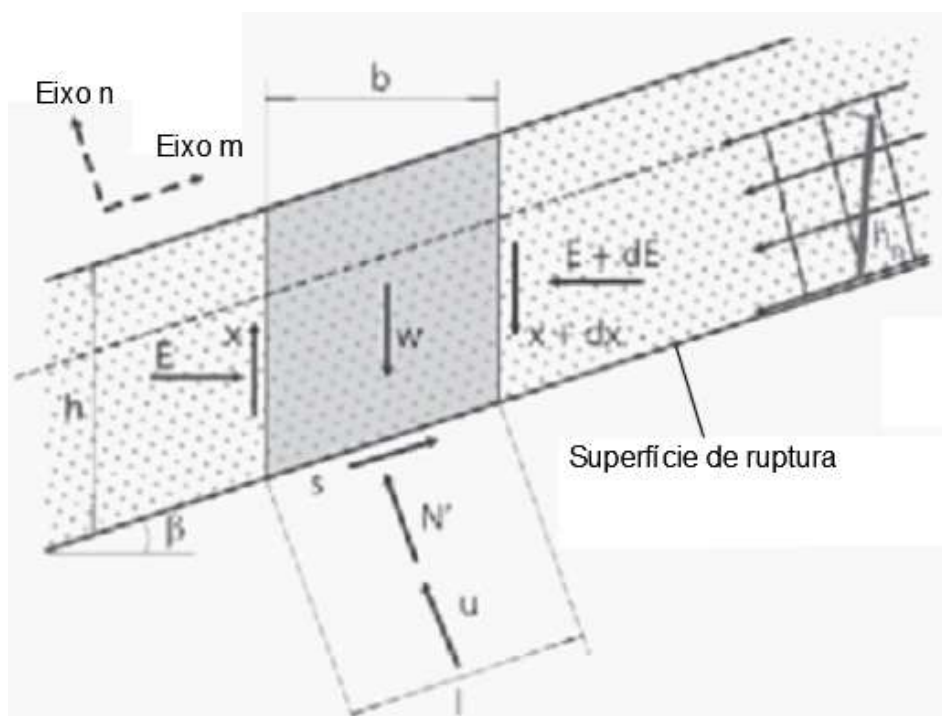
Para tanto diversos métodos são encontrados na literatura, a maioria deles tem base no critério equilíbrio-limite pressupondo estado plano de deformação e a validação associada ao formato da superfície da ruptura (GERSCOVICH, 2016).

Com exceção do método do Talude Infinito, estão apresentados nesta revisão métodos utilizados para movimentos de massa com formato de ruptura circular ou curva, pois são deste tipo que preferencialmente ocorrem nas escavações de valas.

2.3.3.1 Talude infinito

Para movimentos de massa com mecanismos caracterizados como escorregamentos translacionais, onde a espessura do material instável é relativamente pequena em relação ao talude, pode-se desprezar os efeitos que ocorrem nas extremidades. A Figura 11, apresenta a relação deste método que considera uma fatia do talude (GERSCOVICH, 2016).

Figura 11 – Forças atuantes em uma fatia segundo o método do Talude Infinito

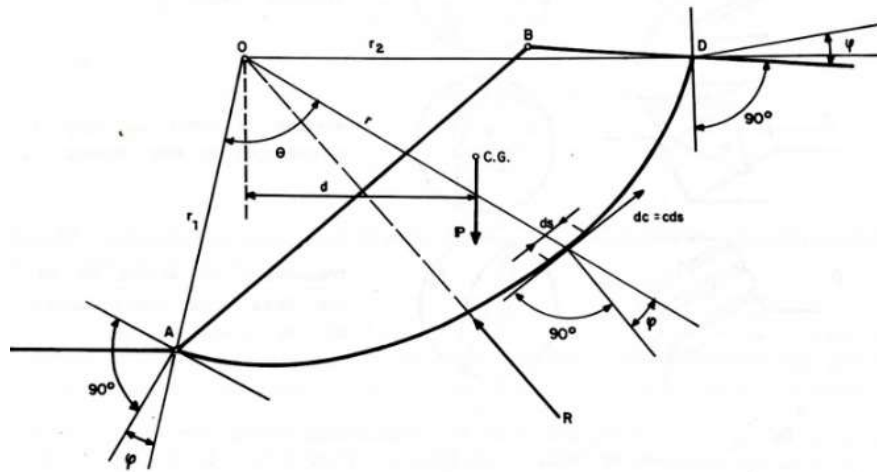


Fonte: Gerscovich (2016, p. 108).

2.3.3.2 Método da espiral logarítmica para ruptura circular

Como o próprio nome já diz este método adota a superfície de escorregamento como sendo uma espiral, sendo os parâmetros envolvidos na análise os presentes na Figura 12. Este método também é conhecido denominado método Rendulic e determina por tentativas sucessivas, pois nele não se conhece previamente a superfície de ruptura, encontrar o fator de segurança mínimo (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

Figura 12 – Parâmetros envolvidos na análise do método da espiral ou Rendulic



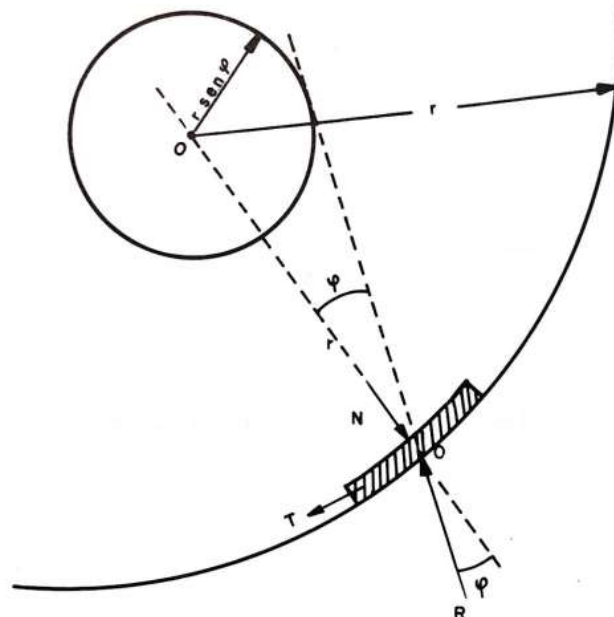
Fonte: Vargas (1972) *apud* Guidicini e Nieble (1983, p. 122).

2.3.3.3 Método de Taylor para ruptura circular

Também conhecido como método do círculo de atrito ele fundamenta-se primordialmente em gráfico e está baseado no conceito de cone de atrito. Este método considera um círculo potencial de ruptura de raio r , além das forças normais e tangenciais e o ângulo de atrito interno entre as partículas do solo (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

A Figura 13 apresenta os elementos considerados no método de Taylor.

Figura 13 – Método do círculo de atrito ou de Taylor



Fonte: Vargas (1972) *apud* Guidicini e Nieble (1983, p. 123).

2.3.3.4 Ábacos de Taylor para ruptura circular

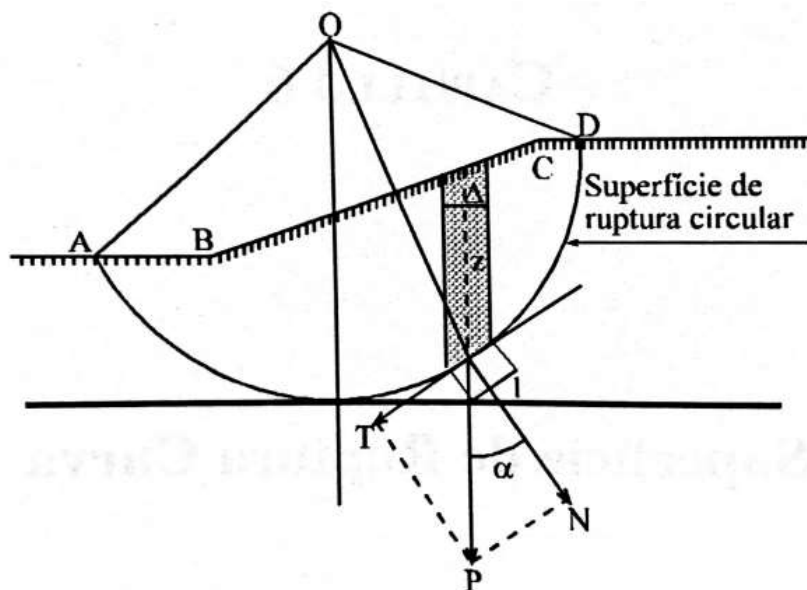
Como forma de simplificar a utilização do método anterior, Taylor em 1937 desenvolveu ábacos que podem ser aplicados na análise da estabilidade de taludes. Entretanto este método exige algumas condições, quais sejam: o talude deve ser homogêneo, simples e não haver percolação de água. Contudo, pode-se obter o fator de segurança (FS), entrando com variáveis como o número de estabilidade N e da inclinação i do talude (GUIDICINI e NIEBLE, 1983; e FIORI e CARMIGNANI, 2001).

2.3.3.5 Método sueco ou das fatias em seção circular

O engenheiro sueco Fellenius desenvolveu em 1936 este método que tem por princípio a análise estática do volume de solo compreendido acima de uma superfície potencial de escorregamento de seção circular. Os parâmetros envolvidos por ele nesta análise são a coesão do solo, o ângulo de atrito linha e relacionado a fatia analisada: o peso, largura, altura e comprimento (GUIDICINI e NIEBLE, 1983; e FIORI e CARMIGNANI, 2001).

A Figura 14 apresenta os parâmetros envolvidos no método considerando uma determinada fatia vertical de solo.

Figura 14 – Método das fatias de Fellenius, relação de parâmetros



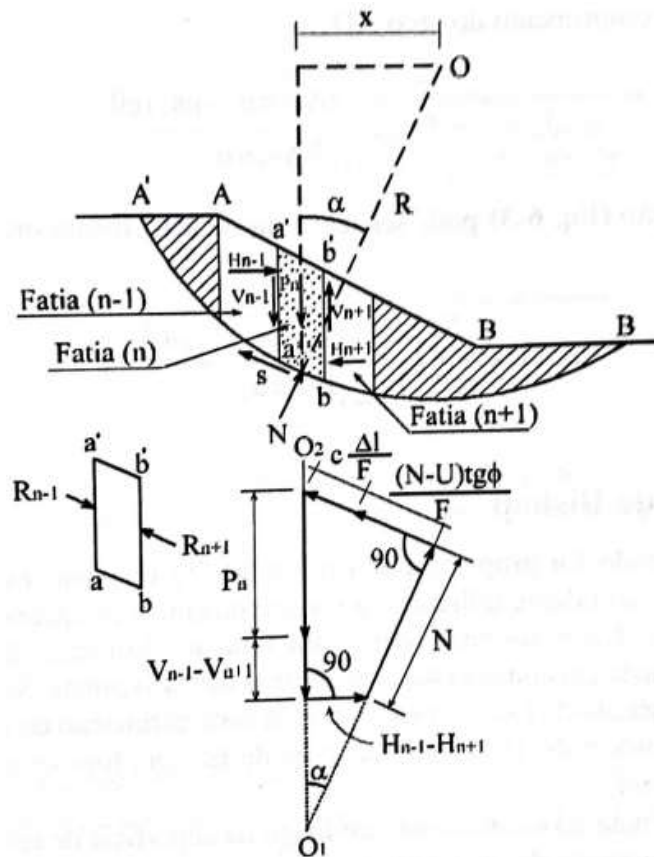
Fonte: Vargas (1972) *apud* Fiori e Carmignani (2001, p. 212).

2.3.3.6 Método de Bishop para ruptura curva

O método proposto por Bishop em 1955 é uma modificação do método desenvolvido por Fellenius, pois também pressupõe, para análise da estabilidade, a divisão da cunha de escorregamento em fatias, entretanto adiciona a relação das fatias vizinhas na análise (FIORI e CARMIGNANI, 2001).

Para Rogério *apud* Fiori e Carmignani, (200, p. 213) o método das fatias de Fellenius superestima o fator de segurança em aproximadamente 15% em relação ao método de Bishop. Na Figura 15 está apresentada a relação de parâmetros considerados por Bishop em seu método.

Figura 15 – Método de Bishop para deslizamento rotacional



Fonte: Caputo (1973) *apud* Fiori e Carmignani (2001, p. 214).

2.4 MÉTODOS DE ESCORAMENTO DE VALAS

A definição de escoramento trazida pela NBR 12.266:1992 sugere que as estruturas destinadas a manter estáveis os taludes das escavações, incluindo as de valas, sejam nomeadas como escoramento (ABNT, 1992).

Como já mencionado a NR-18 obriga o emprego de escoramento para valas de profundidades que ultrapassem 1,25 m. É importante mencionar também que a remoção do sistema de escoramento deve ser realizada cuidadosamente e a medida que for sendo feito o reaterro.

Nos cálculos dos sistemas de escoramento, considerando entre outros a posição e dimensão das peças, devem ser consideradas as máximas pressões que, porventura, possam atingir a estrutura. Além de que, o método a ser empregado neste cálculo deve ser devidamente consagrado pela técnica e a memória deste cálculo estar contida no projeto (ABNT, 1992).

