

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

HELMER MURRA CAETANO

**ANÁLISE DE RISCOS EM UMA BARRAGEM DE REJEITO COM O USO DE
DIVERSAS TÉCNICAS DE ESTABILIDADE DE TALUDES – ESTUDO DE CASO**

**Ilha Solteira
2022**

HELMER MURRA CAETANO

**ANÁLISE DE RISCOS EM UMA BARRAGEM DE REJEITO COM O USO DE
DIVERSAS TÉCNICAS DE ESTABILIDADE DE TALUDES – ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil

Nome do orientador
Prof. Dr. Adriano Souza

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- C128a Caetano, Helmer Murra.
Análise de riscos em uma barragem de rejeito com o uso de diversas técnicas de estabilidade de taludes: estudo de caso / Helmer Murra Caetano. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
90 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022
- Orientador: Adriano Souza
Inclui bibliografia
1. Barragens de rejeito. 2. Estabilidade. 3. Segurança de barragens.


Raiane da Silva Santos

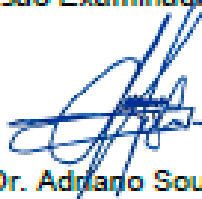
Helmer Murra Caetano

**ANÁLISE DE RISCOS DE UMA BARRAGEM DE REJEITO COM O USO DE
DIVERSAS TÉCNICAS DE ESTABILIDADE DE TALUDES – ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto
ao Curso de Graduação em Engenharia
Civil, da Faculdade de Engenharia da
Universidade Estadual Paulista "Júlio de
Mesquita Filho", Câmpus de Ilha Solteira.

Aprovado em 22/07/2022

Comissão Examinadora



Prof. Dr. Adriano Souza

UNESP/FE - Campus de Ilha Solteira (Orientador)



Prof. Dr. Marco Antonio de Moraes Alcantara

UNESP/FE - Campus de Ilha Solteira



Engª Civil MSc. Amanda de Moraes Ricardi

Geometrisa - Segurança de Barragens - Ilha Solteira

Ilha Solteira, 22 de julho de 2022

RESUMO

A grande quantidade de barragens de rejeito de mineração em território nacional, juntamente com os acidentes ocorridos na última década, evidencia cada vez mais a necessidade de assegurar que tais estruturas operem em condições adequadas a fim de evitar quaisquer tipos de complicações, no que diz respeito à segurança do barramento. Assim, um dos principais estudos que visa garantir a segurança da estrutura é a análise de fluxo e estabilidade. Barragens de rejeito possuem uma vasta gama de condições de operação e alta heterogeneidade no que se diz respeito às características dos materiais empregados na construção. Assim, o presente trabalho determinou com uso do software Geostudio, a influência de fatores como geometria de construção, condições de operação e método utilizado na análise de estabilidade influenciam nas condições de fluxo e nos fatores de segurança obtidos. Por fim, foi verificado que o método de alteamento a jusante se mostra mais seguro, com poucas variações de linha freática e fator de segurança independente das condições de carregamento atuantes no barramento. Também foi verificada melhor adesão, para o presente trabalho, dos métodos de Bishop e Spencer na determinação dos fatores de segurança.

Palavras-chave: Barragens de rejeito, estabilidade, segurança de barragens.

ABSTRACT

The large number of mining tailings dams in the national territory, together with the accidents that occurred in the last decade, increasingly highlights the need to ensure that such structures operate under adequate conditions in order to avoid any type of complications, with regard to to bus security. Thus, one of the main studies that aims to ensure the safety of the structure is the analysis of flow and stability. Tailings dams have a wide range of operating conditions and high heterogeneity with regard to the characteristics of the materials used in their construction. Thus, the present work determined using the Geostudio software, the influence of factors such as construction geometry, operating conditions and the method used in the stability analysis influence the flow conditions and the safety factors obtained. Finally, it was verified that the method of raising downstream is safer, with few variations of the water table and a safety factor regardless of the loading conditions acting on the bus. It was also verified better adhesion, for the present work, of the Bishop and Spencer methods in the determination of the safety factors

Keywords: Tailings dams, stability, dam safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas construtivas do método de alteamento a montante.....	17
Figura 2 – Etapas construtivas do método de alteamento a jusante.	18
Figura 3 – Etapas construtivas do método de linha de centro.....	20
Figura 4 – Curvas granulométricas de diferentes tipos de rejeitos.....	22
Figura 5 – Curvas tensão–deformação das areias.....	24
Figura 6 – Envoltória Mohr–Coulomb.....	25
Figura 7 – Aproximação de envoltória não linear para envoltória bilinear	25
Figura 8 – Formação da brecha em ruptura por <i>overtopping</i>	27
Figura 9 – Sequência ilustrativa de <i>overtopping</i> em barragem de rejeito.....	27
Figura 10 – Estágios de desenvolvimento do <i>piping</i>	28
Figura 11 – Sequência ilustrativa de <i>overtopping</i> em barragem de rejeito.....	29
Figura 12 – Detalhamento de um hidrociclone.	32
Figura 13 – Modelo de zonas de permeabilidade devido a segregação hidráulica. ..	33
Figura 14 – Detalhamento das zonas de permeabilidade no reservatório.....	34
Figura 15 – Esquematização da variação da linha freática de acordo com o lago de decantação.....	36
Figura 16 – Influência do sistema de drenagem interna em uma barragem.....	37
Figura 17 – Influência da permeabilidade da fundação na linha freática.....	38
Figura 18 – Seção de ruptura e aplicação do método das fatias.....	40
Figura 19 – Seção de ruptura e aplicação do método das fatias.....	41
Figura 20 – Distribuição de forças em uma fatia de solo (n).	43
Figura 21 – Forças distribuídas em lamela de solo.	44
Figura 22 – Dimensões utilizadas no fator de correção do fator de correção.....	46
Figura 23 – Hipóteses consideradas pelo método de Spencer	47
Figura 24 – Procedimento de obtenção do fator de segurança para o método de Spencer.....	48
Figura 25 – Geometria – Método de jusante.	51
Figura 26 – Geometria – Método de linha de centro.	51
Figura 27 – Geometria – Método de montante.....	52
Figura 28 – Exemplo de malha de elementos finitos utilizada na modelagem.	53
Figura 29 – Exemplo de curva característica de solo utilizada modelagem.	55
Figura 30 – Exemplo de permeabilidade utilizada no estudo.	56
Figura 31 – Exemplo de cunha de ruptura e fatias geradas pelo software.....	57
Figura 32 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Alteamento a montante (CCN-01).....	60
Figura 33 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Alteamento a montante (CCN-02).....	61
Figura 34 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Alteamento a montante (CCN-03).....	61
Figura 35 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Alteamento a montante (CCN-04).....	62

Figura 36 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de linha de centro (CCN-01)	63
Figura 37 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de linha de centro (CCN-02)	64
Figura 38 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de linha de centro (CCN-03)	65
Figura 39 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de linha de centro (CCN-04)	65
Figura 40 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de jusante (CCN-01)	66
Figura 41 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de jusante (CCN-02)	67
Figura 42 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de jusante (CCN-03)	68
Figura 43 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de jusante (CCN-04)	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de permeabilidade para utilização na função Seep/W.	57
Tabela 2 – Parâmetros de resistência utilizados no software.....	58
Tabela 3 – Fatores de segurança obtidos – Método de montante (CCN-01).	60
Tabela 4 – Fatores de segurança obtidos – Método de montante (CCN-02).	61
Tabela 5 – Fatores de segurança obtidos – Método de montante (CCN-03).	62
Tabela 6 – Fatores de segurança obtidos – Método de montante (CCN-04).	63
Tabela 7 – Fatores de segurança obtidos – Método de linha de centro (CCN-01)....	64
Tabela 8 – Fatores de segurança obtidos – Método de linha de centro (CCN-02)....	64
Tabela 9 – Fatores de segurança obtidos – Método de linha de centro (CCN-03)....	65
Tabela 10 – Fatores de segurança obtidos – Método de linha de centro (CCN-04)..	66
Tabela 11 – Fatores de segurança obtidos – Método de jusante (CCN-01).....	67
Tabela 12 – Fatores de segurança obtidos – Método de jusante (CCN-02).....	68
Tabela 13 – Fatores de segurança obtidos – Método de jusante (CCN-03).....	69
Tabela 14 – Fatores de segurança obtidos – Método de jusante (CCN-04).....	70

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	9
SUMÁRIO	10
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	14
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	14
3.1 Barragem de rejeito.....	14
3.2 Métodos Construtivos de Barragens de Rejeitos	15
3.2.1 Método de montante.....	15
3.2.2 Método de jusante.....	17
3.2.3 Método de linha de centro.....	19
3.3 Comportamento e propriedades dos rejeitos.....	20
3.3.1 Granulometria dos rejeitos	21
3.3.2 Densidade.....	22
3.3.3 Adensamento	23
3.3.4 Parâmetros de resistência	23
3.3.5 Envoltória de resistência	24
3.4 Mecanismos de ruptura de barragens de rejeitos	26
3.4.1 Ruptura por galgamento	26
3.4.2 Ruptura por <i>piping</i>	28
3.4.3 Ruptura por liquefação	29
3.5 Legislação de barragens de rejeitos	30
3.6 Análise de fluxo e percolação.....	31
3.6.1 Aterro hidráulico.....	31
3.6.2 Condutividade hidráulica	33
3.6.3 Lagoa de decantação e praia de rejeitos.....	36
3.6.4 Sistemas de drenagem em barragens de rejeito.....	36
3.6.5 Percolação através da fundação	38
3.7 Estabilidade de taludes	39
3.7.1 Método Fellenius ou Método Ordinário	41
3.7.2 Método de Bishop.....	42

3.7.3	Método de Bishop Simplificado.....	44
3.7.4	Método de Janbu Simplificado	46
3.7.5	Método de Spencer	47
3.7.6	Método de Morgenstern–Price	49
4.	METODOLOGIA	49
3.1	Concepção Estrutural (ou modelagem gráfica).....	50
3.2	Modelagem numérica.....	52
3.1.1	Análise de fluxo e percolação	52
3.1.2	Análise de estabilidade	57
3.3	Condições de carregamento	58
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	Método de montante	60
4.1.1	Condição de funcionamento ideal (CCN-01)	60
4.1.2	Condição sem praia de rejeitos (CCN-02).....	60
4.1.3	Condição com sistema de drenagem inoperante (CCN-03)	61
4.1.4	Condição com sistema de drenagem inoperante e sem praia de rejeitos (CCN-04)	62
4.2	Método de linha de centro	63
4.2.1	Condição de funcionamento ideal (CCN-01)	63
4.2.2	Condição sem praia de rejeitos (CCN-02).....	64
4.2.3	Condição com sistema de drenagem inoperante (CCN-03)	65
4.2.4	Condição com sistema de drenagem inoperante e sem praia de rejeitos (CCN-04)	65
4.3	Método de jusante	66
4.3.1	Condição de funcionamento ideal (CCN-01)	66
4.3.2	Condição sem praia de rejeitos (CCN-02).....	67
4.3.3	Condição com sistema de drenagem inoperante (CCN-03)	68
4.3.4	Condição com sistema de drenagem inoperante e sem praia de rejeitos (CCN-04)	69
4.4	Análise dos resultados	70
4.4.1	Análise de fluxo.....	71
4.4.2	Análise do fator de segurança	73
6.	CONCLUSÃO.....	75
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
	APÊNDICE A – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método montante – CCN-01.....	81
	APÊNDICE B – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método montante – CCN-02.....	82
	APÊNDICE C – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método montante – CCN-03.....	83

APÊNDICE D – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método montante – CCN-04	84
APÊNDICE E – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de centro – CCN-01	85
APÊNDICE F – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de centro – CCN-02	86
APÊNDICE G – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de centro – CCN-03	87
APÊNDICE H – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de centro – CCN-04	88
APÊNDICE I – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de jusante – CCN-01.....	89
APÊNDICE I – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de jusante – CCN-02.....	90
APÊNDICE J – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de jusante – CCN-03	91
APÊNDICE K – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de jusante – CCN-03	92

1. INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas que podem construídas tanto em cursos d'água permanentes ou temporários, para fins de contenção de substâncias líquidas, quanto em locais para disposição e contenção de misturas de sólidos e líquidos (BRASIL, 2010).

A economia do país sempre teve uma ligação com o setor de mineração onde, desde os tempos do Brasil colônia, a extração mineral se enquadra como uma das principais bases da economia. Destaca-se que a atividade mineradora é responsável por 16,7% do Produto Interno Bruto (PIB) Industrial do Brasil (IBRAM, 2018).

Apesar da importância econômica e social, a mineração também é responsável por um grande impacto ambiental. A extração do minério, por meio dos processos de lavra e beneficiamento, da origem aos resíduos chamados estéreis e rejeitos, os quais não possuem valor econômico. Os estéreis são materiais oriundos da escavação nas minas, enquanto os rejeitos são resíduos constituídos por partículas finas de minério e grandes quantidades de resíduo argiloso, os quais são geralmente dispostos em barragens (RESO, 2015).

No território brasileiro, existem cerca de 770 barragens de rejeito (ANM, 2019). A grande complexidade de gestão de segurança de tais estruturas se deve a dois principais fatores: a sua construção, que é executada de maneira contínua em conjunto com o desenvolvimento da mina de exploração, e ao complexo comportamento dos rejeitos, o qual tende a sofrer modificações ao longo do tempo durante sua disposição.

Nos últimos 30 anos, a frequência de ruptura de barragens de rejeitos foi cerca de 10 vezes maior que a frequência de ruptura de barragens de acumulação de água, deixando evidente a necessidade de realizar uma boa gestão e acompanhamento adequado das estruturas em questão (DAVIES, 2002).

Dentre os perigos mais significativos para o setor de mineração, as barragens de rejeito possuem destaque, em razão do risco atrelado ao grande volume de rejeitos que podem ser armazenados. Cita-se como um dos principais riscos a liberação descontrolada dos materiais sólidos e da água armazenada, ocasionada por uma eventual ruptura da estrutura, junto ao risco de contaminação, devido ao armazenamento de substâncias químicas originadas pelo processo de beneficiamento.

Atingida a capacidade operacional do barramento, elevações graduais do dique inicial são realizadas a fim de aumentar o volume de resíduos armazenados. O processo de elevação, chamado de alteamento, pode ser executado de três diferentes maneiras, sendo elas: alteamento a montante, alteamento de linha de centro e alteamento a jusante (ANA, 2021).

Em razão dos grandes desastres envolvendo barragens de rejeitos terem ocorrido em estruturas alteadas pelo método a montante, presume-se que esta metodologia construtiva possui influência direta na estabilidade dos taludes de contenção.

2. OBJETIVOS

Analisar as características de cada método construtivo, bem como as adversidades que podem, eventualmente, comprometer a segurança da estrutura, a fim de identificar a influência de tais fatores na estabilidade de barragens de rejeito.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Barragem de rejeito

Barragens de rejeitos são estruturas projetadas e executadas com a finalidade de receber e armazenar, de maneira adequada, os rejeitos originados pelo processo de beneficiamento de minérios.

A periodicidade de atualização e revisão, a qualificação de responsáveis técnicos, o nível de detalhes e conteúdos mínimos do Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM) estão definidos na resolução nº 95 do dia 07/02/2022, da Agência Nacional de Mineração (ANM). Tais diretrizes são aplicadas a barragens de mineração, as quais são definidas como sendo:

a) barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais; e b) estruturas construídas por meio de disposição hidráulica de rejeitos, como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, suscetíveis à liquefação;(ANM, 2022).

A barragem de rejeitos deve conter uma estrutura estável de maneira a possibilitar, em conjunto com sua fundação, a retenção do rejeito retido ao em seu reservatório ao passo que permita o controle de percolação de água nos maciços, a fim de garantir o atendimento da estrutura aos critérios ambientais, de segurança e de volume armazenado (ICOLD, 2001).

O processo de construção de uma barragem de rejeitos tem início com um dique de partida, o qual segue os métodos de construção tradicionais utilizados em barragens utilizadas para armazenamento de água. À medida que a capacidade operacional do barramento é atingida, são executados diques de alteamentos sucessivos a fim de aumentar o volume útil da barragem (ANA, 2001).

O material empregado na etapa de construção dos diques de alteamento pode utilizar solos de empréstimo ou estéreis da própria mina, no entanto, na grande maioria dos casos, faz-se o uso do próprio rejeito. A porção mais grossa dos rejeitos, oriunda do processo de hidrociclonagem, é chamada de *underflow* e é empregada na construção dos diques de alteamento. Já a porção mais fina dos rejeitos, chamada de *overflow* é lançada no reservatório do barramento (GALO, 2017).

A construção por alteamentos dilui os custos de construção, já que proporciona maior flexibilidade de operação, permitindo a ampliação da estrutura de acordo com as taxas de produção de minério, dada em função da mudança nos preços de *commodities*, fator que pode implicar em maiores ou menores volumes de rejeitos gerados (ÁVILA; ESPÓSITO, 2008).

Os principais métodos construtivos são os de alteamento a montante, alteamento a jusante e alteamento a linha de centro. O método construtivo a ser empregado levará em conta características de segurança, volume de rejeitos a serem armazenados, custo e localização do barramento.

3.2 Métodos Construtivos de Barragens de Rejeitos

3.2.1 Método de montante

A execução do alteamento a montante consiste em construir um dique de partida utilizando solo de empréstimo (geralmente composto por solo argiloso compactado), do qual o rejeito será lançado perimetralmente a partir da crista em direção à montante do barramento garantindo determinado afastamento mínimo, definido em projeto, da água, processo que dá origem à chamada praia de rejeitos.

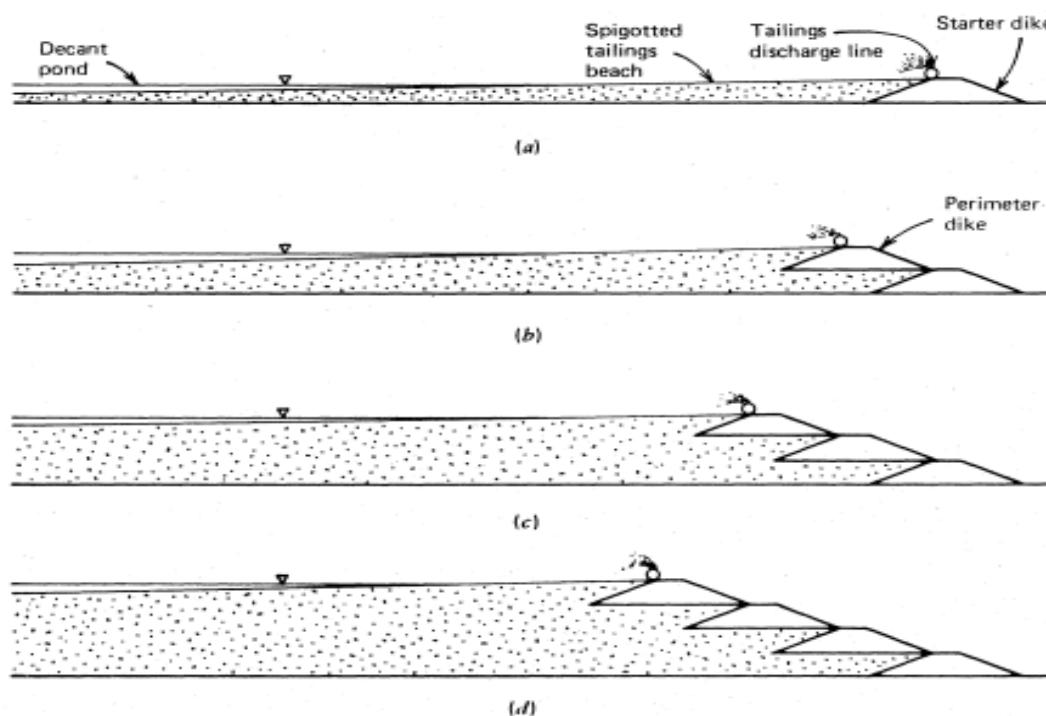
A praia formada será utilizada como fundação para o próximo dique de alteamento, processo que será repetido sucessivamente até a disposição final do barramento. (VICK, 1983)

O método de alteamento a montante demanda que o rejeito arenoso, localizado na praia, se apresente na condição drenada, de maneira a proporcionar um material adequado para execução e suporte do dique de alteamento subsequente. Destaca-se a necessidade de se manter a praia de rejeitos a uma distância adequada dos diques de alteamento, a fim de evitar uma da linha freática próxima aos maciços de alteamento, fato que causaria um aumento da saturação do material e, conseqüentemente, uma redução do fator de estabilidade (FILHO, ABRÃO, 2015).

O método de alteamento a montante apresenta algumas vantagens, podendo-se citar tanto o baixo custo, dado pela utilização próprio rejeito depositado para execução dos alteamentos, quanto à simplicidade e rapidez que a execução dos alteamentos exige. Em contrapartida, o método apresenta uma limitação na altura total dos diques de alteamento, capacidade de armazenamento de água reduzida e susceptibilidade a liquefação (não sendo indicada para locais nos quais haja incidência de ações sísmicas), além de demandar um controle rigoroso da linha freática, dada a dificuldade de construção de um sistema de drenagem eficiente. (FILHO, ABRÃO, 2015).

A Figura 1 apresenta uma discretização das etapas construtivas empregadas no método, especificando o dique inicial, a região de descarga dos rejeitos, a praia de rejeitos, a lagoa de decantação e os diques de alteamento.

Figura 1 – Etapas construtivas do método de alteamento a montante.



Fonte Vick (1983)

3.2.2 Método de jusante

A construção pelo método de jusante parte de um dique inicial (dique de partida) de solo compactado, no qual se seguem os alteamentos executados na direção à jusante do dique inicial (ARAÚJO, 2006). O deslocamento do eixo da barragem em cada alteamento é realizado a partir do lançamento de material para jusante do dique inicial. Destaca-se que o chamado *underflow* é comumente utilizado como material para construção dos diques de alteamento.

O método é relativamente recente e foi desenvolvido a partir da necessidade de execução de alteamentos sobre outros materiais que não os rejeitos lançados e adensados. O método permite a construção de um sistema de drenagem, a partir do dique inicial, na medida em que os alteamentos vão sendo construído, fato que permite um maior controle de percolação e da linha freática (FILHO, 2004)

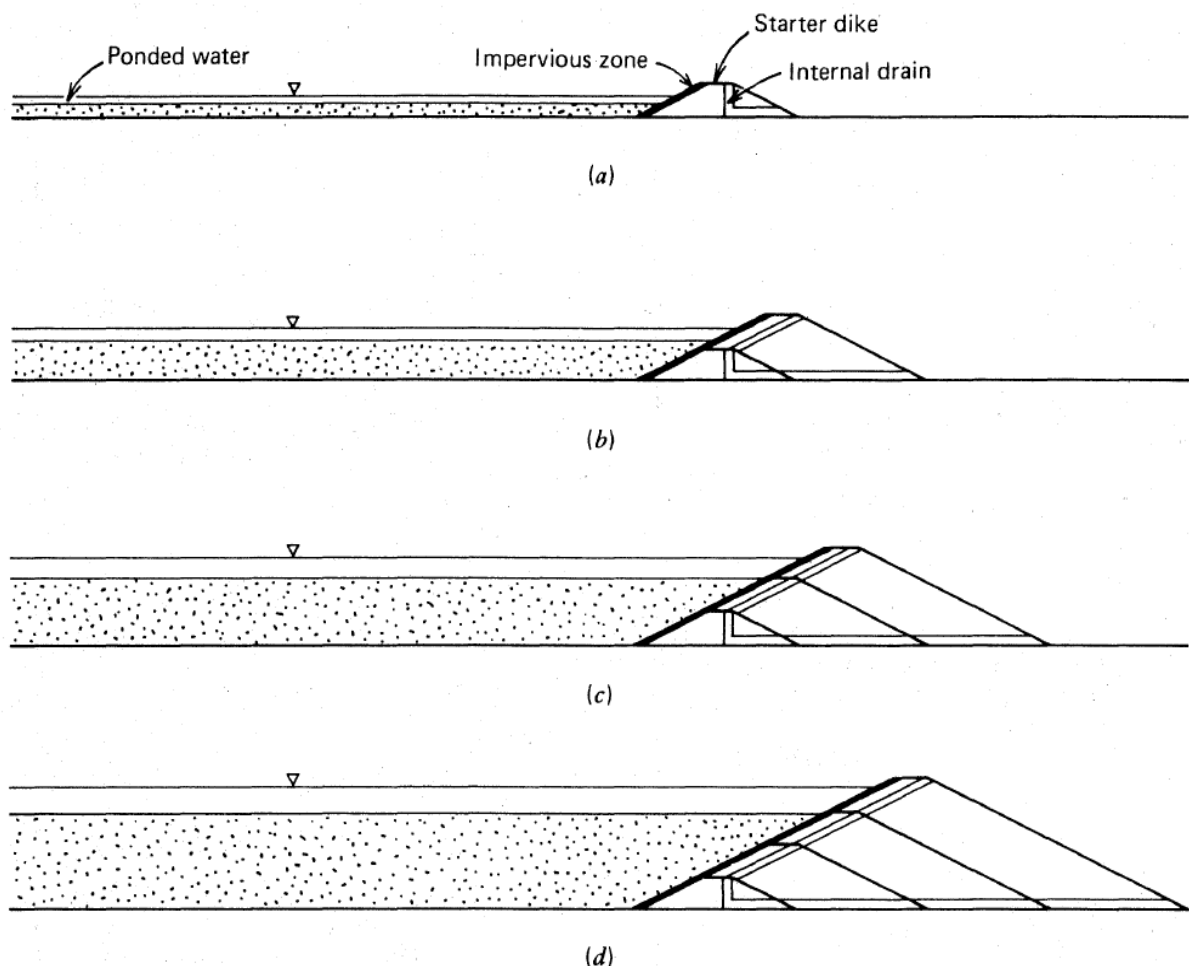
Dentre as principais vantagens do método, pode-se citar a possibilidade de execução de um sistema de drenagem interna, a compatibilidade com uma grande quantidade de alteamentos, a resistência da estrutura a efeitos dinâmicos quando

comparado com os demais métodos, e a capacidade de armazenamento de água quando necessário (VICK, 1983).

Em contrapartida está a necessidade de um grande volume de material compactado para execução dos alteamentos, demandando maior investimento, e a necessidade de controle de erosão eólica e hidráulica uma vez que os taludes de jusante não podem apresentar cobertura vegetal a fim de possibilitar a construção dos alteamentos subsequentes (FILHO, ABRÃO. 2015)

A Figura 2 abaixo apresenta expõe as etapas construtivas empregadas no método de construção a jusante.

Figura 2 – Etapas construtivas do método de alteamento a jusante.



Fonte Vick (1983)

3.2.3 Método de linha de centro

O método de linha de centro é considerado como uma solução intermediária entre os demais, tendo como principal característica a união das vantagens e redução das desvantagens (VICK, 1983).

A execução do método consiste em manter o eixo do barramento alinhado ao eixo da crista do dique inicial à medida que novos alteamentos são construídos. Desse modo o espaldar de montante se apoia sobre a praia de rejeitos enquanto o de jusante sobre todo o talude da etapa subjacente (CASTRO, 2008).

O lançamento dos rejeitos empregado nesse e nos demais métodos são comumente realizados por hidrociclones posicionados na região da crista. O método também permite utilizar zonas de drenagem interna em todas as etapas de alteamento, possibilitando melhor controle das zonas saturadas (ARAÚJO, 2006).

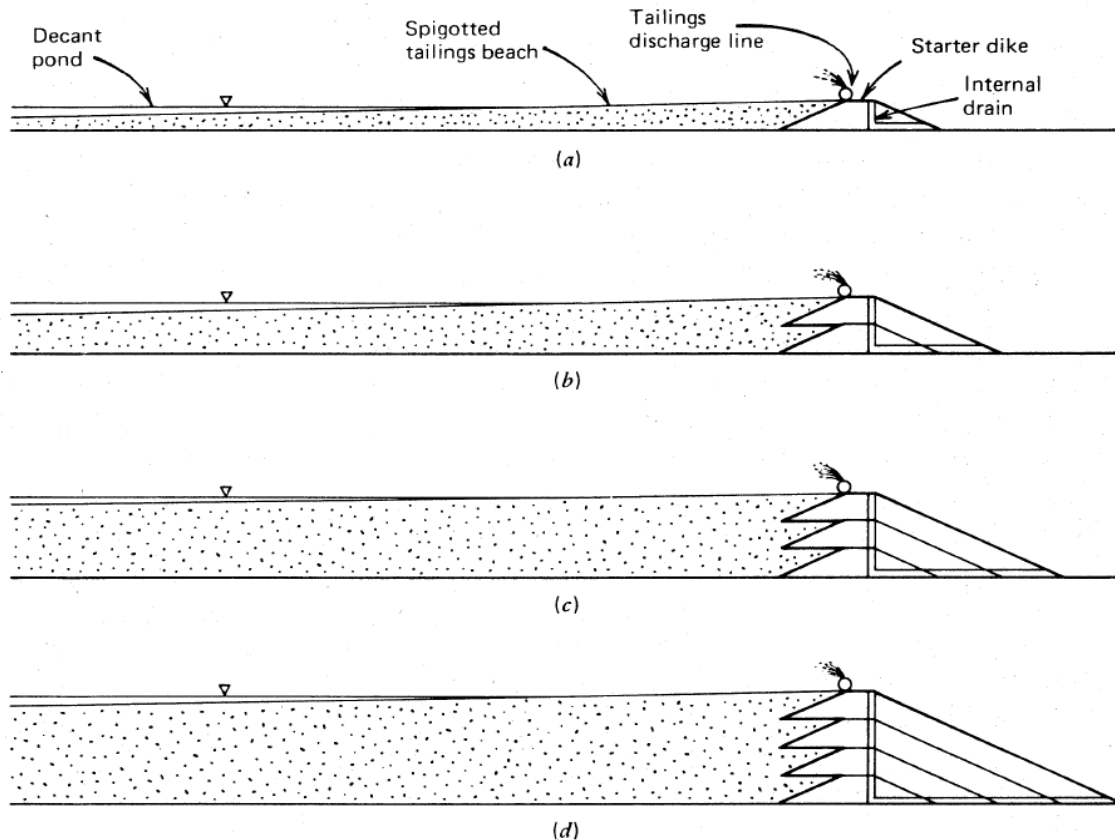
Dentre as principais vantagens cita-se a economia de espaço físico e menor consumo de material compactado quando comparado ao método de jusante. Em contrapartida o método não é plenamente adequado para o armazenamento de água, além de possuir limitações nas taxas de alteamento e apresentar susceptibilidade a liquefação (Galo, 2017).

Assim, esse método apresenta custo de execução mais elevado, quando comparado a estruturas que fazem o uso do método de montante, ao passo que apresenta maior viabilidade econômica quando comparado a aplicação do método de jusante.

