

DIRETRIZES PARA A REALIZAÇÃO DE ANÁLISES DE ESTABILIDADE DE TALUDES UTILIZANDO OS MÉTODOS DE PROJEÇÃO ESTEREOGRÁFICA E ANÁLISE CINEMÁTICA E DE SENSIBILIDADE

GUIDELINES FOR REALIZATION SLOPE STABILITY ANALYSES USING THE STEREOGRAPHIC PROJECTION AND KINEMATIC AND SENSITIVITY ANALYSIS METHODS

DANILO JOSÉ DA SILVA

Engenheiro de Minas, Novo Oriente, Ceará, Brasil

ORCID:0000-0002-9083-0096

E-mail:danilojose.eng.minas@gmail.com

RESUMO ABSTRACT

Em análises de estabilidade de taludes em rocha, as estruturas geológicas desempenham um papel fundamental nas condições de estabilidade, pois os modos de ruptura que ocorrem em taludes rochosos, são formados exclusivamente pela presença de meios descontínuos na massa de rocha, esses planos de fraqueza são característicos de diversos tipos de rochas e são denominados de descontinuidades. Uma das características mais importantes das descontinuidades é que as mesmas apresentam orientações, ou seja, possuem uma direção em relação ao norte geográfico e uma inclinação em relação a um plano horizontal. Essa orientação é o parâmetro chave para a realização de análises de estabilidade de taludes em rocha, visando a obtenção dos tipos prováveis de ruptura que ocorrem em taludes rochosos, pois a partir da orientação das descontinuidades em relação a orientação da face livre do talude, é possível determinar se as mesmas possuem ou não, condições para conduzir a um dado modo de ruptura. Devido à escassez de publicações nacionais, que não abordam esses assuntos de forma mais ampla, o presente artigo tem como objetivo estabelecer descrições, ilustrações, orientações e metodologias, que podem ser empregadas, para a projeção estereográfica de estruturas geológicas e análise de estabilidade de taludes em rocha, utilizando a metodologia cinemática e de sensibilidade. O artigo demonstra a técnica de projeção estereográfica, onde é possível representar as orientações das estruturas geológicas em um ambiente de duas dimensões, e também sobre os métodos de análise cine-

In rock slope stability analysis, the geological structures play a key role in the stability conditions, for the failure modes arising on rocky slopes are formed exclusively from the presence of discontinuous means in the rock mass, these planes of weakness are characteristic of various types of rock and are denominated as discontinuities. One of the most important characteristics of discontinuities, is that they present orientations, in other words, possess a direction in relation to the geographic north and an inclination in relation to a horizontal plane. This orientation is the key parameter for realization stability analyses of rock slopes, to obtain the probable types of failures, for from the orientation of the discontinuities in relation to the orientation of the free face of the slope, it is possible to determine if they have or do not, conditions to drive a given mode of rupture. Due to the scarcity of national publications that address these subjects more broadly, the present article has the objective of establishing descriptions, illustrations, guidelines and methodologies, which can be Applied, for stereographic projection of geological structures and rock slope stability analysis, using the kinematic and sensitivity methodology. The article demonstrates the stereographic projection techniques, where it is possible to represent the orientations of geological structures in a two-dimensional environment, and also on the methods of kinematic and sensitivity analysis, that respectively evaluate the failure modes, uncertainty and variability in the data. In addition, it

mática e de sensibilidade, que avaliam respectivamente os modos de ruptura, incertezas e variabilidades nos dados. Além disso, foi possível constituir uma metodologia que pode ser seguida para a realização dessas análises, com o objetivo de contribuir como um passo a passo a ser empregado.

Palavras-chaves: estabilidade de taludes, descontinuidades, orientações, modos de ruptura, análises de estabilidade

1. INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento de massas rochosas, vem crescendo nos últimos anos, e desde o desenvolvimento de metodologias de avaliação de estabilidade de rochas, expostas na superfície, sempre foi dado ênfase à estabilidade de taludes. Gerscovich (2016) define o termo talude como sendo qualquer superfície inclinada ao horizonte, composta por uma massa de solo ou rocha ou a junção de ambos, de origem natural, denominado encosta, ou construído pelo homem, por exemplo os aterros e cortes.

A diferença entre o comportamento mecânico do solo e da rocha deve ser sempre abordada, pois ambos diferem bastante. O solo se comporta como um meio estratificado e inconsolidado, na qual a coesão, o ângulo de atrito e o tamanho dos grãos, são os fatores mais importantes na avaliação de estabilidade. Já o comportamento da rocha é de um meio descontínuo e consolidado, sendo que a presença desse meio descontínuo na massa de rocha, será o elo mais fraco e, portanto, terá um maior domínio nas condições de estabilidade (Hudson & Harrison 1997).

A estabilidade de taludes em rocha, é bastante influenciada pela geologia estrutural presente na mesma. O termo geologia estrutural, refere-se ao estudo de estruturas geológicas, que se formam na rocha, devido ao processo de desenvolvimento e sua interação com o ambiente ao qual foi condicionada, podendo levar ao aparecimento de estruturas descontínuas em toda a matriz ou em dadas porções da rocha. Exemplos de estruturas geológicas são fissuras, juntas, falhas, dobras, planos de acamamento e foliações metamórficas (Wyllie 2017).

has been possible to constitute a methodology that can be followed for the realization of these analyses, with the objective of contributing as a step-by-step to be employed.

Keywords: slope stability, discontinuities, orientations, failure modes, stability analysis

As estruturas geológicas, são classificadas como descontinuidades, ou seja, um plano de fraqueza na rocha, que a torna descontínua em uma dada superfície. Esse plano descontínuo, influencia bastante na estabilidade da rocha, pois essa porção formada, favorece para que um dado modo de ruptura possa vir a ocorrer, preferencialmente ao longo dessa superfície descontínua. Em todos os estudos de estabilidade de rochas, é de suma importância a realização de avaliações bastante precisas das estruturas geológicas, objetivando obter informações dos tipos, características e propriedades mecânicas (Wyllie 2017).

Diversos estudos compilados nas publicações de Hoek & Bray (1977) e Goodman (1989), demonstram que rochas duras possuem uma elevada resistência, onde a ruptura por influência da gravidade, só é possível, caso a descontinuidade permita o movimento de massa sobre a sua superfície formada. Esses estudos, idealizados por diversos autores, chegaram à conclusão que para rochas expostas na superfície, existem quatro modos de ruptura, sendo eles planar, em cunha, circular e tombamento. Desses quatro modos de ruptura, três são formados exclusivamente por descontinuidades, com o modo de ruptura circular sendo um caso particular, mas também influenciado pela presença das mesmas. Nos três primeiros modos de ruptura, a orientação da superfície descontínua em relação à face livre do talude, desempenha um papel bastante importante nas condições de estabilidade (Goodman 1989).

A abordagem mais precisa para determinação dos tipos prováveis de ruptura é a análise cinemática. O termo cinemática, refere-se ao estudo do movimento sem haver uma preocupação com as forças que o fazem se mover. A partir dessa

abordagem, a análise cinemática visa avaliar qualitativamente os prováveis modos de ruptura do talude rochoso em função da orientação das descontinuidades e da face livre do talude, em relação ao ângulo de atrito do material, esse último para rochas representa uma provável inclinação limite que uma superfície descontínua pode suportar sem que haja movimento cisalhante, onde um mergulho desse plano descontínuo com valor superior ao do ângulo de atrito possui uma maior chance de ocorrer movimento cisalhante. Essa inclinação limite é de difícil determinação, sendo necessário direcionar com cautela um valor norteador para as análises (Hudson & Harrison 1997).

A orientação das descontinuidades e da face livre do talude, diz respeito a direção do plano descontínuo em função do norte verdadeiro e a inclinação deste plano em relação a um plano horizontal. A partir disso, é avaliado a geometria formada pelas descontinuidades, pelo método de projeção estereográfica em um ambiente de duas dimensões, em função do modo de análise que é característico de cada tipo de ruptura. Dessa forma, é possível classificar se o movimento da geometria formada é cinematicamente viável ou inviável (Hudson & Harrison 1997).

Em taludes rochosos, é quase inevitável controlar a queda e movimento de massas rochosas, pois os custos necessários para garantir a segurança completa, são bem elevados. Mas Hoek & Bray (1977) e Goodman (1989) demonstraram que um dos fatores não mecânicos que mais influência nas condições de instabilidade é a inclinação da face livre do talude. Essa inclinação, pode favorecer diretamente no movimento de massa para um dado modo de ruptura, sendo necessário em avaliações qualitativas de taludes rochosos, avaliar a influência que a variabilidade no valor da inclinação irá condicionar nos modos de ruptura

prováveis para o talude, sendo essa avaliação denominada de análise de sensibilidade, das quais também é utilizada para avaliar os demais parâmetros do método de análise cinemática (Goodman 1989).

