

5

Análise de estabilidade dos taludes de escavação

As análises de estabilidade dos taludes de corte da casa de força e retaludamento a montante buscaram contemplar o estudo das quatro formas básicas de ruptura de taludes rochosos sugeridas por Hoek & Bray (1981) e apresentadas na Figura 5.1.

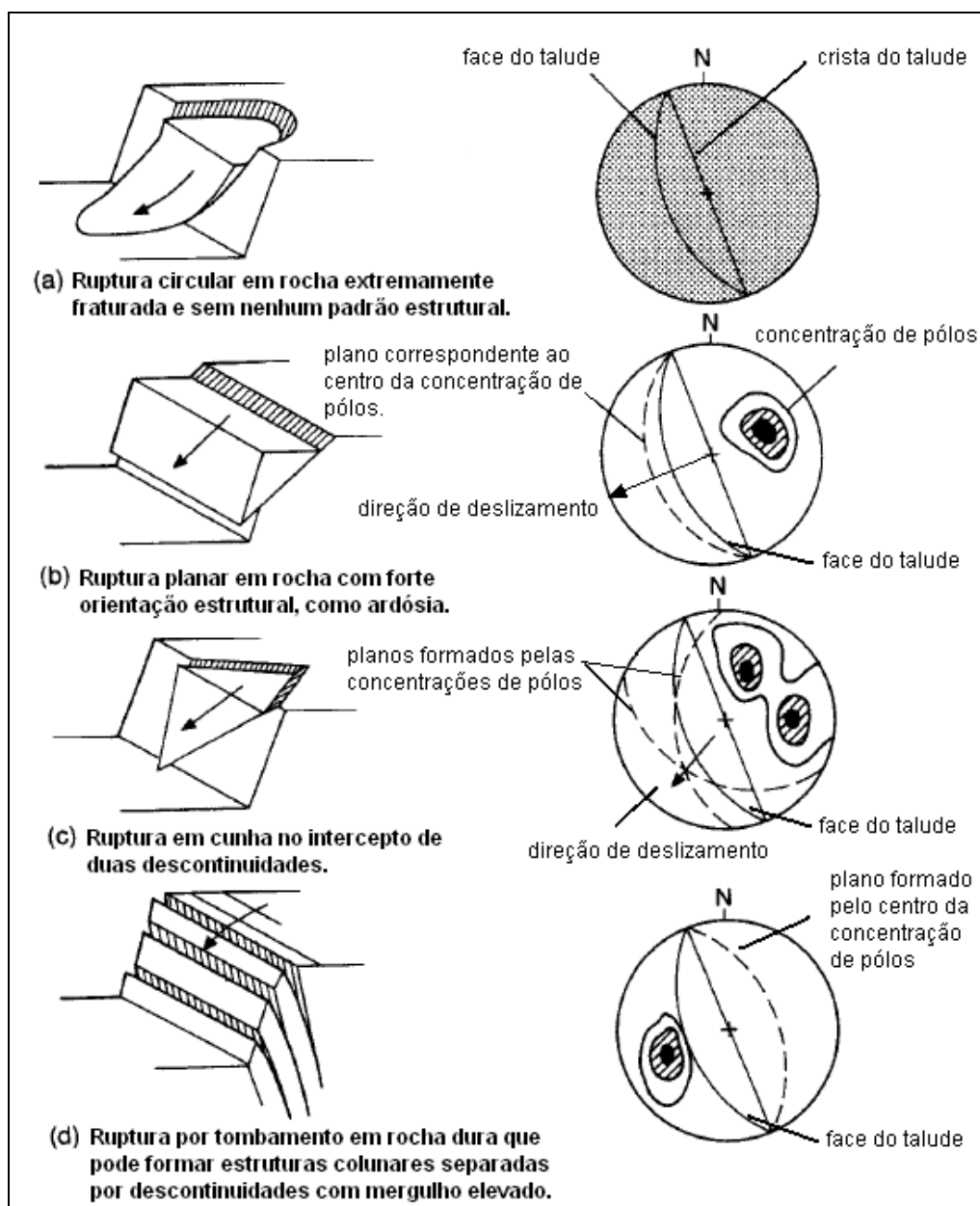


Figura 5.1 – Tipos de instabilidade de taludes rochosos (Adaptada de Hoek & Bray, 1981).