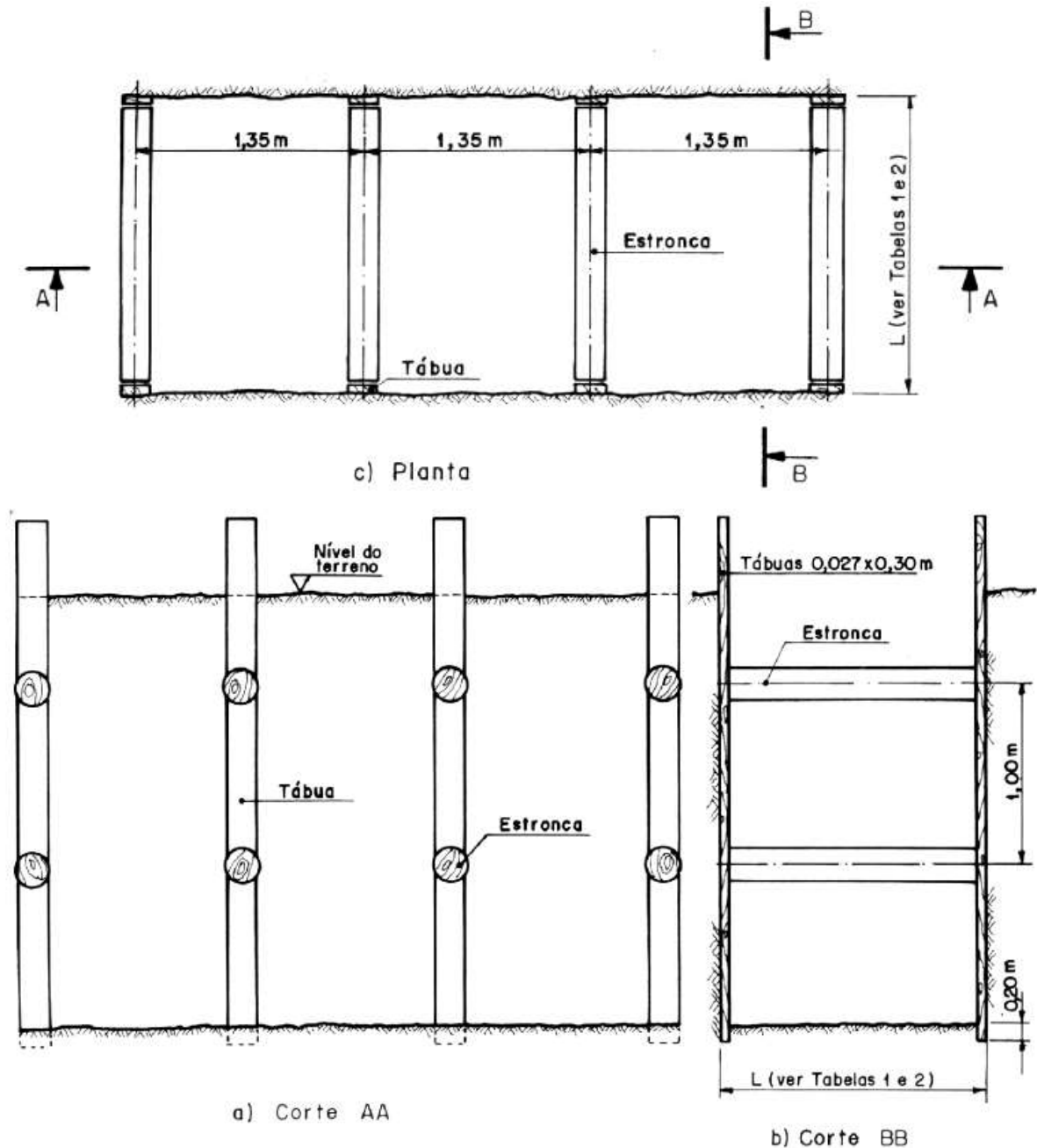
Sobre os materiais a serem empregados na confecção dos escoramentos, sendo eles de madeira ou metal, deve-se considerar a sua plena integridade, não possuírem defeitos, falhas nem soldas ou trincas em madeiras. Não menos importante é uma rigorosa inspeção nas estruturas antes e durante a sua utilização, são comuns avarias acontecerem nas escoras quando da retirada ou movimentação para trechos subsequentes da vala de escavação.

A NBR 12.266:1992 (ABNT, 1992) traz definições específicas sobre alguns tipos de escoramentos para valas, dentre elas estabelece as dimensões mínimas para, quando isso não ocorre na etapa de projeto. Também discrimina o tipo de madeira a ser utilizada, quais sejam: peroba, maçaranduba, angelim, canafístula, entre outras com características de serem madeiras duras, resistentes à umidade. Já as estroncas por ter seu uso pleno a compressão considera adequado o uso de madeira de eucalipto.

- a) Pontaleteamento: deverão ser utilizadas tábuas de 2,7 cm x 30 cm, respectivamente de espessura e largura, tendo seu espaçamento limitado a 1,35 m e considerando estroncas travadas na horizontal com diâmetro de 20 cm de um em um metro (Figura 16);
- b) Escoramento descontínuo: tábuas de 2,7 cm x 30 cm, com espaçamento de 30 cm entre cada uma só que com uso de travamento horizontal, em toda extensão, por longarinas de 6 cm x 16 cm espaçadas verticalmente a cada metro e travadas com estroncas de 20 cm a cada 1,35 m (Figura 17);
- c) Escoramento contínuo: mesmas peças de madeira utilizadas e travamentos considerados no escoramento descontínuo, porém as tábuas devem ser aplicadas encostadas umas nas outras, sem espaçamento (Figura 18); e

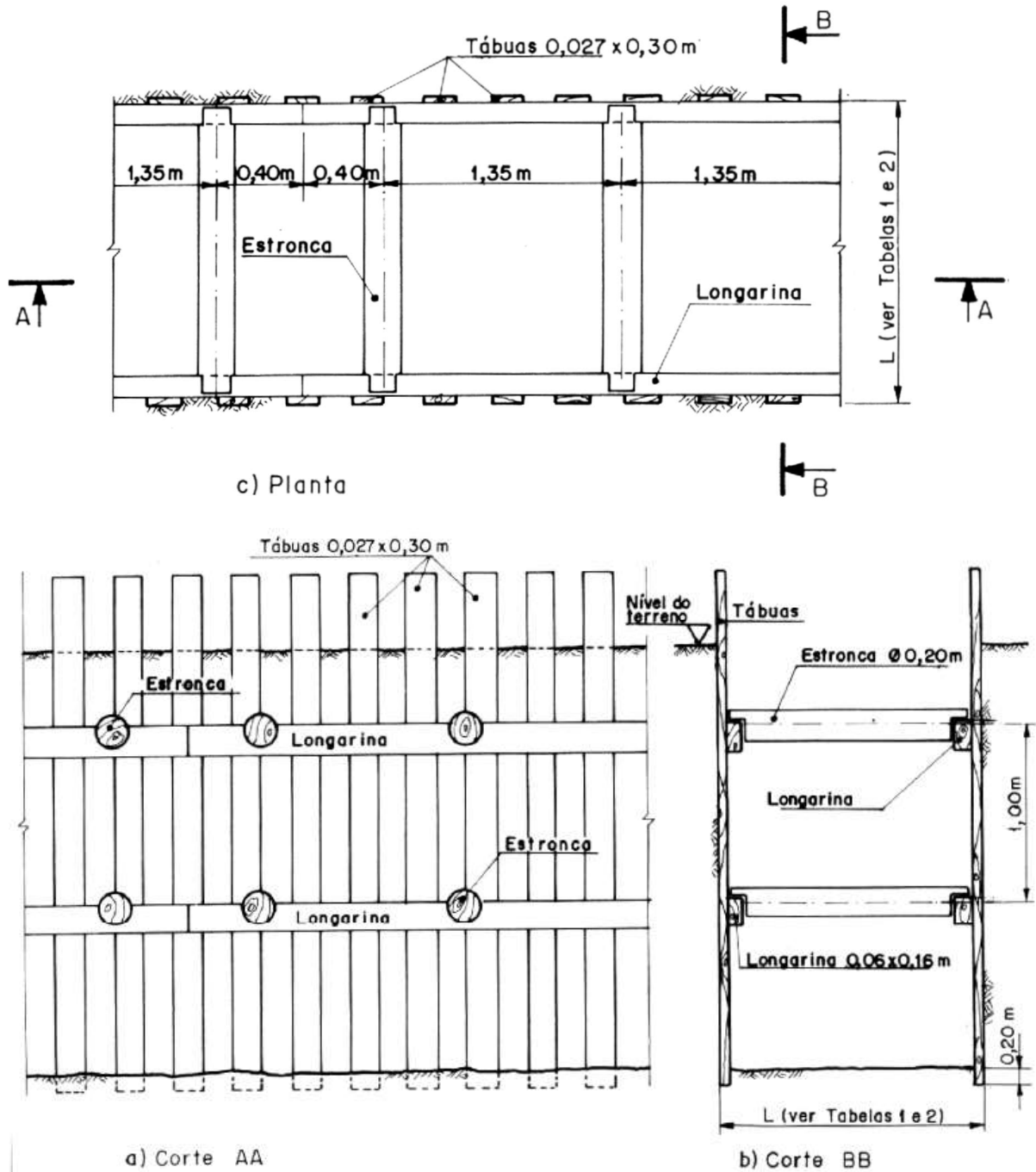
- d) Escoramento especial: neste tipo a NBR 12.266:1992 considera o uso de estacas prancha 6 cm x 16 cm do tipo macho fêmea, com travamento horizontal por longarinas contínuas de 8 cm de diâmetro por 18 cm e ainda aplicando-se estroncas a cada 1,35 m, tendo elas 20 cm de diâmetro (Figura 19).

Figura 16 – Escoramento do tipo pontaleamento



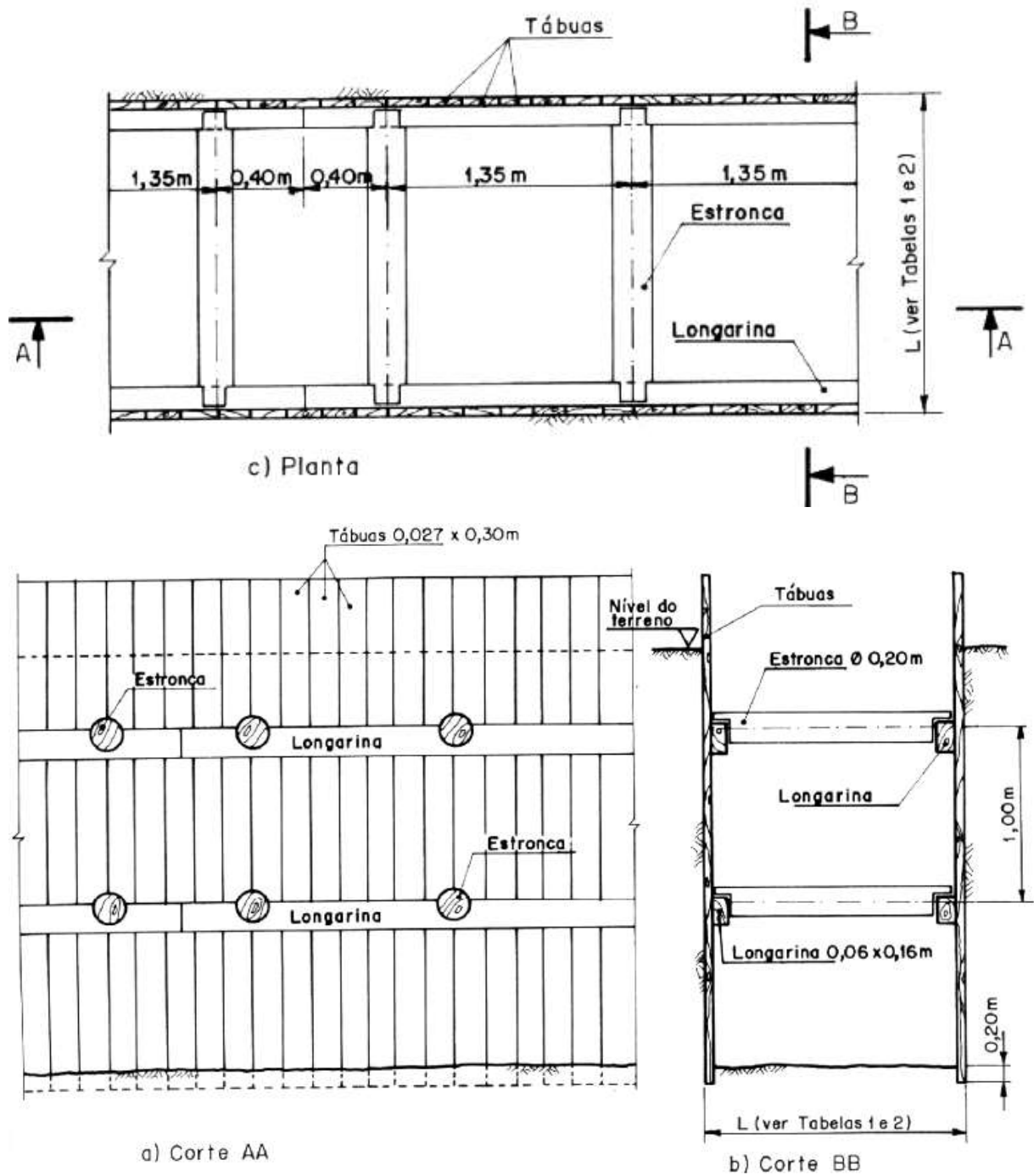
Fonte: ABNT (1992, p. 12).