Portanto, devido à escassez de publicações nacionais, que não abordam de uma forma mais ampla instruções, detalhamentos e caminhos a serem seguidos para aplicação desses métodos, que vem sendo bastante utilizados nos últimos anos, para avaliação qualitativa da estabilidade de taludes rochosos. O presente artigo tem como objetivo estabelecer descrições, ilustrações, orientações e metodologias, que podem ser empregadas, para a projeção estereográfica de estruturas geológicas e análise de estabilidade de taludes em rocha, utilizando a metodologia cinemática e de sensibilidade.

2. PROJEÇÃO ESTEREOGRÁFICA

A projeção estereográfica, permite representar os dados de orientação ou altitude de planos e alinhamentos estruturais de um ambiente tridimensional, para que possam ser analisadas em um ambiente de duas dimensões. Essa projeção é feita em um estereograma (Figura 1), que nada mais é, que um círculo com linhas internas, que quando unidas representam uma escala de 0° a 90° , tendo esse círculo uma escala de 0° a 360° . Um dos primeiros passos antes da realização de análises cinemáticas, é a obtenção da orientação das descontinuidades e do talude para que, posteriormente, essas orientações sejam plotadas em um estereograma e, possa ser dada sequência a interpretação de suas condições cinemáticas (Wyllie 2017).

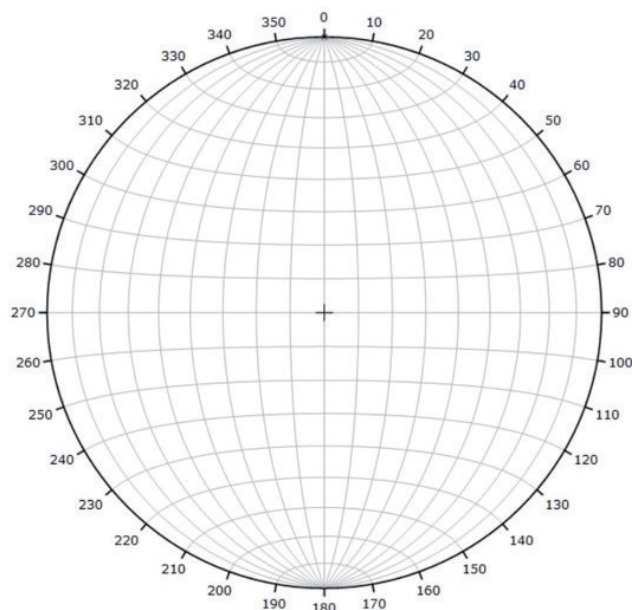


Figura 1. Estereograma (Fonte: Elaborado pelo autor 2023).

A terminologia utilizada para orientação de planos é strike, dip e dip direction, já para alinhamentos é trend e plunge. O strike e trend representam a direção partindo do norte geográfico até uma linha imaginária horizontal e paralela ao plano e alinhamento. O dip e plunge representam a inclinação ou mergulho entre o plano ou alinhamento e uma linha imaginária horizontal perpen-

dicular ao plano é paralela ao alinhamento. Já o dip direction é a direção do mergulho partindo do norte geográfico até uma linha imaginária horizontal e perpendicular ao plano (Wyllie 2017). A Figura 2 detalha a localização geométrica dessas terminologias de orientação para planos e alinhamentos.

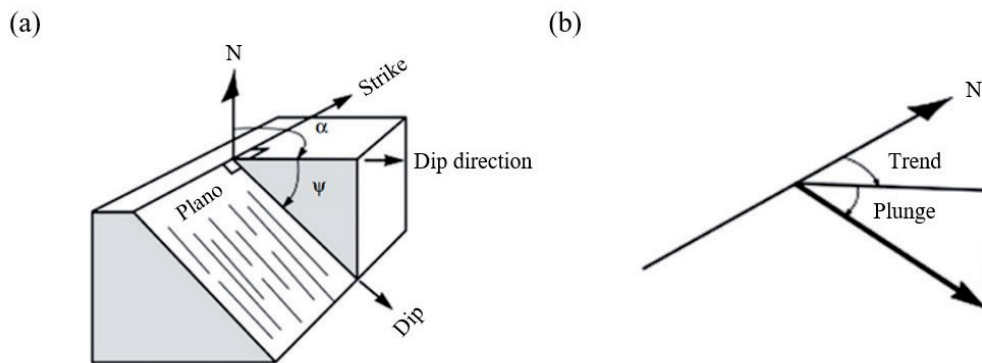


Figura 2. (a) terminologia de orientação para planos, (b) terminologia de orientação para alinhamentos (Fonte: Modificado de Wyllie 2017).

A forma de obtenção dos dados de orientação é feita com auxílio de uma bússola geológica com clinômetro embutida. A bússola, quando devidamente descontado o valor da declividade magnética da região, direciona para obtenção da direção do plano ou alinhamento em função do norte geográfico, já o clinômetro mede a inclinação do plano

ou alinhamento em relação a horizontal. O plano ou alinhamento da descontinuidade, para obtenção da altitude, pode ser observado diretamente na superfície da rocha (Wyllie 2017). A Figura 3 ilustra os modelos de bússolas mais empregados para obtenção de orientações, com todas elas possuindo clinômetro embutido.

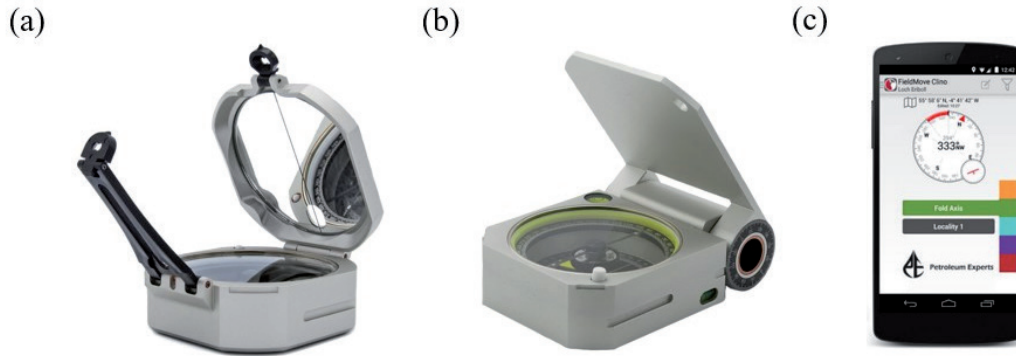


Figura 3. (a) bússola brunton, (b) bússola clar, (c) bússola digital (Fonte: Brunton 2023, Petroleum experts 2023).

Um erro muito cometido na obtenção do mergulho e que existe o mergulho aparente e verdadeiro. O verdadeiro é a inclinação mais íngreme do plano, já o aparente é a inclinação mais suave do plano. Uma forma simples de obtenção do mergulho verdadeiro é despejar água ou areia sobre a projeção do plano da descontinuidade feita com auxílio de algum acessório e observar a direção de caimento, influenciada pela gravidade (Wyllie 2017).

Wyllie (2017) salienta que representar planos e alinhamentos no estereograma requer muita atenção, pois existem diversos tipos de configurações disponíveis para o estereograma. Os planos devem ser representados na forma de grandes círculos (semi-elipse) e os alinhamentos na forma de polos (ponto). O passo a passo a seguir descreve as configurações que devem ser adotadas em função da projeção estereográfica a ser seguida e a Figura 4 ilustra cada uma das configurações.

- O primeiro passo inicial é a escolha do hemisfério, que pode ser superior (a) ou inferior (b). Esse hemisfério, nada mais é, que um corte em uma esfera a dividindo em uma porção superior e inferior. A visualização zenith do corte na esfera, representa a projeção estereográfica de hemisfério superior, e a visua-

lização nadir do corte na esfera, representa a projeção estereográfica de hemisfério inferior. O hemisfério superior é utilizado para a projeção de polos, já o inferior é utilizado para planos;

- O segundo passo é a escolha do tipo de projeção, que pode ser equatorial (c) ou polar (d). Essa projeção visa simplificar a representação de grandes círculos ou polos no estereograma. A projeção equatorial, pode ser utilizada tanto para traçar grandes círculos e polos, já a projeção polar é utilizada apenas para traçar polos;
- O último passo é a escolha da própria rede estereográfica, que pode ser de Schmidt (e) ou Wulff (f). A rede de Schmidt representa uma projeção de igual área, onde qualquer representação no estereograma possui área igual na superfície da esfera de referência. Essa rede é utilizada para avaliação de contornos e densidade de polos e de orientações preferenciais de conjuntos de descontinuidades. Já a rede de Wulff representa uma projeção de igual ângulo, onde qualquer representação no estereograma, possui ângulo igual na superfície da esfera de referência. Essa rede é utilizada apenas para avaliação de relações angulares.