Vale destacar que, tanto para o método de montante quanto para o método de linha de centro os parâmetros geotécnicos dos rejeitos são fatores com grande relevância no que se diz respeito ao projeto e manutenção da estrutura.

A seguir (Figura 3) estão dispostas as etapas construtivas empregadas no método de linha de centro.

Figura 3 – Etapas construtivas do método de linha de centro



Fonte Vick (1983)

3.3 Comportamento e propriedades dos rejeitos

O comportamento dos rejeitos pode ser determinado através de estudos da mecânica dos solos, em especial os de comportamento de areias. Apesar de apresentarem granulometria arenosa, os rejeitos muitas vezes apresentam particularidades que diferem do comportamento das areias. Assim, os estudos dos rejeitos de mineração devem levar em conta suas características mineralógicas, físico-químicas e geotécnicas, as quais variam de acordo com o método de beneficiamento empregado e com o tipo de minério extraído (VICK, 1983; ESPÓSITO, 2000; LOPES, 2000).

Propriedades dos materiais (granulometria, peso específico, permeabilidade, e formato dos grãos) tendem a sofrer variações de acordo com o método empregado no beneficiamento do material. (RIBEIRO, 2015). Assim, a elaboração de projetos de dimensionamento de barragens demanda ensaios de obtenção dos parâmetros específicos dos materiais analisados.

Rejeitos granulares depositados a partir da técnica de aterro hidráulico têm seu comportamento determinado tanto pela característica do próprio rejeito quanto pela maneira como é disposto no reservatório. A energia de disposição dos rejeitos, relacionada concentração da polpa e com a vazão empregada na construção do aterro hidráulico, possui grande relação com o fenômeno de segregação hidráulica. Caso tais variáveis fossem constantes, os perfis de segregação hidráulica teriam relação direta somente com a granulometria e com a massa específica dos grãos (ÁVILA, ESPÓSITO, 2008). No entanto, sabe-se da grande dificuldade em manter constância nas variáveis de deposição e nas características físico-químicas dos rejeitos, já que apresentam perfis de segregação com alto grau de variabilidade.

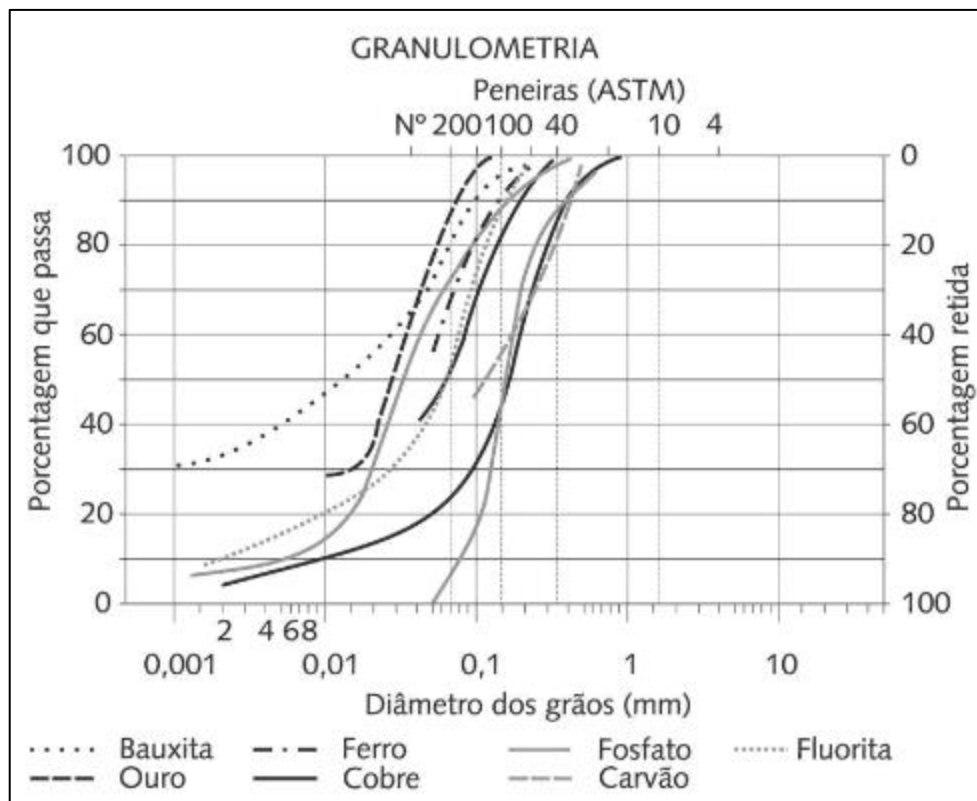
As principais características de base para compreensão do comportamento geológico e geotécnico dos rejeitos de mineração encontram-se expostas a seguir.

3.3.1 Granulometria dos rejeitos

A granulometria dos rejeitos varia de coloides a areias. Rejeitos com granulometrias mais finas (diâmetros menores ou iguais a 0,074 mm) são chamados de lamas, enquanto aqueles com granulometrias mais grossa são chamados de rejeitos granulares e apresentam maiores valores de permeabilidade (BOSCOV, 2008).

A Figura 4 a seguir apresenta as curvas granulométricas de diferentes rejeitos de mineração.

Figura 4 – Curvas granulométricas de diferentes tipos de rejeitos.



Fonte Abrão (1987)

3.3.2 Densidade

A densidade é normalmente expressa em razão da densidade seca e/ou índice de vazios e está relacionada, em grande parte, à granulometria e ao teor de argila. Rejeitos podem ter uma grande variação da densidade dos grãos, fato que influencia o comportamento total da massa de rejeitos. (VICK, 1983).

A disposição dos rejeitos e sua posição em relação aos diques de alteamento provocam variações na densidade e na umidade do material. Materiais sedimentados em reservatórios apresentam uma grande variabilidade de densidade aparente seca. Devido a compressibilidade dos rejeitos lançados hidráulmente, sua densidade tende a aumentar em regiões de maior profundidade de deposição. (GALO, 2017)

Maiores densidades de rejeito são fundamentais para uma estrutura estável, estando ela sujeita a esforços estáticos ou a esforços dinâmicos. Parâmetros de controle das condições de estabilidade estão diretamente ligados com a densidade dos aterros hidráulicos. (ÁVILA, ESPÓSITO, 2008)

3.3.3 Adensamento

Rejeitos recém depositados em reservatórios apresentam elevada quantidade de água. O processo de adensamento se inicia com a disposição e promove a perda de água do material fazendo com que prevaleçam as chamadas tensões efetivas. Tal condição faz com que o rejeito apresente comportamento de solos (ARAÚJO, 2006).

A ausência de um sistema de drenagem na estrutura limita o adensamento dos rejeitos e gera baixos valores de tensão efetiva, fazendo com que apresentem baixa massa específica e quase nenhuma resistência em sua superfície. Em contrapartida, um sistema de drenagem apropriado aumenta a massa específica dos materiais nos primeiros momentos após o lançamento e faz com que as propressões atuantes no material sejam negativas (GALO, 2017).

3.3.4 Parâmetros de resistência

De maneira geral, a ruptura dos solos se dá por cisalhamento. A resistência a cisalhamento de um solo é dada pela máxima tensão de cisalhamento a qual um solo pode ser submetido sem que haja ruptura.

O critério de Mohr–Coulomb define o critério de ruptura das areias e está definido na Equação [1].

$$\tau = c' + \sigma' * \tan \varphi' \quad [1]$$

em que:

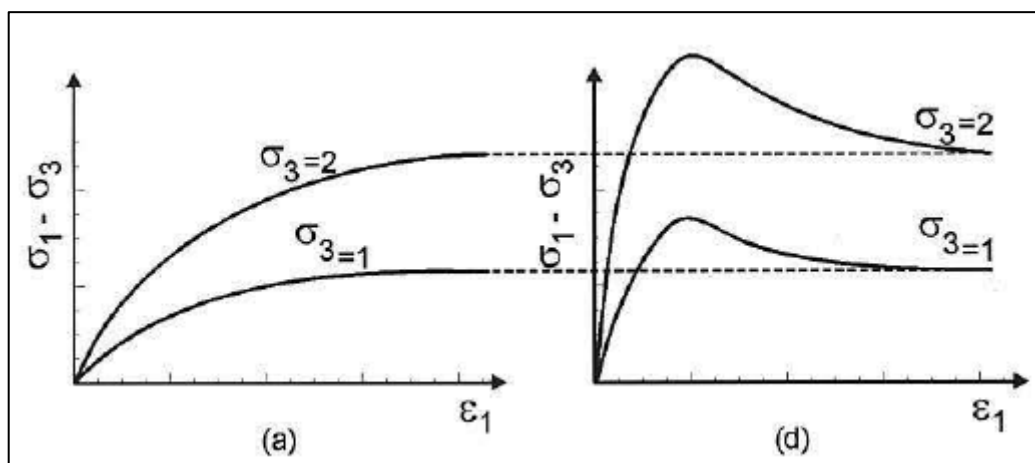
- τ = resistência ao cisalhamento;
- c' = coesão efetiva;
- σ' = tensão normal ao plano;
- φ' = ângulo de atrito efetivo;

Difícilmente os rejeitos de mineração apresentam valores significativos de coesão efetiva. Materiais compostos por areias finas e siltes com baixa plasticidade contam com uma resistência ao cisalhamento baseada no ângulo de atrito, sem a presença de coesão (VICK, 1983).

Os ensaios triaxiais adensados drenados (CD), adensados não drenados (CU) e de cisalhamento direto são utilizados em laboratório para se obter os valores de resistência ao cisalhamento, coesão efetiva e ângulo de atrito dos materiais. As areias, em ensaios triaxiais adensados drenados, têm o comportamento de sua curva de tensão–deformação baseado em sua compactidade (areias fofas ou compactas).

Para o caso das areias fofas, essas apresentam redução do volume com o cisalhamento e a tensão axial aumenta juntamente com a deformação até que se atinja, ou não, uma tensão máxima. Já as areias compactas apresentam um comportamento subdividido em três principais regiões: a primeira onde a tensão axial aumenta rapidamente com a deformação; a segunda próxima ao ápice onde ocorre o maior valor de tensão axial, e a terceira onde a curva de tensão–deformação é similar à observada nas areias fofas. A Figura 5 apresenta as curvas de tensão–deformação das areias fofas e das areias compactas.

Figura 5 – Curvas tensão–deformação das areias



(a) Areias Fofas; (b) Areias Compactas

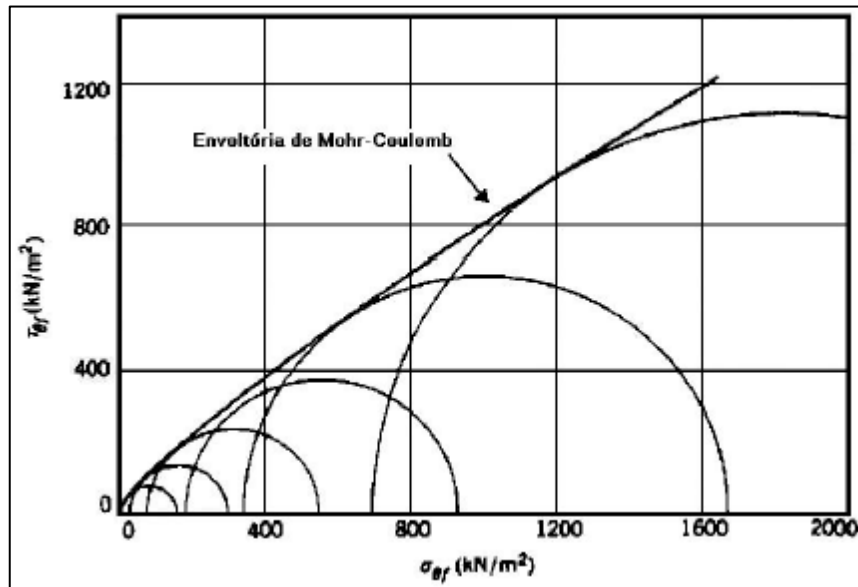
Fonte: Pinto (2006)

3.3.5 Envoltória de resistência

Normalmente os critérios de resistência de Mohr contam com uma representação curva, sendo essa a envoltória de resistência de todos os círculos de Mohr que representam os estados limites de resistência dos materiais. No entanto, devido a simplificações, as envoltórias são representadas como uma ruptura linear (CHARLES, SOARES, 1984).

A Figura 6 mostra uma representação do critério de resistência de Mohr-Coulomb.

Figura 6 – Envoltória Mohr-Coulomb



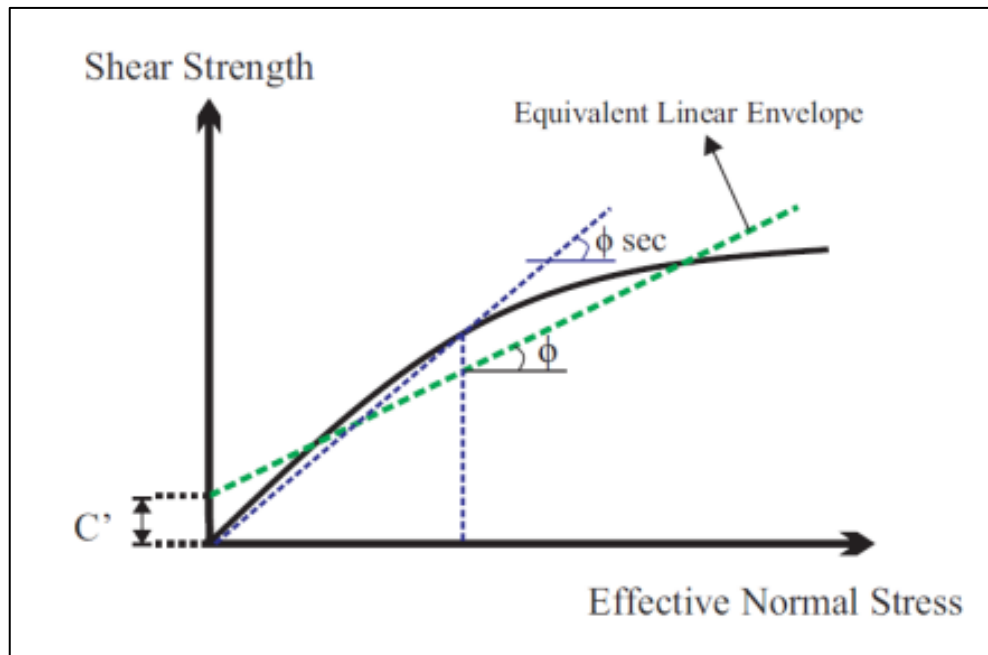
Fonte: Lambe, Whitman (1979).

O critério de Mohr-Coulomb para materiais arenosos é ideal para previsões somente em certa faixa de tensões normais, a qual deve ser selecionada de acordo com a situação a ser estudada. O critério mencionado pode ser caracterizado por possuir um bom ajuste dos dados de resistência residual, no entanto, caso materiais com um comportamento compacto (baixa tensão de confinamento) ou com comportamento fofo (maior tensão de confinamento) sejam utilizados para obtenção da resistência, o valor da coesão efetiva obtido pode vir a ser superior à resistência de cisalhamento real quando a tensão normal for igual a zero. Assim, para os casos mencionados não é recomendado realizar a extrapolação linear da resistência (CHARLES, SOARES, 1984; MELLO, 1977).

Desse modo, em situações em que não é possível fazer a utilização de uma envoltória curva, a envoltória linear pode ser aproximada por uma série de segmentos de reta como, por exemplo, uma envoltória bilinear (Figura 7), onde ocorre uma transição de segmentos na medida em que o nível de tensão aplicada se altera.

Figura 7 – Aproximação de envoltória não linear para envoltória bilinear

Fonte: Maghsoudloo (2013)



3.4 Mecanismos de ruptura de barragens de rejeitos

Visando a segurança de barragens de rejeitos é necessário estudar os principais mecanismos de ruptura que podem atingir tais estruturas a fim de melhorar a tomada de decisão mediante as situações práticas, promovendo assim medidas de correção de falhas mais eficientes (VALERIUS, 2014). Dentre todas as causas que podem vir causar instabilidade a essas estruturas se destacam a liquefação, o galgamento e o *piping*.

3.4.1 Ruptura por galgamento

O galgamento, ou *overtopping*, está ligado a incapacidade do sistema de extravasão verter a vazão afluente ao reservatório. Esse método de ruptura está associado a passagem da água pela crista do dique de contenção, levando à ruptura parcial ou total do maciço.

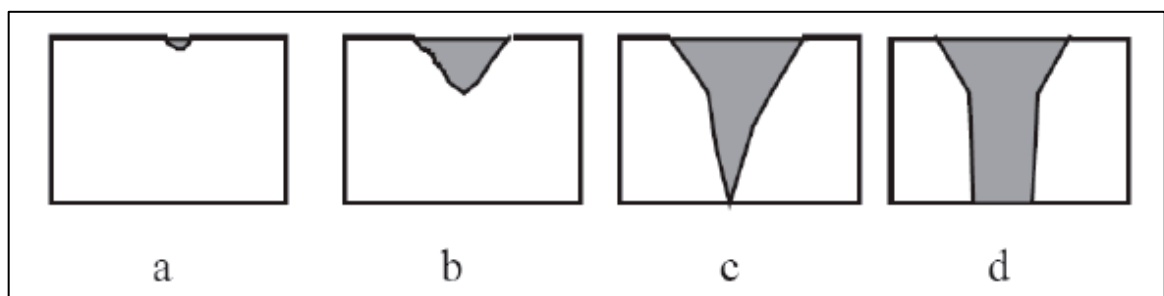
Existem três situações principais que podem desencadear o galgamento da estrutura (COLLISCHONN, 1997), sendo elas:

- Formação de cheia superior àquela utilizado no projeto das estruturas vertentes, fazendo com que não sejam capazes de verter a cheia afluente;
- Falhas na operação da estrutura vertente;

- Formação de ondas no reservatório (ondas podem ser de origem sísmica ou por deslizamentos de encostas)

De acordo com a intensidade e o tempo do galgamento, pode-se iniciar um processo de formação de uma brecha na crista da barragem, a qual tende a aumentar com o tempo devido ao processo erosivo. A Figura 8 apresenta uma esquematização da formação de uma brecha no barramento, enquanto a Figura 9 apresenta uma sequência ilustrativa do fenômeno de galgamento.

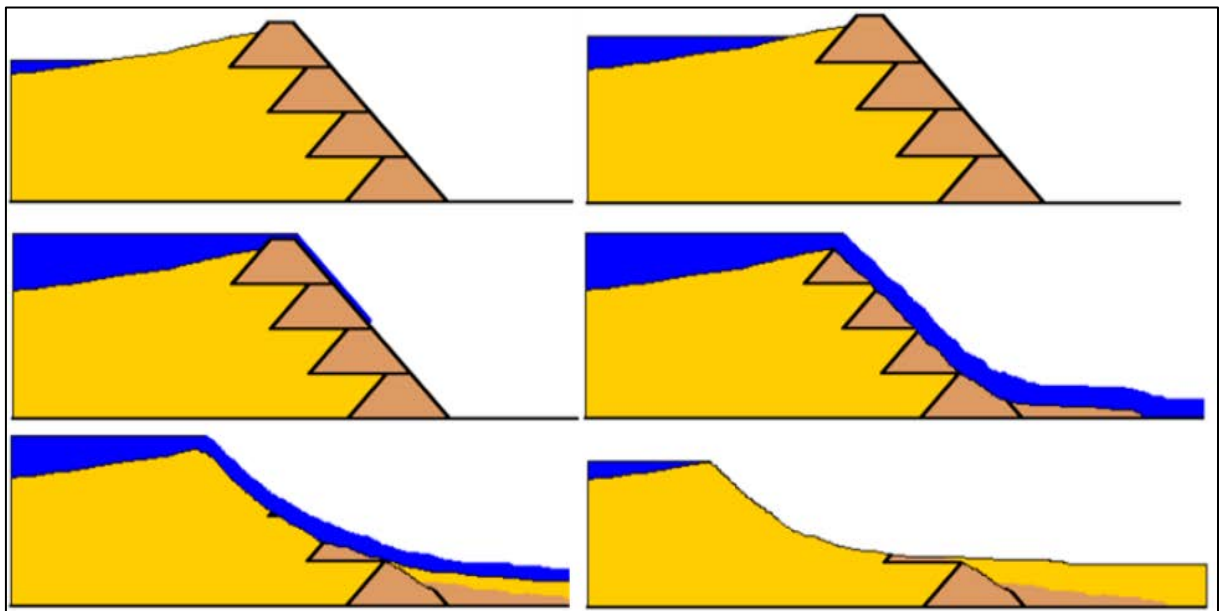
Figura 8 – Formação da brecha em ruptura por *overtopping*.



(a) Início da brecha em região de maior fragilidade; (b) brecha em formato característico; (c) aprofundamento da brecha; (d) aumento lateral da brecha por erosão.

Fonte: Lauriano (2009).

Figura 9 – Sequência ilustrativa de *overtopping* em barragem de rejeito.



Fonte: Galo (2017).

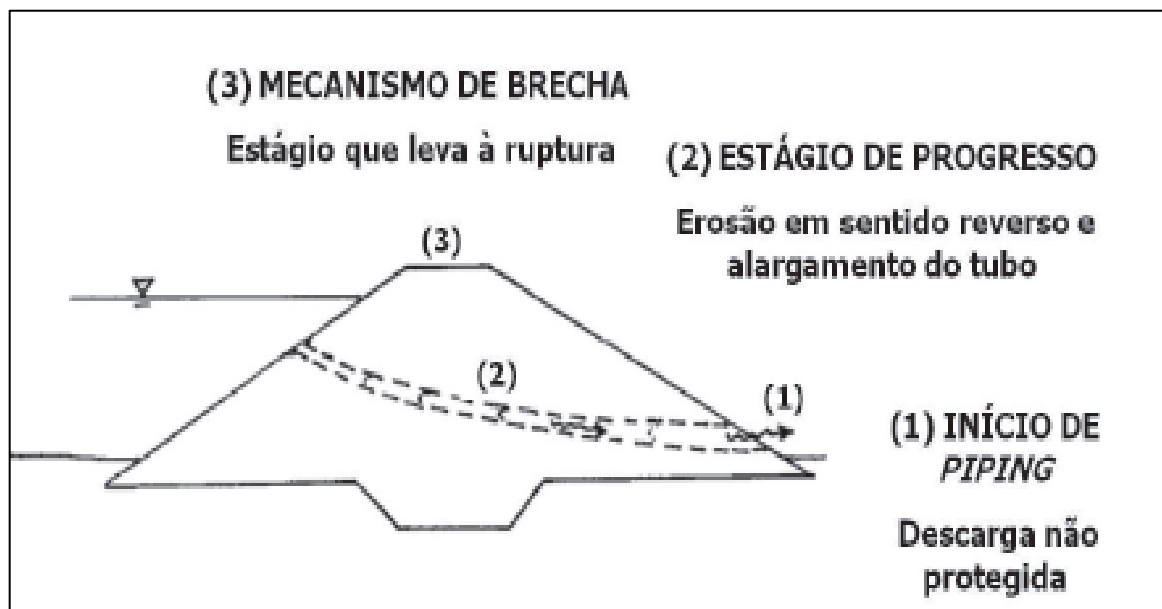
3.4.2 Ruptura por *piping*

Ruptura hidráulica é a denominação atribuída a perda de resistência e da estabilidade de uma porção de solo devido a forças de percolação. Quando em estágio inicial, a perda de resistência provoca uma erosão em determinado ponto aumentando o fluxo de água e o gradiente hidráulico na região. Assim o ponto de erosão inicial começa a progredir pelo interior do barramento (TOMÁS, 2016).

A ruptura hidráulica por *piping* desencadeia um processo erosivo onde os grãos de solo são carregados pelas forças de percolação e apresenta um comportamento análogo às erosões superficiais (MAIA, 2015). A ocorrência do fenômeno no corpo dos aterros geralmente está ligada a falhas no sistema de drenagem interna. A ocorrência do fenômeno na região da fundação ou das ombreiras está atrelada tanto a falhas no sistema de drenagem quanto a problemas construtivos e/ou geológicos (GALO, 2017).

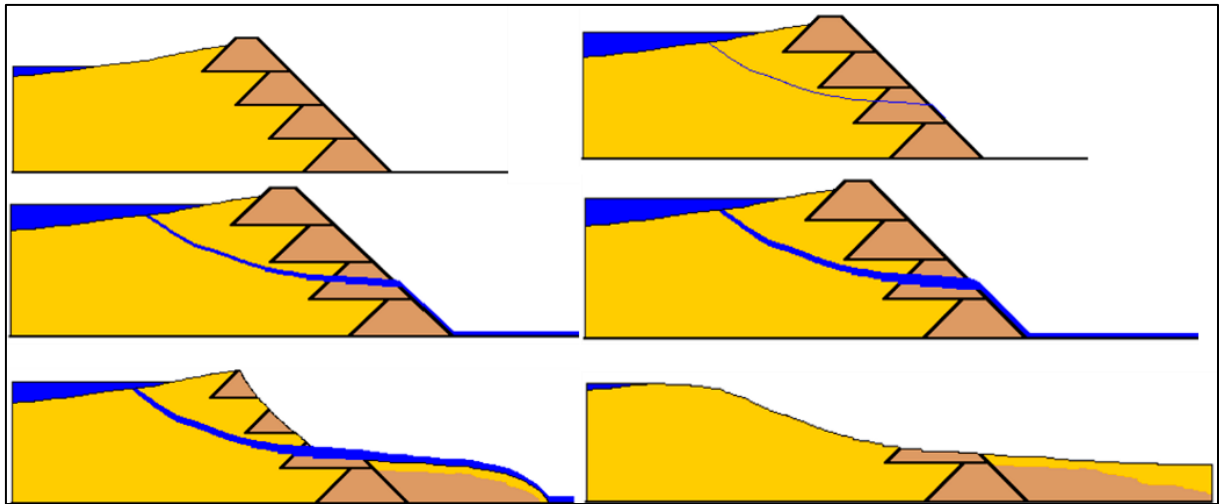
A Figura 10 apresenta os estágios de desenvolvimento no fenômeno em uma estrutura de terra enquanto a Figura 11 apresenta uma esquematização do processo em uma barragem de rejeitos.

Figura 10 – Estágios de desenvolvimento do *piping*.



Fonte: Lauriano (2019).

Figura 11 – Sequência ilustrativa de *overtopping* em barragem de rejeito.



Fonte: Galo (2017).

3.4.3 Ruptura por liquefação

O fenômeno de liquefação em uma barragem de rejeitos é caracterizado pela perda repentina da resistência dos materiais finos, saturados e fofos, desencadeada por uma redução significativa das tensões efetivas, aumentando as poropressões, e induzindo o rejeito a se comportar como fluido. Assim, a liquefação é um fenômeno que ocorre em solos arenosos em condições saturadas, fazendo com que o material se comporte como líquido perdendo o atrito entre seus grãos. Destaca-se para que o fenômeno ocorra o material granular deve apresentar suscetibilidade a liquefação, tomando como exemplo areias fofas ou pouco compactadas (SOUZA, 2016).

O chamado gatilho de liquefação é um fenômeno que desencadeia o processo em solos que tem suscetibilidade a liquefação. O gatilho está normalmente associado a carregamentos estáticos ou dinâmicos, ocorrendo na grande maioria das vezes em barragens que utilizam o método de alteamento a montante (RIBEIRO, 2015).

A Liquefação dinâmica está associada a terremotos e vibrações, ao passo que a liquefação estática não conta com muitos estudos associados, apresentando um número limitado de publicações e pesquisas associadas em bibliografias técnicas (DAVIES *et al.*, 2002).

Apesar da carência de dados indicativos dos gatilhos de liquefação estática, o fenômeno pode estar associado ao aumento das poropressões induzido tanto pelo aumento da linha freática quanto por taxas de carregamentos excessivos

(alateamentos executados de maneira muito rápida). Desse modo, as tensões cisalhantes estáticas passam a ultrapassar a superfície de ruptura, de maneira a criar uma situação de carregamento não drenada, podendo levar a uma movimentação da fundação e conseqüentemente a ruptura da estrutura (DAVIES *et al.*, 2002).

3.5 Legislação de barragens de rejeitos

A Lei Federal nº 12.334, promulgada no ano de 2010, alterada pela lei federal nº 14.066, promulgada no ano de 2020, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB, a qual se trata de um instrumento legal, a nível nacional, que trata de maneira detalhada, a segurança de barragens, incluindo as de rejeitos, no Brasil.

A PNSB é voltada para barragens de acumulação de água, disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Para se enquadrarem na lei, as barragens devem apresentar pelo menos:

- Altura do maciço, aferida do pé de talude jusante até a crista do barramento igual ou superior a quinze metros;
- Volume total maior ou igual a 3 milhões de m³;
- Armazenar resíduo considerado perigoso;
- Apresentar dano potencial associado médio ou alto;
- Apresentar categoria de risco alto a critério do órgão fiscalizador;

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) estabelece, na resolução nº 143/2012, que todas as barragens devem possuir uma classificação baseada nos seguintes critérios:

- Dano potencial associado – considera o dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, cuja graduação leva em conta as perdas de vidas humanas e os impactos sociais, econômicos e ambientais
- Categoria de risco – classifica a barragem de acordo com os aspectos que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente ou desastre, englobando suas características técnicas, estado de conservação e Plano de Segurança de Barragens

Em virtude do PNSB, foram criadas portarias e normas específicas para a fiscalização de barragens de rejeito. Como por exemplo, pode-se citar o Cadastro Nacional de Segurança de Barragens de Mineração foi criado pela Portaria DNPM nº 416/2012, o qual apresenta informações a respeito do Plano de Segurança, da Revisão Periódica de Segurança, Inspeções de Segurança Regulares e Especiais de Barragens de Mineração.

3.6 Análise de fluxo e percolação

As barragens de rejeitos são compostas por diferentes materiais e zonas com distintas propriedades geotécnicas. Sendo assim, determinar o fluxo d'água através dos maciços é um aspecto fundamental para a realização da análise de estabilidade.

A análise de fluxo em barragens de rejeito deve levar em consideração a origem dos materiais empregados na construção, logo não se deve esperar uma homogeneidade e uniformidade dos parâmetros utilizados. Aliado a isso, os diferentes períodos de construção dos alteamentos em conjunto com os materiais oriundos de pontos de lavra diferentes tornam certa a heterogeneidade dos materiais, fazendo com que seja necessário analisar os parâmetros e propriedades do solo a fim de se obter resultados condizentes com a situação das estruturas em campo (ARAÚJO, 2006)

O método de disposição dos resíduos nas barragens de rejeito também é um fator importante a ser considerado nos estudos de fluxo. A utilização de hidrociclones na deposição dos rejeitos de minério da origem ao fenômeno chamado segregação hidráulica, que nada mais é do que a tendência de deposição da fração sólida dos rejeitos tendo em vista seu peso próprio, gerando impactos diretos no posicionamento da linha freática e das zonas de saturação (ARAÚJO, 2006).