Figura 17 – Escoramento do tipo descontínuo



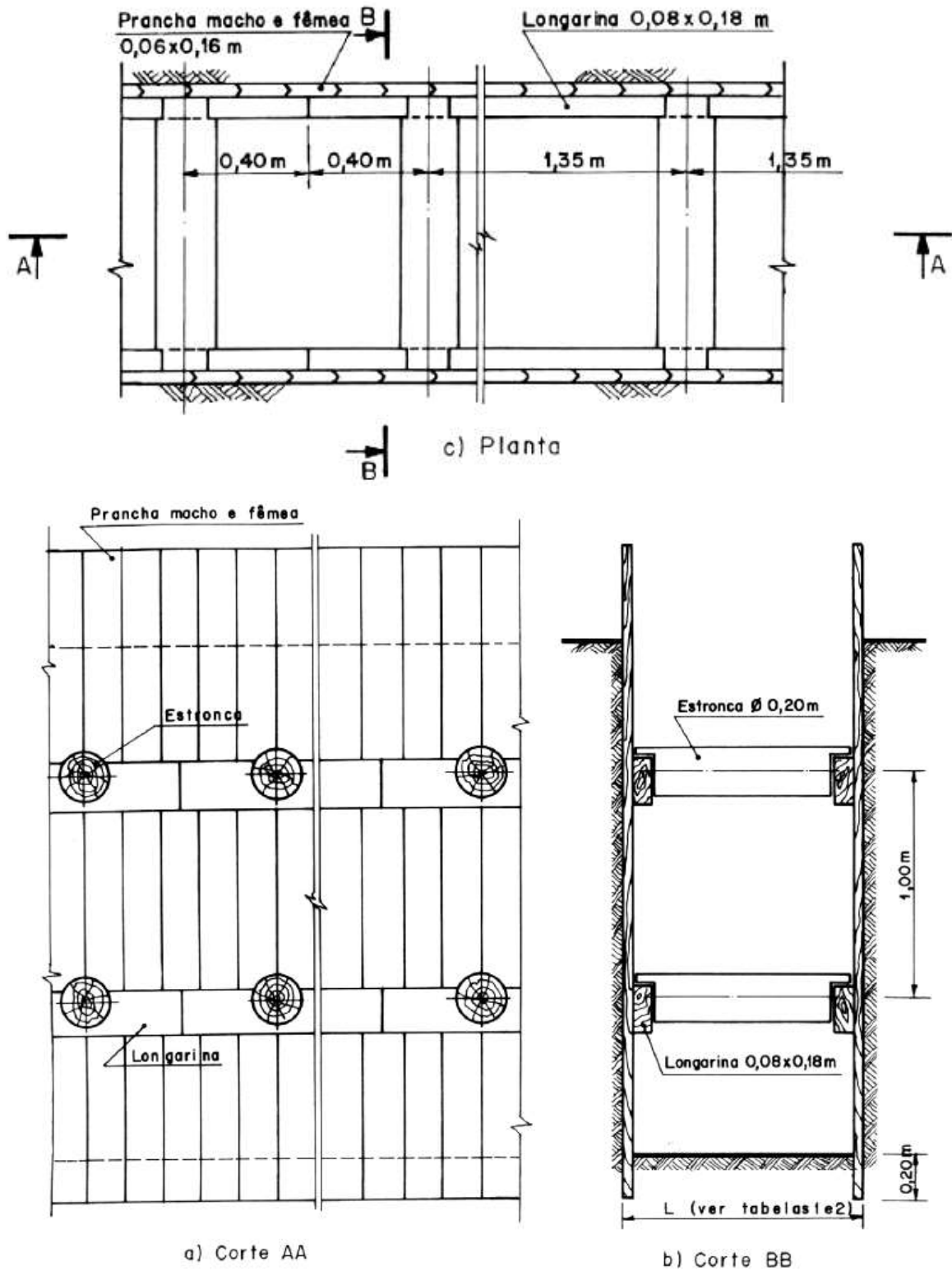
Fonte: ABNT (1992, p. 13).

Figura 18 – Escoramento do tipo contínuo



Fonte: ABNT (1992, p. 14).

Figura 19 – Escoramento especial



Fonte: ABNT (1992, p. 15).

Outra forma de escoramento que atualmente é vista com bastante frequência, nas obras com escavação de valas, são os escudos metálicos, também conhecidos como blindagens. Estas estruturas são constituídas de sanduíches de chapas e perfis metálicos formando paredes que travados entre si por estroncas tubulares ajustáveis ou não. Estas estruturas são encontradas a venda ou para locação com diferentes tamanhos, ou seja, alcançando alturas e comprimentos distintos.

Uma das características interessantes deste tipo de escoramento de valas é a alta produtividade, pois possuem uma mobilidade elevada ao passo que enquanto a vala vai sendo escavada imediatamente na cessão anterior é possível ir assentando a tubulação.

A Figura 20 mostra uma blindagem em pleno uso, salientando-se a baixíssima coesão do solo no local da escavação.

Figura 20 – Blindagem metálica em uso como escoramento de vala



Fonte: Registrada pelo autor.

3 METODOLOGIA

Por meio da metodologia adotada pretende-se avaliar a sensibilidade de alguns parâmetros geomecânicos do solo, bem como da alteração geométrica das valas no que tange a estabilidade de suas paredes durante a escavação. Para tal, foi considerado a variação de alguns dos parâmetros do solo, tais como: coesão do solo “c”, ângulo de atrito interno entre as partículas do solo “ ϕ ”, peso específico aparente natural do solo “ γ_n ” e o nível/presença de água no solo. Outras variações também foram consideradas tais como a profundidade de escavação da vala a qual simulou-se o fator de segurança para valas de um metro, dois metros e três metros.

No desenvolvimento metodológico fez-se uso do programa computacional de projeto *Slide* Versão 9.030 (ROCSCIENCE) conforme licença N° 17.497-001 de propriedade da empresa FGS Engenharia Geotécnica e Ambiental LTDA., cedida para este estudo. Os parâmetros utilizados no citado programa foram:

- a) Método de análise: Método de Bishop Simplificado;
- b) Critério de ruptura: Mohr-Coulomb;
- c) Modo de ruptura: Ruptura Circular;
- d) Método de busca da superfície crítica: Grid; e
- e) Quanto a saturação do solo: 0 e 0,2 (Ru Value).

Para considerar a saturação do maciço de solo nas simulações utilizou-se o parâmetro de poropressão Ru, que é expresso pela equação (Eq. 02). Para termos de comparação, valores de Ru iguais a zero indicam que as paredes da vala estariam completamente secas, já para valores de 0,4 a saturação aproxima-se de 100%. A equação 02 apresenta a definição da poropressão através da metodologia Ru.

$$Ru = \frac{u}{\sigma_v} \quad (\text{eq. 02})$$

Onde: Ru = poropressão do solo;
 u = poropressão; e
 σ_v = tensão vertical total.

No que tange à variação dos coeficientes do solo, utilizou-se uma faixa de abrangência que pudesse englobar a maioria dos solos que ocorrem no Brasil, principalmente na sua região sul. As variações utilizadas para cada um dos índices do solo estão listadas a seguir:

- a) coesão do solo: para este parâmetro a faixa de variação adotada foi de zero a 25kPa, porém adotando valores com intervalo de 5 em 5kPa;
- b) peso específico aparente natural: neste parâmetro a variação foi de um em um, sendo o primeiro de 15kN/m³ e o último 20kN/m³; e
- c) ângulo de atrito interno entre as partículas: já neste parâmetro a variação se deu entre 22° a 32° com intervalo adotado de dois em dois.

As faixas utilizadas de variação, apresentadas acima, foram baseadas em valores ensaiados e/ou utilizados pelos seguintes autores: Bastos (1991); Soares (1997); Ferreira (1998); Martins (2001); Perazzolo (2003); Bastos (2004); Silveira (2005); e Rigo (2005), que estudaram a resistência ao cisalhamento de solos residuais do estado do Rio Grande do Sul.

Como forma de avaliar a influência dos parâmetros e índices do solo acima mencionados, está sendo proposto por este trabalho seis diferentes configurações de valas simétricas escavadas em solo, quais sejam:

- a) vala com 1 m de profundidade e paredes com ângulo, em relação ao fundo, de 90° (1H:1V);
- b) vala com 2 m de profundidade e paredes com ângulo, em relação ao fundo, de 90° (1H:1V);
- c) vala com 3 m de profundidade e paredes com ângulo, em relação ao fundo, de 90° (1H:1V);
- d) vala com 1 m de profundidade e paredes com ângulo, em relação ao fundo, de 63° (1H:2V);
- e) vala com 2 m de profundidade e paredes com ângulo, em relação ao fundo, de 63° (1H:2V); e
- f) vala com 3 m de profundidade e paredes com ângulo, em relação ao fundo, de 63° (1H:2V).

Para ser avaliada a influência dos parâmetros geomecânicos do solo ante o dimensionamento de uma estrutura de escoramento de vala, fora utilizada a teoria baseada em Coulomb, para determinação dos empuxos passivos e ativos exercidos pelo solo.

A equação 03 mostra a fórmula do empuxo utilizada na determinação das cargas exercidas ou suportadas pela estrutura de contenção dimensionada neste trabalho.

$$E = \int \sigma_{h'} \cdot dh \quad (\text{eq. 03})$$

Onde: E = empuxo resultante (passivo ou ativo);

$\sigma_{h'}$ = tensão efetiva horizontal; e

dh = variação da altura ou profundidade.

Já a tensão horizontal efetiva é dada por:

A equação 04 trás a definição da tensão horizontal efetiva.

$$\sigma_{h'} = \sigma_{v'} \cdot k \pm 2 \cdot c\sqrt{k} \quad (\text{eq. 04})$$

Onde: $\sigma_{v'}$ = tensão efetiva horizontal do solo;

k = coeficiente de empuxo ativo/passivo; e

c = coesão do solo.

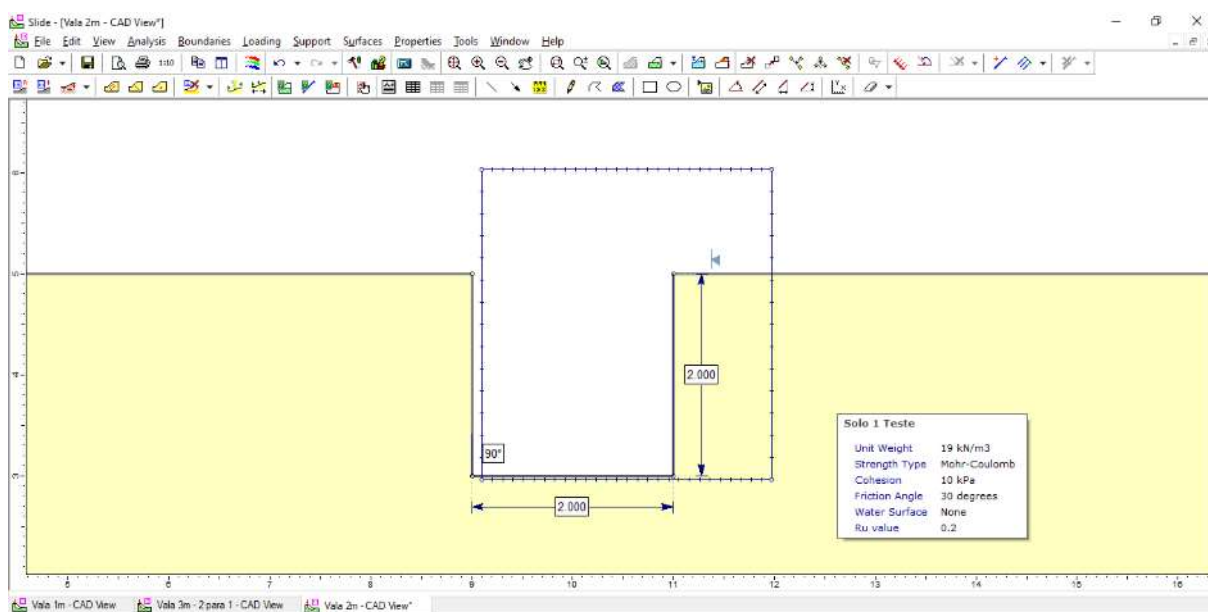
Ainda cabe salientar que nos cálculos do coeficiente k (lado passivo) utilizados na determinação dos empuxos, fora atribuído um coeficiente de segurança de 1,5.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como já descrito anteriormente, foram adotadas seis configurações de valas para demonstrar a influência dos diferentes índices do solo, quanto ao seu fator de segurança, sobre a instabilidade das paredes.

A Figura 21 compreende uma imagem obtida a partir do emprego do programa *Slide*, exibindo a vala de dois metros, com ângulo entre paredes e fundo de 90°, que exemplifica uma das variações utilizadas neste estudo.