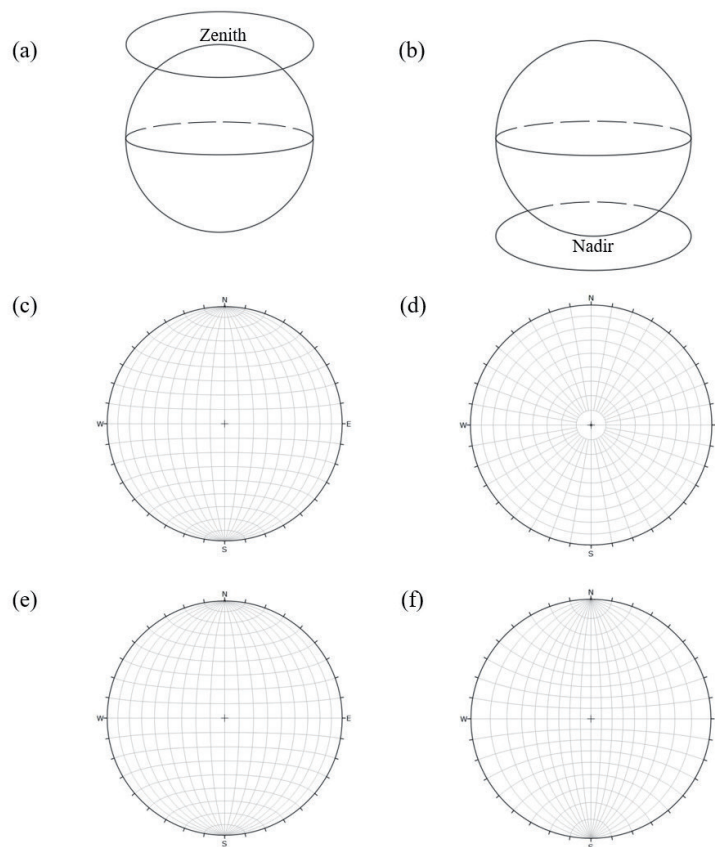


Figura 4. (a) hemisfério superior, (b) hemisfério inferior, (c) projeção equatorial, (d) projeção polar, (e) rede estereográfica de Schmidt, (f) rede estereográfica de Wulff (Fonte: Elaborado pelo autor 2023).

Com a configuração escolhida, já é possível iniciar a projeção dos planos e alinhamentos no estereograma. Essa projeção, pode ser feita de forma manual, com a impressão do estereograma configurado e, com uso de papel vegetal sobreposto ao estereograma. A partir disso, é possível rotacionar em relação ao eixo do círculo o papel vegetal e representar os planos e alinhamentos no formato de grandes círculos e polos, respectivamente (Goodman 1989). A utilização de softwares como é o caso do Dips é mais vantajosa, pois basta apenas configurar a projeção e informar a terminologia adotada dos planos e alinhamentos, com a projeção das estruturas sendo gerada de forma automática a partir da inserção dos dados.

Para o entendimento da representação de planos no formato de grandes círculos, é feita uma analogia com o método manual, onde é necessário um estereograma, papel vegetal, alfinete e lápis. Com a sobreposição do papel vegetal sobre o círculo do estereograma auxiliado pelo alfinete, é fei-

to o desenho dos sentidos geográficos e do círculo externo. Posteriormente, toma-se inicialmente o valor do strike e marca-se um ponto no papel vegetal, essa marcação deve ser rotacionada para cima do norte ou sul, dependendo da sua proximidade. Em função do dip direction, demarca-se o valor do dip no sentido de fora para o centro do círculo, selecionado uma semi-elipse que representa o mergulho e demarca a mesma por completo. Por fim, retorna-se os sentidos previamente desenhados sobre o papel vegetal, para sobreposição sobre os sentidos do estereograma, gerando assim, a representação estereográfica do plano na forma de grande círculo (Goodman 1989). A Figura 5 ilustra o resultado da representação de um plano na forma tridimensional no corte da esfera de referência, para uma melhor visualização do formato de plotagem em grande círculo em função das terminologias adotadas.

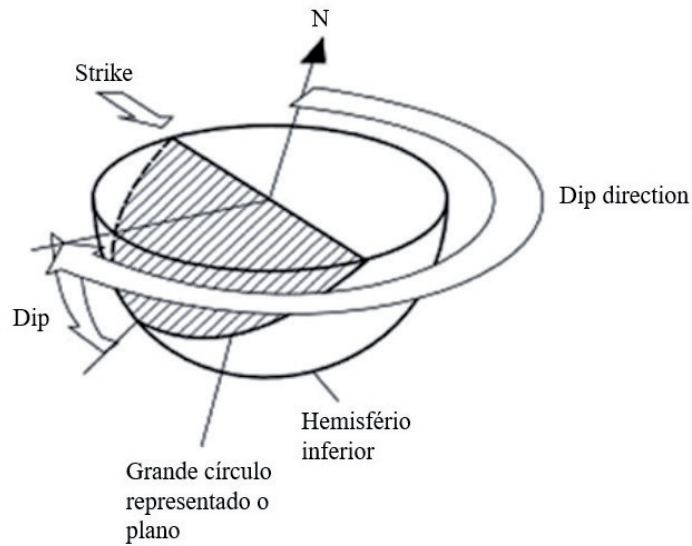


Figura 5. Representação tridimensional de um plano no formato de grande círculo no estereograma (Fonte: Modificado de Wyllie 2017).

Seguindo a mesma analogia, a representação de alinhamentos no formato de polos é mais simples. Primeiramente, seleciona-se o valor do trend e marca-se um ponto no papel vegetal, essa marcação deve ser rotacionado para cima do leste ou oeste, dependendo de sua proximidade. Em função do trend, demarca-se o valor do plunge no sentido de fora para o centro do círculo, na forma de um ponto em função do mergulho. Por fim, re-

torna-se os sentidos previamente desenhados sobre o papel vegetal, gerando assim, a representação do alinhamento na forma de polo (Goodman 1989). A Figura 6 ilustra o resultado da representação de um alinhamento na forma tridimensional no corte da esfera de referência, para uma melhor visualização do formato de plotagem em polo em função das terminologias adotadas.

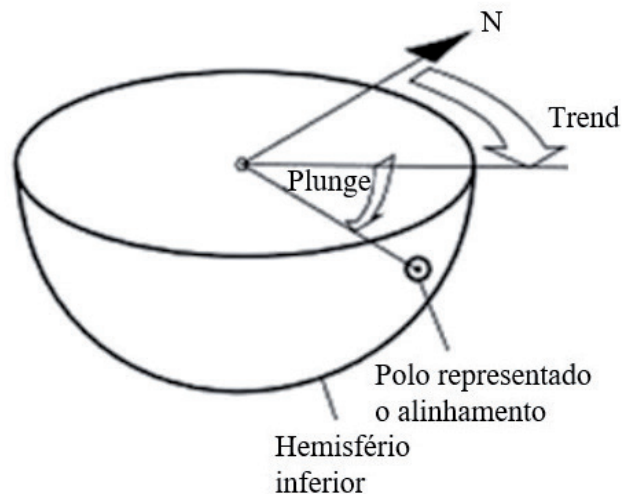


Figura 6. Representação tridimensional de um alinhamento no formato de polo no estereograma (Fonte: Modificado de Wyllie 2017).

Para a representação de diversos planos de descontinuidades, não é vantajoso realizar a plotagem no formato de grandes círculos, pois gera uma enorme poluição visual no estereograma, dificultando a interpretação. Uma forma bastante empregada, é transformar a representação do grande círculo em um polo, na qual o polo representará um vetor normal, com 90° de inclinação em relação ao dip do plano, sendo a direção desse vetor um valor de 180° a mais em relação ao dip direction do plano. A utilização de softwares, simplifica e muito a projeção de estruturas geológicas em estereogramas, principalmente na conversão de grande círculo para polo e vice-versa, além disso, é possível vincular o polo a uma figura geométrica, para caracterizar o tipo de estrutura que lhe representa, melhorando a interpretação dos resultados (Wyllie 2017).

Uma plotagem exclusiva para análises cinemáticas é a do ângulo de atrito, este ângulo representa uma provável inclinação limite que uma superfície descontínua pode suportar sem que

haja movimento cisalhante. No caso de rochas, dependendo do modo de ruptura, um corpo rochoso estará sobre um plano inclinado, sendo esse plano a superfície potencial de ruptura, onde poderá ou não haver atrito entre as partículas minerais presentes na superfície da descontinuidade, permitindo ou não o movimento cisalhante. A representação do ângulo de atrito no estereograma, depende do modo de ruptura avaliado, na qual o valor do ângulo de atrito é representado como um círculo de atrito, com a escala do círculo, dependendo do valor do ângulo. Esse círculo é plotado no estereograma seguindo o sentido do centro para fora ou o inverso, dependendo do modo de ruptura a ser avaliado (Wyllie 2017, Goodman 1989). A Figura 7 ilustra a representação do cone de atrito em relação ao vetor normal e em função da inclinação do plano, esse cone de atrito quando representado em um estereograma é chamado de círculo de atrito, com ambos possuindo a mesma escala, que representa o valor do ângulo de atrito.