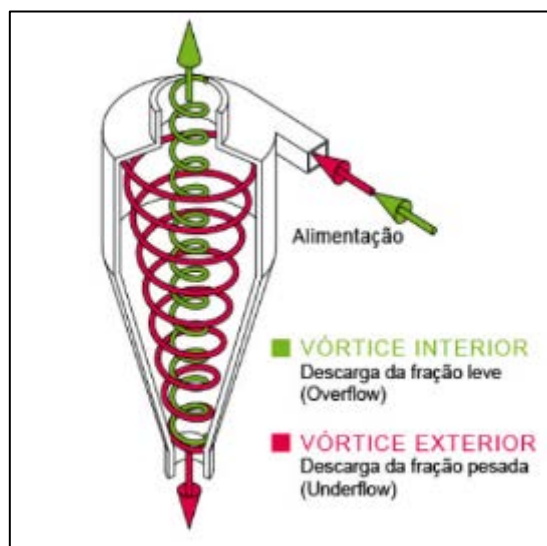
3.6.1 Aterro hidráulico

A técnica de aterro hidráulico consiste em transportar todo material proveniente dos processos de beneficiamento utilizando água ou demais fluidos. Considerando a construção de barragens de terra convencionais é uma técnica que caiu em desuso sendo, no entanto, muito empregada em barragens de rejeito devido ao baixo custo e às condições e características de transporte de rejeitos (RIBEIRO, 2000; AGOSTINO, 2008).

Os métodos de lançamento hidráulico de rejeitos mais empregados fazem uso de hidrociclones ou canhões. A segregação dos rejeitos, quando feito o uso dos canhões, ocorre na própria praia e é dado em função das características e concentração dos materiais. Já no uso de hidrociclones, realiza-se uma classificação granulométrica dos rejeitos antes do lançamento (SANTOS, RIBEIRO, 2007).

Hidrociclones (Figura 12), quando instalados próximos a barragem, segregam os materiais com diferentes granulometrias, fazendo com que o rejeito de fração granular seja lançado pela parte inferior do ciclone (*underflow*), enquanto a fração fina é lançada pela parte superior do ciclone (*overflow*). Salienta-se que os materiais mais grosseiros são mais resistentes e permeáveis quando comparados aos materiais mais finos (SANTOS, 2004).

Figura 12 – Detalhamento de um hidrociclone.



Fonte: Akw (2018).

O fenômeno de segregação hidráulica (separação dos materiais de acordo com a granulometria) também pode ocorrer naturalmente através da sedimentação em etapas da parte sólida. Primeiramente ocorre a sedimentação dos grãos mais pesados criando assim um gradiente de concentração ao longo da praia de rejeitos (RIBEIRO, 2000).

A segregação hidráulica tem influência direta na condutividade hidráulica dos rejeitos depositados ao longo de zonas diferentes da praia, devendo assim ser considerada nos modelos de fluxo no interior do barramento (REZENDE, 2013).

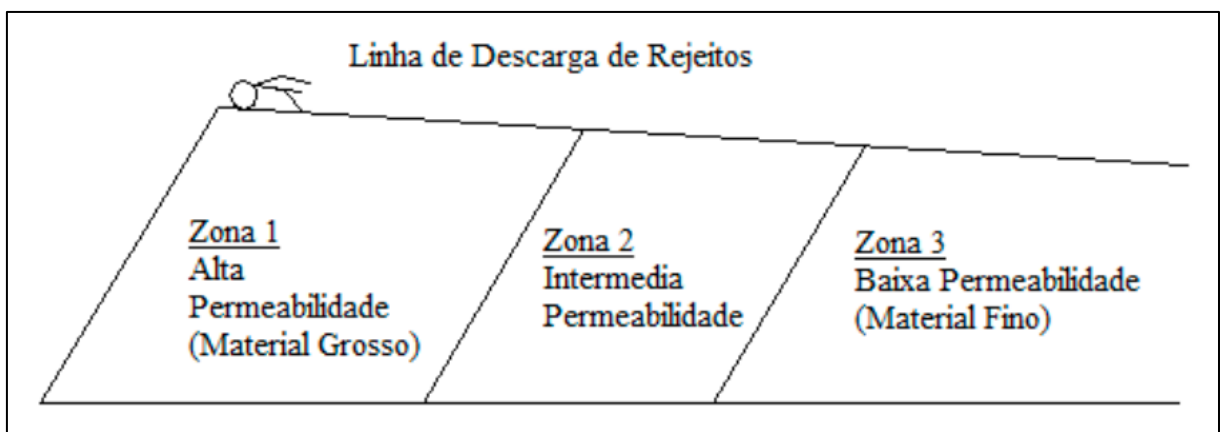
3.6.2 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica é uma propriedade que pode ser definida como a facilidade da água percolar em determinado tipo de solo. Características relacionadas a condutividade hidráulica estão ligadas a determinação das poropressões e cargas totais, ao dimensionamento do sistema de drenagem e ao posicionamento da linha freática (FILHO, 2004).

Características como processo construtivo, características do fluido percolante e parâmetros geotécnicos do rejeito exercem influência direta na condutividade hidráulica (SILVA, 2017). Desse modo o fenômeno de segregação hidráulica faz com que existam zonas de maior permeabilidade próximas aos pontos de descarga, uma vez que nessa região estão dispostos materiais com granulometria mais grossa. Já em regiões mais afastadas do ponto de lançamento, são esperadas zonas de menor permeabilidade devido a maior concentração de materiais de granulometria mais fina. Por fim, na região entre as áreas mencionadas é esperada uma zona com permeabilidade intermediária (ARAÚJO, 2006).

A Figura 13 apresenta um modelo teórico das zonas de permeabilidade de rejeitos.

Figura 13 – Modelo de zonas de permeabilidade devido a segregação hidráulica.



Fonte: Araújo (2006).

Destaca-se que o modelo apresentado na Figura 13 não leva em consideração a grande variação da densidade das partículas dos rejeitos, logo, trata-se de um modelo válido somente para barramentos onde os rejeitos contam com

massa específica dos grãos constante, uma vez que segregação hidráulica é influenciada pela massa específica das partículas (ARAÚJO, 2006).

A densidade dos materiais e a mineralogia são tão relevantes quanto a granulometria dos materiais, influenciando diretamente na forma como os rejeitos se distribuem no lançamento do aterro hidráulico, provocando alterações na permeabilidade. SANTOS (2004) elaborou um modelo que exemplifica a variação da permeabilidade ao estudar o transporte de sedimentos de rejeitos de minério de ferro (Figura 14).

Figura 14 – Detalhamento das zonas de permeabilidade no reservatório.



Fonte: SANTOS (2004).

Estudos utilizando rejeitos de minério de ferro apontam que a segregação decorrente do peso das partículas, faz com que zonas de maior concentração de minério sejam encontradas próximas ao ponto de lançamento, seguida de zonas de partículas arenosas com maiores diâmetros e por fim, em regiões mais distantes ao ponto de lançamento com partículas mais leves de granulometria fina (ARAÚJO, 2006).

O fluxo hídrico também é influenciado pelo grau de saturação dos solos. Solos saturados apresentam vazios entre as partículas preenchidos por água, fazendo com que a condutividade hidráulica, nessa situação, seja máxima. Já solos não saturados têm seus vazios preenchidos também por ar, o qual preenche os poros reduzindo a permeabilidade do material. Logo, o perfil de determinado solo está relacionado ao seu grau de saturação.

A determinação da condutividade hidráulica de rejeitos é realizada utilizando as mesmas técnicas empregadas em solos convencionais saturados (métodos diretos, indiretos ou laboratoriais) (REZENDE, 2013).

Os métodos diretos fornecem resultados mais compatíveis com a realidade, no entanto, demandam maior tempo de execução, mão de obra qualificada e recursos financeiros, fazendo com que os métodos indiretos ainda sejam os mais utilizados (ARSHAD *et al*, 2019).

Uma das principais formas de estimar a condutividade hidráulica de rejeitos arenosos é através do diâmetro efetivo do material, determinado através da análise granulométrica, utilizando a formulação de Hazen (HAZEN, 1983), apresentada na Equação [2].

$$k = C * D_{10}^2 \quad [2]$$

em que:

- k = condutividade hidráulica [cm/s];
- C = coeficiente ($90 \leq C \leq 120$);
- D_{10} = diâmetro efetivo [mm]

A equação acima foi determinada para grãos de areia com coeficiente de uniformidade inferior a 5 (areias uniformes) com diâmetro efetivo dos grãos entre 0,01 e 0,3 cm.

A fórmula de Terzaghi também permite calcular a permeabilidade através do diâmetro efetivo, e está apresentada na equação [3] (TERZAGHI, 1925).

$$k = C_1 * D_{10}^2 * (0,7 + 0,03.t) \quad [3]$$

em que:

- $C_1 = C_0 * \frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}}$
- t = temperatura [°C]
- C_0 = Coeficiente de permeabilidade ligado ao tamanho da partícula ($460 \leq c_0 \leq 800$);
- n = porosidade do material

3.6.3 Lagoa de decantação e praia de rejeitos

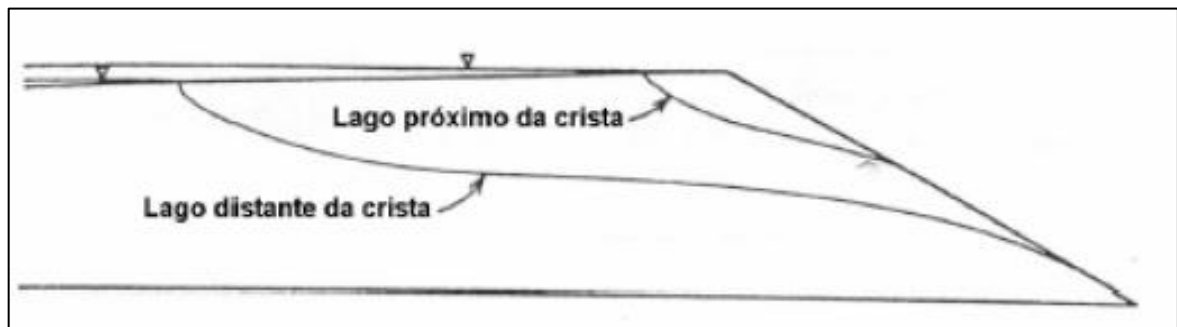
As características e propriedades das praias de rejeitos formadas por aterro hidráulico são resultado das características granulométricas, velocidade e método de descarga de rejeitos empregado na barragem e peso específico (AGOSTINHO, 2008).

A segregação hidráulica que possibilita a formação da praia de rejeitos. A concentração de sólidos presentes no material tem impactos no seu ângulo de disposição, ou seja, o ângulo de repouso tende a ser menor quanto menor for a quantidade de sólidos presente na polpa (SOARES, 2010).

Ainda segundo o autor, a principal composição do lago de decantação se dá pela disposição da parte argilosa contida nos rejeitos, fazendo com que seu processo de formação seja muito diferente dos observados nas praias.

A posição da linha freática está intimamente ligada a distância da praia de rejeitos em relação aos diques de alteamento. Lagos mais próximos a crista elevam a saturação e a poropressão nos taludes, desfavorecendo a estabilidade da estrutura (VICK, 1983 *apud* FILHO, 2004). A Figura 15 apresenta uma esquematização do posicionamento do lago e da linha freática em uma barragem.

Figura 15 – Esquematização da variação da linha freática de acordo com o lago de decantação.



Fonte: Vick (1983) *apud* Araújo (2006).

3.6.4 Sistemas de drenagem em barragens de rejeito

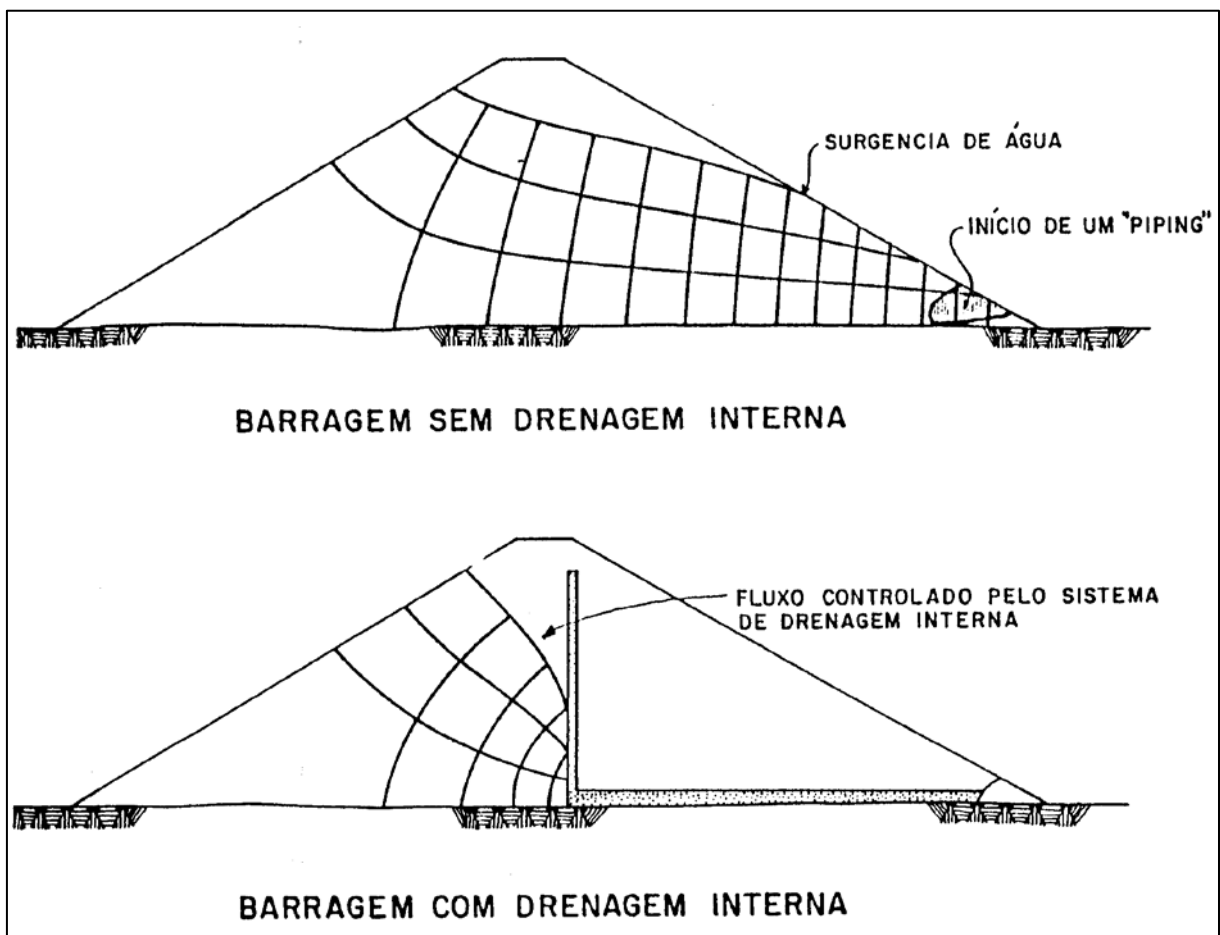
A existência de um sistema de drenagem em barragens, seja ele composto por filtros verticais ou tapetes drenantes, é essencial para se ter um controle da posição da linha freática. O comprometimento da integridade desse sistema em longo prazo está geralmente atrelado a problemas construtivos ou de colmatação (ARAÚJO, 2006).

Como dito anteriormente, a grande heterogeneidade dos rejeitos no que se diz respeito a permeabilidade, métodos construtivos e de disposição impacta diretamente o tipo de sistema de drenagem a ser implementado (FILHO, 2004).

Visando um controle adequado do fluxo de água no interior da barragem, deve-se considerar também a vazão pluviométrica afluente ao barramento, e não somente a vazão do rejeito. Junto a isso, a condutividade hidráulica das fundações também deve ser levada em conta, já que barragens com fundações mais permeáveis tendem a apresentar linhas freáticas menos elevadas quando comparadas àquelas executadas em solos de fundação com condutividades hidráulicas menores (TOMÉ, PASSINI, 2008).

A Figura 16 expõe a influência do sistema de drenagem interna no interior do maciço.

Figura 16 – Influência do sistema de drenagem interna em uma barragem.



Fonte: Bittar (2006).

Assim, a presença ou a falta de um sistema de drenagem eficiente e adequado causa impactos diretos nos regimes de poropressões no interior da barragem, fator esse essencial na garantia da estabilidade global da estrutura (ARAÚJO, 2006).

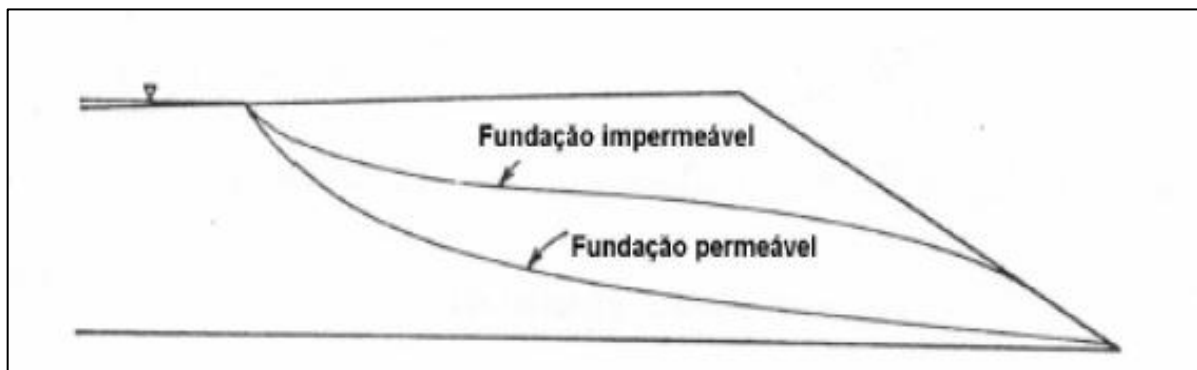
3.6.5 Percolação através da fundação

Como mencionado anteriormente, a condutividade hidráulica das fundações impacta diretamente no fluxo de água através das barragens. Em barragens convencionais, de maneira geral, o fluxo de água através da fundação é, na grande maioria das vezes, superior ao fluxo observado nos maciços de terra compactados (CRUZ, 1996).

Através da

Figura 17 é possível observar a influência da variação da permeabilidade da fundação com o posicionamento da linha freática.

Figura 17 – Influência da permeabilidade da fundação na linha freática.



Fonte: Vick (1983) *apud* Araújo (2006).

De maneira geral, pode-se dizer que barragens com fundações com maior permeabilidade, resistência a liquefação e a esforços de deformação são as mais adequadas para a implementação de barragens de rejeito (CASTRO, 2008).

A anisotropia é um fator que também deve ser considerado ao se fazer o estudo da condutividade hidráulica e do fluxo na fundação. Tal parâmetro faz com que a condutividade hidráulica seja diferente para cada uma das condições de fluxo (x, y e z), podendo influenciar na velocidade de percolação e, conseqüentemente, na permanência do fluido na fundação, agindo assim, diretamente na linha freática e subpressão (CRUZ, 1996).

3.7 Estabilidade de taludes

O estudo da estabilidade é um fator importância na garantia da segurança dos taludes, sejam eles aterros compactados, escavados ou naturais, devendo ser considerado tanto na fase de operação quanto na fase de projeto de barramentos.

Analisar a estabilidade de um talude nada mais é que determinar as tensões de cisalhamento exercidas nas superfícies de ruptura possíveis e compará-las com a resistência do solo ao cisalhamento. Entende-se por ruptura crítica a superfície que apresentar o menor fator de segurança obtido (DAS, 2007).

O fator de segurança (FS) é determinado pela razão entre o somatório das tensões de resistência ao cisalhamento e o somatório das forças cisalhantes que agem na superfície de ruptura. A equação de obtenção do fator de segurança está expressa na Equação [4]. O critério de ruptura normalmente empregado é o de Mohr-Coulomb. Destaca-se que, fatores de segurança iguais a 1 indicam que o talude apresenta estado de ruptura iminente.

$$FS = \frac{\sum \tau_r}{\sum \tau_c} \quad [4]$$

em que:

- FS = fator de segurança [];
- τ_r = forças de resistência ao cisalhamento [N/m²];
- τ_c = tensão cisalhante atuante na superfície de ruptura [N/m²];

Existem duas classificações para os métodos de análise de estabilidade, sendo eles o método determinístico e o método probabilístico. Os métodos determinísticos atribuem um valor médio a todas as variáveis utilizadas no cálculo do fator de segurança. Já os métodos probabilísticos consideram que os parâmetros de entrada são variáveis aleatórias, podendo assim assumir quaisquer valores dentro de um intervalo determinado, o qual é deduzido pela probabilidade de ocorrência e distribuição de frequência, obtidos através de dados disponibilizados (SAYÃO *et al.*, 2012).

Os métodos de Tylor, do talude infinito e das fatias são baseados no equilíbrio limite, sendo que o método das fatias conta com uma grande variabilidade de métodos de estabilidade, os quais apresentam diferentes graus de complexidade, sendo assim a ferramenta mais empregada para esse tipo de estudo no meio geotécnico.

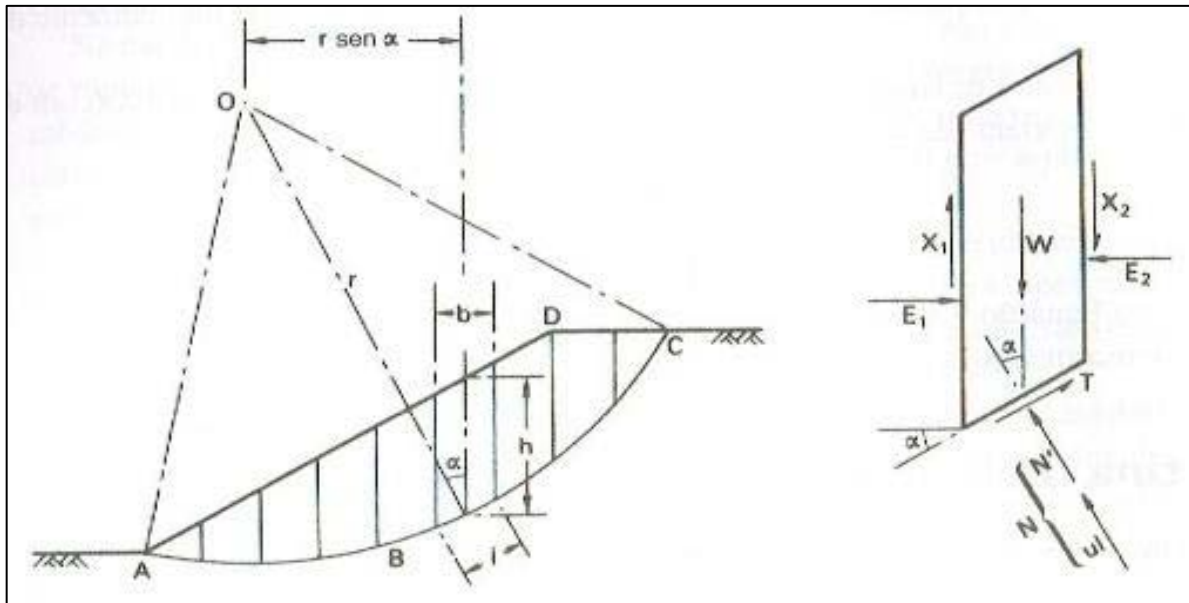
O método das fatias não possui restrições no que se diz respeito a homogeneidade do solo, geometria dos taludes e tensões utilizadas na análise (tensões totais ou tensões efetivas), fazendo com que seja o método mais empregado na estabilidade de taludes. A partir do método das fatias, o estudo de estabilidade pode ser executado em taludes de superfície irregular, com solos heterogêneos, além de permitir a inclusão nos cálculos das condições de poropressão e linha freática no interior dos maciços. O método consiste em dividir a superfície de ruptura potencial em fatias (Figura 18) e aplicar sobre elas as equações de equilíbrio dispostas a seguir:

$$\sum F_H = 0 \quad [5]$$

$$\sum F_V = 0 \quad [6]$$

$$\sum F_M = 0 \quad [7]$$

Figura 18 – Seção de ruptura e aplicação do método das fatias.



Fonte Craig, 2012.

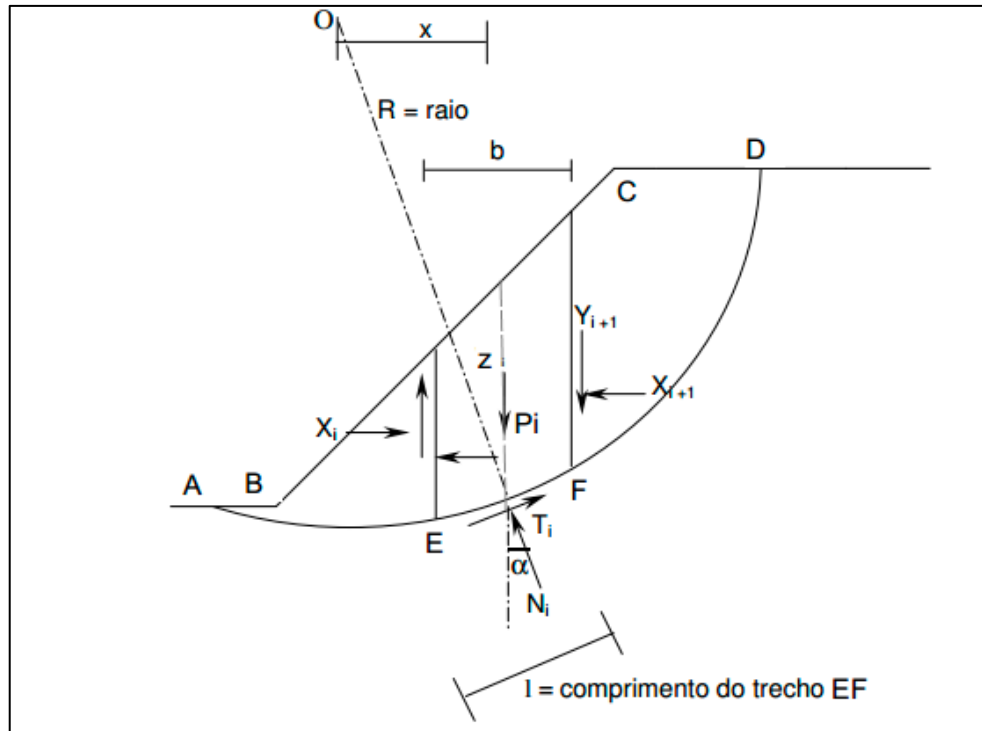
A aplicação das equações 5, 6 e 7 fornece um sistema onde o número de equações é menor que o número de incógnitas, fato que demanda algumas simplificações do problema para que uma solução seja obtida. As hipóteses de simplificação são a principal diferença entre os métodos das fatias existentes, os quais podem ser mais ou menos conservadores, resultado em diferentes resultados. Os principais métodos das fatias estão apresentados a seguir.

3.7.1 Método Fellenius ou Método Ordinário

Sendo conhecido como o primeiro método de estabilidade desenvolvido e apresentado em registros literários, o Método Ordinário ou de Fellenius, também conhecido como método sueco ou das fatias, foi desenvolvido em 1936. O método despreza a força entre as fatias, satisfazendo o equilíbrio entre os momentos, fato que possibilitou o cálculo dos fatores de segurança por métodos manuais, uma vez que os métodos computacionais eram inexistentes na época de sua criação (FIORI; CARMIGNANI, 2009).

O método é baseado na análise estatística do volume de material acima de uma superfície de ruptura circular, o qual é dividido em fatias. O cálculo considera somente o equilíbrio de momentos, não sendo consideradas as forças normais e tangenciais às paredes da fatia. A Figura 19 apresenta os parâmetros considerados para o desenvolvimento do método.

Figura 19 – Seção de ruptura e aplicação do método das fatias.



Fonte: Fabrício (2006).

Realizando a decomposição da força peso em suas componentes paralelas e normais ao plano de ruptura da base da fatia, considerando a pressão neutra juntamente com a Equação [4], obtém-se a Equação [4]:

$$FS = \frac{\sum [cl + tg\phi(P\cos\alpha_i - \mu l)]}{\sum P\sin\alpha_i} \quad [8]$$

em que:

- c = coesão do solo;
- l = comprimento da base da fatia;
- ϕ = ângulo de atrito interno do solo
- P = peso da fatia;
- α_i = inclinação da base da fatia
- μ = pressão neutra;

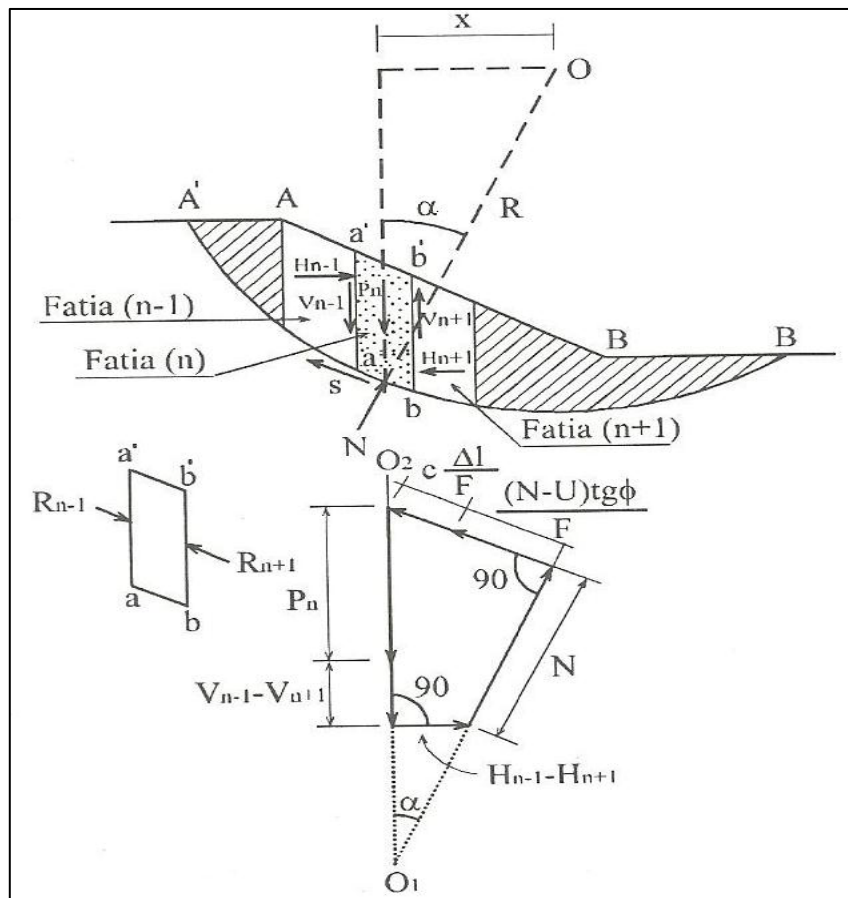
3.7.2 Método de Bishop

O presente método foi desenvolvido em 1955, por Bishop, e desenvolve o cálculo de estabilidade de taludes a partir da divisão da cunha de escorregamento

em várias fatias. O método é considerado como uma modificação do método de Fellenius, uma vez que passa a considerar a atuação das reações de fatias vizinhas.

