



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E DE
MATERIAIS – PPGEM

RAFAEL BUGS ANTOCHEVIZ

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO PROCEDIMENTO A SER UTILIZADO EM UMA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES – RUPTURA CIRCULAR

Porto Alegre

2018

RAFAEL BUGS ANTOCHEVIZ

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO PROCEDIMENTO A SER UTILIZADO EM UMA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES – RUPTURA CIRCULAR

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica

Orientador: Prof. Dr. André César Zingano

Porto Alegre

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Dr. Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Prof.^a Dr.^a Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Prof.^a Dr.^a Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Vice-Coodenador: Prof. Dr. Afonso Reguly

<https://www.ufrgs.br/bibeng/ficha-catalogfica/>

RAFAEL BUGS ANTOCHEVIZ

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO PROCEDIMENTO A SER UTILIZADO EM UMA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES – RUPTURA CIRCULAR

Está Dissertação foi analisada e julgada adequada para à obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Orientador: Prof. Dr. André César Zingano

Aprovado em: ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Antônio Bressani – (PPGEC/UFRGS) _____

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni – (PPGEM/UFRGS) _____

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe – (PPGEM/UFRGS) _____

Dedico este trabalho a minha família e
minha namorada pela apoio e compreensão
incondicionais

AGRADECIMENTOS

A meus pais e minha irmã pelo amor e apoio incondicional ao longo de minha vida, pelos sacrifícios que fizeram para que eu pudesse concretizar meus sonhos, pela educação de qualidade que sempre batalharam para que eu tivesse e por sempre acreditarem em mim, mesmo quando eu não acreditava mais.

A minha namorada por seu amor, sua amizade e por sempre estar ao meu lado, me apoiando e incentivando a continuar em frente e me tornar uma pessoa e um profissional melhor, todos os dias.

Aos amigos e colegas sempre presentes e fiéis, que compreenderam minha ausência em alguns momentos e, que de alguma forma contribuíram para essa dissertação.

Aos amigos e colegas do laboratório de Mecânica de Rochas da UFRGS que de alguma forma sempre estiveram presentes e apoiaram a concretização desse trabalho e, em especial, ao Prof. Dr. André Cezar Zingano pela orientação, apoio e amizade.

Aos funcionários do PPGEM pela ajuda e compreensão, bem como por sempre estarem disponíveis e dispostos a ajudar e a manter o excelente nível do programa de pós-graduação e, também, a CNPq pelo auxílio concedido.

“It won't end here, your faith has got to be greater than your fear”

Julian Casablancas

RESUMO

Análises de estabilidade de taludes, em mineração, são uma das atividades mais importantes do processo de obtenção de um bem mineral. Assegurar a estabilidade das escavações e a segurança do empreendimento são vitais para o processo de extração e, para tanto, a escolha da forma de análise (2D, *quasi*-tridimensional ou 3D) ou do método (equilíbrio limite ou análise numérica) mais propício para esse tipo de estudo é de suma importância. Muitas vezes o engenheiro responsável acaba baseando sua escolha na familiaridade com determinada metodologia ou na praticidade de determinado programa, em detrimento a fatores técnicos e de relevância para o estudo. Dessa forma, visando preencher tal lacuna existente atualmente e facilitar a escolha da melhor metodologia a ser utilizada, o presente estudo reúne os principais métodos conhecidos, suas vantagens e desvantagens e, assim, propõem uma metodologia para que essa escolha seja baseada em parâmetros técnicos relevantes. A metodologia proposta é, de certa forma, restritiva na escolha dos procedimentos que serão considerados, uma vez que, buscou-se utilizar métodos que tenham sua aplicabilidade comprovada, que possuam vantagens consideráveis sobre outros métodos e que sejam rigorosos, ou seja, satisfaçam todas as condições de equilíbrio (forças e momentos). Para corroborar com a metodologia proposta, quatro situações práticas diferentes foram apresentadas, demonstrando a aplicabilidade da metodologia.

Palavras-chave: Análise 2D, análise 3D, equilíbrio limite, análise numérica.

ABSTRACT

Analysis of slope stability in mining is one of the most important activities of the process of obtaining a mineral resources. Ensuring the excavation stability and the safety of the project are vital to the extraction process. The choice of the form of analysis (2D, *quasi*-three-dimensional or 3D) or of the method (limit equilibrium or numerical analysis) more suitable for this type of study is of paramount importance since, the responsible engineer often end up basing the analysis on familiarity with a particular methodology or on the availability of a particular program, to the detriment of technical factors and relevance to the study. Thus, in order to fill this existing gap and facilitate the selection of the best methodology to be used, the present study brings together the main known methods, their advantages and disadvantages and, therefore, presents a methodology for such a choice to be based on relevant technical parameters. The proposed methodology is somewhat restrictive in the choice of procedures that will be considered, since it has been tried to use methods that have proven applicability, that have considerable advantages over other methods and that are rigorous, satisfying all equilibrium conditions (forces and moments). In order to corroborate the proposed methodology, four different practical situations were presented, demonstrating the applicability of the methodology.

Keywords: 2D analysis, 3D analysis, limit equilibrium, numerical analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Efeito escala em maciços rochosos mostrando a transição entre amostras de rocha intacta e amostras de um maciço rochoso fraturado	22
Figura 2.2 – (a) Modelo contínuo e (b) modelo descontínuo	24
Figura 2.3 – Mecanismos básicos de ruptura: (a) ruptura circular, (b) ruptura planar, (c) ruptura em cunha e (d) tombamento	26
Figura 2.4 – Representação do arco experimental da ruptura circular pelo método do círculo de atrito.....	29
Figura 2.5 – Determinação do fator de segurança pelo método gráfico	30
Figura 2.6 – Gráfico para a determinação do fator K: (curva a) para pressão uniforme ao longo do arco da ruptura circular e (curva b) para valores iguais a zero nas bordas do arco da ruptura circular e variação senoidal ao longo do mesmo	30
Figura 2.7 – Superfície de ruptura correspondente para o método <i>Swedish Circle</i> ($\phi = 0$)	31
Figura 2.8 – Superfície de ruptura correspondente para o método da espiral logarítmica.....	32
Figura 2.9 – Talude infinito e planos de ruptura (AA' e BB')	33
Figura 2.10 – Fatia mostrando as forças consideradas no método comum de fatias	34
Figura 2.11 – Superfície de ruptura correspondente ao método comum de fatias	35
Figura 2.12 – Superfície de ruptura correspondente ao método simplificado de Bishop.....	36
Figura 2.13 - Superfície de ruptura correspondente ao método simplificado de Janbu	37
Figura 2.14 – Fator de correção utilizado no método simplificado de Janbu	37
Figura 2.15 - Superfície de ruptura correspondente e a “linha de confiança” considerada no método generalizado de Janbu.....	38
Figura 2.16 – Forças entre fatias e sua resultante (Q) quando as forças entre fatias são paralelas	40
Figura 2.17 – Relação entre o fator de segurança obtido pelo equilíbrio de momentos (F_m), o fator de segurança obtido pelo equilíbrio de forças (F_f) e o ângulo θ	41
Figura 2.18 – Direção das forças entre fatias – <i>Corps of Engineers</i> #1.....	42
Figura 2.19 – Direção das forças entre fatias – <i>Corps of Engineers</i> #2.....	43
Figura 2.20 – (a) Superfície de ruptura adotada pelo método de Sarma (1973) e (b) diagrama mostrando as forças atuantes em uma fatia	43
Figura 2.21 – Pressupostos sobre tensões normais na superfície da fatia: (a) forças e tensões que atuam sobre a massa deslizante, (b) distribuição assumida das tensões normais totais e (c) determinação das tensões normais totais em uma fatia	45
Figura 2.22 – Forças atuando em uma fatia de um talude com superfície de ruptura não-circular.....	46
Figura 2.23 – Forma geral para estabilidade de taludes <i>quasi</i> -tridimensional	49
Figura 2.24 – Método de Lambe e Whitman (1969): (a) vista em planta e (b) fator de segurança para diferentes seções	50
Figura 2.25 – Vista em planta do método proposto por Seed et al. (1990).....	52

Figura 2.26 – Representação da diferença entre as áreas projetada e real da superfície de deslizamento: (a) vista tridimensional e (b) seção transversal perpendicular à AA'	53
Figura 2.27 – Geometrias assumidas para a superfície de ruptura pelo método de Baligh e Azzouz (1975): (a) cilindro central, (b) cilindro central e cone anexado e (c) cilindro central e elipsoide anexado	55
Figura 2.28 – Efeitos da geometria da superfície de ruptura no fator de segurança em corte verticais em taludes formados por argila	56
Figura 2.29 – Seção 2D do método de Hovland (1977).....	57
Figura 2.30 – Geometria da ruptura circular considerada por Chen (1981) – “Forma de colher” (<i>Spoon shape</i>)	58
Figura 2.31 – Vista frontal da geometria de ruptura circular considerada por Chen (1981) – “Forma mista” (<i>Mixed shape</i>)	59
Figura 2.32 – Diagrama de forças para uma coluna pelo método de Chen (1981)	60
Figura 2.33 – Possíveis modos de ruptura: (a) superfície de ruptura limitada localmente (3D) e (b) superfície de ruptura cilíndrica longa (2D)	62
Figura 2.34 – Plano de simetria da superfície de ruptura	62
Figura 2.35 – Superfície de ruptura 3D para taludes verticais coesivos: (a) superfície de ruptura 3D e (b) seção vertical do talude	64
Figura 2.36 – Geometria tridimensional da superfície de deslizamento com extremidades planares: (a) vista oblíqua e (b) vista em seção	65
Figura 2.37 – Geometria tridimensional da superfície de deslizamento com extremidades circulares	65
Figura 2.38 – Forças atuantes em uma coluna no método de Hungr (1987)	66
Figura 2.39 – Método de Hungr (1987): (a) Geometria tridimensional da superfície de deslizamento e (b) seção vertical da superfície de deslizamento (plano XZ).....	67
Figura 2.40 – Método para a localização do eixo de referência: (a) vista em seção e (b) vista em planta	68
Figura 2.41 – Geometria da superfície de ruptura considerada por Cavounidis e Kalogeropoulos (1992)	70
Figura 2.42 – Vista lateral e vista frontal da superfície de ruptura do método de Lam e Fredlund (1993)	71
Figura 2.43 – Representação de uma coluna com as forças atuantes no método de Lam e Fredlund (1993)	72
Figura 2.44 – Forças atuantes em uma coluna após as considerações das hipóteses simplificadoras do método de Lam e Fredlund (1993).....	73
Figura 2.45 – Esquema 3D da potencial massa de ruptura com uma camada assimétrica de baixa resistência no limite inferior	74
Figura 2.46 – Vista em planta da grade utilizada para discretizar a massa deslizante em colunas pelo método de Huang et al. (2002).....	75
Figura 2.47 – Diagrama de corpo livre de um elemento 3D do método de Chang (2002)	76
Figura 2.48 – Sistema de blocos considerado no método de Chang (2002).....	76

Figura 2.49 – Esquema mostrando o tipo de movimento assumido pelo método de Chen et al. (2003)	77
Figura 2.50 – Forças aplicadas em um prisma pelo método de Chen et al. (2003): (a) antes dos pressupostos serem utilizados e (b) após os pressupostos feitos para a força de cisalhamento no prisma	78
Figura 2.51 – Modelo de ruptura 3D pelo método de Yamagami e Jiang (1997)	79
Figura 2.52 – Forças externas e internas que atuam sobre uma coluna de solo típica no método de Cheng e Yip (2007)	80
Figura 2.53 – Esquema de forças atuando em uma coluna pelo método de Zhou e Cheng (2013)	82
Figura 2.54 – Seção 2D de um modelo discretizado pelo método das diferenças finitas	87
Figura 2.55 – Modelo 3D discretizado pelo método das diferenças finitas	88
Figura 2.56 – Definição dos termos do método dos elementos finitos	89
Figura 2.57 – Definição dos termos do método dos elementos de contorno	91
Figura 2.58 – Seção 2D de um modelo discretizado pelo método dos elementos discretos ...	94
Figura 4.1 – Parâmetros de decisão para forma mais adequada de análise: 2D, <i>quasi</i> -tridimensional e 3D	138
Figura 4.2 – Procedimento sistemático de escolha do método a ser utilizado: equilíbrio limite ou análise numérica	140
Figura 4.3 – Metodologia aplicada – Exemplo 1: Geologia complexa – Escolha da forma de análise	141
Figura 4.4 – Metodologia aplicada – Exemplo 1: Geologia complexa – Escolha do método de análise	142
Figura 4.5 – Metodologia aplicada – Exemplo 2: Ruptura associada a descontinuidades – Escolha da forma de análise.....	143
Figura 4.6 – Metodologia aplicada – Exemplo 2: Ruptura associada a descontinuidades – Escolha do método de análise	143
Figura 4.7 – Metodologia aplicada – Exemplo 3: Barragens de rejeito ou pilhas de estéril confinadas – Escolha da forma de análise	144
Figura 4.8 – Metodologia aplicada – Exemplo 3: Barragens de rejeito ou pilhas de estéril confinadas – Escolha do método de análise	145
Figura 4.9 – Possíveis situações de contato com o terreno original.....	145
Figura 4.10 – Metodologia aplicada – Exemplo 4: Contato entre materiais – Escolha da forma de análise	146
Figura 4.11 – Metodologia aplicada – Exemplo 4: Contato entre materiais – Escolha do método de análise	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Resumo dos procedimentos em 2D de massa inteira (continua)	33
Tabela 2-2 – Resumo dos procedimentos em 2D de fatias.....	47
Tabela 2-3 – Resumo dos procedimentos <i>quasi</i> -tridimensionais (continua).....	53
Tabela 2-4 – Resumo dos procedimentos em 3D de equilíbrio limite (continua)	83
Tabela 2-5 – Resumo dos procedimentos de análise numérica – modelos contínuos.....	92
Tabela 2-6 – Resumo dos procedimentos de análise numérica – modelos descontínuos.....	95
Tabela 2-7 – Resumo dos procedimentos de análise numérica – modelos híbridos.....	96
Tabela 3-1 – Procedimentos em 2D de massa inteira	104
Tabela 3-2 – Procedimentos em 2D de fatias (continua)	110
Tabela 3-3 – Procedimentos <i>quasi</i> -tridimensionais	113
Tabela 3-4 – Procedimentos em 3D de equilíbrio limite	124
Tabela 3-5 – Procedimentos de análise numérica (continua).....	133

SUMÁRIO

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	17
1.1. OBJETIVOS	19
1.2. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	19
Capítulo 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1. ASPECTOS GERAIS	21
2.2. MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE	27
2.2.1. Análise de estabilidade em 2D para ruptura circular	27
2.2.1.1. Procedimento de “Massa Inteira” – Círculo de atrito	29
2.2.1.2. Procedimento de “Massa Inteira” – <i>Swedish Circle</i> ($\phi = 0$)	31
2.2.1.3. Procedimento de “Massa Inteira” – Espiral logarítmica	31
2.2.1.4. Procedimento de “Massa Inteira” – Talude infinito	32
2.2.1.5. Procedimento de fatias – Método comum de fatias	34
2.2.1.6. Procedimento de fatias – Métodos de Bishop	35
2.2.1.7. Procedimento de fatias – Métodos de Janbu	36
2.2.1.8. Procedimento de fatias – Método de Lowe e Karafiath (1960)	38
2.2.1.9. Procedimento de fatias – Método de Morgenstern e Price (1965)	39
2.2.1.10. Procedimento de fatias – Métodos de Spencer (1967)	39
2.2.1.11. Procedimento de fatias – Método Sueco modificado (<i>Corps of Engineers’ Modified Swedish Procedure</i>)	41
2.2.1.12. Procedimento de fatias – Método de Sarma (1973)	43
2.2.1.13. Procedimento de fatias – Método generalizado de equilíbrio limite (<i>General Limit Equilibrium Method of Slices – GLE</i>)	44
2.2.1.14. Procedimento de fatias – Zhu e Lee (2002)	45
2.2.1.15. Procedimento de fatias – Huang (2013)	46
2.2.2. Análise de estabilidade <i>quasi</i> -tridimensional para ruptura circular	48
2.2.2.1. Sherard et al. (1963)	49
2.2.2.2. Lambe e Whitman (1969)	50
2.2.2.3. Anagnosti (1969)	51
2.2.2.4. Seed et al. (1990)	51

2.2.2.5.	Loehr et al. (2004).....	52
2.2.3.	Análise de estabilidade em 3D para ruptura circular	54
2.2.3.1.	Baligh e Azzouz (1975); Azzouz e Baligh (1978)	55
2.2.3.2.	Hovland (1977).....	57
2.2.3.3.	Chen (1981); Chen e Chameau (1982).....	58
2.2.3.4.	Dennhardt e Forster (1985).....	60
2.2.3.5.	Leshchinsky et al. (1985); Leshchinsky e Baker (1986); Baker e Leshchinsky (1987); Leshchinsky e Mullet (1988); Leshchinsky e Huang (1992)	61
2.2.3.6.	Ugai (1985 e 1988).....	63
2.2.3.7.	Gens et al. (1988).....	64
2.2.3.8.	Hungr (1987); Hungr et al. (1989).....	66
2.2.3.9.	Seed et al. (1990)	68
2.2.3.10.	Cavounidis e Kalogeropoulos (1992)	69
2.2.3.11.	Lam e Fredlund (1993)	70
2.2.3.12.	Huang e Tsai (2000), Huang et al. (2002)	73
2.2.3.13.	Chang (2002).....	75
2.2.3.14.	Chen et al. (2003)	77
2.2.3.15.	Yamagami e Jiang (1997); Jiang e Yamagami (2004)	78
2.2.3.16.	Cheng e Yip (2007).....	79
2.2.3.17.	Zheng (2009 e 2012)	81
2.2.3.18.	Zhou e Cheng (2013)	82
2.3.	ANÁLISE NUMÉRICA	85
2.3.1.	Análise de estabilidade em 2D e 3D	86
2.3.1.1.	Modelos contínuos – Diferenças finitas	87
2.3.1.2.	Modelos contínuos – Elementos finitos	89
2.3.1.3.	Modelos contínuos – Elementos de contorno	90
2.3.1.4.	Modelos descontínuos – Elementos discretos	93
2.3.1.5.	Modelos híbridos	96
Capítulo 3 –	APLICABILIDADE DOS MÉTODOS APRESENTADOS.....	98
3.1.	MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE	100
3.1.1.	Análise de estabilidade em 2D para ruptura circular	103
3.1.1.1.	Procedimentos de “Massa Inteira”	103

3.1.1.2.	Procedimento de fatias.....	105
3.1.2.	Análise de estabilidade <i>quasi</i> -tridimensional para ruptura circular	111
3.1.3.	Análise de estabilidade em 3D para ruptura circular	113
3.2.	ANÁLISE NUMÉRICA - Modelos	126
3.2.1.	Modelos contínuos	128
3.2.2.	Modelos descontínuos	129
3.3.	ANÁLISE NUMÉRICA - Métodos.....	130
3.3.1.	Modelos contínuos	130
3.3.2.	Modelos descontínuos	131
3.3.3.	Modelos híbridos	133
Capítulo 4 -	SUGESTÃO DE METODOLOGIA DE ANÁLISE.....	137
4.1.	PROCEDIMENTO SISTEMÁTICO	137
4.2.	APLICAÇÕES DA METODOLOGIA	141
Capítulo 5 -	CONCLUSÕES	147
Capítulo 6 -	TRABALHOS FUTUROS.....	149
REFERÊNCIAS	150

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Diversas atividades da engenharia exigem escavações em rocha ou solo. Em engenharia civil, podemos citar sistemas de transporte como estradas e ferrovias, barragens para geração de energia e suprimento de água, além do desenvolvimento industrial e urbano. Na mineração, lavra a céu aberto representa uma grande porção da exploração mineral. As dimensões de cavas a céu aberto abrangem alguns hectares e profundidades inferiores a 100 metros até áreas com centenas de hectares e profundidades superiores a 800 metros. O ângulo do talude global para tais cavas varia de menos de 30° para rochas de baixa qualidade até quase vertical em rochas competentes (WYLLIE; MAH, 2005).

Obras que exigem a criação de taludes são, e sempre serão, necessárias dentro da engenharia e, por isso, o estudo de estabilidade de escavações a céu aberto se faz tão importante. Maciços rochosos não são homogêneos, cada um apresenta características diferentes de fraturamento e parâmetros de resistência. Dessa forma, cada análise de estabilidade deve ser feita de forma específica para cada tipo de maciço existente, evitando-se, com isso, estudos cujos resultados não serão condizentes com a realidade.

Abramson et al. (2002) relata que o objetivo principal da análise de estabilidade de taludes é contribuir e assegurar a segurança e economicidade dos projetos. Para tanto, é necessário identificar alguns parâmetros críticos que afetarão o projeto, bem como compreender a natureza, magnitude e a probabilidade de potenciais problemas em taludes. Os principais objetivos da análise de estabilidade de taludes são:

1. Compreender o desenvolvimento e a formação de encostas e os processos responsáveis por suas diferentes características;
2. Avaliar a estabilidade dos taludes em curto e longo prazo;
3. Avaliar a possibilidade de rupturas em taludes naturais ou projetados;
4. Analisar e compreender os mecanismos de ruptura e a influência dos fatores ambientais;
5. Permitir a reconfiguração de taludes rompidos e o planejamento e concepção de medidas preventivas, quando necessárias;
6. Estudar os efeitos de eventos sísmicos em taludes.

Apesar dos grandes avanços em prever, avaliar e remediar, rupturas de taludes continuam sendo um grande problema social, econômico e ambiental. Isso se deve tanto pela complexidade dos mecanismos de ruptura quanto pela falta de conhecimento acerca dos mesmos. Com isso, cada vez mais, pessoas qualificadas são necessárias para analisar e prever a estabilidade das escavações. Além de pessoal capacitado para esse tipo de estudo, uma investigação de campo abrangente e de qualidade deve ser o primeiro passo de qualquer estudo em estabilidade de taludes.

Embora a análise de taludes locais (bancadas) seja de grande importância, bem como a análise de taludes contendo conjuntos de descontinuidades bem definidos, é necessário, também, projetar e analisar taludes em maciços em rochas altamente alteradas ou de baixa resistência e solos. Em tais situações, a ruptura ocorre ao longo de uma superfície que se aproxima de uma forma circular. Conforme Hustrulid et al. (2013), este tipo de falha é importante quando se considera a estabilidade de: (a) taludes altos em rochas nas quais as características estruturais são assumidas como aleatoriamente orientada; (b) taludes em solo; (c) barragens e; (d) aterros e lixões.

De forma a conduzir esse tipo de estudo e analisar os potenciais perigos relacionados a estabilidade de taludes, é essencial compreender os processos e mecanismos geradores de instabilidade. Tais mecanismos são, muitas vezes, complexos e atuam em profundidade (não estando expostos na face do talude) dificultando, assim, a investigação e caracterização dos fatores que contribuem para instabilidade gerando, com isso, algumas dificuldades como, por exemplo, qual método utilizar para a análise ou quais parâmetros de entrada devem ser utilizados.

Ao longo dos últimos anos uma vasta gama de métodos para análise de estabilidade de taludes surgiu, facilitando os estudos nessa área. Desde métodos simples de equilíbrio limite até técnicas mais sofisticadas envolvendo métodos numéricos, a capacidade de processar os dados e gerar modelos para esse tipo de análise cresceu significativamente. Todavia, é de suma importância para os profissionais que nessa área atuam, compreender de forma plena as variações e limitações inerentes em cada metodologia. Não basta apenas usar uma dessas ferramentas, deve-se usá-la de forma de correta.

Dessa forma, essa dissertação de mestrado é dedicada a uma discussão sobre os métodos de análise de estabilidade considerando rupturas circulares em taludes rochosos com

faces retas, reunindo os principais métodos utilizados, agrupando-os e organizando-os conforme suas vantagens e desvantagens, criando uma metodologia para escolha do procedimento mais adequado, conforme as características do maciço rochoso em estudo.

1.1. OBJETIVOS

Baseado em uma compilação teórica dos temas relacionados ao motivo desse trabalho, o objetivo principal é gerar um procedimento sistemático de escolha do método mais apropriado de análise de estabilidade de taludes em relação a ruptura circular e considerando taludes com faces retas, por representar uma das principais formas de ruptura em taludes globais. Para tanto, os principais métodos conhecidos de equilíbrio limite e análise numérica, em duas e três dimensões, serão apresentados e comparados, demonstrando para qual situação é cabível a utilização de cada um dos métodos relacionados.

Para ser possível este estudo, os seguintes objetivos específicos serão abordados:

1. Fundamentação teórica dos métodos conhecidos atualmente de análise de estabilidade de taludes em duas e três dimensões utilizando técnicas de equilíbrio limite e análise numérica;
2. Exemplificação da utilidade de cada método, apresentando pontos positivos e negativos de sua utilização bem como comparação entre os mesmos;
3. Criação de uma sistemática para a escolha entre uma análise em duas ou três dimensões, bem como o método mais indicado a ser utilizado para cada tipo de aplicação;
4. Aplicação do procedimento criado em quatro exemplos de utilização.

1.2. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em 6 capítulos, incluindo o presente capítulo introdutório, onde se faz uma breve apresentação do assunto a ser abordado na dissertação, demonstrando os objetivos para o presente trabalho e a organização da mesma.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica do estudo, embasando na literatura existente os conceitos necessários para a compreensão do trabalho. Dividido em 3 tópicos

(ASPECTOS GERAIS, MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE e ANÁLISE NUMÉRICA), o capítulo descreve de forma sucinta dos principais métodos de análise de estabilidade de taludes existentes atualmente.

O Capítulo 3, seguindo o conteúdo apresentado no capítulo anterior, busca mostrar as vantagens e desvantagens de cada método e, dessa forma, determinar os procedimentos que serão considerados na metodologia, levando em conta a precisão e praticidade de cada um. No Capítulo 4, é apresentada uma metodologia para a escolha da melhor forma (2D, *quasi*-tridimensional e 3D) e do melhor método de análise de estabilidade de taludes, objetivo principal desse trabalho. Tal procedimento é aplicado em 4 diferentes exemplos práticos, nesse mesmo capítulo.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com a realização desse estudo, baseado nas avaliações dos capítulos anteriores. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas sugestões de assuntos a serem abordados em trabalhos futuros permitindo a continuidade desta pesquisa.

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ASPECTOS GERAIS

Uma área de grande importância na mecânica de rochas é a que lida com a estabilidade de taludes rochosos. Sistemas de transporte como estradas e ferrovias, escavações a céu aberto, e, em geral, qualquer obra que necessite de uma escavação plana com determinada inclinação, necessitará de taludes e, por consequência, haverá a necessidade da realização de estudos de estabilidade que garantam a segurança das operações.

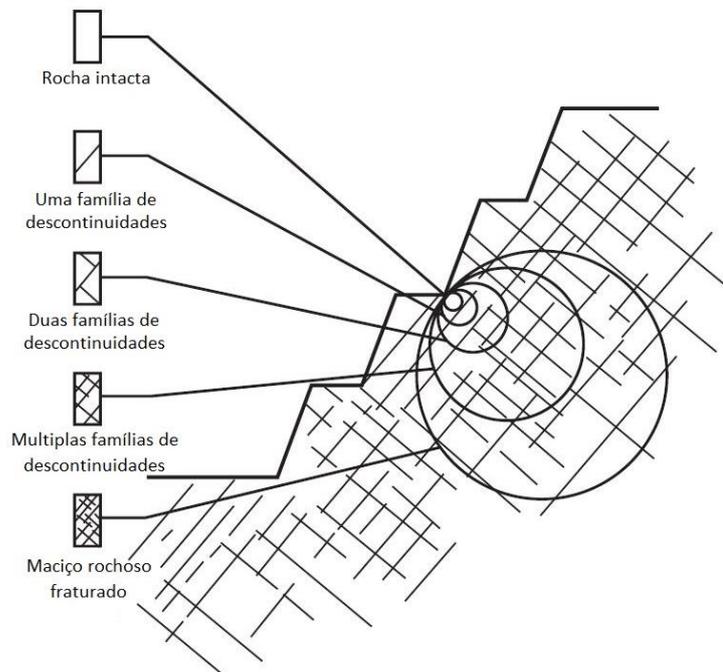
A estabilidade necessária para taludes varia conforme o tipo de projeto e as consequências que uma ruptura pode trazer. Podemos citar dois tipos principais de taludes: para obras civis e para mineração. A diferença básica entre taludes para engenharia civil e taludes para mineração reside no fato de que, para engenharia civil, um alto grau de confiabilidade é requerido, uma vez que, ruptura de taludes ou até mesmo queda de rochas são raramente tolerados. Por outro lado, algum movimento dos taludes na mineração a céu aberto se faz aceitável, contanto que, os mesmos não interrompam as atividades desempenhadas (WYLLIE; MAH, 2005).

Segundo Hoek e Bray (1981) a estabilidade de taludes em maciços rochosos é condicionada pela geologia estrutural (ocorrências naturais de falhas e rupturas, comumente denominadas de descontinuidades) da rocha em que se realiza a escavação. As descontinuidades são planos de fraqueza na rocha intacta no qual a ruptura tende a ocorrer preferencialmente. Enquanto a orientação de tais descontinuidades é o fator principal que influencia a estabilidade, outras propriedades como, persistência, espaçamento, rugosidade e preenchimento apresentam, também, grande importância.

Outro fator de grande importância que governa a estabilidade de taludes é a força de cisalhamento da potencial superfície de ruptura (superfície assumida ao longo da qual possa ocorrer o deslizamento ou a ruptura do talude). Wyllie e Mah (2005) nos dizem que a escolha de valores corretos e coerentes para esse parâmetro não depende apenas dos ensaios de laboratório, mas também da correta interpretação desses dados em relação ao comportamento do maciço rochoso. Isso quer dizer que a escolha do parâmetro correto

dependerá da relação entre a superfície de ruptura e a estrutura geológica do maciço, conforme mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Efeito escala em maciços rochosos mostrando a transição entre amostras de rocha intacta e amostras de um maciço rochoso fraturado



Fonte: Modificado de Wyllie e Mah (2005)

O estudo e a determinação das propriedades e parâmetros geomecânicos em um talude rochoso, citados anteriormente, além da caracterização geológica estrutural da região, são de suma importância na determinação da metodologia que será aplicada na análise de estabilidade de taludes. Levando em conta as propriedades e parâmetros disponíveis para a análise bem como os objetivos que se busca alcançar com o estudo, o primeiro passo a ser considerado é determinar se a análise pode ser representada em duas dimensões ou se uma análise em três dimensões é mais recomendada.

Conforme Leong e Rahardjo (2012), apesar dos problemas relacionados a estabilidade de taludes serem problemas em três dimensões, análises em 3D ainda não são amplamente utilizadas. Isso se deve a inúmeras razões, como: (a) acredita-se que a análise bidimensional (2D) gera estimativas conservadoras do problema se comparadas com a análise tridimensional (3D); (b) a análise em três dimensões demanda a criação de modelos mais complexos se

comparados com os modelos necessários para a análise em duas dimensões e; (c) é mais difícil determinar os dados de entrada e visualizar os resultados em uma análise de estabilidade 3D.

Apesar das dificuldades de uma análise 3D, as mesmas vêm sendo cada vez mais utilizadas, devido aos avanços computacionais e, são respaldadas em algumas recomendações, como as propostas por Wyllie e Mah (2005): (a) a direção das principais estruturas geológicas têm 20° ou 30° de diferença em relação à direção do talude; (b) o eixo do material anisotrópico tem entre 20° ou 30° de diferença em relação à direção do talude; (c) as direções das tensões principais não são nem paralelas nem perpendiculares ao talude; (d) a distribuição das unidades geomecânicas varia ao longo da direção do talude e; (e) a geometria do talude em planta não pode ser representada em 2D, assumindo-se assimetria ou modelo com deformação plana.

O próximo passo é determinar o método de análise que será utilizado e que mais se adapta ao maciço com o qual se está trabalhando. Diversos métodos surgiram ao longo dos anos, cada qual com sua peculiaridade, sua capacidade e sua possibilidade de uso, todavia, é necessário conhecer bem as aplicações e limitações de cada um deles, para determinar se sua utilização condiz, ou não, com o problema existente.

Dentre os diversos métodos existentes atualmente para análise de estabilidade de taludes, os mais utilizados pelos engenheiros são os métodos de equilíbrio limite e métodos de análise numérica. No primeiro, diferentes propriedades geomecânicas do maciço são consideradas na determinação do fator de segurança do talude. Nesse método, as análises consistem em determinar se existe resistência suficiente no talude para suportar as tensões de cisalhamento que tendem a provocar a falha ou deslizamento.

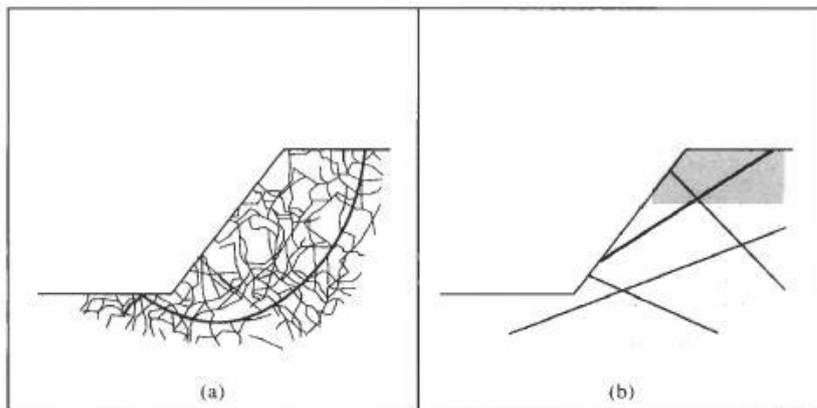
O segundo método, por sua vez, conforme Wyllie e Mah (2005), é baseado na criação de modelos geomecânicos computacionais capazes de descrever o comportamento mecânico de um maciço rochoso o qual apresenta certas condições iniciais como, tensão *in situ*, nível de água, condições de contorno ou mudanças induzidas por, por exemplo, escavações. O resultado obtido nesse tipo de análise (métodos numéricos) pode representar uma situação de equilíbrio ou de colapso. Em caso de equilíbrio, a resultante tensão-deformação em qualquer ponto no maciço rochoso pode ser comparada com valores reais medidos. Caso o resultado obtido seja o colapso, o modelo previsto de falha é apresentado.

Os cálculos envolvendo os métodos de equilíbrio limite usualmente avaliam o fator de segurança utilizando um dos diversos procedimentos de análise existente. Por outro lado, os

métodos numéricos dividem o maciço rochoso em elementos e, cada um desses elementos, é assinalado com uma relação tensão x deformação e propriedades que descrevem o comportamento do material. Tais elementos podem ser conectados em um modelo contínuo ou separados como em um modelo descontínuo.

Determinados os parâmetros, citados anteriormente, mais representativos e coerentes com o estudo conduzido, por fim, deve-se estabelecer o modelo que será utilizado (modelos contínuos, descontínuos ou híbridos). Conforme Hudson e Harrison (1997) um maciço rochoso instável pode se comportar de duas maneiras distintas, conforme suas características geomecânicas. Na primeira, o maciço possui um comportamento contínuo no qual a superfície de falha é criada no maciço e, na segunda, a ruptura é regida pela presença de descontinuidades específicas pré-existentes, assim, o maciço se comporta de forma descontínua, conforme demonstrado na Figura 2.2. Além das duas maneiras descritas anteriormente, é possível haver casos intermediários onde a falha ocorre parcialmente ao longo de uma descontinuidade e parcialmente no maciço.

Figura 2.2 – (a) Modelo contínuo e (b) modelo descontínuo



Fonte: Modificado de Hudson e Harrison (2011)

Os modelos contínuos se mostram mais representativos de taludes em solo, maciços em rocha intacta, rochas brandas ou materiais altamente fraturados (comportamento similar a solos). Esse tipo de modelo não é capaz de representar ou descrever a trajetória de uma superfície de falha pois, a mesma, ao não estar bem definida ou ao se assumir uma como possível pode levar ao erro, em alguns casos.

Por outro lado, os modelos descontínuos são capazes de representar dois tipos de comportamentos mecânicos: o comportamento da descontinuidade e o comportamento do material sólido. Tais modelos são mais representativos de maciços pouco fraturados nos quais as descontinuidades são bem definidas e regem a ruptura, não sendo recomendado para corpos complexos pois, significaria dividi-lo em muitas zonas, complicando, assim, a análise.

A falha pode ocorrer, também, conforme um modelo contínuo e descontínuo (híbrida). Tal forma de análise de estabilidade em taludes rochosos vem sendo cada vez mais utilizada e tem mostrado grande potencial na investigação de alguns fenômenos como, a influência do nível de água no fraturamento de taludes em maciços rochosos de baixa qualidade.

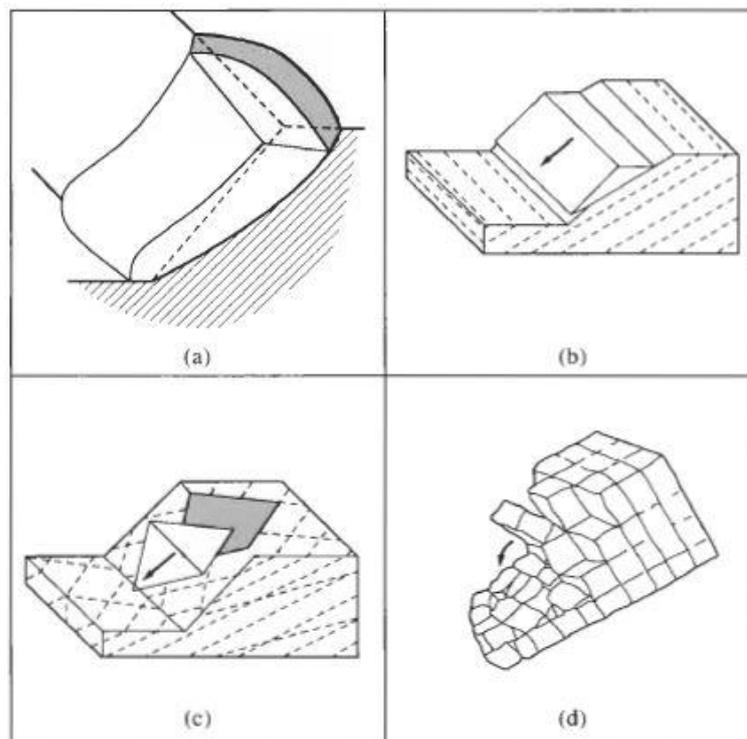
Conforme Hustrulid et al. (2009) a decisão de qual modelo melhor se aplica ao estudo que se está conduzindo raramente é simples e não há uma regra, pré-estabelecida, para determinar o tipo de modelo que deve ser utilizado. Muitas análises começam com modelos contínuos. Caso o talude em estudo se mostre instável, sem considerar as descontinuidades, não há a necessidade de se criar modelos descontínuos. Por outro lado, caso o modelo contínuo pareça, razoavelmente estável, a incorporação das principais estruturas deve gerar uma estimativa mais precisa do comportamento do talude. Normalmente apenas uma porcentagem muito pequena de descontinuidades pode realmente ser incluída em um modelo. A fim de criar modelos de tamanho razoável para a análise, os dados de geometria das descontinuidades devem ser filtrados, identificando aquelas que são mais suscetíveis a ruptura, para se selecionar apenas as que são mais críticas.

Como uma amplificação dos modelos de ruptura apresentados na Figura 2.2 e descritos anteriormente, a Figura 2.3 mostra os quatro mecanismos básicos de ruptura encontrados em maciços rochosos:

- a. **Ruptura circular:** ocorre em maciços rochosos muito fraturados ou intemperizados pois não se encontra mais um padrão estrutural definido e, assim, a ruptura é livre para encontrar a linha de menor resistência, a qual, segundo observações empíricas, geralmente toma a forma de um círculo;
- b. **Ruptura planar:** acontece quando um plano de escorregamento ocorre praticamente paralelo a face do talude e mergulha com um ângulo inferior ao da face do mesmo, mas superior ao ângulo de atrito;

- c. **Ruptura em cunha:** ocorre quando dois planos de descontinuidade se interceptam formando uma linha de intersecção definida por uma orientação e um mergulho. Tal linha deve possuir um mergulho inferior ao mergulho da face, mas superior ao ângulo de atrito médio dos dois planos;
- d. **Tombamento:** tradicionalmente, esse tipo de ruptura ocorre de duas formas: tombamento direto (tombamento de blocos) e tombamento flexural. Tombamento direto ocorre quando o centro de gravidade do bloco sai do contorno de sua base gerando um momento crítico no bloco. Esse tipo de tombamento é caracterizado pela existência de uma família de descontinuidades que possui um mergulho elevado na direção do talude e, uma segunda família de descontinuidades espaçadas, ortogonal a anterior, sendo essas as quais determinarão a altura do bloco. Tombamento flexural, por sua vez, ocorre sem a formação de blocos, mas também com a presença de uma família de descontinuidades, com um mergulho elevado na direção do talude, quebrando a coluna de rocha por flexão, à medida que a mesma se dobra para a frente.

Figura 2.3 – Mecanismos básicos de ruptura: (a) ruptura circular, (b) ruptura planar, (c) ruptura em cunha e (d) tombamento



Fonte: Hudson e Harrison (2011)

O presente estudo é focado na análise de estabilidade do mecanismo de ruptura circular em taludes rochosos com faces retas, considerando os métodos de equilíbrio limite e métodos numéricos (mais utilizados atualmente). Dessa forma, todos os procedimentos relacionados a esses métodos de análise, tanto em duas quanto em três dimensões, serão apresentados e explicados nos itens 2.2 e 2.3 do presente capítulo.

2.2. MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE

Métodos de equilíbrio limite são utilizados há décadas para a análise da estabilidade de taludes e, atualmente, a maioria desses estudos envolve o uso desses métodos devido a sua simplicidade e precisão. Tais métodos funcionam de forma muito eficiente na maioria dos computadores pessoais permitindo que o profissional explore, rapidamente, uma vasta gama de opções, testando diferentes modelos geológicos e variando parâmetros geomecânicos, para, com isso, determinar a estabilidade ou instabilidade do projeto. Os resultados produzidos por esses métodos são dependentes da qualidade dos dados de entrada utilizados, assim, um modelo geológico representativo é essencial e estimativas realistas de parâmetros geomecânicos e resistência das descontinuidades se fazem necessárias.

No método de equilíbrio limite, apenas o conceito de equilíbrio estático é aplicado. Infelizmente, exceto nos casos mais simples, a maioria dos problemas de estabilidade são estaticamente indeterminadas, uma vez que o número de equações disponíveis não é suficiente para resolver o número de incógnitas existentes. A fim de se determinar um fator de segurança para o projeto, algumas suposições simplificadoras, devem ser feitas para que o número de equações seja exatamente igual ao número de incógnitas (HUANG, 2014). Tais simplificações são o que diferem os inúmeros métodos existentes e, mesmo quando satisfazem as mesmas condições de equilíbrio, diferentes métodos consideram diferentes premissas de cálculo.