Essas análises foram divididas em duas etapas: a análise estrutural, onde por meio de projeções estereográficas verificou-se a possibilidade de rupturas controladas por feições estruturais do maciço e a análise estática de equilíbrio limite, que englobou os conjuntos de talude x feição estrutural sugeridos pela análise estrutural e a seção crítica sugerida pela modelagem do maciço.

Nesse caso, a análise da seção crítica extraída da modelagem foi englobada pela instabilidade indicada na Figura 5.1a, ruptura circular, já que ao ser classificado no sistema RMR-1989, o maciço foi considerado um meio contínuo equivalente onde foi estimada a distribuição de coesão e ângulo de atrito em função do valor de RMR. Para essa análise foram usados os métodos dos elementos finitos.

Para realizar essas análises de estabilidade foi preciso primeiro efetuar a escolha dos taludes médios a serem estudados. A Figura 5.2 apresenta a planta de onde foram extraídas as direções dos planos de corte dos taludes adotados.

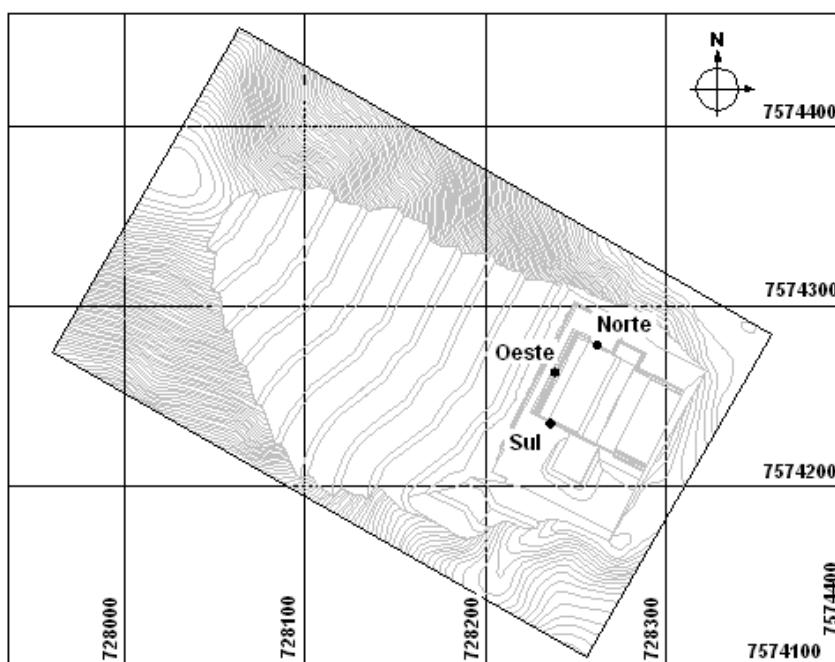


Figura 5.2 – Planta de localização dos taludes de corte.

O talude a jusante da casa de força não foi estudado, pois conforme citado anteriormente, sua apresentação é apenas ilustrativa, já que ali será realizada a escavação do canal de fuga. As escavações desse canal e dos condutos forçados, conforme apresentado anteriormente, não foram contempladas por não se tratarem do objeto de estudo.

Para determinar agora o ângulo de mergulho desses taludes, a partir da planta da Figura 5.2 foram geradas as projeções em corte indicadas na Figura 5.3.