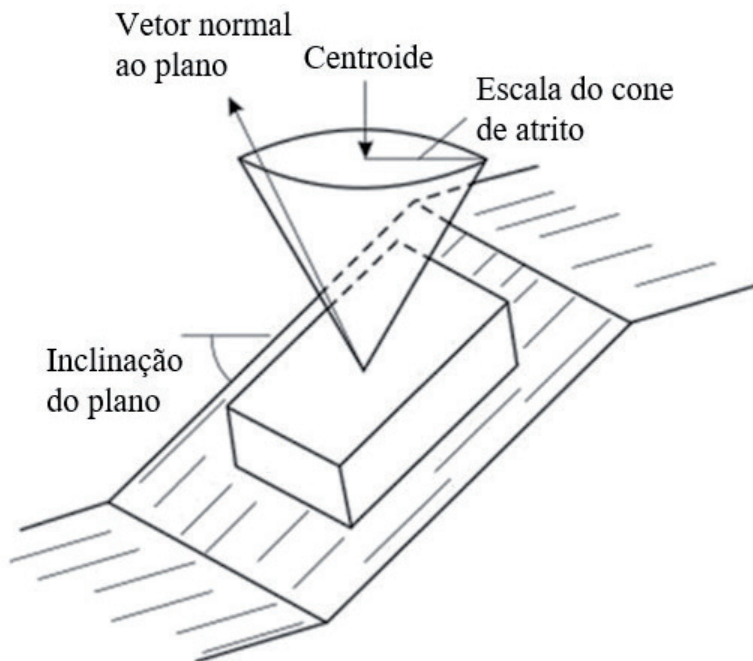


Figura 7. Ilustração da representação do cone de atrito e círculo de atrito em relação ao vetor normal e em função da inclinação do plano (Fonte: Modificado de Wyllie 2017).

Outras informações importantes que podem ser geradas em projeções estereográficas é o contorno de polos, densidade de polos, diagrama de rosetas e interseções de planos (Wyllie 2017). Uma descrição breve de cada um é dada logo abaixo e a Figura 8 ilustra cada uma dessas informações que podem ser visualizadas no estereograma.

- O contorno de polos (a) representa um limite que pode ser estabelecido de estruturas que possuem uma pequena variação na orientação, onde os polos que estiverem contidas nesse contorno, representam uma espécie de família, ou seja, estão contidas no mesmo grupo, podendo extrair uma orientação média desse conjunto de estruturas;
- A densidade de polos (b) é quase semelhante ao contorno de polos, diferindo apenas em que os agrupamentos de polos são representados em termos de intervalos percentuais ou quantidades, com as menores concentrações

sendo representados visualmente por um tom de cor menos intenso e as maiores concentrações por um tom de cor mais intenso;

- O diagrama de rosetas (c) é uma forma de representação da orientação das estruturas geológicas no formato de diagrama de frequência relativa, ou seja, a escala do estereograma de 0° a 360° é dividida em intervalos e para cada orientação contida nesse intervalo é representado na forma de porcentagem ou quantidade em relação ao todo, sendo essa frequência relativa representado graficamente como um histograma no estereograma;
- A interseção de planos (d) representa o ponto onde dois grandes círculos se cruzam no estereograma, essa interseção, caracteriza uma tendência de orientação, onde esse ponto de interseção possui trend e plunge, ou seja, forma um alinhamento com orientação.

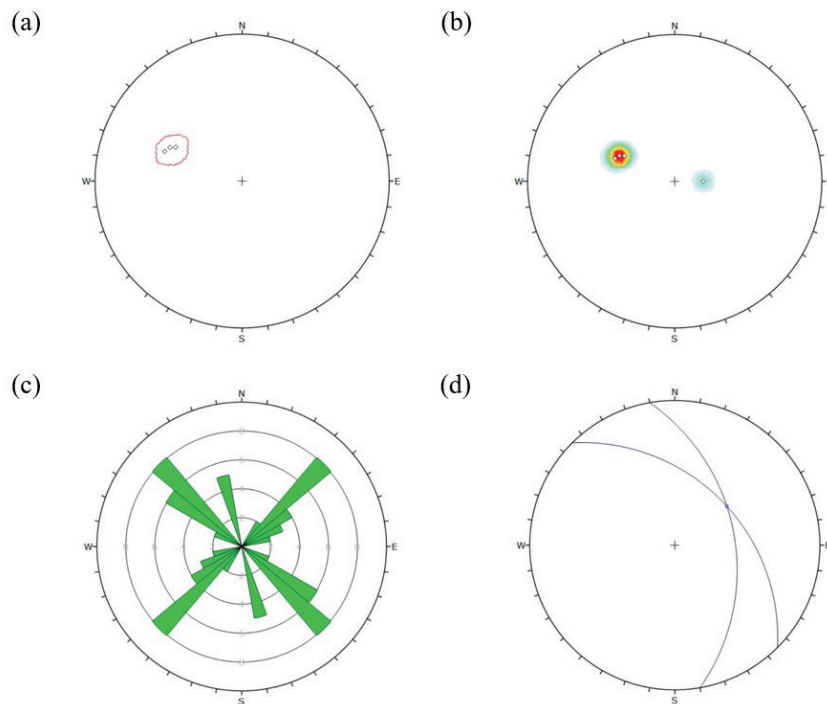


Figura 8. (a) contorno de polos, (b) densidade de polos, (c) diagrama de rosetas, (d) interseção de planos (Fonte: Elaborado pelo autor 2023).

3. ANÁLISE CINEMÁTICA

A análise cinemática de estruturas geológicas, direciona para a obtenção dos prováveis modos de rupturas em rochas, através de uma avaliação cinemática da relação entre a orientação das descontinuidades e do talude em função do ângulo de atrito. O termo cinemática, refere-se à avaliação do movimento de corpos sem fazer referência às forças que o fazem se mover. Para que uma massa de rocha sofra deslocamento, é fundamental que haja uma superfície favorecendo ao movimento, logo é necessário avaliar se essa superfície pode direcionar para um movimento cinematicamente viável ou não (Goodman 1989).

Segundo Wyllie (2017) os diferentes tipos de rupturas estão diretamente associados à relação entre a orientação das descontinuidades e do talude em função do ângulo de atrito. Para cada modo de ruptura, há uma forma diferente de avaliação, sendo que a partir da projeção estereográfica, é possível avaliar e determinar se uma dada descontinuidade ou conjunto, pode estar em estado crítico para um dado modo de ruptura.

Goodman (1989) pondera que esse tipo de análise deve ser utilizado com cautela, pois o mesmo faz referência mínima a parâmetros de resistência da rocha, levando em consideração apenas o ângulo de atrito, que é de difícil determinação para o caso de rochas. Logo, esse tipo de análise deve ser empregado como ponto de partida para uma ampla sequência de procedimentos, objetivando atestar as condições de estabilidade de taludes.

A grande vantagem dessa análise é que a mesma pode ser feita a partir de técnicas de projeção estereográfica, pois esse tipo de abordagem cinemática tem como foco avaliar as condições de movimento sobre a superfície formada, em função da orientação das descontinuidades e do talude em relação ao ângulo de atrito. Como a projeção estereográfica permite a representação

da orientação ou altitude de planos e alinhamentos em um ambiente de duas dimensões, favorece para a aplicação de análises cinemáticas a partir de estereogramas (Wyllie 2017).

A configuração do estereograma, frequentemente adotada para análises cinemáticas é de hemisfério inferior, projeção equatorial e rede estereográfica de Schmidt. Já a representação de planos no formato de grande círculo ou polos, vai depender do modo de ruptura avaliado (Wyllie 2017). A seguir será apresentado uma descrição mais ampla sobre a avaliação cinemática para cada modo de ruptura.

3.1 RUPTURA PLANAR

A ruptura planar é um tipo de movimento de massa que ocorre sobre uma superfície descontínua perpendicular à face livre do talude, essa superfície forma um plano com inclinação suave e menor do que o da face livre do talude. As condições cinemáticas que devem ser atendidas para o modo de ruptura planar estão dispostas logo abaixo (Wyllie 2017, Hudson & Harrison 1997). A Figura 9 ilustra a representação da geometria para o modo de ruptura planar e sua exibição no estereograma.

- A inclinação do plano potencial de deslizamento deve ser menor do que o mergulho da face livre do talude;
- O plano potencial de deslizamento tem que emergir na face livre do talude;
- A extremidade superior do plano potencial de deslizamento deve cruzar o topo do talude ou uma fenda de tração;
- A inclinação do plano potencial de deslizamento deve ser maior do que o ângulo de atrito;
- A direção do plano potencial de deslizamento precisa ser perpendicular à face livre do talude.

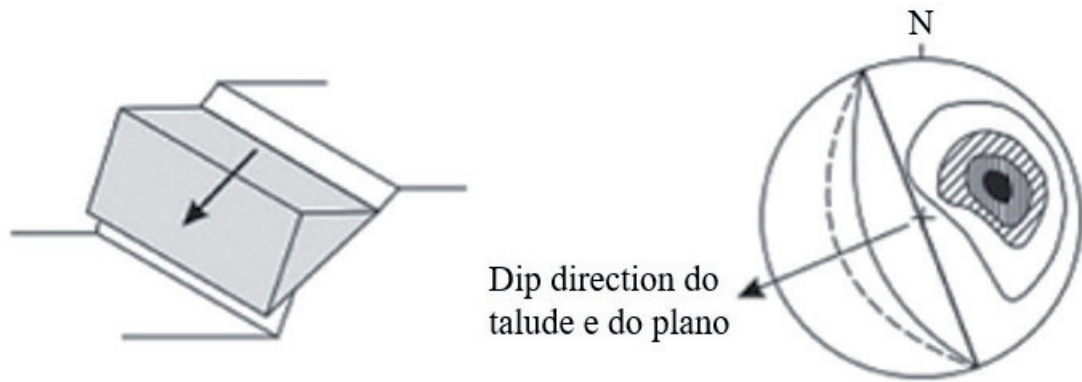


Figura 9. Ilustração da representação da geometria do modo de ruptura planar no talude e sua exibição no estereograma (Fonte: Modificado de Wyllie 2017).