A Figura 20 apresenta a distribuição de forças ao longo de uma fatia n .

Figura 20 – Distribuição de forças em uma fatia de solo (n).



Fonte: Caputo (1973).

A partir do polígono determinado, efetuando as devidas projeções de força peso, aplicando a definição do fator de segurança (Equação [4]) e considerando a igualdade de momentos em relação ao centro do círculo de raio (R), tem-se a Equação [9].

$$FS = \frac{1}{\sum P_n \sin \alpha} \sum \frac{(P_n + V_{n-1} - V_{n+1} - U \cos \alpha) \tan \phi + cl \cos \alpha}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{FS} * \tan \phi} \quad [9]$$

em que:

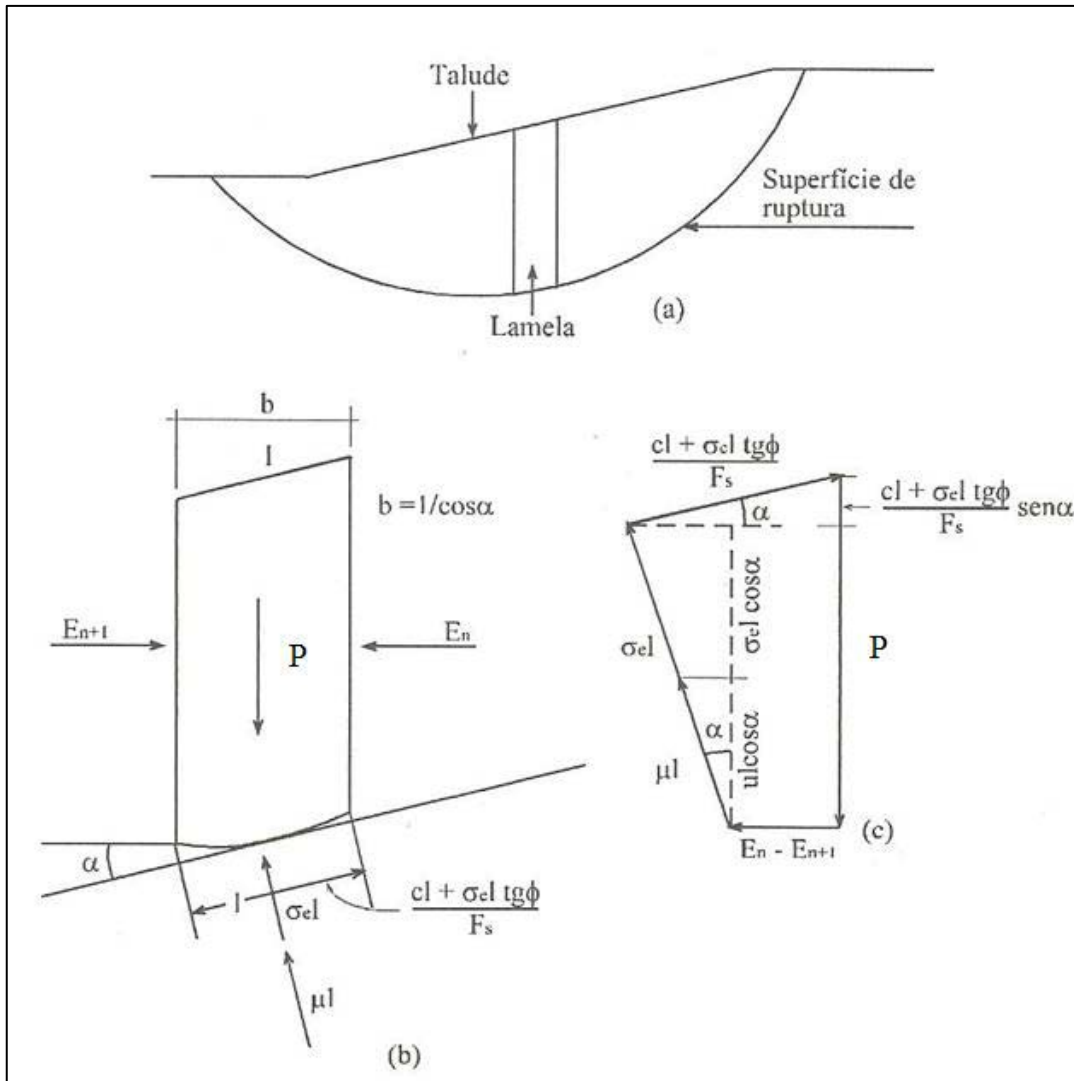
- cl =força de resistência devido a coesão do solo;
- ϕ =ângulo de atrito interno do solo
- P =peso da fatia;
- α =inclinação da base da fatia
- U =força neutra;

O procedimento de cálculo parte de um valor aproximado do fator de segurança, determinando assim o segundo elemento da equação. O cálculo se repete até a obtenção de um fator de segurança satisfatório. Destaca-se que o fator $V_{n-1} - V_{n+1}$ pode ser igualado a zero, uma vez que, segundo Bishop, a simplificação resulta em erros da ordem de 1%.

3.7.3 Método de Bishop Simplificado

A partir da simplificação do fator $V_{n-1} - V_{n+1}$, apresentado na Equação [9], procedido do desenvolvimento adequado dos termos a partir da distribuição de forças verticais presentes na fatia (Figura 21).

Figura 21 – Forças distribuídas em lamela de solo.



Fonte: Marangon (2004)

Obtendo-se:

$$FS = \frac{\Sigma(bc + P - \mu B)tg\phi * \frac{1}{m_a}}{\Sigma P sen\alpha} \quad [10]$$

onde:

$$m_a = cos\alpha \left(1 + \frac{tg\phi \cdot tg\alpha}{FS} \right) \quad [11]$$

em que:

- c = coesão do solo;

- ϕ = ângulo de atrito interno do solo
- P = peso da fatia;
- α = inclinação da base da fatia
- μ = pressão neutra;

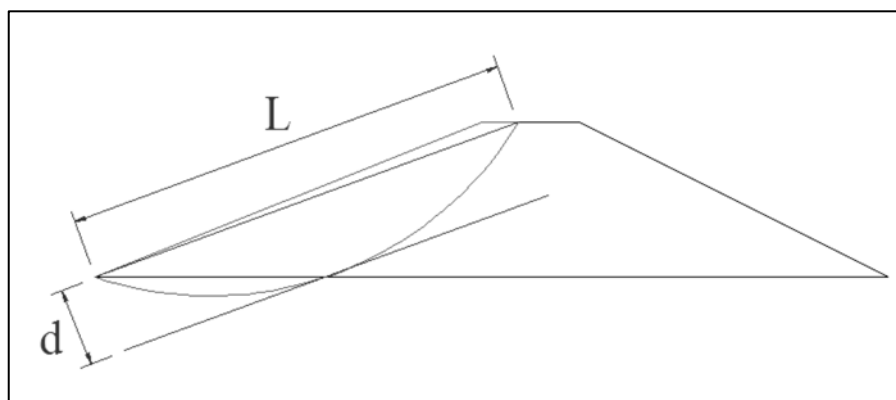
Nota-se que “FS” aparece em ambos os membros das equações, logo um procedimento específico deve ser realizado para o cálculo final do valor. Deve-se tomar um valor aproximado do fator de segurança para a Equação [11] e a partir do valor obtido, calcular o FS com a Equação [10]. Caso haja divergência muito grande do resultado obtido com o valor inicial, o procedimento deve ser repetido até que se tenham valores aproximados na situação mencionada.

3.7.4 Método de Janbu Simplificado

O método de Janbu simplificado é empregado em superfícies de escorregamento não necessariamente circulares.

A formulação de Janbu é semelhante a utilizada pelo método de Bishop simplificado, divergindo por um fator de correção relacionado com a geometria da superfície de escorregamento (Figura 22).

Figura 22 – Dimensões utilizadas no fator de correção do fator de correção



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Equação [12] apresenta a formulação de Janbu simplificado, enquanto a Equação [13] apresenta a formulação para a obtenção do fator de correção. Destaca-se que a formulação também depende da coesão e ângulo de atrito interno.

$$FS = f_0 \frac{\Sigma(bc + P - \mu B)tg\phi * \frac{1}{m_a}}{\Sigma P sen\alpha} \quad [12]$$

$$f_0 = 1 + k \left[\frac{d}{l} - 1,4 \left(\frac{d}{L} \right)^2 \right] \quad [13]$$

$$c' > 0 \rightarrow k = 0,31$$

$$c' > 0 \text{ e } \phi > 0 \rightarrow k = 0,50$$

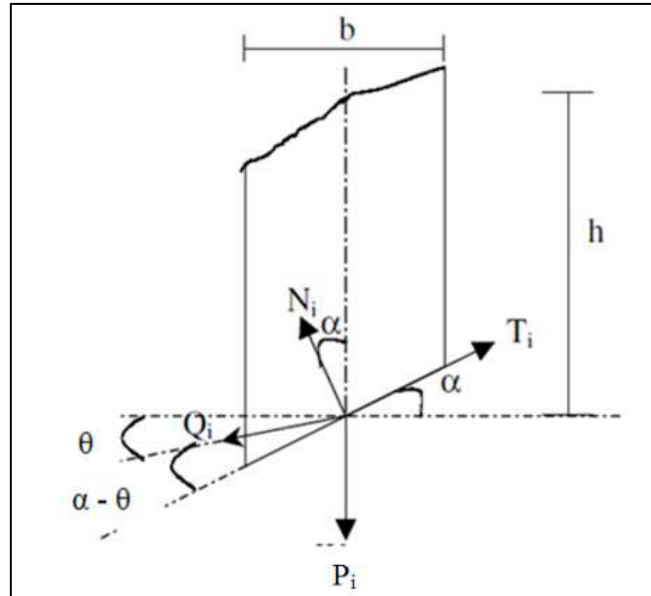
3.7.5 Método de Spencer

Trata-se de um método desenvolvido para aplicação em superfícies de ruptura circulares, mas que podem ser adaptadas superfícies não circulares contendo um centro de rotação fictício (NASH, 1987).

O Método assume paralelismo das forças entre as fatias, ou seja, possuem o mesmo ângulo de inclinação, o qual é calculado durante a resolução do problema. A determinação do fator de segurança é feita de maneira iterativa, onde são adotados fatores de segurança e ângulos de inclinação de maneira a se repetir o procedimento de cálculo até que seja satisfeito o equilíbrio de momentos e de forças para cada fatia.

A Figura 23 apresenta as hipóteses que devem ser levadas em conta para o desenvolvimento dos cálculos pelo método de Spencer

Figura 23 – Hipóteses consideradas pelo método de Spencer



Fonte: Fabrício (2006).

Aplicando os equilíbrios de forças e desenvolvendo as devidas simplificações, chega-se as seguintes equações

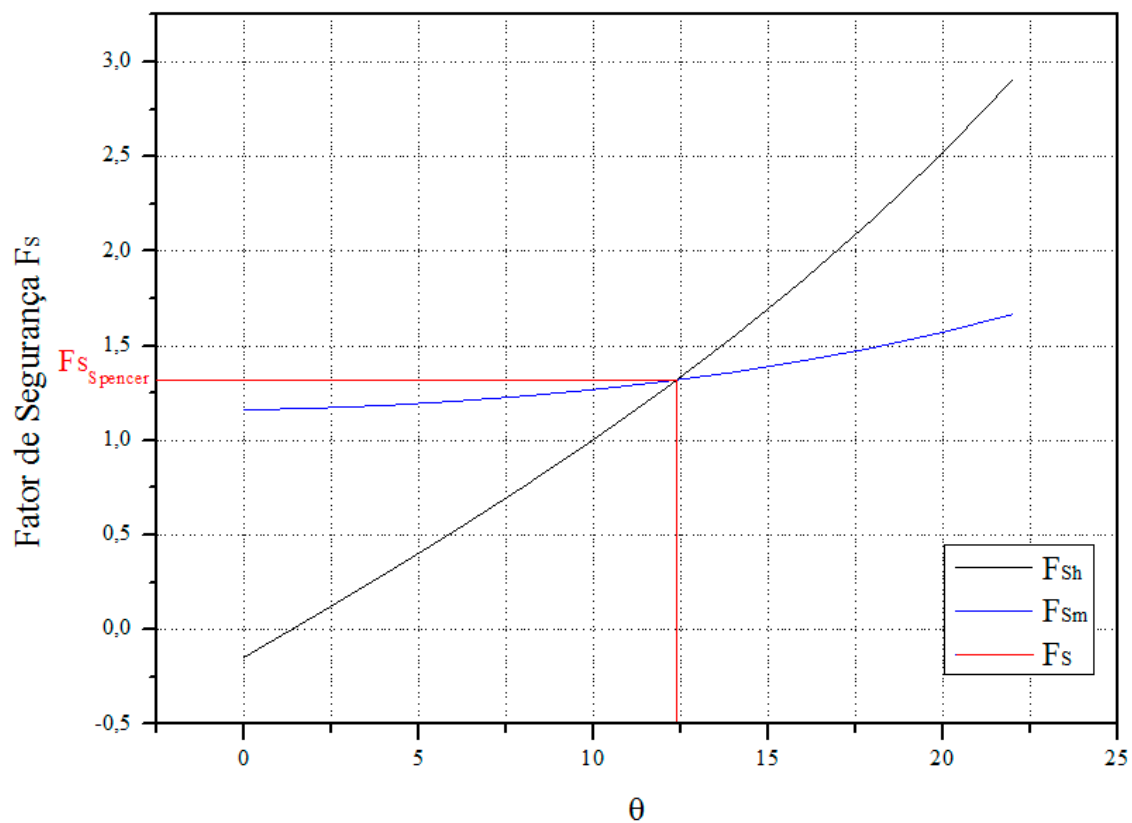
$$Q = \frac{\frac{c.b.\sec \alpha}{2} + \frac{tg\phi(h\cos \alpha - \mu b \sec \alpha)}{FS} - P\sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left[1 + \frac{tg\phi.tg(\alpha - \theta)}{FS} \right]} \quad [14]$$

$$\Sigma Q \cos(\alpha - \theta) = 0 \quad [15]$$

$$\Sigma Q = 0 \quad [16]$$

Assim, são plotados gráficos de F_{sm} (Equação [15]) e F_{sh} (Equação [16]), a partir do valor de Q determinado pela Equação [14]. O ponto de intersecção das duas funções obtidas fornece o valor do Fator de segurança que atende as duas equações. A Figura 24 ilustra o procedimento descrito.

Figura 24 – Procedimento de obtenção do fator de segurança para o método de Spencer.



Fonte: Pereira (2013).

3.7.6 Método de Morgenstern–Price

O método de Morgenstern e Price foi desenvolvido em 1965 e possibilita a utilização de funções genéricas especificadas pelo usuário que relacionem as forças normais e as forças cisalhantes. Além do método satisfazer o equilíbrio das forças e dos momentos, também leva em consideração as forças normais e de cisalhamento entre as fatias. O programa Slope/W, do software Geostudio conta com algumas funções entre fatias já disponíveis o cálculo do método. Para casos em que nenhuma função é selecionada ou especificada, o método de Morgenstern-Price se torna idêntico ao método de Spencer.

4. METODOLOGIA

A concepção do presente trabalho inicialmente contava com a disponibilização de dados suficientes para a avaliação da estabilidade de uma barragem de rejeitos já existente. Devido a políticas de privacidade e divulgação dos empreendedores consultados, tais dados não puderam ser obtidos para análise.

Assim, o desenvolvimento do presente trabalho tomou como base a concepção estrutural de 3 tipos de barragens de rejeitos de mineração, para as quais foram simulados diferentes cenários de carregamento visando avaliar a análise de fluxo no barramento e o comportamento do fator de segurança calculado por diferentes métodos.

Todas as informações a respeito de materiais, geometria, software utilizando, dentre outras serão apresentadas nos seguintes tópicos.

3.1 Concepção Estrutural (ou modelagem gráfica)

Como mencionado anteriormente, devido à dificuldade de obtenção de dados empíricos de uma barragem de rejeitos já existente (tais como geometria; dados de instrumentação; parâmetros dos solos utilizados nos diques de alteamento e dos rejeitos; dentre outros) optou-se por analisar a influência do método construtivo (alteamentos a montante, jusante e linha de centro) de barragens de rejeito de mineração nos valores do fator de segurança.

Para proceder com tal análise, foi elaborado um projeto conceitual de uma barragem de rejeitos para cada um dos 3 métodos construtivos existentes (método de montante, método de jusante e método de linha de centro).

Devido à grande quantidade de estudos observados, o presente trabalho tomou como base rejeitos de minérios de ferro, principalmente no que se diz respeito as propriedades geotécnicas e geometria. Destaca-se que, devido à grande variabilidade dos parâmetros, foram utilizados aqueles com valores próximos aos menores valores encontrados na bibliografia consultada.

Os projetos consideraram barragens constituídas por 6 tipos de materiais (fundação, aterro do dique de partida, aterro dos diques de alteamento, rejeito disposto, rejeito adensado e areia do sistema de drenagem), os quais terão suas propriedades de fluxo e de resistência detalhadas nos tópicos a seguir.

Como método construtivo, foram elaboradas seções construídas pelo método de alteamento a montante, a jusante e a linha de centro. Os modelos foram elaborados tomando como base os projetos e esquematizações dos referidos métodos construtivos encontrados na bibliografia consultada.

A concepção da geometria das 3 seções considerou alteamentos de 10 metros, intercalados por bermas de 5 metros no cenário de alteamento a montante,

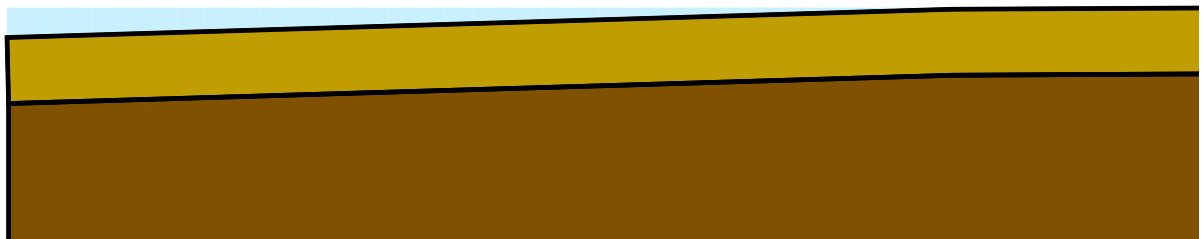
especificamente. O dique de partida apresenta taludes com inclinações de 1:1,5, enquanto os diques de alteamento possuem taludes com inclinações de 1:2. Ao todo, foram considerados 5 alteamentos além do dique de partida.

A configuração da praia de rejeitos consistiu em duas diferentes fases: uma na porção sob a linha d'água, apresentando maior inclinação da ordem de 3%; a outra na porção de rejeitos acima da linha d'água, apresentando inclinação menor quando comparada a parte submersa, da ordem de 0,5%. Destaca-se que a distância inicial da praia de rejeitos em relação aos diques de alteamento foi de 150 metros. O solo de fundação foi escolhido de acordo com o material mais encontrado nas regiões do estado de Minas Gerais, uma vez que esse consiste no estado com maiores concentrações de barragens de rejeitos no país.

O sistema de drenagem das seções do método de alteamento a jusante e de linha de centro percorre os diques de alteamento desde o dique de partida até o último dique executado, enquanto o método de alteamento a montante conta apenas com um tapete drenante sob o pé do dique de partida.

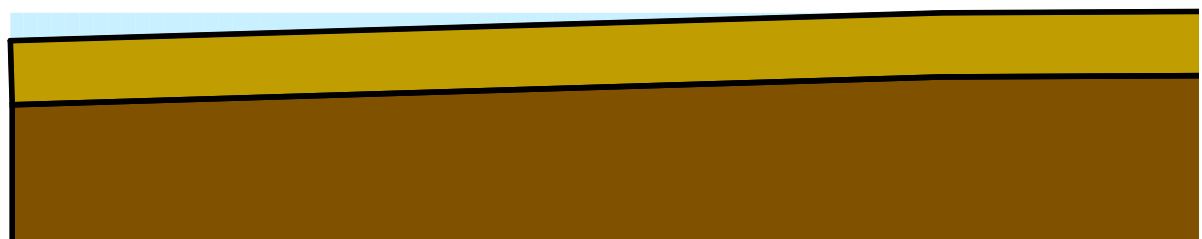
As figuras a seguir ilustram as geometrias, juntamente com as regiões de aplicação de cada material utilizadas para o desenvolvimento do presente estudo:

Figura 25 – Geometria – Método de jusante.



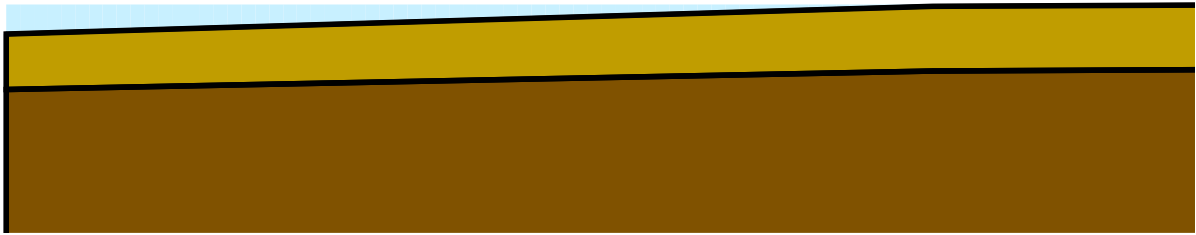
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Geometria – Método de linha de centro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Geometria – Método de montante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Modelagem numérica

O presente tópico visa apresentar os métodos utilizados para a obtenção do fator de segurança e apresentar, de maneira quantitativa, os valores dos parâmetros geológicos e geotécnicos dos solos utilizados dos materiais utilizados na concepção da estrutura.

A análise dos fatores de segurança para os diferentes cenários e métodos apresentados foi elaborada a partir do software GeoStudio 2021.

A obtenção dos fatores de segurança através do software GeoStudio foi dividida em duas partes: a primeira, consiste em analisar as condições de percolação e fluxo do barramento a fim de se obter a linha freática (utilizando a ferramenta Seep/W) enquanto a segunda consiste em determinar os parâmetros de resistência dos materiais para assim obter, aliado a linha freática já determinada, o valor do fator de segurança (utilizando a ferramenta Slope/W).

3.1.1 Análise de fluxo e percolação

A diferença de cargas totais no interior do maciço é um fator que proporciona as condições de percolação de água. A existência de tal diferença faz com que o fluxo de água siga no sentido do ponto de maior carga total para o de menor. O chamado gradiente hidráulico surge devido a essa diferença de cargas totais, o qual possibilita a aferição da velocidade e vazão da água por meio da Lei de Darcy.

O perfil do maciço pode ser dividido em três zonas: não saturada; saturada por capilaridade; e saturada abaixo do nível d'água, onde as pressões de água são positivas. Acima do nível d'água, as pressões são negativas e denominada de

sucção. Pressões positivas tendem a afastar as partículas sólidas, enquanto as negativas atuam como agentes de atração de partículas (GERSCOVICH, 2012).

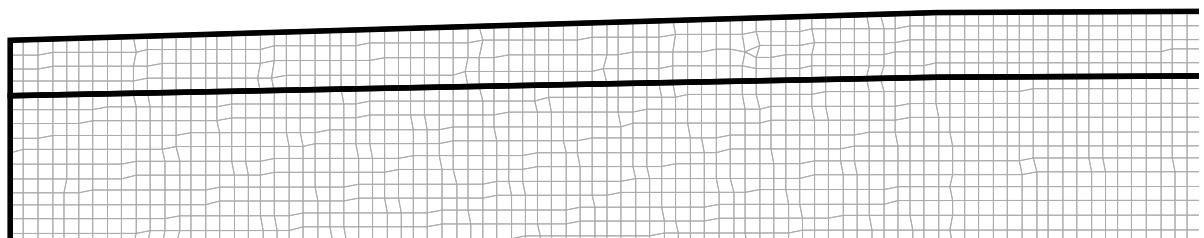
Se o solo for isotrópico em relação a permeabilidade, e for considerado um fluxo bidimensional (quando as partículas de água seguem caminhos curvos, mas contidos em planos paralelos), o fluxo interno d'água é determinado por meio das equações de Laplace.

A fim de solucionar as equações de Laplace, têm-se os traçados de rede de fluxo d'água em um talude, na qual se identificam as linhas de fluxo e as linhas equipotenciais, conforme ilustram os exemplos. Destaca-se que a superfície freática representa o limite entre a zona saturada e a não saturada, e que nesta região a poropressão (pressão indicada pelo piezômetro) é nula.

Como mencionado no tópico de revisão bibliográfica, a permeabilidade da fundação exerce grande influência no posicionamento da linha freática, sendo assim, a percolação de água em barramentos de terra considera fluxos não confinado, havendo percolação pela fundação da estrutura e não somente pelo maciço.

Há variados métodos de se resolverem problemas de percolação. Neste estudo, executa-se a análise de fluxo e percolação por meio de métodos numéricos (MEF – Método dos Elementos Finitos), conforme ilustra Figura 28. Após a criação de uma rede de elementos finitos, pode-se calcular a carga total em cada ponto.

Figura 28 – Exemplo de malha de elementos finitos utilizada na modelagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nas malhas de elementos finitos, com auxílio das ferramentas SEEP/W do **Software GeoStudio 2021.4**, pode-se analisar o talude e, com base nas características dos materiais, consegue-se fazer estimativas para o comportamento freático no solo.

Serão apresentados, como resultados, a representação visual da linha freática, linhas de fluxo e cargas totais no interior da seção do barramento para

condição de carregamento (que serão explicadas nos tópicos seguintes) analisada. Destaca-se que:

$$Carga\ total = carga\ altimétrica + carga\ piezométrica\ (ou\ poropressão) \quad [17]$$

em que:

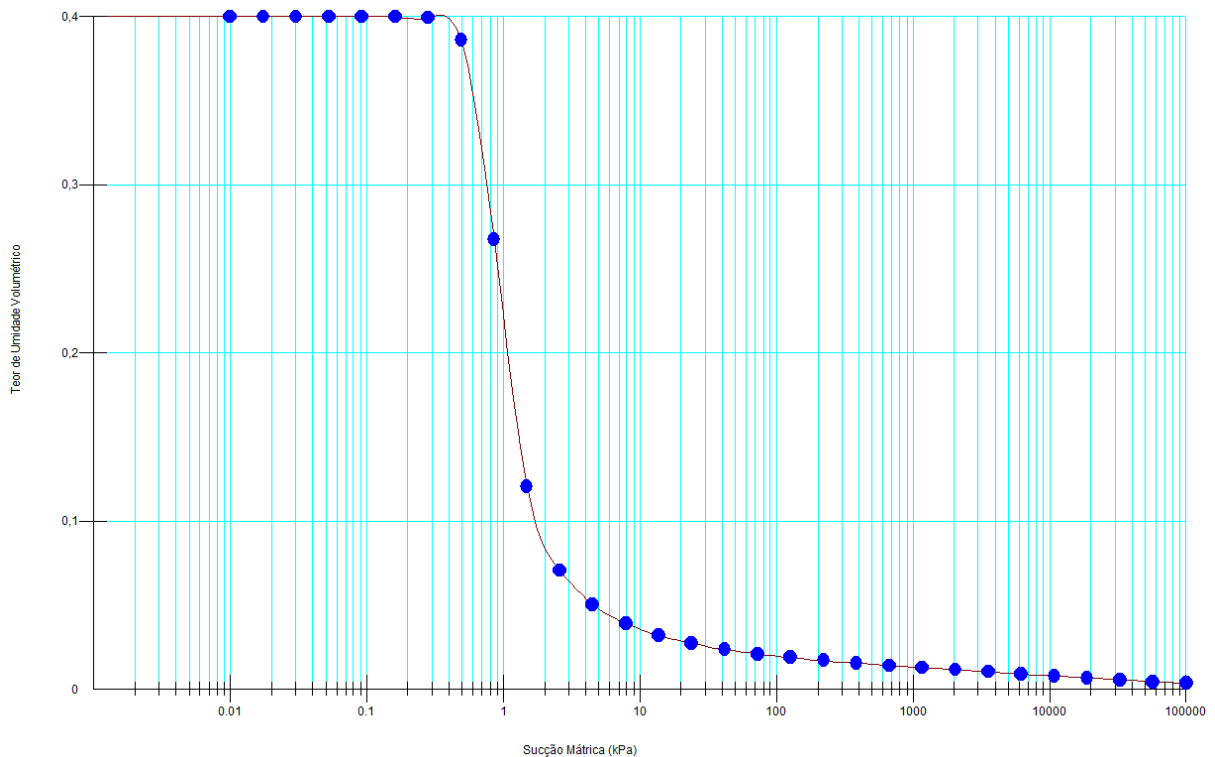
- Carga Altimétrica: diferença de cota entre o ponto considerado e a cota de referência
- Poropressão: pressão neutra no ponto considerado, expressa em altura de coluna d'água.

Como mencionado, a ferramenta Seep/W permite fazer a análise de fluxo em materiais saturados e não saturados, fator importante para o desenvolvimento do presente estudo, uma vez que barragens de rejeito apresentam regiões nas duas condições.

O estudo de percolação em materiais não saturados pode ser feito através da sucção. A sucção nada mais é do que a pressão responsável pela absorção ou perda de água de materiais porosos. A sucção pode ser dividida em duas componentes: a sucção matricial, relacionada ao tipo de partícula e sua estruturação; e a osmótica, ligada a química do solo (MARINHO, 1997).

A modelagem de materiais em condições não saturadas é realizada pela curva de retenção de água ou curva característica do material, que pode ser obtida por ensaios laboratoriais ou por formulações empíricas. As curvas correlacionam, geralmente, o grau de saturação com a sucção matricial, conforme apresenta a Figura 29.

Figura 29 – Exemplo de curva característica de solo utilizada modelagem.