2.2.1. Análise de estabilidade em 2D para ruptura circular

O estudo de estabilidade de taludes em duas dimensões é o método mais utilizado atualmente devido sua simplicidade e facilidade de uso. Todavia, tais métodos são baseados

em simplificações para se reduzir um problema em três dimensões em um problema de duas dimensões e, com isso, a precisão dos resultados pode variar conforme o método utilizado. A seleção do método mais adequado não é uma decisão fácil e um esforço deve ser despendido para se coletar dados em campo, condizentes com a realidade, para se compreender os mecanismos de falha, os quais irão determinar o tipo de método que se deve utilizar (ALBATAINEH, 2006).

Segundo Duncan et al. (2014) os métodos de equilíbrio limite em duas dimensões utilizam dois procedimentos diferentes:

1. **Procedimento de “Massa Inteira” ou “Single Free-Body Procedure”**: considera a massa total limitada, abaixo, por uma determinada superfície de escorregamento e, acima, pela superfície do talude. Nesse procedimento, as equações são escritas e resolvidas para uma única massa inteira. Os métodos círculo de atrito, *Swedish Circle*, espiral logarítmica e talude infinito utilizam esse procedimento;
2. **Procedimento de fatias ou “Procedures of Slices”**: limita, da mesma forma que o procedimento anterior, a massa total do escorregamento, no entanto, divide tal massa em fatias verticais. Nesse procedimento, as equações são escritas e resolvidas para cada fatia. Esse procedimento possui métodos diferentes para superfícies circulares de ruptura (método comum de fatias; Bishop simplificado e Bishop completo) e superfícies não-circulares (simplificado de Janbu e generalizado de Janbu; Lowe e Karafiath; Spencer; método Sueco modificado ou *Corps of Engineers’ Modified Swedish Procedure*; Morgenstern e Price; método generalizado de equilíbrio limite; Sarma; Zhu e Lee e o método proposto por Huang).

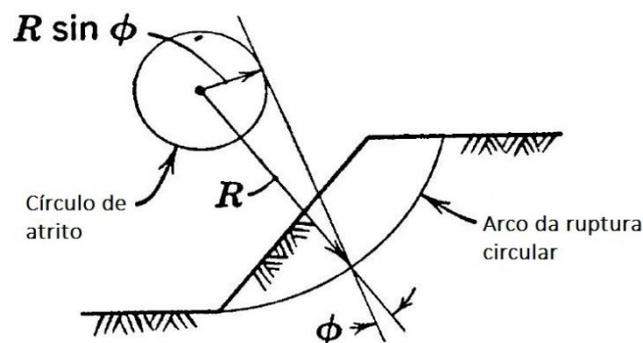
Três condições de equilíbrio se fazem necessárias nos métodos de equilíbrio limite: (1) equilíbrio de forças na direção vertical; (2) equilíbrio de forças na direção horizontal e (3) equilíbrio de momentos em qualquer ponto. Os métodos listados acima consideram, pelo menos, alguma condição de equilíbrio para o cálculo do fator de segurança. Todavia, independente do procedimento adotado, o número de incógnitas (forças, localização das forças, momentos, fator de segurança...) será maior que o número de equação de equilíbrio e, com isso, algumas premissas devem ser consideradas para que se possa obter uma igualdade entre o número de incógnitas e o número de equações existentes (DUNCAN et al., 2014).

Os métodos listados acima podem até satisfazer as mesmas condições de equilíbrio, mas ao considerarem diferentes premissas para o cálculo, geram diferentes fatores de segurança. Tais métodos são descritos nos itens a seguir.

2.2.1.1. Procedimento de “Massa Inteira” – Círculo de atrito

O método do círculo de atrito diz que, para uma superfície de ruptura circular, as resultantes das tensões normais e do componente de fricção da resistência ao cisalhamento serão tangentes a um círculo de raio $R \cdot \sin \phi$, chamado círculo de fricção (Figura 2.4). Esse método representa uma abordagem conveniente tanto por métodos gráficos como por métodos matemáticos (Taylor, 1937, 1948).

Figura 2.4 – Representação do arco experimental da ruptura circular pelo método do círculo de atrito



Fonte: Modificado de Taylor (1948)

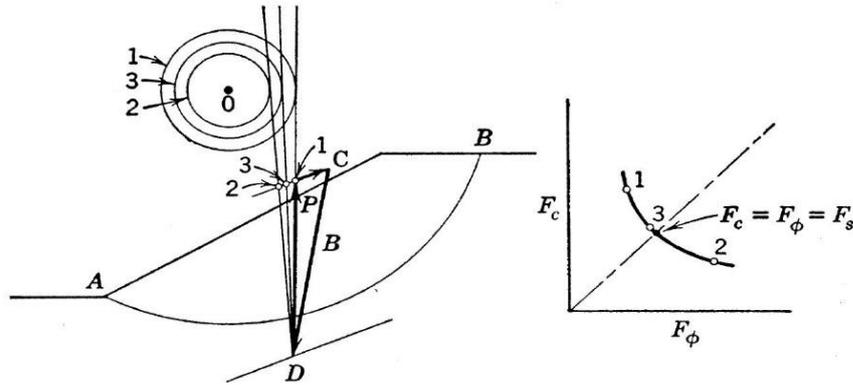
O método gráfico consiste de três passos: determinação do vetor W (peso total da massa deslizando), determinação da força neutra U e a etapa final, de tentativa e erro, (Figura 2.5) uma vez que o ângulo ϕ não é conhecido. Em tal etapa, determina-se o fator de segurança relacionado as componentes de atrito (F_ϕ) e de coesão (F_c), conforme as equações 1 e 2, abaixo. Plotando-se os resultados das tentativas em um gráfico F_c por F_ϕ e, nesse gráfico, traçando-se uma linha com angulação de 45° , passando pela origem e interseccionando a linha com os resultados plotados teremos o fator de segurança (ponto onde $F_c = F_\phi$).

$$F_\phi = \frac{\tan \phi_e}{\tan \phi_d} \quad 1$$

$$F_c = \frac{c_e}{c_d}$$

2

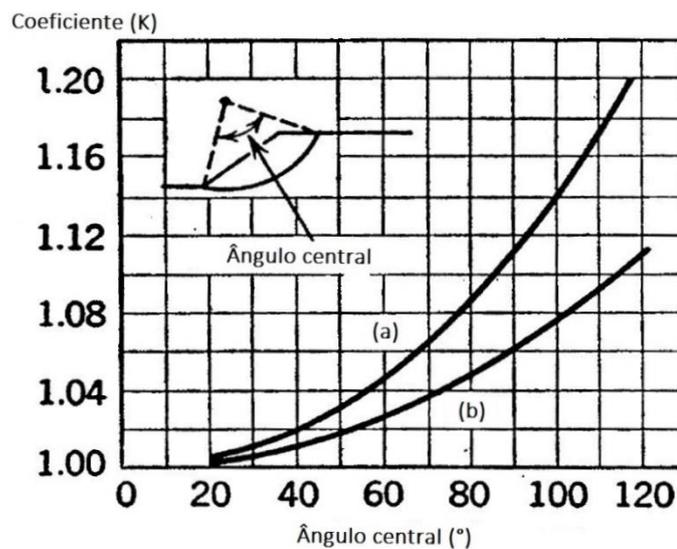
Figura 2.5 – Determinação do fator de segurança pelo método gráfico



Fonte: Modificado de Taylor (1948)

Taylor (1948) também apresenta um fator de correção (K) onde o círculo de raio $K \cdot R \cdot \sin \phi$ é conhecido como círculo de atrito modificado. Esse fator não altera o resultado de uma forma drástica, mas é facilmente obtido (Figura 2.6) e aumenta a precisão do procedimento sendo, portanto, recomendado o seu uso.

Figura 2.6 – Gráfico para a determinação do fator K: (curva a) para pressão uniforme ao longo do arco da ruptura circular e (curva b) para valores iguais a zero nas bordas do arco da ruptura circular e variação senoidal ao longo do mesmo



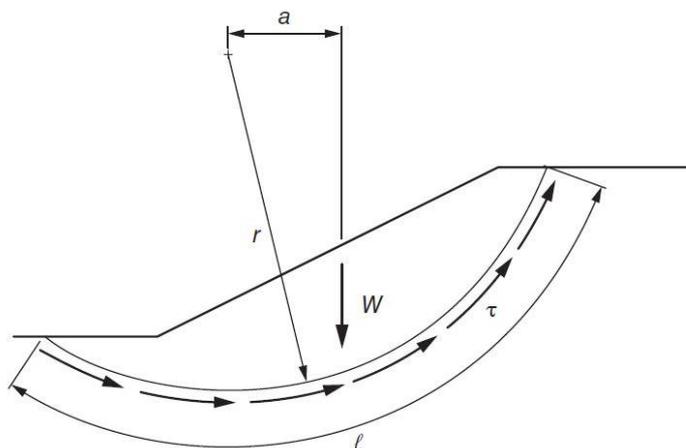
Fonte: Modificado de Taylor (1948)

2.2.1.2. Procedimento de “Massa Inteira” – *Swedish Circle* ($\phi = 0$)

No método *Swedish Circle* assume-se que a superfície de ruptura é um arco circular rígido que rompe por rotação em torno de seu centro, conforme mostrado na Figura 2.7. O ângulo de atrito é zero, assim, a tensão cisalhante é considerada como sendo devido, apenas, a coesão.

Aparentemente, algumas formas desse método foram usadas primeiramente por Petterson, em 1916 (PETTERSON, 1955), mas o método parece ter sido formalizado para $\phi = 0$ por Fellenius, em 1922 (FELLENIOUS, 1922; SKEMPTON, 1948). Na verdade, trata-se de um caso especial do método da espiral logarítmica pois quando $\phi = 0$, a espiral logarítmica se torna um círculo. Dessa forma, ele também satisfaz todas as condições de equilíbrio, direta (equilíbrio de momentos) e indiretamente (equilíbrio de forças). No entanto, os cálculos para esse caso, considerando o método da espiral logarítmica, são muito complicados e, dessa forma, considera-se o *Swedish Circle* ($\phi=0$), como um caso separado (DUNCAN et al., 2014).

Figura 2.7 – Superfície de ruptura correspondente para o método *Swedish Circle* ($\phi = 0$)



Fonte: Modificado de Duncan et al. (2014)

2.2.1.3. Procedimento de “Massa Inteira” – Espiral logarítmica

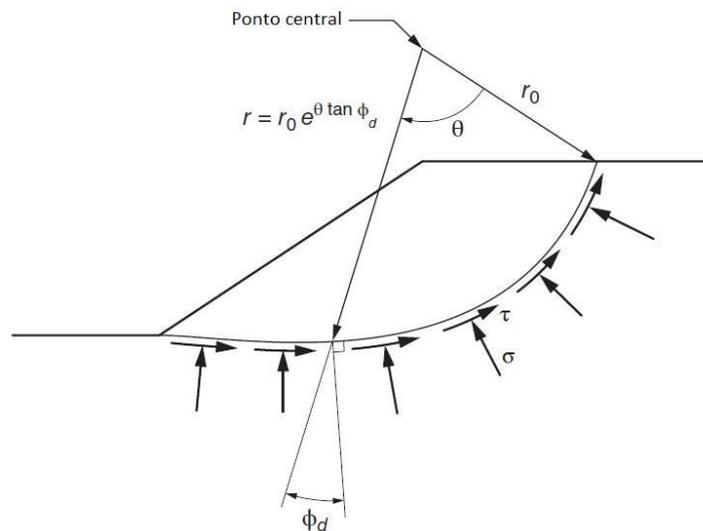
Nesse método, a superfície de ruptura é tomada como sendo uma espiral logarítmica como apresentado na Figura 2.8 (RENDULIC, 1935). O ponto central, o raio inicial (r_0) e o valor de ϕ_d , definem a espiral. O raio da espiral varia com o ângulo de rotação θ , em torno do centro da espiral, conforme a equação 3, abaixo:

$$r = r_0 e^{\theta \tan \phi_d}$$

3

Onde: r = distância radial do ponto central até um ponto na espiral; r_0 = raio inicial; θ = ângulo entre r e r_0 e ϕ_d = ângulo de atrito interno.

Figura 2.8 – Superfície de ruptura correspondente para o método da espiral logarítmica



Fonte: Modificado de Duncan et al. (2014)

Este método, devido sua forma, tem a propriedade de que todas as resultantes das tensões normais e componentes de atrito da resistência ao cisalhamento passam pelo ponto central da espiral. Conseqüentemente, suas contribuições para os momentos se cancelam e a equação do momento envolve somente a força peso e a resistência coesiva do solo, dessa forma, o método satisfaz, diretamente, as condições de equilíbrio de momentos e, indiretamente, as condições de equilíbrio de forças.

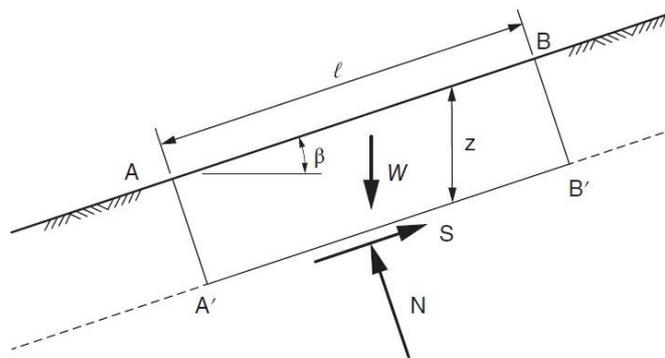
2.2.1.4. Procedimento de “Massa Inteira” – Talude infinito

Como o próprio nome nos diz, nesse método, assume-se que o talude é infinitamente extenso, com condições e propriedades constantes ao longo da profundidade (podendo conter vários estratos rochosos) e a superfície de ruptura ocorre ao longo de um plano paralelo ao talude. A justificativa para tal simplificação reside no fato de que a profundidade da superfície

de ruptura é significativamente menor do que a largura e o comprimento do plano de falha considerado (TAYLOR, 1948).

Como o talude é infinito, a tensão será a mesma em qualquer plano perpendicular ao talude. As equações de equilíbrio são obtidas considerando um bloco retangular como o mostrado na Figura 2.9 (bloco formado pelos planos AA' e BB'). Para um talude infinito, as forças nos limites do bloco serão idênticas em magnitude, opostas em direção e colineares, assim, tais forças se equilibram e podem ser ignoradas nas equações de equilíbrio satisfazendo, dessa forma, as condições de equilíbrio de forças diretamente e as condições de equilíbrio de momentos indiretamente.

Figura 2.9 – Talude infinito e planos de ruptura (AA' e BB')



Fonte: Duncan et al. (2014)

A Tabela 2-1 apresenta um resumo dos procedimentos em duas dimensões que consideram a massa de ruptura como uma massa inteira.

Tabela 2-1 – Resumo dos procedimentos em 2D de massa inteira (continua)

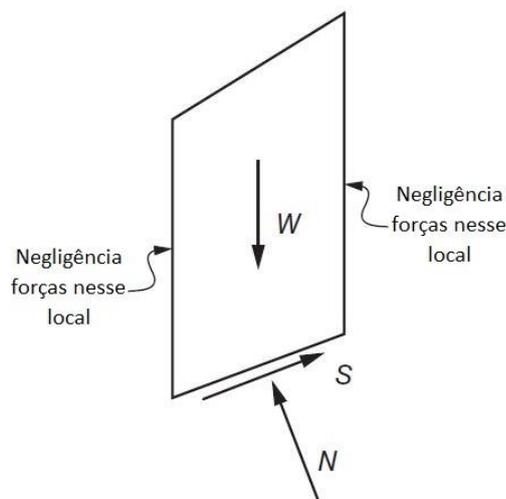
Método	Premissas	Condições de equilíbrio satisfeitas
Círculo de atrito	Superfície de ruptura circular e resultantes das tensões normais e do componente de fricção da resistência ao cisalhamento serão tangentes a um círculo de raio $R \cdot \sin \phi$ (círculo de fricção)	Equilíbrio de forças
<i>Swedish Circle</i> ($\phi = 0$)	Superfície de ruptura circular, ângulo de atrito igual a zero e tensão cisalhante considerada como sendo devido, apenas, a coesão	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos

Espiral logarítmica	Superfície de ruptura igual a uma espiral logarítmica	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos
Talude Infinito	Talude infinitamente extenso, com condições e propriedades constantes ao longo da profundidade (podendo conter vários estratos rochosos) e superfície de ruptura ocorre ao longo de um plano paralelo ao talude	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos

2.2.1.5. Procedimento de fatias – Método comum de fatias

O método comum de fatias (FELLENIOUS, 1936) é também conhecido como “método de Fellenius” ou “método *Swedish Circle*” (pois, caso $\phi = 0$, o fator de segurança obtido será o mesmo). Nesse método assume-se que a superfície de ruptura é circular e que o somatório de momentos é em torno do centro O (Figura 2.11). A força entre fatias é negligenciada (Figura 2.10) e o equilíbrio de cada uma é obtido considerando que o somatório de forças (verticais e horizontais) em cada fatia será zero, assim, o método satisfaz apenas o equilíbrio de momentos (ALBATAINEH, 2006).

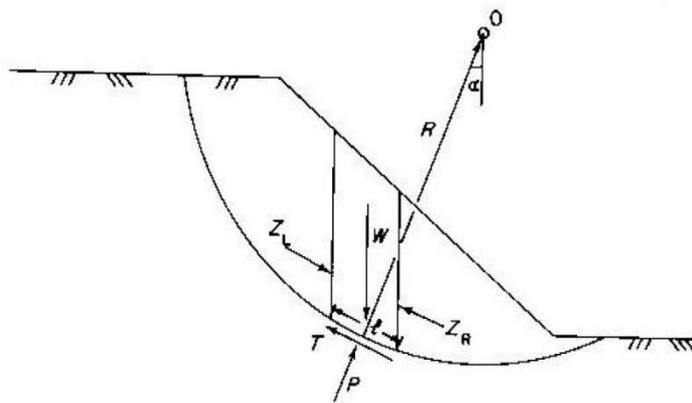
Figura 2.10 – Fatia mostrando as forças consideradas no método comum de fatias



Fonte: Modificado de Duncan et al. (2014)

A expressão original para o fator de segurança pelo método comum de fatias resultava em tensões efetivas negativas na superfície de deslizamento pois, como as forças entre fatias são negligenciadas, não existe nenhuma força para se opor a poro-pressão (ALBATAINEH, 2006). Assim, Turnbull e Hvorslev (1967), ao expressar o peso da fatia em termos do “peso efetivo” (peso da fatia menos a força devido a poro-pressão) obtém uma melhor expressão para o fator de segurança para o método desde que a poro-pressão seja menor do que a pressão total de sobrecarga vertical, condição essa que deve existir para qualquer talude estável.

Figura 2.11 – Superfície de ruptura correspondente ao método comum de fatias



Fonte: Anderson e Richards (1987)

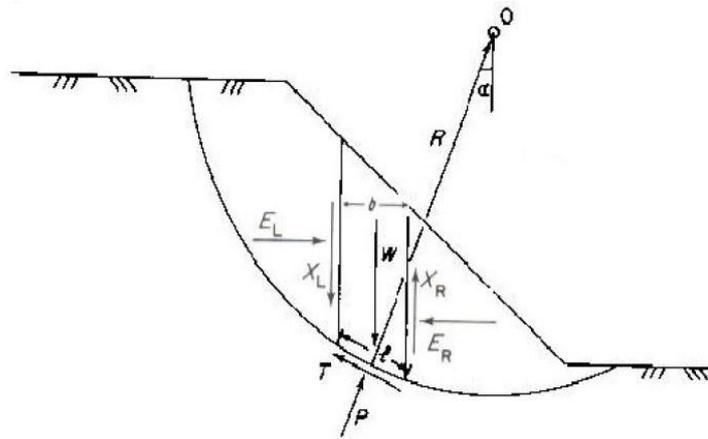
2.2.1.6. Procedimento de fatias – Métodos de Bishop

Bishop (1955), originalmente apresentou dois métodos diferentes para análise de estabilidade de taludes. No primeiro, conhecido como método completo de Bishop, o autor descreve todas as etapas e pressupostos necessários para satisfazer plenamente o equilíbrio estático. No entanto, nenhum detalhe específico foi determinado e, na verdade, esse método era semelhante a um procedimento que Fellenius (1936) havia descrito anteriormente (DUNCAN et al., 2014).

No segundo método, conhecido como método simplificado de Bishop, assume-se que as forças nas laterais das fatias são horizontais, ou seja, não há tensão cisalhante entre as mesmas, como mostrado na Figura 2.12. Para $\phi = 0$, o método simplificado de Bishop retorna um valor idêntico ao valor obtido com o método da espiral logarítmica, *Swedish Circle* e o

método comum de fatias pois, todos esses métodos satisfazem as condições de equilíbrio de momento em torno do centro de um círculo, o que produz um único valor para o fator de segurança. Na verdade, qualquer método que satisfaça o equilíbrio de momentos em torno do centro da superfície de ruptura circular, retornará o mesmo valor para o fator de segurança para a condição de $\phi = 0$.

Figura 2.12 – Superfície de ruptura correspondente ao método simplificado de Bishop

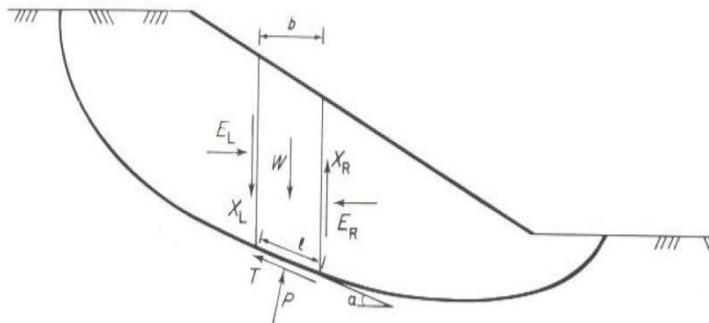


Fonte: Anderson e Richards (1987)

2.2.1.7. Procedimento de fatias – Métodos de Janbu

Assim como Bishop (1955), Janbu também apresentou dois métodos diferentes para a análise de estabilidade de taludes. O primeiro, conhecido como método simplificado de Janbu, (JANBU et al., 1956), é aplicável a qualquer superfície de ruptura, como mostrado na Figura 2.13. Nesse método, a força entre fatias é assumida como sendo horizontal e, dessa forma, as forças de cisalhamento são zeradas.

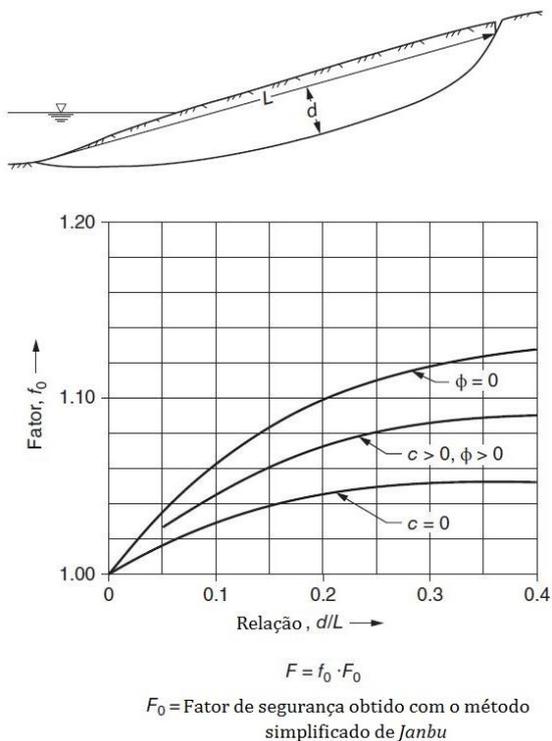
Figura 2.13 - Superfície de ruptura correspondente ao método simplificado de Janbu



Fonte: Anderson e Richards (1987)

Para levar em conta a força de cisalhamento entre fatias, Janbu et al. (1956) propõem o uso de um fator de correção (f_0). Tal fator está relacionado à coesão, ângulo de atrito interno e a forma da superfície de ruptura (Figura 2.14). O fator de correção apresentado foi baseado em uma série de cálculos de estabilidade (entre 30 e 40) usando os métodos simplificado e generalizado, propostos por Janbu. Duncan et al. (2014) nos dizem que, muitas vezes, esse fator de correção parece gerar valores melhorados para o fator de segurança devendo-se usar de precaução na sua utilização.

Figura 2.14 – Fator de correção utilizado no método simplificado de Janbu

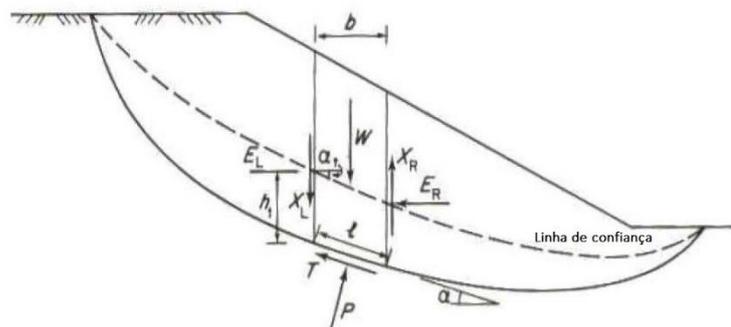


Fonte: Modificado de Duncan et al. (2014)

O segundo procedimento, conhecido como método generalizado de Janbu, (JANBU, 1954; JANBU et al. 1956) é um método iterativo também e, aplicável a qualquer superfície de ruptura. Ele assume que o ponto no qual as forças entre fatias atuam é definido por uma “linha de confiança” (Figura 2.15) e a força normal na base da fatia é derivada do somatório das forças verticais. O fator de segurança é calculado pela mesma fórmula baseada no equilíbrio de forças, utilizada pelo método de Spencer (1967) e, obtido por cálculos iterativos.

A diferença entre os dois métodos (simplificado e generalizado) reside no fato de que o método generalizado leva em consideração as forças de cisalhamento na derivação da força normal. Além disso, o método simplificado satisfaz apenas as condições de equilíbrio de forças, enquanto o método generalizado, satisfaz todas as condições de equilíbrio (forças e momentos).

Figura 2.15 - Superfície de ruptura correspondente e a “linha de confiança” considerada no método generalizado de Janbu



Fonte: Anderson e Richards (1987)

2.2.1.8. Procedimento de fatias – Método de Lowe e Karafiath (1960)

O método proposto por Lowe e Karafiath (1960) considera que as forças entre fatias são inclinadas em um ângulo representado pela média das inclinações do talude (superfície) e da superfície de cisalhamento (superfície de deslizamento). A suposição dos autores produz fatores de segurança que geralmente apresentam diferença de aproximadamente 10% dos valores calculados por procedimentos que satisfazem o equilíbrio estático completo (forças e momentos) sendo assim, um dos métodos mais precisos que consideram apenas o equilíbrio de forças.

As equações de equilíbrio podem ser resolvidas graficamente ou numericamente. As soluções requerem um procedimento iterativo, de tentativa e erro para calcular o fator de segurança. Um primeiro fator de segurança é assumido e o equilíbrio de forças é então verificado. Se o mesmo não for satisfeito, um novo fator de segurança é assumido e o processo é repetido até que o equilíbrio seja satisfeito em um grau aceitável.

2.2.1.9. Procedimento de fatias – Método de Morgenstern e Price (1965)

Apresentado em 1965, o método desenvolvido por Morgenstern e Price é aplicável a qualquer superfície de ruptura composta por materiais com diferentes tensões de cisalhamento e poro-pressão, além de satisfazer tanto o equilíbrio de momentos como de forças. Tal método assume uma função matemática arbitrária para descrever a direção das forças entre fatias, dada pela equação 4, abaixo:

$$\lambda f(x) = \frac{X}{E} \quad 4$$

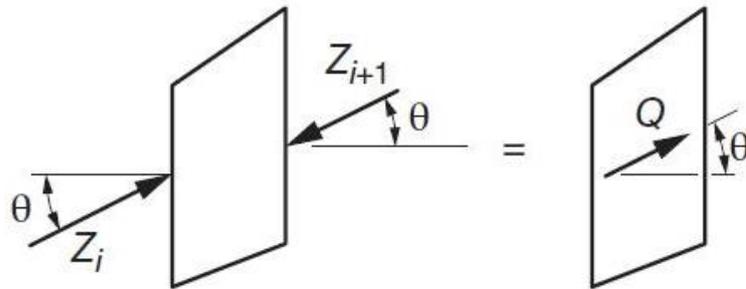
Onde λ é um fator de escala desconhecido que é determinado juntamente com outras incógnitas, $f(x)$ é uma função assumida que varia continuamente ao longo da superfície de ruptura (O método de Morgenstern e Price é similar ao método de Spencer para uma função $f(x)$ constante), X é a força vertical entre fatias e E é a força horizontal entre fatias. As incógnitas determinadas por esse método são o fator de segurança (F), o fator de escala (λ), a força normal na base da fatia (P), a força horizontal entre fatias (E) e a localização das forças entre fatias (linha de confiança). Uma vez determinadas tais incógnitas, usando as equações de equilíbrio e condições de contorno propostas pelo método, a componente vertical das forças entre fatias (X) pode ser calculada utilizando-se a equação 4, descrita acima.

2.2.1.10. Procedimento de fatias – Métodos de Spencer (1967)

O método de Spencer de 1967 foi originalmente apresentado para análise em superfície de ruptura circular, mas é facilmente expandido para superfícies de ruptura não-circulares. Esse método satisfaz tanto o equilíbrio de momentos como de forças, pois toma como premissa o

fato de que as forças entre fatias são paralelas e, dessa forma, possuem a mesma inclinação (Figura 2.16).

Figura 2.16 – Forças entre fatias e sua resultante (Q) quando as forças entre fatias são paralelas

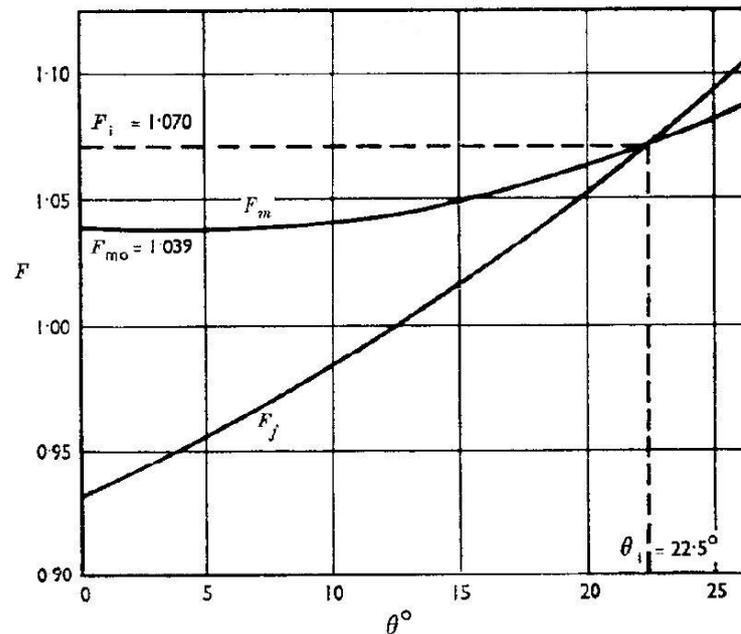


Fonte: Duncan et al. (2014)

Nesse método, as forças entre fatias são substituídas por uma resultante estaticamente equivalente (Q), que atua no ponto médio da base da respectiva fatia, tal como a força normal (N), a força peso (W) e a tensão cisalhante (S). Isso apenas não ocorrerá caso existam forças adicionais na fatia, fato não considerado nesse método.

Para o cálculo do fator de segurança, Spencer (1967) determinou duas equações para o fator de segurança. Uma é baseado na soma de momentos sobre um ponto comum (F_m) e a outra na soma de forças em uma direção paralela às forças entre fatias (F_f) produzindo, assim, dois fatores de segurança. Quando os dois fatores de segurança são iguais para um determinado ângulo θ , ambos os equilíbrios de força e de momento são satisfeitos (Figura 2.17).

Figura 2.17 – Relação entre o fator de segurança obtido pelo equilíbrio de momentos (F_m), o fator de segurança obtido pelo equilíbrio de forças (F_f) e o ângulo θ



Fonte: Spencer (1967)

2.2.1.11. Procedimento de fatias – Método Sueco modificado (*Corps of Engineers' Modified Swedish Procedure*)

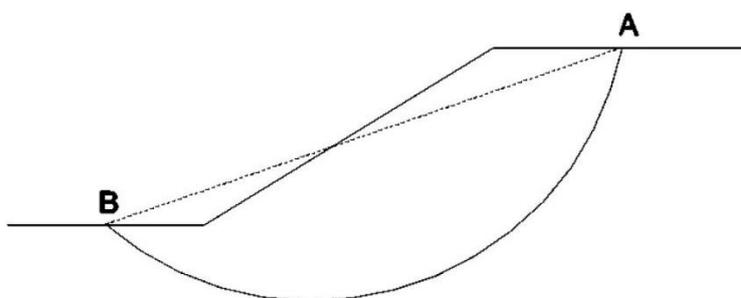
O método Sueco modificado é o nome aplicado à procedimentos que satisfazem apenas as condições de equilíbrio de forças (satisfazem o equilíbrio da força nas direções horizontal e vertical, mas não satisfazem o equilíbrio de momentos) quando eles são usados para análise de superfícies de ruptura circulares. Esse método tem sido amplamente utilizado pelo Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers, 1970*). Assim como para o método de Lowe e Karafiath (1960), as equações de equilíbrio podem ser resolvidas graficamente ou numericamente e, para calcular o fator de segurança, é necessário um procedimento iterativo, de tentativa e erro.

As forças entre fatias são representadas de duas maneiras no método Sueco modificado. Na primeira abordagem, são consideradas como representando as forças totais entre as fatias, resultado de tensões efetivas e poro-pressão. Na segunda abordagem, são consideradas como representando forças efetivas que representam as tensões efetivas nos limites entre fatias. As forças resultantes da poro-pressão são, então, consideradas como forças

separadas entre as fatias e, com isso, o valor calculado do fator de segurança será diferente dependendo da abordagem utilizada.

Independentemente de as forças entre fatias representarem forças totais ou efetivas, sua inclinação deve ser assumida. O manual de 1970 do *U.S. Army Corps of Engineers* afirma que as forças laterais devem ser assumidas como paralelas à "inclinação média do talude", a qual geralmente é considerada como a inclinação de uma linha reta desenhada entre os pontos onde a superfície de ruptura intersecta a crista e o pé do talude (linha entre os pontos A e B, Figura 2.18). Todas as forças laterais são assumidas como tendo a mesma inclinação (pressuposto *Corps of Engineers* #1) (Figura 2.18). A suposição de forças laterais paralelas à inclinação média do talude mostrou-se, por vezes, levar a resultados conservadores em muitos casos – o fator calculado de segurança é muito grande – quando comparado a procedimentos mais rigorosos que satisfazem o equilíbrio de forças e momento, como o método de Spencer. O grau de imprecisão é maior quando são utilizadas forças totais entre as fatias assim, provavelmente, é mais realista e mais seguro assumir que as forças entre fatias estão inclinadas a metade da inclinação média do talude quando são utilizadas forças totais.

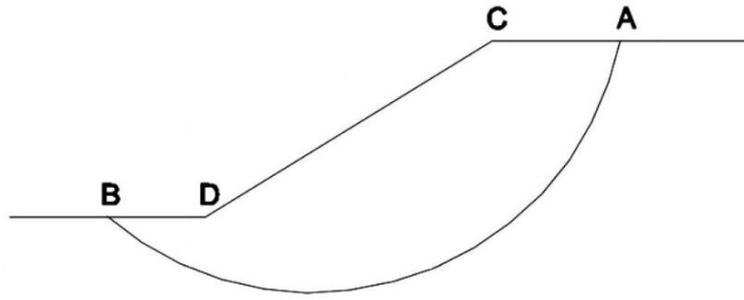
Figura 2.18 – Direção das forças entre fatias – *Corps of Engineers* #1



Fonte: Modificado de da Silva (2013)

Para evitar a possibilidade de se superestimar o fator de segurança, as forças entre fatias também podem ser consideradas como sendo paralelas a superfície. Dessa forma, a direção das forças entre fatias não é constante, ao contrário do pressuposto anterior, *Corps of Engineers* #1, ou seja, onde a superfície do solo é horizontal (trecho BD e CA, Figura 2.19), a força entre fatias resultante é horizontal e, onde a superfície do solo possui uma inclinação (trecho DC, Figura 2.19), a resultante é paralela à essa inclinação (pressuposto *Corps of Engineers* #2) (Figura 2.19).

Figura 2.19 – Direção das forças entre fatias – *Corps of Engineers #2*

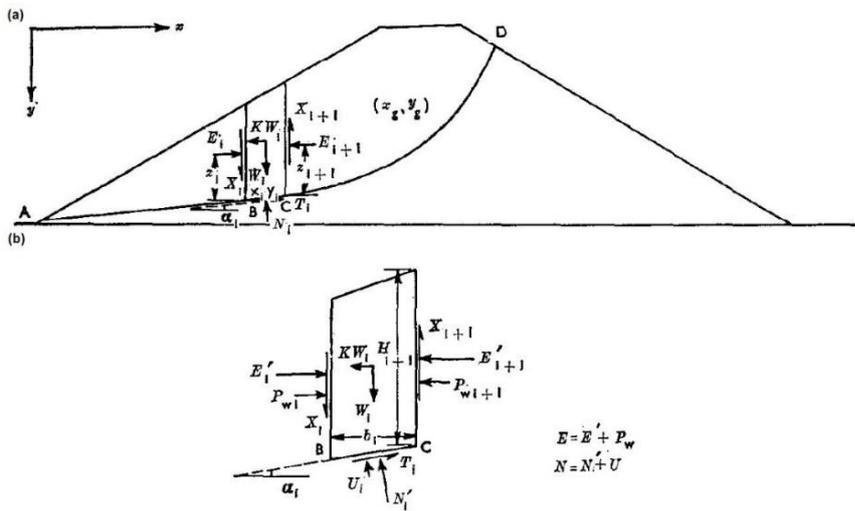


Fonte: Modificado de da Silva (2013)

2.2.1.12. Procedimento de fatias – Método de Sarma (1973)

O método de Sarma (1973) é uma abordagem diferente de todos os métodos discutidos anteriormente pois considera um coeficiente sísmico (k_c) desconhecido e o fator de segurança deve ser conhecido. Usualmente, assume-se o fator de segurança como sendo 1 e o coeficiente de segurança necessário para se obter tal fator de segurança é calculado. Esse coeficiente representa o coeficiente sísmico necessário para que ocorra uma ruptura.

Figura 2.20 – (a) Superfície de ruptura adotada pelo método de Sarma (1973) e (b) diagrama mostrando as forças atuantes em uma fatia



Fonte: Sarma (1973)

Sarma (1973) estendeu sua pesquisa ao cálculo de fatores de segurança, uma vez que, conforme argumentado por ele, como uma massa de solo se move de nenhum movimento

para a ruptura, durante um evento sísmico, a massa deve passar pela aceleração onde o fator de segurança é 1.0, ou seja, o ponto em que a massa está no limite do equilíbrio. Ele chamou esse valor de aceleração de “aceleração crítica”, determinando a criação da constante K_c , onde para taludes sem cargas sísmicas, o coeficiente sísmico alvo é zero (ALBATAINEH, 2006).

2.2.1.13. Procedimento de fatias – Método generalizado de equilíbrio limite (*General Limit Equilibrium Method of Slices – GLE*)

O método proposto por Fredlund e Krahn (1977), é também conhecido como método generalizado de equilíbrio limite (*General Limit Equilibrium Method of Slice – GLE*). Conforme os autores, alguns dos métodos citados anteriormente nesse estudo (método comum de fatias; método simplificado de Bishop; método de Spencer; método simplificado e generalizado de Janbu, método de Lowe e Karafiath, método sueco modificado e o método de Morgenstern e Price) são apenas casos especiais do método GLE.

A equação do fator de segurança para todos os métodos mencionados anteriormente pode ser escrita de uma forma geral para o equilíbrio de momentos (F_m) (equação 5) e/ou forças (F_f) (equação 6):

$$F_m = \frac{\sum c'l \cos \alpha + \sum (P - ul)R \tan \phi'}{\sum Wx - \sum Pf + \sum kW e \pm Aa + Ld} \quad 5$$

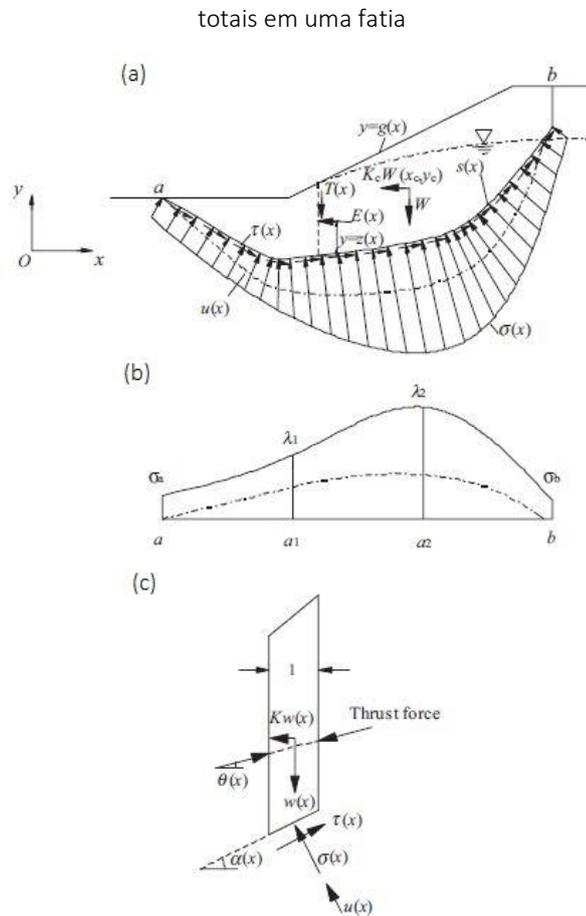
$$F_m = \frac{\sum c'l \cos \alpha + \sum (P - ul) \tan \phi' \cos \alpha}{\sum P \sin \alpha + \sum kW \pm Aa - L \cos \omega} \quad 6$$

Onde cada um dos somatórios representa um parâmetro (coesão, ângulo de atrito, peso da fatia, força normal, etc.). Além disso, a equação da força normal, que também pode ser escrita de uma forma geral, é igual para todos os métodos, com exceção do método comum de fatias que não pode ser relacionado as formulações gerais uma vez que, não satisfaz os princípios necessários relacionados as forças entre fatias. O que difere cada método é a forma de tratamento das forças entre fatias, que por sua vez, difere as equações da força normais e o valor do fator de segurança obtido.