Para avaliação do modo de ruptura planar a partir da análise cinemática, é necessário que a projeção das orientações das discontinuidades seja no formato de polos e a orientação do talude no formato de grande círculo e polo. Posteriormente, o ângulo de atrito deve ser plotado na forma de círculo de atrito, com a inclinação seguindo a direção do centro para fora do estereograma. Por fim, plota-se os limites inferior e superior da direção do talude e o limite da zona crítica, que

é traçado como uma elipse, formada entre o polo do talude e o centro do círculo de atrito. A partir da plotagem é definida a zona crítica, essa zona é formada na área acima do círculo de atrito e abaixo do polo do talude, delimitada pelos limites inferior e superior da direção do talude e pelo limite da zona crítica (Goodman 1989). A Figura 10 apresenta a ilustração da localização das variáveis empregadas para análise cinemática em relação ao modo de ruptura planar no estereograma.

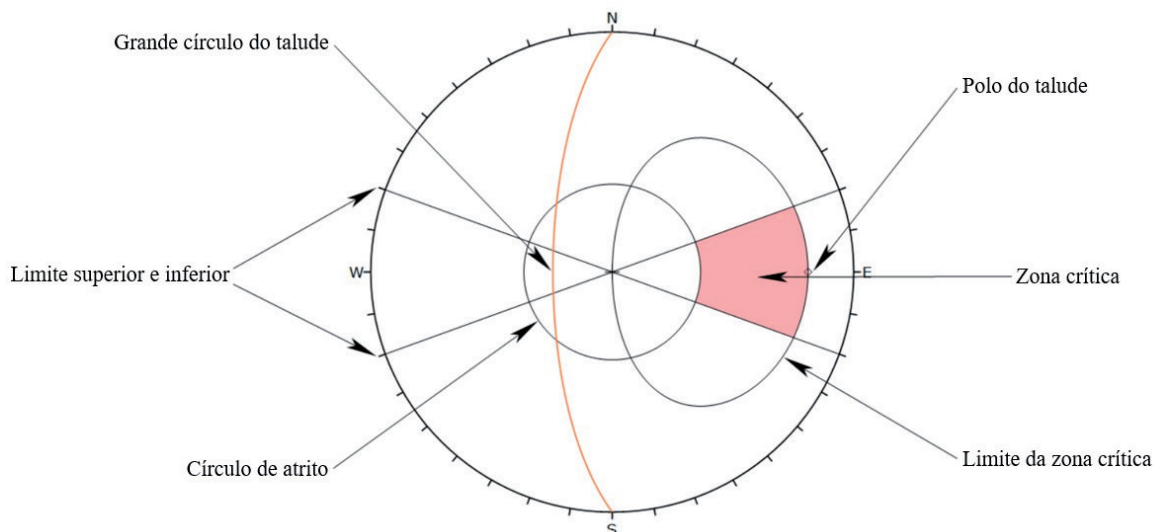


Figura 10. Ilustração da localização das variáveis empregadas para análise cinemática em relação ao modo de ruptura planar no estereograma (Fonte: Elaborado pelo autor 2023).

As discontinuidades com prováveis condições para sofrer ruptura planar, são as em que o polo de suas orientações estiverem presentes na zona crítica, pois essa zona representa uma condição de movimento cinematicamente viável e satisfaz todas as condições cinemáticas para o modo de ruptura planar, fora dessa zona, nenhuma condição é satisfeita e o movimento é cinematicamente inviável (Wyllie 2017, Hudson & Harrison 1997).

3.2 RUPTURA EM CUNHA

A ruptura em cunha é outro tipo de movimento de massa que ocorre quando duas discontinuidades se cruzam formando um tetraedro. A superfície gerada é uma espécie de cunha, com orientação formada pela linha de interseção entre as duas superfícies descontínuas. Esse tipo de modo de ruptura é uma espécie de variação do modo de ruptura planar, diferindo apenas por ocorrer entre duas superfícies descontínuas for-

madadas e não apenas uma, mas possui condições cinemáticas quase semelhantes, sendo elas dispostas logo abaixo (Wyllie 2017, Hudson & Harrison 1997). A Figura 11 ilustra a representação da geometria para o modo de ruptura em cunha e sua exibição no estereograma.

- A inclinação formada pela interseção das duas superfícies potenciais de deslizamento deve ser menor do que o mergulho da face livre do talude;
- A interseção formada pelas duas superfícies potenciais de deslizamento tem que emergir na face livre do talude;
- A extremidade superior da interseção formada pelas duas superfícies potenciais de deslizamento deve cruzar o topo do talude ou uma fenda de tração;
- A inclinação formada pela interseção das duas superfícies potenciais de deslizamento deve ser maior do que o ângulo de atrito.

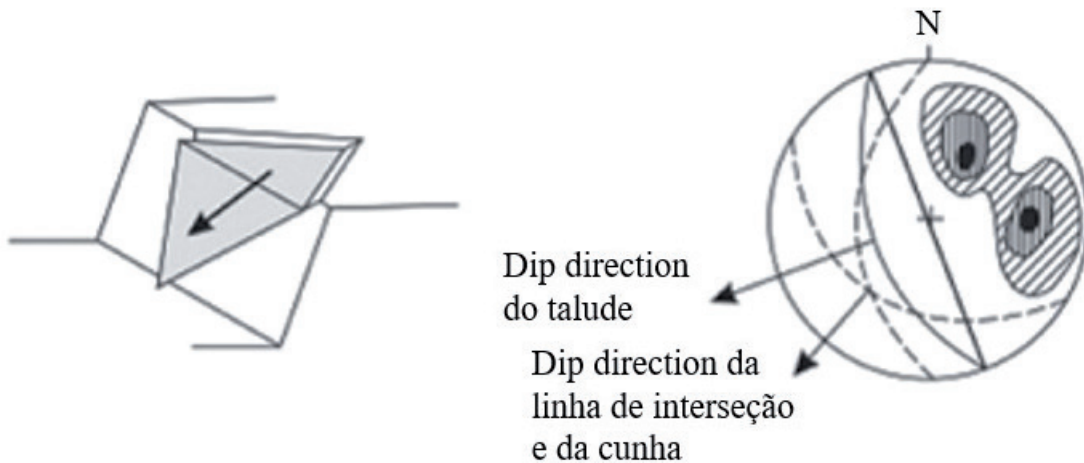


Figura 11. Ilustração da representação da geometria do modo de ruptura em cunha no talude e sua exibição no estereograma (Fonte: Modificado de Wyllie 2017).

Para avaliação do modo de ruptura em cunha a partir da análise cinemática, é necessário que tanto a orientação das descontinuidades como a do talude, sejam plotadas no formato de grande círculo. Posteriormente, deve ser marcado o ponto de interseção entre os grandes círculos das descontinuidades, que representarão o polo de orientação da interseção. O ângulo de atrito também é plotado, mas diferente do modo de ruptura planar, o círculo de atrito é plotado com inclinação seguindo a direção de fora para o centro do

estereograma. Por fim, o limite da zona crítica é definido como um grande círculo, traçado a partir da escala do círculo de atrito. A partir dessas plotagens é definido a zona crítica, essa zona é formada na área acima do grande círculo do talude e abaixo do círculo de atrito, delimitada pelo limite da zona crítica (Goodman 1989). A Figura 12 apresenta a ilustração da localização das variáveis empregadas para análise cinemática em relação ao modo de ruptura em cunha no estereograma.