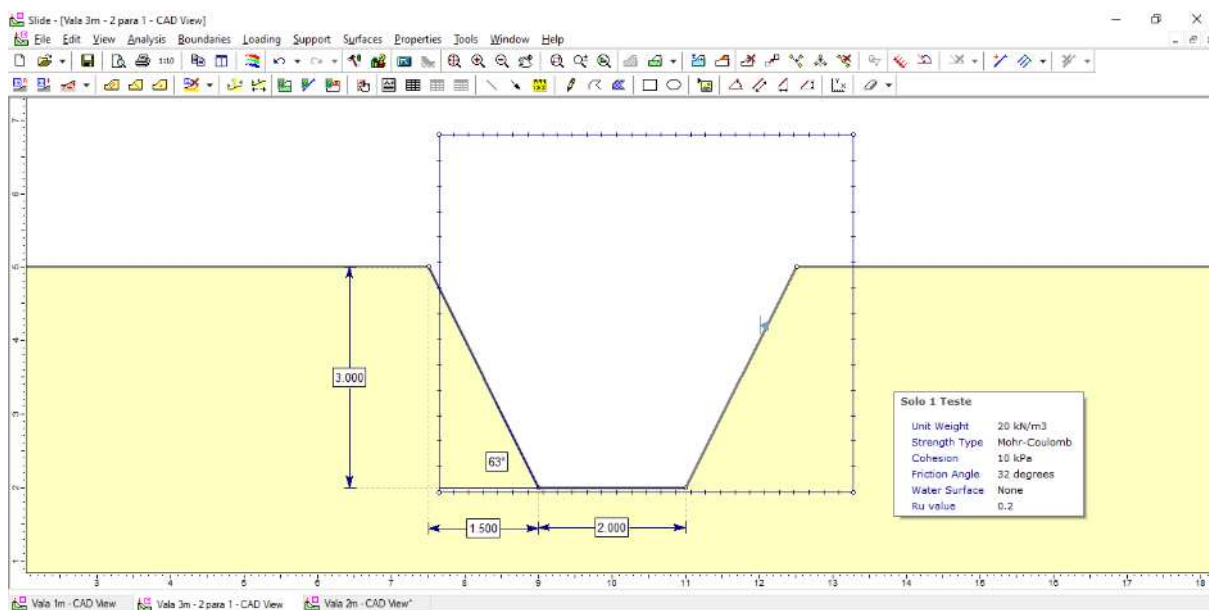
Figura 21 – Recorte de imagem gerada no programa *Slide* mostrando uma das configurações de vala utilizadas (vala reta de 2m)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a Figura 22 apresenta também um recorte gerado a partir do programa *Slide*, porém exemplifica a configuração das valas com paredes inclinadas em 63°, ou seja, para cada um metro escavado na horizontal tem-se dois metros na vertical.

Figura 22 – Recorte de imagem gerada no programa *Slide* mostrando uma das configurações de vala utilizadas (vala inclinada 1H:2V de 3m)

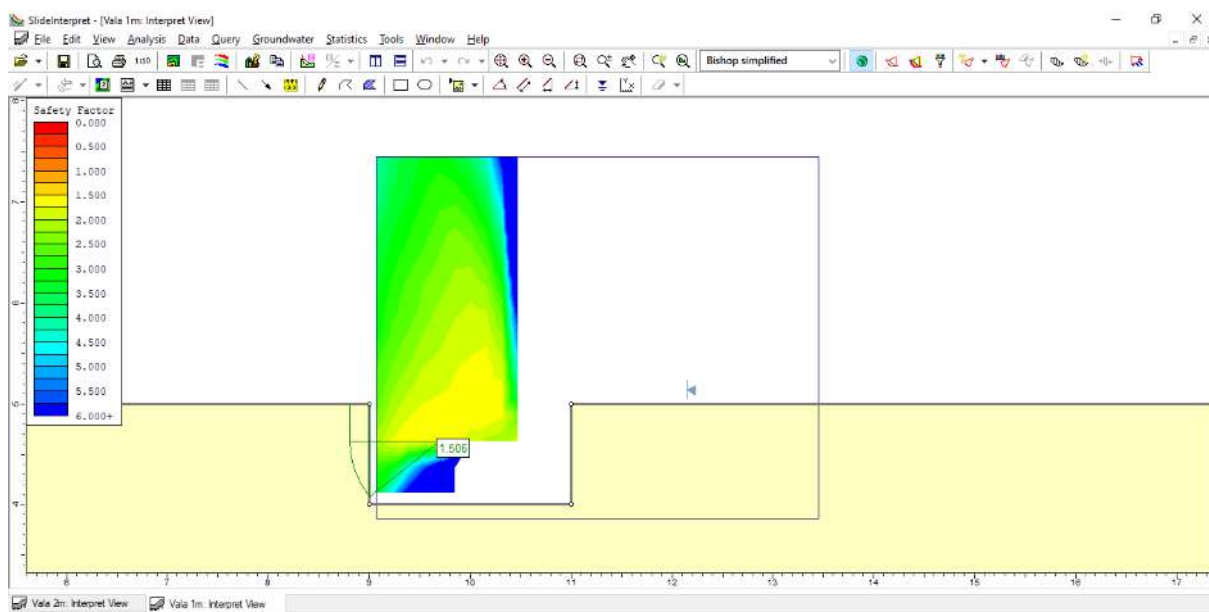


Fonte: Elaborado pelo autor.

Já as figuras Figura 23 e Figura 24 mostram os resultados da simulação, evidenciando o fator de segurança, após inserção dos parâmetros e condições definidas pelo usuário.

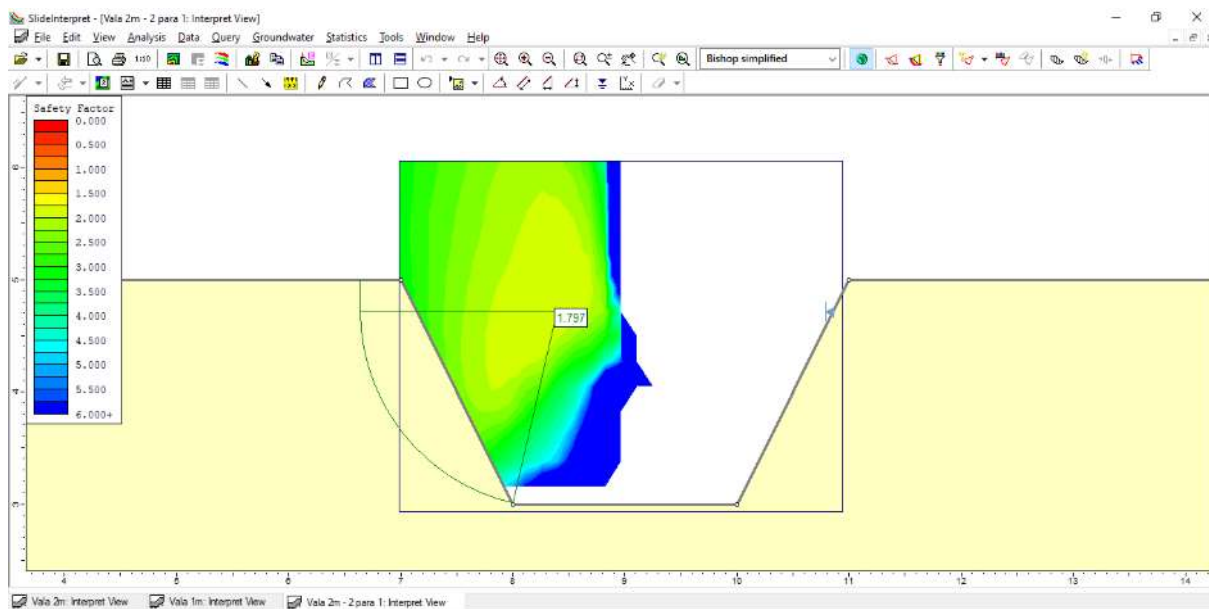
Salienta-se que a configuração da vala, em todas as simulações, foi simétrica. Deste modo, apenas houve a necessidade de rodar o programa avaliando as rupturas circulares/rotacionais da esquerda para a direita, pois apresentariam os mesmos resultados da direita para a esquerda.

Figura 23 – Recorte de imagem gerada no programa *Slide* mostrando o resultado de uma simulação (vala reta de 1m)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Recorte de imagem gerada no programa *Slide* mostrando o resultado de uma simulação (vala inclinada de 2m)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Salienta-se que não foram consideradas nestas simulações estruturas de escoramento.

4.1 INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ATRITO E PESO ESPECÍFICO APARENTE NATURAL DO SOLO

Com o objetivo de avaliar a influência dos índices do solo e, também, identificar quanto estes influenciam no fator de segurança, ou seja, na integridade das paredes de uma escavação de vala, foram variados o ângulo de atrito interno entre as partículas do solo (ϕ) e o peso específico aparente natural (γ_n), conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na segunda avaliação do fator de segurança

Profundidade da vala (m)	Coesão “c” (kPa)	Peso específico aparente natural “ γ_n ” (kN/m ³)	Ângulo de atrito interno “ ϕ ” (°)	Influência de água no solo “Ru value”
1	5	15, 16, 17, 18, 19 e 20	22, 24, 26, 28, 30 e 32	0 e 0,2
2	10	15, 16, 17, 18, 19 e 20	22, 24, 26, 28, 30 e 32	0 e 0,2
3	10	15, 16, 17, 18, 19 e 20	22, 24, 26, 28, 30 e 32	0 e 0,2

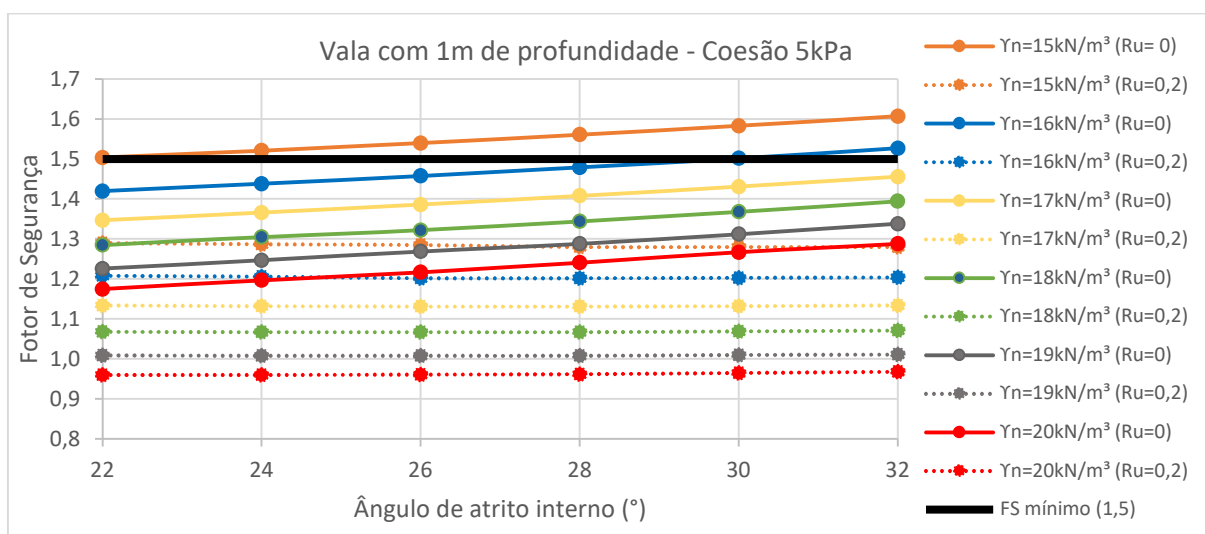
Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente fora cogitado avaliar a influência com o mesmo valor de coesão, ou seja, 5kPa para as três configurações de vala, porém os resultados preliminares mostraram fatores de segurança muito baixos já para a vala com profundidade de dois metros. Sendo assim, definiu-se aumentar o valor fixo para 10kPa da coesão nas valas de dois e três metros de profundidade.

4.1.1 Valas com ângulo de 90° das paredes em relação ao fundo (1H:1V)

Para poder avaliar melhor os resultados, ou seja, as variações do FS, foram inseridos nos mesmos gráficos e nas mesmas condições geométricas de vala, as variações dos parâmetros geomecânicos supracitadas, estando no Gráfico 1 a simulação para a vala de 1 metro e no Gráfico 2 e Gráfico 3, respectivamente os fatores de segurança alcançados nas simulações para as valas de dois metros e três metros.

Gráfico 1 – FS para variação do ângulo de atrito interno e peso específico do solo
vala de 1m



Fonte: Elaborado pelo autor.