2.2.1.14. Procedimento de fatias – Zhu e Lee (2002)

Zhu e Lee (2002) apresentam um procedimento para derivar as três equações de equilíbrio (equações de forças horizontais e verticais e equação de momento) com base em uma suposição em relação à distribuição de tensão normal ao longo da superfície deslizante. A combinação dessas equações resulta em uma única equação cúbica em termos do fator de segurança, que é explicitamente resolvido.

Figura 2.21 – Pressupostos sobre tensões normais na superfície da fatia: (a) forças e tensões que atuam sobre a massa deslizante, (b) distribuição assumida das tensões normais totais e (c) determinação das tensões normais totais em uma fatia



Fonte: Zhu e Lee (2002)

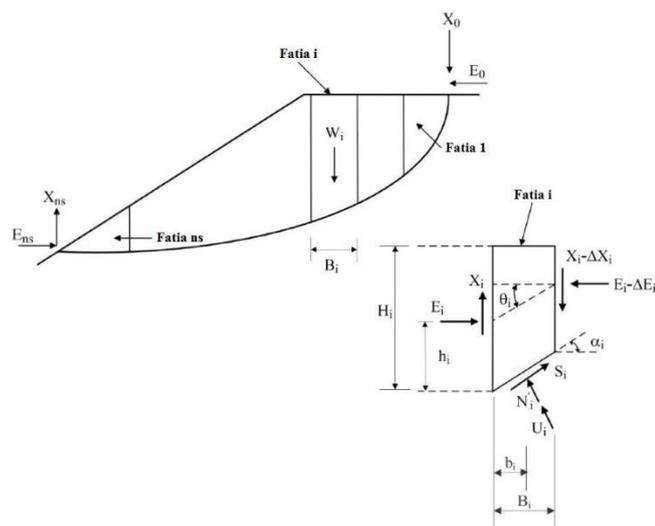
O fator de segurança pode ser explicitamente obtido no âmbito do equilíbrio limite rigoroso através de uma suposição sobre a distribuição das tensões normais totais que atuam ao longo da superfície de ruptura (Figura 2.21a). Sugere-se que a distribuição das tensões normais totais ($\sigma(x)$) seja representada por um polinômio de Lagrange de grau 3 (Figura 2.21b).

As equações globais de equilíbrio de força (verticais e horizontais) e momento para toda a massa deslizante podem ser escritas na forma de integrais. Manipular as três equações leva a uma equação cúbica simples para o fator de segurança que pode ser resolvida analiticamente, resultando em uma solução explícita para a estabilidade do talude.

2.2.1.15. Procedimento de fatias – Huang (2013)

Os métodos de fatias convencionais para análise de estabilidade de taludes usam um valor constante do fator de segurança ao longo de toda a superfície de falha, não fornecendo informações de deslocamentos e possíveis variações nas margens de segurança do talude analisado. Por conseguinte, é de importância prática expandir o método de fatias baseado em forças para um sistema baseado em deslocamentos para fornecer informações úteis sobre forças cisalhantes e margens de segurança associadas ao longo da superfície de falha potencial. Assim, Huang (2013) amplia o procedimento generalizado de Janbu, complementando o método com critérios adicionais em relação à compatibilidade do deslocamento de fatias e relações de tensão-deslocamento não-lineares representadas por um modelo de solo hiperbólico, tornando-o um sistema estaticamente determinado capaz de gerar fatores locais de segurança baseados na tensão e no deslocamento ao longo de uma superfície potencial de falha (Figura 2.22).

Figura 2.22 – Forças atuando em uma fatia de um talude com superfície de ruptura não-circular



Fonte: Modificado de Huang (2013)

A Tabela 2-2 apresenta um resumo dos procedimentos em duas dimensões de fatias para análises de estabilidade de taludes.

Tabela 2-2 – Resumo dos procedimentos em 2D de fatias

Método	Superfície de ruptura	Condições de equilíbrio satisfeitas
Comum de fatias	Circular	Equilíbrio de momentos
Completo de Bishop	-	-
Simplificado de Bishop	Circular	Equilíbrio de forças na vertical Equilíbrio de momentos
Simplificado de Janbu	Aplicável em qualquer forma	Equilíbrio de forças
Generalizado de Janbu	Aplicável em qualquer forma	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos
Lowe e Karafiath (1960)	Aplicável em qualquer forma	Equilíbrio de forças
Morgenstern e Price (1965)	Aplicável em qualquer forma	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos
Spencer (1967)	Aplicável em qualquer forma	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos
Método Sueco modificado (<i>Corps of Engineers' Modified Swedish Procedure</i>)	Aplicável em qualquer forma	Equilíbrio de forças
Sarma (1973)	Aplicável em qualquer forma	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos
Método generalizado de fatias	Aplicável em qualquer forma	-
Zhu e Lee (2002)	Aplicável em qualquer forma	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos
Huang (2013)	Aplicável em qualquer forma	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos

2.2.2. Análise de estabilidade *quasi*-tridimensional para ruptura circular

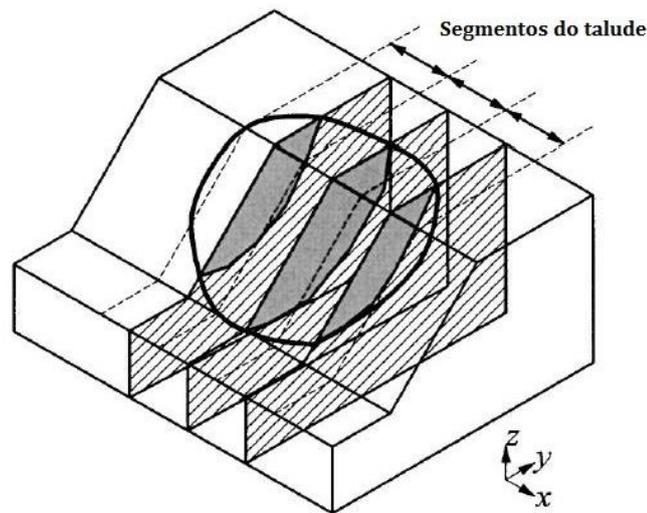
Os procedimentos bidimensionais para análise de taludes são atraentes por vários motivos: (a) são relativamente simples em comparação com procedimentos de análise tridimensional; (b) é relativamente fácil satisfazer o equilíbrio estático completo; (c) foram implementados em software de fácil utilização e; (d) foram utilizados com sucesso por muitos anos para avaliar a estabilidade de taludes. Todavia, o fato de se reduzir um problema tridimensional a um problema bidimensional gera a necessidade de algumas premissas que podem gerar discrepâncias no fator de segurança calculado. Dessa forma, visando manter a praticidade dos métodos 2D e tornar o problema mais próximo da realidade 3D a qual pertence, duas abordagens têm sido utilizadas para avaliar a estabilidade de taludes em 3D considerando procedimentos de análise em 2D (LOEHR et al., 2004). A primeira consiste em realizar análises bidimensionais para uma única seção transversal através da massa deslizante. Tal seção é normalmente tomada como a seção transversal "máxima", isto é, a seção transversal com a maior área através da massa deslizante na direção do deslizamento. Frequentemente, a seção transversal máxima representa a seção transversal com o menor fator de segurança e, portanto, a abordagem é, por vezes, dita como "conservadora". No entanto, a seção transversal máxima nem sempre produz o menor fator de segurança. Por exemplo, as seções transversais localizadas próximas das extremidades da massa deslizante em algumas encostas de aterro podem estar alinhadas com interfaces relativamente fracas, de modo que elas produzam o menor fator de segurança. Essas seções transversais podem ser pequenas em relação a outras seções transversais e, embora possam produzir os fatores mais baixos de segurança, elas não são consideradas representativas e, portanto, não são usadas para análises bidimensionais. Muitas vezes, para encostas com geometria complexa, a seção transversal que é realmente usada é algo arbitrária e sujeita à avaliação do engenheiro sobre o que é representativo (LOEHR et al., 2004).

A segunda abordagem para análise de estabilidade de taludes em três dimensões usando procedimentos de análise bidimensionais é analisar uma série de cortes transversais uniformemente espaçados através da massa deslizante, alinhados com a direção do deslizamento (Figura 2.23). Os resultados das análises bidimensionais individuais são então

combinados para calcular um fator de segurança tridimensional "equivalente" (LOEHR et al., 2004).

Os procedimentos de análise *quasi*-tridimensional apresentados nesse trabalho consideram a segunda abordagem, mencionada acima e, tais métodos são descritos nos itens a seguir.

Figura 2.23 – Forma geral para estabilidade de taludes *quasi*-tridimensional



Fonte: Modificado de Loehr et al. (2004)

2.2.2.1. Sherard et al. (1963)

O método proposto por Sherard et al. (1963) consiste em se dividir o comprimento do talude analisado em 3 a 5 segmentos de igual comprimento, de forma que os planos verticais sejam perpendiculares ao eixo longitudinal do talude. Para cada seção encontra-se a superfície crítica a partir de uma análise bidimensional e, assume-se que essas superfícies bidimensionais críticas estão contidas na superfície tridimensional mais crítica.

Para cada superfície crítica deve-se, então, calcular a soma das forças cisalhantes resistentes e a soma das forças cisalhantes solicitantes de tal forma que, considerando o talude dividido em "n" segmentos, o fator de segurança é calculado como:

$$FS = \frac{\sum F_r}{\sum F_d} \quad 7$$

Onde F_r e F_d representam, respectivamente, as forças de resistência totais e as forças de resistência atuantes na massa deslizante para cada seção transversal bidimensional e a soma é realizada para todas as seções transversais.

2.2.2.2. Lambe e Whitman (1969)

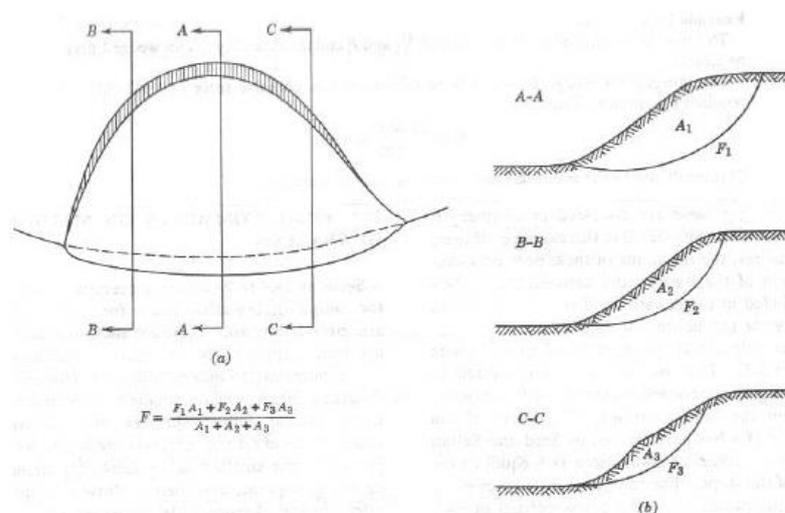
Lambe e Whitman (1969), por sua vez, sugerem usar três seções transversais paralelas através do talude (

Figura 2.24) e o cálculo do fator de segurança em 2D para cada seção transversal criada para, dessa forma, determinar o fator de segurança 3D. Esse fator é ponderado usando a área acima da superfície de falha em cada seção transversal como o fator de ponderação conforme a seguinte equação:

$$F = \frac{F_1 A_1 + F_2 A_2 + F_3 A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \quad 8$$

Onde, F e A representam, respectivamente, o fator de segurança e o fator de ponderação (área total acima da superfície de ruptura) para as seções transversais 2D correspondentes.

Figura 2.24 – Método de Lambe e Whitman (1969): (a) vista em planta e (b) fator de segurança para diferentes seções



Fonte: Lambe e Whitman (1969)

2.2.2.3. Anagnosti (1969)

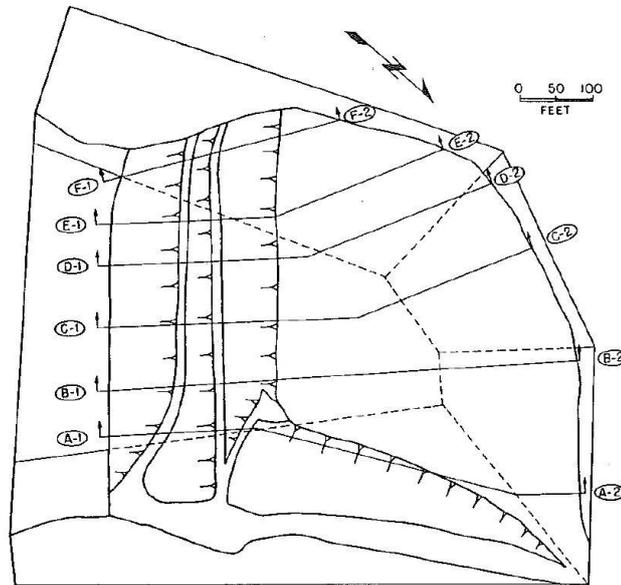
Em 1969, Anagnosti apresenta uma extensão em 3D ao método 2D desenvolvido por Morgenstern e Price em 1965. Tal método foi desenvolvido para determinar o fator de segurança das potenciais superfícies de rupturas com diferentes formas. Foram estabelecidas equações de equilíbrio para uma série de finas fatias verticais bem como condições de equilíbrio limite nas laterais sujeitas ao deslizamento. A principal hipótese neste método é a função atribuída para as forças de cisalhamento entre fatias que tornou possível satisfazer todas as condições de equilíbrio (forças e momentos).

2.2.2.4. Seed et al. (1990)

Assim como no método proposto por Lambe e Whitman (1969), Seed et al. (1990) também utilizam seções transversais paralelas através do talude (

Figura 2.25) e o cálculo do fator de segurança em 2D para cada seção transversal criada para, assim, determinar o fator de segurança 3D. Todavia, ao contrário do método proposto anteriormente, Seed et al. (1990) consideram seis seções transversais para análise (ao contrário do método proposto por Lambe e Whitman que considera três seções transversais). Além disso, o fator de ponderação utilizado é o peso acima da superfície de ruptura de cada seção transversal e não mais a área acima da superfície de ruptura, como utilizado por Lambe e Whitman (1969).

Figura 2.25 – Vista em planta do método proposto por Seed et al. (1990)



Fonte: Seed et al. (1990)

2.2.2.5. Loehr et al. (2004)

Loehr et al. (2004) desenvolveram um método denominado “Método da Resistência Ponderada” (*Resistance-Weighted procedure*) o qual é uma extensão dos métodos *quasi*-tridimensionais conhecidos. O método, assim como os procedimentos mencionados anteriormente, inicialmente determina uma superfície crítica para cada seção criada e, para essa superfície, é calculado um fator de segurança bidimensional. Os fatores de segurança calculados são ponderados considerando o equilíbrio total das forças cisalhantes (T) ao longo de cada superfície de deslizamento bidimensional para, dessa forma, se determinar o fator de segurança 3D, conforme a equação abaixo:

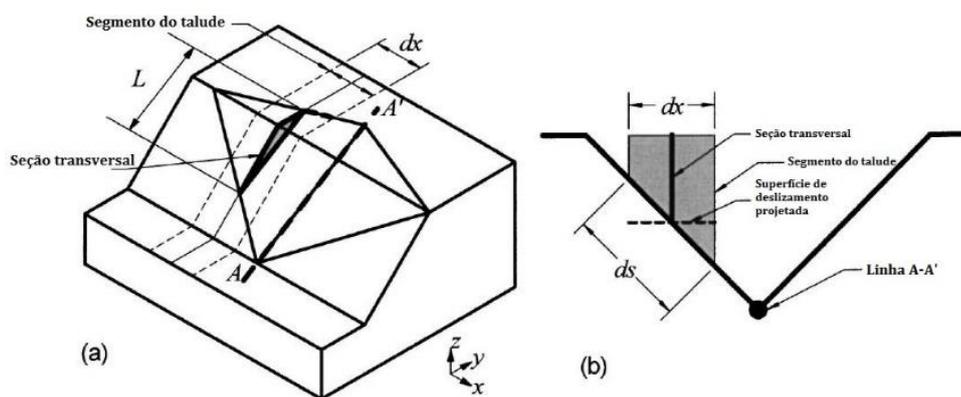
$$F_{3D} = \frac{\sum F_{2D}T}{\sum T} \quad 9$$

Loehr et al. (2004) pontuam que uma das diferenças entre um verdadeiro método tridimensional e o fator de segurança expresso pelo método proposto é a diferença nas áreas correspondentes às superfícies de deslizamento. A área da superfície de deslizamento implícita

neste método é a mesma dos métodos bidimensionais, isto é, perpendicular ao plano da seção transversal, dessa forma, a área real da superfície de deslizamento será maior, uma vez que se deixa de trabalhar com uma seção 2D e se passa a trabalhar com um modelo 3D. Assim, a resistência ao cisalhamento é desenvolvida em uma área maior.

Uma correta aproximação para a diferença entre a área real e a área projetada pode ser feita pela multiplicação, na equação 9, dos termos no numerador pela razão ds/dx . A distância ds é medida ao longo da superfície de deslizamento no plano perpendicular à seção transversal bidimensional, e a distância dx é medida na direção perpendicular à seção transversal, como mostrado na Figura 2.26 (LOEHR et al., 2004).

Figura 2.26 – Representação da diferença entre as áreas projetada e real da superfície de deslizamento: (a) vista tridimensional e (b) seção transversal perpendicular à AA'



Fonte: Modificado de Loehr et al. (2004)

A Tabela 2-3 apresenta um resumo dos procedimentos *quasi*-tridimensionais de análise.

Tabela 2-3 – Resumo dos procedimentos *quasi*-tridimensionais (continua)

Método	Premissas
Sherard et al (1963)	Média ponderada da estabilidade das várias seções escolhidas (entre 3 e 5 seções)
Lambe e Whitman (1969)	Média ponderada da estabilidade das várias seções escolhidas Fator de ponderação = área da superfície de deslizamento

Anagnosti (1969)	<p>Satisfaz todas as condições de equilíbrio (forças e momentos)</p> <p>Aplicável em qualquer forma de superfície de ruptura</p> <p>Aplicável apenas em taludes homogêneos</p> <p>Superfície de ruptura 3D não é especificada (usuário deve determinar a superfície crítica 3D)</p>
Seed et al. (1990)	<p>Média ponderada da estabilidade das várias seções escolhidas</p> <p>Fator de ponderação = peso da superfície de deslizamento</p>
Loehr et al. (2004)	<p>Aplicável em qualquer forma de superfície de ruptura</p> <p>Área da superfície de deslizamento = Área dos métodos bidimensionais (perpendicular ao plano da seção transversal)</p> <p>Área real da superfície de deslizamento maior (resistência ao cisalhamento é desenvolvida em uma área maior)</p> <p>Fator de correção = razão ds/dx</p>

2.2.3. Análise de estabilidade em 3D para ruptura circular

Conforme o estudo realizado por Akhtar (2011), desde a década de 60, diversas pesquisas propuseram diferentes procedimentos para a análise de estabilidade de taludes utilizando as técnicas de equilíbrio limite em três dimensões. Todavia, após quase sete décadas, o número de procedimentos em 3D, aceitos, ainda é muito pequeno em relação aos procedimentos utilizados em 2D.

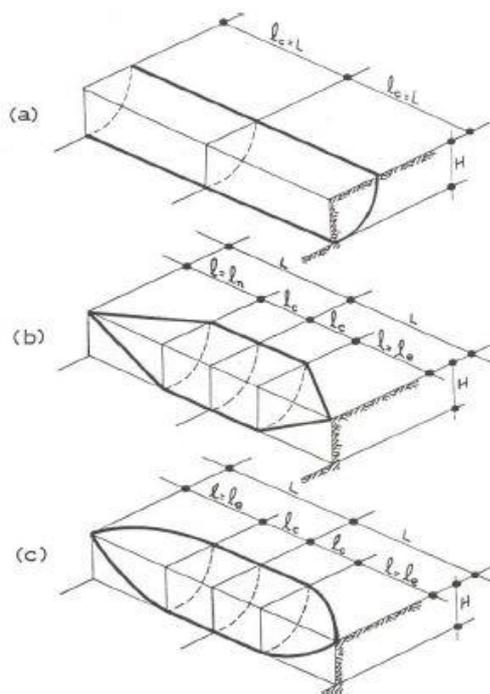
Comparando os procedimentos existentes em 2D e 3D, para os métodos de equilíbrio limite, notamos que um número maior de premissas se faz necessário para os procedimentos em três dimensões. Podemos dizer que um procedimento difere do outro no que diz respeito à: (a) premissas em relação as forças entre colunas; (b) equações de equilíbrio e; (c) simplificações quanto à forma da superfície de ruptura (AKHTAR, 2011).

Considerando modelos em três dimensões do método de equilíbrio limite, podemos citar como exemplo dos diversos procedimentos conhecidos: (a) Hovland (1977); (b) Cavounidis e Kalogeropoulos (1992); (c) Chang (2002) entre outros. Os principais métodos conhecidos para esse tipo de análise são revistos nos itens abaixo.

2.2.3.1. Baligh e Azzouz (1975); Azzouz e Baligh (1978)

Baligh e Azzouz (1975) analisaram os efeitos de borda na estabilidade de taludes homogêneos e coesivos, estendendo o procedimento de “falha do arco circular” em duas dimensões para três dimensões. Esse procedimento, em 2D, assume que a superfície de ruptura consiste em um cilindro infinitamente longo e que o mecanismo de ruptura é baseado em uma rotação rígida deste cilindro em torno de seu eixo. Esses pressupostos básicos são mantidos para o problema 3D, no entanto, a região de ruptura é tomada como uma superfície de revolução que se estende por um cilindro de comprimento finito (l_c) com um cone ou um elipsoide de comprimento l_n ou l_e , respectivamente, anexado às suas extremidades (Figura 2.27). Além disso, todas as forças elementares de cisalhamento, que atuam sobre a superfície de ruptura, são consideradas como perpendiculares ao eixo da revolução.

Figura 2.27 – Geometrias assumidas para a superfície de ruptura pelo método de Baligh e Azzouz (1975): (a) cilindro central, (b) cilindro central e cone anexado e (c) cilindro central e elipsoide anexado

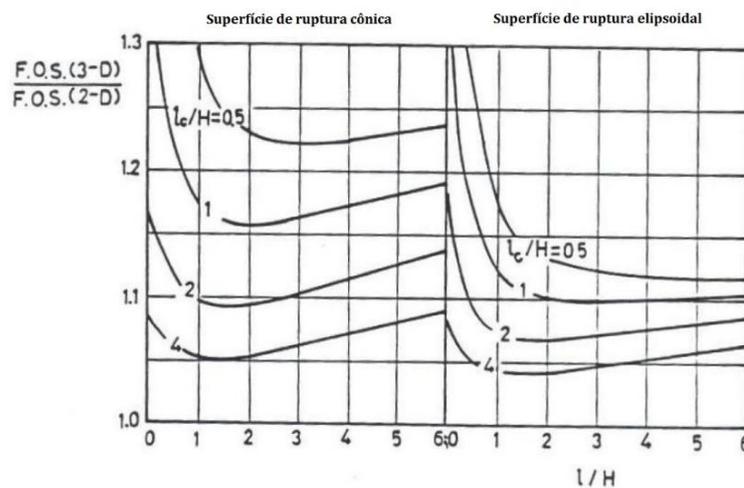


Fonte: Baligh e Azzouz (1975)

Uma vez que nesse método apenas solos coesivos foram levados em conta, Baligh e Azzouz (1975) consideraram, para o cálculo do fator de segurança, um corte vertical em taludes

formados por argila no qual o eixo de rotação passa pela crista do talude e o cilindro que forma a superfície de ruptura passa pela base do mesmo. A Figura 2.28 apresenta a razão do fator de segurança 3D (FS 3D) pelo fator de segurança 2D (FS 2D) plotada contra a razão entre o comprimento das extremidades do cilindro (l) e a altura do talude (H) para diferentes valores de l_c/H .

Figura 2.28 – Efeitos da geometria da superfície de ruptura no fator de segurança em corte verticais em taludes formados por argila



Fonte: Modificado de Baligh e Azzouz (1975)

Com base na Figura 2.28, Baligh e Azzouz (1975) concluíram que: (a) o efeito 3D tende a aumentar o fator de segurança 3D; (b) à medida que l_c/H aumenta, a razão entre o fator de segurança 3D e o fator de segurança 2D diminui; (c) para um valor fixo de l_c/H , o fator de segurança atinge um valor mínimo em um valor crítico de l/H o qual representa o comprimento provável em que ocorrerá a ruptura e; (d) quando $l=0$, o valor da razão entre os fatores de segurança 2D e 3D é o mesmo, independente da forma considerada para sua extremidade.

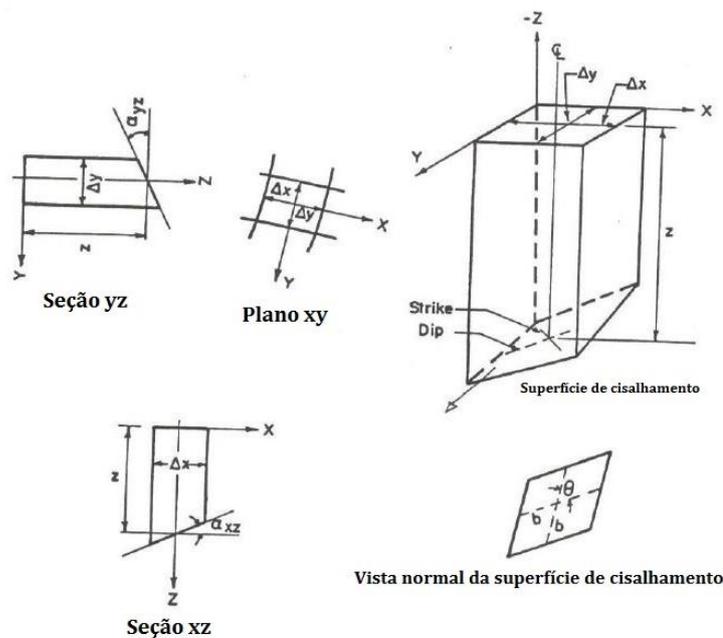
Azzouz e Baligh (1978), por sua vez, apresentaram procedimentos 3D para solos coesivos e não coesivos, expandindo seu trabalho anterior. Nessa revisão, a superfície de ruptura é novamente considerada como um cilindro com extremidades cônicas ou elipsoidais e a direção das forças elementares de cisalhamento, que atuam sobre a superfície de ruptura, são consideradas como perpendiculares ao eixo de revolução, além disso, também é necessário assumir que as tensões são normais na superfície de ruptura. Embora os pressupostos relacionados às forças de resistência ao cisalhamento não tenham mudado, duas hipóteses

adicionais foram introduzidas para a distribuição de outras forças. A primeira seguiu o método comum de fatias (FELLENIOUS, 1936) para desconsiderar todas as forças entre fatias e calcular tensões normais a partir do equilíbrio de momentos de cada fatia. A segunda assumiu que a tensão efetiva vertical é a maior tensão principal que é igual ao peso da fatia; a tensão horizontal é a menor tensão principal e; uma terceira tensão principal é igual ao coeficiente do peso da fatia que atua paralelamente ao eixo de rotação.

2.2.3.2. Hovland (1977)

Hovland (1977) apresenta um método geral de análise de estabilidade em 3D análogo ao método comum de fatias em 2D e, por isso, às vezes é referido como o método comum de colunas. Nesse método, todas as forças entre colunas, que atuam nas laterais das mesmas, são ignoradas e, as forças normais e de cisalhamento que atuam na base de cada coluna são derivadas como componentes do peso da coluna. Assume-se também que existe movimento apenas em uma direção e que o equilíbrio do sistema é calculado apenas para tal direção (Figura 2.29).

Figura 2.29 – Seção 2D do método de Hovland (1977)



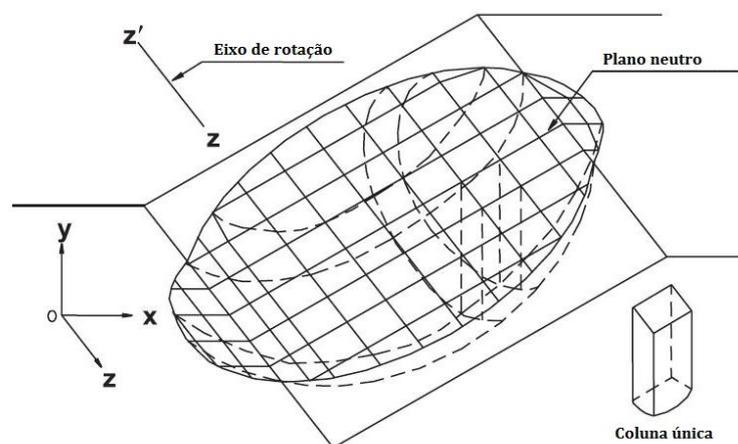
Fonte: Modificado de Hovland (1977)

O fator de segurança é calculado dividindo a massa do solo acima da superfície de ruptura em várias colunas verticais, assumindo que as coordenadas X e Y são perpendiculares e estão no plano horizontal, a coordenada Z é vertical e a coordenada Y deve estar na direção de movimento do talude. A área da coluna no plano XY é definida por ΔX e ΔY e, para determinar uma fórmula para o cálculo do fator de segurança, Hovland (1977) assume que ambos, ΔX e ΔY , são constantes para todas as colunas.

2.2.3.3. Chen (1981); Chen e Chameau (1982)

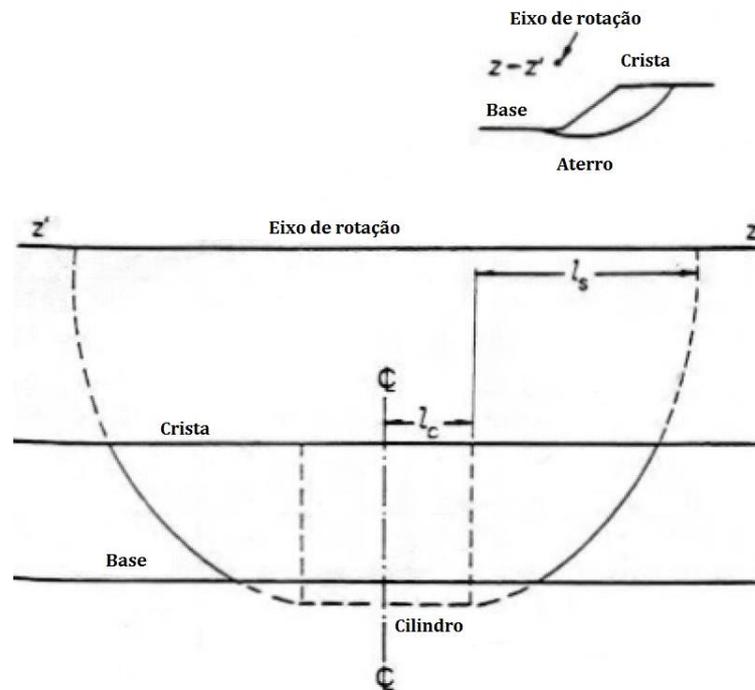
Chen (1981) e Chen e Chameau (1982) desenvolveram estudos abrangente dos efeitos tridimensionais sobre a estabilidade de taludes para uma grande variedade de parâmetros e geometrias de solo. Eles sugerem métodos para a análise de ruptura circular na qual a massa deslizante é dividida em diversas colunas verticais e o fator de segurança é definido como a razão entre o esforço de resistência disponível e o esforço solicitante. Chen (1981) apresenta e analisa três tipos de geometria diferentes: (a) “tipo rolo” (*roller type*), onde a massa de ruptura possui forma cilíndrica com limites verticais e, assim, o problema é muito similar ao problema 2D, diferenciando-se pelo fato de que o comprimento da massa de ruptura é finito; (b) “forma de colher” (*spoon shape*), conforme a Figura 2.30 e; (c) “forma mista” (*mixed shape*), estruturada como um cilindro de comprimento finito com um elipsoide anexado as suas extremidades, análogo a forma proposta por Baligh e Azzouz (1975), (Figura 2.31).

Figura 2.30 – Geometria da ruptura circular considerada por Chen (1981) – “Forma de colher” (*Spoon shape*)



Fonte: Modificado de Chen (1981)

Figura 2.31 – Vista frontal da geometria de ruptura circular considerada por Chen (1981) – “Forma mista” (*Mixed shape*)

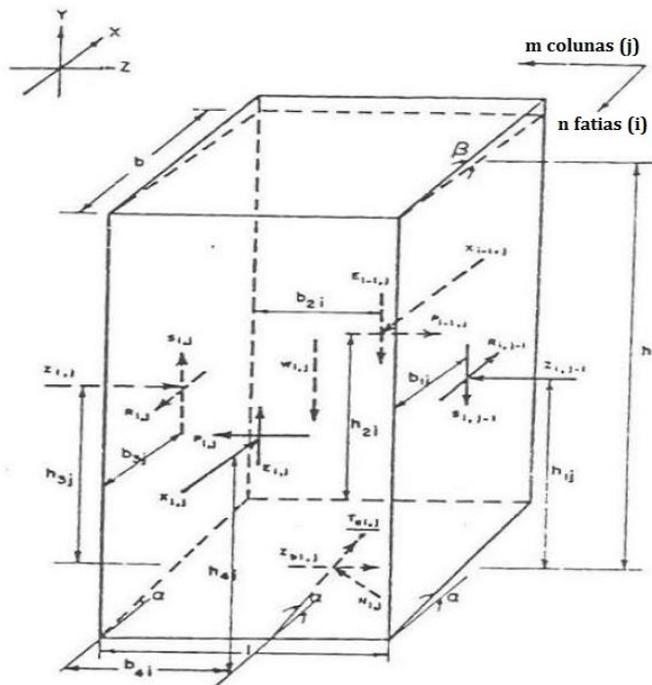


Fonte: Modificado de Chen e Chameau (1982)

Os principais pressupostos do método são (CHEN, 1981; CHEN e CHAMEAU, 1982):

- A massa de ruptura é simétrica e dividida em diversas colunas verticais, um diagrama de corpo livre de uma coluna é mostrado na Figura 2.32;
- A direção do movimento é ao longo do plano XY somente (nenhum movimento na direção Z), portanto, no instante de falha, as tensões de cisalhamento ao longo do plano YZ são assumidas como sendo zero;
- O comprimento e a largura da coluna são pequenos o suficiente para que se possa assumir que as forças laterais atuam ao longo da linha central vertical do lado considerado;
- As forças de cisalhamento entre colunas são consideradas paralelas à base da mesma e, também são consideradas como uma função de sua posição;
- Assume-se que as forças entre fatias possuem a mesma inclinação ao longo de cada seção (Z constante).

Figura 2.32 – Diagrama de forças para uma coluna pelo método de Chen (1981)



Fonte: Modificado de Chen (1981)

Com base nos pressupostos anteriores, o problema é estaticamente determinado e, portanto, para um fator de segurança calculado, o equilíbrio de forças e de momentos é satisfeito para cada coluna, bem como para a massa total.

2.2.3.4. Dennhardt e Forster (1985)

Em 1985, Dennhardt e Forster propõem um procedimento 3D de equilíbrio limite para estimar a estabilidade de taludes que é referido como o procedimento “*Whole-Failure-Body*” ou “Falha de Corpo Inteiro”. Eles assumem que as tensões de cisalhamento mobilizadas atuam na direção do vetor tangente à superfície de ruptura. Além disso, eles introduzem uma função trigonométrica para descrever a distribuição de tensões normais na superfície de ruptura em oposição a considerar a relação tensão-deformação dos solos.

Acredita-se que esses pressupostos sejam tão confiáveis quanto os feitos para forças entre fatias em qualquer procedimento de fatias. Além disso, Dennhardt e Forster (1985) mostram que o fator de segurança 3D é maior do que o fator de segurança 2D, utilizando o seu

método e, afirmam que seu procedimento é mais confiável do que os desenvolvidos por Baligh e Azzouz (1975) e Hovland (1977).

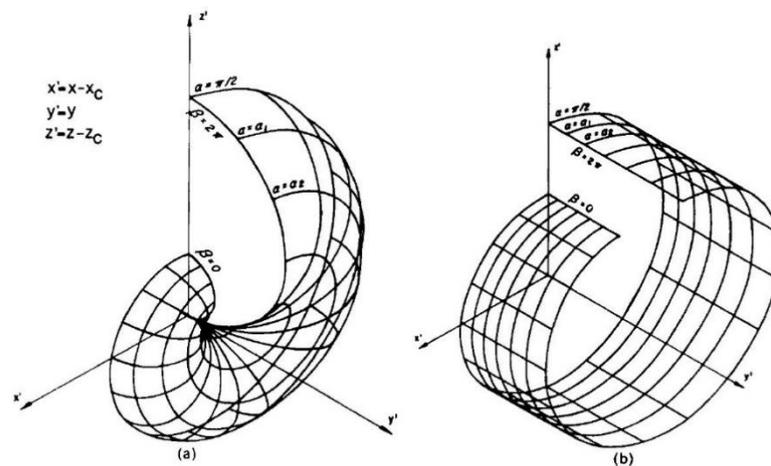
2.2.3.5. Leshchinsky et al. (1985); Leshchinsky e Baker (1986); Baker e Leshchinsky (1987); Leshchinsky e Mullet (1988); Leshchinsky e Huang (1992)

O procedimento de análise de estabilidade de taludes em três dimensões, desenvolvido por Leshchinsky et al. (1985), é uma abordagem matemática rigorosa baseada nas técnicas de equilíbrio limite e cálculo variacional. Eles descrevem o método proposto como uma "formulação variacional melhorada do problema de estabilidade de talude 3D introduzido por Kopacszy (1957)".

Os autores utilizam o método proposto para analisar casos hipotéticos de taludes simétricos e homogêneos, devido sua simplicidade, embora o mesmo possa ser utilizado para qualquer geometria da superfície de ruptura. Inicialmente existem três parâmetros desconhecidos nas equações de equilíbrio da massa deslizante: a superfície de deslizamento e a direção da tensão normal e da tensão de cisalhamento nessa superfície. A análise se concentra em determinar os parâmetros mencionados para que os mesmos atinjam o fator de segurança mínimo. As superfícies de deslizamento críticas e simétricas utilizadas por Leshchinsky et al. (1985) são representadas por extremos contidos na solução de uma equação diferencial parcial de primeira ordem desenvolvida pelos autores, na qual, sua solução depende dos três parâmetros mencionados e do fator de segurança. Sendo assim, o fator de segurança pode ser determinado por um processo iterativo, que satisfaça o equilíbrio restritivo.

Além disso, os autores mostram que para um ângulo de atrito interno constante (ψ) existem duas superfícies de deslizamento potenciais representando dois possíveis modos de ruptura. O primeiro modo é 3D (ou seja, superfície de ruptura limitada localmente) e é crítico quando existem condições de carregamento locais, o segundo é 2D (isto é, superfície de ruptura cilíndrica longa) e é crítico para condições de deformação plana (Figura 2.33).

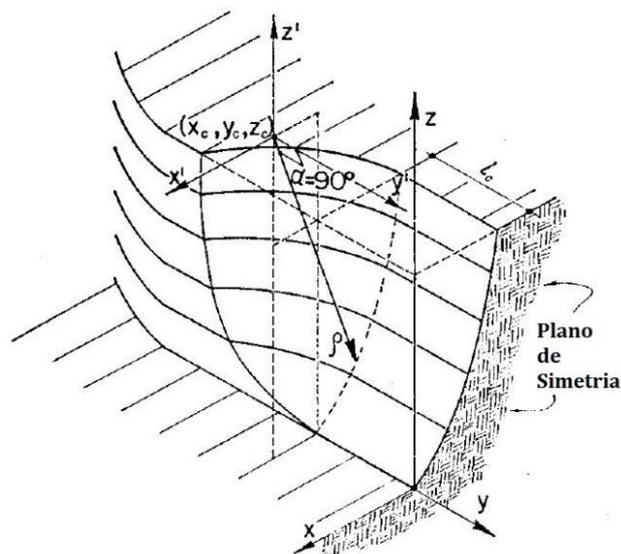
Figura 2.33 – Possíveis modos de ruptura: (a) superfície de ruptura limitada localmente (3D) e (b) superfície de ruptura cilíndrica longa (2D)



Fonte: Leshchinsky et al. (1985)

Leshchinsky e Baker (1986) modificam o procedimento de análise da estabilidade de talude 3D baseado no cálculo variacional limitando o alcance da análise a problemas simétricos (Figura 2.34). Eles analisam apenas metade de uma massa deslizante simétrica e homogênea, enquanto que no procedimento anterior, toda a massa deslizante era analisada. Além disso, a superfície de ruptura, consistindo de uma seção cilíndrica central e bordas esféricas, é analisada para investigar a importância dos efeitos de borda.

Figura 2.34 – Plano de simetria da superfície de ruptura



Fonte: Modificado de Leshchinsky, Baker e Silver (1986)

Baker e Leshchinsky (1987) desenvolveram o método 3D de Leshchinsky et al. (1985) para taludes simétricos, cônicos (pilhas) e homogêneos. Para simplificar o método, Baker e Leshchinsky (1987) ignoraram a poro-pressão. A forma da superfície de ruptura é definida como uma equação desconhecida que é determinada como parte do processo de solução do problema.

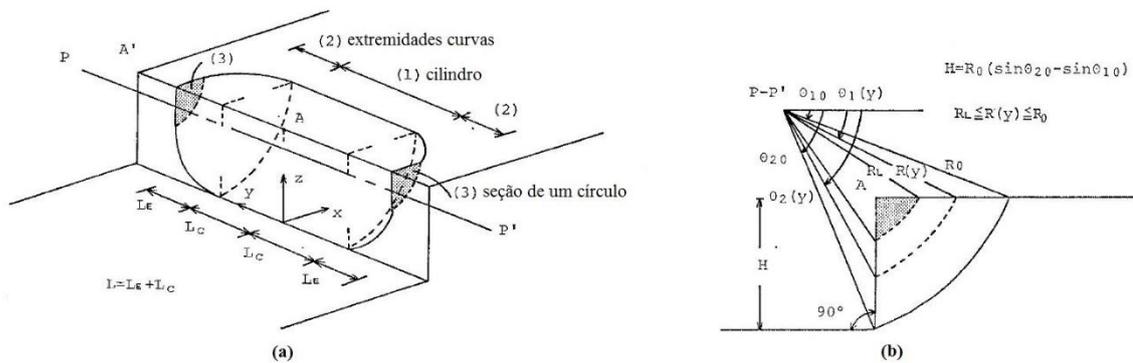
Leshchinsky e Mullett (1988) propuseram um método 3D para analisar a estabilidade de taludes verticais, homogêneos e simétricos com base no método de equilíbrio limite e na análise variacional. O método proposto considera cortes verticais nos quais, a forma assumida da superfície de ruptura é, essencialmente, uma extensão tridimensional da espiral logarítmica bidimensional. Além disso, tal método é capaz de calcular o fator de segurança 3D considerando a presença de poro-pressão, algo que não era possível nos métodos propostos anteriormente.