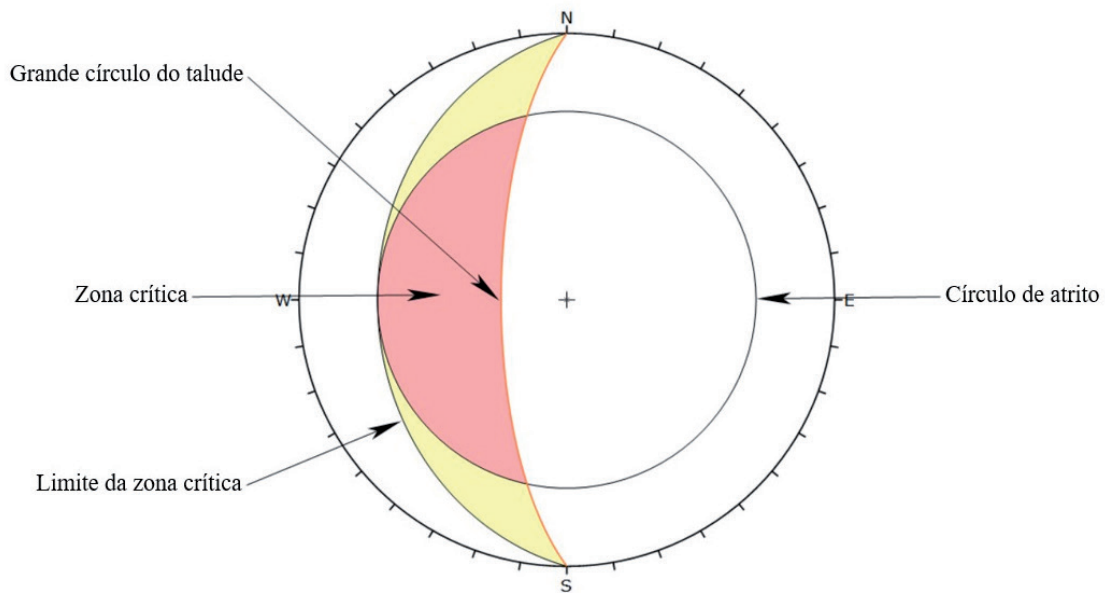


Figura 12. Ilustração da localização das variáveis empregadas para análise cinemática em relação ao modo de ruptura em cunha no estereograma (Fonte: Elaborado pelo autor 2023).

As interseções das descontinuidades com prováveis condições para sofrer ruptura em cunha, são as em que o polo da interseção estiverem presentes na zona crítica, pois essa zona representa uma condição de movimento cinematicamente viável e satisfaz todas as condições cinemáticas para o modo de ruptura em cunha, fora dessa zona, nenhuma condição é satisfeita e o movimento é cinematicamente inviável (Wyllie 2017, Hudson & Harrison 1997).

3.3 RUPTURA CIRCULAR

A ruptura circular é um tipo característico de movimento de massa que ocorre em rochas fracas,

altamente intemperizadas, fortemente fraturas e sem um padrão de orientação estrutural, com a superfície de ruptura formada, assemelhando-se a de um círculo. Esse tipo de ruptura é comumente associado a solos, mas também é comum em rochas, em ambos os casos, a superfície formada procura a menor resistência ao cisalhamento ao longo talude, sendo a mesma próxima a de um círculo. Algumas condições são necessárias para que esse tipo de ruptura ocorra em rochas, sendo elas dispostas logo abaixo (Wyllie 2017). A Figura 13 ilustra a representação da geometria para o modo de ruptura circular e sua exibição no estereograma.

- A rocha não possui um padrão de orientação estrutural bem definido, sendo fortemente fraturada;
- A persistências e espaçamento das descontinuidades presentes são muito pequenas;
- O intemperismo atuante na rocha encontra-se em elevado grau de atuação;
- As partículas da rocha são muito pequenas em relação ao tamanho do talude.

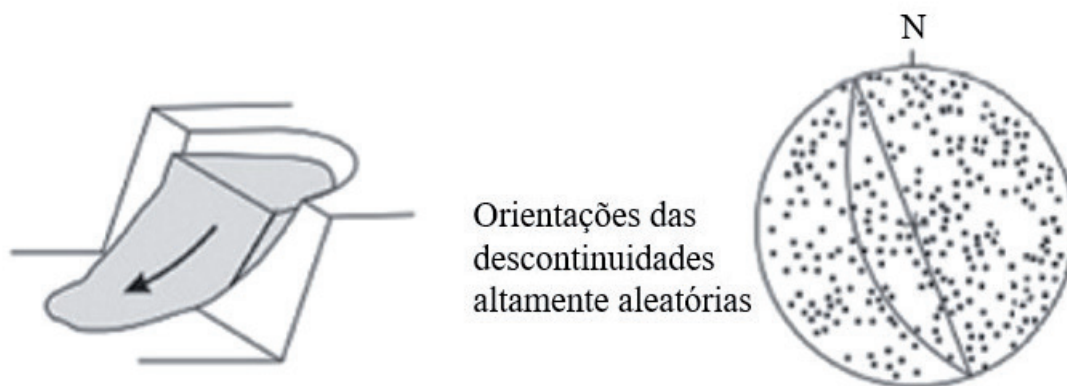


Figura 13. Ilustração da representação da geometria do modo de ruptura circular no talude e sua exibição no estereograma (Fonte: Modificado de Wyllie 2017).

A análise cinemática para esse tipo de ruptura não se aplica, pois, esse tipo de movimento de massa não é redigido por estruturas geológicas descontínuas. Mas a partir da projeção estereográfica da orientação das descontinuidades no formado de polos, é possível julgar se existe ou não um padrão de orientação estrutural bem definido, caso não haja padrão e as mesmas possuam uma elevada dispersão em termos de orientação, o talude terá uma maior condição para sofrer ruptura circular do que qualquer outro modo de ruptura (Wyllie 2017).

3.4 RUPTURA POR TOMBAMENTO

A ruptura por tombamento é outro tipo característico de movimento de massa que ocorre em blocos que se formam no talude, com os mesmos tombando em direção à face livre. A presença de descontinuidades que se cruzam com orientação na mesma direção da face livre do talude e de descontinuidades paralelas entre si e espaçadas com orientação contrária à da face livre do talude, geram blocos de diversos tamanhos e formas, que dependendo da superfície de sustentação, podem

tombam diretamente, de forma não direta ou sofrer flexão perpendicularmente à face livre do talude. As condições cinemáticas que devem ser atendidas para o modo de ruptura por tombamento estão dispostas logo abaixo (Wyllie 2017, Hudson & Harrison 1997). A Figura 14 ilustra a representação da geometria para o modo de ruptura por tombamento e sua exibição no estereograma.

- As descontinuidades que se cruzam devem possuir uma orientação de interseção das superfícies dos blocos quase igual à da face livre do talude para sofrerem tombamento direto;
- As descontinuidades que se cruzam direcionando para tombamento oblíquo não possuem orientação de interseção das superfícies dos blocos perpendicular à da face livre do talude;
- As descontinuidades devem possuir uma orientação contrária à face livre do talude e espaçadas paralelamente entre si para sofrerem tombamento por flexão;
- A inclinação da superfície de sustentação dos blocos deve ser maior do que a do ângulo de atrito.

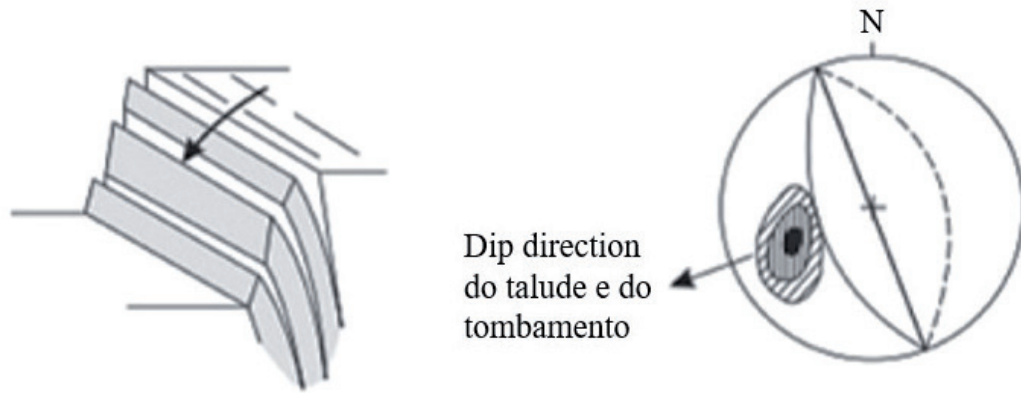


Figura 14. Ilustração da representação da geometria do modo de ruptura por tombamento no talude e sua exibição no estereograma (Fonte: Modificado de Wyllie 2017).

Para avaliação do modo de ruptura por tombamento a partir da análise cinemática, é necessária uma abordagem distinta para os modos de tombamento, sendo o primeiro o direto/oblíquo e o segundo por flexão.

Para o modo de tombamento direto/oblíquo, é necessário que a projeção das orientações das discontinuidades seja no formato de grande círculo e a orientação do talude no formato de grande círculo e polo. Posteriormente, deve ser marcado o ponto de interseção entre os grandes círculos das discontinuidades. O ângulo de atrito é plotado na forma de círculo de atrito, com a inclinação seguindo a direção do centro para fora

do estereograma. Por fim, plota-se os limites inferior e superior da direção do talude e o limite da zona crítica, que é traçado na forma de um círculo, seguindo a escala da orientação do polo do talude. A partir da plotagem é definida a zona crítica, essa zona é formada na área acima do círculo de atrito e abaixo do polo do talude, delimitada pelos limites inferior e superior da direção do talude e pelo limite da zona crítica (Hudson & Harrison, 1997). A Figura 15 apresenta a ilustração da localização das variáveis empregadas para análise cinemática em relação ao modo de ruptura por tombamento direto/oblíquo no estereograma.