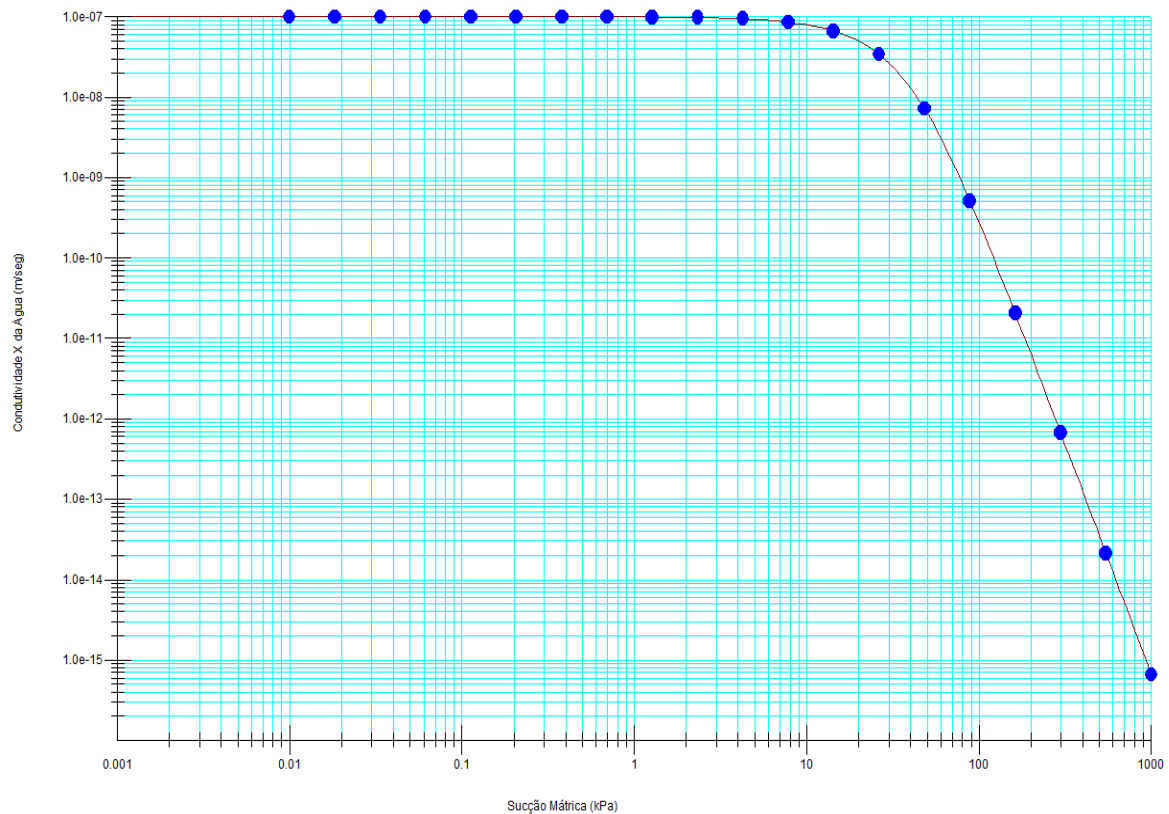
Fonte: Elaborado pelo autor.

O programa permite tanto a introdução das curvas de maneira manual quanto de maneira estimada a partir de curvas características típicas dos materiais existentes no banco de dados do programa. Os estudos do presente trabalho levaram em conta as curvas do banco de dados do software devido à ausência de dados reais de uma barragem de rejeitos.

O programa Seep/W conta também com três métodos que permitem estimar a permeabilidade para materiais na condição não saturada baseados na curva característica apresentada na Figura 29.

A estimativa da permeabilidade do presente estudo foi estimada a partir da equação de VAN GENUCHTEN, a qual determina a condutividade em função (Figura 30) da sucção matricial a partir da curva características do solo. Assim, os parâmetros de ajuste para análise de fluxo e percolação foram retirados da literatura. E serão estimados graficamente através das curvas presentes no próprio software. Destaca-se que a fundação será analisada somente em condições saturadas de operação do barramento.

Figura 30 – Exemplo de permeabilidade utilizada no estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tanto para os diques de partida iniciais quanto para os diques de alteamento foi considerada sua execução em material argiloso típico de aterros compactados, contando assim com uma permeabilidade relativamente baixa. Para o solo de fundação foi considerado solo residual de filito, sendo esse típico do estado de Minas Gerais, local onde se encontram a grande maioria de barragens de rejeitos. A porção dos rejeitos, a fim de simplificação dada a grande heterogeneidade do material, foi dividida em duas fases levando-se em conta o fenômeno de segregação, a parte do rejeito adensado (porção mais grossa) e rejeito disposto (porção mais fina). O sistema de drenagem foi modelado como sendo executado em areia.

Assim, todos os parâmetros levantados na bibliografia apresentada e utilizados para estimar as curvas características e de permeabilidade estão dispostas na tabela a seguir.

Tabela 1 – Dados de permeabilidade para utilização na função Seep/W.

Localização	Tipo de solo	Modo de saturação	Método de estimacão	Teor de umidade saturado	Kx saturado (m/s)	Teor de umidade residual	Anisotropia (Ky/Kx)
Aterro (Alteamento)	Solo argiloso	Saturado/não saturado	Argila	0,4	1,00E-07	0,24	1
Camada drenante	Brita	Saturado/não saturado	Pedregulho	0,4	1,00E-03	0,045	1
Dique de Partida	Solo argiloso	Saturado/não saturado	Argila	0,4	1,00E-07	0,24	0,01
Fundação (Solo residual)	Solo Residual de Filito	Saturado	Areia	-	1,00E-06	-	1
Rejeito Adensado	Fração grossa de rejeito	Saturado/não saturado	Areia	0,45	2,25E-05	0,04	0,3
Rejeito Disposto	Fração fina de rejeito	Saturado/não saturado	Areia Siltosa	0,45	3,40E-06	0,04	0,3

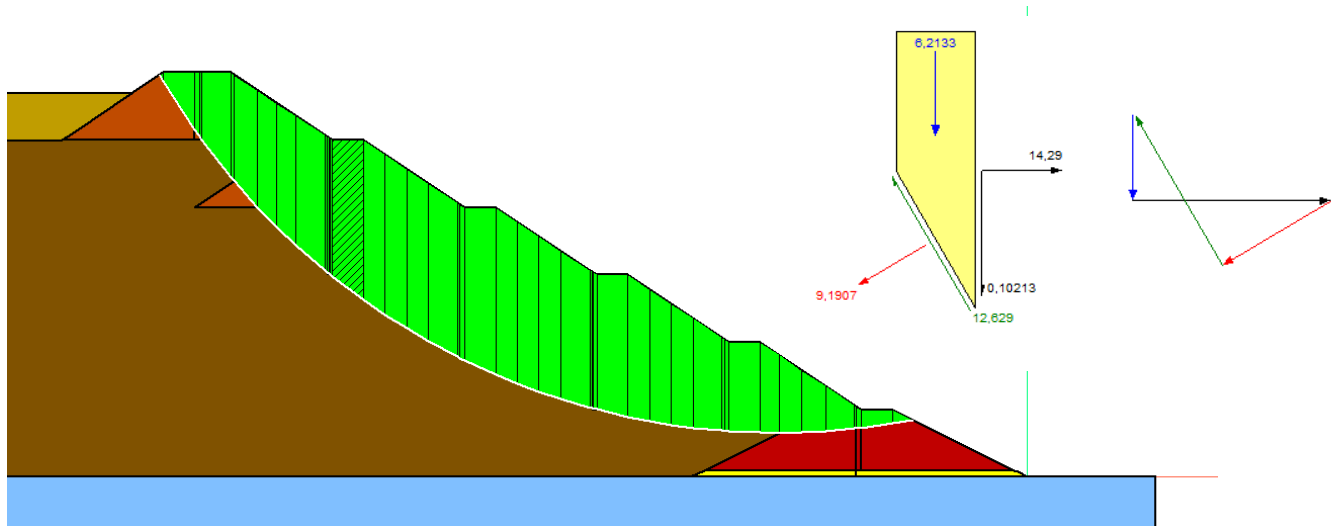
Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, inseridos todos os parâmetros de entrada, a simulação foi executada para cada um dos cenários que serão descritos a seguir e como resultado se obteve a linha freática, linhas de fluxo e cargas totais.

3.1.2 Análise de estabilidade

Os estudos de estabilidade foram desenvolvidos com auxílio da ferramenta computacional SLOPE/W do Software GeoStudio 2021.4. Foram realizadas análises de estabilidade empregando o Método dos Elementos Finitos (MEF) em conjunto com o Método das Fatias, conforme ilustra Figura 31.

Figura 31 – Exemplo de cunha de ruptura e fatias geradas pelo software.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, foram efetuadas as verificações de segurança da estrutura para os métodos de Fellenius; Bishop; Janbu e Spencer, visto que são os métodos com maiores diferenças entre si e que são passíveis de análise através do software Geostudio.

Com base nas características adotadas para cada material, já expostas no tópico 3.1.1, foram definidos os parâmetros de resistência com base nos critérios de Mohr-Coulomb e envoltórias de resistência apresentados em literatura. Os dados obtidos para inserção no programa estão dispostos na tabela a seguir:

Tabela 2 – Parâmetros de resistência utilizados no software.

Localização	Modelo do Material	Peso Específico (kN/m ³)	Coesão Efetiva	Ângulo de atrito
Aterro (Alteamento)	Mohr-Coulomb	19	25	30
Camada drenante		25	0	35
Dique de Partida		22	35	30
Fundação (Solo residual)		20	19	35
Rejeito Adensado		18	0	32
Rejeito Disposto		18	0	20

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, inseridos todos os parâmetros de entrada e definidas as regiões de entrada e saída da cunha (para sua determinação de maneira automática) a simulação foi executada para cada um dos cenários que serão descritos a seguir e como resultado se obteve o valor do fator de segurança.

3.3 Condições de carregamento

Uma barragem de rejeito pode apresentar diversas condições de operação que podem variar de acordo com o estado de conservação, condições de operação, dentre outros fatores.

Assim, o presente trabalho avaliou, juntamente com a influência do método construtivo, variações como a variação da posição da linha freática e praia de rejeitos, colmatação hipotética do sistema de drenagem, dentre outras condições as quais serão chamadas de condições de carregamento.

As condições de carregamento analisadas estão dispostas a seguir:

- **Condição de funcionamento ideal (CCN-01)**: Utilizada como modelo de referência, com praia de rejeito afastada 150 m do último talude de alteamento, com sistema de drenagem funcionando.
- **Condição sem praia de rejeitos (CCN-02)**: Cenário considerando toda área de rejeito sob a linha d'água, ou seja, sem afastamento do último talude de alteamento. Para esse cenário, será considerado funcionamento pleno do sistema de drenagem.
- **Cenário com sistema de drenagem inoperante (CCN-03)**: Cenário considerando colmatção do sistema de drenagem interno. Será considerada praia de rejeitos distante a 150 m do último dique de alteamento.
- **Cenário considerando sistema de drenagem inoperante e sem praia de rejeitos (CCN-04)**: Será considerada a colmatção do sistema de drenagem juntamente com nível d'água sem afastamento do talude final de alteamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como mencionado anteriormente, o procedimento para obtenção dos fatores de segurança foi dividido em 2 etapas principais, primeiramente realizou-se uma análise de fluxo para cada condição de carregamento mencionada, fornecendo as condições de carga total atuante no barramento, linhas de fluxo e posicionamento da linha freática.

Finalizada a etapa de análise de fluxo, os resultados obtidos foram utilizados para a obtenção do fator de segurança. Os fatores de segurança serão analisados pelos métodos mencionados no tópico de metodologia, e os resultados estão apresentados em formato de tabela. **As respectivas cunhas de ruptura para cada método serão apresentadas nos apêndices do presente trabalho.**

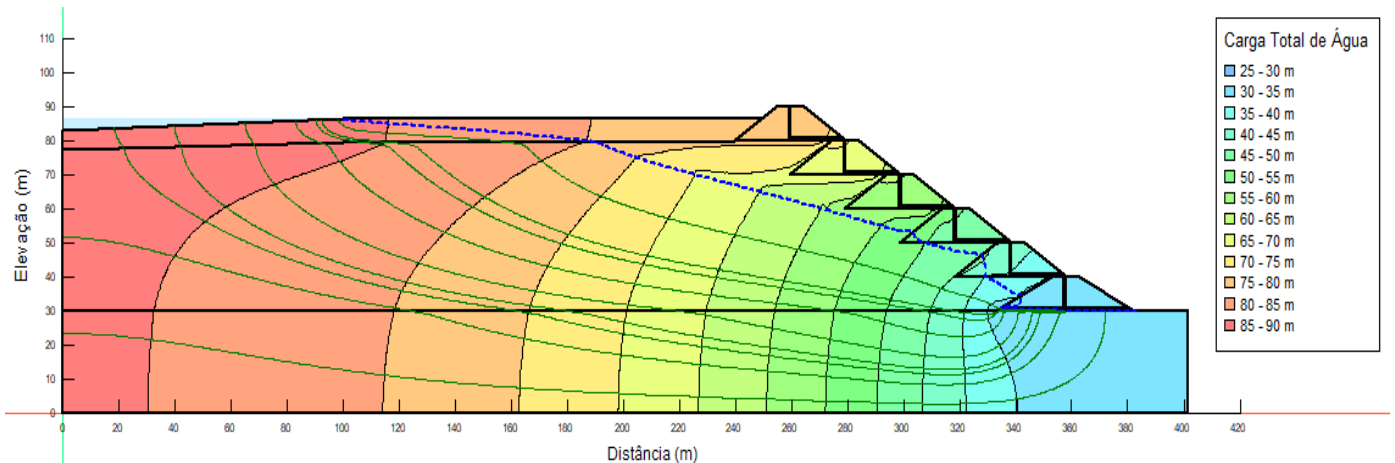
Os resultados obtidos a partir da análise de percolação e análise de estabilidade constam devidamente abordados e comentados no tópico 4.2 do presente trabalho.

4.1 Método de montante

4.1.1 Condição de funcionamento ideal (CCN-01)

A seguir estão apresentadas as condições de fluxo no interior do barramento, considerando a CCN-01. Em seguida estão expostos os fatores de segurança para cada um dos métodos de estabilidade elencados.

Figura 32 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Alçamento a montante (CCN-01).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Fatores de segurança obtidos – Método de montante (CCN-01).

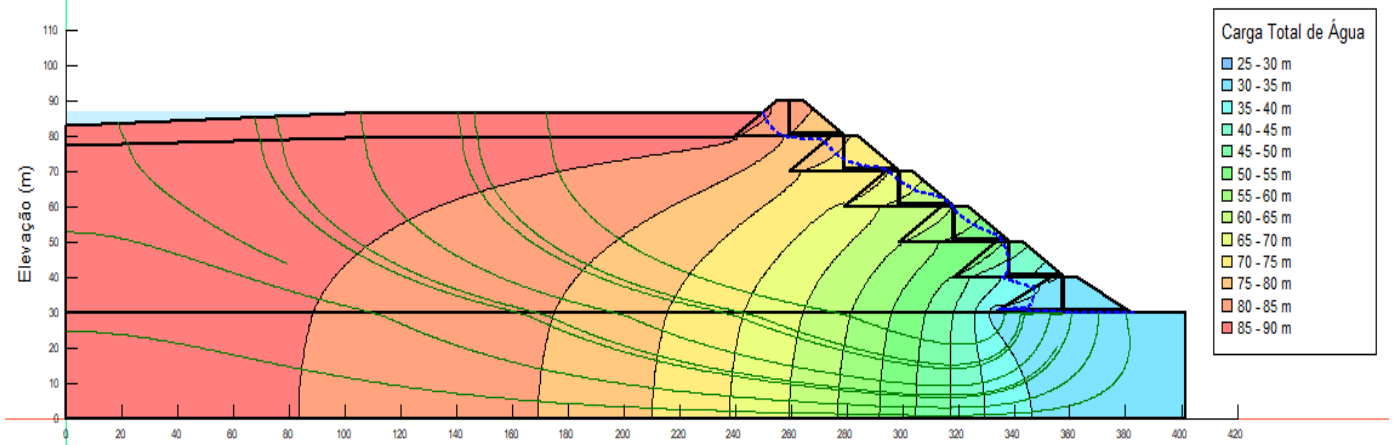
Cenário de carregamento	Método	Fator de segurança
CCN-01	Spencer	1,547
	Janbu	1,418
	Bishop	1,549
	Fellenius	1,418

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Condição sem praia de rejeitos (CCN-02)

Os resultados obtidos a partir dos estudos de fluxo e estabilidade para a presente condição de carregamento estão dispostos a seguir.

Figura 33 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Alteamento a montante (CCN-02).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Fatores de segurança obtidos – Método de montante (CCN-02).

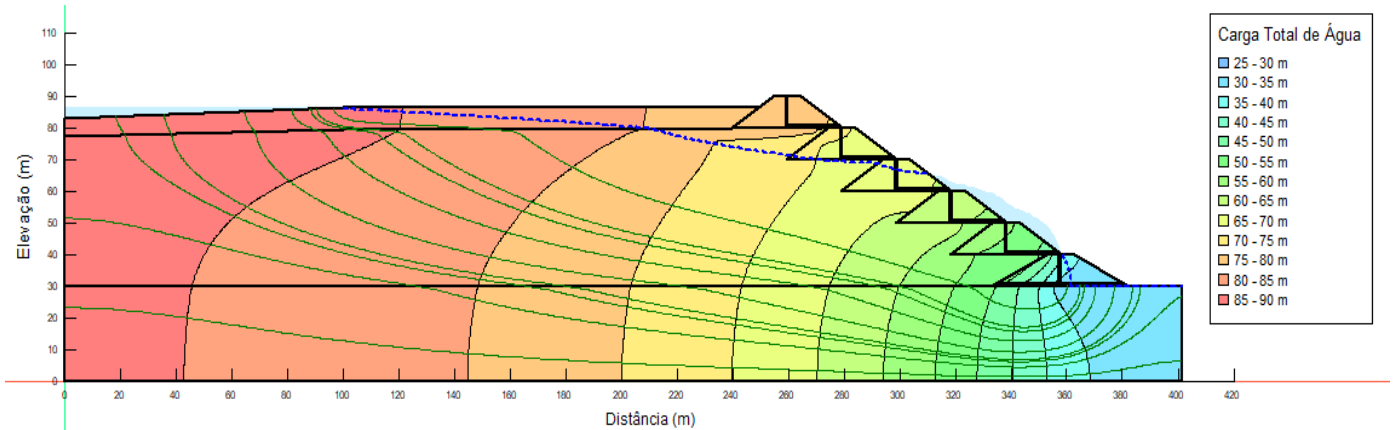
Cenário de carregamento	Método	Fator de segurança
CCN-02	Spencer	1,310
	Janbu	1,187
	Bishop	1,308
	Fellenius	1,234

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Condição com sistema de drenagem inoperante (CCN-03)

Análogo as demais condições apresentadas, os resultados obtidos a partir dos estudos de fluxo e estabilidade para a presente condição de carregamento estão dispostos a seguir.

Figura 34 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Alteamento a montante (CCN-03).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Fatores de segurança obtidos – Método de montante (CCN-03).

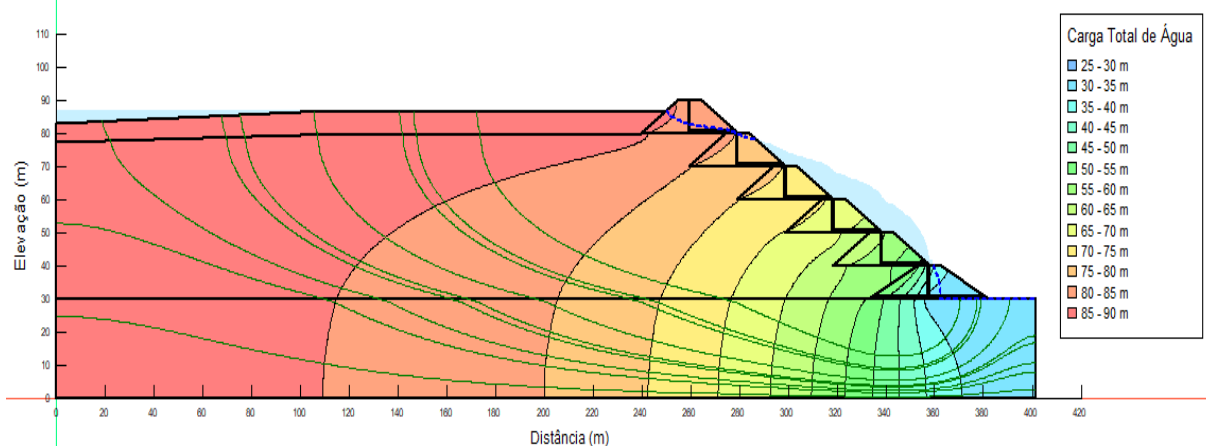
Cenário de carregamento	Método	Fator de segurança
CCN-03	Spencer	1,233
	Janbu	1,134
	Bishop	1,228
	Fellenius	1,153

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.4 Condição com sistema de drenagem inoperante e sem praia de rejeitos (CCN-04)

Por fim, como última condição de carregamento para o método de montante, é apresentada a seguir os resultados obtidos a partir dos estudos.

Figura 35 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Alçamento a montante (CCN-04).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Fatores de segurança obtidos – Método de montante (CCN-04).

Cenário de carregamento	Método	Fator de segurança
CCN-04	Spencer	1,165
	Janbu	1,092
	Bishop	1,163
	Fellenius	1,155

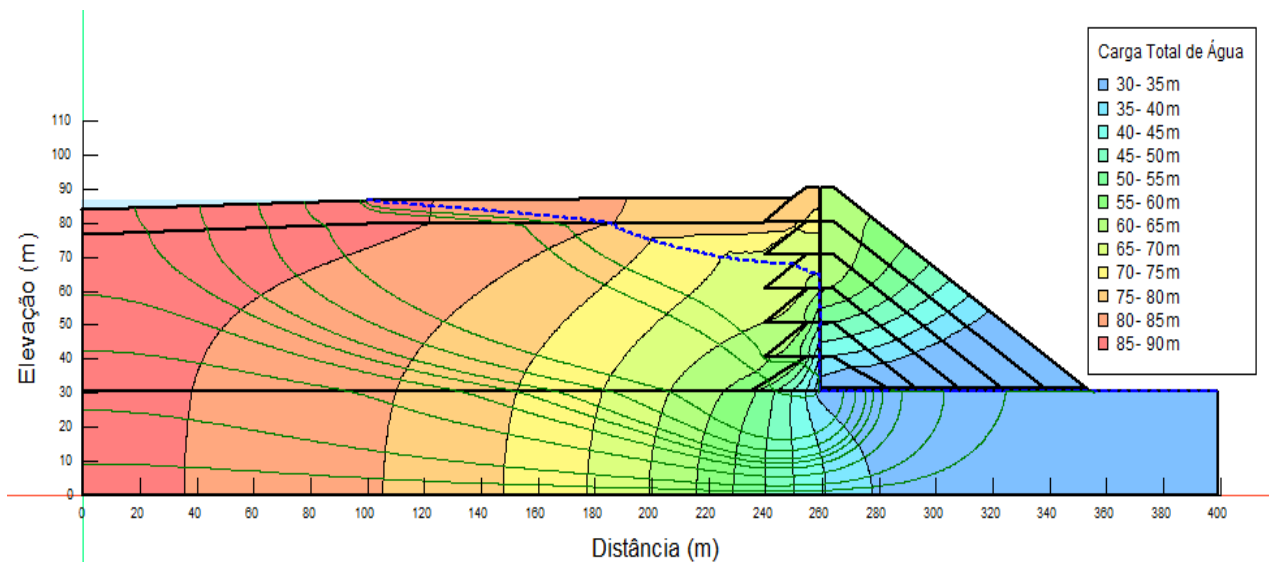
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Método de linha de centro

4.2.1 Condição de funcionamento ideal (CCN-01)

A seguir estão apresentadas as condições de fluxo no interior do barramento, considerando a CCN-01. Em seguida estão expostos os fatores de segurança para cada um dos métodos de estabilidade elencados.

Figura 36 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de linha de centro (CCN-01)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Fatores de segurança obtidos – Método de linha de centro (CCN-01).

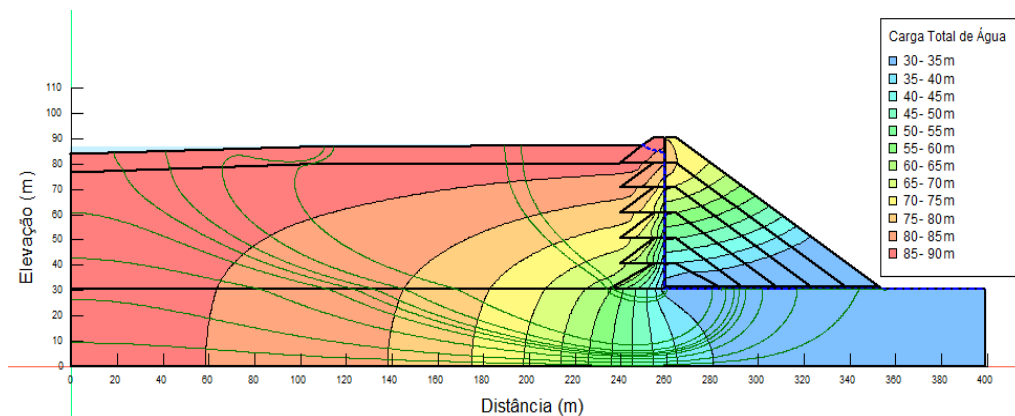
Cenário de carregamento	Método	Fator de segurança
CCN-01	Spencer	1,605
	Janbu	1,440
	Bishop	1,605
	Fellenius	1,448

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Condição sem praia de rejeitos (CCN-02)

Os resultados obtidos a partir dos estudos de fluxo e estabilidade para a presente condição de carregamento estão dispostos a seguir.

Figura 37 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de linha de centro (CCN-02).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Fatores de segurança obtidos – Método de linha de centro (CCN-02).

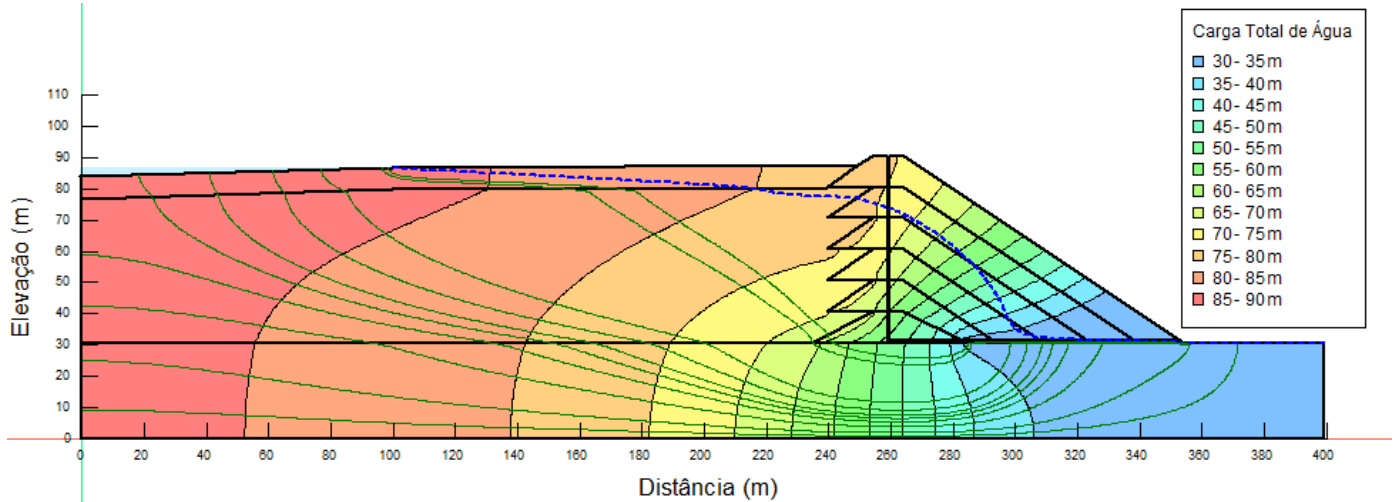
Cenário de carregamento	Método	Fator de segurança
CCN-02	Spencer	1,580
	Janbu	1,440
	Bishop	1,580
	Fellenius	1,448

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3 Condição com sistema de drenagem inoperante (CCN-03)

Análogo as demais condições apresentadas, os resultados obtidos a partir dos estudos de fluxo e estabilidade para a presente condição de carregamento estão dispostos a seguir.

Figura 38 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de linha de centro (CCN-03).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Fatores de segurança obtidos – Método de linha de centro (CCN-03).

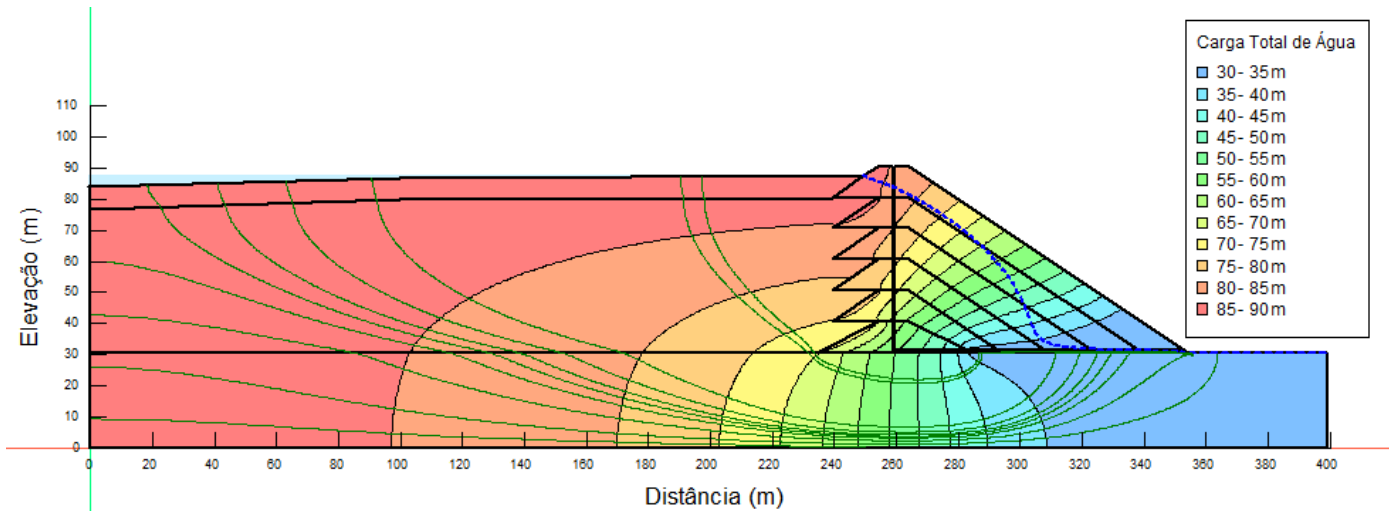
Cenário de carregamento	Método	Fator de segurança
CCN-03	Spencer	1,573
	Janbu	1,386
	Bishop	1,575
	Fellenius	1,413

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Condição com sistema de drenagem inoperante e sem praia de rejeitos (CCN-04)

Por fim, como última condição de carregamento para o método de linha de cento, são apresentados a seguir os resultados obtidos a partir dos estudos.