Leshchinsky e Huang (1992b) apresentam um procedimento de análise matematicamente rigoroso que é uma extensão do procedimento 2D desenvolvido por Leshchinsky e Huang (1992a) e que pode ser aplicado a qualquer massa de ruptura simétrica. As equações de equilíbrio global são explicitamente satisfeitas através de um "processo matemático em que a tensão normal sobre a superfície de deslizamento especificada é parte da solução", portanto, não são necessários pressupostos estáticos. Esse processo matemático, utilizado para determinar o fator de segurança, foi capaz de convergir em um fator de segurança ao resolver simultaneamente um certo número de equações lineares e três equações não-lineares em um processo iterativo.

2.2.3.6. Ugai (1985 e 1988)

Ugai (1985) propôs um método 3D para taludes coesivos, verticais e simétricos usando equações de equilíbrio de limite e cálculos variacionais. O autor emprega técnicas de equilíbrio limite 3D para provar que "a superfície de ruptura crítica de qualquer talude coesivo e com inclinação é a superfície de um corpo rotacional". Então, ele desenvolve seu procedimento de cálculo variacional para taludes coesivos verticais assumindo uma geometria da superfície de ruptura composta por uma seção cilíndrica central com extremidades curvas que terminam com uma seção de um círculo (Figura 2.35).

Figura 2.35 – Superfície de ruptura 3D para taludes verticais coesivos: (a) superfície de ruptura 3D e (b) seção vertical do talude



Fonte: Modificado de Ugai (1988)

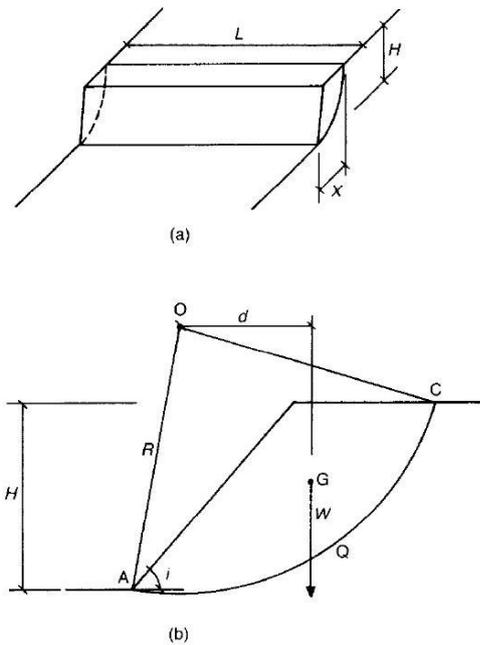
Em suas conclusões, Ugai (1985) afirma que o fator de segurança 3D é maior do que o fator de segurança 2D indicado por outros pesquisadores, todavia, o autor não nomeia nenhum em seu estudo. O autor afirma, também, que a superfície de ruptura consistindo de um cilindro com extremidades planas aproxima-se das superfícies críticas de ruptura 3D e do fator de segurança mínimo 3D para taludes verticais.

Ugai (1988) apresenta um procedimento de análise de estabilidade de taludes em 3D que estende o procedimento 2D de fatias de Fellenius (1936) para 3D. Nesse método, a massa de ruptura é considerada como uma seção cilíndrica central com extremidades elipsoidais e é dividida em colunas verticais. Este procedimento é aplicável a qualquer tipo de solo homogêneo e pressupõe que a resultante das forças entre colunas que atuam nas laterais de cada uma é paralela à base da coluna. O autor também estende os procedimentos 2D de Bishop simplificado (1955), Janbu simplificado (1956) e Spencer (1967) para 3D.

2.2.3.7. Gens et al. (1988)

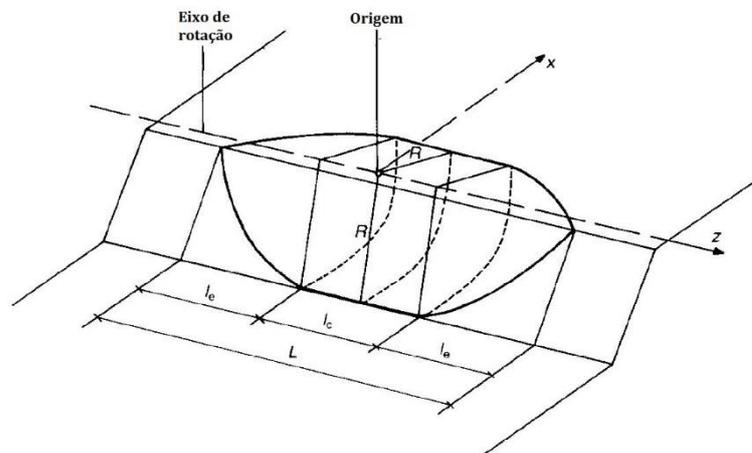
Gens et al. (1988) desenvolveram um procedimento de análise de estabilidade de taludes 3D com base no equilíbrio de momento que pode ser aplicado a taludes homogêneos, isotrópicos e puramente coesivos. A forma geral da superfície de deslizamento foi considerada semelhante ao estudo de Azzouz e Baligh (1987), no entanto, Gens et al. (1988) consideram uma forma combinada específica de superfície de deslizamento assumida como uma parte central cilíndrica anexada a extremidades planares (Figura 2.36) ou curvas (Figura 2.37).

Figura 2.36 – Geometria tridimensional da superfície de deslizamento com extremidades planares: (a) vista oblíqua e (b) vista em seção



Fonte: Gen et al. (1988)

Figura 2.37 – Geometria tridimensional da superfície de deslizamento com extremidades circulares



Fonte: Modificado de Gen et al. (1988)

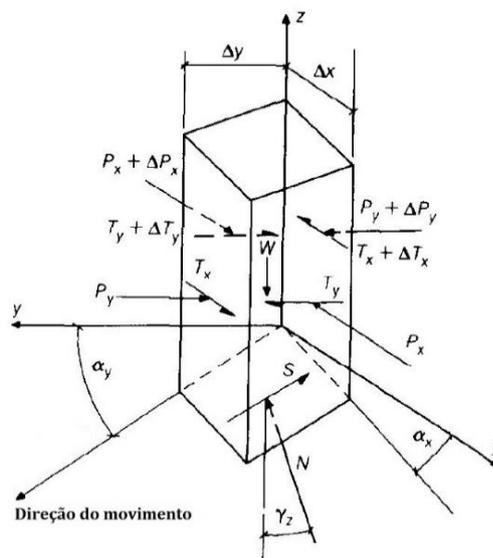
Os autores mostram que para tornar o processo de determinar o fator de segurança mínimo mais sistemático, é conveniente, ao invés de usar diferentes formas de superfície de ruptura, utilizar uma única família de curvas potenciais (hiperbólica, linha reta, exponencial, parabólica e elíptica) que representem as extremidades do talude. Gens et al. (1988) também mostram que as seções finais elipsoidais, ao contrário das seções finais hiperbólicas,

parabólicas, cônicas ou exponenciais, fornecem boas estimativas para o fator de segurança 3D na maioria dos casos práticos. Eles afirmam que a superfície de ruptura crítica 3D é menos profunda do que no caso 2D correspondente, e que existe um valor crítico do fator profundidade (proporção da profundidade vertical máxima de escorregamento e a altura do talude) para além da qual a superfície de ruptura crítica não irá penetrar. Além disso, concluem que o comprimento do escorregamento diminui com o aumento da inclinação do talude e o comprimento da ruptura aumenta com o aumento do fator de profundidade.

2.2.3.8. Hungr (1987); Hungr et al. (1989)

Hungr (1987) apresenta um procedimento de análise de estabilidade de taludes 3D baseado nos métodos de equilíbrio limite, que é uma extensão direta do método simplificado de Bishop (1955) para fatias. Esse procedimento envolve os mesmos pressupostos apresentados no procedimento simplificado de Bishop (1955): (a) as forças de cisalhamento verticais que atuam tanto nas faces verticais longitudinais como laterais de cada coluna podem ser negligenciadas na equação de equilíbrio (Figura 2.38) e; (b) a equação de equilíbrio de força vertical de cada coluna e a equação de equilíbrio de momento de todo o conjunto de colunas são suficientes para determinar todas as forças desconhecidas.

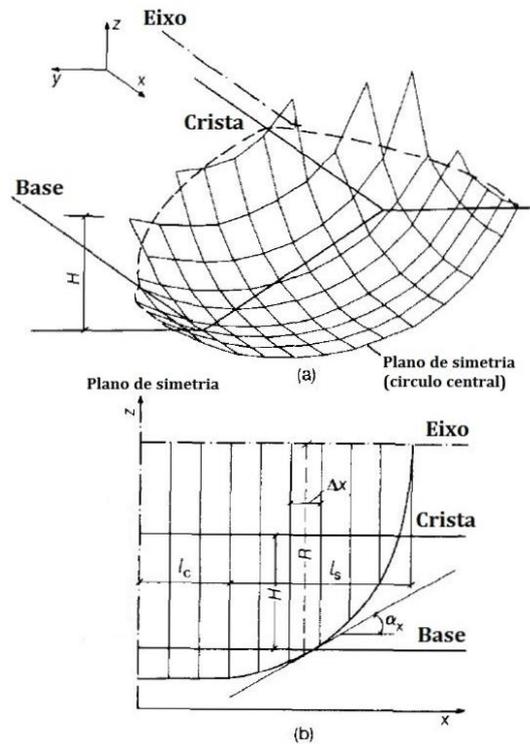
Figura 2.38 – Forças atuantes em uma coluna no método de Hungr (1987)



Fonte: Modificado de Hungr (1987)

O método proposto, que pode ser considerado como um procedimento de colunas, satisfaz o equilíbrio de forças verticais e o equilíbrio global de momentos. Nele, as forças normais entre colunas e as forças de cisalhamento horizontais não são negligenciadas, embora não sejam utilizadas na formulação da equação, o que é uma vantagem inerente ao método original simplificado de Bishop (1955) para fatias. Uma superfície rotacional com seção transversal circular foi assumida como a superfície de falha e a mesma é dividida em uma série de colunas dispostas em fileiras de largura uniforme (Figura 2.39).

Figura 2.39 – Método de Hungr (1987): (a) Geometria tridimensional da superfície de deslizamento e (b) seção vertical da superfície de deslizamento (plano XZ)

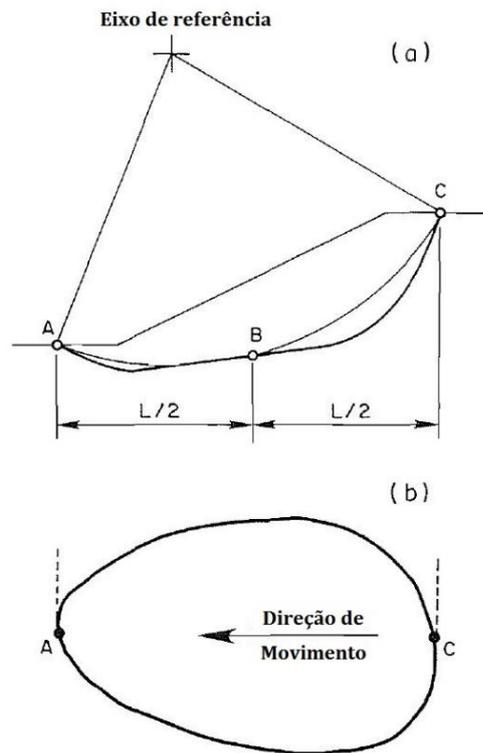


Fonte: Modificado de Hungr (1987)

Hungr et al. (1989) apresentam uma extensão 3D do procedimento simplificado de Bishop (1955) incluindo a modificação sugerida por Fredlund e Krahn (1977), tornando o procedimento simplificado de Bishop (1955) também aplicável às superfícies não circulares. Os autores indicam que, para uma superfície de ruptura circular, o eixo de referência é também o eixo de rotação. No entanto, para uma superfície de ruptura não circular, o fator de segurança dependerá da localização do eixo de referência, assim, eles recomendam o uso de um método semelhante ao sugerido por Fredlund e Krahn (1977) para a análise 2D, usando o eixo de

rotação dado pelo centro de um círculo ajustado ao perfil deslizante (Figura 2.40). Hungr et al. (1989) também derivam o fator de segurança na direção do deslizamento, o que é equivalente ao procedimento simplificado de Janbu et al. (1956) em 3D, sem considerar o fator de correção proposto.

Figura 2.40 – Método para a localização do eixo de referência: (a) vista em seção e (b) vista em planta



Fonte: Modificado de Hungr et al. (1989)

2.2.3.9. Seed et al. (1990)

Seed et al. (1990) desenvolvem dois procedimentos de estabilidade em 3D para análise de um talude no aterro de Kettleman Hills, Califórnia. O primeiro procedimento descrito é denominado "Análise de bloco múltiplo – Abordagem de equilíbrio de força" (*Multiple Block Analysis – Force-Equilibrium Approach*). Nesta análise, a massa de ruptura é dividida em cinco blocos com limites verticais entre si onde se avalia o potencial de deslizamento de toda a massa, o equilíbrio de força horizontal e vertical de cada bloco, bem como as tensões nos limites entre blocos. As forças são balanceadas tanto para o equilíbrio individual de cada bloco quanto para o equilíbrio de todo o sistema para, com isso, se determinar o fator de segurança de todo o

sistema de blocos atuando de forma única. Assume-se que as forças laterais que atuam nos limites dos blocos são horizontais, e apenas as forças normais atuam nos limites verticais entre blocos (isto é, não são aplicadas forças de cisalhamento nas laterais). Como as forças verticais entre blocos não possuem componentes verticais, o sistema pode então ser analisado considerando o equilíbrio vertical para cada um dos cinco blocos e o equilíbrio lateral geral do sistema total de cinco blocos na direção assumida de deslizamento.

A análise é realizada considerando-se, inicialmente, uma direção preferencial de movimento para o conjunto de blocos (considera-se que todos os blocos se movem na mesma direção). Em seguida, um fator de segurança inicial é assumido e se calcula as forças presentes nos blocos buscando-se a “convergência” do fator de segurança, convergência essa que é obtida para diferentes direções de deslizamentos e fatores de segurança obtendo-se, dessa forma, a direção crítica de deslizamento (menor fator de segurança).

O segundo procedimento de análise é referido como "Análise de blocos múltiplos que permite movimentos diferenciais da massa deslizante" (*Multiple Block Analyses Allowing for Differential Movements of Slide Mass*). Nesta análise, a massa de ruptura é dividida em onze blocos, também com limites verticais. Considera-se que cada bloco apresenta força motriz ativa, força de resistência passiva, que as forças entre fatias estão inclinadas em 20° com a horizontal e que uma pequena força de cisalhamento é necessária para transmitir a força de cisalhamento entre os blocos. Infelizmente a inclinação das forças laterais torna o problema indeterminado, uma vez que tal pressuposto afeta o fator de segurança calculado. Para contornar esse problema, os autores estipulam que uma tolerância, para efeitos não considerados no método anterior, pode ser de cerca de 5%. Assim, os resultados determinados pelo primeiro método podem ser adequadamente reduzidos por esse valor em uma avaliação, conforme os autores.

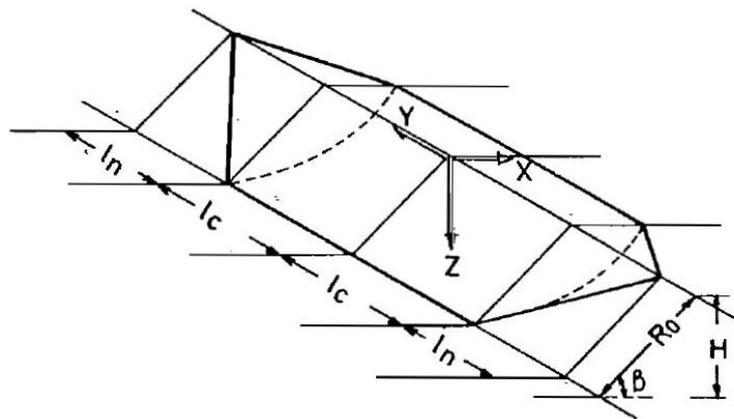
2.2.3.10. Cavounidis e Kalogeropoulos (1992)

Em 1992, Cavounidis e Kalogeropoulos propõem um método 3D para analisar cortes verticais em solos coesos que é uma extensão do método de Baligh e Azzouz (1975) e Azzouz e Baligh (1978). Diferente dos métodos usados como base, Cavounidis e Kalogeropoulos (1992) consideram uma variação linear para a resistência ao cisalhamento não drenado enquanto os

autores anteriores consideravam uma variação constante da mesma. Dessa forma, o método proposto é considerado como um método geral de análise e o método de Baligh e Azzouz (1975) e Azzouz e Baligh (1978) passa a ser visto como um caso particular do método geral proposto.

Para tal procedimento, uma superfície de ruptura cilíndrica central combinada com extremidades cônicas foi assumida e seu eixo de rotação foi definido na crista do talude (Figura 2.41). Os autores analisam três casos distintos para a resistência ao cisalhamento não drenado: (a) variação linear com um valor inicial para a resistência ao cisalhamento não drenado; (b) variação linear e resistência ao cisalhamento não drenado igual a zero na superfície e; (c) resistência ao cisalhamento não drenado constante (caso particular). A equação do fator de segurança foi estabelecida com base no equilíbrio de momentos, como a relação entre o momento de rotação do corpo deslizando e o momento de resistência das duas partes que compõem a superfície de ruptura considerada (cilindro e cone) em relação ao eixo de rotação.

Figura 2.41 – Geometria da superfície de ruptura considerada por Cavounidis e Kalogeropoulos (1992)



Fonte: Modificado de Cavounidis e Kalogeropoulos (1992)

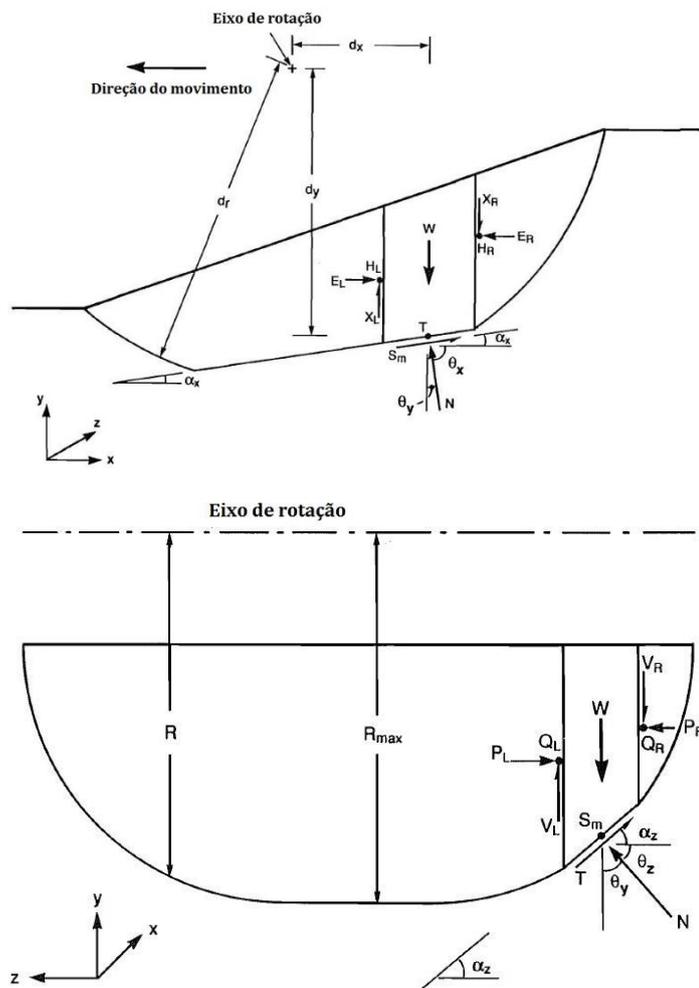
2.2.3.11. Lam e Fredlund (1993)

Lam e Fredlund (1993) apresentam um método 3D baseado no método 2D de Fredlund e Krahn (1977), também conhecido como método generalizado de fatias (*General Limit Equilibrium Method of Slice – GLE*), que satisfaz o equilíbrio de força para cada coluna, bem como o equilíbrio de momento geral. Esse procedimento assume uma superfície rotacional

com uma única direção de movimento como sendo a superfície de ruptura e, a massa de ruptura é dividida em colunas (Figura 2.42).

O fator de segurança é definido como o fator pelo qual os parâmetros de resistência ao cisalhamento devem ser reduzidos para levar a massa de solo a um estado de equilíbrio limite ao longo da superfície de ruptura selecionada. Considera-se que o fator de segurança para os componentes coesivos e friccionais são iguais e, Lam e Fredlund (1993) estipulam que o valor dos dois fatores de segurança, um relacionado ao equilíbrio de momentos (F_m) e outro relacionado ao equilíbrio de forças (F_f) devem ser iguais para satisfazer o equilíbrio total do sistema.

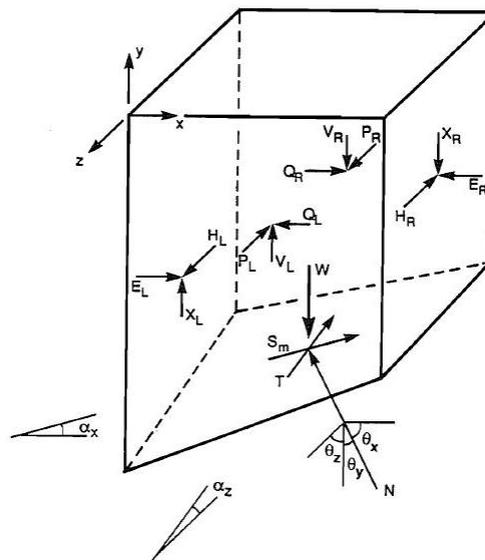
Figura 2.42 – Vista lateral e vista frontal da superfície de ruptura do método de Lam e Fredlund (1993)



Fonte: Modificado de Lam e Fredlund (1993)

Conforme Lam e Fredlund (1993), o método de colunas é indeterminado. Para uma massa de ruptura com n colunas na direção paralela ao deslizamento e m fileiras na direção perpendicular ao deslizamento, os autores mostram que o procedimento de colunas é indeterminado uma vez que, o número de incógnitas é $12 \times n \times m + 2$, enquanto o número de equações é $4 \times n \times m + 2$ (Figura 2.43).

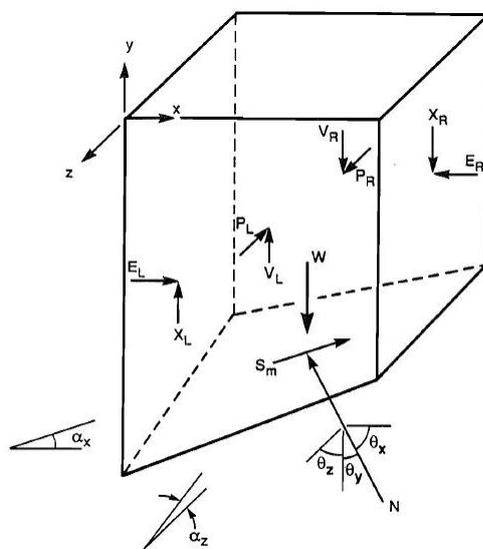
Figura 2.43 – Representação de uma coluna com as forças atuantes no método de Lam e Fredlund (1993)



Fonte: Lam e Fredlund (1993)

Dessa forma, os autores, afim de reduzir o grau de indeterminação do problema, fazem uso de dois pressupostos: (a) o ponto de aplicação da força normal N na base da coluna passa através de seu centro e; (b) todas as forças de cisalhamento entre colunas, que agem nas diversas faces de uma coluna, podem ser relacionadas com as suas respectivas forças normais através de funções próprias. Essas funções descrevem a variação da direção das resultantes das forças normal e cisalhante entre as colunas. As forças atuantes na coluna, após a consideração das hipóteses simplificadoras, estão representadas na Figura 2.44.

Figura 2.44 – Forças atuantes em uma coluna após as considerações das hipóteses simplificadoras do método de Lam e Fredlund (1993)

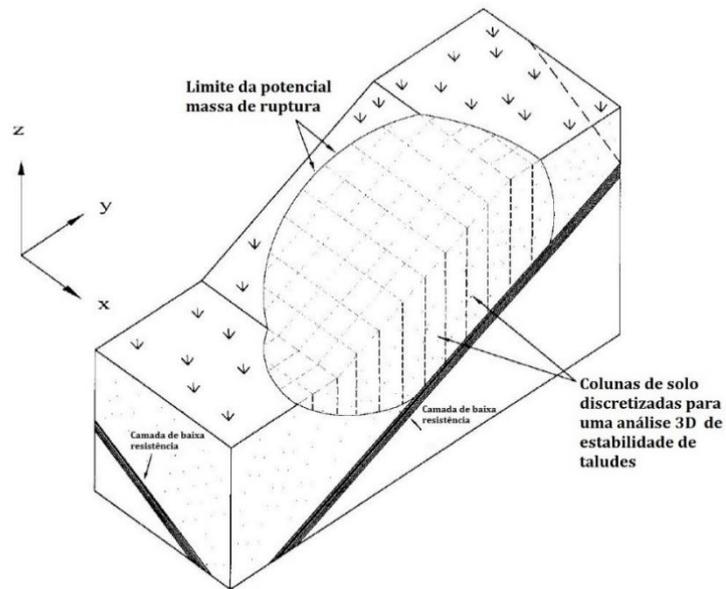


Fonte: Lam e Fredlund (1993)

2.2.3.12. Huang e Tsai (2000), Huang et al. (2002)

Huang e Tsai (2000) desenvolveram um método 3D que satisfaz o equilíbrio de momento em duas direções, isto é, transversal e paralela à direção de deslizamento e é capaz de calcular não apenas o fator de segurança, mas também a possível direção de escorregamento. Eles apontam que o uso de uma superfície de ruptura circular em estudos 3D pode, nem sempre, representar a correta geometria da superfície crítica de ruptura em taludes simétricos ou assimétricos. Dessa forma, assume-se uma superfície de ruptura rotacional semiesféricas ou parcialmente esférica, tornando-a assim, parte da análise e não mais um pressuposto. Essa superfície é discretizada em n colunas como mostrado na Figura 2.45 e, os dois componentes da força de cisalhamento necessários para resistir ao deslizamento são calculados usando o equilíbrio de momento em ambas as direções (transversal e paralela). Apenas o equilíbrio de forças verticais é considerado e as forças horizontais entre colunas são ignoradas.

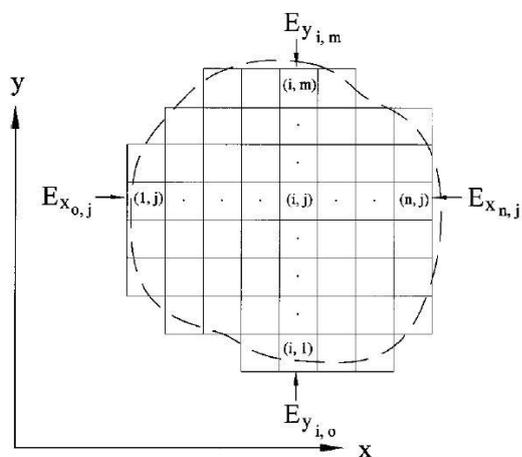
Figura 2.45 – Esquema 3D da potencial massa de ruptura com uma camada assimétrica de baixa resistência no limite inferior



Fonte: Modificado de Huang e Tsai (2000)

O procedimento de estabilidade de talude 3D generalizado de Huang et al. (2002) é uma extensão do método de Huang e Tsai (2000) para análise de estabilidade de taludes mais sofisticadas e voltadas para o uso em computadores. Para facilitar o uso prático do método de Huang e Tsai (2000), dois problemas deveriam ser resolvidos: (a) a aplicabilidade para superfície de ruptura não rotacionais e; (b) a validade das formulações de equilíbrio limite em um sistema de coordenadas 3D unificado. Dessa forma, tal método utiliza uma grade quadrada para discretizar a massa deslizante em colunas (Figura 2.46) e considera as formulações e pressupostos básicos quanto ao equilíbrio de forças e momentos do método generalizado de fatias (*General Limit Equilibrium Method of Slice – GLE*).

Figura 2.46 – Vista em planta da grade utilizada para discretizar a massa deslizante em colunas pelo método de Huang et al. (2002)



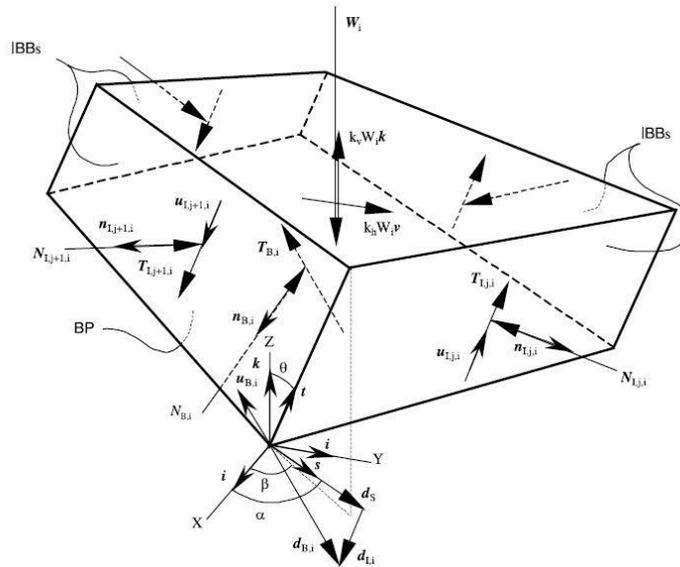
Fonte: Modificado de Huang et al. (2002)

Apesar do método de Huang et al. (2002) ser semelhante ao método generalizado de fatias, duas diferenças devem ser mencionadas: (a) a resultante das forças de cisalhamento horizontais entre colunas, de cada coluna, foi assumida como zero como uma suposição extra para diminuir o grau de indeterminação do problema e; (b) a direção da força de cisalhamento resultante na base das colunas foi considerada única e calculada a partir da relação entre o fator de segurança direcional, usando o método da secante.

2.2.3.13. Chang (2002)

Chang (2002) desenvolve um procedimento de análise 3D com base no mecanismo de deslizamento observado na ruptura do talude do aterro *Kettleman Hills*, em 1988, e em estudos de modelos associados. Usando o conceito de equilíbrio limite, o procedimento assume que a massa de ruptura é um sistema de blocos no qual os contatos entre os mesmos estão inclinados (Figura 2.47) e com linhas de interseção paralelas, o que permite uma análise cinemática da massa deslizante. Em consideração ao esforço diferencial entre os blocos, as tensões de cisalhamento na superfície de ruptura e os contatos entre blocos são calculados com base no grau de mobilização da força de cisalhamento nesses contatos. O fator de segurança global é calculado com base no equilíbrio de força individual dos blocos, bem como do sistema de blocos inteiro.

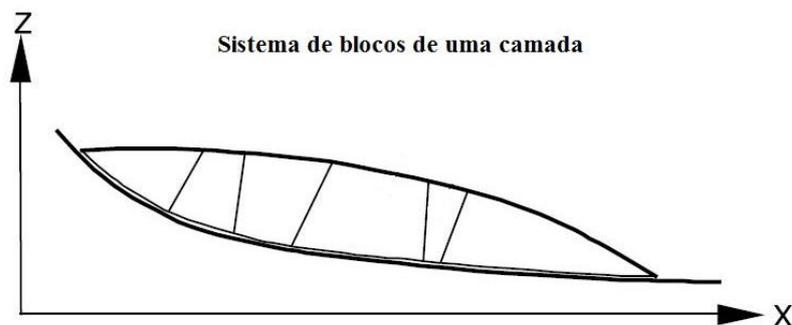
Figura 2.47 – Diagrama de corpo livre de um elemento 3D do método de Chang (2002)



Fonte: Chang (2002)

A massa deslizante é considerada como um sistema de bloco de uma camada, como mostrado na Figura 2.48. Cada bloco possui apenas um plano de base (porção da superfície de ruptura), mas o número de contatos entre blocos adjacentes para qualquer bloco é irrestrito. Os movimentos do sistema de blocos, bem como dos blocos individuais, são assumidos como translacionais. Assume-se que os contatos dos blocos permanecem fechados durante a ruptura e que os mesmos podem ser distorcidos numa zona limitada paralela aos contatos com outros blocos, para acomodar a geometria da superfície de deslizamento sem alterar seus volumes, isto é, uma distorção de volume constante.

Figura 2.48 – Sistema de blocos considerado no método de Chang (2002)



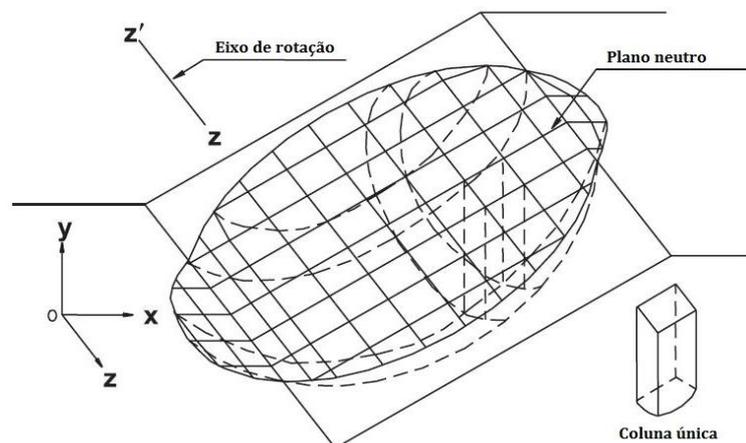
Fonte: Modificado de Chang (2002)

O fator de segurança é definido como um fator pelo qual os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito), devem ser divididos para que o talude entre em um estado de equilíbrio limite ao longo de uma superfície de deslizamento potencial.

2.2.3.14. Chen et al. (2003)

Chen et al. (2003) apresentaram um método 3D simplificado baseado nos pressupostos do método 2D de Spencer (1967). O tipo de movimento de massa assumido foi rotacional (Figura 2.49) e vários pressupostos foram utilizados para estabelecer os equilíbrios de força e momento.

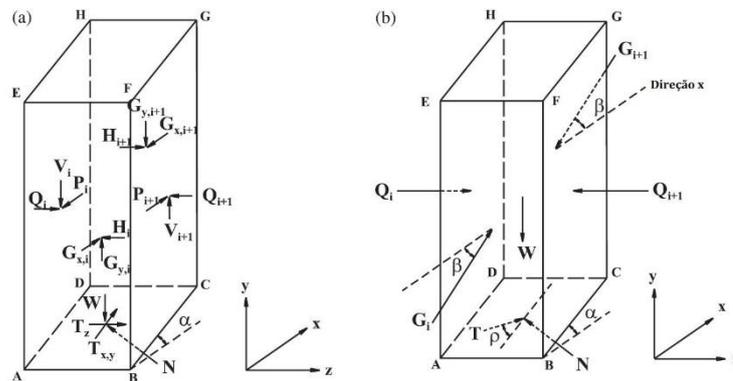
Figura 2.49 – Esquema mostrando o tipo de movimento assumido pelo método de Chen et al. (2003)



Fonte: Modificado de Chen et al. (2003)

Todas as forças de cisalhamento horizontais, seguindo o procedimento de Spencer (1967) e duas, das quatro forças verticais entre as colunas, conforme os procedimentos de Hungr et al. (1989) e Huang e Tsai (2000), foram ignoradas (Figura 2.50). A inclinação das forças resultantes entre colunas foi assumida como constante e, a direção da força de cisalhamento na base da coluna foi assumida igual e com um ângulo constante, mas desconhecido ou igual a um valor que foi calculado pelo produto da constante mencionada (inclinação das forças resultantes entre colunas) e um coeficiente de assimetria.

Figura 2.50 – Forças aplicadas em um prisma pelo método de Chen et al. (2003): (a) antes dos pressupostos serem utilizados e (b) após os pressupostos feitos para a força de cisalhamento no prisma



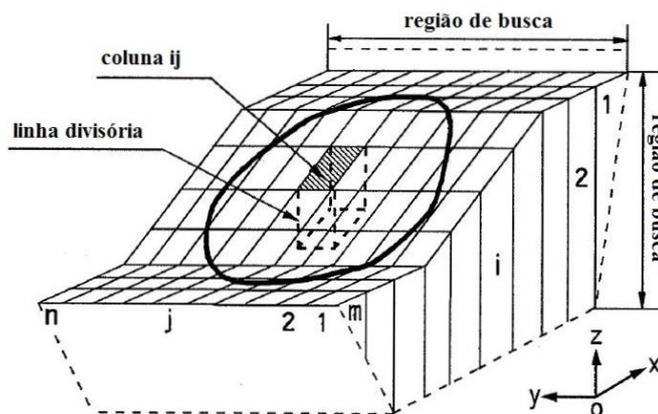
Fonte: Chen et al. (2003)

Para encontrar o fator de segurança 3D, foram utilizados o equilíbrio global de forças e momentos. Estes equilíbrios foram utilizados para estabelecer três equações de controle envolvendo três incógnitas como o fator de segurança, inclinação das resultantes das forças entre colunas e direção de deslizamento. Chen et al. (2003) determinaram essas incógnitas usando o método *Newton-Raphson*.

2.2.3.15. Yamagami e Jiang (1997); Jiang e Yamagami (2004)

Yamagami e Jiang (1997) propuseram o primeiro método 3D capaz de encontrar a direção de deslizamento em vez de usar um plano de simetria ou uma direção de deslizamento assumida. Este método é uma junção da extensão do método simplificado de Janbu (1956; 1973) que foi capaz de considerar, em sua análise, formas generalizadas de talude e superfície de ruptura; da abordagem de minimização para análises de estabilidade de taludes 3D, baseada em programação dinâmica e; do método de geração de números aleatórios. Em seu método, os autores consideram uma superfície de ruptura arbitrária em 3D. A massa de ruptura é dividida em colunas e a direção de deslizamento é assumida para o eixo xz, não possuindo movimento no eixo y (Figura 2.51). Dessa forma, e utilizando o equilíbrio de forças na horizontal e na vertical, Yamagami e Jiang (1997) estabelecem duas equações distintas para o fator de segurança.

Figura 2.51 – Modelo de ruptura 3D pelo método de Yamagami e Jiang (1997)



Fonte: Modificado de Yamagami e Jiang (1997)

Com base nas equações criadas, a massa de ruptura é dividida em seções verticais perpendiculares a direção de deslizamento assumida (*stage*) e, dentro de cada seção, curvas (*state*) são criadas considerando uma função que determina o fator de segurança para cada uma e, que engloba as duas equações distintas para o fator de segurança (horizontal e vertical). A superfície de ruptura, então, será determinada pela junção das curvas em cada seção que apresentarem o fator de segurança mínimo.

Em 2004, Jiang e Yamagami propuseram um método 3D que é uma extensão do método de Yamagami e Jiang (1997) mas que utiliza o método de Spencer (1967), ao invés do método simplificado de Janbu (1956; 1973), em sua análise. Jiang e Yamagami (2004) também estabeleceram duas equações diferentes para o fator de segurança, no entanto, uma é em relação ao equilíbrio de forças na horizontal e a outra é em relação ao equilíbrio de momento. Dessa forma, o fator de segurança é definido pela resolução simultânea dessas equações com diferentes valores de ângulo para as forças entre colunas. O ponto de interseção em um gráfico que correlaciona o fator de segurança obtido pelas duas equações e os ângulos considerados resulta no fator de segurança global.

2.2.3.16. Cheng e Yip (2007)

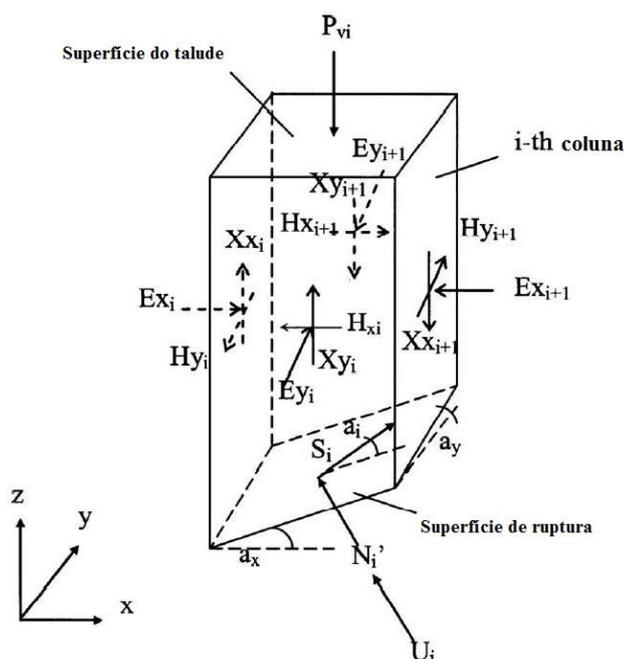
Cheng e Yip (2007) propuseram métodos 3D baseados nos métodos simplificado de Bishop (1955), simplificado de Janbu (1956; 1973) e Morgenstern e Price (1965). Um problema assimétrico em 3D é apresentado como uma extensão do método de Morgenstern e Price

(1965) e pode ser reduzido aos métodos simplificado de Bishop (1955) e simplificado de Janbu (1956; 1973) ao se considerar apenas equações de equilíbrio de forças e momentos, negligenciando-se todas as forças de cisalhamento entre colunas. Os pressupostos de cada método 3D seguiram as suposições correspondentes de sua origem 2D, mas a forma da superfície de deslizamento foi assumida como sendo esférica, para todos os métodos.

A massa de ruptura é dividida em colunas (Figura 2.52) e, conforme os autores, apesar de tais colunas se separarem entre si ao longo do processo de ruptura assumindo diferentes direções de deslizamento para diferentes colunas, espera-se que isso cause pouco efeito no valor do fator de segurança, permitindo que se considere apenas uma direção de deslizamento.

O processo de resolução do problema começa determinando-se a direção de deslizamento na qual os fatores de segurança, relacionados ao equilíbrio de forças e de momentos, será igual. Então, é determinado o fator de segurança resultante onde, por meio de um processo iterativo, o mesmo deve satisfazer o equilíbrio geral de momentos em cada direção. Esta iteração continua até alcançar um valor único de fator de segurança em todas as direções.

Figura 2.52 – Forças externas e internas que atuam sobre uma coluna de solo típica no método de Cheng e Yip (2007)



Fonte: Modificado de Cheng e Yip (2007)

2.2.3.17. Zheng (2009 e 2012)

Zheng (2009) apresentou um rigoroso método 3D que considera a superfície de ruptura como uma massa inteira ao invés de discretizá-la em colunas. Esse método assume que a superfície de ruptura possui uma forma geral com uma direção de deslizamento arbitrária e conhecida.