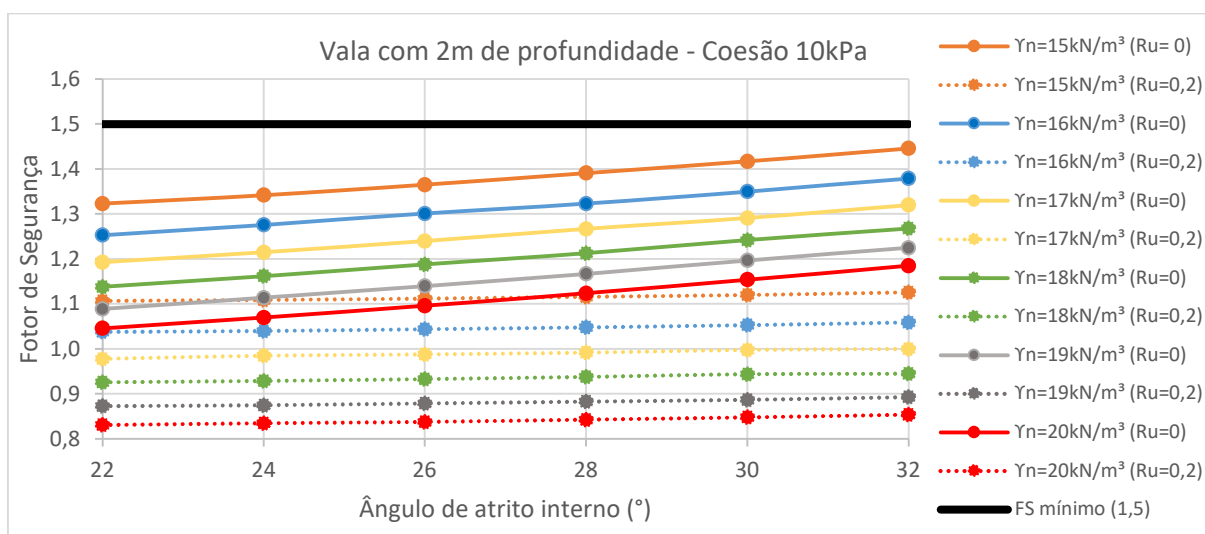
Inicialmente cabe destacar que, igualmente aos resultados que variavam a coesão, aqui também se observou que os valores do FS sempre aparecem menores quando acrescentada poropressão ($R_u=0,2$).

Outra interpretação relevante refere-se ao decréscimo no FS conforme há aumento no peso específico aparente natural (γ_n). O ângulo de atrito interno (ϕ) gerado entre as partículas do solo também tem seu grau de influência sobre o FS, porém conforme os resultados para a vala de um metro, causando menor amplitude que a variação do γ_n .

Ainda observando o Gráfico 1, foi verificado que somente com $\gamma_n=15\text{kN/m}^3$ e sem considerar influência da água, alcança-se o fator de segurança mínimo. Na contramão, com aumento do ângulo de atrito interno foi observada uma sutil melhora no FS, mesmo quando considerados solos com elevado $\phi=30^\circ$ ou $\phi=32^\circ$ por exemplo, tem-se FS abaixo de 1,5 para solos com γ_n acima de 16kN/m^3 .

Como já discutido, o valor da coesão (c) em apenas 5kPa fez a maioria dos valores do coeficiente de segurança ficar abaixo do mínimo (1,5). Certamente para esta configuração de vala (um metro), se fossem utilizados valores mais elevados de coesão, ter-se-iam resultados com maior FS, conforme comprovado no item 4.1.

Gráfico 2 – FS para variação do ângulo de atrito interno e peso específico do solo
vala de 2m



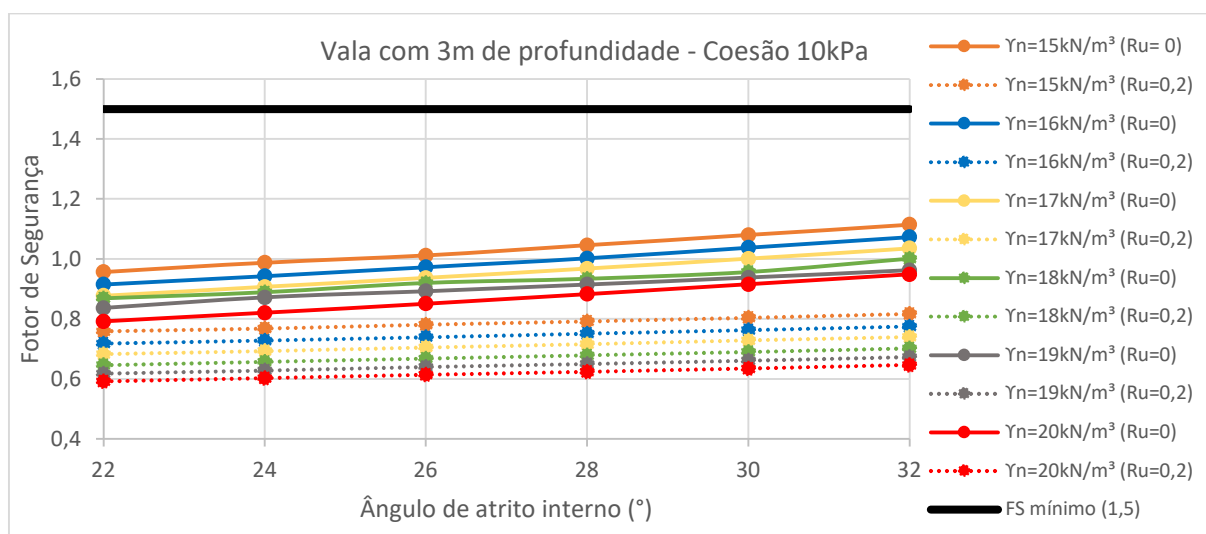
Fonte: Elaborado pelo autor.

Igualmente aos resultados da simulação com vala de um metro aqui o aumento do γ_n permanece influenciando na redução do FS. Fato fácil de compreender pois solos mais pesados sofrem maior atuação da gravidade, favorecendo o seu cisalhamento e consequente ruptura com colapso das paredes.

Com o aumento da vala para dois metros, mesmo ampliando-se a coesão para 10kPa, nenhum dos valores do ϕ (faixa de 22° a 32°) e do γ_n (15kN/m³ a 20kN/m³) atingiram o coeficiente segurança mínimo de 1,5. Quando consideradas as séries simuladas com Ru=0,2 apenas as com pesos específicos inferiores a 17kN/m³ superaram o fator de segurança de 1,0.

Outra avaliação que pode ser extraída do gráfico acima refere-se à variação muito sutil dos valores do FS, exclusivamente para as simulações considerando solo saturado, mesmo com o acréscimo do ângulo de atrito interno das partículas do solo.

Gráfico 3 – FS para variação do ângulo de atrito interno e peso específico do solo
vala de 3m



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como esperado os resultados do fator de segurança relacionado a estabilidade das paredes da vala de três metros foram ainda mais baixos, sendo apenas as séries com γ_n inferior a 17kN/m^3 , para os maiores ângulos de atrito e sem considerar água, que ultrapassaram o valor de 1,0. Cabe aqui esclarecer que os valores do coeficiente de segurança que não atingiram 1,0 significam que as paredes da vala nem ficariam íntegras, ou seja, entram em colapso (desmoronam) durante a escavação, ou melhor, durante o aprofundamento da vala.

Outra avaliação que pode ser extraída do gráfico de três metros e refere-se apenas as séries que consideram saturação do solo, é que nenhuma simulação mostrou valores do FS acima de 1,0, mesmo com elevados valores de ϕ e baixos de γ_n .

Ainda sobre as simulações deste item pôde se perceber que nenhuma das valas teriam escavações seguras (FS acima de 1,5) para a condição com presença de água (Ru=0,2), deixando evidente a necessidade de implantação de medidas de escoramento para escavações nestas valas com solos nestas faixas de variação dos parâmetros geomecânicos.

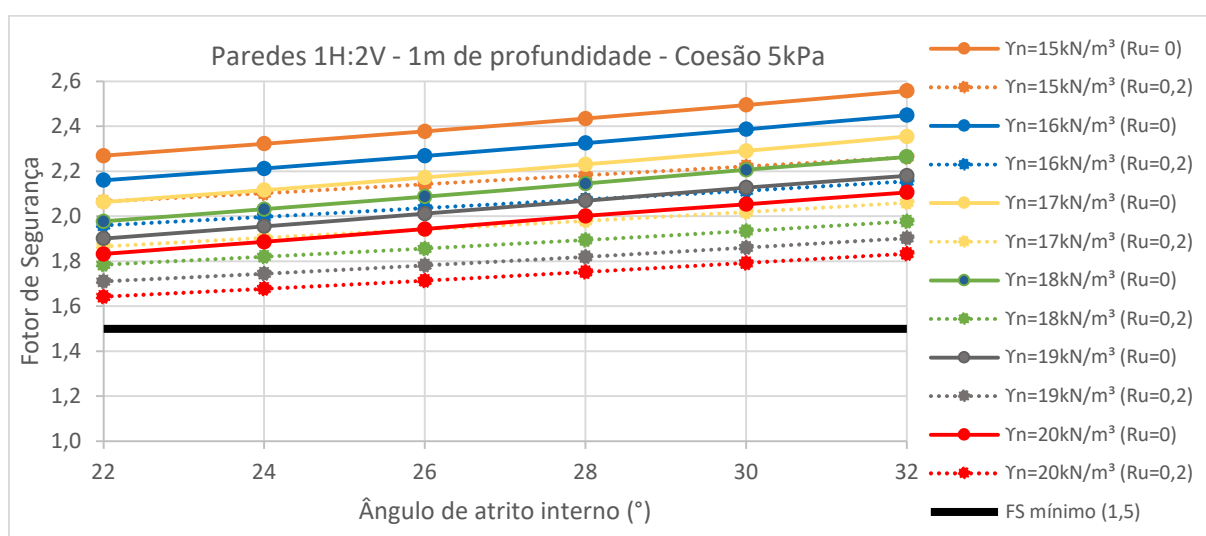
Por fim cabe salientar que é notável a menor influência sobre o fator de segurança atribuída aos parâmetros γ_n e ϕ quando comparados aos associados a coesão.

4.1.2 Valas com ângulo de 63° das paredes em relação ao fundo (1H:2V)

Neste item estão apresentados os resultados que avaliam o fator de segurança das simulações realizadas com a vala tendo uma configuração inclinada, ou seja, tendendo a ser mais segura em relação a instabilidade de suas paredes.

O Gráfico 4 traz os resultados do FS para a vala de um metro de profundidade e paredes inclinadas.

Gráfico 4 – FS para variação do ângulo de atrito interno e peso específico do solo vala de 1m com inclinação das paredes de 63°

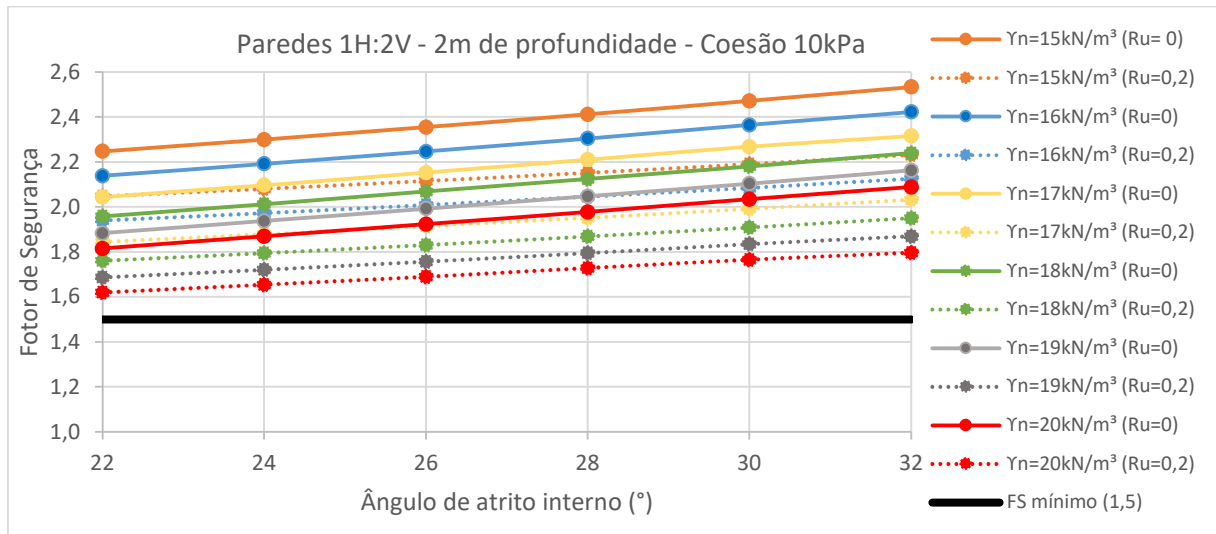


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados vistos acima são expressivamente superiores aos atingidos com a vala tendo suas paredes retas (Gráfico 1), tanto que todos os valores do FS encontrados são superiores a 1,6. Já para a simulação da vala reta, de mesma profundidade, raros foram os valores de FS que superaram 1,5 e nenhum deles quando estava-se considerando a poropressão presente no maciço de solo simulado.

Mesmo usando nesta simulação um valor consideravelmente baixo de coesão (5kPa) toda a escavação estaria estável e com coeficiente de segurança mínimo (1,5) sendo atingido. Salienta-se aqui o preconizado na NR-18:2021 que apenas escavações inferiores a 1,25m de profundidade estão livres de serem acompanhadas de profissionais com comprovada habilitação para tal.