Figura 39 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de linha de centro (CCN-04).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Fatores de segurança obtidos – Método de linha de centro (CCN-04).

Cenário de carregamento	Método	Fator de segurança
CCN-04	Spencer	1,442
	Janbu	1,306
	Bishop	1,441
	Fellenius	1,379

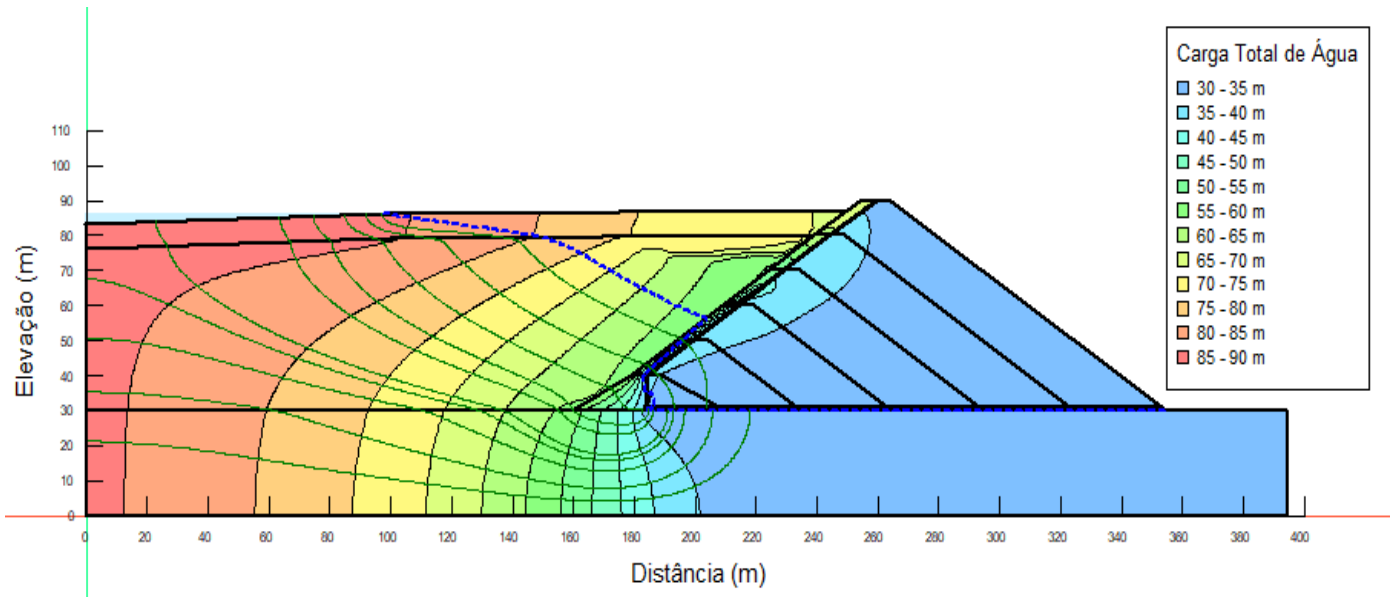
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Método de jusante

4.3.1 Condição de funcionamento ideal (CCN-01)

A seguir estão apresentadas as condições de fluxo no interior do barramento, considerando a CCN-01. Em seguida estão expostos os fatores de segurança para cada um dos métodos de estabilidade elencados.

Figura 40 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de jusante (CCN-01).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 – Fatores de segurança obtidos – Método de jusante (CCN-01).

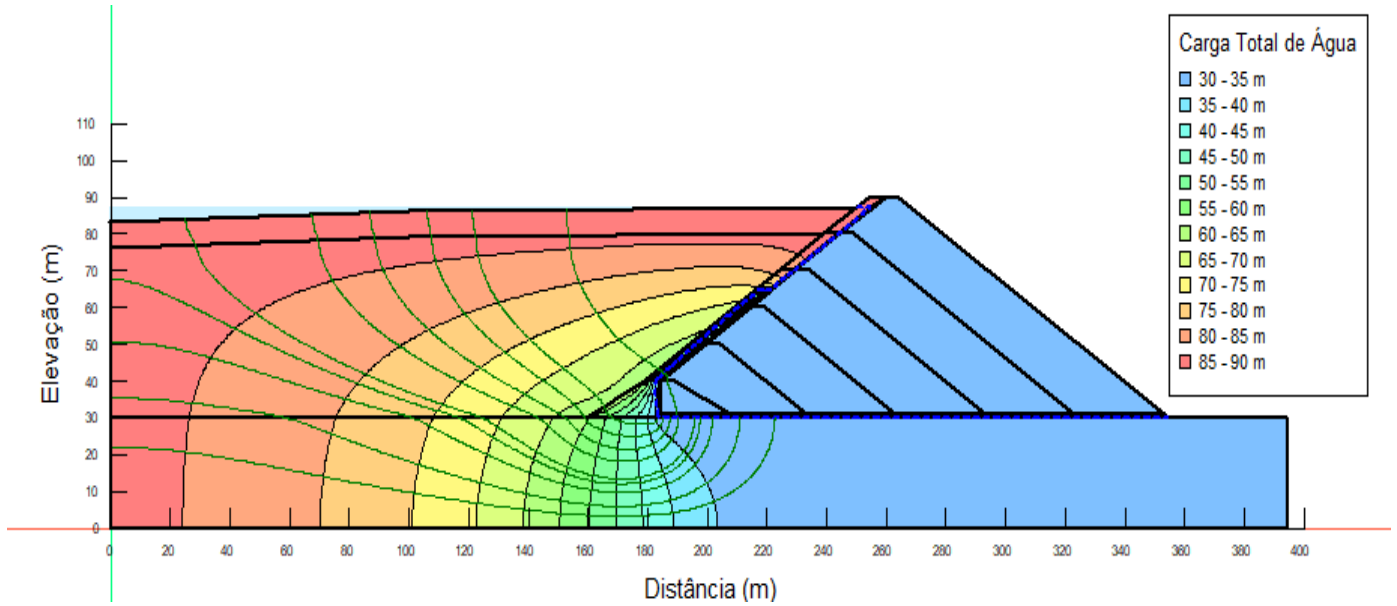
Cenário de carregamento	Método	Fator de segurança
CCN-01	Spencer	1,749
	Janbu	1,499
	Bishop	1,752
	Fellenius	1,498

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Condição sem praia de rejeitos (CCN-02)

Os resultados obtidos a partir dos estudos de fluxo e estabilidade para a presente condição de carregamento estão dispostos a seguir.

Figura 41 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de jusante (CCN-02).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Fatores de segurança obtidos – Método de jusante (CCN-02).

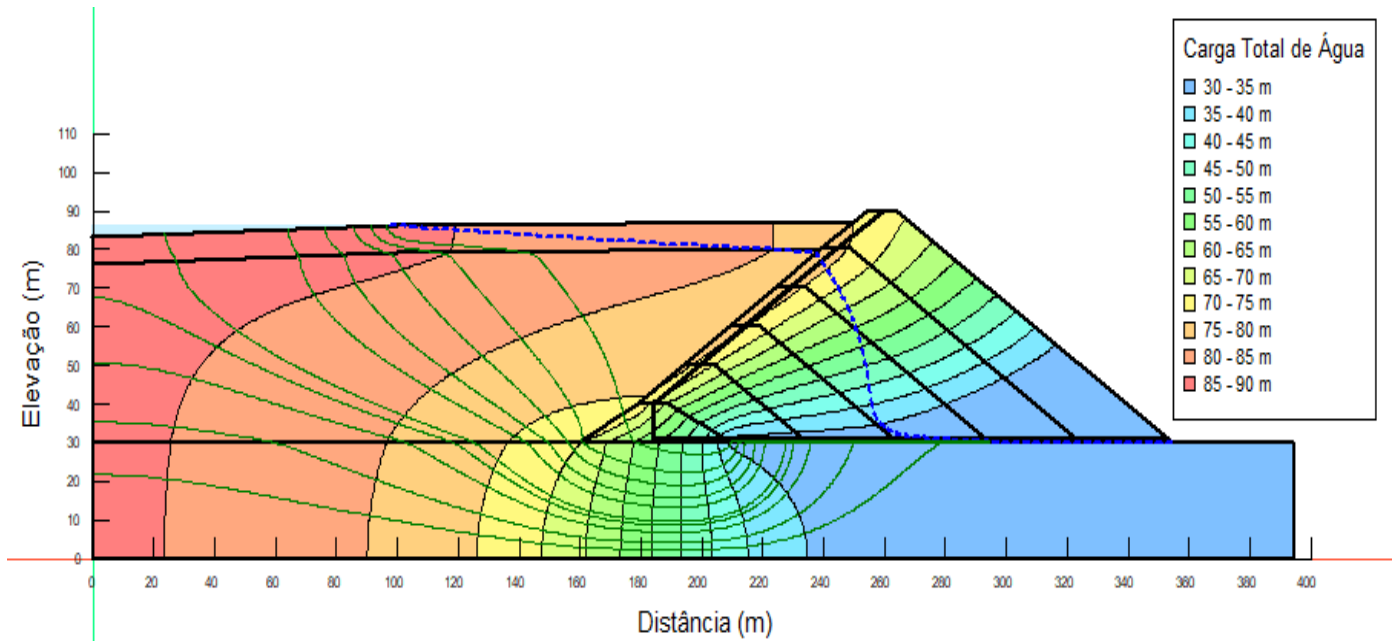
Cenário de carregamento	Método	Fator de segurança
CCN-02	Spencer	1,748
	Janbu	1,499
	Bishop	1,751
	Fellenius	1,498

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Condição com sistema de drenagem inoperante (CCN-03)

Análogo as demais condições apresentadas, os resultados obtidos a partir dos estudos de fluxo e estabilidade para a presente condição de carregamento estão dispostos a seguir.

Figura 42 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de jusante (CCN-03).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Fatores de segurança obtidos – Método de jusante (CCN-03).

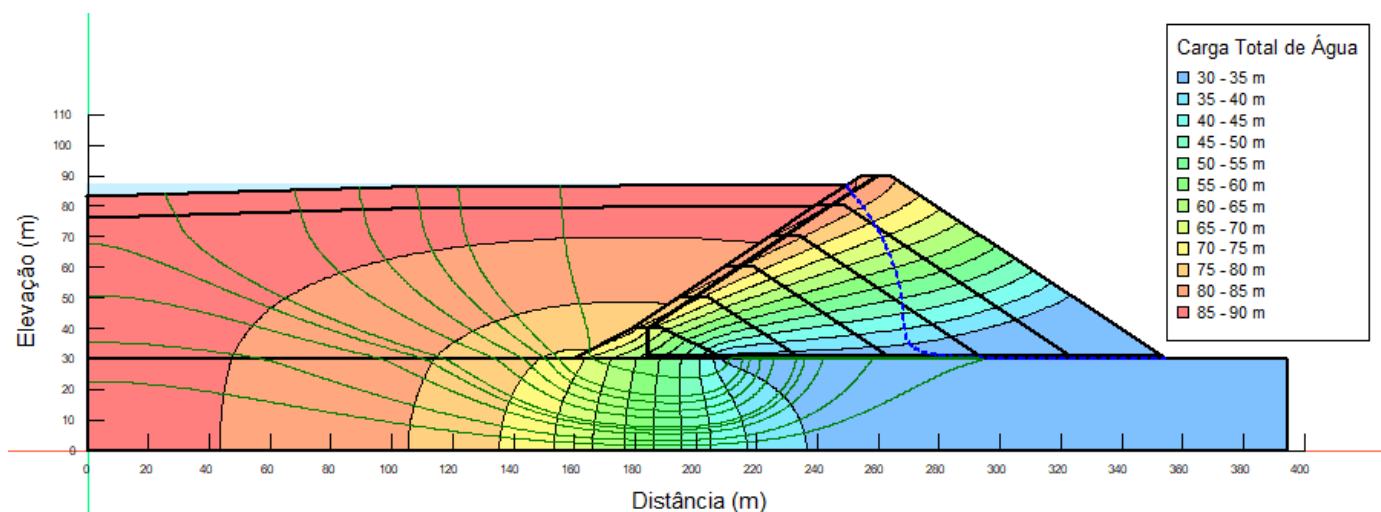
Cenário de carregamento	Método	Fator de segurança
CCN-03	Spencer	1,748
	Janbu	1,498
	Bishop	1,751
	Fellenius	1,497

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.4 Condição com sistema de drenagem inoperante e sem praia de rejeitos (CCN-04)

Por fim, como última condição de carregamento para o método de jusante, é apresentada a seguir os resultados obtidos a partir dos estudos.

Figura 43 – Cargas totais, linha freática e linhas de fluxo – Método de jusante (CCN-04).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Fatores de segurança obtidos – Método de jusante (CCN-04).

Cenário de carregamento	Método	Fator de segurança
CCN-04	Spencer	1,736
	Janbu	1,498
	Bishop	1,740
	Fellenius	1,497

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Análise dos resultados

A análise dos resultados obtidos terá como base a condição de funcionamento ideal dos barramentos estudados (CCN-01).

Fazendo uma análise conjunta, tanto dos resultados de análise de fluxo quanto dos resultados da estabilidade efetivamente, é evidente que o método a jusante demonstra maior eficiência no que se diz respeito a segurança e estabilidade da estrutura. Tal fato é observado pelas variações mínimas das cargas totais atuantes nos diques de alteamento e dos fatores de segurança obtidos para esse método construtivo, independente da condição de carregamento a qual a seção estava submetida.

O método de linha de centro apresentou um grau de variação maior no que se diz respeito a cargas atuantes nos diques de alteamento, no entanto é possível constatar que tais alterações causaram, de maneira geral, pouco impacto no fator de

segurança, fato que reafirma a utilização do método como sendo uma solução intermediária.

Já o método de alteamento a montante se destacou negativamente no estudo elaborado, uma vez que variações nas condições de operação do barramento afetam de maneira significativa o posicionamento da linha freática, cargas totais incidentes nos diques de alteamento e fatores de segurança obtidos. Tal fato pode ser explicado tanto pela geometria aplicada na execução dos alteamentos quanto pelo fato de o sistema de drenagem se localizar somente abaixo do dique de partida.

Dentre as condições de carregamento analisadas, nota-se que o comprometimento do sistema de drenagem interno do barramento exerce maior impacto na segurança do barramento mesmo em relação a ausência de uma praia de rejeitos no reservatório, independentemente da geometria de construção avaliada. Assim, é evidente que os barramentos devem contar com um sistema de drenagem devidamente projetado para que se possa garantir as condições de segurança e operação da estrutura.

Já em relação aos métodos de estabilidade de talude empregados, pode-se notar grande proximidade dos valores obtidos pelos métodos de Bishop e Spencer, proximidade visível também entre os métodos de Janbu e Fellenius. Destaca-se que, dada a condição de utilização de um software computacional, em conjunto com a proximidade de valores apresentados quando comparados, os métodos de Bishop e Spencer se adequam melhor a presente aplicação uma vez que contam com menos simplificações para o desenvolvimento dos cálculos.

4.4.1 Análise de fluxo

Em relação a análise de fluxo para a CCN-01, notou-se que alguns pontos dos diques de alteamento se encontram em zonas saturadas na seção que utiliza o método de alteamento a montante. Os métodos de jusante e linha de centro apresentam uma superfície freática mais controlada, de maneira que, somente as zonas onde a linha freática adentra o sistema de drenagem se encontra saturada, mantendo a região a jusante do referido sistema em uma condição não saturada.

Em relação a distribuição de cargas totais o método de construção a jusante merece destaque, uma vez que os diques de alteamento e o dique de partida apresentam cargas totais baixas, quando comparada aos demais métodos, por toda

a extensão dos diques de alteamento. Tal comportamento pode ser explicado pelo método construtivo empregado em cada uma das seções, uma vez que os métodos de jusante e linha de centro permitem a construção de um sistema de drenagem ao longo de todos os diques de alteamento, enquanto o sistema de drenagem do método de montante se situa somente abaixo do dique de partida.

Na CCN-02, pode se notar de maneira mais visível a influência do sistema de drenagem. A ausência de uma praia de rejeitos aumenta significativamente as condições de saturação dos diques de alteamento do método montante. Para os métodos jusante e linha de centro, apesar de ser notada uma elevação da linha freática, é possível observar que as cargas totais, principalmente na região a jusante do sistema de drenagem, não sofrem grandes alterações quando se toma como base a CCN-01. Novamente se destacam as cargas totais atuantes nos diques de alteamento do método de jusante, as quais sofrem alterações irrisórias em comparação a CCN-01.

Ao se analisar a CCN-01 e CCN-02 nota-se a grande influência que o sistema de drenagem exerce na distribuição de cargas totais e posicionamento do nível freático. Fato esse reafirmado ao se analisar a CCN-03. Nos três casos nota-se que a obstrução do sistema de drenagem provocaria impactos maiores quando comparado a inexistência de uma praia de rejeitos. Ainda, nestes carregamentos a colmatção do filtro nas seções estudadas provocou um deslocamento da linha freática e das cargas totais no sentido de jusante. As maiores alterações podem ser notadas no método de montante, onde o comprometimento do sistema de drenagem dá início a surgências a jusante dos diques de alteamento, situação que propicia ainda mais o surgimento de *pipping*.

A CCN-04 mostra que, no caso de um eventual comprometimento do sistema de drenagem aliado a ausência de uma praia de rejeito causa maiores impactos, novamente, à seção construída pelo método de alteamento de montante, aumentando ainda mais as surgências mencionadas na CCN-03. Já os métodos de jusante e linha de centro apresentam poucas mudanças no posicionamento da linha da linha freática e das cargas totais quando tomada como base a CCN-03.

4.4.2 Análise do fator de segurança

Em relação aos métodos de análise do fator de segurança empregados, pode-se notar que, independentemente da condição de carregamento analisada, os métodos de Spencer e Bishop apresentaram valores próximos, assim como os métodos de Fellenius e Janbu contaram com grande proximidade de valor. Fato que se dá principalmente as considerações de cada um dos métodos onde, os métodos de Fellenius e Janbu não consideram as forças das fatias laterais, enquanto os métodos de Bishop e Spencer levam em conta tais fatores.

Os métodos de Spencer e Bishop apresentaram variaram entre si cerca de 0,15% para as condições de carregamento do método de montante, cerca de 0,01% para o método de linha de centro e 0,17% para o método de jusante.

Já os métodos de Janbu e Fellenius variaram entre si cerca de 4% para as condições de carregamento do método de montante, cerca de 2,5% para o método de linha de centro e 0,06% para o método de jusante.

Destaca-se que as porcentagens citadas acima foram calculadas considerando todas as condições de carregamento. De maneira geral pode-se notar que as variações dos fatores de segurança obtidos para os métodos de Spencer e Bishop são muito próximas entre si. A mesma premissa vale para os fatores de segurança obtidos pelos métodos de Janbu e Fellenius os quais apresentaram baixas variações quando comparados.

Como mencionado no tópico de revisão bibliográfica do presente trabalho, os métodos de Bishop e Spencer apresentam maior complexidade de cálculo quando comparados aos demais métodos avaliados. Analisando os fatores de segurança obtidos, nota-se que os métodos Bishop e Spencer fornecem cunhas de ruptura com maiores valores de fator de segurança em relação aos valores obtidos pelos métodos de Janbu e Spencer.

Para o método de montante, os métodos de Bishop e Spencer apresentaram fatores de segurança em média, 7,5% maiores quando comparados aos valores apresentados pelos métodos de Janbu e Fellenius.

Para o método de construção a linha de centro essa média foi cerca de 9,00 % enquanto para o método de construção a jusante foram cerca de 14% maiores.

Dadas o grau de complexidade e as considerações adotadas nos métodos de Bishop e Spencer, aliado ao fato se utilizar um software de elementos finitos para

determinar os fatores de segurança, é válido afirmar que tais métodos são os mais adequados para a aplicação do presente estudo ainda que apresentem fatores de segurança maiores (fato que é desfavorável à segurança). **Sendo assim, as seguintes constatações serão realizadas considerando somente esses 2 métodos (Bishop e Spencer).**

Na condição de funcionamento normal das estruturas, pode-se notar a grande influência do método construtivo empregado nos fatores de segurança obtidos. O método de jusante se mostrou o mais favorável a segurança, com um fator de segurança na ordem de 1,75. O método de linha de centro apresenta fatores de segurança na ordem de 1,60 enquanto o método de montante conta com fatores de segurança na ordem de 1,40. Tal comportamento já era esperado, dadas as condições construtivas já apresentadas no tópico de revisão bibliográfica.

Comparado com a CCN-02, a ausência diminuiu o fator de segurança da estrutura em cerca de 15,5% considerando o método de montante, 1,55% considerando o método de linha de centro e 0,05% considerando o método de jusante.

Já o comprometimento do sistema de drenagem (CCN-03) faz com que o fator de segurança diminua em 20,5% considerando o método de montante, 2,00% no método de construção a linha de centro e 0,05% no método de construção a jusante.

A análise da CCN-04 permitiu constatar uma diminuição do fator de segurança, comparado a condição normal, de 25,00 % considerando o método de construção a montante, 10,00% considerando o método de linha de centro, e 0,7% considerando o método de jusante.

6. CONCLUSÃO

A análise dos resultados obtidos pela metodologia proposta para o estudo permitiu identificar que o método a jusante demonstra maior eficiência no que se diz respeito a segurança e estabilidade da estrutura.

O método de linha de centro apresentou um grau de variação maior no que se diz respeito a cargas atuantes nos diques de alteamento, no entanto é possível constatar que tais alterações causaram, de maneira geral, pouco impacto no fator de segurança, indicando sua utilização como sendo uma solução intermediária.

O método de alteamento a montante foi o destaque negativo. As condições de operação do barramento afetam de maneira significativa o posicionamento da linha freática, cargas totais incidentes nos diques de alteamento e fatores de segurança obtidos.

O comprometimento do sistema de drenagem interno do barramento exerce maior impacto na segurança do barramento mesmo em relação à ausência de uma praia de rejeitos no reservatório, independentemente da geometria de construção avaliada.

Os métodos de Bishop e Spencer além de fornecerem resultados com valores próximos foram os que melhor se adequaram no presente estudo uma vez que levam em considerações mais forças atuantes entre as fatias no desenvolvimento matemático, condição ideal para métodos computacionais, representando de maneira mais fiel as condições possivelmente encontradas em campo.

Por fim, com base nas considerações aqui apresentadas, é fundamental que as barragens de rejeito não só sejam construídas a partir de métodos que trabalhem a favor de sua estabilidade, mas também contem com um sistema de drenagem devidamente projetado e eficiente, para que se garanta as condições de segurança e operação da estrutura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINO, L. F. **Praias de barragens de rejeitos de mineração: características e análise da sedimentação**. Tese de D.Sc, Engenharia Mineral, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2008.

AKW. Disponível em: <http://www.akwauv.com/Hidrociclones-AKA-VORTEX-e-distribuidoresradiais-AKA-SPIDER.htm>. Acesso em: 10 de junho de 2022.

ANA. Agência Nacional de Mineração. **Relatório de segurança de barragens 2020**. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/.2021>, Acesso em: 03 de maio de 2022.

ANM. **PESQUISA DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO**, 2022. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/GerenciarPublico> . Acesso em: 03 de maio de 2022

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Dissertação de M.Sc., Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

ÁVILA, J. P.; ESPÓSITO, T. J. **Programa de implementação de procedimentos de gestão e segurança das barragens de rejeitos. Curso para gerentes/engenheiros de operação**. Belo Horizonte: Instituto Brasileiro de Mineração-IBRAM, 2008.

ÁVILA, J. P.; ESPÓSITO, T. J. **Programa de implementação de procedimentos de gestão e segurança das barragens de rejeitos**. Curso para gerentes/engenheiros de operação. Belo Horizonte: Instituto Brasileiro de Mineração-IBRAM, 2008.

BITTAR, R. J. **Caracterização tecnológica de rejeitos de fosfato e análises de estabilidade da barragem de rejeitos B5 da Bunge Fertilizantes S/A**. 251 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Minas, universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 13-20.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.** Brasília, DF. Setembro de 2010. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm . Acesso em: 01 de janeiro de 2022.

CASTRO, L. V. P. **Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante.** Dissertação de M.Sc., Engenharia Mineral, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2008.

CHARLES, J. A.; SOARES, M. M. ***The stability of slopes in soils with nonlinear failure envelopes.*** *Canadian Geotechnical Journal*, 1984, 21(3): 397-406, 10.1139/t84-044.

COLLISCHONN, W. **Análise do Rompimento da Barragem de Ernestina.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997, 193 p.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras - Casos Históricos, Materiais de Construção e Projeto.** 1 ed. São Paulo, Oficina de Textos. v. 1, 1986, 647p

DAVIES, M. P. **Tailings impoundment failures: are geotechnical engineers listening?** *Geotechnical News, Waste Geotechnics*, 2002, p. 31-36.

DAVIES, M. P.; MCROBERTS, E. C.; MARTIN, T. E. ***Static Liquefaction of Tailings – Fundamentals and Case Histories.*** *Amec Earth and Environmental*. Vancouver, 2002.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico.** Tese (Doutorado em Geotecnia) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2000, 363 f.,

FABRÍCIO, J. V. F. **Análises probabilísticas da estabilidade de taludes e contenções.** 2006. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

FILHO, L. H. A. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone.** Dissertação de M.Sc., Engenharia Civil, UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil, 2004.

FILHO, W. L. O.; ABRÃO, P. C. **Disposição de Rejeitos de Mineração**. In: ZUQUETTE, L.V. (Org.) Geotecnia Ambiental. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. Cap. 9.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicação na estabilidade dos taludes**. Curitiba: Editora da UFPR, 2009.

GALO, D. B. **Análise de riscos em barragens de rejeitos com o uso de técnicas semiprobabilísticas de estabilidade de taludes – Um estudo de caso**. 119 f. Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM), 2018. **Economia Mineral do Brasil**; 1 ed, Brasília, DF, IBRAM, 128 p.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS-ICOLD. **Tailings dams risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences**. Bulletin 121. Paris, 2001.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics**. J. Wiley & Sons, New York, 1969.

LAURIANO, A. W. **Estudo De Ruptura Da Barragem De Funil: Comparação Entre Os Modelos Fldwav E Hec-Ras**. 2009. 251 f. Monografia (Especialização) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009

LOPES, M. C. O. **Deposição hidráulica de rejeitos granulares e a influência nos seus parâmetros de resistência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade de Brasília, Brasília, 2000.189p.

MAGHSOUDLOO, A. **Nonlinearity of the residual shear strength envelope in stiff clays**. Disponível em: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12615551/index.pdf> Acesso em: 30 julho 2016.

MARANGON, M. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes e Geotecnia. 2004. 25 p.

MELLO, V. F. B. **Contribuição ao estudo da resistência ao cisalhamento dos solos.** Tese apresentada à Congregação da Escola de Engenharia da Universidade Mackenzie para concurso à Cátedra de Mecânica dos Solos, Fundações e Obras de Terra. Universidade de São Paulo: São Paulo, 1956.

NASH, D. F. T. ***A comparative review of limit equilibrium methods of slope stability.*** In *Slope Stability: Geotechnical Engineering and Geomorphology*, Anderson MG, Richards KS (eds). Wiley: Chichester; 11–75, 1987.

PEREIRA, T. S. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Ciências Rurais. Universidade Federal de Santa Maria, 2013, 78f.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas/3ª Edição.** Carlos de Sousa Pinto. - São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RESO. **Soluções Ambientais. Mineração e seus diversos tipos de resíduos.** Fevereiro de 2015. Disponível em: <http://resoambiental.com/2015/02/mineracao-e-seus-diversos-tiposde-residuos>. Acesso em: 03 de maio de 2022.

REZENDE, V. A. **Estudo do comportamento de barragem de rejeito arenoso alteada por montante.** Dissertação de M.Sc., NUGEO/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil. 2013.

RIBEIRO, C. C. **Estudo sobre o comportamento geomecânico de rejeito de mineração de zinco.** 2015. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

RIBEIRO, L. F. M. **Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicados a barragens de rejeitos.** Tese de D.Sc., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2000.

RIBEIRO, V. Q. F. **Proposta de metodologia para avaliação dos efeitos de rupturas de estruturas de disposição de rejeitos.** 2015. 291 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia e Transportes, Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SANTOS, A. G., RIBEIRO, L. F. M. **Condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro**, Revista Escola de Minas, v. 60, 465-470 pp, 2007.

SANTOS, A. G. **Influência do Teor de Ferro na Condutividade Hidráulica Saturada de um Rejeito de Minério de Ferro**. Dissertação de M.Sc, UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil. 2004.

SAYÃO, A. S. F. J. *et al.* **Considerations on the probability of failure of mine slopes**. Soils & Rocks, Rio de Janeiro, v. 35, p. 31-37, 2012.

SILVA, C. G. C. **Estudo da influência do teor de finos no comportamento de um rejeito de minério de ferro a partir de ensaios edométricos**, Projeto de Graduação, UFRJ/ Escola Politécnica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.2017

TERZAGHI, C. **Principles of soil mechanics: III—determination of permeability of clay**, Engineering News Record, 1925, 12–16 pp.

THOMÉ, R., PASSINI, M. L., **Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais**, Ciências Sociais Aplicadas em Revista, 2018, v. 18, 49-55 pp.

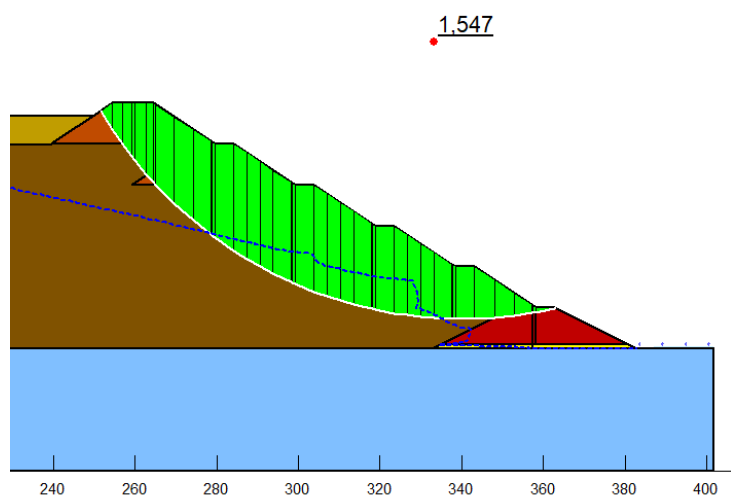
TOMÁS, D. **PERMEABILIDADE NOS SOLOS: Gradiente Crítico**. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/104736750/Permeabilidade-1>. Acesso em: 02 de julho de 2022.