Por assumir a superfície de ruptura como uma massa inteira ao invés de colunas individuais, uma equação de integração de forma vetorial é derivada de todas as seis condições de equilíbrio (força e momentos), cujas incógnitas consistem no fator de segurança e na tensão normal total na superfície de ruptura. Uma aproximação para a tensão normal é determinada com base em um vetor a formado por cinco incógnitas. Substituindo essa aproximação na equação de integração de forma vetorial criada, obtém-se um sistema de equações não lineares com relação ao fator de segurança e ao vetor a . Por fim, o sistema criado é resolvido como um problema de autovalor para encontrar o valor correspondente ao fator de segurança, bem como do vetor a . Zheng (2009) afirma que um fator de segurança positivo existe em seu sistema de equações não lineares para uma direção de deslizamento corretamente selecionada e que sob condições não drenadas, a solução é única ($F > 0$) e o fator de segurança tem uma expressão explícita.

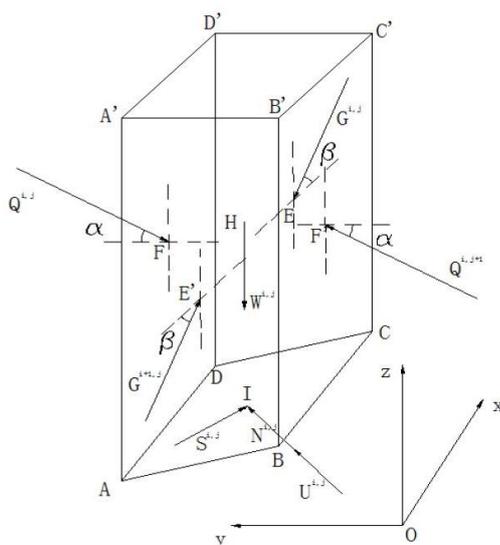
Zheng (2012) diz que o método proposto por Zheng (2009) também pode ser considerado como o aprimoramento do método de Fellenius e que tal método não é capaz de acomodar superfícies de ruptura de forma complexa. Assim, Zheng (2012) apresenta um método que tem por objetivo melhorar a precisão e a robustez do método 3D rigoroso (que satisfaz todas as condições de equilíbrio) no tratamento de superfícies de ruptura de forma complexa, introduzindo as suposições do método de Morgenstern e Price 2D (consideradas nas forças internas, para dar uma melhor aproximação a tensão normal total na superfície de ruptura), devido à sua flexibilidade e habilidade para tratar superfícies de ruptura de qualquer forma e, mantendo alguns pressupostos de Zheng (2009).

2.2.3.18. Zhou e Cheng (2013)

Zhou e Cheng (2013) apresentam um método rigoroso de coluna utilizando as técnicas de equilíbrio limite, no qual, as forças entre colunas são levadas em conta considerando seis condições de equilíbrio (três condições de equilíbrio de forças e três de momentos). Conforme os autores, o método assume que a inclinação das forças entre colunas não é constante, diferentemente do método de Spencer (1967) e, o valor do fator de segurança é obtido usando o método dos mínimos quadrados de *Levenberg-Marquardt*. Além disso, o presente método pode ser aplicado para procurar automaticamente as superfícies de ruptura tridimensionais e determinar o fator de segurança da conhecida superfície de ruptura de forma arbitrária.

Os métodos de coluna são indeterminados, uma vez que o número de incógnitas é muito superior ao número de equações. Portanto, é necessário fazer algumas suposições sobre as forças entre colunas para tornar o problema determinado. Dessa forma, os autores dizem que: (a) a base da coluna é plana e que as forças normais, de cisalhamento e poro-pressão atuam no centro da mesma; (b) o peso da coluna atua no centroide da mesma, que por sua vez aponta para o centro da base; (c) as forças entre colunas são paralelas aos planos yz e xz; (d) a direção de movimento ou a possibilidade de mudança dessa direção é oposta ao eixo x; (e) não existe suporte para o talude e; (f) a resistência a tração do solo é zero (Figura 2.53).

Figura 2.53 – Esquema de forças atuando em uma coluna pelo método de Zhou e Cheng (2013)



Fonte: Zhou e Cheng (2013)

A Tabela 2-4 apresenta um resumo dos procedimentos de análise de estabilidade de taludes em três dimensões.

Tabela 2-4 – Resumo dos procedimentos em 3D de equilíbrio limite (continua)

Método	Base teórica	Superfície de ruptura	Condições de equilíbrio satisfeitas	F3D > F2D
Baligh e Azzouz (1975); Azzouz e Baligh (1978)	Arco circular	Simple	Equilíbrio de momentos	F3D>F2D (se razão l_c/H maior que quatro: F3D \approx F2D)
Hovland (1977)	Método comum de fatias	Simétrica	Equilíbrio de momentos	F3D>F2D (geralmente para solos coesivos, mas pode ser inferior para solos não coesivos)
Chen (1981); Chen e Chameau (1982)	Método de Spencer	Simétrica	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos	F3D>F2D (geralmente para solos coesivos, mas pode ser inferior para solos não coesivos)
Dennhardt e Forster (1985)	Equilíbrio Limite (Massa inteira)	Simétrica	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos	F3D>F2D
Leshchinsky et al. (1985) * ¹ ; Leshchinsky e Baker (1986) * ² ; Baker e Leshchinsky (1987) * ³ ; Leshchinsky e Mullet (1988) * ⁴ ; Leshchinsky e Huang (1992) * ⁵	Equilíbrio Limite e análise variacional	Simétrica * ¹ * ² * ⁵ Pilhas Cônicas * ³ Cortes verticais * ⁴	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos	F3D>F2D
Ugai (1985) * ¹ ; Ugai (1988) * ²	Equilíbrio Limite e análise variacional * ¹ Método comum de fatias simplificado de Bishop, Janbu simplificado e Spencer * ²	Cortes verticais * ¹ Simétrica * ²	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos	F3D>F2D * ¹ * ² F3D>F2D para o método comum de fatias * ²

Resumo dos procedimentos em 3D de equilíbrio limite (continuação)

Hungr (1987) * ¹ ; Hungr et al. (1989) * ²	Método simplificado de Bishop * ¹ * ² Método de Janbu simplificado * ²	Simétrica	Equilíbrio de forças na vertical Equilíbrio de momentos	F3D>F2D
Gens et al. (1988)	<i>Swedish Circle</i>	Simples	Equilíbrio de momentos	F3D>F2D
Seed et al. (1990) – Análise de bloco múltiplo – Abordagem de equilíbrio de força (<i>Multiple Block Analysis – Force-Equilibrium Approach</i>)	Análise de bloco múltiplo e abordagem de equilíbrio de força	Geral	Equilíbrio de forças	F3D>F2D
Seed et al. (1990) – Análise de blocos múltiplos que permite movimentos diferenciais da massa deslizante (<i>Multiple Block Analyses Allowing for Differential Movements of Slide Mass</i>)	Análise de blocos múltiplos que permite movimentos diferenciais da massa deslizante	Geral	Nenhum	F3D>F2D
Cavounidis e Kalogeropoulos (1992)	Extensão dos métodos de Baligh e Azzouz (1975) e Azzouz e Baligh (1978)	Cortes verticais	Equilíbrio de momentos	F3D>F2D
Lam e Fredlund (1993)	Método generalizado de fatias	Geral	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos	F3D>F2D
Yamagami e Jiang (1997) * ¹ ; Jiang e Yamagami (2004) * ²	Método simplificado de Janbu * ¹ Método de Spencer * ²	Geral * ¹ Simétrica * ²	Equilíbrio de forças * ¹ Equilíbrio de forças na horizontal * ² Equilíbrio de momentos * ²	-

Resumo dos procedimentos em 3D de equilíbrio limite (conclusão)

Huang e Tsai (2000) * ¹ ; Huang et al. (2002) * ²	Equilíbrio Limite * ¹	Complexa * ¹ Geral * ²	Equilíbrio de forças na vertical * ¹	F3D>F2D
	Método simplificado de Janbu * ²		Equilíbrio de forças * ² Equilíbrio de momentos * ¹ * ²	
Chang (2002)	Equilíbrio Limite	Simétrica	Equilíbrio de forças	F3D>F2D
Chen et al. (2003)	Método de Spencer	Geral	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos	F3D>F2D
Cheng e Yip (2007)	Métodos simplificado de Bishop, simplificado de Janbu e Morgenstern e Price	Geral	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos	F3D>F2D
Zheng (2009) * ¹ ; Zheng (2012) * ²	Método comum de fatias * ¹ Método de Morgenstern e Price * ²	Geral	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos	-
Zhou e Cheng (2013)	Equilíbrio Limite	Geral	Equilíbrio de forças Equilíbrio de momentos	-

2.3. ANÁLISE NUMÉRICA

A complexidade de muitos sistemas geomecânicos necessita a utilização de métodos de análise numérica como os métodos dos elementos finitos, diferenças finitas e elementos distintos ou discretos. Com o avanço da tecnologia, vem se popularizando, cada vez mais, o uso de computadores e softwares de última geração, tornando, assim, o uso de métodos numéricos uma ferramenta poderosa de design e análise para estudos de estabilidade de taludes, permitindo a criação de modelos complexos, não possíveis com os métodos tradicionais de equilíbrio limite.

Como todos os taludes em rocha envolvem a presença de descontinuidades, a criação de modelos representativos do sistema em estudo é necessária para que, com precisão, possamos realizar um estudo de estabilidade. A representação de tais descontinuidades em um modelo numérico dependerá do tipo de modelo considerado. Wyllie e Mah (2005) dividem os métodos numéricos em dois tipos: contínuos (rocha intacta) e descontínuos (descontinuidades pré-existent), conforme apresentado e descrito anteriormente, no item 2.1 do presente capítulo.

Os modelos contínuos assumem que o material (maciço rochoso) é totalmente constante (sem a presença de estruturas) e, as descontinuidades são analisadas somente em casos especiais (buscando representar um maciço rochoso de forma mais realista), introduzindo uma interface entre os corpos. Por outro lado, os modelos descontínuos representam as descontinuidades explicitamente. Elas são inseridas conforme sua orientação e localização dentro do talude e visam mostrar o comportamento e a influência que apresentam na estabilidade do talude.

Os modelos contínuos estão associados aos métodos dos elementos finitos, diferenças finitas e elementos de contorno. Por outro lado, os modelos descontínuos são associados ao método dos elementos distintos ou discretos. Tais métodos são apresentados e descritos nos itens a seguir.

2.3.1. Análise de estabilidade em 2D e 3D

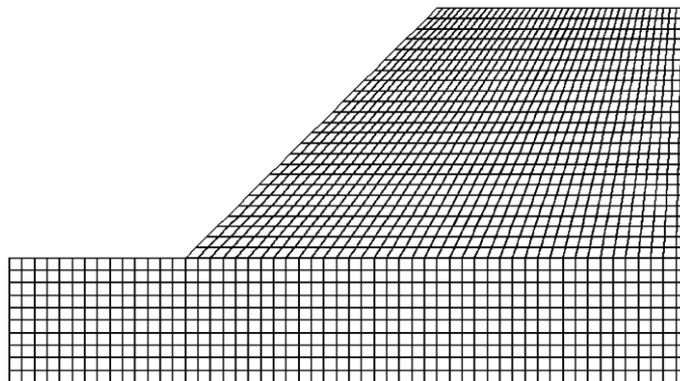
Diferentemente dos métodos de equilíbrio limite, mencionados anteriormente, no item 2.2 desta dissertação, os quais apresentavam formulações diferentes para os modelos em duas dimensões e três dimensões, os métodos que utilizam análise numérica não apresentam diferenças significativas que justifiquem a criação de tópicos separados para a descrição dos métodos em 2D e 3D. Os métodos em três dimensões costumam ser extensões dos métodos convencionais em duas dimensões e, assim, há existência de uma malha poligonal (de superfície) em modelos 2D e uma malha poliédrica (de volume) em modelos 3D pode ser apontada como a maior diferença entre os modelos 2D e 3D.

2.3.1.1. Modelos contínuos – Diferenças finitas

O método das diferenças finitas é, talvez, o método numérico mais antigo utilizado para resolver um conjunto de equações diferenciais (HUSTRULID et al., 2009). De forma simplificada, podemos dizer que o método consiste na substituição de todas as derivadas, na equação diferencial que governa o fenômeno em estudo, por uma equação algébrica que relaciona valores de variáveis de campo (por exemplo, tensão ou deslocamento) com pontos discretos no espaço. Os materiais são representados por elementos em um grid bidimensional (Figura 2.54) ou tridimensional (Figura 2.55), formando uma malha, ajustada pelo usuário, para melhor adequar à forma do objeto a ser modelado.

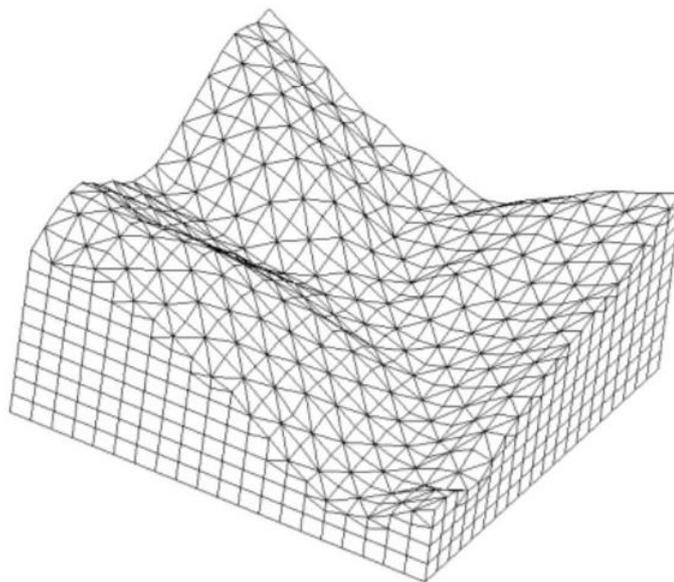
Cada elemento se comporta de acordo com as leis de tensão-deformação, linear ou não linear, prescritas em resposta às forças aplicadas ou condições de contorno. Se as tensões forem suficientemente elevadas para fazer com que o material ceda e flua, os elementos do grid deformam-se e movem-se conforme o material que é representado.

Figura 2.54 – Seção 2D de um modelo discretizado pelo método das diferenças finitas



Fonte: Modificado de Soren et al. (2014)

Figura 2.55 – Modelo 3D discretizado pelo método das diferenças finitas



Fonte: Modificado de Site ITASCA Consulting Group, Inc. (2016)¹

Conforme Sinha (1989), o método das diferenças finitas está relacionado à abordagem explícita. Essa abordagem se baseia na ideia de uma etapa, em um espaço de tempo tão pequeno que, uma perturbação em um ponto da malha, é experimentada apenas pelos seus vizinhos imediatos, implicando no fato de que, o tempo dessa etapa é menor que o tempo que a perturbação leva para se propagar entre dois pontos adjacentes.

A solução separada para pontos individuais na malha torna desnecessário a criação de matrizes para o cálculo. Para cada etapa, mencionada anteriormente, uma solução individual é obtida para cada ponto da malha e o ciclo de cálculo para obtenção da solução envolve as leis de Newton do movimento e a lei constitutiva do material *in situ*. A aceleração obtida para um ponto da malha é integrada para produzir a velocidade do ponto em consideração na malha, que por sua vez é usada para determinar a alteração na deformação da malha. Subsequentemente, as deformações determinam os correspondentes incrementos de tensão que, por sua vez, geram forças nos pontos vizinhos da malha. Estes são somados para determinar a força resultante do equilíbrio que se relaciona com a aceleração que iniciou o ciclo de cálculo².

¹ Disponível em: <<http://www.itascacg.com/software>>. Acesso em: 19 out. 2016.

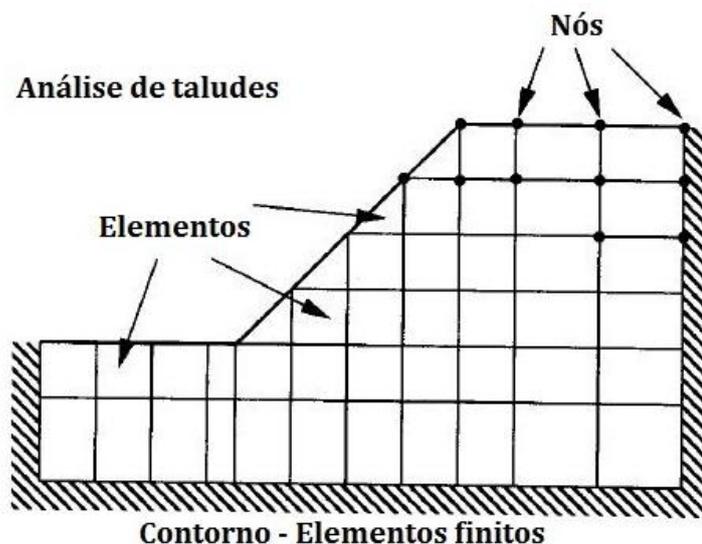
² SINHA, R.S. *Underground Structures: Design and Instrumentation*. Amsterdam, NED: Elsevier Science Publishing Company Inc., 1989. 480 p.

Inicialmente concebido como uma abordagem de computação dinâmica, isto é, relacionada ao tempo, o método das diferenças finitas pode ser usado para resolver problemas estáticos pelo amortecimento da solução dinâmica. Dessa forma, a “etapa”, mencionada anteriormente, não se refere a uma fase física, mas sim a uma fase da solução do problema (tempo) e, as velocidades analisadas referem-se ao deslocamento em comprimento por intervalo de tempo³.

2.3.1.2. Modelos contínuos – Elementos finitos

O método dos elementos finitos vem expandindo o seu uso na engenharia nos últimos 50 anos e teve o seu desenvolvimento motivado pelas dificuldades que o método da diferença finitas apresentava ao lidar com modelos complexos. Trata-se de uma técnica para resolver equações diferenciais parciais discretizando, primeiramente, essas equações, em suas dimensões espaciais. Esse processo é realizado localmente sobre pequenas regiões com forma definida e finita (elementos), o que dá nome ao método. Isto resulta em equações matriciais relacionando os dados de entrada em pontos específicos nos elementos (nós) com os dados de saída nesses mesmos pontos (Figura 2.56) (SMITH; GRIFFITHS, 1988).

Figura 2.56 – Definição dos termos do método dos elementos finitos



Fonte: Modificado de Abramson et al. (2002)

³ SINHA, op. cit.

Ao contrário do método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos está relacionado a abordagem implícita. Ela é baseada no conceito de resolver valores desconhecidos em todos os pontos ao mesmo tempo. A análise é realizada através da resolução da matriz de equações que modela a malha discretizada. Isto é, um sistema de equações é estabelecido relacionando incógnitas com valores conhecidos através de uma matriz de rigidez global. Por exemplo, a relação das forças nodais com os deslocamentos é analisada desta forma através da malha de elementos finitos (SINHA, 1989).

Existem diversas técnicas para a determinação do fator de segurança, tanto para o método citado anteriormente (diferenças finitas), quanto para o método dos elementos finitos. As técnicas mais conhecidas são a do aumento da gravidade (SWAN; SEO, 1999) e aquela que simula o colapso do talude pela redução progressiva dos parâmetros de resistência (*Strenght Reduction Factor - SRF*) (MATSUI; SAN, 1992). Na primeira, as forças gravitacionais são aumentadas gradativamente até que ocorra a ruptura do talude (g_f) então, o fator de segurança é definido como a relação entre a aceleração gravitacional na ruptura (g_f) e a aceleração gravitacional real (g). Na segunda técnica, mais amplamente utilizada, a redução dos parâmetros é feita pelas equações 10 e 11, abaixo:

$$c^* = \frac{C}{M} \quad 10$$

$$\tan^* \phi = \frac{\tan \phi}{M} \quad 11$$

Onde M é o parâmetro adotado para redução dos valores de c e $\tan \phi$ nas sucessivas análises pelo método, até a ruptura do talude, quando $M = FS$ (fator de segurança).

2.3.1.3. Modelos contínuos – Elementos de contorno

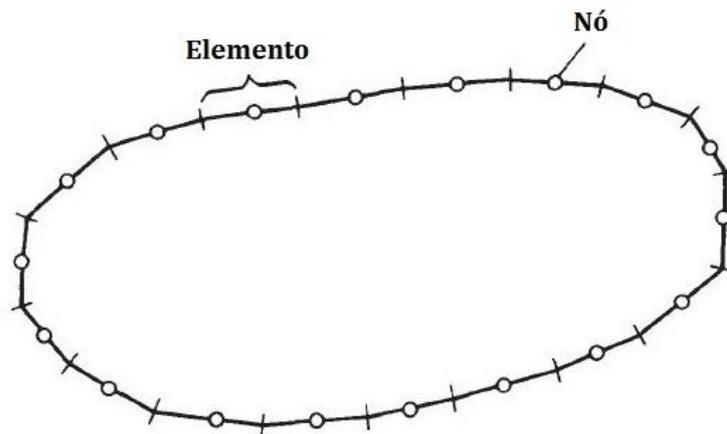
Nesse método, a menos que seja necessário modelar alguma singularidade do maciço, a discretização do modelo se faz necessária apenas para o contorno do mesmo, sendo o restante do maciço tratado como um modelo contínuo. Os cálculos ficam limitados ao contorno do modelo e o interior deste é tipicamente descrito e simulado por equações diferenciais

parciais e, estas equações são, na maioria das vezes, lineares e representam formulações aproximadas das condições reais (SINHA, 1989).

Conforme Brebbia et al. (1984), existem dois tipos diferentes de formulações para o método dos elementos de contorno: os métodos indiretos e diretos. No método indireto, primeiro resolve-se o problema para as incógnitas que satisfazem as condições específicas de contorno e, depois, se resolve o restante dos parâmetros de contorno em termos dessas soluções. Como os parâmetros de contorno não especificados são obtidos indiretamente, esse procedimento recebe o nome de método indireto dos elementos de contorno. Por outro lado, no método direto, alguns teoremas fundamentais de integração são utilizados para eliminar o passo intermediário criando, dessa forma, um sistema de equações algébricas relacionando os parâmetros de contorno desconhecidos diretamente com os parâmetros conhecidos em cada elemento do contorno, sendo assim, esse procedimento é conhecido como método direto dos elementos de contorno.

Como simplificação, para facilitar a visualização dos termos relacionados a criação de um modelo pelo método dos elementos de contorno, a Figura 2.57 mostra o contorno de uma figura dividida em uma série de segmentos ou elementos e, em seu centro, nós, onde os valores desconhecidos (incógnitas) são considerados.

Figura 2.57 – Definição dos termos do método dos elementos de contorno



Fonte: Modificado de Brebbia et al. (1984)

Caso seja necessário analisar descontinuidades no interior do modelo, deve-se introduzir “contornos internos”. Tais contornos modelam as interfaces entre diferentes tipos

de materiais ou descontinuidades. O método que envolve a análise de elementos de contorno internos é conhecido como “Método do deslocamento de descontinuidades” e representa um típico específico do método indireto dos elementos de contorno (SINHA, 1989).

A Tabela 2-5, abaixo, apresenta um resumo dos métodos de análise numérica que trabalham com modelos contínuos.

Tabela 2-5 – Resumo dos procedimentos de análise numérica – modelos contínuos

Modelo	Método	Premissas
Contínuo	Diferenças finitas	Substituição de todas as derivadas, na equação diferencial que governa o fenômeno em estudo, por uma equação algébrica que relaciona valores de variáveis de campo com pontos discretos no espaço
		Materiais representados por elementos em um grid bidimensional ou tridimensional
	Elementos finitos	Cada elemento se comporta de acordo com as leis de tensão-deformação, linear ou não linear, prescritas em resposta às forças aplicadas ou condições de contorno
		Técnica para resolver equações diferenciais parciais discretizando, primeiramente, essas equações, em suas dimensões espaciais
		Processo realizado localmente sobre pequenas regiões com forma definida e finita (elementos). Isto resulta em equações matriciais relacionando os dados de entrada em pontos específicos nos elementos (nós) com os dados de saída nesses mesmos pontos
		Discretização do modelo se faz necessária apenas para o contorno do mesmo – restante do maciço tratado como um modelo contínuo
	Elementos de contorno	Dois tipos diferentes de formulações: métodos indiretos (primeiro resolve-se o problema para as incógnitas que satisfazem as condições específicas de contorno e, depois, se resolve o restante dos parâmetros de contorno em termos dessas soluções) e diretos (alguns teoremas fundamentais de integração são utilizados para eliminar o passo intermediário criando um sistema de equações algébricas relacionando os parâmetros de contorno desconhecidos diretamente com os parâmetros conhecidos em cada elemento do contorno)

2.3.1.4. Modelos descontínuos – Elementos discretos

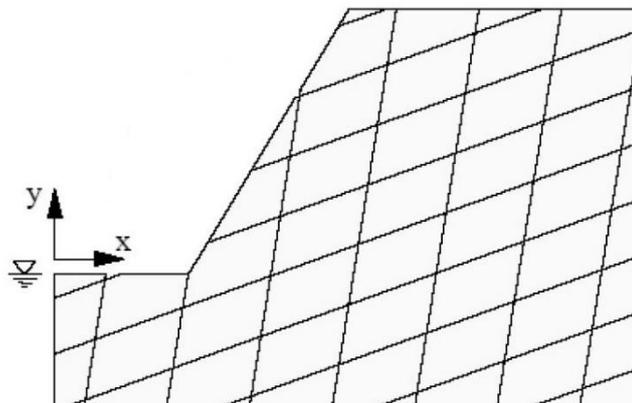
Apesar dos modelos contínuos serem extremamente úteis, é de suma importância reconhecermos suas limitações e suas possibilidades de aplicação. Em um maciço rochoso, por exemplo, que apresenta inúmeras descontinuidades, as quais controlam o mecanismo de ruptura, um modelo descontínuo é mais representativo.

Ao contrário dos métodos mencionados anteriormente, nesse, o maciço não é modelado de forma contínua e sim por meio de um conjunto de blocos, rígidos ou deformáveis, divididos por fraturas contínuas, tratadas como condições de contorno entre os blocos (HERRERO, 2015). Esse método é aplicável quando a ruptura do talude é governada pelo movimento ao longo das descontinuidades (entre os blocos) e não na parte interna dos blocos.

Conforme Pinto (2011), a formulação estabelecida para a utilização do método dos elementos discretos adota uma série de hipóteses que permitem simplificar o problema real, descartando os aspectos menos significativos e permitindo estabelecer um modelo físico e matemático do problema em estudo. As hipóteses que são estabelecidas são as seguintes:

1. As partículas são consideradas corpos rígidos;
2. Nas uniões entre partículas considera-se a existência de contatos entre as mesmas e, tal contato ocorre em um ponto ou área muito pequena;
3. No contato entre partículas existe uma tolerância de penetração. A magnitude desta é relacionada com a força de contato através da Lei Força-Deslocamento e é muito pequena em relação ao tamanho das partículas;
4. Todas as partículas são circulares. Em 2D são utilizados cilindros e em 3D esferas;
5. A geração de um meio empregando elementos discretos deve ser aleatória e os diâmetros dos mesmos devem ser tratados de forma similar (posição e diâmetro dos elementos distintos são aleatórios).

Figura 2.58 – Seção 2D de um modelo discretizado pelo método dos elementos discretos



Fonte: Modificado de Site ITASCA Consulting Group, Inc. (2016)⁴

O cálculo nesse método considera a equação de equilíbrio dinâmico para cada bloco no sistema. Essa é então formulada e, repetidamente, resolvida até que as condições de contorno e as leis de contato e movimento, entre os blocos, sejam satisfeitas. Assim, o método explica fenômenos complexos de interação não-linear entre blocos.

O método dos elementos discretos, descrito neste item, apresenta algumas variações, com algumas alterações entre si. Entre essas variações, podemos citar:

- a. **Método dos elementos distintos:** desenvolvido por Cundall (1971), esse método incorpora alguns aspectos do método das diferenças finitas. Foi o primeiro procedimento a tratar as discontinuidades do maciço rochoso como um conjunto de blocos semirrígidos (posteriormente, blocos deformáveis), interagindo ao longo de discontinuidades com rigidez definida dando, assim, a esse método, uma natureza dupla (representa o comportamento de dois tipos de materiais diferentes: discontinuidades e maciço);
- b. **DDA (*Discontinuous Deformation Analysis*):** desenvolvido por Shi (1989), é similar ao método dos elementos finitos para a resolução de problemas de tensão-deformação, mas considera a interação de blocos independentes (como a malha de elementos finitos do método de mesmo nome) ao longo de discontinuidades em um maciço rochoso fraturado. Esse método modela um material descontínuo como um sistema de blocos deformáveis que se movem independentemente sem serem penetrados por outros blocos;

⁴ Disponível em: <<http://www.itasca.com/software>>. Acesso em: 19 out. 2016.

- c. **PFC (*Particle Flow Code*)**: a mais recente formulação em modelos descontínuos. É a aplicação da formulação dos elementos distintos na forma de código de fluxo de partículas. Tal código permite que o maciço rochoso seja representado como uma série de partículas esféricas que interagem por coesão. Partículas podem ser agrupadas por meio de forças de interação para, assim, simular blocos fraturados. O cálculo, nesse método, é baseado na aplicação contínua das leis de movimento em cada partícula e da lei de força-deslocamento em cada contato.

A Tabela 2-5, abaixo, apresenta um resumo dos métodos de análise numérica que trabalham com modelos descontínuos.

Tabela 2-6 – Resumo dos procedimentos de análise numérica – modelos descontínuos

Modelo	Método	Premissas	
Descontínuo	Elementos distintos	Incorpora alguns aspectos do método das diferenças finitas	
		Primeiro procedimento a tratar discontinuidades como um conjunto de blocos semirrígidos (posteriormente, blocos deformáveis), interagindo ao longo de discontinuidades com rigidez definida	
	Elementos discretos	DDA	Similar ao método dos elementos finitos para a resolução de problemas de tensão-deformação Considera a interação de blocos independentes ao longo de discontinuidades em um maciço rochoso fraturado Modela um material descontínuo como um sistema de blocos deformáveis que se movem independentemente sem serem penetrados por outros blocos
		PFC	Aplicação da formulação dos elementos distintos na forma de código de fluxo de partículas Representa o maciço rochoso como uma série de partículas esféricas que interagem por coesão Cálculo baseado na aplicação contínua das leis de movimento em cada partícula e da lei de força-deslocamento em cada contato

2.3.1.5. Modelos híbridos

Os modelos híbridos têm sido cada vez mais utilizados em estudos de estabilidade de taludes. Diferentes combinações de métodos podem ser feitas para se criar um modelo que melhor representa a realidade do estudo. Sinha (1989) nos mostra três diferentes formas de combinação: (a) o problema é dividido em duas ou mais áreas que são analisadas simultaneamente e diferentes métodos são usados para cada área; (b) a análise do problema é dividida em duas ou mais etapas e diferentes métodos são utilizados para cada etapa onde, os resultados obtidos em uma etapa são utilizados como parâmetros de entrada na etapa seguinte e; (c) o modelo é gerado, primeiramente, por um método para validar os parâmetros e, posteriormente, tais parâmetros são usados com outro método para gerar o modelo que melhor fornece os dados necessários.

Um exemplo de modelo híbrido utilizado em estudos de estabilidade de taludes é a junção do método dos elementos finitos e dos elementos distintos incorporando uma malha adaptativa. Apesar de, separados, os modelos contínuos e descontínuos gerarem resultados satisfatórios para esse tipo de análise, problemas mais complexos envolvem mecanismos relacionados tanto com a existência de descontinuidades quanto ao comportamento frágil de uma rocha intacta. Dessa forma, a junção desses dois métodos permite a modelagem tanto de uma rocha intacta quanto do desenvolvimento de fraturas no modelo.

O método exemplificado utiliza uma malha de elementos finitos capaz de modelar deformações envolvendo fraturas. Caso a tensão no talude exceda o critério de falha adotado para o modelo contínuo, uma fratura é iniciada e a malha adaptativa permite a propagação de tal fratura pela malha de elementos finitos.

A Tabela 2-7, abaixo, apresenta um resumo dos métodos de análise numérica que trabalham com modelos híbridos.

Tabela 2-7 – Resumo dos procedimentos de análise numérica – modelos híbridos

Modelo	Método	Premissas
Híbrido	-	Diferentes combinações dos métodos apresentados anteriormente podem ser feitas para se criar um modelo que melhor representa a realidade do estudo

Por fim, baseado na revisão bibliográfica apresentada nesse capítulo, na qual todos os principais métodos de análise existentes atualmente foram apresentados, esse trabalho visa montar um procedimento sistemático para a facilitar a determinação do melhor método a ser aplicado. Dessa forma, busca-se preencher uma lacuna, existente atualmente nos estudos de estabilidade de taludes para rupturas circulares, relacionada a escolha correta do melhor método a ser utilizado para em um projeto, uma vez que, muitas empresas e profissionais acabam por utilizar programas baseados nos métodos descritos aqui, mas que não condizem com a realidade do estudo.

O próximo capítulo apresenta a aplicabilidade dos métodos considerados nesse estudo, apontando as vantagens e desvantagens de cada um, bem como as situações em que cada método pode e deve ser aplicado. Assim, o procedimento que será apresentado considera metodologias de fácil aplicação e que apresentem precisão em sua análise, desconsiderando métodos que envolvam cálculos complicados e de difícil compreensão, que necessitem de muito tempo ou iterações para serem utilizados e/ou que considerem premissas demais, o que acabaria por afetar a qualidade e a precisão da análise.

CAPÍTULO 3 – APLICABILIDADE DOS MÉTODOS APRESENTADOS

Um dos grandes problemas em uma análise de estabilidade de taludes é determinar quando utilizar metodologias em duas dimensões ou se um estudo tridimensional é mais recomendado. Métodos 2D são as formas mais comuns utilizadas em análises de estabilidade de taludes devido a sua simplicidade, no entanto, tais métodos são baseados em diferentes simplificações para poder reduzir o problema 3D em 2D, tornando a precisão da análise errática, variando conforme o método utilizado. Apesar de modelos tridimensionais serem a melhor representação uma vez que o alvo do estudo é um objeto em três dimensões, tais formas de análise são complexas e de difícil confecção dos modelos necessários, dificultando, assim, sua utilização. Anagnosti (1969) mostra que o número de premissas necessárias para satisfazer todas as equações de equilíbrio em 3D é quatro vezes maior que em uma análise 2D e que, a comparação com algumas análises, assumindo fatias em 2D, revela que o fator de segurança aumenta em mais de 50% utilizando métodos 3D.

Uma vez que nenhuma referência geral está disponível para selecionar o método de análise ou se a mesma deve ser feita em 2D ou 3D, os engenheiros foram largados a seus próprios julgamentos, deixando a precisão e a validade dos resultados como última preocupação. Os métodos de análise tridimensional, assim como os métodos 2D, exigem pressupostos para alcançar uma definição estaticamente determinada do problema. Existem várias maneiras de fazer isso; alguns métodos fazem isso diminuindo o número de incógnitas e outros aumentando o número de equações, ou ambos, de modo que os dois números possam ser iguais (ALBATAINEH, 2006). A realização da análise em 3D requer, também, a obtenção de dados suficientes por meio de sondagens pois, perfurações adicionais podem ajudar na criação de perfis em diferentes secções transversais dentro da massa deslizante. No entanto, o aumento no número de furos aumentará o orçamento necessário para o projeto não sendo, portanto, preferido.

A análise tridimensional torna-se importante, conforme Albataineh (2006), nos casos em que: (a) a geologia é complexa, o que dificulta a seleção de uma seção bidimensional típica; (b) a geometria do talude e da superfície de deslizamento variam significativamente lateralmente; (c) as propriedades do material são altamente heterogêneas ou anisotrópica; (d) o talude é sobrecarregado localmente; (e) o talude possui força de cisalhamento e/ou poro-

pressão complicada, as quais requerem a combinação dos efeitos da geometria do talude e da resistência ao cisalhamento para determinar a direção do movimento que leva a um fator mínimo de segurança ou; (f) para recalcular a força de cisalhamento em um talude rompido. Nessas situações, uma análise 3D pode ser necessária.

Segundo Cornforth (2004), devido ao alto custo associado à análise da estabilidade de taludes em 3D, os engenheiros limitam seu uso aos seguintes casos:

- a. Quando a largura (W) em relação ao comprimento (L), do deslizamento de terra, é maior do que 2 ($W/L > 2$);
- b. Quando a profundidade do deslizamento muda significativamente entre o centro e os lados do escorregamento;
- c. Quando a mudança na geologia da superfície ou as condições da água subterrânea em toda a largura do escorregamento é significativa.

Ainda, conforme Wyllie e Mah (2005), uma análise 3D é respaldada nas seguintes recomendações: (a) a direção das principais estruturas geológicas têm 20° ou 30° de diferença em relação à direção do talude; (b) o eixo do material anisotrópico tem entre 20° ou 30° de diferença em relação à direção do talude; (c) as direções das tensões principais não são nem paralelas nem perpendiculares ao talude; (d) a distribuição das unidades geomecânicas varia ao longo da direção do talude e; (e) a geometria do talude em planta não pode ser representada em 2D, assumindo-se assimetria ou modelo com deformação plana.

Superado o problema de qual abordagem seguir (2D ou 3D), nos deparamos com outra dificuldade em um estudo de estabilidade de taludes: Qual método utilizar? Dado a vasta gama de métodos de análise existentes hoje, tornou-se essencial para o profissional que trabalha com estabilidade de taludes compreender os diferentes parâmetros que podem ser utilizados bem como as limitações inerentes a cada metodologia. A discrepância entre os fatores de segurança obtidos com diferentes metodologias ocorre devido a inúmeros problemas decorrentes da precisão do método utilizado, da abordagem numérica da programação, da técnica de busca para a superfície de deslizamento mais crítica, da dependência das considerações do usuário e das simplificações da geometria do talude. Além disso, em algumas situações, um método é utilizado em detrimento a outro por razões relevantes e/ou que não justificam determinada escolha, ao invés de razões técnicas sólidas e coerentes.

Deve-se notar que as limitações dos métodos de análise de estabilidade de taludes não sugerem que os mesmos não tenham valor prático, eles devem ser usados com uma compreensão sólida de seus pressupostos e teoria e, com a capacidade de avaliar os resultados de forma qualitativa e quantitativa. Na prática, diferentes métodos produzem diferentes superfícies de deslizamento e, com isso, diferentes fatores mínimos de segurança. Portanto, é importante comparar os resultados da análise com as medições de campo, em vez de comparar apenas os fatores de segurança. A questão mais crítica na avaliação de diferentes métodos de análise é a capacidade desses de determinar a superfície de deslizamento mais crítica. Considerando uma certa superfície de deslizamento crítica, os fatores de segurança de diferentes métodos podem diferir devido à discrepância na formulação matemática e nas simplificações utilizadas no desenvolvimento de cada método.

Dessa forma, os próximos itens apresentam as qualidades e as limitações das metodologias consideradas nesse trabalho, apontando as situações em que cada uma é melhor aplicada e, apresentando os motivos para que tais sejam incluídas ou não da metodologia objetivo final desse estudo.

3.1. MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE

Na prática atual, as análises de estabilidade de taludes são geralmente resolvidas com métodos de equilíbrio limite usando procedimentos 2D, devido à sua simplicidade e compreensão geral. Embora tais metodologias sejam populares, elas idealizam o problema, considerando taludes simétricos e infinitamente longos na terceira dimensão, em oposição as características das encostas naturais e feitas pelo homem, geralmente, variam, mesmo ao longo de curtas distâncias. Portanto, a simplificação 2D às vezes é amplamente intuitiva e geralmente corresponde ao pior cenário. Os resultados do estudo de Cavounidis (1987) mostraram que o fator de segurança 3D é, geralmente, um pouco maior do que o correspondente fator em 2D. Gens, Hutchinson e Cavounidis (1988) e Xie et al. (2011) relataram que a diferença mencionada pode ser tão grande quanto 30%, em alguns casos. Outra limitação importante dos métodos 2D é determinar a direção do deslizamento. Como uma suposição inicial em todos os métodos 2D, essa direção é assumida como sendo paralela ao plano transversal do talude, no entanto, tal hipótese nunca é garantida.

Conforme Albataineh (2006), os vários métodos de análise de equilíbrio limite bidimensional diferem uns dos outros em dois aspectos:

1. Diferentes métodos utilizam diferentes pressupostos para compensar o equilíbrio entre o número de equações de equilíbrio e o número de incógnitas;
2. Diferentes métodos utilizam diferentes pressupostos quanto à localização e orientação das forças internas entre as fatias assumidas.

Outra forma, intermediária aos métodos 2D e 3D, é a abordagem *quasi*-tridimensional. Nela, o fator de segurança 2D é calculado para várias seções transversais paralelas e, em seguida, usado para encontrar o fator médio ponderado de segurança da inclinação em 3D. A área ou o peso de cada seção transversal é utilizada como fator de ponderação, sendo comum usar duas seções ou três seções para realizar a análise. Mais seções podem ser obtidas assegurando que as seções estão cobrindo áreas iguais do deslizamento (Cornforth, 2004). Este método é uma simplificação da análise em 3D e tem sido usado pelos engenheiros há muito tempo. Além disso, essa suposição sempre produzirá um fator 2D de segurança próximo ao fator 3D de segurança. Todavia, uma das limitações do uso de fatores de ponderação com base na área ou no peso de uma seção transversal é que grandes cortes transversais podem ter uma grande influência no fator de segurança, mesmo que as seções escolhidas não representem as seções críticas do talude.

A última forma de análise é a abordagem 3D. Embora a análise 3D elimine as limitações mencionadas anteriormente dos métodos 2D, ela ainda apresenta algumas desvantagens em suas teorias e aplicações. As análises tridimensionais de estabilidade de taludes foram apresentadas nas últimas décadas e quase todos os métodos de equilíbrio limite em 3D existentes são extensões dos métodos de fatias 2D. Para se converter os métodos de fatias 2D em análises de estabilidade de taludes 3D, tais fatias são transformadas em colunas, adicionando, assim, a terceira dimensão e, conseqüentemente, as condições estáticas de equilíbrios limite das colunas devem ser satisfeitas. As outras definições, simplificações e premissas dos métodos 2D podem ou não ser consideradas no método 3D desenvolvido. A extensão dos procedimentos 2D para 3D requer mais pressupostos para tornar o problema estaticamente determinado, dessa forma, um procedimento difere de outro em termos de: (a) os pressupostos relativos às forças entre colunas; (b) equações de equilíbrio e; (c) simplificações em relação à forma da superfície de falha (AKHTAR, 2011).