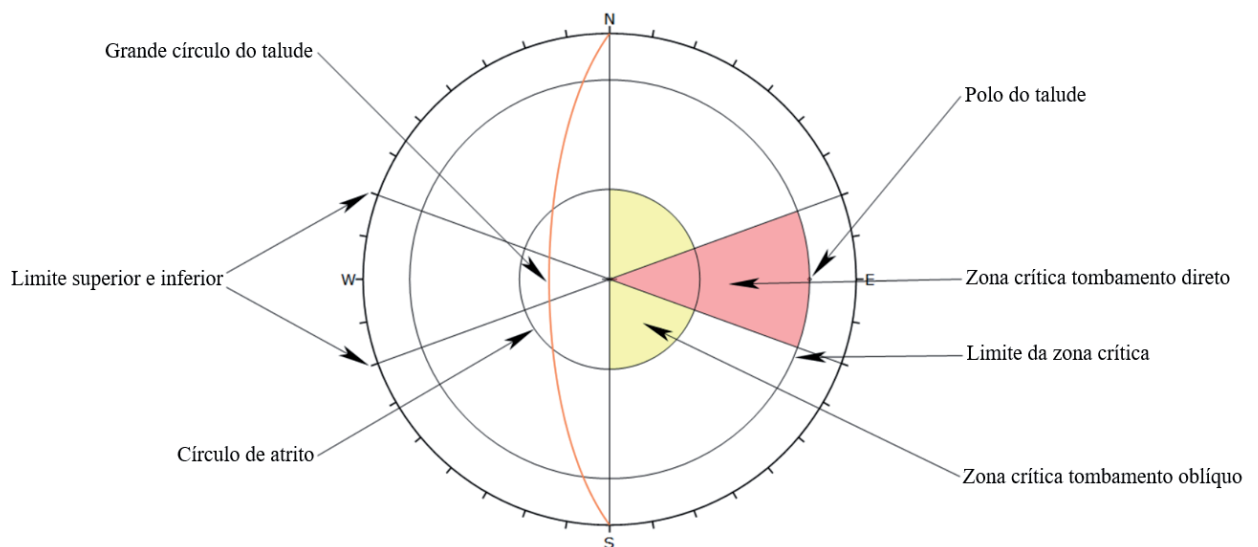


Figura 15. Ilustração da localização das variáveis empregadas para análise cinemática em relação ao modo de ruptura por tombamento direto/oblíquo no estereograma (Fonte: Elaborado pelo autor 2023).

Para o modo de tombamento por flexão, é necessário que a projeção das orientações das descontinuidades, seja no formato de polos e a orientação do talude no formato de grande círculo. Por fim, plota-se os limites inferior e superior da direção do talude e o limite da zona crítica, que é traçado na forma de grande círculo, possuindo a mesma direção do talude mais com um valor de inclinação obtido da soma da inclinação do talude

mais a do ângulo de atrito. A partir da plotagem é definida a zona crítica, essa zona é definida na área acima do grande círculo do limite da zona crítica e delimitada pelos limites inferior e superior da direção do talude e pelo limite da zona crítica (Goodman 1989). A Figura 16 apresenta a ilustração da localização das variáveis empregadas para análise cinemática em relação ao modo de ruptura por tombamento por flexão no estereograma.

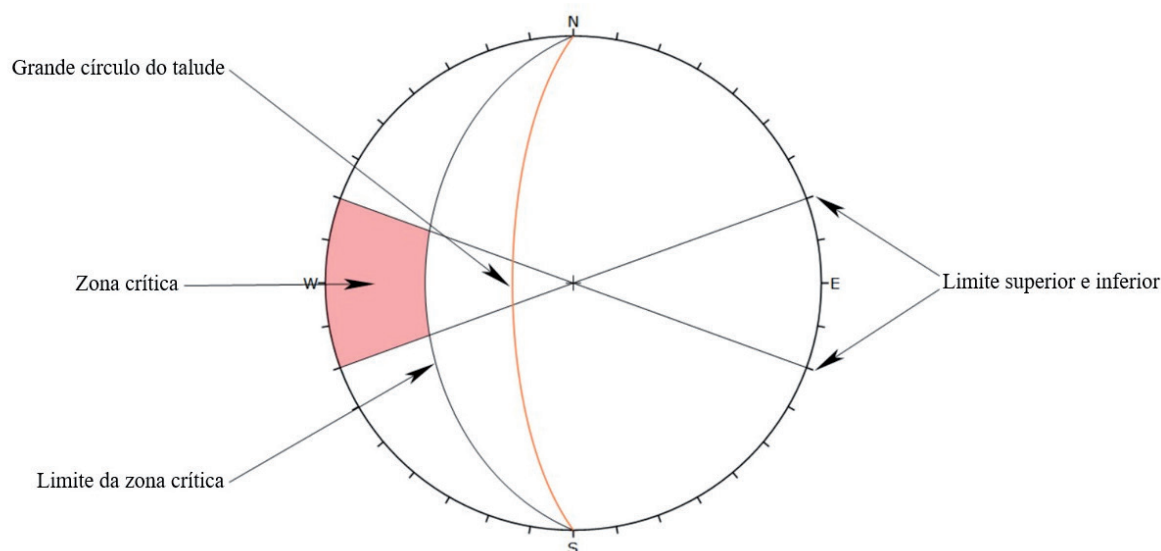


Figura 16. Ilustração da localização das variáveis empregadas para análise cinemática em relação ao modo de ruptura por tombamento por flexão no estereograma (Fonte: Elaborado pelo autor 2023).

As descontinuidades com prováveis condições para sofrer ruptura por tombamento direto/oblíquo, são as em que o polo da interseção estiverem presentes na zona crítica, já para o tombamento por flexão são as em que o polo de suas orientações estiverem presentes na zona crítica. Em ambos os casos, essa zona representa uma condição de tombamento cinematicamente viável e satisfaz todas as condições cinemáticas para o modo de ruptura por tombamento direto/oblíquo e por flexão, fora dessa zona, nenhuma condição é satisfeita e o tombamento é cinematicamente inviável (Wyllie 2017, Hudson & Harrison 1997).

4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade é um complemento para todos os métodos de análises de estabilidade

de taludes, pois a mesma avalia a influência que possíveis intervalos de variação, envolvendo os valores dos dados quantitativos, direciona nas condições de estabilidade. Qualquer forma de obtenção de dados não é isenta de erros, em alguns casos, uma pequena variação no valor verdadeiro, pode influenciar e muito nos resultados das análises, podendo levar a uma tomada de decisões incoerentes a partir de resultados obtidos (Wyllie 2017).

O foco dessa análise, como complemento para a análise cinemática, é estabelecer limites inferiores e superiores para os dados quantitativos obtidos e, avaliar a influência que essa variabilidade nos valores, poderá direcionar nos modos de rupturas avaliados. Analisar a influência da variabilidade de diversos fatores, pode torna-se bastante complexo e na prática, o recomendado é avaliar cada parâmetro separadamente. Em aná-

lises cinemáticas, os principais parâmetros onde é possível estabelecer um limite inferior e superior do dado quantitativo encontrado é o ângulo de atrito, inclinação e direção do talude. Ambos são dependentes um dos outros para o resultado da análise e devem ser avaliados separadamente (Wyllie 2017).

Todos os três parâmetros para análises cinemáticas possuem bastante influência nas condições de estabilidade, sendo que apenas o ângulo de atrito terá maiores incertezas em relação ao seu valor real, pois o mesmo é de difícil determinação. Já os demais, incluindo a orientação das descontinuidades, as incertezas em relação ao valor verdadeiro vão depender da calibração e precisão do equipamento e da forma de utilização do mes-

mo pelo operador. Os resultados das análises de sensibilidade para o método de análise cinemática são expressos na forma de gráficos para melhor interpretação, onde os eixos devem representar a relação entre a quantidade ou porcentagem de descontinuidades em estado crítico em relação ao intervalo entre o limite inferior e superior do valor quantitativo do parâmetro avaliado (Wyllie 2017). A Figura 17 ilustra um exemplo de gráfico gerado pelo software Dips para interpretação dos resultados das análises de sensibilidade, nesse gráfico o eixo y representa a porcentagem de descontinuidades em estado crítico para um dado modo de ruptura e o eixo x a variação do valor de mergulho da face livre do talude.