VALERIUS, M. B. (2014). **Cadastro e Análise do Potencial de Risco das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM – 245/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105 p.

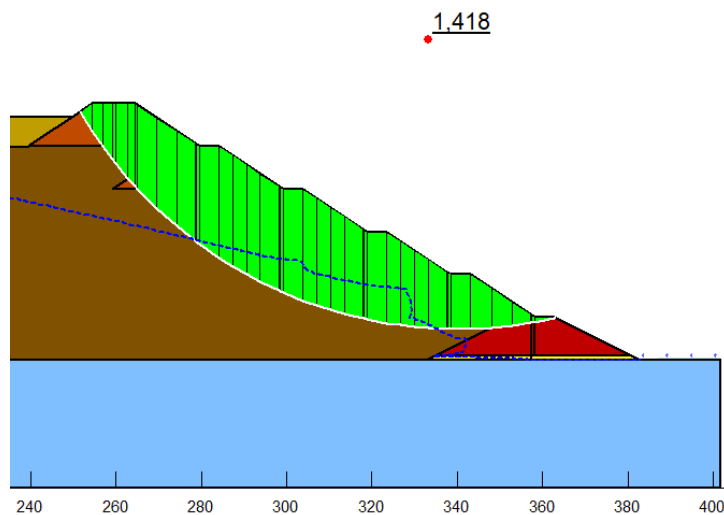
VICK, S. G. **Planning, design, and analysis of tailings dams**. New York: Wiley Interscience, 1983.

APÊNDICE A – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método montante – CCN-01

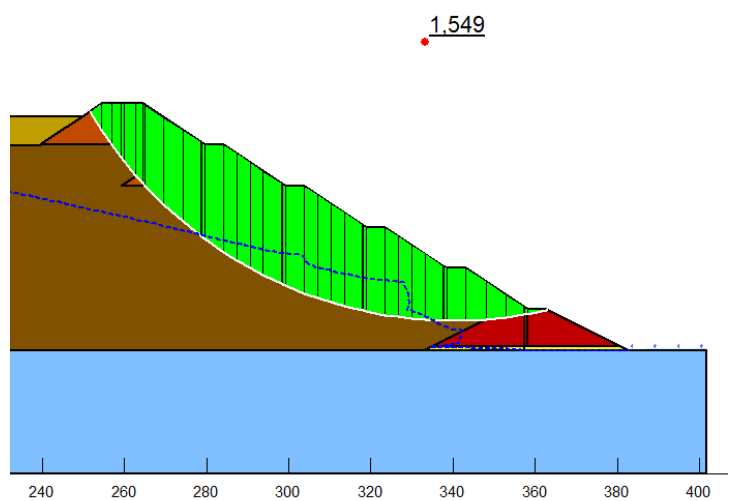
(a)



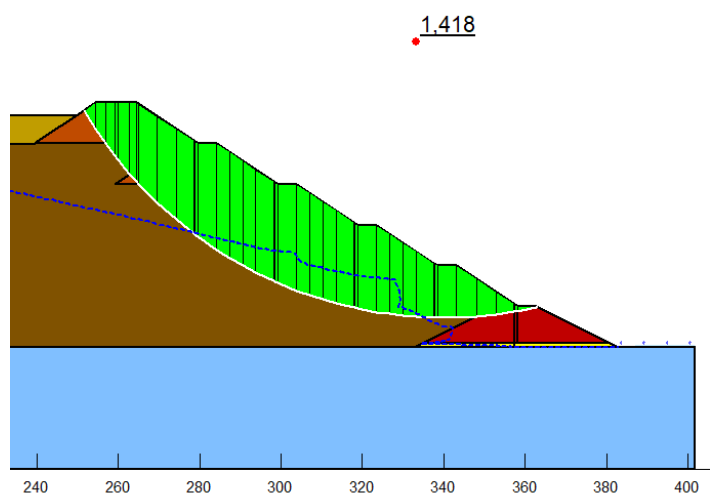
(b)



(c)



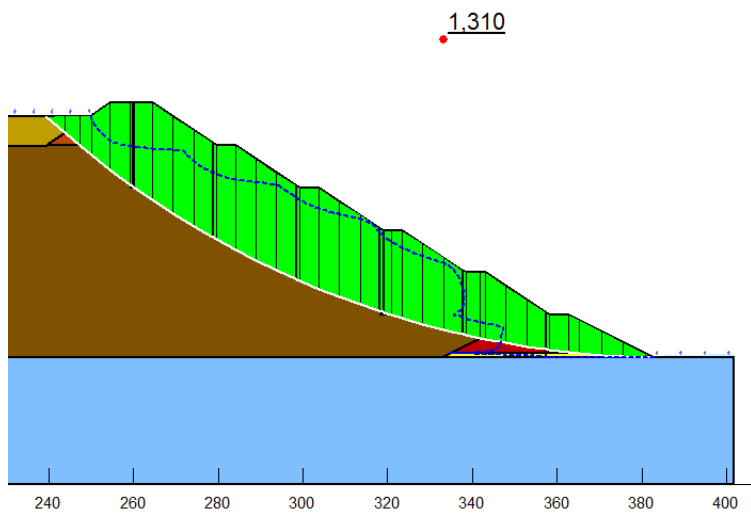
(d)



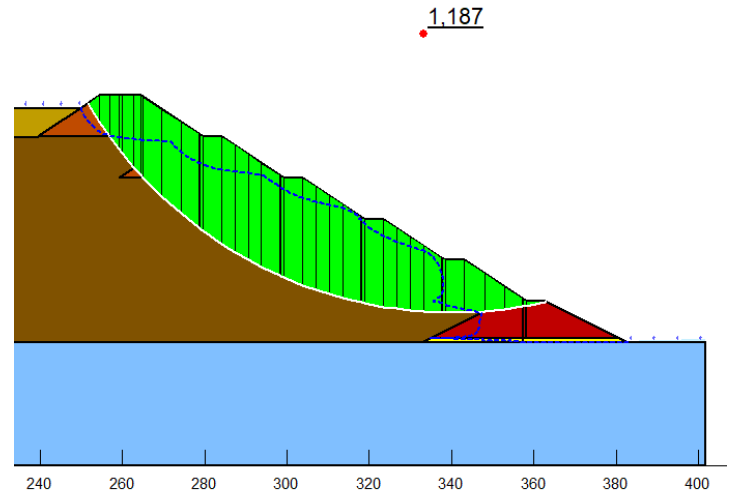
(a)–Spencer; (b)–Janbu; (c)–Bishop; (d)–Fellenius

APÊNDICE B – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método montante – CCN-02

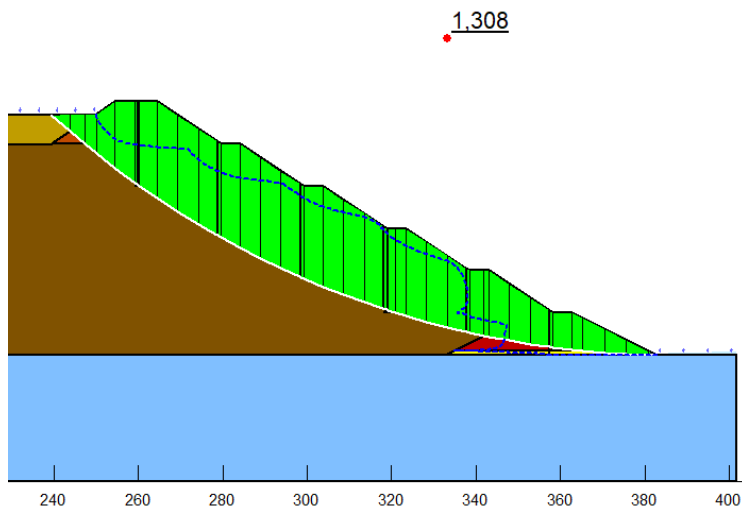
(a)



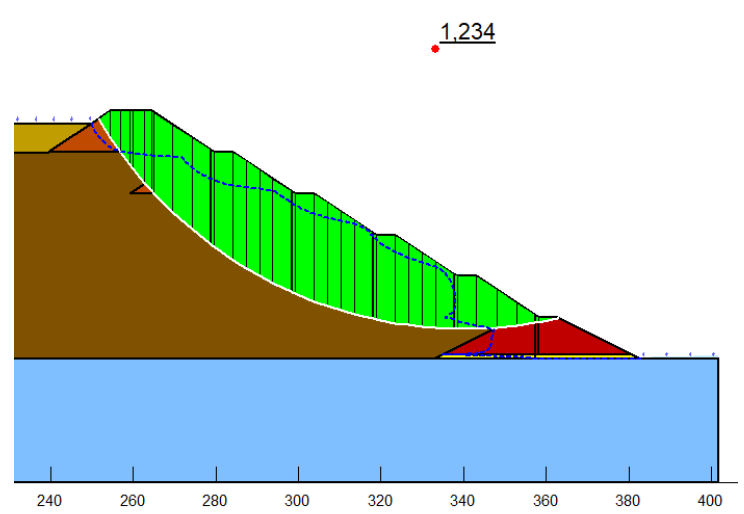
(b)



(c)



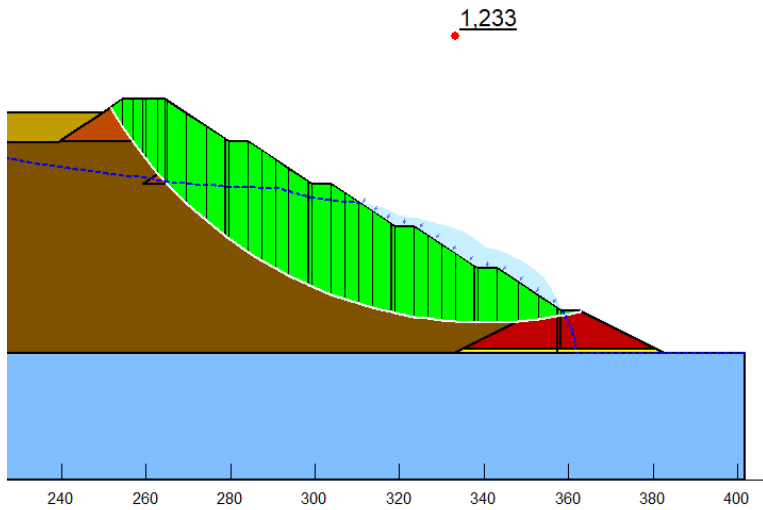
(d)



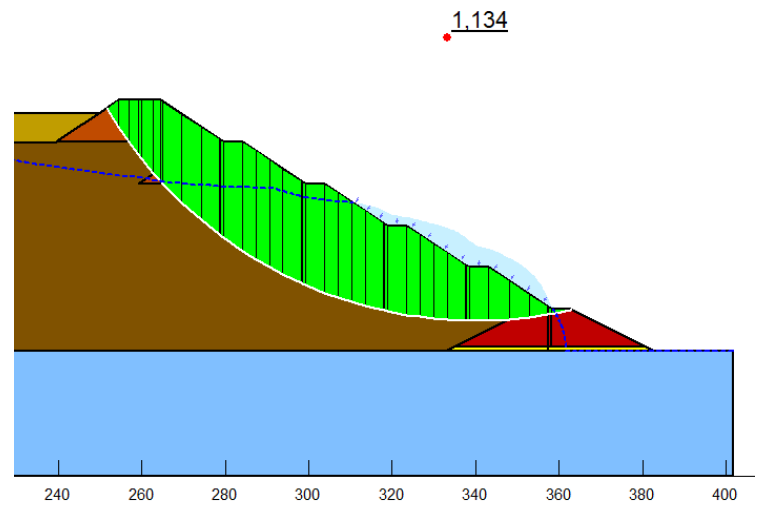
(a)–Spencer; (b)–Janbu; (c)–Bishop; (d)–Fellenius

APÊNDICE C – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método montante – CCN-03

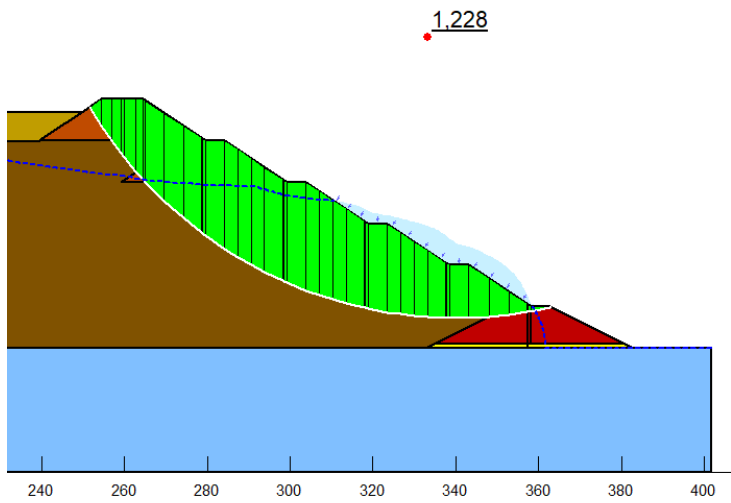
(a)



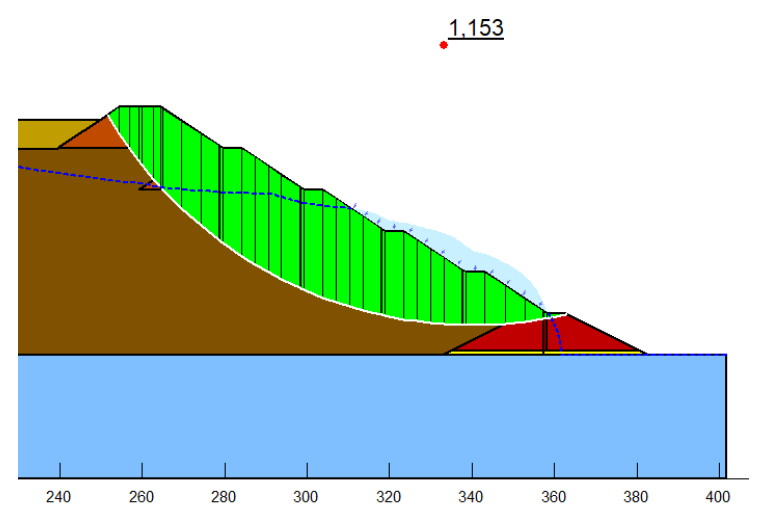
(b)



(c)

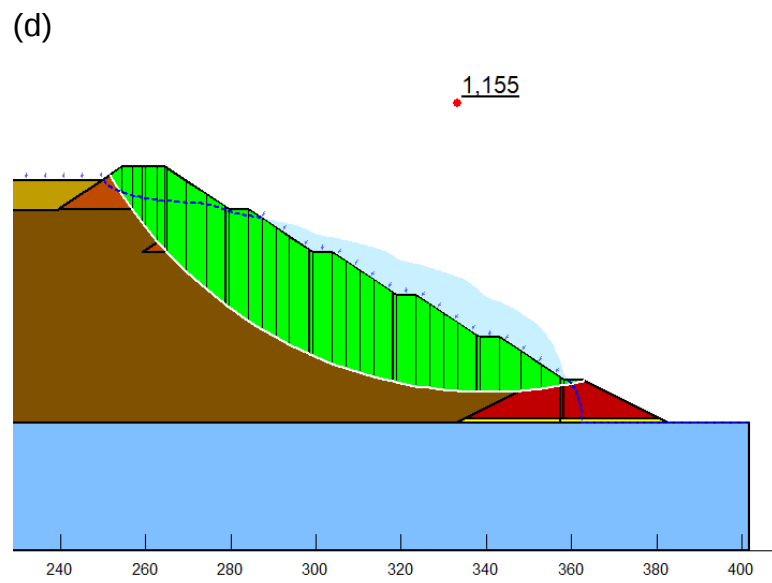
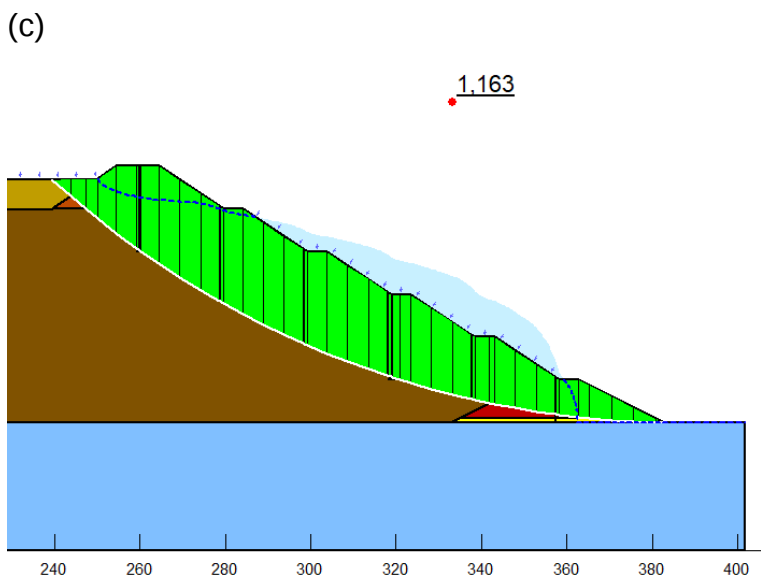
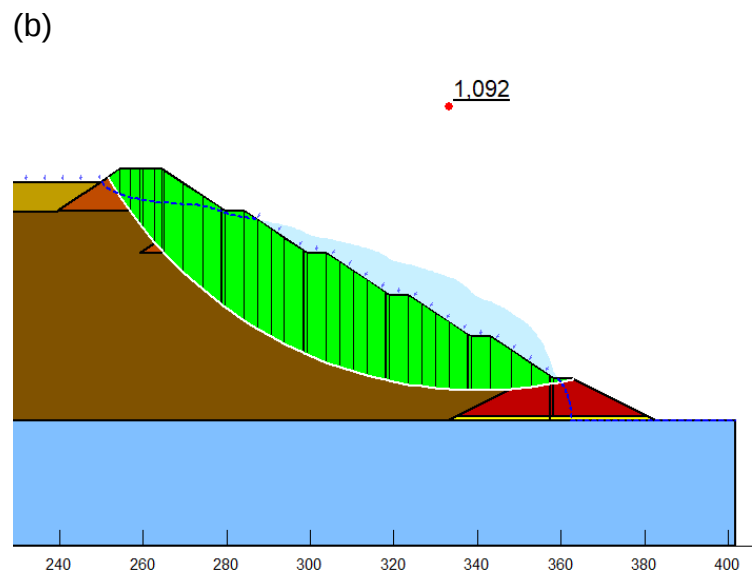
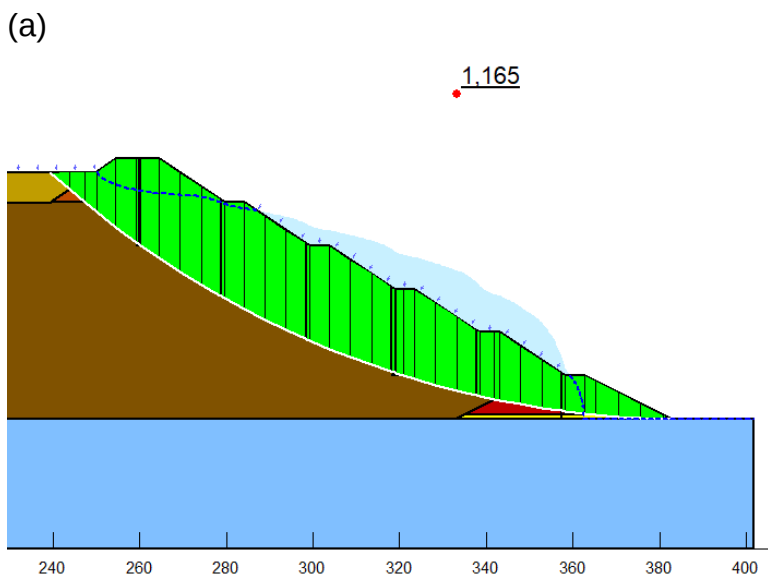


(d)



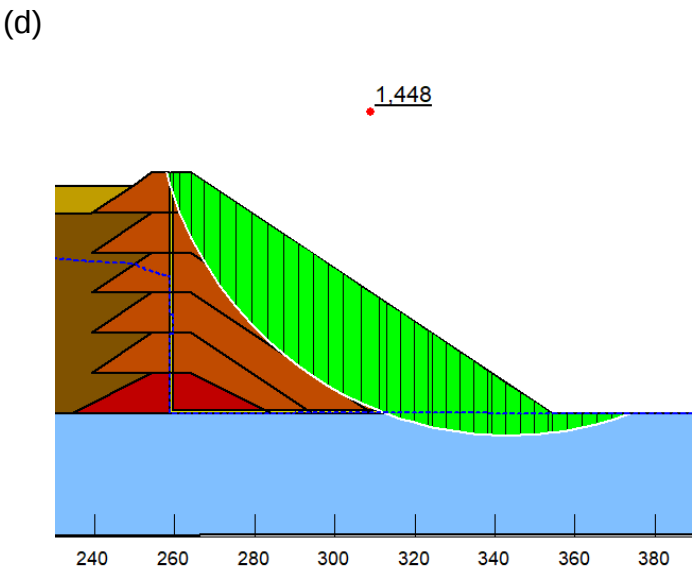
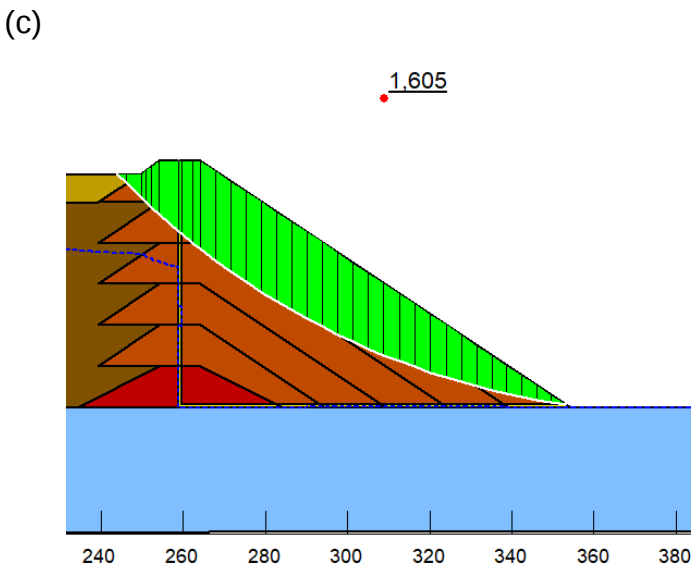
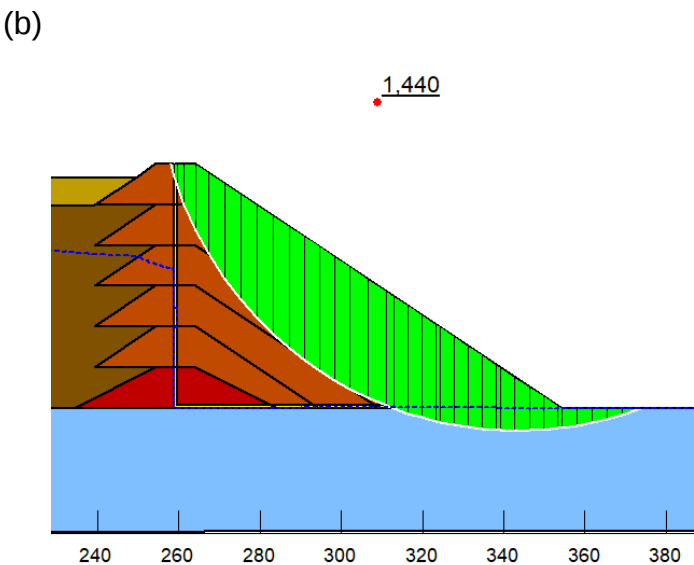
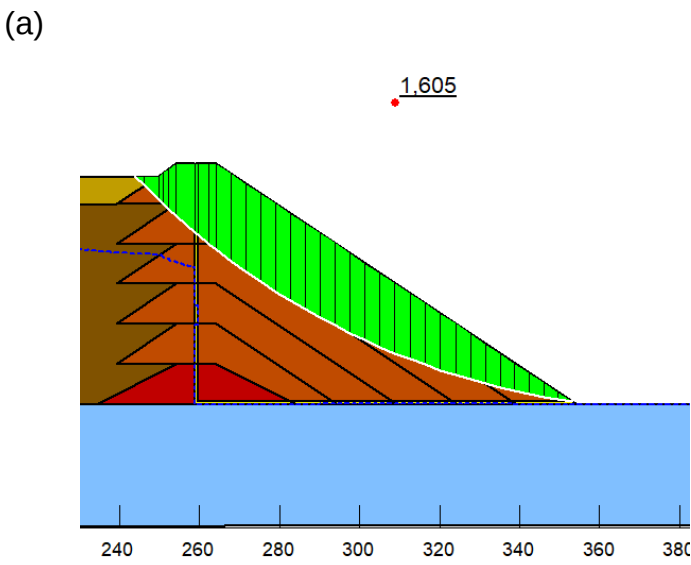
(a)–Spencer; (b)–Janbu; (c)–Bishop; (d)–Fellenius

APÊNDICE D – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método montante – CCN-04



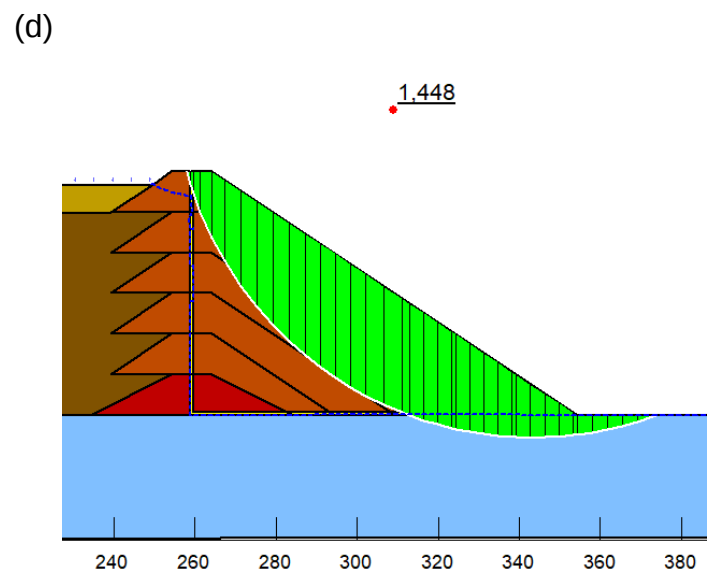
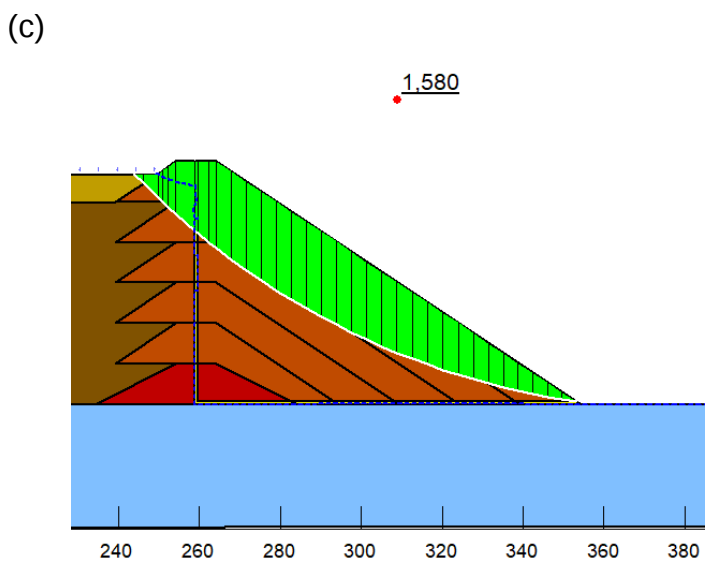
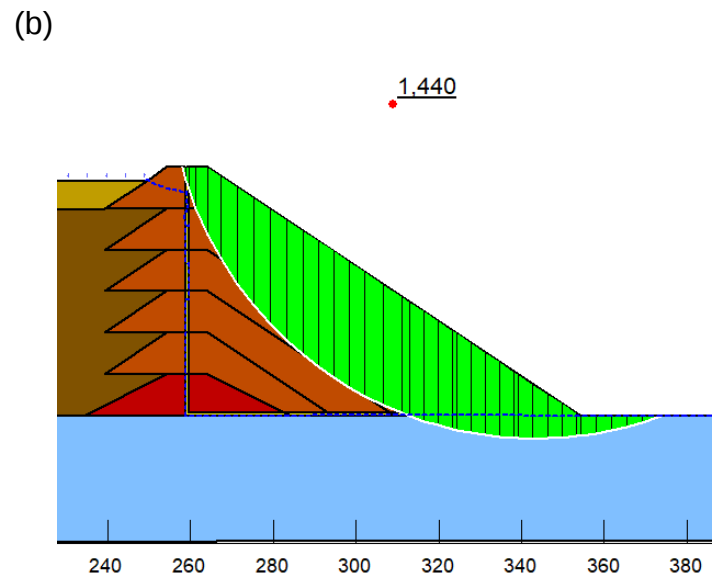
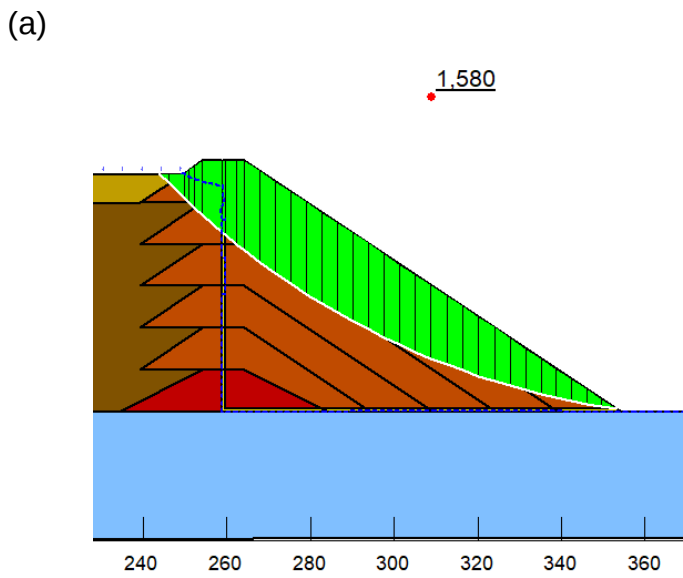
(a)–Spencer; (b)–Janbu; (c)–Bishop; (d)–Fellenius

APÊNDICE E – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de centro – CKN-01