Os resultados, em alguns casos, apresentaram maiores fatores de segurança para a análise bidimensional, em determinadas situações, quando comparados com a análise 3D, enquanto outros estudos mostraram o contrário. Isso ocorre devido as diferenças dos métodos utilizados em cada caso. Em geral, a análise 3D foi realizada para a seção mais crítica da análise 2D, devido à simplicidade de cálculo da superfície de deslizamento mais crítica. Portanto, a superfície de deslizamento crítica gerada não correspondeu necessariamente à superfície de deslizamento mais crítica que pode ser gerada a partir da análise 3D ou de observações de campo, se uma largura finita do talude for considerada. Além disso, a maioria dos métodos 3D é uma extensão da versão 2D de algum método existente e, portanto, carrega as limitações do método 2D. Dessa forma, pode-se dizer que, em geral, para análises que consideram a face do talude reta (alvo desse estudo), os métodos de estabilidade de talude que produzem fatores de segurança mais elevados na análise 3D do que na análise 2D são mais precisos, enquanto os que produzem o oposto são imprecisos devido às premissas simplificadoras ou à derivação ou extensão errôneas do método.

Cavounidis (1987) prova que o fator de segurança mínimo em 3D é sempre maior que o fator de segurança mínimo em 2D para o mesmo talude. O autor emprega álgebra simples em sua comprovação e afirma que seus argumentos são unicamente voltados para uma análise considerando os métodos de equilíbrio limite. Em seu trabalho, Cavounidis (1987) afirma que os resultados de pesquisadores anteriores (Hovland, 1977; Chen e Chameau, 1982), que indicam que a razão entre o fator de segurança 3D e 2D é muito pequena para maciços não coesivos foram obtidos ou comparando-se fatores de segurança inadequados ou usando suposições simplificadoras injustificadas. Além disso, o autor afirma que as comparações entre fatores de segurança para um talude específico são significativas apenas quando comparados os fatores de segurança mínimos.

Nos itens abaixo, as vantagens e desvantagens dos métodos de equilíbrio limite, considerados nesse estudo, para as três formas de análises mencionadas acima (2D, *quasi*-tridimensional e 3D) são apresentadas.

3.1.1. Análise de estabilidade em 2D para ruptura circular

3.1.1.1. Procedimentos de “Massa Inteira”

Por se tratar de metodologias em duas dimensões as quais, dessa forma, já são penalizadas por algumas simplificações, os procedimentos 2D que consideram a massa de ruptura como uma massa inteira, por tratarem a ruptura dessa forma, acabam fazendo uso de outras premissas que simplificam ainda mais o estudo. Além disso, tais métodos podem ser aplicados, basicamente, apenas em superfícies circulares o que, limita suas aplicações.

O método do círculo de atrito, proposto por Taylor (1937, 1948), apresenta utilidade limitada, podendo ser aplicado apenas em taludes homogêneos com $\phi > 0$ e superfície de ruptura circular. Além disso, ele apresenta problemas na determinação da superfície de ruptura crítica, mas, apesar de suas limitações, tal método é facilitado pela utilização dos ábacos de análise propostos por Taylor (1937) e suas posteriores extensões e, por isso, é considerado nesse estudo.

O método *Swedish Circle* é um caso especial do método da espiral logarítmica, assim, ele também satisfaz todas as condições de equilíbrio, direta (momentos) e indiretamente (forças), conforme descrito anteriormente (item 2.2.1.2). Esse método é uma forma eficaz de análise de estabilidade para taludes homogêneos e heterogêneos. No entanto, ele é válido considerando que, $\phi = 0$ e que a superfície de ruptura possa ser aproximada por um círculo, limitando, dessa forma, suas aplicações, mesmo assim, ele é considerado nesse estudo.

O método de espiral logarítmica pode ser usado para determinar o fator de segurança de um talude homogêneo e simples (compostos de apenas um material), sem presença de poro-pressão, coesivo e que possua atrito interno. Ele satisfaz diretamente, as condições de equilíbrio de momentos e, indiretamente, as condições de equilíbrio de forças. Embora o método da espiral logarítmica seja de aplicações limitadas, o simples fato de satisfazer o equilíbrio de momentos sem outras premissas além de representar a superfície de ruptura como uma espiral logarítmica faz com que seja possível utilizar este método como um critério para verificar a precisão de outros métodos. No entanto, tal método é muito complexo para cálculos a mão livre sendo eficiente apenas computacionalmente e, suas aplicações são

similares as de outros métodos, mais simples, dessa forma, esse método não é considerado nesse estudo.

O fator de segurança, obtido pelo método do talude infinito, pode ser calculado tanto para tensões totais como para tensões efetivas bem como para diferentes condições de nível d'água. Uma vez que, o fator de segurança, para materiais não coesivos, não depende da profundidade da superfície de ruptura, esse método é muito recomendado para esse tipo de material. Já para materiais coesivos, esse método se aplica, contanto que uma camada de material firme, paralela ao talude, limite em profundidade a superfície de ruptura. Se tal camada existir em uma pequena profundidade quando comparada com a extensão lateral do talude, esse método fornece uma aproximação adequada para os cálculos de estabilidade. Além disso, esse método satisfaz, diretamente, as condições de equilíbrio de forças e, indiretamente, as condições de equilíbrio de momentos e, por suas vantagens, tal método é considerado nessa dissertação.

Conforme Taylor (1948), a condição necessária para a existência do método (talude com comprimento infinito, sem nenhuma variação) não existe realmente na maioria dos locais. Dessa forma, considera-se para análise uma fatia vertical do talude, tomada como representativa do maciço como um todo. Sendo assim, em casos mais complexos ou onde as camadas do maciço não tiverem uma profundidade constante, outro tipo de análise é recomendado.

Com base nas características apresentadas acima, a Tabela 3-1 apresenta, para os procedimentos em duas dimensões que consideram a massa de ruptura como uma massa inteira, quais métodos foram considerados no estudo e se os mesmos apresentam ábacos ou softwares que facilitem o seu uso.

Tabela 3-1 – Procedimentos em 2D de massa inteira

Método	Considerado no estudo	Ábacos/Software
Círculo de atrito	Sim	Ábacos de Taylor (1937)
<i>Swedish Circle</i> ($\phi = 0$)	Sim	Não
Espiral logarítmica	Não	Não
Talude Infinito	Sim	Não

3.1.1.2. Procedimento de fatias

Os procedimentos 2D de equilíbrio limite mais utilizados atualmente são aqueles que dividem a massa de ruptura em fatias e analisam a estabilidade para cada fatia considerada. Isso permite que os métodos que consideram essa forma de análise lidem com geometrias mais complexas do que as consideradas para os métodos mencionados anteriormente (métodos de “massa inteira”), podendo, assim, ser aplicados, em superfícies de ruptura circulares e não circulares.

O método comum de fatias é aplicável a taludes heterogêneos e solos comuns (solos $c-\phi$), onde a superfície de ruptura pode ser aproximada por um círculo. Ele é o método de fatias mais fácil de se utilizar e permite que o fator de segurança seja calculado diretamente, facilitando, dessa forma, cálculos feitos a mão livre, ao contrário dos outros métodos mencionados nesse estudo, os quais requerem soluções iterativas para o cálculo do fator de segurança. Assim, o método é conveniente para cálculos manuais.

Apesar disso, devido as premissas adotadas, fatores de segurança, calculados por esse método são tipicamente mais conservadores. Whitman e Bailey (1967) nos dizem que, fatores de segurança calculados para taludes com baixo grau de inclinação e/ou com uma poro-pressão elevada, podem ser até 60% mais conservadores quando comparados com valores obtidos por outros métodos. O método comum de fatias é menos preciso quando comparado a outros procedimentos de fatias, sendo sua precisão menor para análises considerando tensões efetivas e diminuindo à medida que a poro-pressão se torna maior. Além disso é impróprio e impreciso para superfícies deslizantes não circulares e satisfaz apenas as condições de equilíbrio de momentos e, dessa forma, não é incorporado na metodologia proposta nesse estudo.

Conforme demonstrado no item 2.2.1.6 desse estudo, Bishop (1955) apresentou originalmente dois procedimentos diferentes para a análise de estabilidade de taludes. No primeiro (método completo de Bishop), Bishop descreveu quais etapas e pressupostos seriam necessários para satisfazer plenamente o equilíbrio estático não apresentando, no entanto, nenhum detalhe específico sendo, na verdade, tal método, muito semelhante a um procedimento que Fellenius (1936) havia descrito anteriormente. Como nenhum desses procedimentos consiste em um conjunto bem definido de pressupostos e etapas, como os

outros procedimentos descritos neste trabalho, esses métodos não são considerados mais e, também não são considerados nesse trabalho.

O segundo método de Bishop (método simplificado de Bishop) é aplicável a taludes heterogêneos e solos comuns (solos $c-\phi$) onde a superfície de deslizamento pode ser aproximada por um círculo. Apesar de não satisfazer completamente as condições de equilíbrio (satisfaz apenas as condições de equilíbrio de momentos e de forças na vertical), esse método gera valores relativamente precisos para o fator de segurança. Bishop (1955) mostrou que esse método gera resultados mais precisos que o método comum de fatias, especialmente para taludes com baixo grau de inclinação e/ou com uma poro-pressão elevada. O método simplificado de Bishop (1955) é utilizado como base para determinar o fator de segurança por dois métodos gráficos, propostos por Bishop e Morgenstern (1960) e suas posteriores extensões, o que facilita sua utilização.

Wright et al. (1973) nos mostra que os resultados gerados por esse método se aproximam, com certa precisão (em torno de 5%), dos resultados obtidos com o método numérico dos elementos finitos. A principal limitação prática do método simplificado de Bishop é que ele é restrito para superfícies de ruptura circulares sendo impróprio e impreciso para superfícies deslizantes não circulares. Visto que sua principal limitação não é impactante na precisão da análise e apenas limita sua utilização, esse método é considerado nesse estudo.

Conforme apresentado no item 2.2.1.7 desse estudo, Janbu, assim como Bishop, apresentou originalmente dois procedimentos diferentes para a análise de estabilidade de taludes e, ambos os métodos são aplicáveis em qualquer forma de superfície de ruptura. O primeiro método (simplificado de Janbu), satisfaz apenas as condições de equilíbrio de forças e é recomendado para taludes com ruptura em baixa profundidade, de forma planar e não paralela à superfície. No entanto, algumas análises e programas de computador aplicam automaticamente o fator de correção ao fator de segurança calculado, enquanto outros não. Sempre que os resultados são relatados para o método simplificado de Janbu, deve-se determinar se o fator de correção foi aplicado, pois a correção pode ter um efeito notório sobre os resultados. Por não se tratar de um método rigoroso e, com isso, acaba por superestimar ou, algumas vezes subestimar os resultados e, por apresentar variações em seus resultados conforme a utilização do fator de correção proposto, tal método não é considerado nesse estudo.

O segundo método (generalizado de Janbu), satisfaz todas as condições de equilíbrio (momentos e forças) e, também, é aplicável a qualquer forma de superfície de ruptura. Para determinar o fator de segurança é necessário o uso de cálculos iterativos de modo que um valor assumido de fator de segurança leva a um valor melhorado e assim por diante e, com isso, várias tentativas são necessárias para obter um fator equilibrado de segurança. Para contornar o fato de ser necessário um processo iterativo de análise, o método generalizado de Janbu apresenta uma série de gráficos (JANBU, 1954; JANBU, 1968) que facilitam sua utilização. Esse método é considerado nesse estudo.

Lowe e Karafiath (1960) apresentaram um método aplicável a superfícies de ruptura circulares e não circulares e, é um dos poucos procedimentos adequados à cálculos feitos a mão. Porém, apesar de apresentar fatores de segurança com pouca diferença em comparação aos procedimentos que satisfazem todas as condições de equilíbrio (aproximadamente 10%), ainda é menos preciso que os métodos rigorosos, pois satisfaz apenas as condições de equilíbrio de forças. Tal método não é considerado nesse estudo, pois, conforme constatado, apresenta variações consideráveis nos resultados obtidos com sua utilização (superestimando ou subestimando o fator de segurança quando comparado aos resultados obtidos com métodos rigorosos), além de apresentar vantagens apenas para cálculos feitos a mão livre, em comparação com outros métodos rigorosos, o que, na realidade atual, não se aplica devido ao desenvolvimento dos programas de computador ou, também, pela possibilidade de utilização de métodos gráficos.

O método de Morgenstern e Price (1965) é aplicável a qualquer superfície de ruptura bem como a materiais com diferentes tensões de cisalhamento e poro-pressão. Além disso também satisfaz todas as condições de equilíbrio o que o torna um procedimento de equilíbrio limite completo e rigoroso. Conforme apresentado no item 2.2.1.9 deste trabalho o método de Morgenstern e Price (1965) é similar ao método de Spencer para uma função $f(x)$ constante. Todavia, a principal diferença entre esses dois métodos é que, o método de Morgenstern e Price, fornece maior flexibilidade nas suposições para as inclinações da força entre fatias, permitindo que a suposição com relação às forças entre fatias seja alterada.

Apesar de suas vantagens, Morgenstern e Price (1965) comparam dois casos com outros métodos existentes revelando que o método pode errar em até 8% para insegurança. Todavia, os autores dizem ser necessário mais cálculos para investigar a ocorrência dessas

diferenças com mais detalhes. Além disso esse método requer procedimentos iterativos de tentativa e erro (deve-se inferir, inicialmente, valores de λ e F , bem como uma forma para a superfície de ruptura). Apesar de suas limitações, essa metodologia é considerada nesse trabalho.

O método proposto por Spencer (1967) é considerado um método muito preciso e aplicável a quase todas as superfícies de ruptura. Também é tido como um dos métodos mais simples de equilíbrio limite que satisfaz todas as condições de equilíbrio. No entanto, assim como em outros métodos aqui apresentados, procedimentos de tentativa e erro se fazem necessários para o cálculo do fator de segurança. Contudo, seu procedimento é facilitado pela possibilidade de utilização dos ábacos proposto por Spencer (1967). Tal método é considerado nesse estudo.

A principal limitação do método Sueco modificado (*Corps of Engineers' Modified Swedish Procedure*) reside no fato de que os fatores de segurança calculados são sensíveis à inclinação assumida para a força entre fatias. Dependendo da inclinação assumida o fator de segurança pode ser subestimado ou superestimado em comparação com o valor calculado por métodos rigorosos que satisfazem todas as condições de equilíbrio. A sensibilidade do método parece ser devida em grande parte ao fato de que o equilíbrio de momentos não está satisfeito.

Como mencionado no item 2.2.1.11, a suposição de forças laterais paralelas à inclinação média do talude (linha reta desenhada entre os pontos onde a superfície de ruptura intersecta a crista e o pé do talude) (pressuposto *Corps of Engineers #1*) mostrou-se, por vezes, levar a resultados conservadores em muitos casos, quando comparado a procedimentos mais rigorosos que satisfazem o equilíbrio de forças e momento. O grau de imprecisão é maior quando são utilizadas forças totais entre as fatias. Dessa forma, para evitar a possibilidade de se superestimar o fator de segurança, as forças entre fatias também podem ser consideradas como sendo paralelas a superfície (pressuposto *Corps of Engineers #2*). Esse método não é considerado nesse estudo, pois, assim como o método de Lowe e Karafiath (1960), apresenta vantagem apenas para cálculos feitos a mãe livre e, também, pode gerar resultados discrepantes com a realidade, quando comparados com procedimentos rigorosos, mais precisos.

O método de Sarma (1973) foi desenvolvido para avaliações de estabilidade sísmica e oferece vantagem sobre outros procedimentos para este propósito. Esse método também

pode ser usado para calcular um fator de segurança, assumindo repetidamente valores diferentes para o fator de segurança e calculando o coeficiente sísmico. O processo é repetido até que o valor assumido para o coeficiente sísmico corresponda ao valor para o qual o fator de segurança é desejado. A simplicidade do método de Sarma (1973) é evidente, uma vez que, o fator usual de segurança é obtido por meio de iterações simples (cerca de três iterações, apenas).

Tal método pode ser aplicado em qualquer superfície de ruptura, além de satisfazer tanto o equilíbrio de momentos como de forças em qualquer direção (horizontal e vertical). A precisão associada ao método Morgenstern e Price (1965) não é perdida devido a simplicidade do método atual. Além disso, cabe salientar que a ajuda de um computador não é essencial e não há problema de convergência. Dessa forma, esse método é considerado nesse estudo.

O método generalizado de fatias, como o próprio nome já nos diz, apresenta uma formulação que generaliza alguns métodos mencionados anteriormente (método comum de fatias; método simplificado de Bishop; método de Spencer; método simplificado e generalizado de Janbu, métodos de equilíbrio de forças e o método de Morgenstern e Price). Trata-se de um método rigoroso, aplicável em qualquer forma de superfície de ruptura no qual, suas aplicabilidades e limitações, estão relacionadas com os casos particulares considerados. O método proposto é considerado nesse estudo.

Estudos de caso mostram que os fatores de segurança obtidos pelo método proposto por Zhu e Lee (2002) concordam bem com aqueles obtidos pelos métodos rigorosos comumente utilizados, como o método de Morgenstern e Price (1965) e o método de Spencer (1967). Suas diferenças são inferiores a 5% nos exemplos relatados pelos autores. Conforme Zhu e Lee (2002), a aplicação do método proposto é bastante direta e sua solução possui a mesma precisão que a dos métodos rigorosos convencionais de fatias, pois ainda está dentro do contexto rigoroso. Outra vantagem do método reside no fato de que ele pode ser aplicado a superfícies de ruptura circulares e não circulares com diferentes condições de drenagem.

No entanto, apesar de suas vantagens, o método proposto por Zhu e Lee (2002) envolve a necessidade de cálculos iterativos e integrações numéricas para a determinação do fator de segurança, prejudicando sua praticidade. Por esse motivo, essa metodologia não é considerada nesse estudo, visto que, existem outras metodologias, de mais fácil aplicação.

As incógnitas e as equações relacionadas com o deslocamento introduzidas pelo método de Huang (2013), resultaram em uma condição estaticamente determinada para uma massa de solo cortada, confinada por uma superfície de falha com formas arbitrárias. Apesar de o método exigir uma certa quantidade de cálculos, os mesmos não são de difícil aplicação. A ferramenta analítica proposta fornece tensões de cisalhamento locais e deslocamentos de cisalhamento (ou fatores de segurança baseados em tensão e deslocamento), permitindo investigações mais detalhadas sobre tais parâmetros ao longo de qualquer superfície potencial de falha.

Os princípios e procedimentos propostos por Huang (2013) também podem ser aplicados a outros métodos de fatia, independentemente da sua precisão. Huang (2013) apresenta apenas um estudo de caso mostrando que seu método pode ser bem simulado. No entanto, conforme o próprio autor, mais estudos de caso em diferentes mecanismos de ruptura de taludes devem ser realizados no futuro para validar o método proposto para aplicações de engenharia prática e, por esse motivo, ele não é considerado nesse estudo.

Com base nas características apresentadas acima, a Tabela 3-2 apresenta, para os procedimentos em duas dimensões de fatias, quais métodos foram considerados no estudo e se os mesmos apresentam ábacos ou softwares que facilitem o seu uso.

Tabela 3-2 – Procedimentos em 2D de fatias (continua)

Método	Considerado no estudo	Ábacos/Software
Comum de fatias	Não	Slide
Completo de Bishop	Não	Não
Simplificado de Bishop	Sim	Ábacos de Bishop e Morgenstern (1960)
		Slide
Simplificado de Janbu	Não	Slide
Generalizado de Janbu	Sim	Ábacos de Janbu (1968)
		Slide
Lowe e Karafiath (1960)	Não	Slide
Morgenstern e Price (1965)	Sim	Não
Spencer (1967)	Sim	Ábacos de Spencer (1967)
		Slide

Resumo dos procedimentos em 2D de fatias (conclusão)

Método Sueco modificado (<i>Corps of Engineers' Modified Swedish Procedure</i>)	Não	Slide
Sarma (1973)	Não	Não
Método generalizado de fatias	Sim	Slide
Zhu e Lee (2002)	Não	Não
Huang (2013)	Não	SLICE-DISP

3.1.2. Análise de estabilidade *quasi*-tridimensional para ruptura circular

Análises *quasi*-tridimensionais são baseadas em métodos 2D, os quais são extrapolados para condições 3D carregando, assim, suas vantagens e desvantagens, tornando o valor do fator de segurança obtido em uma análise bidimensional mais próximo de sua realidade 3D. Dessa forma, essa metodologia é aplicada quando se necessita de dados mais precisos do que os obtidos com um método 2D, e em situações que não apresentem geologia tão complexa a ponto de justificar uma análise 3D.

O método proposto por Sherard et al. (1963) considera o efeito tridimensional calculando o somatório das forças de resistência totais e das forças de resistência atuantes na massa deslizante para cada seção transversal bidimensional utilizada (entre 3 e 5 seções). O resultado obtido com esse método é uma média da estabilidade das seções escolhidas e, conforme os autores, gera um fator de segurança entre 25 e 50% maior que o fator de segurança obtido por métodos bidimensionais. Tal método é considerado nessa dissertação.

O método proposto por Lambe e Whitman (1969), calcula o fator de segurança 3D utilizando uma média ponderada dos fatores de segurança 2D das várias seções escolhidas nas quais, o fator de ponderação é a área da superfície de deslizamento. Esse método também é considerado nessa dissertação.

Anagnosti (1969) propõem um método que satisfaz todas as condições de equilíbrio (forças e momentos) além de ser aplicável para qualquer forma de superfície de ruptura. Todavia, tal método é aplicável apenas em taludes homogêneos e sua principal limitação reside no fato de que a superfície de ruptura 3D não é especificada e, com isso, o usuário deve

determiná-la. A seleção da mesma, em muitos casos, é praticamente impossível e, por esse motivo, essa metodologia não é considerado nesse estudo.

Assim como o método proposto por Lambe e Whitman (1969), o método proposto por Seed et al. (1990) também calcula o fator de segurança tridimensional através de uma média ponderada dos fatores de segurança 2D das várias seções escolhidas e, nesse caso, o fator de ponderação é o peso da superfície de deslizamento. Conforme mencionado pelos próprios autores, alguns parâmetros utilizados na análise não são totalmente confiáveis, podendo apresentar um erro entre 10 e 25% do valor real e, por esse motivo, esse método não é considerado nesse estudo.

O método proposto por Loehr et al. (2004) é aplicável a qualquer forma de superfície de ruptura. Como já mencionado anteriormente, a área da superfície de deslizamento implícita (2D) neste método é a mesma dos métodos bidimensionais, isto é, uma seção perpendicular ao plano da seção transversal, dessa forma, a área real da superfície de deslizamento (3D) será maior e, com isso, a resistência ao cisalhamento é desenvolvida em uma área maior. Com isso, para corrigir a diferença entre a área real e a área implícita os autores propõem a multiplicação dos termos no numerador da fórmula para o cálculo do fator de segurança 3D pela razão ds/dx .

Embora o método seja aproximado, os resultados das análises comparativas apresentadas mostram que o método produz fatores tridimensionais de segurança que estão em estreita concordância com os fatores de segurança calculados usando procedimentos 3D de análise de estabilidade mais rigorosos. Conforme os autores, no pior caso, o método proposto produziu fatores de segurança que foram 10% maiores que os obtidos usando metodologias mais rigorosas, mas na maioria dos casos analisados, as diferenças foram bem inferiores (menos de 10%). Assim, ele serve como uma forma simples de estimar a magnitude dos efeitos tridimensionais quando um procedimento tridimensional mais rigoroso não estiver disponível e, por esse motivo, é considerado nessa dissertação.

Cabe salientar aqui que uma das limitações no uso de fatores de ponderação com base na área ou no peso de uma seção transversal reside no fato de que grandes cortes transversais podem ter uma grande influência no fator de segurança mesmo quando as superfícies de deslizamento estão confinadas ou não representam a seção mais crítica do talude gerando, com isso, resultados incoerentes com a realidade do estudo. Dessa forma, é de suma importância, utilizar tais metodologias conforme suas possibilidades de aplicação e

considerando suas limitações para, dessa forma, assegurar a qualidade dos resultados. É importante lembrar, também, que muitas vantagens e desvantagens da análise *quasi*-tridimensional está diretamente relacionada a abordagem 2D escolhida para determinar o fator de segurança das superfícies críticas de cada seção.

Com base nas características apresentadas acima, a Tabela 3-3 apresenta, para os procedimentos *quasi*-tridimensionais de análise, quais métodos foram considerados no estudo.

Tabela 3-3 – Procedimentos *quasi*-tridimensionais

Método	Considerado no estudo
Sherard et al (1963)	Sim
Lambe e Whitman (1969)	Sim
Anagnosti (1969)	Não
Seed et al. (1990)	Não
Loehr et al. (2004)	Sim

3.1.3. Análise de estabilidade em 3D para ruptura circular

Conforme descrito nos itens anteriores desse estudo, a análise tridimensional torna-se importante, basicamente, nos casos em que a geologia é complexa e o maciço apresenta grande variação lateral de sua geometria, o que dificulta a seleção de uma seção bidimensional representativa para análise. Um grande número de métodos de análise de estabilidade de taludes em 3D, baseados nos conceitos de equilíbrio limite, foram desenvolvidos desde os anos 50 e, esses métodos foram revisados buscando compreender e apresentar as aplicações e limitações de cada um.

Baligh e Azzouz (1975) mostram que os efeitos 3D tendem a aumentar o fator de segurança embora, para longos comprimentos de falha (razão l_c/H maior que quatro - Figura 2.27) o fator de segurança 3D se aproxime do valor do fator de segurança 2D. Além disso, os fatores de segurança obtidos usando superfícies de ruptura de extremidade elíptica são inferiores aos obtidos usando extremidades cônicas. Dessa forma, concluem que as superfícies de ruptura com extremidade elíptica são mais propensas a simular a realidade da geometria

das falhas em taludes mesmo que nenhum histórico de casos seja usado para confirmar essa afirmação. A superfície de ruptura cônica, por sua vez, produz um fator de segurança menor quando comparado a outros métodos, assim, o comprimento de ruptura ($2L$ - Figura 2.27), calculado usando essa superfície é consideravelmente subestimado. Baligh e Azzouz (1975) atribuem essas discrepâncias à variação das propriedades do solo ao longo do eixo do aterro, que seu procedimento não conseguiu acomodar.

As principais limitações do método proposto por Baligh e Azzouz (1975) estão relacionadas ao fato de o mesmo, como apresentado, poder ser aplicado apenas a taludes coesivos; apenas o equilíbrio de momentos ser satisfeito e, também, ao fato de as forças cisalhantes atuantes na superfície de ruptura serem consideradas perpendiculares ao eixo de rotação.

Azzouz e Baligh (1978), por sua vez, apresentam um método para solos coesivos e não coesivos, expandindo, dessa forma, seu trabalho anterior. Nessa revisão, os pressupostos relacionados às forças de resistência ao cisalhamento e a geometria da superfície de ruptura (cilindro com extremidades cônicas ou elipsoidais) não mudam, bem como a necessidade de se assumir que as tensões são normais na superfície de ruptura. Todavia, duas hipóteses adicionais foram introduzidas e, com isso, os autores concluíram que seus novos pressupostos fornecem resultados mais razoáveis do que os pressupostos anteriores. Apesar de tais vantagens, a determinação da distribuição de tensões normais em três dimensões é uma grande limitação de ambos procedimentos. Por não se tratarem de metodologias rigorosas e, uma vez que, a superfície de ruptura deve ser estipulada pelo usuário e não determinada automaticamente, os métodos propostos por Baligh e Azzouz (1975) e Azzouz e Baligh (1978) não são considerados nesse estudo.

Em seus estudos, Hovland (1977) mostra que a relação entre o fator de segurança 3D e o fator de segurança 2D é bastante sensível aos parâmetros do solo utilizados e à forma básica da superfície de ruptura, mas menos sensível à largura da superfície de ruptura. Ele também afirma que o fator de segurança 3D geralmente é significativamente maior do que fator de segurança 2D para um solo coeso, mas pode ser inferior em solos não coesivos.

Steiner (1978) mostra que Hovland (1977) assume, implicitamente, que não há forças horizontais, mas que tais forças são significativas em uma análise 3D. Azzouz e Baligh (1978) e Steiner (1978) também mostram que o procedimento de Hovland (1977) produz resultados

errôneos para solos não coesivos. Além disso, o método proposto por Hovland (1977) satisfaz apenas o equilíbrio de momentos e é aplicável apenas para taludes homogêneos. Dessa forma, tal método não é considerado nesse estudo.

O método proposto por Chen (1981) e Chen e Chameau (1982), apesar de satisfazer tanto o equilíbrio de forças quanto o equilíbrio de momentos, é aplicável apenas para taludes homogêneos. Em seu estudo Chen (1981) e Chen e Chameau (1982) apresentam as seguintes conclusões sobre o método proposto: (a) os efeitos 3D são mais significativos em comprimentos menores da massa de ruptura; (b) para taludes suaves, os efeitos 3D são mais significativos para os solos de alta coesão e baixo ângulo de atrito; (c) em alguns casos, o fator de segurança 3D obtido para solos não coesivos pode ser ligeiramente menor do que o obtido por métodos 2D; (d) a poro-pressão pode fazer com que os efeitos 3D sejam ainda maiores principalmente em solos de alta coesão e baixo ângulo de atrito e; (e) o ângulo entre fatias influencia o fator de segurança. Apesar de se tratar de um método rigoroso, o procedimento proposto por Chen (1981) e Chen e Chameau (1982) nem sempre apresenta resultados superiores para o fator de segurança 3D em comparação ao fator de segurança 2D, o que pode induzir o usuário ao erro e, com isso, esse método não é considerado nesse estudo.

O método proposto por Denhardt e Forster (1985) satisfaz as condições de equilíbrio de forças e momentos e pode ser aplicado a qualquer tipo de solo e vários ângulos de inclinação. Cargas externas e poro-pressão, também podem ser consideradas. No entanto, os autores não conseguem fazer qualquer comparação com os resultados dessas ou quaisquer outras análises em 3D, nem aplicam seu procedimento a qualquer caso histórico e, por esse motivo, sua metodologia não é considerada nesse estudo. Além disso, tal procedimento pode ser aplicado apenas em uma massa de ruptura simétrica de forma elipsoidal.

Leshchinsky et al. (1985) apresentam um método rigoroso (satisfaz todas as condições de equilíbrio) cujos resultados da análise indicam que: (a) as superfícies de deslizamento críticas são suaves; (b) o fator de segurança obtido para uma superfície de ruptura limitada localmente (modo de ruptura 3D) é maior do que o fator de segurança obtido para uma superfície de ruptura cilíndrica longa (modo de ruptura 2D); (c) a diferença entre o fator de segurança para os modos de ruptura 3D e 2D diminui à medida que o ângulo de atrito interno ou a inclinação do talude aumentam; (d) o fator de segurança 3D é independente da distribuição de tensão normal sobre a superfície de deslizamento crítica; (e) a direção da força de cisalhamento sobre

a superfície de deslizamento depende da geometria da superfície da mesma, mas não da distribuição de tensão normal e; (f) superfícies de deslizamento profundas resultam quando o ângulo de atrito interno e a inclinação do talude são pequenos.

Conforme Leshchinsky e Baker (1986), os resultados da análise de problemas hipotéticos mostram que uma baixa coesão resulta em superfícies de deslizamento pouco profundas e, em solos sem coesão, a superfície de deslizamento potencial coincide com a superfície do talude, assim, portanto, não há efeitos de borda (os mesmos são insignificantes neste caso). Os efeitos de borda são mais pronunciados para solos coesos. Os resultados de Baker e Leshchinsky (1987) mostraram uma razão máxima de 1.6 para a proporção do fator de segurança 3D em relação ao fator de segurança 2D. Eles concluíram que essa proporção diminui à medida que a coesão diminui, dessa forma, para solos de coesão zero, os valores de fator de segurança 3D e 2D são iguais. Em uma conclusão geral, Baker e Leshchinsky (1987) declararam que a análise 2D de pilhas cônicas provoca resultados conservadores com base no material e inclinação do talude.

O método proposto por Leshchinsky e Mullett (1988) passa a considerar a presença de poro-pressão, algo que não era possível nos métodos propostos anteriormente. Os efeitos tridimensionais mais pronunciados são quando se considera um solo coeso, à medida que as pressões dos poros aumentam, os efeitos de borda diminuem para um solo coesivo. O método proposto por Leshchinsky e Huang (1992b) permite aplicações para qualquer superfície de ruptura, sendo, com isso, a única metodologia, proposta por Leshchinsky, a considerar tal variável.

Apesar de grandes vantagens, os métodos apresentados por Leshchinsky possuem algumas desvantagens em comum. Devido suas simplificações, são aplicáveis apenas a taludes simétricos e homogêneos. Baker e Leshchinsky (1987) é aplicável, também, apenas a taludes cônicos, ou seja, pilhas. Os procedimentos são matematicamente complicados, o que limitam suas aplicações e, também, os autores não usam seus procedimentos para analisar qualquer caso histórico de campo nem comparam seus resultados com os de qualquer outro procedimento 3D. Dessa forma, tais metodologias não são consideradas nesse estudo.

O método proposto por Ugai (1985) satisfaz as condições de equilíbrio de força e de momento e permite a determinação exata da superfície de ruptura crítica 3D bem como a avaliação dos efeitos 3D no fator de segurança. Em suas conclusões, Ugai (1985) afirma que as

formas exatas das superfícies de ruptura crítica 3D são determinadas para serem cilindros divididos com extremidades curvas e também afirma que o fator de segurança 3D é maior que o fator de segurança 2D, como indicado por outros pesquisadores. No entanto, o autor não aplicou seu procedimento em nenhum estudo de campo nem apresentou nenhum programa capaz de conduzir as análises de forma a facilitar trabalhos práticos. Embora o autor declare que este procedimento pode ser aplicado a taludes com qualquer inclinação, ele não faz nenhuma previsão para esta variável em sua análise, aplicando-a apenas em taludes coesivos verticais e simétricos e, por esses motivos, não é considerado nesse estudo.

Ugai (1988) apenas apresenta extensões dos métodos 2D propostos por alguns autores (Fellenius (1936), Bishop simplificado (1955), Janbu simplificado (1957) e Spencer (1967)) para modelos tridimensionais. Estes métodos estendidos foram aplicados em taludes simétricos e homogêneos cuja massa de ruptura é considerada como uma seção cilíndrica central com extremidades elipsoidais e dividida em colunas verticais. Os resultados indicam que: (a) à medida que a proporção do comprimento da superfície de ruptura com a altura vertical do talude diminui, os efeitos 3D aumentam, ou seja, a proporção do fator de segurança 3D/2D aumenta; (b) efeitos 3D são pequenos para taludes não coesivos e grandes para taludes coesivos e; (c) a proporção do fator de segurança 3D pelo fator de segurança 2D pode ser inferior para o procedimento 3D de Fellenius (1936). Ele relata três estudos históricos de campo que mostram que os efeitos 3D aumentam o fator de segurança entre 5 e 30% em solos coesivos. Tal método é considerado nesse estudo.

O método proposto por Hungr (1987) satisfaz o equilíbrio de forças na direção vertical e o equilíbrio global de momentos e é aplicável apenas em taludes homogêneos e em superfícies de ruptura circular, assim como no método simplificado de Bishop (1955), do qual é baseado. Hungr (1987) faz uma análise comparativa com o método de Chen e Chameau (1982) na qual, os resultados mostram que seu procedimento estima valores para o fator de segurança 3D que são maiores que os relatados por Chen e Chameau (1982). Além disso, para materiais não coesivos, Hungr (1987) mostra que a relação entre o fator de segurança 3D e o fator de segurança 2D se aproxima, mas não está abaixo, de um.

Hungr et al. (1989) mostra que seu método prevê, com precisão, o fator de segurança 3D para superfícies circulares e simétricas, sendo assim, é aplicável a uma vasta gama de problemas práticos, similar ao que ocorre com o seu método equivalente em 2D. No entanto,

os resultados tendem a ser conservadores para algumas superfícies não circulares e assimétricas. Os autores afirmam que este último pode ser atribuído ao desequilíbrio de forças laterais para geometrias assimétricas bem como por negligenciar tensões de cisalhamento internas que surgem em geometrias não circulares e assimétrica. Dessa forma, e por não serem métodos rigorosos, além de possuírem aplicações limitadas, os métodos propostos por Hungr (1987) e Hungr et al. (1989) não são considerados nesse estudo.

Gens et al. (1988) usam seu procedimento de estabilidade para analisar onze casos históricos de campo. Essa iniciativa é prudente, mas os autores consideram apenas um tipo de problema de estabilidade de taludes (taludes homogêneos, isotrópicos e puramente coesivos). Os resultados também mostram que o método previu corretamente o modo de falha (isto é, no talude, no pé do talude ou na base do talude), mas não a superfície de deslizamento real. Além disso, os autores não conseguem comparar os resultados de seu procedimento com os de outros procedimentos de estabilidade em 3D e, também, tal método satisfaz apenas as condições de equilíbrio de momentos, não sendo um método rigoroso de análise. Por essas razões, essa metodologia não é considerada nesse estudo.

O primeiro método proposto por Seed et al. (1990) denominado "Análise de bloco múltiplo – Abordagem de equilíbrio de força" (*Multiple Block Analysis – Force-Equilibrium Approach*), oferece a vantagem de ser analiticamente correto, estaticamente determinado, considerando o equilíbrio de forças e, assim, facilmente reproduzível. No entanto, não é claro que essa análise atende aos requisitos de compatibilidade cinemática associados ao modo real da ruptura, o que provavelmente envolve alguns movimentos fora do plano de ruptura e algum grau de falha progressiva. Por esse motivo, uma abordagem alternativa também foi desenvolvida.

O segundo procedimento de análise, referido como "Análise de blocos múltiplos que permite movimentos diferenciais da massa deslizante" (*Multiple Block Analyses Allowing for Differential Movements of Slide Mass*) embora permita direções não-uniformes para o deslizamento potencial, ele não satisfaz o equilíbrio de forças ou de momentos. Além disso, apesar de contornar o problema relacionado a compatibilidade cinemática associada ao modo de ruptura real, a solução encontrada para resolver esse problema foi estipular, conforme julgamento dos autores, uma tolerância para efeitos não considerados na abordagem anterior

de cerca de 5%. Dessa forma, conforme os autores, os resultados determinados pelo primeiro método podem ser adequadamente reduzidos por esse valor.

Apesar das vantagens apresentadas pelos métodos propostos e das formas consideradas para contornar alguns problemas existentes, os métodos propostos, conforme os próprios autores, por necessitarem que o usuário faça algumas considerações relevantes, podem gerar erros em torno de 10% e, dessa forma, não são considerados nesse estudo.

Os resultados de Cavounidis e Kalogeropoulos (1992) mostraram que o fator de segurança 3D é sempre maior do que o fator de segurança 2D correspondente, estando, com isso, de acordo com os resultados de Cavounidis (1987). Também descobriram que a diferença entre fatores 3D e 2D, de segurança, diminui à medida que se aumenta o comprimento da parte cilíndrica e mantém-se o comprimento constante das extremidades cônicas. Em oposição, o papel da análise 3D torna-se mais importante ao aumentar o comprimento das extremidades cônicas em um comprimento constante da superfície de ruptura. Além disso, mostraram que, para um comprimento da parte cilíndrica maior que quatro vezes a altura do talude a relação entre o fator de segurança 3D e 2D é sempre menor que 1.1. Tal procedimento é uma boa aproximação da influência do efeito de borda e outros parâmetros no fator de segurança.

Todavia, apesar de suas vantagens e de demonstrar características importantes em uma análise 3D, o método proposto por Cavounidis e Kalogeropoulos (1992) satisfaz apenas o equilíbrio de momentos, não sendo, por tanto, um método rigoroso. Além disso, a superfície de ruptura obtida não é a superfície de ruptura crítica e o método é aplicável apenas em superfícies de rupturas simétricas e taludes coesivos e, assim, não é considerado nesse estudo.

O método proposto por Lam e Fredlund (1993) apresenta a teoria e a implementação de um modelo de estabilidade de taludes tridimensional mais generalizado. Os autores consideram zero as forças entre colunas para taludes com geometrias simples e uniformes e, para taludes com geometria não-uniforme, os autores decidiram ignorar três das cinco forças entre colunas devido a sua magnitude relativamente pequena, o que permite considerar as mesmas como zero. Conforme Lam e Fredlund (1993), a formulação do método proposto é "geral" do ponto de vista do equilíbrio limite, mas deve-se notar que não é "geral" do ponto de vista cinemático, uma vez que nada é indicado no método em relação à direção do movimento ou a possibilidade de mudança de direção dentro da massa deslizando. Apesar de tais premissas negativas, Lam e Fredlund (1993) apresentam um método que satisfaz todas as condições de

equilíbrio (forças e momentos) e que é aplicável a qualquer forma de superfície de ruptura e, dessa forma, esse método é considerado nesse estudo, mas deve ser usado com cuidado devido suas simplificações.

Yamagami e Jiang (1997) propuseram um método que foi o primeiro a permitir encontrar a direção de deslizamento ao invés de usar um plano de simetria ou uma direção de deslizamento assumida. Além disso, tal método é capaz de determinar o fator de segurança mínimo e a correspondente superfície de ruptura crítica. No entanto, ele satisfaz apenas as condições de equilíbrio de forças (horizontal e vertical) e fica restrito às encostas suaves, com inclinação até 45 graus. Também, esse método usou um processo extremamente demorado para encontrar a direção de deslizamento. Assim, apesar de apresentar um programa para os cálculos necessários, o método é de difícil utilização prática.

A extensão proposta por Jiang e Yamagami (2004) ao método de Yamagami e Jiang (1997) satisfaz as condições de equilíbrio de forças (horizontal) e de momentos. Assim, os autores concluíram que o uso de condições de equilíbrio de força e de momentos na busca do fator de segurança aumenta a confiabilidade dos resultados. Esse método, também permite encontrar a direção de deslizamento e é capaz de determinar o fator de segurança mínimo e a correspondente superfície de ruptura crítica. No entanto, apesar de apresentar uma matemática mais fácil de ser compreendida e aplicada, o método ainda é complicado de ser aplicado no cotidiano. Com isso, nenhuma das metodologias propostas é considerado nesse estudo.

Huang e Tsai (2000) eliminam dois grandes problemas inerentes a alguns métodos 3D já apresentados: (a) o trabalho envolvido em determinar um plano de simetria pois, em áreas de condições geométricas e/ou geológicas irregulares, a direção potencial de deslizamento pode variar consideravelmente e; (b) o trabalho envolvido em determinar um sistema de coordenadas local para várias superfícies potenciais de ruptura, ou seja, ao usar tais métodos, um sistema de coordenadas local deve ser estabelecido para que os eixos sejam idênticos à direção assumida de deslizamento.

Dessa forma, ao usar o método proposto, a direção possível de deslizamento para uma superfície de ruptura semiesférica ou composta é uma parte da solução analítica, em vez de uma suposição. Possíveis erros, associados a assumir um plano simétrico para uma massa de ruptura 3D sob condições assimétricas, podem ser eliminados. Além disso, o método satisfaz o

equilíbrio de momento em ambas as direções (transversal e paralela) mas apenas o equilíbrio de forças verticais é considerado (as forças horizontais entre colunas são ignoradas).