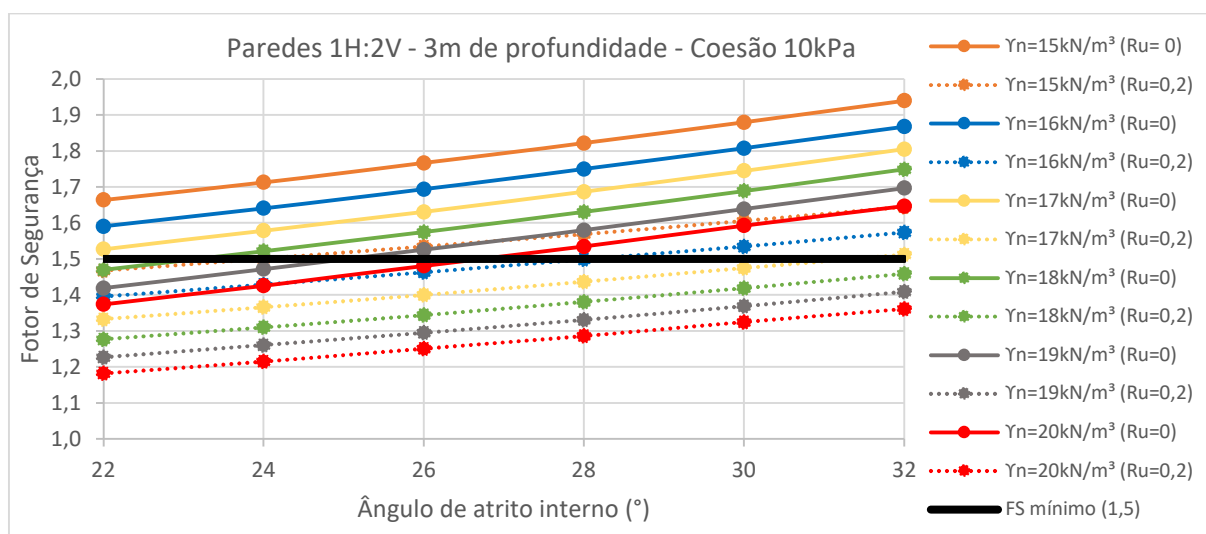
Gráfico 5 – FS para variação do ângulo de atrito interno e peso específico do solo
 vala de 2m com inclinação das paredes de 63°



Fonte: Elaborado pelo autor.

Igualmente aos resultados para a vala inclinada de um metro, no Gráfico 5 obteve-se os menores coeficientes de segurança sendo superiores a 1,6, atribuídos a simulação considerando $Ru=0,2$ e com peso específico mais elevado, ou seja, 20kN/m^3 . Cabe destacar que a coesão neste caso foi ampliada para 10kPa igualmente ao que fora efetuado na simulação com a vala reta de 2m (Gráfico 2). Ainda sobre esta comparação, pode-se observar como a inclinação das paredes sustentou a estabilidade desta vala e a atribuiu considerável FS, já que na vala reta nenhum valor atingiu $FS > 1,5$.

Gráfico 6 – FS para variação do ângulo de atrito interno e peso específico do solo
vala de 3m com inclinação das paredes de 63°



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como esperado os resultados do fator de segurança nesta configuração de vala (Gráfico 6) obteve menores resultados em detrimento das outras com menores profundidades, entretanto mesmo para os valores mais críticos utilizados do ângulo de atrito interno (menores) e do peso específico (maiores) entregaram fatores de segurança superiores a 1.

De forma geral a inclinação de 63° das paredes da vala, mesmo esta não sendo tão acentuada se comparada a inclinações comuns em obras na ordem de 45° ou até mesmo 30°, se mostrou bastante eficiente como medida a ser adotada em prol da estabilidade das paredes das valas e da segurança dos trabalhadores.

Outra avaliação pertinente sobre as valas retas das inclinadas é que a influência da saturação (Ru=0,2) foi menor nas valas inclinadas, fato percebido quando se avalia a distância da simulação sem água (linhas cheias dos gráficos) das com água (linhas pontilhadas). É provável que este fato ocorra pois quando se tem inclinação das paredes o nível de água perde pressão mais rapidamente com o empuxo hidrostático exercendo menor influência em detrimento de paredes retas.

4.2 INFLUÊNCIA DA COESÃO DO SOLO

Com intuito de descobrir qual seria a influência de outros parâmetros do solo em seu fator de segurança, relacionada a estabilidade das paredes, outra avaliação

realizada foi a variação da coesão do solo e fixação do peso específico e o ângulo de atrito, conforme a Tabela 2.

Com a fixação do peso específico (γ_n) e do ângulo de atrito interno (ϕ) em valores médios consegue-se avaliar isoladamente a influência da parcela coesão do solo sobre a integridade das paredes de uma escavação em vala.

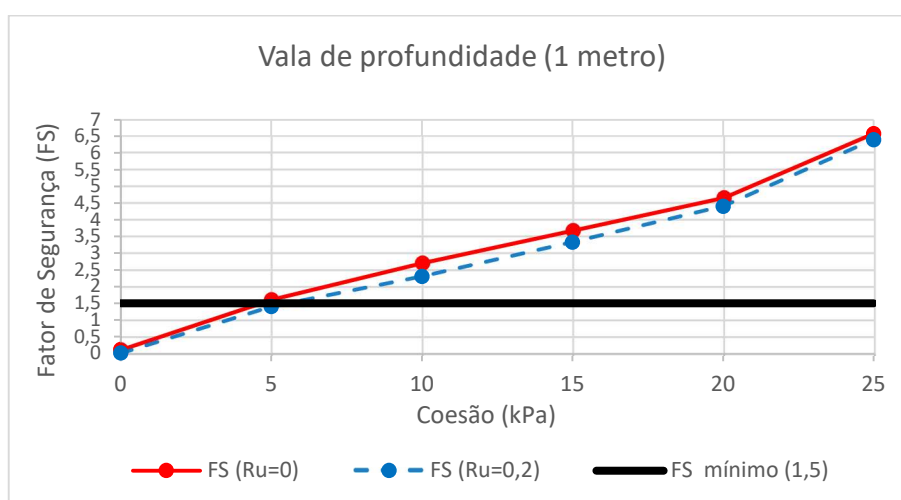
Tabela 2 – Parâmetros utilizados para avaliação do fator de segurança

Profundidade da vala (m)	Coesão “c”(kPa)	Peso específico aparente natural “ γ_n ” (kN/m ³)	Ângulo de atrito interno “ ϕ ” (°)	Influência de água no solo “Ru value”
1	0, 5, 10, 15, 20, 25	16	26	0 e 0,2
2	0, 5, 10, 15, 20, 25	16	26	0 e 0,2
3	0, 5, 10, 15, 20, 25	16	26	0 e 0,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados dessa avaliação estão expressos nos gráficos que seguem, sendo que o Gráfico 7 ilustra os resultados do fator de segurança da vala de um metro de profundidade, o Gráfico 8 os resultados da vala de dois metros e o Gráfico 9 a variação da coesão para uma vala de três metros. Cabe salientar que nestas três simulações estão sendo consideradas valas com paredes verticais, ou seja, ângulo de 90° em relação ao fundo da vala.

Gráfico 7 – Fatores de segurança para variação da coesão

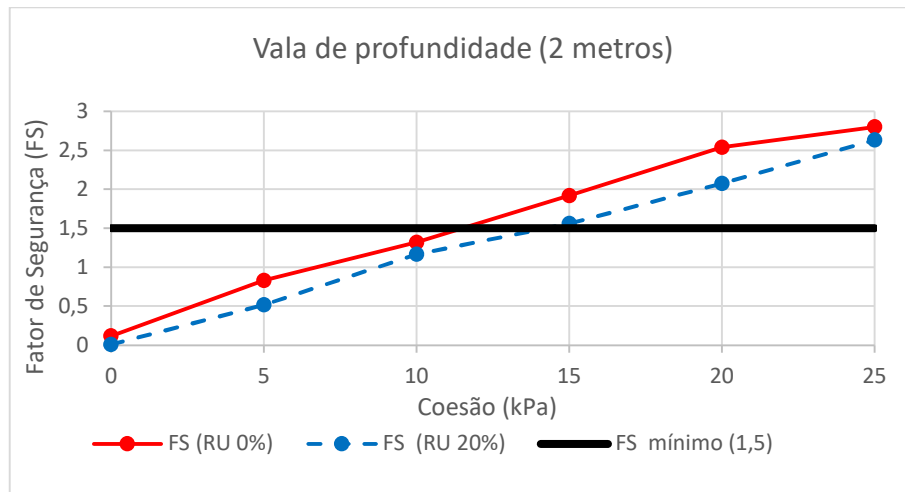


Por intermédio do gráfico anterior, pode-se verificar que os valores do FS já atingem índices seguros, ou seja, 1,5, para solos que apresentam coesão de 5kPa,

mesmo quando simuladas escavações em terrenos com presença de água (poropressão), conforme a série $Ru=0,2$.

Percebe-se ainda a influência da poropressão nos resultados, pois, os valores do FS ao longo do gráfico estão deslocados entre as séries com e sem considerar umidade no solo.

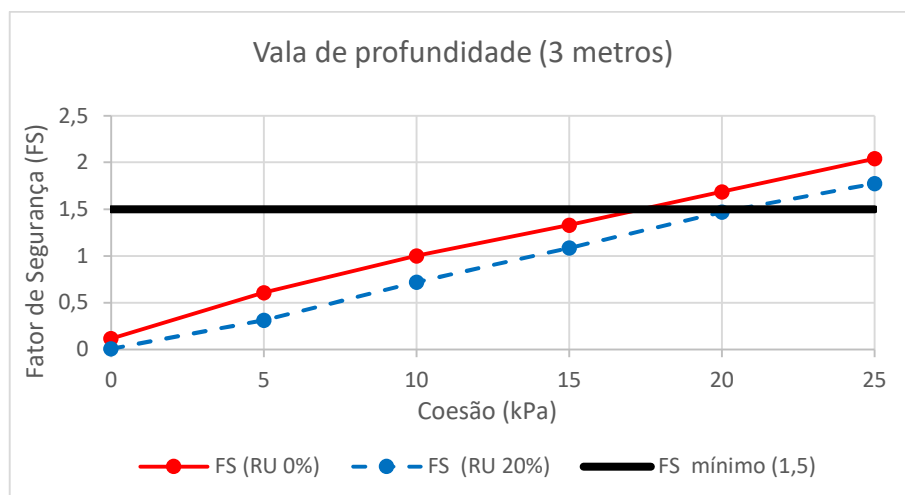
Gráfico 8 – Fatores de segurança para variação da coesão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do Gráfico 8, que ilustra a escavação de dois metros, pode-se perceber uma diferença com a vala de um metro, pois apenas valores de coesão, acima de 10kPa para série seca e de quase 15kPa para escavações considerando $Ru=0,2$, atingiu-se a fator de segurança mínimo exigido (1,5).

Gráfico 9 – Fatores de segurança para variação da coesão



Fonte: Elaborado pelo autor.

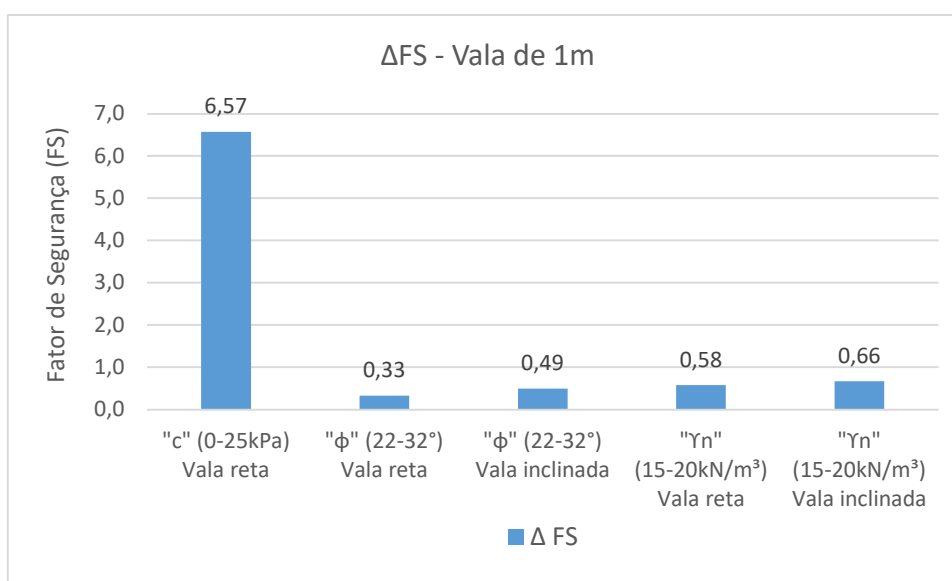
Já para as simulações realizadas em uma escavação de vala com paredes verticais de três metros, foram obtidos fatores de segurança acima do mínimo exigido por norma, apenas quando os valores de coesão do solo se aproximam de 20kPa.

Salienta-se ainda a evidente importância e influência do parâmetro coesão do solo, visto pelos resultados das simulações apresentadas neste item, no fator de segurança que está diretamente associado a ruptura do solo e a seu colapso.

Para poder avaliar conjuntamente a influência dos parâmetros do solo foram gerados gráficos que expressam a variação do FS, ou seja, a resultante entre o valor máximo menos o mínimo. Salienta-se que foram aplicadas as mesmas faixas de variação de cada parâmetro geomecânico, conforme usadas anteriormente.

O Gráfico 10 apresenta a variação (delta) dos valores encontrados para o fator de segurança na vala com um metro de profundidade.