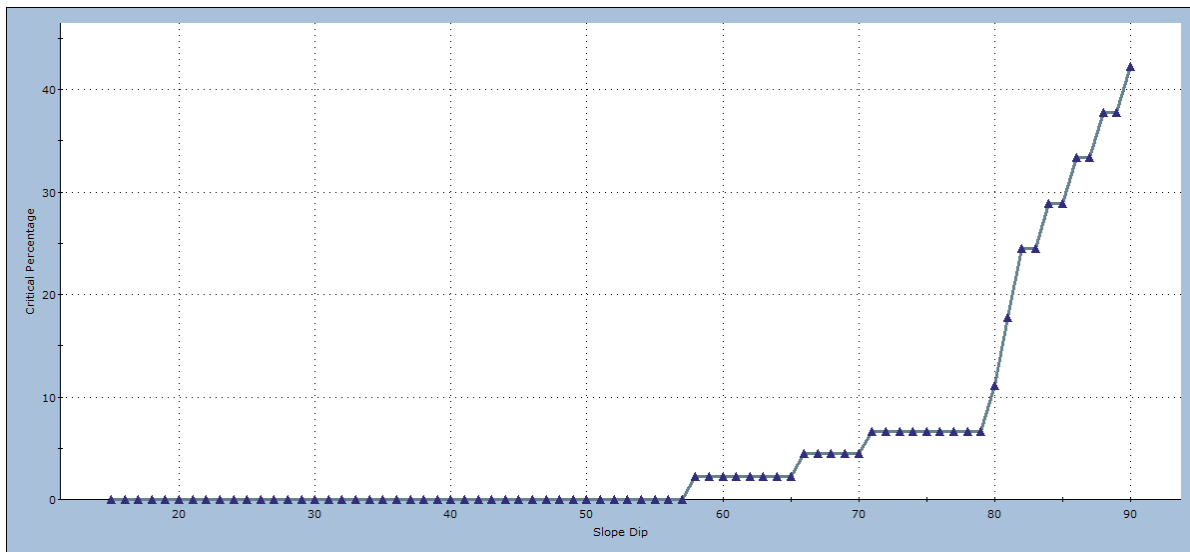


Figura 17. Exemplo de um gráfico gerado pelo software Dips para interpretação dos resultados das análises de sensibilidade (Fonte: Elaborado pelo autor 2023).

Com os resultados obtidos das análises de sensibilidades, é necessário realizar diversas combinações possíveis entre os valores dos parâmetros, para que seja possível denotar o estado provável mais crítico encontrado ou o estado menos crítico em termos de números de descontinuidades. Com essa análise também é possível encontrar os valores para os parâmetros quantitativos que direciona em menores condições de instabilidade, a partir de uma variabilidade mais ampla entre o intervalo do limite inferior e superior (Goodman 1989).

5. METODOLOGIA RECOMENDADA

Para a realização de análises de estabilidade de taludes a partir da projeção estereográfica e análise cinemática e de sensibilidade, recomenda-se que o talude ou conjunto de taludes sejam setorizados, ou seja, dividido em partes, com cada área das seções, seguindo uma representatividade da orientação do talude e extensão das descontinuidades presentes no maciço rochoso. A partir da setorização, deve ser obtido as medições de comprimento e altura de cada área das seções

com auxílio de uma trena de fibra de vidro. Posteriormente, a orientação do talude pode ser obtida com o emprego de uma bússola com clinômetro e algum acessório que ajuda a projetar o plano de orientação representativo de cada seção (Silva 2023).

Com a parametrização das seções do talude ou conjunto de taludes finalizada, recomenda-se que seja feita uma avaliação geológica-geotécnica de todas as seções do talude, visando aprimorar a compreensão geológica e geomecânica de cada tipo de descontinuidades presentes nas seções. Após esse estudo, já é possível iniciar a obtenção das orientações das descontinuidades presentes, sendo que essa orientação também é determinada com auxílio de uma bússola com clinômetro e algum acessório que ajuda a projetar o plano de orientação. O número de dados de orientação varia muito de seções para seções, não sendo sugerido que seja fixado um valor limite de dados, mas sim que os dados a serem obtidos, sempre busquem representar as descontinuidades presentes na seção avaliada (Silva 2023).

Após a finalização da obtenção dos dados de orientação, é recomendado a criação de um banco de dados no formato de planilhas com essas informações, para uma melhor integração com o software. Posteriormente, o banco de dados pode ser facilmente importado para o software de projeção estereográfica como é o caso do Dips, na qual o mesmo pode ser configurado em função da terminologia de orientação adotada, declividade magnética, tipo de hemisfério, tipo de projeção estereográfica e rede estereográfica (Silva 2023).

Após a importação dos dados e configuração do software, é possível extrair diversos dados da projeção estereográfica, tais como a projeção no formato de grande círculo ou polos, contorno e densidade de polos, diagrama de rosetas e interseções entre os grandes círculos. Já para as análises cinemáticas é inserido os dados de orientação do talude e do ângulo de atrito, este último por ser de difícil obtenção, recomenda-se que seja tomado um valor médio extraído de bibliografias em função do tipo de rocha. Após a inserção desses dados, o software gera automaticamente o resultado das análises para os modos de ruptura planar, em cunha, por tombamento direto/oblíquo e flexão (Silva 2023).

Por fim, em função dos resultados obtidos das análises cinemáticas, é possível direcionar para as análises de sensibilidade, avaliado a variabilidade entre o limite inferior e superior do valor quantitativo do ângulo de atrito, inclinação e direção do talude. Sendo que este último, a variabilidade do valor já é considerada nas análises cinemáticas, por conta do limite inferior e superior da direção de mergulho da face livre talude. Para a variabilidade no valor do ângulo de atrito, recomenda-se que seja considerado um limite inferior e superior acima de 10 em função do ângulo obtido ou extraído de bibliografias para o mesmo tipo de rocha, para o limite inferior e superior da direção de mergulho da face livre talude um valor superior a 20 é admissível na própria análise cinemática e superior a 10 na análise de sensibilidade, já para a inclinação do talude é recomendado estabelecer um intervalo de variabilidade entre 15° a 90°, visando extrair a influência que a inclinação da face livre do talude direciona nos modos de ruptura avaliados. Em função dos resultados obtidos, realiza-se diversas combinações de dados, visando obter a melhor interpretação possível para a análise de estabilidade (Silva 2023).

6. CONCLUSÃO

Em função das referências publicados por Hoek & Bray (1977), Goodman (1989), Hudson & Harrison (1997) e Wyllie (2017), que apresentaram e fizeram melhorias ao longo do tempo nos métodos de análise de estabilidade de taludes em função da orientação das descontinuidades, foi possível alcançar o objetivo principal do presente trabalho, estabelecendo descrições dos métodos de forma mais ampla e completa, criação de ilustrações, modificação e extração de outras fontes, assim como o direcionamento no formato de passo a passo dos métodos de projeção estereográfica e análises cinemáticas e de sensibilidade, para todos os tipos prováveis de ruptura em taludes rochosos.

A partir dos métodos expostos, também foi possível estabelecer condições para utilização correta dessas metodologias, pois as mesmas também possuem limitações de aplicação, assim como qualquer outro método de análise de estabilidade

de taludes. Além disso, esse tipo de análise deve ser sempre empregada com cautela, pois o mesmo faz referência mínima a parâmetros de resistência da rocha, levando em consideração apenas o ângulo de atrito, sendo assim uma metodologia simplificada para a verificação dos modos prováveis de ruptura, não se tratando de um método determinístico e probabilístico, onde ambos empregam uma gama maior de parâmetros para a obtenção de um resultado quantitativo do fator de segurança ou probabilidade de ruptura de um dado tipo de ruptura avaliado. Haja visto que para um resultado bem mais preciso é necessário o emprego de diversos outros parâmetros de resistência da rocha descontínua, para avaliar de forma precisa a resistência ao cisalhamento da superfície potencial de ruptura.

Mesmo possuindo limitações, as análises cinemáticas combinado com análises de sensibilidade, torna-se possível determinar dados modos de ruptura prováveis e considerar as possíveis variabilidades nos valores quantitativos dos dados, podendo assim, direcionar para melhores resultados. Uma vez que, devido ao elevado caráter direcional das descontinuidades e sua alta influência nas condições de estabilidade em função da inclinação da face livre do talude, é possível encontrar uma inclinação ideal da face livre do talude, que reduz ou até mesmo elimine a possibilidade de ruptura, de acordo com o momento cinematicamente viável das descontinuidades críticas, para dados possíveis modos de ruptura no talude rochoso.

A metodologia recomendada para emprego prático desses métodos expostos, foi desenvolvida e aprimorada a partir da experiência adquirida em um trabalho de conclusão de curso na área de estabilidade de taludes de Silva (2023). Essa metodologia recomendada é dividida em etapas, com cada uma complementando a anterior, além de

direcionar para possíveis equipamentos que podem ser empregados para a obtenção dos dados. Por fim, espera-se que o trabalho possa vir a contribuir como um guia de boas práticas para análises de estabilidade de taludes em rocha.

REFERÊNCIAS

Gerscovich, D. Estabilidade de taludes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. p. 11-34.

Goodman, R. E. Introduction to rock mechanics. 2th. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1989. p. 293-339.

Hudson, J. A. Harrison, J. P. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. 1th. ed. Kidlington: Elsevier Science Ltd, 1997. v. 1, p. 287-323.

Hoek, E. Bray, J. Rock slope engineering. 2th. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1977. p. 402.

Rocscience. Dips user guide, 2023. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/dips/tutorials/tutorials-overview>. Acesso em 03 de abr. de 2023.

Silva, D. J. Mapeamento estrutural e análise de estabilidade de taludes de um corte de estrada no município de Boa Viagem - CE. 2023. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal do Ceará. Cratéus, 2023.

Wyllie, D. C. Rock slope engineering: civil applications. 5th. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2018. p. 27-58.