Huang et al. (2002) por sua vez, aprimoram o método anterior de Huang e Tsai (2000) tornando o problema aplicável a mecanismos de ruptura não rotacionais e válido para formulações de equilíbrio limite em um sistema de coordenadas 3D unificado. Além disso, passa a satisfazer todas as condições de equilíbrio (força e momento). Todavia Huang et al. (2002) indicam que seu procedimento não incorpora a resistência ao cisalhamento lateral paralelamente à direção do deslizamento e, portanto, um erro no valor calculado do fator de segurança 3D do talude pode ocorrer até certo ponto, dependendo da geometria da massa deslizando e da inclinação do plano de ruptura.

Cheng e Lau (2008) indicam que, como as direções de deslizamento das colunas do solo não são únicas nos procedimentos 3D de Huang e Tsai (2000) e Huang et al. (2002) e algumas colunas estão se separando, o processo de soma para o cálculo de FS pode não ser aplicável. Além disso, Cheng e Yip (2007) demonstram que, sob carga transversal, a exigência de diferentes direções deslizantes para diferentes colunas do solo pode levar a problemas de convergência. Com isso, tais métodos não são considerados nesse estudo.

Ao aplicar um conceito de equilíbrio de limite e assumir uma superfície de deslizamento pré-existente, o método proposto por Chang (2002) estima apropriadamente a força desenvolvida ao longo dos contatos dos blocos, mas considera apenas o equilíbrio de forças para blocos individuais bem como para o sistema geral também. Tal método é considerado nesse estudo.

Com base em comparações de uma série de problemas hipotéticos 2D e 3D de solução conhecida, Chang (2002) diz que o método é geralmente preciso para a análise de estabilidade de taludes envolvendo movimentos de massa do tipo translacional, no entanto, para movimentos de massa do tipo rotacional em argilas, o método parece superestimar o fator de segurança, no entanto, o grau de superestimação deverá diminuir se o número de blocos na simulação da massa deslizando aumentar. Devido ao padrão de contato entre os blocos, que permite uma cinemática entre eles onde os materiais são assumidos como deformando sob volume constante, o método é aplicável a materiais que não se dilatariam ou que se dilatariam pouco durante o cisalhamento, como areias soltas, argilas normalmente consolidadas ou

materiais em condições de carregamento não drenadas, no entanto, não é totalmente aplicável para areias densas ou materiais excessivamente consolidados sob condições drenadas.

Os resultados do estudo de Chen et al. (2003) mostraram que, com o método proposto, o fator de segurança 3D é semelhante a outros métodos 3D em problemas simétricos, mas fatores de segurança 3D maiores foram alcançados em casos altamente assimétricos. Outra característica desse método é a facilidade de ser empregado. Quando comparado com o método 2D de Spencer, apenas uma equação, para o equilíbrio na direção z , foi adicionada e o procedimento de interação de *Newton-Raphson* permitiu uma convergência muito rápida. Além disso, o método proposto satisfaz todas as condições de equilíbrio (forças e momentos). No entanto, conforme os próprios autores, o método ainda representa uma abordagem simplificada, uma vez que a condição de equilíbrio estático não está completamente satisfeita para cada coluna, e alguns componentes de cisalhamento das forças entre colunas são negligenciados. Dessa forma, visto que sua aplicabilidade está relacionada apenas a praticidade e, para resultado coerentes, é necessário a utilização de métodos mais rigoroso, tal metodologia não é considerado nesse estudo.

Cheng e Yip (2007) desenvolveram um método que é uma simples extensão de métodos 2D no qual, os resultados são comparáveis aos obtidos por outros pesquisadores. O método proposto por eles é aplicável a problemas simétricos e altamente não-assimétricos com cargas transversais e, apenas uma direção de deslizamento pode ser determinada uma vez que, conforme os autores, a exigência de diferentes direções de deslizamento para diferentes colunas de solo pode levar a problemas de convergência. Em vistas dessa limitação, a hipótese de uma única direção de deslizamento pode ser uma formulação aceitável para a análise do estado limite final.

No entanto, a extensão do método 2D para 3D considerando os métodos simplificado de Bishop (1955) e simplificado de Janbu (1956; 1973) não consideram as forças de cisalhamento entre colunas, gerando condições de equilíbrio limite incompletas e, para o método de Morgenstern e Price (1965), não é possível manter o equilíbrio global e local sem pressupostos adicionais uma vez que a formulação para esse método em 3D é altamente indeterminada estaticamente. Apesar das limitações nas formulações, a aplicabilidade da análise assimétrica 3D proposta foi demonstrada por vários exemplos em que os resultados do método de Morgenstern e Price (1965) são semelhantes aos do método simplificado 3D Bishop

e do método 3D Janbu simplificado. A formulação proposta também pode prever as direções de deslizamento exatas, o que valida a aplicabilidade da presente formulação e, assim, tal método é considerado nesse trabalho.

O método proposto por Zheng (2009) é um dos poucos métodos rigorosos existentes, satisfazendo as seis condições de equilíbrio (força e momentos) para a massa deslizante e, assume que a superfície de ruptura possui uma forma geral com uma direção de deslizamento arbitrária e conhecida. No entanto, conforme mencionado anteriormente, Zheng (2012) diz que o método proposto por Zheng (2009) também pode ser considerado como o aprimoramento do método de Fellenius e que esse método não é capaz de acomodar superfícies de ruptura de forma complexa. Para corrigir o problema relacionado ao método de Zheng (2009), Zheng (2012) apresenta um novo método rigoroso de equilíbrio de limite em 3D, que se baseia na suposição de Morgenstern e Price. Apesar de apresentar alta precisão para alguns exemplos, o procedimento ainda precisa ser aplicado a condições mais difíceis.

Ambos os métodos apresentados por Zheng são excelentes avanços nos métodos rigorosos de análise utilizando a metodologia de equilíbrio limite. Todavia, devido a sua complexidade matemática, o fato de o autor apresentar apenas alguns exemplos de aplicação, não considerando estudos de caso bem como ainda precisar ser utilizado em situações mais complexas, sua aplicação a problemas do cotidiano ainda é limitada e, por isso, não são considerados nesse estudo.

O método proposto por Zhou e Cheng (2013) é um método rigoroso pois satisfaz todas as seis condições de equilíbrio (forças e momentos) e, pode realizar uma busca automática da superfície de ruptura crítica e determinar o fator de segurança para taludes tridimensionais ou deslizamentos de terra com uma superfície de deslizamento conhecida e de forma arbitrária. No entanto, o método não apresenta nenhum programa para facilitar sua utilização, o que o torna complicado de ser aplicado na prática, dessa forma, tal método não é considerado nesse estudo.

Com base nas características apresentadas acima, a Tabela 3-4 apresenta, para os procedimentos em três dimensões, quais métodos foram considerados no estudo e se os mesmos apresentam ábacos ou softwares que facilitem o seu uso.

Tabela 3-4 – Procedimentos em 3D de equilíbrio limite

Método	Considerado no estudo	Software
Baligh e Azzouz (1975); Azzouz e Baligh (1978)	Não	STAB3D
Hovland (1977)	Não	Não
Chen (1981); Chen e Chameau (1982)	Não	LEMIX e FEPSON
Dennhardt e Forster (1985)	Não	Não
Leshchinsky et al. (1985) * ¹ ; Leshchinsky e Baker (1986) * ² ; Baker e Leshchinsky (1987) * ³ ; Leshchinsky e Mullet (1988) * ⁴ ; Leshchinsky e Huang (1992) * ⁵	Não	Não
Ugai (1985) * ¹ ; Ugai (1988) * ²	Sim* ²	Não
Hungr (1987) * ¹ ; Hungr et al. (1989) * ²	Não	CLARA-3
Gens et al. (1988)	Não	F3SLOP e DEEPCYL
Seed et al. (1990) – Análise de bloco múltiplo – Abordagem de equilíbrio de força (<i>Multiple Block Analysis – Force-Equilibrium Approach</i>)	Não	Não
Seed et al. (1990) – Análise de blocos múltiplos que permite movimentos diferenciais da massa deslizando (<i>Multiple Block Analyses Allowing for Differential Movements of Slide Mass</i>)	Não	SS3D
Cavounidis e Kalogeropoulos (1992)	Não	Não
Lam e Fredlund (1993)	Sim	3D-SLOPE
Yamagami e Jiang (1997) * ¹ ; Jiang e Yamagami (2004) * ²	Não	3D-DYRANUT
Huang e Tsai (2000) * ¹ ; Huang et al. (2002) * ²	Não	Não
Chang (2002)	Sim	SSA-3D
Chen et al. (2003)	Não	STAB-3D
Cheng e Yip (2007)	Sim	3DSLOPE e RS ³
Zheng (2009) * ¹ ; Zheng (2012) * ²	Não	Não
Zhou e Cheng (2013)	Não	Não

Todos os procedimentos completos de equilíbrio limite 2D, ou seja, métodos que satisfazem todas as condições de equilíbrio (força e momento), apesar de fazerem uso de diferentes premissas, as mesmas, não possuem grande influência no fator de segurança. Assim,

pode-se dizer que nenhum procedimento que satisfaça todas as condições de equilíbrio é mais preciso do que outro. Já os métodos que consideram apenas as condições de equilíbrio de forças ou de momentos são consideravelmente menos precisos que os métodos rigorosos. Apesar disso, tais métodos apresentam suas vantagens e, caso sejam utilizados, devem ser manipulados de forma cautelosa, levando em conta suas limitações, descritas no item 3.1.1 desse trabalho.

As metodologias 2D apresentadas possuem extensões gráficas que buscam facilitar o trabalho inerente a uma análise de estabilidade de taludes. A precisão básica alcançável com essa metodologia é tão boa quanto a precisão com a qual a geometria do talude, densidades, forças de cisalhamento, poro-pressão e outros parâmetros necessários podem ser definidos. A principal limitação dos gráficos de estabilidade de taludes é que eles são desenvolvidos para condições simples e são necessárias aproximações para aplicá-los em condições reais. No entanto, se as aproximações necessárias forem feitas de forma criteriosa, resultados precisos podem ser alcançados mais rapidamente do que utilizando outros métodos. Recomenda-se, dessa forma, realizar análises preliminares usando métodos gráficos e análises finais, em etapas mais avançadas de um projeto, com métodos mais rigorosos.

Muitos dos métodos 3D existentes são extensões diretas de métodos 2D de estabilidade de taludes. Gens et al (1988) desenvolveram o método *Swedish Circle* para estabelecer um novo método 3D. O método de Hovland (1977) juntamente com o método de Ugai (1988) e Zheng (2009) foram desenvolvidos como extensões do método comum de fatias. O método simplificado de Bishop (1955) serviu de base para os métodos 3D de Hungr (1987), Ugai (1988), Hungr et al. (1989) e Cheng e Yip (2007). Ugai (1988), Hungr et al. (1989), Yamagami e Jiang (1997), Cheng e Yip (2007) propuseram diferentes métodos 3D, desenvolvendo o método de Junbu (1973). A extensão do método de Spencer (1967) forneceu vários métodos 3D de Chen (1981), Chen e Chameau (1982), Ugai (1988), Cheng et al. (2003) e Jiang e Yamagami, (2004). Os métodos de equilíbrio limite 3D de Cheng e Yip (2007) e Zheng (2012) foram estabelecidas como uma extensão do método de Morgenstern e Price (1965). Os métodos 3D de Lam e Fredlund (1993) e Huang et al. (2002) são uma extensão do método generalizado de fatias. Por extensão do método 2D de arco circular, Baligh e Azzouz (1975), Azzouz e Baligh (1978) e Cavounidis e Kalogeropoulos (1992) apresentaram extensões 3D.

Em oposição, alguns métodos, incluindo Dennhardt e Forster (1985), Huang e Tsai (2000), Chang (2002) e Zhou e Cheng (2013) usaram apenas os princípios de equilíbrio limite como sua teoria fundamental. Ugai (1985), Leshchinsky et al. (1985), Leshchinsky e Baker (1986), Baker e Leshchinsky (1987), e Leshchinsky e Mullet (1988) e Leshchinsky e Huang (1992) utilizaram a análise variacional ao lado dos princípios do equilíbrio limite para estabelecer seus métodos 3D.

Uma diferença importante entre as análises em 2D e 3D de taludes é a capacidade das análises em 3D de considerar a direção de deslizamento. Devido à natureza da análise 2D, o corpo deslizante tem que se mover através de uma direção assumida, mas métodos 3D permitem encontrar tal direção. Entre todos os métodos 3D existentes, apenas os métodos de Yamagami e Jiang (1997), Jiang e Yamagami (2004), Huang e Tsai (2000), Huang et al. (2002), Cheng e Yip (2007) e Zhou e Cheng (2013) propuseram algumas abordagens para determinar a direção de deslizamento. No entanto, todas essas metodologias apresentam restrições que acabam por limitar sua utilização conforme apresentado no item 3.1.3 desse capítulo.

Embora alguns métodos considerem uma forma geral para os taludes, outras premissas, como o uso de uma base teórica não confiável, ignorar a direção de deslizamento, restringir a forma da superfície de ruptura e considerar apenas problemas específicos, limitam a aplicação desses métodos. Conseqüentemente, uma equação eficiente para o fator de segurança 3D ainda é necessária para considerar as condições tridimensionais reais de um talude. Apesar disso, este estudo, mostrou que os métodos de equilíbrio do limite, tanto em 2D quanto em 3D são confiáveis e podem ser utilizados com confiança para investigar a estabilidade de encostas em determinadas situações. Estudos utilizando análises numéricas podem ser dispendiosos e não justificados, a menos que outras condições complexas estejam presentes. Assim, como mencionado anteriormente, o desenvolvimento de técnicas avançadas de busca e otimização são vitais para melhorar os métodos de equilíbrio de limite, que são adequados para alguns problemas de estabilidade de taludes.

3.2. ANÁLISE NUMÉRICA - Modelos

Embora os métodos de análise de equilíbrio limite sejam simples de usar e tenham sido bem adaptados aos problemas de estabilidade de taludes em maciços rochosos, eles não

podem representar deformação e/ou deslocamento da massa de ruptura. Esta deficiência foi amplamente preenchida por métodos de análise numérica, que podem modelar muitas das condições complexas encontradas em encostas rochosas, como o comportamento de tensão-deformação não linear, anisotropia e mudanças na geometria (READ; STACEY, 2009).

Segundo Lorig e Varona (2001), modelos numéricos são programas de computador que tentam representar a resposta mecânica de um maciço rochoso submetido a um conjunto de condições iniciais (tensões in situ, níveis de água), condições de contorno e mudanças induzidas (escavação em minerações a céu aberto ou subterrânea). Tais modelos geralmente geram, como resultado de uma simulação, duas condições: equilíbrio ou colapso. Se um resultado de equilíbrio for obtido, as tensões e deslocamentos resultantes em qualquer ponto da massa rochosa podem ser comparados com os valores medidos. Caso um resultado de colapso seja o resultado, o modo de falha previsto será demonstrado sendo possível, ainda, em ambos os casos, calcular o fator de segurança.

Segundo Wyllie e Mah (2005), existem diversas razões pelas quais análises numéricas são utilizados para estudos de estabilidade de taludes, incluindo:

- a. Métodos numéricos podem ser extrapolados, com confiança, além de seu banco de dados em comparação com os métodos empíricos onde o modo de ruptura é explicitamente definido;
- b. Outros métodos, como equilíbrio limite, não estão disponíveis ou tendem a simplificar demais o problema, possivelmente levando a soluções excessivamente conservadoras;
- c. As principais características geológicas, presença de água e outros fatores, podem ser incorporadas em modelos numéricos, proporcionando aproximações mais realistas do comportamento do talude;
- d. O comportamento físico observado pode ser explicado;
- e. Várias possibilidades de análise podem ser consideradas.

No entanto, a modelagem numérica apresenta alguns problemas segundo Lorig e Varona (2001) como, por exemplo, a dificuldade na representação de falhas progressivas. Esse mecanismo é complexo e de pouco conhecimento, o que dificulta a sua modelagem. As principais causas que envolvem esse tipo de falha são: (a) acumulação de tensão nas estruturas

principais e/ou no maciço rochoso; (b) aumento da poro-pressão e; (c) deformação em função do tempo do material sob certa condição de carregamento (*creep*).

Além disso, muitos dos detalhes do comportamento do maciço rochoso são desconhecidos e incognoscíveis; portanto, a abordagem da modelagem não é tão direta como é, digamos, em outros ramos da mecânica. É impossível – e indesejável – incluir todos os recursos e detalhes dos mecanismos de resposta do maciço rochoso, em um único modelo. Dessa forma, a modelagem exige que o problema real seja idealizado ou simplificado, para se adequar às restrições impostas por fatores como os modelos de material disponíveis e a capacidade do computador utilizado (WYLLIE; MAH, 2005).

Os modelos numéricos dividem a massa rochosa em elementos onde cada um recebe uma relação tensão-deformação idealizada e propriedades que descrevem como o material se comporta. Tais elementos podem ser conectados em um modelo contínuo ou separados por descontinuidades em um modelo descontínuo. No caso de um modelo contínuo, as descontinuidades são inseridas apenas com a intenção de representar um maciço rochoso da forma mais real possível. Para o caso dos modelos de descontínuos as descontinuidades dentro dos modelos estão representadas explicitamente. Elas são incluídas com uma determinada orientação e localização dentro do talude em busca do comportamento e a influência que apresentaram na estabilidade do mesmo.

Bray (1967) demonstrou que, uma rocha que contém dez ou mais famílias de descontinuidades, seu comportamento pode ser aproximado ao comportamento de uma massa homogênea (modelo contínuo) com apenas 5% de erro. Além disso, se uma rocha é maciça e contém poucas descontinuidades (menos de três famílias de descontinuidades), ela poderia idealmente se comportar como um meio homogêneo. Hoek e Brown (1980), por sua vez, mostraram que a homogeneidade é uma característica dependente do tamanho da amostra. Se o tamanho da amostra for consideravelmente reduzido, a rocha mais heterogênea se tornará uma rocha homogênea (Figura 2.1).

3.2.1. Modelos contínuos

Os modelos contínuos assumem que o material é contínuo em todo o corpo e são reconhecidos pela sua utilidade na representação e análise de taludes em solo, maciços de

rocha intacta, rochas brandas ou materiais altamente fraturados semelhantes a um solo. Os códigos contínuos geralmente são relacionados com os métodos de diferenças finitas, elementos finitos e elementos de contorno.

Tais modelos são amplamente utilizados por sua facilidade na etapa de modelagem, todavia, não são capazes de representar ou descrever a trajetória da falha. A resposta da análise é determinada pela localização ou pré-visualização das variações e concentração de tensões e deformações dentro do modelo. Dessa forma, o problema com os modelos contínuos está relacionado com a determinação da “superfície de ruptura”, a qual, ao não estar bem definida e se determinar uma como “possível”, em alguns casos pode levar ao erro, principalmente nos casos dos taludes de grande altura e as suas distintas etapas de escavação (AGUILERA, 2009).

3.2.2. Modelos descontínuos

Os modelos descontínuos requerem inicialmente a localização das discontinuidades ou estruturas geológicas preexistentes no maciço rochoso antes de começar a análise. Diferentemente dos modelos contínuos, esses representam as discontinuidades com a existência de contatos ou interfaces entre corpos discretos que compõem o sistema. Sua principal característica e virtude é a possibilidade de representar o comportamento das juntas ou estruturas presentes num talude, além dos deslocamentos sofridos pelas deformações da matriz rochosa e, geralmente, estão relacionados ao método dos elementos discretos (AGUILERA, 2009).

Normalmente, apenas uma porcentagem muito pequena de juntas ou estruturas pode ser incluída, para criar modelos de tamanho razoável para análise prática. Os dados da geometria estrutural devem ser filtrados para selecionar apenas as estruturas críticas para a resposta mecânica. Isso é feito identificando as que são mais suscetíveis a deslizamento e/ou separação para a condição de carregamento prescrito e pode envolver a determinação da existência de liberdade cinemática suficiente e, assim, calibrar a análise comparando o comportamento observado com a resposta do modelo.

O desenvolvimento e o uso de códigos descontínuos nas análises de estabilidade de taludes representaram um grande passo adiante na modelagem do efeito de estruturas em maciços rochosos estreitamente articulados. No geral, no entanto, a necessidade de limitar o

número de falhas e articulações para criar modelos de um tamanho que, realmente, possa ser tratado por esses códigos representa uma lacuna crítica em nossa capacidade de compreender e modelar adequadamente os mecanismos de falha que podem desenvolver-se em maciços fraturados (READ; STACEY, 2010).

3.3. ANÁLISE NUMÉRICA - MÉTODOS

3.3.1. Modelos contínuos

O método das diferenças finitas, conforme Sinha (1989), por se tratar de uma aproximação explícita, facilita a análise do comportamento de problemas ao longo do tempo, permitindo uma análise passo a passo dos possíveis mecanismos de ruptura, ou seja, problemas formados por vários estágios. Além disso, é recomendado para modelar o comportamento de materiais não lineares e sistemas instáveis como maciços rochosos com um alto grau de fraturamento. Visto que não há formação de matrizes, não há necessidade de capacidade de processamento e armazenamento computacional muito grande permitindo análise de deslocamentos maiores sem grandes esforços computacionais além de, maior eficiência em análises dinâmicas. No entanto, a utilização em problemas estáticos poderá exigir mais tempo de computação do que os restantes métodos numéricos.

Griffiths e Lane (1999) mostraram que o método de elementos finitos pode ser usado como uma alternativa aos métodos de equilíbrio limite, em uma análise de estabilidade de taludes, sem que se faça necessário um conjunto de dados e habilidades muito além daquelas necessárias aos métodos de equilíbrio limite. Os mesmos parâmetros de entrada necessários para as análises de equilíbrio limite, são suficientes para avaliar a estabilidade utilizando os métodos de elementos finitos. Uma vez que não se faz necessário dividir a massa de ruptura em fatias verticais, também não se faz necessário o uso de premissas para as forças entre fatias. Tal método é capaz de determinar a superfície de ruptura por meio do cálculo das tensões, não sendo preciso a procura de uma superfície de escorregamento crítica, necessária nos métodos de equilíbrio limite (GRIFFITHS; LANE, 1988). Além disso, o método dos elementos finitos mostra flexibilidade no manejo de materiais heterogêneos e problemas dinâmicos bem como, eficiência no tratamento de modelos constitutivos complexos e fraturados. Esse método é

capaz de simular condições saturadas e não saturadas e é adequado para análises de solo, rocha ou modelos solo-rocha. No entanto, apesar de grandes vantagens, pode ser necessário uma quantidade considerável de tempo para preparar os dados de entrada e o usuário deve estar atento às limitações do modelo/programa, incluindo, por exemplo, efeitos de tamanho de malha. Outra característica desfavorável do método é que, maciços rochosos pouco fraturados podem ser modelados usando interfaces, mas geralmente, maciços muito fraturados não são adequadamente representados.

No método dos elementos de contorno, o sistema de equações é relativamente pequeno, comparado ao método dos elementos finitos, com isso, uma capacidade menor de processamento e armazenamento é suficiente para o método e, a introdução e extração de dados é relativamente simples e de processamento fácil. Trata-se de um método eficiente e econômico para modelos 2D e 3D quando a maior preocupação está relacionada ao contorno dos modelos. No entanto, hoje em dia a capacidade da maior parte dos programas de elementos de contorno, com algumas exceções, está limitada ao comportamento linear constitutivo do maciço, assim, características mais complexas de construção e simulação em função do tempo não são de fácil modelação.

3.3.2. Modelos descontínuos

O método dos elementos discretos é especialmente útil para estudos cinemáticos de sistemas de blocos grandes e onde a magnitude dos movimentos de blocos que podem ser analisados é grande em comparação com o obtido na maioria dos modelos contínuos. Além disso, a capacidade computacional necessária é comparativamente pequena. Apesar de tais vantagens, a computação requer como dados de entrada a localização e orientação das juntas e, dependendo do projeto, essa informação pode ser de difícil obtenção. Conforme demonstrado no item 2.3.1.4 do presente trabalho, o método dos elementos discretos, apresenta algumas variações, com algumas diferenças entre si. Entre essas variações, podemos citar o método dos elementos distintos, DDA (*Discontinuous Deformation Analysis*) e PFC (*Particle Flow Code*), os quais, as vantagens e desvantagens de suas aplicações estão apresentadas abaixo:

- a. **Método dos elementos distintos:** devido sua natureza dupla (representa o comportamento de dois tipos de materiais diferentes: descontinuidades e maciço),

é recomendado para problemas que envolvem taludes fraturados. Tal método é altamente aplicável para modelar instabilidades controladas por descontinuidades e simular grandes deslocamentos devido a escorregamentos ou aberturas ao longo de descontinuidades, sendo muito útil para rochas de baixa resistência, tombamentos flexurais e outros modos complexos de ruptura de um talude. Além disso, também é utilizado para simular a ação de fatores externos como presença de poro-pressão e atividade sísmica no movimento dos blocos. Apesar das inúmeras vantagens que o método dos elementos distintos oferece, assim como o método dos elementos discretos, nesse procedimento a computação requer dados precisos das juntas e descontinuidades, dessa forma, uma informação não precisa sobre a localização, orientação e/ou espaçamento de uma descontinuidade, por exemplo, pode gerar resultados imprecisos;

- b. **DDA (*Discontinuous Deformation Analysis*)**: tal método, também é utilizado em problemas que envolvem taludes fraturados mas difere dos anteriores uma vez que as fórmulas utilizadas são mais simples, o que facilita o cálculo computacional. Além disso, o método tem a capacidade de modelar grandes deformações e movimentos de blocos rígidos além de simular o estado de união ou falha entre blocos. Todavia, a maior desvantagem desse método reside no fato de que todo o contato adicional introduzido resulta em uma mudança no número de equações a serem resolvidas, assim, modelos muito fraturados podem apresentar dificuldades de cálculo. Também, apresenta problemas na determinação do fator de segurança de materiais coesivos, gerando valores muito inferiores para esses casos.
- c. **PFC (*Particle Flow Code*)**: esse código é capaz de simular o fluxo granular de partículas, movimentos translacionais entre blocos, fraturas em uma rocha intacta e a resposta dinâmica do maciço a uma detonação ou atividade sísmica. No entanto, apesar de sua vasta capacidade, os dados computacionais necessários para sua utilização acabam limitando-o.

3.3.3. Modelos híbridos

Cada método numérico pode ser usado de forma mais eficiente ao ser combinado a outro método por duas razões distintas. Primeiro, os pontos fortes de cada método podem ser preservados e suas fraquezas podem ser eliminadas. Em segundo lugar, a combinação de métodos individuais pode criar um modelo que melhor descreve o problema (SINHA, 1989). No entanto, problemas mais complexos envolvem uma maior capacidade computacional além de necessitar de calibrações contínuas ao modelo.

Todos os métodos apresentados nesse trabalho são considerados na metodologia final que será apresentada uma vez que, cada procedimento descrito possui uma aplicabilidade diferente do outro. A Tabela 3-5, abaixo, apresenta um resumo dos métodos de análise numérica considerados nesse estudo.

Tabela 3-5 – Procedimentos de análise numérica (continua)

Modelo	Método	Vantagens	Desvantagens	Software
	Diferenças finitas	Análise passo a passo dos possíveis mecanismos de ruptura Modela o comportamento de materiais não lineares e sistemas instáveis Não há formação de matrizes	Utilização em problemas estáticos poderá exigir mais tempo de computação	FLAC e FLAC3D (Itasca consulting group)
Contínuo	Elementos finitos	Determina a superfície de ruptura por meio do cálculo das tensões Flexibilidade no manejo de materiais heterogêneos e problemas dinâmicos Capaz de simular condições saturadas e não saturadas Adequado para análise de solo, rocha ou modelos solo-rocha	Pode ser necessário uma quantidade considerável de tempo para preparar os dados de entrada O usuário deve estar atento às limitações do modelo/software Maciços muito fraturados não são adequadamente representados	PLAXIS 2D e PLAXIS 3D (Plaxis) RS ² (Rocscience)

Procedimentos de análise numérica (continuação)

Contínuo	Elementos de contorno	Capacidade menor de processamento e armazenamento	Capacidade limitada ao comportamento linear constitutivo do maciço (caraterísticas mais complexas de construção e simulação em função do tempo não são de fácil modelação)	-
		Introdução e extração de dados relativamente simples e de processamento fácil		
		Método eficiente e econômico para modelos 2D e 3D quando a maior preocupação está relacionada ao contorno dos modelos		
	Elementos discretos	Útil para estudos cinemáticos de sistemas de blocos grandes e onde a magnitude dos movimentos de blocos que podem ser analisados é grande em comparação com o obtido na maioria dos modelos contínuos	Computação requer como dados de entrada a localização e orientação das juntas – tal informação pode ser difícil de obter de forma correta e precisa	-
		Capacidade computacional necessária pequena.		
Descontínuo	Elementos discretos	Recomendado para problemas que envolvem taludes fraturados	Computação requer como dados de entrada a localização e orientação das juntas – tal informação pode ser difícil de obter de forma correta e precisa	UDEC e 3DEC <i>(Itasca consulting group)</i>
		Altamente aplicável para modelar instabilidades controladas por descontinuidades e simular grandes deslocamentos devido a escorregamentos ou aberturas ao longo de descontinuidades		
		Muito útil para rochas de baixa resistência, tombamentos flexurais e outros modos complexos de ruptura de um talude		
		Utilizado para simular a ação de fatores externos como presença de poro-pressão e atividade sísmica no movimento dos blocos		

Procedimentos de análise numérica (conclusão)

Descontínuo	Elementos discretos	DDA	Utilizado em problemas que envolvem taludes fraturados	Todo o contato adicional introduzido resulta em uma mudança no número de equações a serem resolvidas	-
			Capacidade de modelar grandes deformações e movimentos de blocos rígidos		
			Simula o estado de união ou ruptura entre blocos	Apresenta problemas na determinação do fator de segurança de materiais coesivos	
			Fórmulas utilizadas são mais simples, o que facilita o cálculo computacional		
		PFC	Capaz de simular o fluxo granular de partículas		
			Movimentos translacionais entre blocos	Dados computacionais necessários para sua utilização acabam limitando-o	PFC2D e PFC3D (Itasca consulting group)
			Fraturas em uma rocha intacta		
			Resposta dinâmica do maciço a uma detonação ou atividade sísmica		
Híbrido	-		Pontos fortes de cada método podem ser preservados e suas fraquezas podem ser eliminadas	Problemas mais complexos envolvem uma maior capacidade computacional	-
			Pode criar um modelo que melhor descreve o problema	Calibrações contínuas ao modelo	

Ao longo das últimas décadas, os avanços no uso de métodos computacionais na mecânica de rochas têm sido impressionantes, especialmente em métodos de análise numérica, com base em abordagens contínuas e descontínuas. Apesar de todos os avanços, as metodologias utilizadas ainda podem ser inadequadas quando enfrentamos os desafios impostos na prática e especialmente quando a representação adequada do modelo ou das discontinuidades são uma condição prévia para uma modelagem bem-sucedida. Jing e Hudson (2002) apresentam alguns problemas de grande importância existentes na modelagem numérica:

- a. Necessidade de avaliação sistemática de incertezas geológicas e de engenharia;

- b. Compreensão e representação matemática de grandes fraturas na rocha;
- c. Quantificação da forma, tamanho, conectividade e efeito das fraturas;
- d. Representação das propriedades do maciço rochoso e do comportamento como um contínuo equivalente;
- e. Representação do comportamento da interface;
- f. Efeitos escala;
- g. Representação numérica de processos de engenharia;
- h. Efeitos relacionados ao tempo;
- i. Capacidades computacionais para estudos em grande escala.

Os métodos numéricos e as técnicas de computação tornaram-se ferramentas diárias para a formulação de modelos conceituais e teorias matemáticas que integram diversas informações sobre geologia, física, técnicas de construção, economia, meio ambiente bem como suas interações. Como resultado da experiência obtida com a modelagem numérica nas últimas décadas, tornou-se bastante claro que o passo mais importante nessa área é, talvez, não apenas operar o código computacional de determinado método, mas, sim, a "contextualização" anterior do problema em termos de processos dominantes, propriedades, parâmetros e perturbações, e suas representações matemáticas. O sucesso na modelagem numérica para mecânica de rocha e problemas de engenharia pode depender, quase inteiramente, da qualidade da caracterização do maciço rochoso e do sistema de fratura existente. A capacidade de modelagem numérica de hoje pode lidar com sistemas de equações complexas e de grande escala, mas a representação quantitativa da física das rochas permanece, geralmente, questionável, embora tenham sido feitos muitos progressos nesse sentido.

Dessa forma, considerando as situações (aplicabilidade e limitações) apresentadas nesse capítulo, para cada método considerado nesse estudo, uma metodologia de análise para ruptura circular, objetivo principal dessa dissertação, será apresentada e, exemplos de aplicação para a mesma, demonstrando sua necessidade e forma de uso em alguns problemas práticos, será apresentado.

CAPÍTULO 4 - SUGESTÃO DE METODOLOGIA DE ANÁLISE

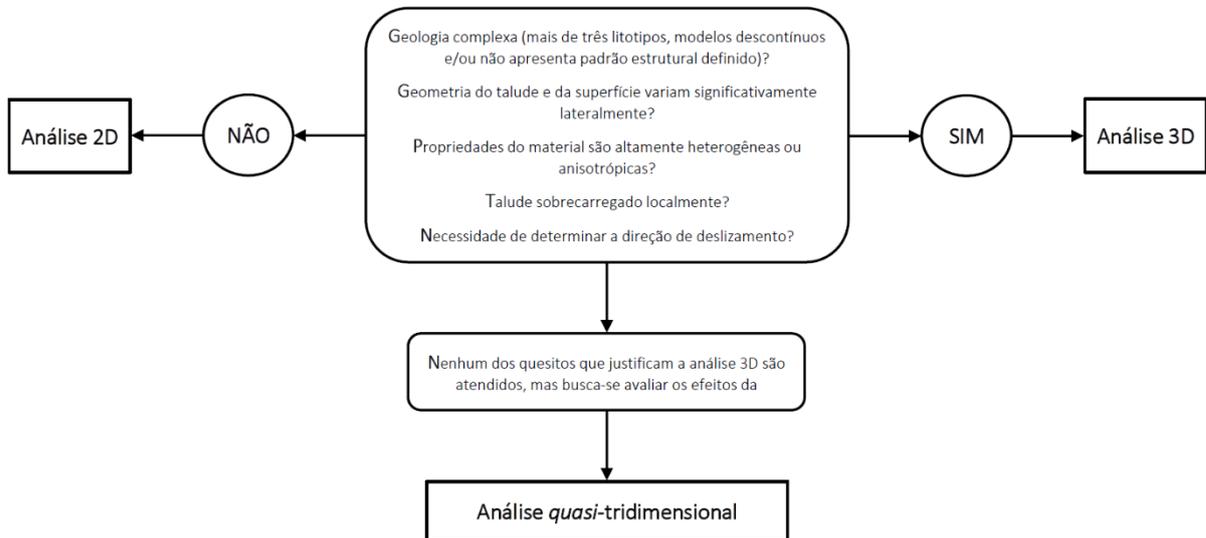
4.1. PROCEDIMENTO SISTEMÁTICO

O método a ser utilizado em um estudo de estabilidade de taludes depende do estágio em que o projeto se encontra. Estágios iniciais, onde a informação disponível ainda é limitada, podem ser analisados com metodologias mais simples, como métodos gráficos e/ou alguns métodos de equilíbrio limite, mas estágios mais avançados, onde a quantidade disponível de informação é maior e a necessidade de estudos mais precisos se faz necessária, devem ser analisados com métodos mais completos, como métodos rigoroso de equilíbrio limite e/ou análises numéricas. Por essa razão e, visto que, o método errado pode gerar resultados não coerentes com a realidade o que afetaria, diretamente, um estudo de estabilidade de taludes, a escolha da metodologia correta a ser empregada é de suma importância, uma vez que, as informações encontradas na literatura atual são, muitas vezes, erradas, desconhecidas e dúbias, podendo induzir o usuário ao erro. Visando preencher tal lacuna existente nos estudos de estabilidade de taludes e considerando as metodologias apresentadas no Capítulo 2 desse trabalho, uma metodologia, cujo objetivo é facilitar a escolha do método mais adequado, é apresentada abaixo. Para tanto, as vantagens e desvantagens de cada método, bem como as aplicações de cada um foram apresentadas no Capítulo 3 desse estudo.

A primeira questão a ser definida, na escolha de uma metodologia a ser utilizada, é qual a melhor forma de análise para o estudo, ou seja, se uma análise 2D, *quasi*-tridimensional ou 3D é mais adequada (Figura 4.1). Como apresentado na fundamentação teórica desse trabalho, essa escolha irá depender do maciço em que se está trabalhando. Caso o mesmo apresente uma geologia complexa, onde o maciço rochoso possui mais de três litotipos, quando é necessário a utilização de um modelo descontínuo e, quando o maciço rochoso não apresenta um padrão estrutural definido; quando a geometria do talude e da sua superfície variem significativamente lateralmente, não permitido uma representação coerente em 2D; caso as propriedades do material sejam altamente heterogêneas ou anisotrópicas; quando o talude estiver sobrecarregado localmente ou quando for necessário determinar a direção de deslizamento, nesses casos, recomenda-se uma análise tridimensional. Caso nenhuma dessas exigências seja necessária, recomenda-se o uso de análises bidimensionais ou *quasi*-

tridimensional (caso nenhum dos quesitos que justificam a análise 3D sejam atendidos, mas busca-se avaliar os efeitos da tridimensionalidade em um maciço rochoso).

Figura 4.1 – Parâmetros de decisão para forma mais adequada de análise: 2D, *quasi*-tridimensional e 3D



Fonte: Autoria própria

Determinada qual forma de análise será usada, é necessário determinar o uso de métodos de equilíbrio limite ou, se análises numéricas são mais recomendadas (Figura 4.2). Como visto nos capítulos anteriores, os métodos de equilíbrio limite 2D apresentam um grau de confiabilidade elevado uma vez que são utilizados a décadas em estudos geotécnicos, sendo, portanto, comprovada sua qualidade e eficiência. Todavia, uma vez que premissas são feitas para reduzir um problema tridimensional em um problema bidimensional, tais metodologias possuem aplicações limitadas e devem ser utilizadas com cuidado e atenção.

Por outro lado, apesar de existirem inúmeros procedimentos para os métodos de equilíbrio limite 3D os mesmos são, geralmente, extensões tridimensionais de métodos bidimensionais. Dessa forma, muitas vezes, mais premissas são necessárias que as metodologias 2D e, também, nem todas as condições de equilíbrio são consideradas sendo, muitas vezes, apenas ignoradas para facilitar a análise. Por esses motivos, muitas delas não são consideradas nesse estudo. No entanto, apesar de suas limitações, tais métodos ainda apresentam grandes qualidades uma vez que não simplificam um problema 3D em 2D. Portanto, parâmetros que muitas vezes não são considerados em análises bidimensionais podem ser analisados e interpretados nessas metodologias, com isso, ainda apresentam certa

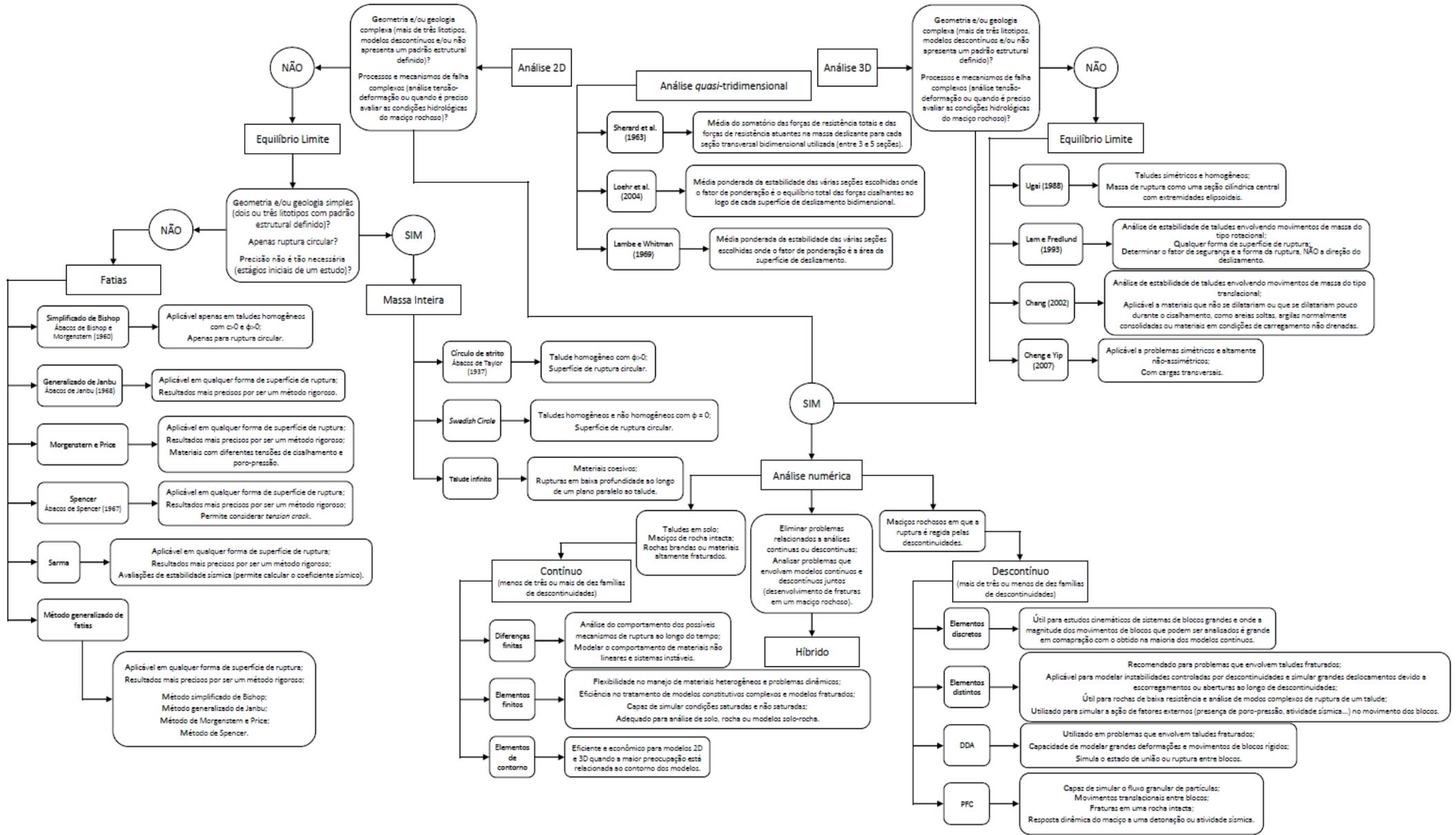
vantagem sobre os métodos 2D e, por isso, algumas metodologias, que se enquadravam nos requisitos adotados nesse estudo foram consideradas no procedimento final.