Gráfico 10 – Variação do FS por parâmetro - vala de 1m

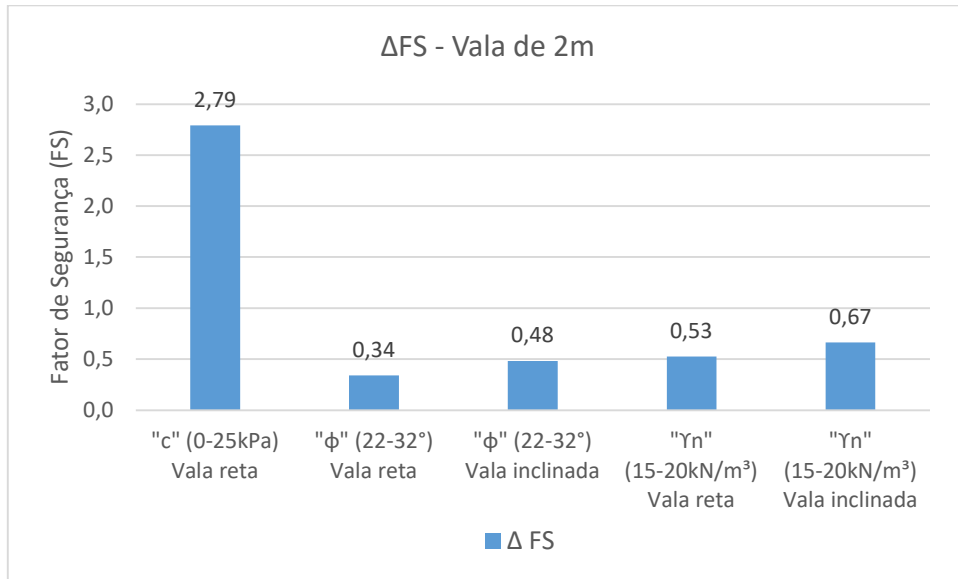


Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme já discutido o parâmetro coesão apresentou a maior amplitude de variação do FS, já a variação do γ_n e do ϕ tiveram valores do FS, máximo e mínimo, mais próximos. Outra constatação, do gráfico acima é o acréscimo nos valores do FS para as valas simuladas com paredes inclinadas, conforme já visto.

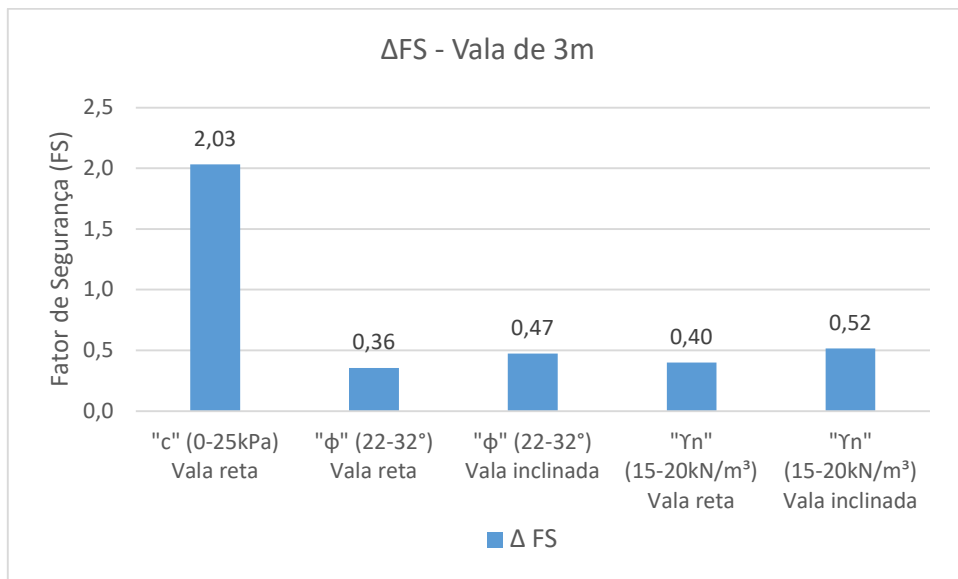
O Gráfico 11 e Gráfico 12 mostram a mesma variação do FS entre os parâmetros estudados, porém para as valas de dois e três metros, respectivamente.

Gráfico 11 – Variação do FS por parâmetro - vala de 2m



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 12 – Variação do FS por parâmetro - vala de 3m



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores do fator de segurança para as valas de dois e três metros apresentaram variação menos expressiva que para a vala de um metro. Observa-se ainda que a influência do parâmetro coesão é menor que para a vala mais rasa, atingindo ΔFS de 2,79 na vala de 2m e 2,03 na de 3m. A amplitude de variação dos parâmetros γ_n e ϕ se mostraram semelhantes para ambas profundidades de vala.

4.3 CÁLCULO DE ESCORAMENTO

A fim de verificar as técnicas de escoramento sugeridas pela NBR 12.266:1992 (ABNT, 1992), foi realizado o dimensionamento do escoramento de uma vala de 3m de altura com dois conjuntos de parâmetros geomecânicos, os quais estão apresentados na Tabela 3.

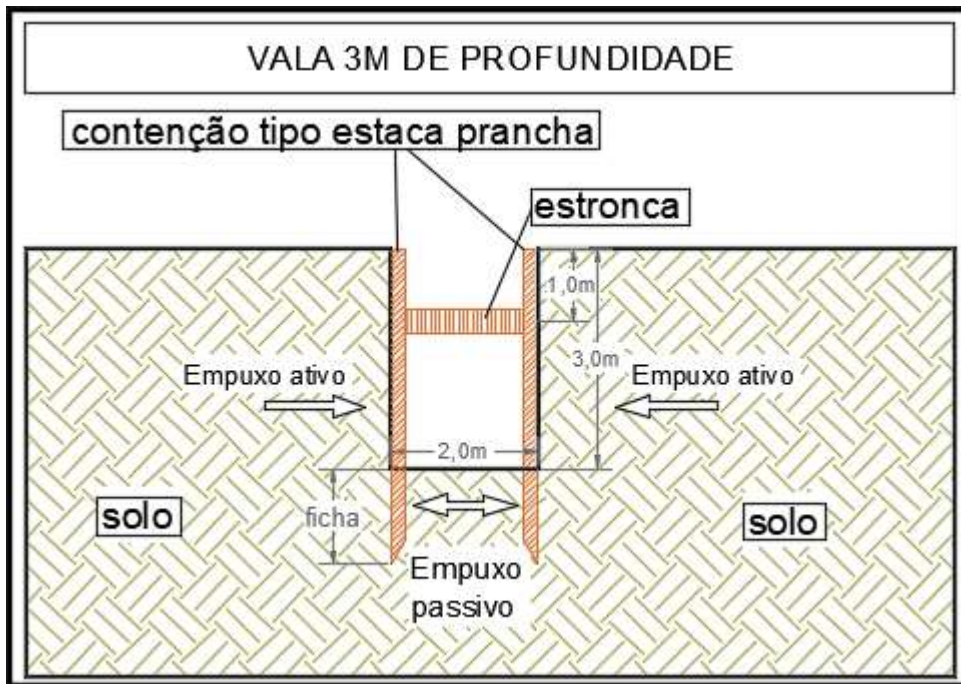
Tabela 3 – Parâmetros geomecânicos utilizados no dimensionamento de um tipo de estrutura de escoramento

Profundidade da vala (m)	Coesão “c” (kPa)	Peso específico aparente natural “ γ_n ” (kN/m ³)	Ângulo de atrito interno “ ϕ ” (°)	Influência de água no solo “Ru value”
3	0, 5 e 10	15	22	0
3	0, 5 e 10	15	22	0,2
3	0, 5 e 10	18	30	0
3	0, 5 e 10	18	30	0,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 25 encontra-se o projeto de escoramento utilizado no dimensionamento apresentado neste item. Trata-se de uma contenção do tipo estaca prancha com uma linha de travamento (estronca) situada a um metro do início da escavação e com um comprimento de ficha que depende dos parâmetros geomecânicos adotados.

Figura 25 – Projeto de escoramento utilizado para determinar as solicitações exercidas pelo solo na vala

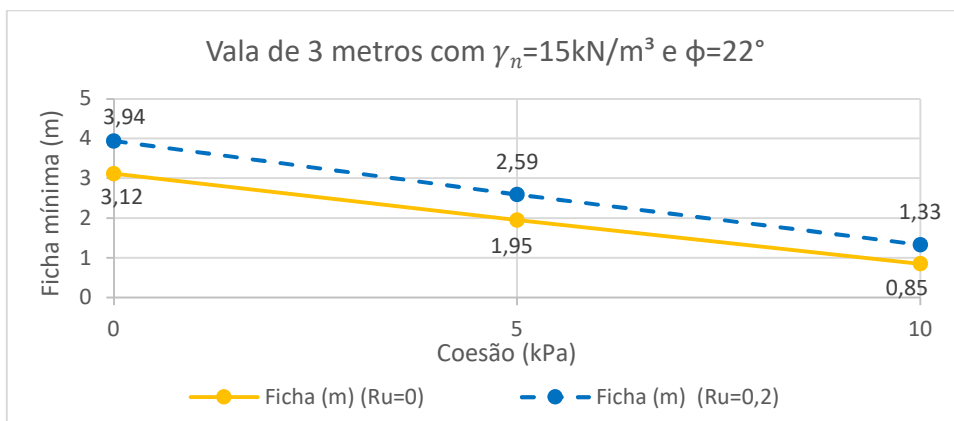


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados extraídos do dimensionamento para cada conjunto de parâmetros estão expressos nos gráficos que seguem.

O Gráfico 13 apresenta os resultados do dimensionamento da ficha mínima necessária para uma vala, com paredes a 90° com o fundo da escavação, sendo considerado o solo com peso específico aparente natural (γ_n) igual a 15kN/m^3 e ângulo de atrito interno entre as partículas (ϕ) de 22° .

Gráfico 13 – Ficha mínima, em metros, para variação da coesão do solo



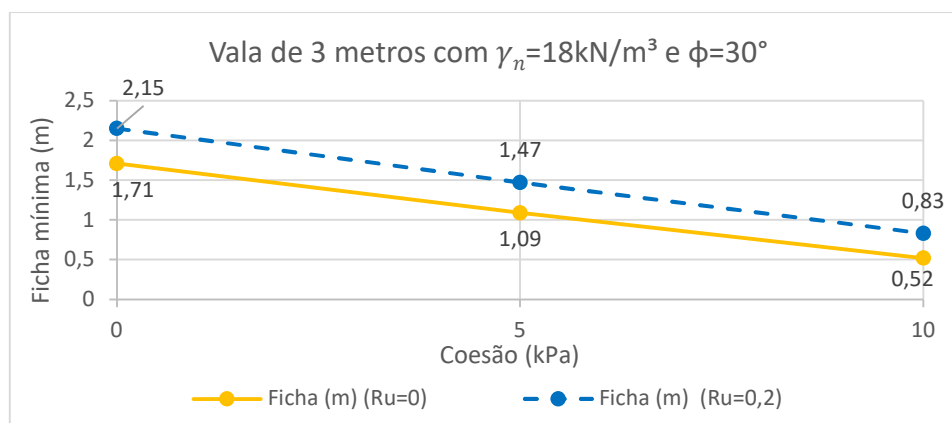
Fonte: Elaborado pelo autor.

Avaliando os resultados do dimensionamento acima pode-se perceber a queda no comprimento da ficha (parte da estaca prancha cravada no solo) de 3,94m para 1,33m com o incremento da parcela de coesão do solo de 0kPa para 10kPa. A redução é expressiva atingindo cerca de 34%, corroborando com os resultados do item 4.1, que também evidenciam a alta influência da coesão do solo em prol da segurança e estabilidade das paredes da vala quanto a sua ruptura.

Os valores deste dimensionamento quando avaliada a influência da poropressão, ou seja, presença de água no solo também se assemelham aos resultados já discutidos até aqui, pois, igualmente a provocar queda no FS mostram uma necessidade maior de ficha para o escoramento estar em equilíbrio, ou seja, seguro.

Outra avaliação pretendida neste item (Gráfico 14) foi comparar a influência que seria percebida no acréscimo do γ_n (15kN/m³ para 18kN/m³), que por sua vez é inversamente proporcional ao aumento do FS e ao acréscimo do ϕ de 22° para 30°.

Gráfico 14 – Ficha mínima, em metros, para variação da coesão do solo



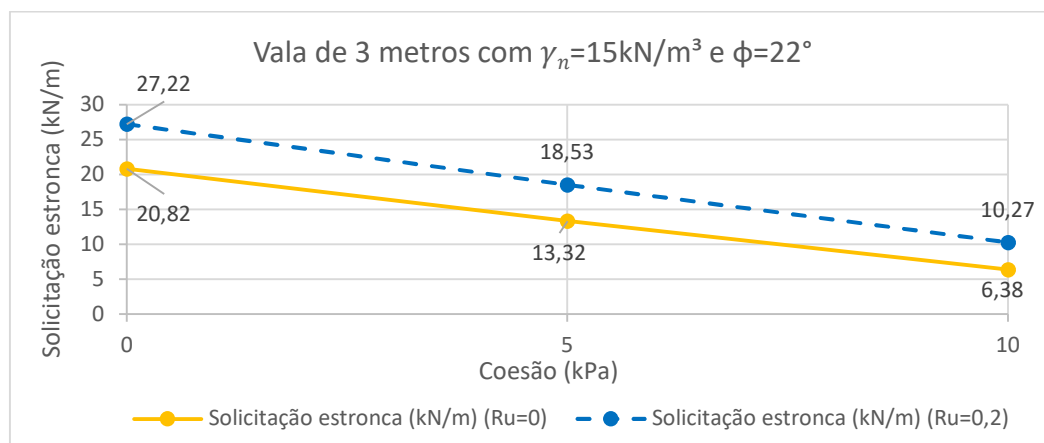
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados do comprimento da ficha deste gráfico são menores que os apresentados no Gráfico 13 e variam percentualmente entre 54,8% a 61,2% incluindo os resultados do comprimento da ficha para o dimensionamento considerando presença de água no solo.