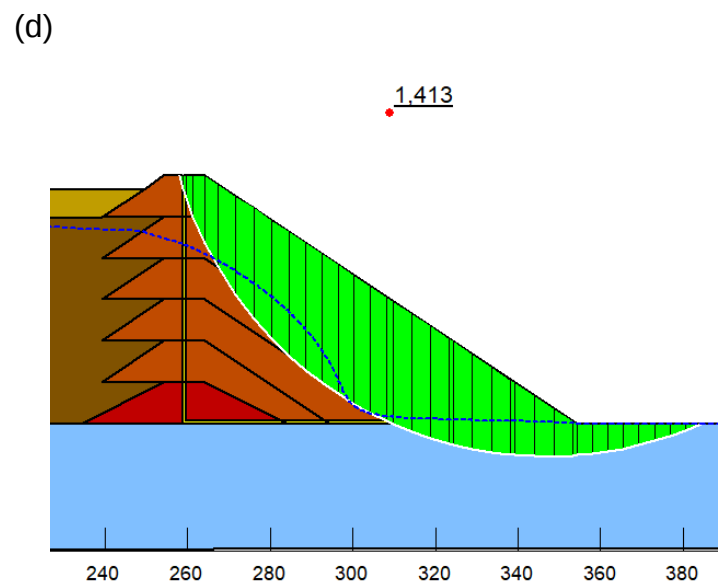
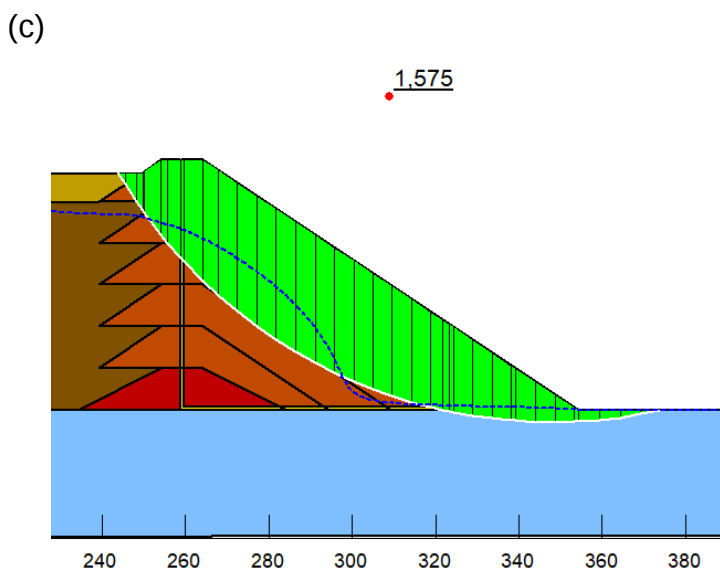
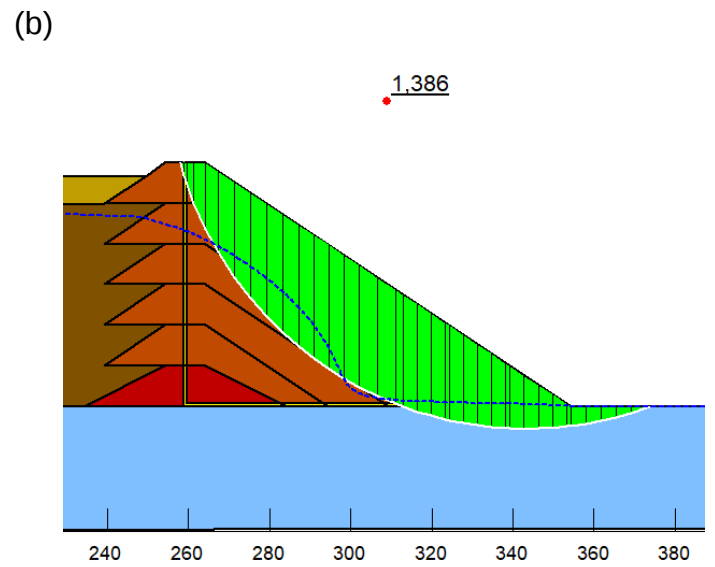
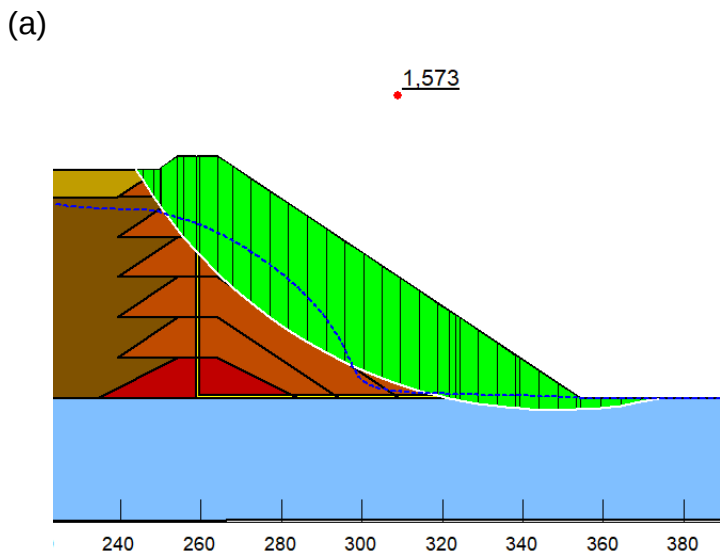
(a)–Spencer; (b)–Janbu; (c)–Bishop; (d)–Fellenius

**APÊNDICE F – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de centro –
CCN-02**



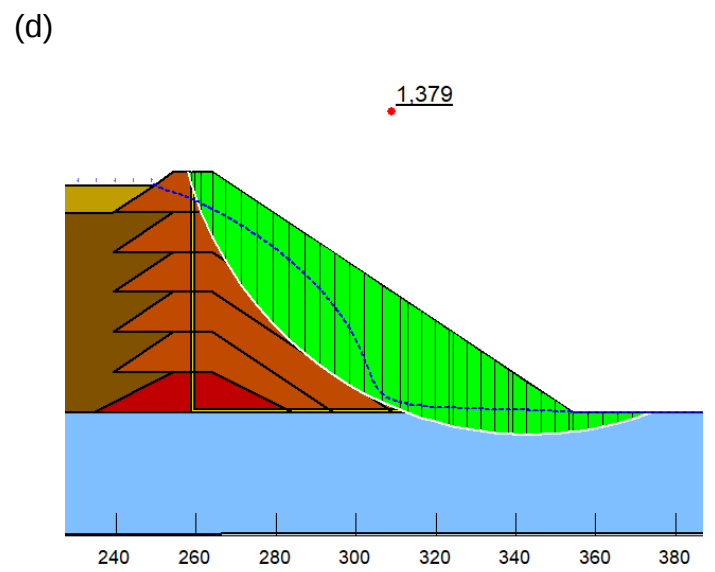
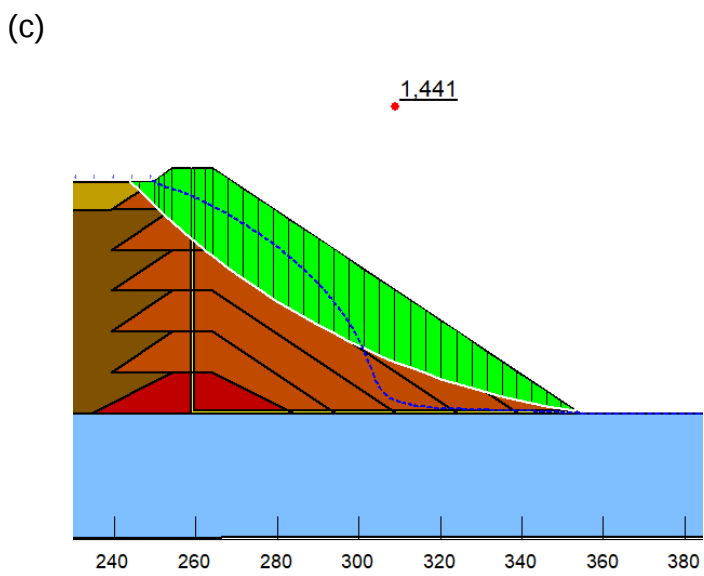
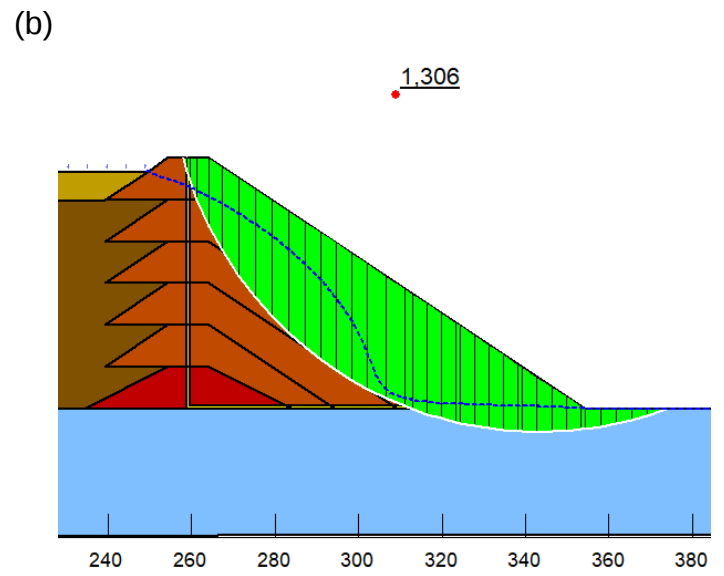
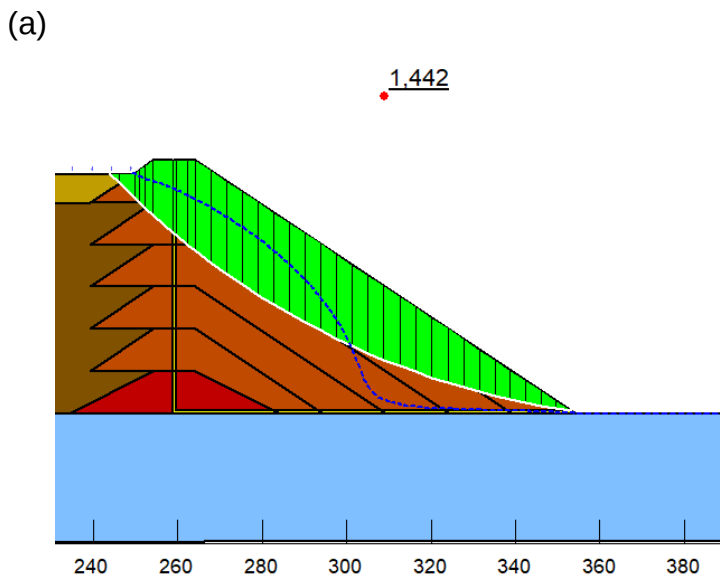
(a)–Spencer; (b)–Janbu; (c)–Bishop; (d)–Fellenius

APÊNDICE G – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de centro – CCN-03



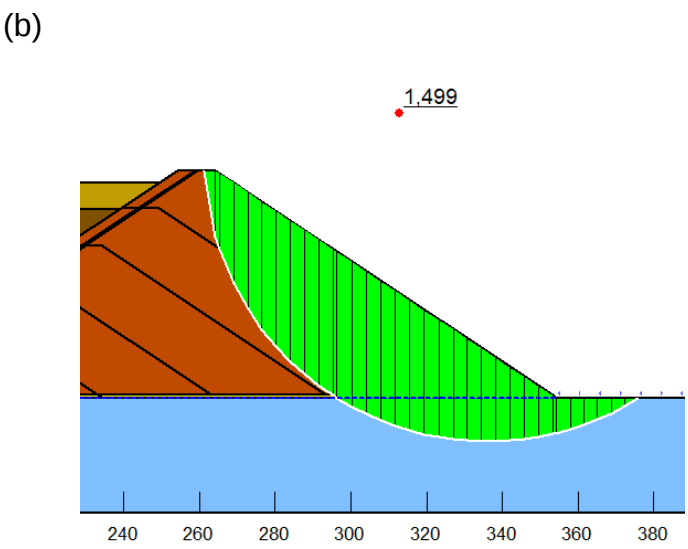
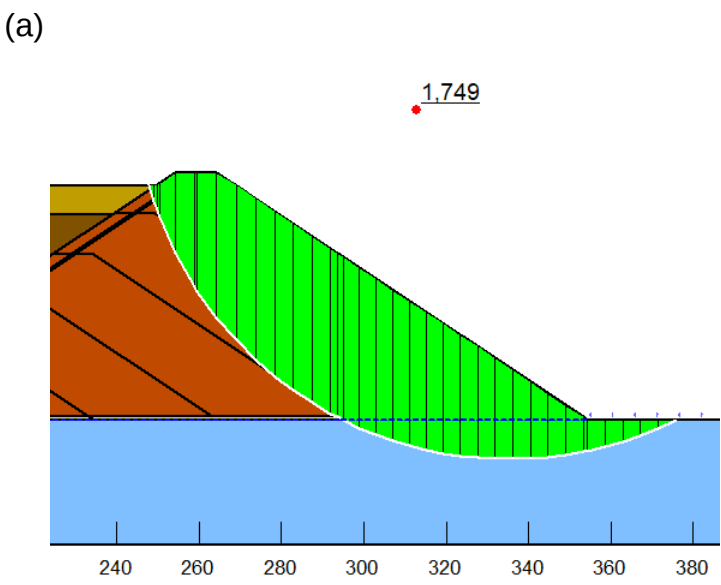
(a)–Spencer; (b)–Janbu; (c)–Bishop; (d)–Fellenius

**APÊNDICE H – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de centro –
CCN-04**

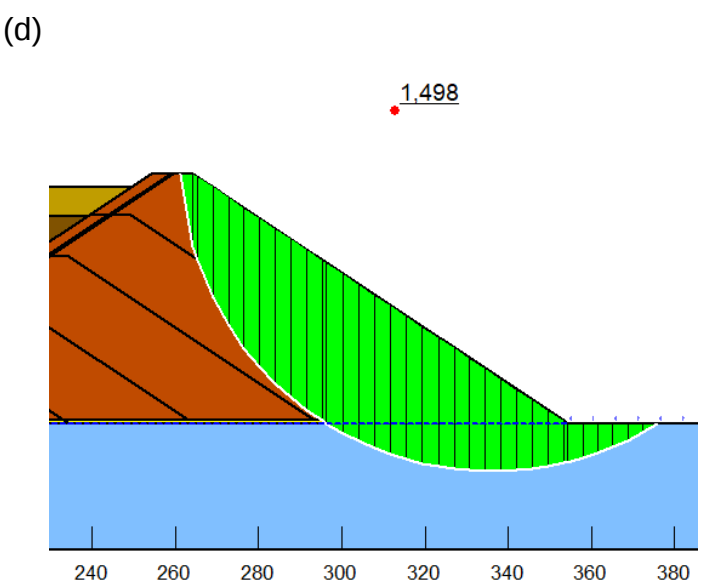
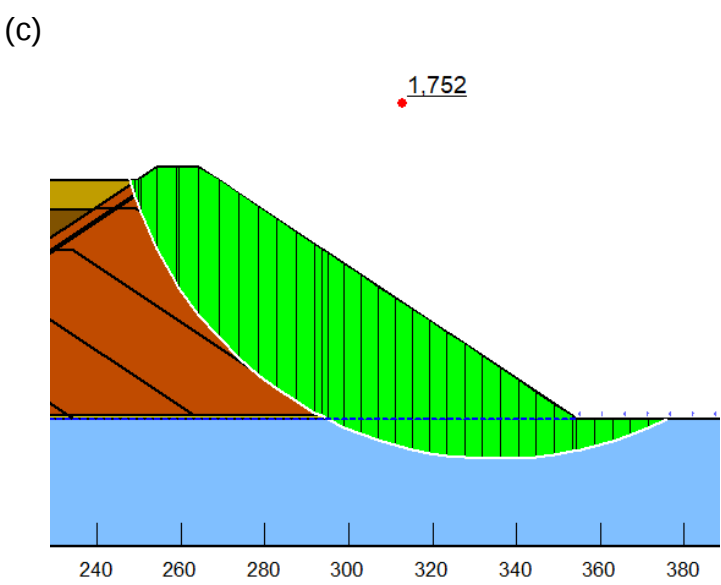


(a)–Spencer; (b)–Janbu; (c)–Bishop; (d)–Fellenius

APÊNDICE I – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de jusante – CCN-01

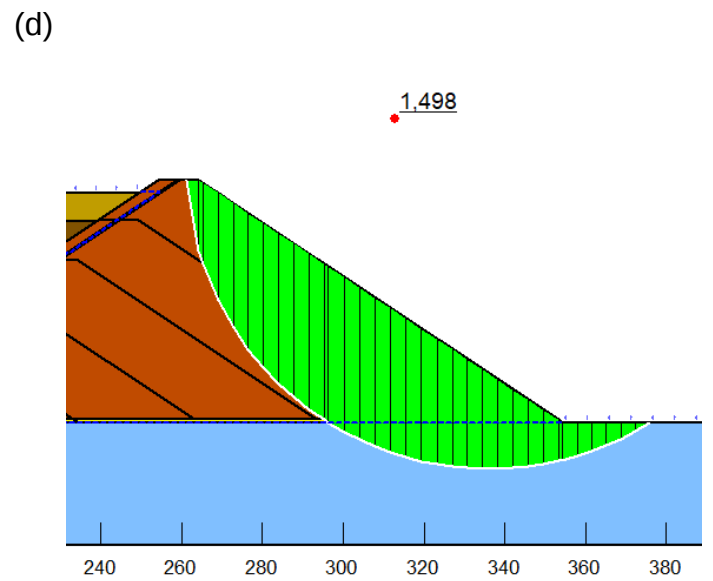
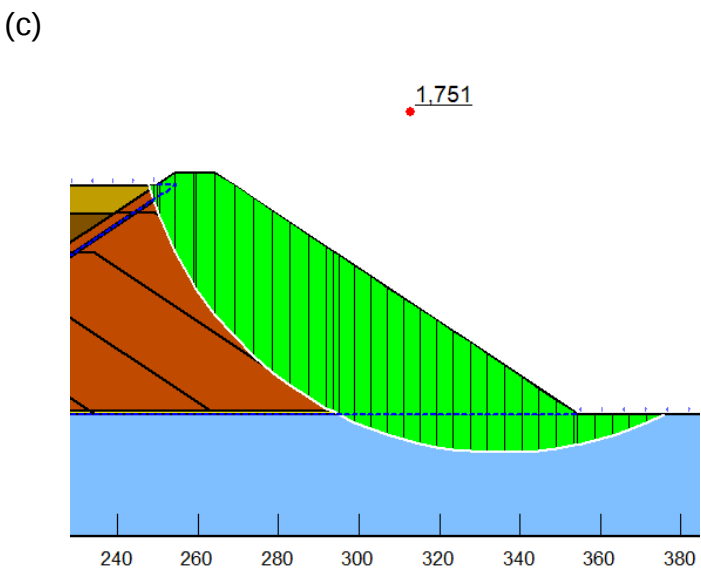
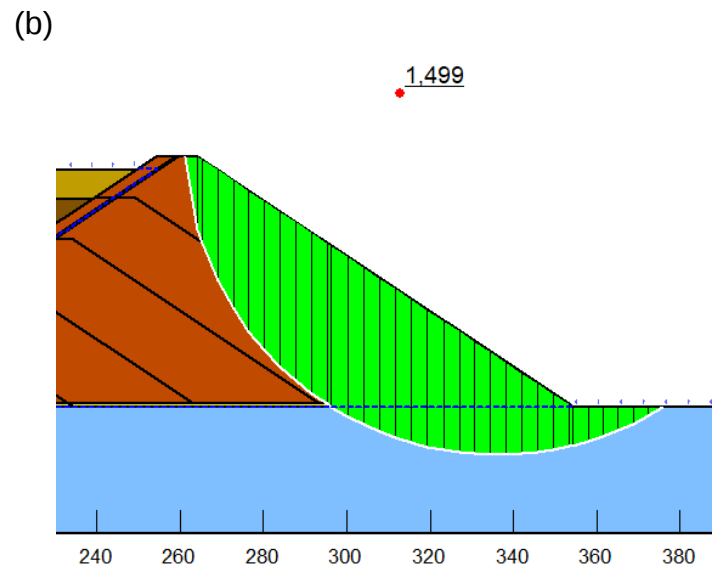
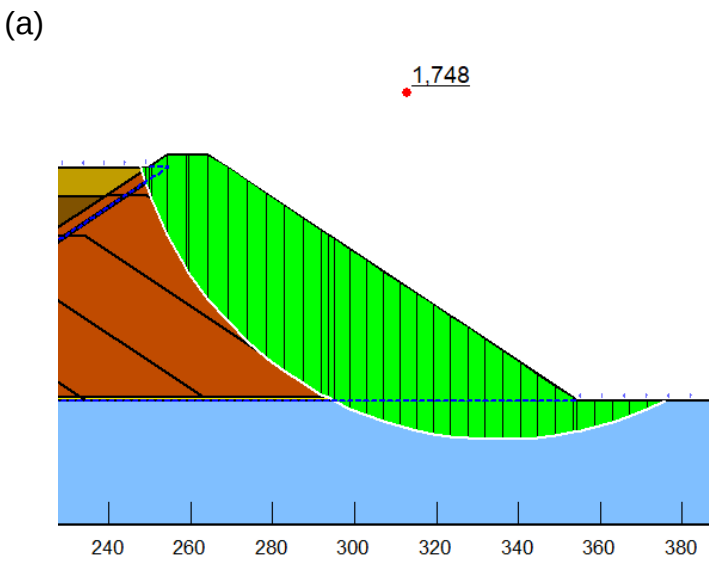


7



(a)–Spencer; (b)–Janbu; (c)–Bishop; (d)–Fellenius

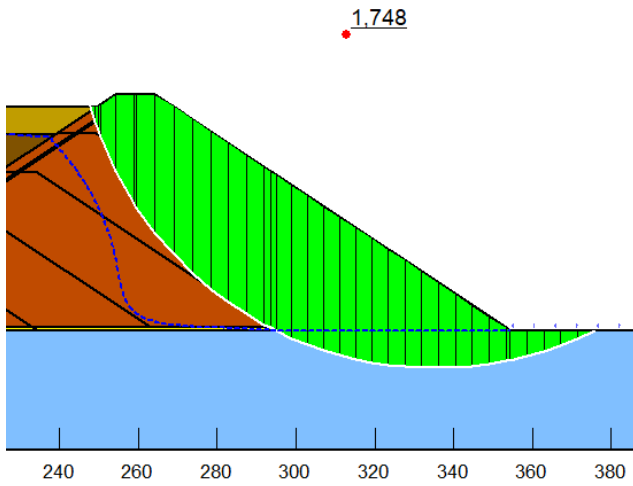
**APÊNDICE I – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de jusante –
CCN-02**



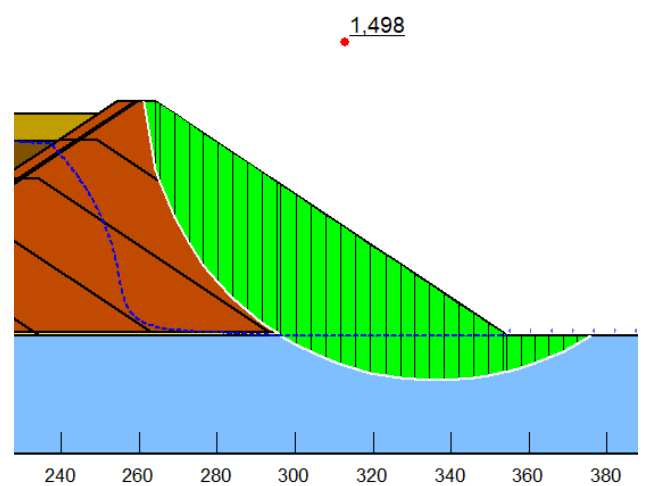
(a)–Spencer; (b)–Janbu; (c)–Bishop; (d)–Fellenius

APÊNDICE J – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de jusante – CCN-03

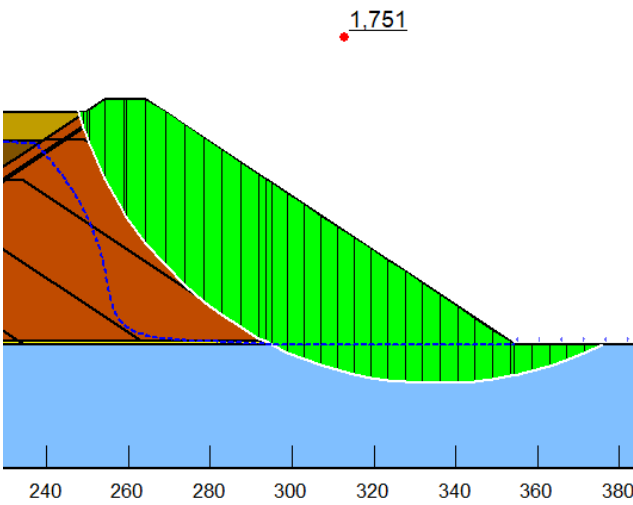
(a)



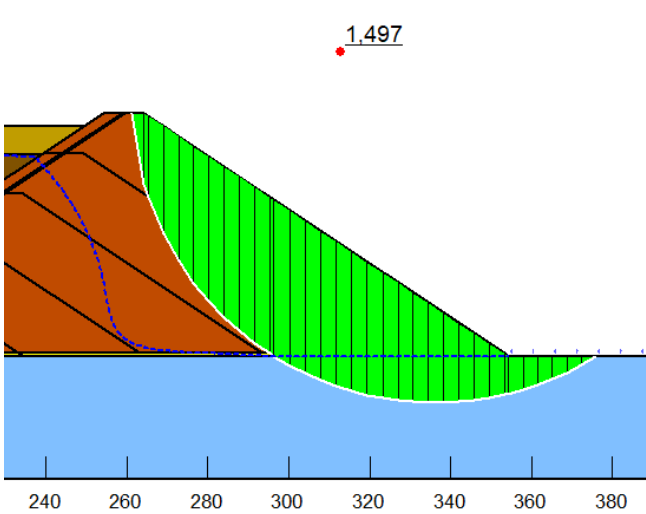
(b)



(c)



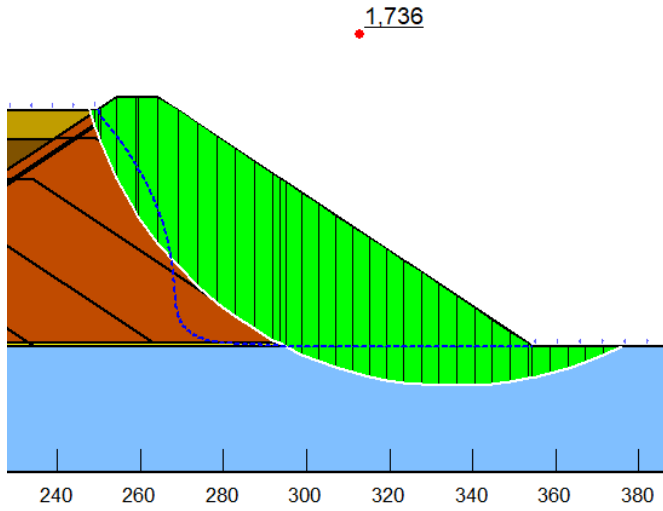
(d)



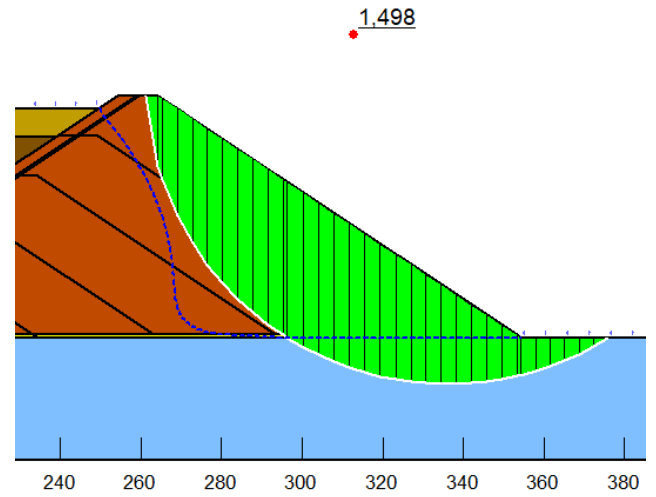
(a)–Spencer; (b)–Janbu; (c)–Bishop; (d)–Fellenius

**APÊNDICE K – Cunhas de ruptura e fator de segurança – Método linha de jusante –
CCN-03**

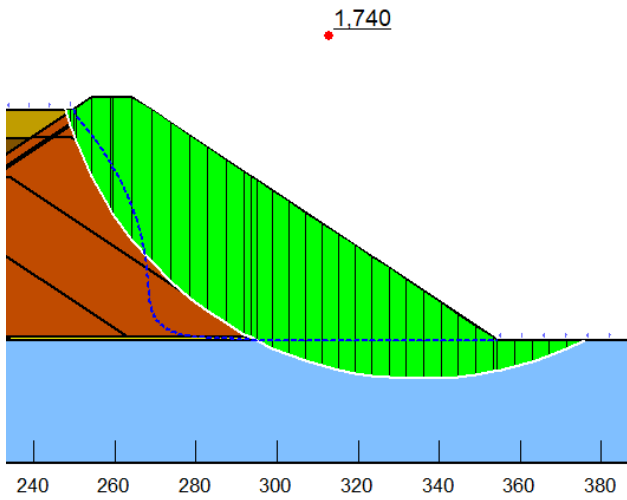
(a)



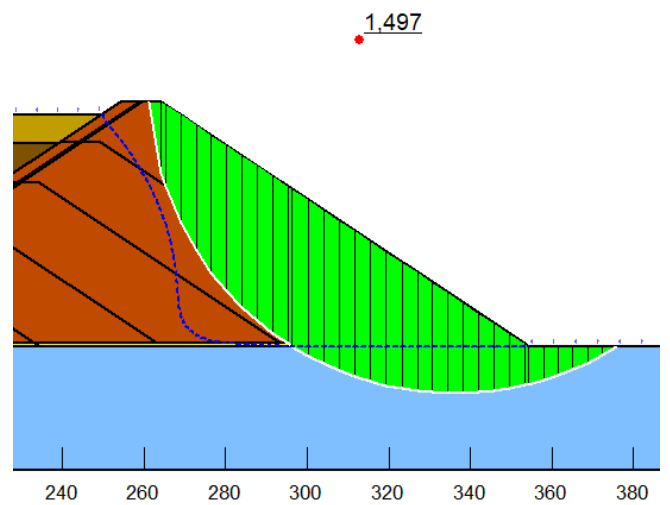
(b)



(c)



(d)



(a)–Spencer; (b)–Janbu; (c)–Bishop; (d)–Fellenius