O último método apresentado nesse estudo (análise numérica) possui grandes vantagens sobre os métodos citados anteriormente, mas, no entanto, apresenta um custo econômico e computacional mais elevado o que, muitas vezes, limita sua aplicabilidade. Apesar disso, dependendo da situação, análises numéricas são mais recomendadas. Isso se aplica em casos em que o maciço rochoso apresenta uma geometria e/ou geologia complexa (mais de três litotipos e não apresenta um padrão estrutural definido) bem como processos e mecanismos de falha complexos e que não podem ser analisados pelos métodos clássicos de equilíbrio limite (análise tensão-deformação ou quando é preciso avaliar as condições hidrológicas do maciço rochoso). Caso nenhuma dessas exigências seja necessária, recomenda-se o uso de métodos de equilíbrio limite.

Outro ponto importante que deve ser determinado em uma análise de estabilidade de taludes, considerando as metodologias 2D, é determinar o uso de métodos que representam a massa de ruptura como uma forma inteira ou que a subdividem em fatias. Geometrias e geologias mais complexas (dois ou três litotipos com padrão estrutural definido), que apresentem tanto ruptura circular quanto não circular são melhores representadas por metodologias que utilizam métodos de fatias. Por outro lado, os métodos que consideram a massa de ruptura como uma massa inteira representam apenas rupturas circulares, mas devido sua simplicidade e fácil manuseio, em determinados casos, sua utilização ainda é válida.

Para estudos em 3D, outro ponto importante é a escolha do modelo que será considerado (modelos contínuos, descontínuos ou híbridos). Modelos contínuos são utilizados para estudos envolvendo taludes em solo, maciços em rocha intacta, rochas brandas ou materiais altamente fraturados semelhantes a um solo. Modelos descontínuos, por sua vez, são aplicados em maciços rochosos nos quais a ruptura é regida pelas discontinuidades. Recomenda-se a utilização de modelos contínuos em maciços com menos de três ou mais de dez famílias de discontinuidades, para outras situações, modelos descontínuos são mais recomendados. Modelos híbridos, são uma forma relativamente nova de lidar com problemas de estabilidade de taludes e são utilizados para eliminar os problemas relacionados a análises contínuas ou descontínuas, por exemplo, modelagem tanto de uma rocha intacta quanto do desenvolvimento de fraturas no modelo.

Figura 4.2 – Procedimento sistemático de escolha do método a ser utilizado: equilíbrio limite ou análise numérica



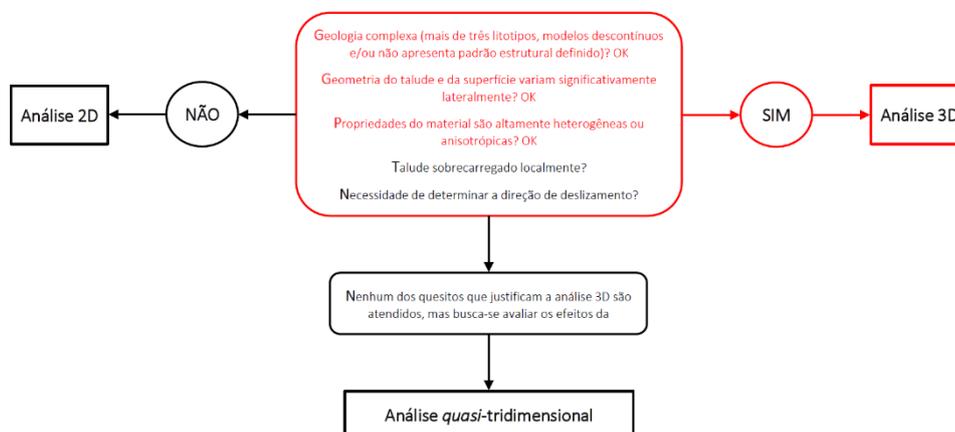
Fonte: Autoria própria

4.2. APLICAÇÕES DA METODOLOGIA

A metodologia proposta nesse estudo possui inúmeras aplicações e se faz necessária, uma vez que, muitas vezes, os dados encontrados na literatura não permitem uma boa interpretação acerca de sua utilização, o que pode confundir o usuário quanto a aplicação de determinada metodologia ou, ainda, a falta de conhecimento sobre qual método utilizar pode ocasionar que a escolha seja baseada em métodos mais conhecidos ou “amigáveis”, em detrimento de parâmetros técnicos e confiáveis. Assim, a escolha errada de uma metodologia pode gerar resultados incoerentes levando a interpretações erradas, prejudicando a segurança ou, ainda, inviabilizando um projeto. Dessa forma, tal metodologia deve ser sempre aplicada na escolha do melhor método a ser utilizado em um estudo de estabilidade de taludes. Para demonstrar a necessidade de sua aplicação, algumas situações práticas serão mencionadas para demonstrar o seu uso.

De forma geral, a utilização de métodos 2D é limitada pois, se reduz um problema 3D em um problema em duas dimensões e, com isso, não podemos representar a área de estudo de forma correta e coerente com a realidade. Dessa forma, em casos onde se trabalha com geometrias e/ou geologias complexas (mais de três litotipos e não há um padrão estrutural definido), onde há heterogeneidade subterrânea com materiais de resistência/rigidez contrastantes e, que variem lateralmente de forma significativa, é necessário a aplicação de métodos 3D de análise (Figura 4.3) uma vez que, devido sua alta variabilidade, a redução do problema em duas dimensões não irá representar de forma correta a realidade do estudo.

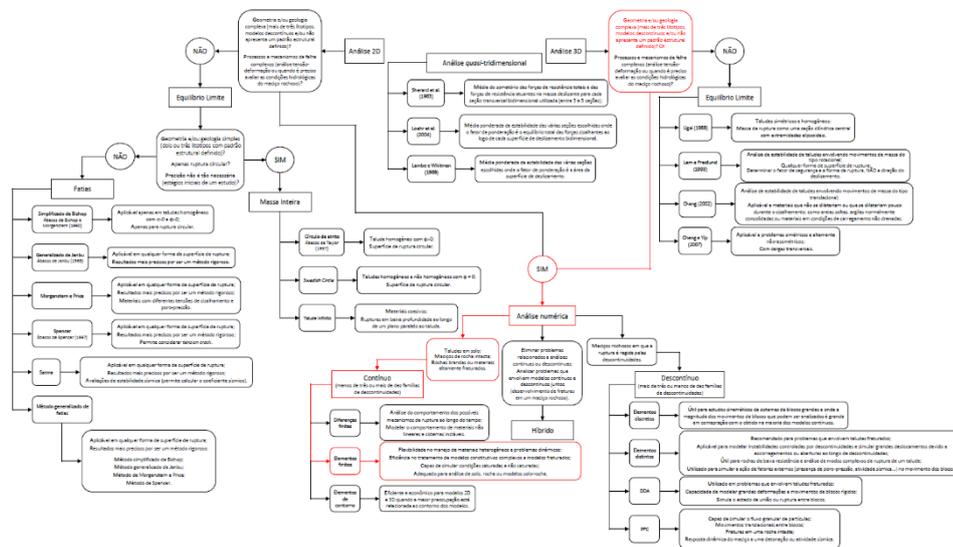
Figura 4.3 – Metodologia aplicada – Exemplo 1: Geologia complexa – Escolha da forma de análise



Fonte: Autoria própria

Assim, determinado a utilização de métodos 3D de análise e, considerando um maciço contínuo, a metodologia mais indicada para esse tipo de estudo é o método de análise numérica dos elementos finitos, como pode ser visto na Figura 4.4, uma vez que o mesmo apresenta flexibilidade no manejo de materiais heterogêneos além de ser eficiente no tratamento de modelos constitutivos complexos e, também, como nesse tipo de problema é improvável que a superfície de ruptura seja circular, métodos de equilíbrio limite não capturaram a geometria provável da superfície de ruptura.

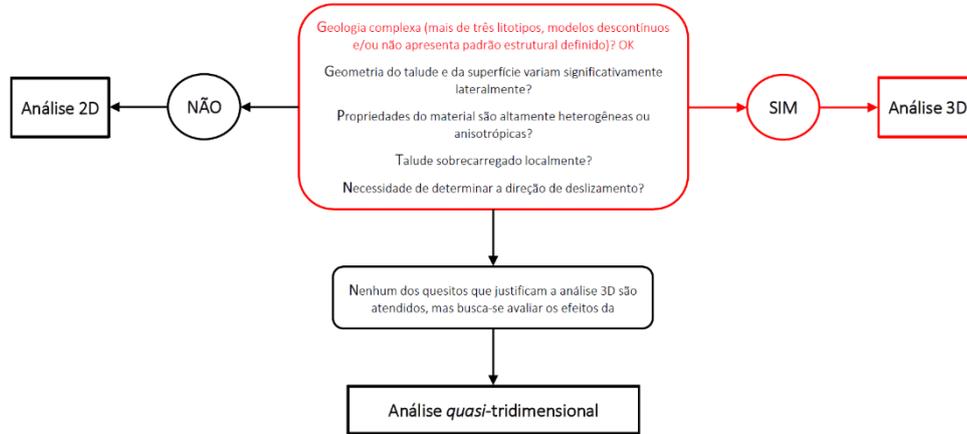
Figura 4.4 – Metodologia aplicada – Exemplo 1: Geologia complexa – Escolha do método de análise



Fonte: Autoria própria

Quando trabalhamos com taludes cuja ruptura está associada às descontinuidades, em determinadas situações, análises 3D são necessárias, visto que, as mesmas, dependendo de sua orientação, persistência, espaçamento e relação com as demais descontinuidades encontradas no maciço rochoso, ao serem reduzidas para ao plano, os efeitos causados pela tridimensionalidade são ignorados, levando a resultados incoerentes (Figura 4.5).

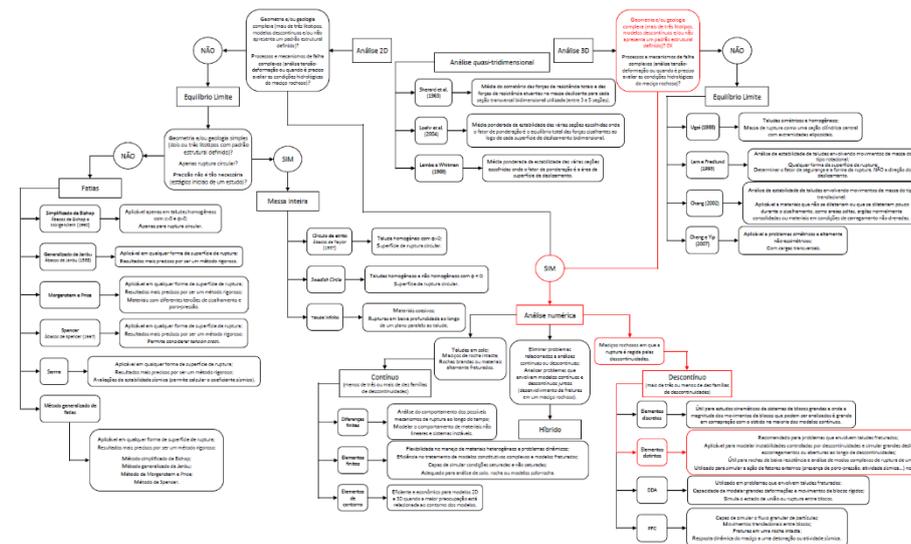
Figura 4.5 – Metodologia aplicada – Exemplo 2: Ruptura associada a descontinuidades – Escolha da forma de análise



Fonte: Autoria própria

A melhor metodologia a ser aplicada para situações em que a ruptura está associada a modelos descontínuos é a dos elementos distintos em 3D (Figura 4.6), uma vez que, tal metodologia, é recomendada para problemas que envolvam taludes fraturados além de ser altamente aplicável para modelar instabilidades controladas por descontinuidades e simular grandes deslocamentos devido a escorregamentos ou aberturas ao longo de descontinuidades, ao contrário dos métodos de equilíbrio limite, os quais representam apenas modelos contínuos, não sendo possível adicionar descontinuidades a análise.

Figura 4.6 – Metodologia aplicada – Exemplo 2: Ruptura associada a descontinuidades – Escolha do método de análise

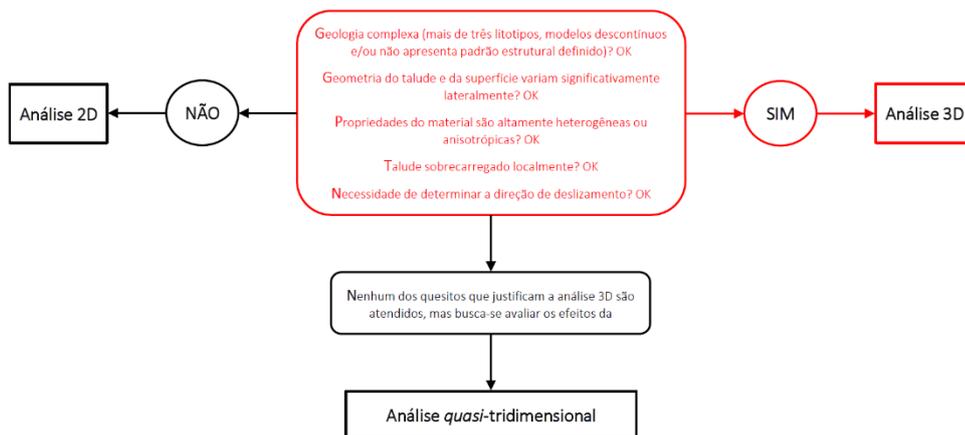


Fonte: Autoria própria

Barragens de rejeito ou pilhas de estéril são necessárias na mineração para o armazenamento, temporário ou definitivo, de materiais que não serão beneficiados. Como tais materiais não apresentam valor agregado (geram apenas custos), ocupam áreas que acabam por se tornar um passivo ambiental (tal material não possui nenhuma utilização) e, por serem materiais depositados (não são de origem natural), a correta conformação dos mesmos é de suma importância. A maioria dos projetos existentes baseia-se em uma análise 2D, no entanto, isso pode levar ao superdimensionamento das estruturas resultando em custos extras desnecessários ou ao dimensionamento incorreto, levando a instabilidade do projeto. Dessa forma, um design otimizado, utilizando análises 3D, permite o armazenamento de uma quantidade maior de material, com alturas e ângulos de inclinação maiores permitindo mais rejeitos por unidade de área.

Uma situação comum para barragens de rejeito ou pilhas de estéril, que deve ser levada em conta nos estudos de estabilidade é o confinamento por encostas ou vales. A redução do problema 3D em 2D acaba por ignorar os efeitos tridimensionais ocasionados pelo confinamento do material (Figura 4.7).

Figura 4.7 – Metodologia aplicada – Exemplo 3: Barragens de rejeito ou pilhas de estéril confinadas – Escolha da forma de análise

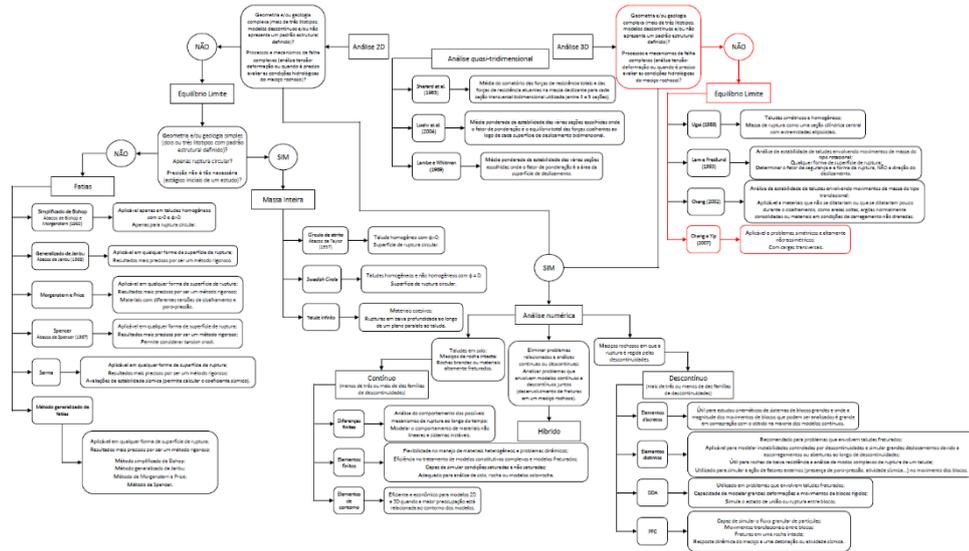


Fonte: Autoria própria

Para esse tipo de estudo, métodos de análise numérica, apesar de eficientes, não justificam sua aplicação, visto que o problema pode ser considerado como um modelo contínuo e formado por material homogêneo. Assim, o problema pode ser resolvido com a utilização de métodos 3D de equilíbrio limite sendo recomendado, conforme a metodologia proposta, o

método de Cheng e Yip (2007) (Figura 4.8), a qual permite análises em problemas simétricos e não-simétricos bem como com a presença de cargas transversais.

Figura 4.8 – Metodologia aplicada – Exemplo 3: Barragens de rejeito ou pilhas de estéril confinadas – Escolha do método de análise



Fonte: Autoria própria

Outra situação que deve ser considerada para estudos envolvendo barragens de rejeito ou pilhas de estéril é o contato entre as mesmas e o terreno original. Esse contato pode ser de uma superfície de fraqueza, formada por uma camada de material de baixa resistência (como mencionado anteriormente, no primeiro exemplo de geometrias complexas) ou relacionada ao movimento da massa de material superior, principalmente devido a inclinação desse contato em relação a orientação do talude e da pilha ou barragem, podendo estar favorável ou desfavorável em relação ao talude (Figura 4.9).

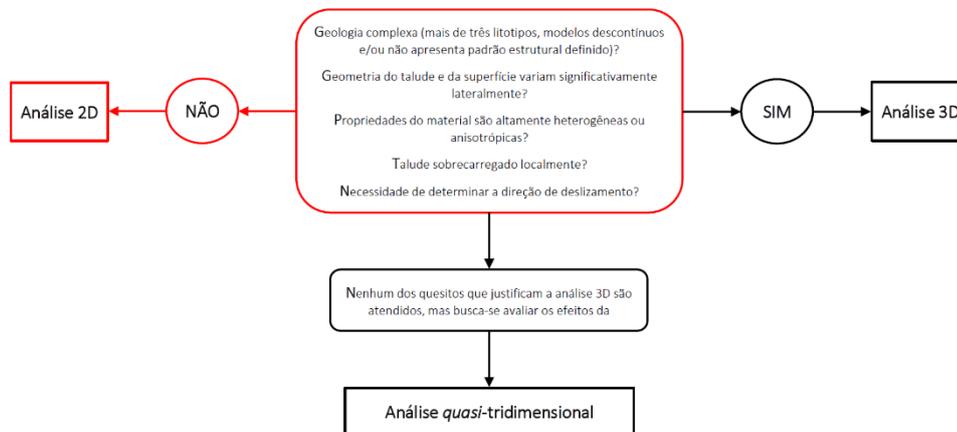
Figura 4.9 – Possíveis situações de contato com o terreno original



Fonte: Autoria própria

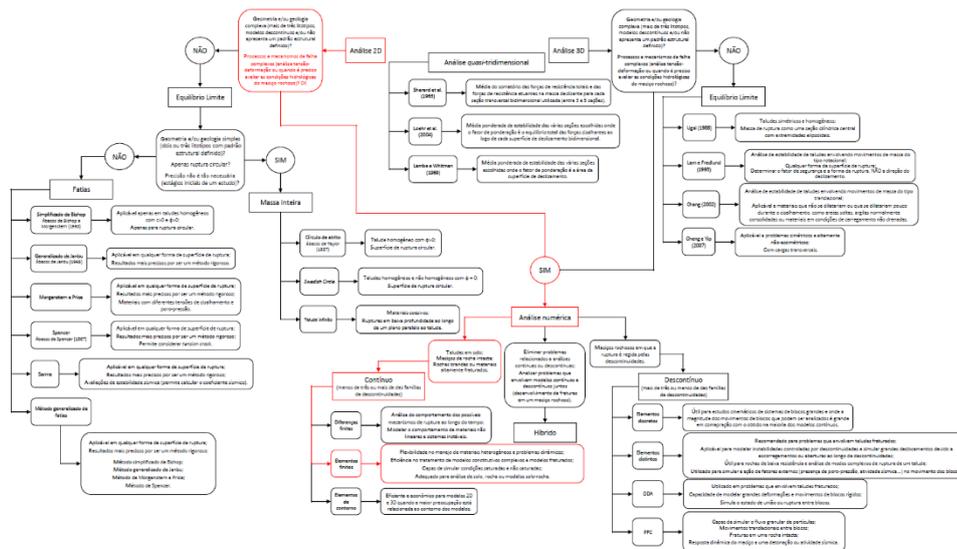
Para tal análise, métodos 3D não se fazem necessários e, com isso, metodologias 2D podem ser aplicadas (Figura 4.10), mas, contudo, métodos de equilíbrio limite não consideram o efeito do contato (*interface*) entre a pilha e o terreno original e, com isso, é recomendado o uso de análises numéricas. Assim, o melhor método para ser aplicado nessa situação é o de elementos finitos (Figura 4.11) pois, o mesmo é eficiente no tratamento de modelos constitutivos complexos, é capaz de simular condições saturadas e não saturadas do maciço sendo, também, adequado para análise de modelos solo-rocha.

Figura 4.10 – Metodologia aplicada – Exemplo 4: Contato entre materiais – Escolha da forma de análise



Fonte: Autoria própria

Figura 4.11 – Metodologia aplicada – Exemplo 4: Contato entre materiais – Escolha do método de análise



Fonte: Autoria própria

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Os dados existentes atualmente na literatura sobre os métodos de equilíbrio limite (2D e 3D) e os métodos numéricos para análise de estabilidade de taludes são desconhecidos e muitas vezes errados ou duvidosos. A má interpretação de um método e, conseqüentemente, sua utilização em um projeto de análise de estabilidade de forma incorreta pode significar, desde erros básicos até erros grosseiros de engenharia que podem levar a inviabilização de um projeto ou, ainda pior, direcionar a escolha e seleção de parâmetros e resultados que culminem em instabilidade de uma escavação a céu aberto no caso de o projeto vir a ser implementado.

Dessa forma, o presente trabalho compilou, em uma revisão bibliográfica completa, todos os principais métodos de análise de estabilidade de escavações em taludes a céu aberto e, com base nos métodos pesquisados propôs uma metodologia para escolha da melhor forma de análise, preenchendo, assim, uma lacuna existente nos projetos de estabilidade de taludes além de facilitar o processo de escolha do método a ser utilizado em um estudo.

Os métodos de análise 2D por fatias, generalizado de Janbu, método de Morgenstern e Price, método de Spencer e o método de Sarma, apresentam diferenças muito pequenas entre si, que não chegam a representar grandes variações no resultado final. Isso se deve ao fato de sua formulação ser muito próxima e, também, ao fato de que todos são métodos rigorosos de análise.

Como pode ser visto, a metodologia proposta não engloba muitos dos métodos de equilíbrio limite, tanto 2D quanto 3D, apresentados nesse trabalho. Isso ocorre, pois, métodos cuja precisão é contestável, ou que não aplicam suas metodologias em estudos de caso que comprovem suas premissas ou, ainda, metodologias cuja única vantagem é a rapidez para cálculos feitos a mão ou cujo cálculo necessário inviabilizava sua aplicação prática, foram desconsiderados. Também, métodos não rigorosos que apenas negligenciavam determinadas forças, sem apresentar explicação coerente para tal premissa foram descartados do presente estudo. Dessa forma, a metodologia proposta acaba por limitar a utilização de muitos métodos e a torna, de certa forma, restritiva, mas, com isso, garante-se que os métodos utilizados irão resultar em valores muito próximos da realidade, evitando superestimativa ou subestimativa dos parâmetros.

De forma geral, o que rege a decisão de qual metodologia utilizar é a complexidade do maciço rochoso e o grau de precisão que é necessário, conforme a etapa em que se encontra um projeto. Geometrias mais complexas exigem análise em três dimensões, uma vez que é impossível simplificar todas as características relevantes em uma seção 2D. Também, caso seja necessária uma análise sobre mecanismos complexos de falha ou determinar tensões e deslocamentos do maciço, recomenda-se uma análise numérica do problema, visto que, tais elementos não são possíveis de serem consideradas em um modelo contínuo de equilíbrio limite.

Por outro lado, metodologias em duas dimensões ou mesmo procedimentos *quasi*-tridimensionais, possuem grandes vantagens quando o maciço pode ser simplificado para 2D por apresentar regularidade lateral. Tais procedimentos são extremamente úteis devido sua simplicidade o que facilita sua utilização sendo assim, recomendados para etapas iniciais de análises de estabilidade e para maciços que possuem geologias e geometrias uniformes. Ainda, com a utilização de procedimentos *quasi*-tridimensionais é possível obter uma aproximação para fatores 3D utilizando metodologias 2D mais simples.

Cabe salientar que a não inclusão de algum método na metodologia proposta não inviabiliza sua utilização. Deve-se, no entanto, ao se utilizar tais metodologias, compreender muito bem suas limitações e aplicações, analisando e interpretando a fundo os resultados obtidos e, comparando-os com a realidade do local de estudo. Por fim, outro aspecto importante de ser lembrado é que, a coleta de dados de forma correta e precisa é uma etapa de grande importância em um estudo de estabilidade de taludes. Determinar qual metodologia utilizar é de suma importância, mas a determinação precisa dos parâmetros a serem inseridos em um modelo de análise é de grande relevância devendo, assim, estar intimamente ligado com a decisão de qual procedimento utilizar.

CAPÍTULO 6 - TRABALHOS FUTUROS

Propõem-se, para trabalhos futuros, a criação de metodologias, similares a apresentada nesse estudo, voltadas para outras formas de ruptura de taludes (rupturas planares e rupturas em cunha, por exemplo). Uma vez que foi constatado nesse estudo as dificuldades que podem ser encontradas ao se buscar o método mais apropriado a ser utilizado, bem como as incoerências que podem ser encontradas na literatura para as metodologias propostas para rupturas circulares de taludes. Uma revisão bibliográfica acerca dos métodos de análise existentes para estudos de outras formas de ruptura se faz necessária.

Outro estudo relevante com relação a estabilidade de taludes é correlacionar as metodologias de análise existentes (para as formas de ruptura conhecidas) com os diferentes sistemas de classificação de maciços existentes, buscando relacionar variáveis pertinentes em um estudo de estabilidade de taludes como, por exemplo, o grau de fraturamento do maciço rochoso, o espaçamento, persistência e orientação das descontinuidades, com os métodos propostos ao longo de décadas de estudos.

Outra questão importante, para trabalhos futuros, é uma análise acerca da geometria da cava, analisando o impacto que a curvatura da mesma apresenta em sua estabilidade. Uma vez que, esse estudo é voltado para taludes cuja face é aproximada de uma reta e, tal característica geométrica pode impactar diretamente no planejamento, operação e segurança (conforme a geometria da face analisa, pode-se obter fatores de segurança 3D inferiores a fatores de segurança 2D) de uma mina sendo, assim, de grande importância um estudo sobre sua relevância, determinando a relação entre as tensões do maciço rochoso com a geometria utilizada no projeto e a consequente estabilidade dos taludes.

REFERÊNCIAS

ABRAMSON, L. W.; LEE, T. S.; SHARMA, S.; BOYCE; G. M. *Slope Stability and Stabilization Methods*. 2th. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 2002. 712 p.

AKHTAR, K. *Three Dimensional Slope Stability Analysis for Natural and Manmade Slopes*. 2011. 319 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Illinois, Urbana. 2011.

ALBATAINEH, N. *Slope Stability Analysis Using 2D and 3D Methods*. 2006. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Akron, Akron. 2006.

ANAGNOSTI, P. Three Dimensional Stability of Fill Dams. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, v. 02, p. 275 – 280, 1969.

AZZOUZ, A. S.; BALIGH, M. M. Three Dimensional Stability of Slopes. *National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce*, n. PB-285 740, Junho de 1978.

AZZOUZ, A. S.; BALIGH, M. M. Loaded Areas on Cohesive Slopes. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v. 109, n. GT 05, p. 724 – 729, 1983.

BAKER, R.; LESHCHINSKY, D. Stability Analysis of Conical Heaps. *Soils and Foundations*, v. 27, n. 04, p. 99 – 110, 1987.

BALIGH, M. M.; AZZOUZ, A. S. End Effects on the Stability of Cohesive Slopes. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v. 101, n. GT 11, p. 1105 – 1117, 1975.

BISHOP, A. W. The Use of Slip Circle in the Stability Analysis of Earth Slopes. *Géotechnique*, v. 05, n. 01, p. 7 – 17, 1955.

BRAY, J. W. A study of jointed and fractured rock. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, v. 5-6/2-3, p. 117 – 136, 1967.

BREBBIA, C. A.; TELLES, J. C. F.; WROBEL, L. C. *Boundary Element Techniques: Theory and Applications in Engineering*. 1th. ed. New York, USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1984. 466 p.

CAVOUNIDIS, S. On the Ratio of Factor of Safety in Slope Stability Analyses. *Géotechnique*, v. 37, n. 02, p. 207 – 210, 1987.

CAVOUNIDIS, S.; KALOGEROPOULOS, H. End Effects on the Stability of Cuts in Normally Consolidated Clays. *Rivista Italiana di Geotechnica*, v. 02, p. 85 – 93, 1992.

CHANG, M. A 3D Slope Stability Analysis Method Assuming Parallel Lines of Intersection and Differential Straining of Block Contacts. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 39, p. 799 – 811, 2002.

CHEN, R. H. Three Dimensional Slope Stability Analysis. *Joint Highway Research Project*, Eng. Experiment Station, Purdue University, Report JHRP-81-17, 1981.

CHEN, R. H.; CHAMEAU, J. L. Three Dimensional Limit Equilibrium Analysis of Slopes. *Géotechnique*, v. 32, n. 01, p. 31 – 40, 1982.

CHEN, Z.; MI, H.; ZHANG, F.; Wang, X. A Simplified Method for 3D Slope Stability Analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 40, p. 675 – 683, 2003.

CHENG, Y. M.; LAU, C. K. *Slope Stability Analysis and Stabilization: New Methods and Insight*, 2th. ed. Florida, USA: CRC Press, 2014. 426 p.

CHENG, Y.; YIP, C. Three Dimensional Asymmetrical Slope Stability Analysis Extension of Bishop's, Junbu's, and Morgenstern-Price's Techniques. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 133, n. 12, p. 1544 – 1555, 2007.

CORNFORTH, D. H. *Landslides in Practice: Investigation, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils*, 1th. ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2004. 624 p.

CUNDALL, P. A. A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movements in Blocky Rock Systems. In: *Rock Mechanics: Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*, 2, 1971, Nancy. *Anais...* Nancy: 1971. p. 2 – 8.

da SILVA, M, J. F. *Análise de Estabilidade de Taludes pelo Método de Equilíbrio Limite*. 2013. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Porto. 2013.

DENNHARDT, M.; FORSTER, W. Problems of Three Dimensional Slope Stability. *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, v. 02, p. 427 – 431, 1985.

DRESCHER, A. Limit Plasticity Approach to Piping in Bins. *Journal of Applied Mechanics*, v. 50, p. 549 – 553, 1983.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. The Accuracy of Equilibrium Methods of Slope Stability Analysis. *Engineering Geology*, v. 16, N. 1/2, p. 5 – 17, 1980.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. *Soil Strength and Slope Stability*. 2th. Ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 2014. 317 p.

EBERHARDT, E. Rock Slope Stability Analysis – Utilization of Advanced Numerical Techniques. 2003. 41 p. Notas de Aula.

FELLENIOUS, W. *Staten Jarnjvagens Geotekniska Commission*, Stockholm, Sweden, 1922.

FELLENIOUS, W. Calculation of the Stability of Earth Dams. *Proceedings of the Second Congress on Large Dams*, v. 04, p. 445 – 463, 1936.

FREDLUND, D. G.; KRAHN, J. Comparison of Slope Stability Methods of Analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 14, p. 429 – 439, 1977.

GENS, A.; HUTCHINSON, J.; CAVOUNIDIS, S. Three Dimensional Analysis of Slides in Cohesive Soils, *Géotechnique*, v. 38, n. 01, p. 1 – 23, 1988.

GRIFFITHS, D. V.; LANE, P. A. Slope Stability Analysis by Finite Elements. *Géotechnique*, v. 49, n. 03, p. 387 – 403, 1999.

HERRERO, C. *Quantifying the Effect of In-Situ Stresses and Pit Depth on Slope Stability by Incorporating Brittle Fracturing in Numerical Model Analysis*. 2015. 172 f. Tese (Doutorado) – Colorado School of Mines, Golden. 2015.

HOVLAND, H. J. Three Dimensional Slope Stability Analysis Method. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v. 103, n. GT 09, p. 971 – 986, 1977.

HUANG, Y. H. *Slope Stability Analysis by the Limit Equilibrium Method: Fundamentals and Methods*. 1th. ed. Reston, USA: ASCE, 2014. 365 p.

HUDSON, J. A.; HARRISON, J. P. *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*. 2th. ed. Kidlington, UK: Elsevier Science Ltd., 2000. 444 p.

HUNGR, O. An Extension of Bishop's Simplified Method of Slope Stability Analysis to Three Dimensions. *Géotechnique*, v. 37, n. 1, p. 113 – 117, 1987.

HUNGR, O.; SALGADO, F. M.; BYRNE, P. M. Evaluation of a Three Dimensional Method of Slope Stability Analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 26, p. 679 – 686, 1989.

HUSTRULID, W. A.; MCCARTER, M. K.; VAN ZYL, D. J. A. *Slope Stability in Surface Mining*. 1th. ed. Colorado, USA: SME, 2009. 442 p.

ITASCA Consulting Group, Inc. Software. Disponível em: <<http://www.itascacg.com/software>>. Acesso em: 19 out. 2016.

JANBU, N. Application of Composite Slip Surfaces for Stability Analyses. *European Conference on Stability of Earth Slopes*, v. 03, p. 43 – 49, 1954.

JANBU, N.; BJERRUM, L.; KJAERNSLI, B. “Veiledning ved losning av Fundamenteringsoppgaver (Soil mechanics applied to some engineering problems)”. Publication 16, Oslo, Norwegian: Geotechnical Institute, 1956.

JANBU, N. Earth Pressure and Bearing Capacity Calculations by Generalized Procedure of Slices. *Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, v. 02, p. 207 – 212, 1957.

JANBU, N. Slope Stability Computations. In: HIRCHFELD, R. C.; POULOS, S. J. (Eds) *Embankment-Dam Engineering*, New York: John Wiley & Sons, 1973. p. 47 – 86.

JING, L.; HUDSON, J. A. Numerical methods in rock mechanics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. v. 39, p. 409 – 427, 2002.

KJELLAND, N. H. *Slope Stability Analysis of Downie Slide: Numerical Modelling and Data Analysis in Support of Geotechnical Decision Support Systems*. 2004. 256 f. Dissertação (Mestrado) – Queen’s University, Kingston. 2004.

LADD, C. C.; FOOTT, R. New Design Procedure for Stability of Soft Clays. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v. 100, n. GT 07, p. 763 – 786, 1974.

LAM, L.; FREDLUND, D. G. A General Limit Equilibrium Model for Three Dimensional Slope Stability Analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 30, n. 06, p. 905 – 919, 1993.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. *Soil mechanics*. 1th. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1969. 553 p.

LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. Two and Three Dimensional Slope Stability Reanalyses of Bukit Batok Slope. *Computers and Geotechnics*, v. 42, n. 01, p. 81 – 88, 2012.

LESHCHINSKY, D.; BAKER, R. Three Dimensional Slope Stability: End Effects. *Soils and Foundations*, v. 26, n.04, p. 98 – 110, 1986.

LESHCHINSKY, D.; BAKER, R.; SILVER, M. L. Three Dimensional Analysis of Slope Stability. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v. 09, p. 199 – 223, 1985.

LESHCHINSKY, D.; HUANG, C. C. Generalized Slope Stability Analysis: Interpretation, Modification, and Comparison. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 118, n. 10, p. 1559 – 1576, 1992a.

LESHCHINSKY, D.; HUANG, C. C. Generalized Three Dimensional Slope Stability Analysis. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 118, n. 11, p. 1748 – 1764, 1992b.

LESHCHINSKY, D.; MULLETT, T. Design Charts for Vertical Cuts. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 114, p. 337 – 344, 1988a.

LOEHR, J. E.; McCOY, B. F.; WRIGHT, S. G. Quasi-Three Dimensional Slope Stability Analysis Method for General Sliding Bodies. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 130, p. 551 – 560, 2004.

LORIG, L.; VARONA, P. Practical Slope Stability Analysis Using Finite Difference Codes. In: Hustrulid, W. A.; McCarter, M. K.; Van Zyl, D. J., editors. *Slope Stability in Surface Mining*. 2001. p. 115 – 124.

LOWE, J.; KARAFIATH, L. Stability of Earth Dams Upon Drawdown, *Proceedings of the First PanAmerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, v. 02, p. 537 – 552, 1959.

MATSUI, T.; SAN, K-c. Finite Element Slope Stability Analysis by Shear Strength Reduction Technique. *Soil and Foundation*, v. 23, n. 01, p. 59 – 70, 1992.

MICHALOWSKI, R. L. Three Dimensional Analysis of Locally Loaded Slopes. *Géotechnique*, v. 39, n. 1, p. 27 – 38, 1989.

MICHALOWSKI, R. L.; DRESCHER, A. Three Dimensional Stability of Slopes and Excavations. *Géotechnique*, v. 59, n. 10, p. 839 – 850, 2009.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. W. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Géotechnique*, v. 15, n. 1, p. 79 – 93, 1965.

PETTERSON, K. E. The Early History of Circular Sliding Surfaces. *Géotechnique*, v. 05, n. 04, p. 275 – 296, 1955.

PINTO, C. N. *Uso de Elementos Discretos na Modelagem Numérica da Perfuração de Poços de Petróleo por Brocas PDC*. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011.

READ, J.; STACEY, P. *Guidelines for Open Pit Slope Design*. Melbourne, AUS: CSIRO PUBLISHING, 2009. 496 p.

RENDULIC, L. Ein Beitrag zur Bestimmung der Gleitsicherheit. *Der Bavingenieur*, n. 19/20, p. 230 – 233, 1935.

SARMA, S. K. Stability Analysis of Embankments and Slopes. *Géotechnique*, v. 23, n. 03, p. 423 – 433, 1973.

SEED, R. B.; MITCHELL, J. K.; SEED, H. B. Kettleman Hills Waste Landfill Slope Failure. II: Stability Analyses. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 116, n. 04, p. 669 – 690, 1990.

SHERARD, J. L.; WOODWARD, R. J.; GIZIENSKI, S. F.; CLEVINGER, W. A. *Earth rock dams: Engineering Problems of Design and Construction*, 1th. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1963. 725 p.

SHI, G-h. Discontinuous Deformation Analysis – A New Numerical Model for the Statics and Dynamics of Deformable Block Structures. In: Conference on Discrete Element Methods, 1, 1989, Golden. *Anais...* Golden: CSM Press, 1989.

SINHA, R.S. *Underground Structures: Design and Instrumentation*. 1th. ed. Amsterdam, NED: Elsevier Science Publishing Company Inc., 1989. 480 p.

SKEMPTON, A. W. The $\phi = 0$ Analysis of Stability and its Theoretical Basis. *Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, v. 01, p. 72 – 78, 1948.

SMITH, I. M.; GRIFFITHS, D. V. *Programming the Finite Element Method*. 2th. ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1988. 469 p.

SOREN, K.; BUDI, G.; SEN, P. Stability Analysis of Open Pit Slope by Finite Difference Method. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, v. 03, n. 05, p. 326 – 334, 2014.

SPENCER, E. A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-slice Forces. *Géotechnique*, v. 17, n. 1, p. 11 – 26, 1967.

STEINER, W. Discussion: 3-D Slope Stability Analysis Method by H.J. Hovland. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v. 104, n. GT 09, p. 1208 – 1209, 1978.

SUN, G.; ZHENG, H.; JIANG, W. A global Procedure for Evaluating Stability of Three-Dimensional Slopes. *Natural Hazards*, v. 61, n. 3, p. 1083 – 1098, 2011.

SWAN, C.; SEO, Y-k. Limit State Analysis of Earthen Slopes Using Dual Continuum/FEM Approaches. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v. 23, p. 1359 – 1371, 1999.

TAYLOR, D. W. *Fundamentals of Soil Mechanics*. 1th. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1948. 700 p.

TURNBULL, W. J.; HVORSLEV, M. J. Special problems in slope stability. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, v. 93, n. SM4, p. 499 – 528, 1967.

U.S. Army Corps of Engineers. Engineering and Design: *Stability of Earth and Rock -Fill Dams*, Engineer Manual EM 1110–2–1902, Department of the Army, Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers, Washington, DC, (1970).

U.S. Army Corps of Engineers. Engineering and Design: *Slope Stability*, Engineering Manual EM 1110-2-1902, Department of the Army, Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers, Washington, DC, (2003).

WHITMAN, R. V.; BAILEY, W. A. Use of Computers for Slope Stability Analysis. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, v. 93, n. SM4, p. 475 – 498, 1967.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. 4th. ed. London, UK: Spon Press, 2005. 431 p.

WRIGHT, S. G.; KULHAWY, F. H.; DUNCAN, J. M. Accuracy of Equilibrium Slope Stability Analysis. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, v. 99, n. SM10, p. 783 – 791, 1973.

XIE, M.; WANG, Z.; LIU, X.; BO, X. Three Dimensional Critical Slip Surface Locating and Slope Stability Assessment for Lava Lobe of Unzen Volcano. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 03, n. 01, p. 82 – 89, 2011.

XING, Z. Three Dimensional Stability Analysis of Concave Slopes in Plan View. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v. 114, n. 06, p. 658 – 671, 1988.

YAMAGAMI, T.; JIANG. C. J. A Search for the Critical Slip Surface in Three Dimensional Slope Stability Analysis. *Soils and Foundations*, v. 37, n.3, p. 1 – 16, 1997.

JIANG. C. J.; YAMAGAMI, T. Three Dimensional Slope Stability Analysis Using an Extend Spencer Method. *Soils and Foundations*, v. 44, n.4, p. 127 – 135, 2004.

ZHENG, H. Eigenvalue Problem from the Stability Analysis of Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 135, n. 5, p. 647 – 656, 2009.

ZHENG, H. A Three Dimensional Rigorous Method for Stability Analysis of Landslides. *Engineering Geology*, v. 145 – 146, p. 30 – 40, 2012.

ZHOU, X. P.; CHENG, H. Analysis of Stability of Three Dimensional Slopes Using the Rigorous Limit Equilibrium Method. *Engineering Geology*, v. 160, p. 21 – 33, 2013.