Por meio desta comparação pode-se afirmar que a influência negativa do acréscimo de um solo mais pesado (maior peso específico) foi sucumbida pelo incremento do ângulo de atrito interno, pois houve considerável diminuição da ficha. Em resumo o coeficiente de atrito tem maior influência do que o parâmetro γ_n .

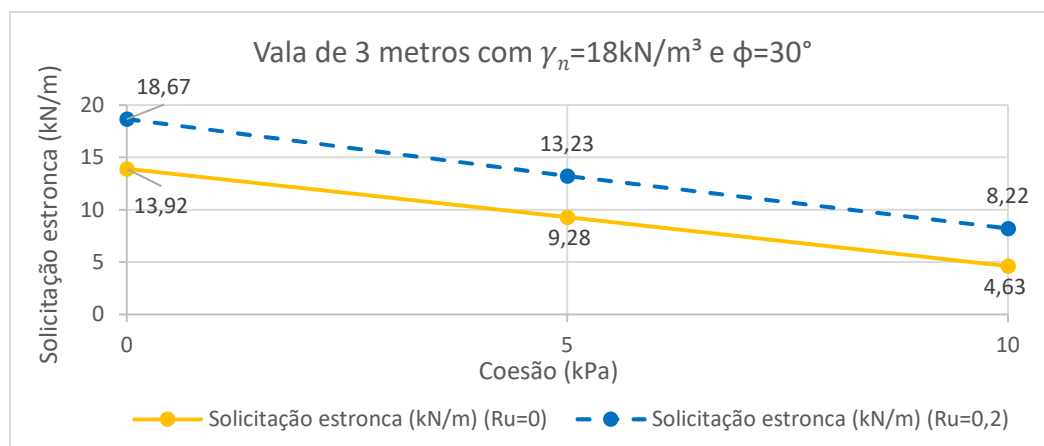
A fim de produzir um estudo mais completo optou-se por calcular também a sollicitação de tensão atuante em um escoramento de vala com um nível de estronca, tal qual já apresentado na Figura 25. Os resultados deste dimensionamento estão expressos no Gráfico 15 que considera o escoramento sob um solo com $\gamma_n=15\text{kN/m}^3$ e $\phi=22^\circ$ e no Gráfico 16 que aumenta o γ_n para 18kN/m^3 e o ϕ para 30° .

Gráfico 15 – Sollicitação de tensão horizontal na linha de estroncas do escoramento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 16 – Sollicitação de tensão horizontal na linha de estroncas do escoramento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme os dados apresentados nos gráficos pode-se perceber que a inserção da poropressão influencia negativamente fazendo as sollicitações horizontais na linha de estroncas aumentarem de $20,82\text{kN/m}$ para $27,22\text{kN/m}$ com coesão igual a zero e $6,38\text{kN/m}^3$ para $10,27\text{kN/m}^3$ com coesão igual a 10kPa no Gráfico 15 e respectivamente de $13,92\text{kN/m}$ para $18,67\text{kN/m}$ e $4,63\text{kN/m}$ para $8,22\text{kN/m}$ no Gráfico 16, representando um aumento médio de $67,4\%$.

Semelhantemente aos resultados do dimensionamento da ficha, os valores de solicitação horizontal na linha da estronca para o tipo de escoramento estudado, representaram uma diminuição quando se compara os parâmetros geomecânicos de γ_n e ϕ do Gráfico 15 aos do Gráfico 16. Portanto, a solicitação máxima necessária, dentre as simulações realizadas, para o dimensionamento seguro de um projeto de escoramento considerando uma linha de estroncas foi de 27,22kN/m e foi resultado da vala reta com 3 metros de profundidade, $\gamma_n=15\text{kN/m}^3$, $\phi=22^\circ$ e considerando presença de água no solo ($R_u=0,2$).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou avaliar a influência das propriedades do solo na segurança das valas escavadas entre 1m e 3m de profundidade. Este tópico, embora simples, tem causado inúmeros acidentes em obras, principalmente pela negligência às boas práticas de engenharia.

Verifica-se que, como esperado, a estabilidade das valas está intimamente ligada às propriedades físicas dos solos. Algumas destas propriedades possuem mais influência do que outras para as geometrias e alturas de valas estudadas neste trabalho.

Concluiu-se ainda que a coesão do solo é o parâmetro geomecânico mais importante para as valas abordadas neste estudo, pois os resultados demonstraram uma expressiva variação no FS para todas as configurações de valas estudadas neste trabalho.

No dimensionamento realizado para um determinado tipo de escoramento, os resultados também mostraram a influência importante da parcela de coesão, visto que com valores de coesão zero os comprimentos de ficha foram consideravelmente maiores que para os resultados com a parcela de coesão sendo adotada de 10kPa, por exemplo.

Para os parâmetros geomecânicos peso específico aparente natural do solo e ângulo de atrito interno entre as partículas, a influência no fator de segurança nas escavações de valas foi menos significativa que a da coesão do solo.

Obviamente que a profundidade da escavação é fator fundamental nos riscos associados a esta atividade, tanto que a mesma é restrita pela NR-18:2021, com a obrigatoriedade do acompanhamento de profissional habilitado, para escavações que ultrapassam 1,25m. Os resultados indicaram que a profundidade representa considerável contribuição para a ruptura das paredes das escavações de valas.

Ainda sobre a configuração das valas, por meio dos resultados desse trabalho, concluiu-se que adotar inclinação nas paredes de uma vala aumenta generosamente o seu FS. Mesmo atribuindo inclinações pouco pronunciadas nas paredes os fatores de FS obtidos foram bem mais elevados.

Cabe ressaltar que esta inclinação é fácil de ser executada em obra, sendo com ângulo de 63°, conforme as utilizadas neste trabalho, ampliam poucos centímetros na abertura da sala não acarretando aumentos significativos nas movimentações de solo.

A influência da água presente no solo é fator crucial para determinar o quão segura ou mais estável estarão as paredes da escavação. As simulações nas quais havia influência da poropressão, sem exceção, reduziram o FS, ocorrendo para todas as configurações de vala estudadas, ou seja, com as paredes retas ou inclinadas. O aumento da poropressão no solo também apontou maiores solicitações nos projetos de escoramento estudados conforme esperado.

Ainda sobre a água, sugere-se, em prol da segurança, a consideração deste elemento nos projetos de escavação de valas, haja visto que negligenciar este parâmetro pode implicar em considerável risco de acidentes.

Por fim, como recomendação para futuros trabalhos, este estudo pode ser ampliado realizando-se outras simulações, considerando outros parâmetros geomecânicos do solo, bem como com outras configurações de valas.

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, R. A.; VELLOSO, D. A. Fundações. *In: Geologia de Engenharia*. Publicado pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) (Org.). I Ed. São Paulo: Oficina dos Textos, 1998, v. I, Cap. 23. p. 381-396.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11.682:1991** - Estabilidade de taludes. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11.682:2009** – Estabilidade de Encostas. 2ª Edição. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12.266:1992** – Projeto e execução de valas para assentamento de tubulação de água, esgoto ou drenagem urbana. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6.484:2001** – Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6.502:1995** – Rochas e Solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8.044:1983** – Projeto Geotécnico. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9.061:1985** – Segurança de escavação a céu aberto. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.
- BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. Tese de doutorado, Curso de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande, 2004.
- BASTOS, C. A. B. **Mapeamento e caracterização geomecânica das unidades geotécnicas de solos oriundos dos granitos, gnaisses e migmatitos de Porto Alegre**. 1991. Dissertação de mestrado, Curso de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- BRASIL. Ministério da Economia/ Secretaria especial de Previdência e Trabalho. **NR-18:2001** - Condições e meio ambiente de trabalho na indústria da construção. Brasília, DF: Ministério da Economia, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-18.pdf/view>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- BRASIL. Ministério da Fazenda. Instituto Nacional do Seguro Social Empresa de Tecnologia e Informações da Previdência. **Anuário estatístico de acidentes do trabalho**: AEAT 2017. Brasília, DF: Ministério da Fazenda, 2017. v. 1. Disponível em: <http://sa.previdencia.gov.br/site/2018/09/AEAT-2017.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2021.
- FERREIRA, P. M. V. **Estudo de um solo residual de arenito da rodovia RS 239: ensaios triaxiais servo – controlados**. 1998. Dissertação de mestrado, Curso de Pós-

graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

FILHO, O. A.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de Taludes. *In: Geologia de Engenharia*. Publicado pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) (Org.). I Ed. São Paulo: Oficina dos Textos, 1998, v. I, Cap. 15. p. 243-269.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, I. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas**. Curitiba: Editora da UFPR, 2001.

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

GUIDICINI, G.; NIEBLE, M. C. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Blucher. 2ª Edição, 1983.

IDOSO morre soterrado em vala no Oeste de Santa Catarina. *In: NSC Total*. Florianópolis/SC, 10 Dez. 2020. Notícia. Disponível em: <https://www.nscotal.com.br/noticias/idoso-morre-soterrado-em-vala-no-oeste-de-santa-catarina>. Acesso em: 25 maio 2021.

INFANTI JR. N.; FORNASARI FILHO, N. **Processos de Dinâmica Superficial**. *In: Geologia de Engenharia*. Publicado pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) (Org.). I Ed. São Paulo: Oficina dos Textos, 1998, v. I, Cap. 9. p. 131-152.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Anuário estatístico do Brasil**. Rio de Janeiro. IBGE. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?id=720&view=detalhes>. Acesso em: 9 out. 2021.

INSTITUTO de Criminalística conclui que soterramento que deixou operários mortos ocorreu porque normas de segurança deixaram de ser adotadas. *In: G1*. Londrina/PR, 09 Set. 2019. Notícia. Disponível em: <https://g1.globo.com/pr/norte-noroeste/noticia/2019/09/09/instituto-de-criminalistica-conclui-que-soterramento-que-deixou-operarios-mortos-ocorreu-porque-normas-de-seguranca-deixaram-de-ser-adotadas.ghtml>. Acesso em: 10 jun. 2021.

KIFER, C. Trabalhador é soterrado durante escavação de vala em obra de casa em Santa Luzia. **Rádio Itatiaia**, Belo Horizonte, 29 Out. 2020. Notícia. Disponível em: <https://www.itatiaia.com.br/noticia/trabalhador-e-soterrado-durante-escavacao-de-vala-em-obra-de-casa-em-santa-luzia>. Acesso em 10 jun. 2021.

LAUDO constata riscos que causaram morte de trabalhador em obra instituto. *In: Portal Correio*. João Pessoa/PB, 21 Fev. 2019. Notícia. Disponível em: <https://portalcorreio.com.br/laudo-constata-riscos-que-causaram-morte-de-trabalhador-em-obra/>. Acesso em: 10 jun. 2021.

MARTINS, F.B. **Investigação do comportamento mecânico de um solo naturalmente estruturado**. 2001. Tese de Doutorado, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MOLITERNO, A. **Caderno de Muros de Arrimo**. São Paulo: Editora Blucher. 2ª Edição, 1994.

OPERÁRIO morre após acidente em escavação de canteiro de obras em Porto Alegre. *In: Gaúcha ZH*, Porto Alegre/RS, 29 Jul. 2020. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2020/07/operario-morre-apos-acidente-em-escavacao-de-canteiro-de-obras-em-porto-alegre-ckd84iofa00130147cwyfigbm.html>. Acesso em 10 jun. 2021.

PERAZZOLO, L. **Estudo geotécnico de dois taludes da Formação Serra Geral, RS**. 2003. Dissertação de Mestrado, Programa de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

RIFFEL, E. S.; GUASSELLI, L. A.; BRESSANI, L. A. Desastres associados a movimentos de massa: uma revisão de literatura. *In: Boletim Goiano de Geografia*. Goiânia, v. 36, n. 2. p. 285-101. Mai./Jul.2016. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/171427/001055987.pdf?sequence=1>. Acesso em: 25 jun. 2021.

RIGO, M. L. **Mineralogia, intemperismo e comportamento geotécnico de solos saprolíticos de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral**. 2005. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ROCSCIENCE. **Slide Versão 5.0: Slide Tutorials** 08, 11. Rocscience, Toronto, Ontario, Canadá, 2004.

SERVIÇO SOCIAL DA INDÚSTRIA (SESI). Departamento Nacional. **Manual de segurança e saúde no trabalho para escavação na indústria da construção**. Brasília/DF: SESI/DN, 2019. 59.

SILVEIRA, F. G. **Investigação do comportamento mecânico de um solo residual de gnaiss da cidade de Porto Alegre, RS**. 2005. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SOARES, J. M. D. **Estudo do comportamento geotécnico do depósito de argila mole da grande Porto Alegre**. 1997. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.