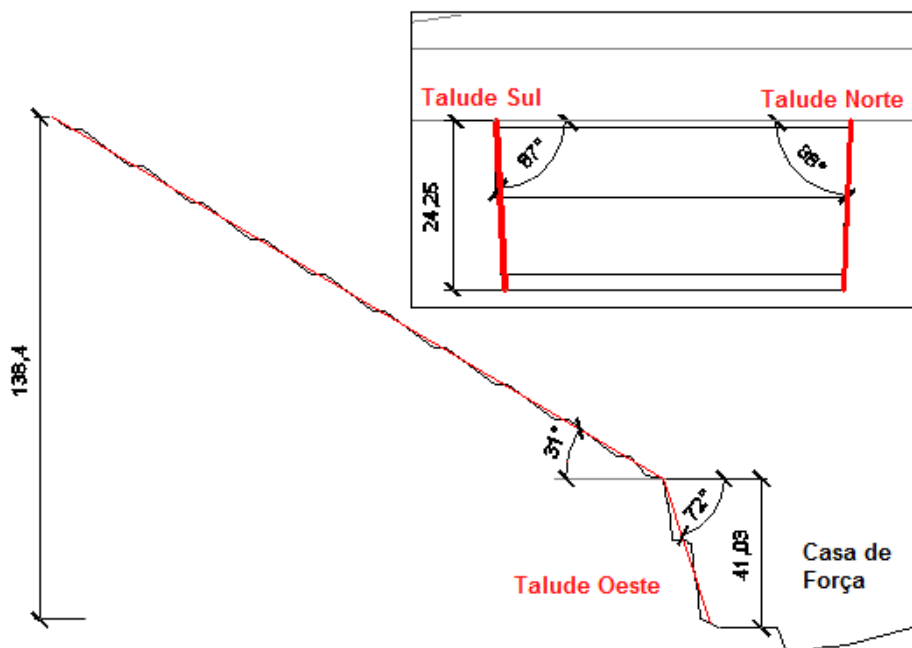


Figura 5.3 – Cortes dos taludes de escavação (cotas em metros).

Da planta e do corte foram compilados então a direção e o mergulho dos taludes de escavação na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Planos médios dos taludes de corte da casa de força.

Talude	Mergulho	Dir. Mergulho	Direção
Oeste	70°	117°	027°
Norte	88°	207°	117°
Sul	87°	027°	297°

Definidas as atitudes e direções dos taludes de corte deu-se início então às análises estruturais de estabilidade.

5.1. Análise estrutural

Essa fase do estudo teve por objetivo determinar as possíveis rupturas governadas por feições estruturais, iniciando-se pelo lançamento dos taludes de corte junto às projeções das feições estruturais, apresentadas na Tabela 3.4 e finalizando com a análise das prováveis feições instabilizadoras, sejam elas de ruptura planar, tombamento ou ruptura em cunha. Para tais análises foi utilizado o programa DIPS[®], da Rocscience.

Para visualizar conjuntamente as projeções das famílias de fraturas componentes do sistema de fraturamento do maciço e dos taludes de corte foi elaborada a Figura 5.4, onde os taludes são apresentados em vermelho e as famílias de fraturas em azul.

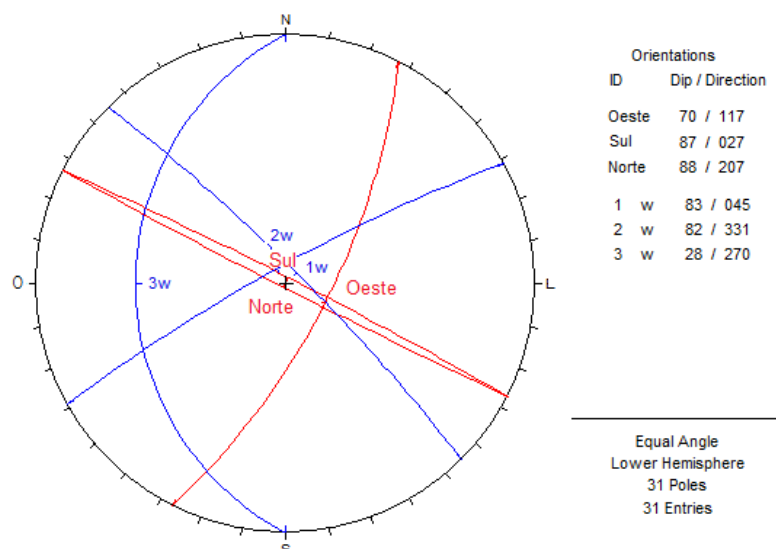


Figura 5.4 – Projeção de taludes de corte da casa de força e famílias de fraturas.

De posse das projeções das famílias de fraturas e dos taludes de escavação já é possível tecer as análises estruturais de estabilidade dos taludes da casa de força.

5.1.1. Análise de ruptura planar

As análises de ruptura planar foram realizadas para cada talude de acordo com os seguintes critérios sugeridos por Hoek & Bray (1981):

- O plano de descontinuidade responsável pelo deslizamento deve ter direção paralela ou aproximadamente paralela à face do talude, com variação máxima de 20°;
- O plano de fratura deve aflorar na face do talude, o que significa que seu mergulho deve ser menor que o da referida face ($\psi_f > \psi_p$), conforme Figura 5.5;
- O mergulho do plano de fratura deve ser maior que o seu ângulo de atrito ($\psi_p > \theta$), conforme Figura 5.5;
- Superfícies de liberdade que propiciem resistência desprezível devem estar presentes no maciço para definir superfícies laterais de escorregamento.

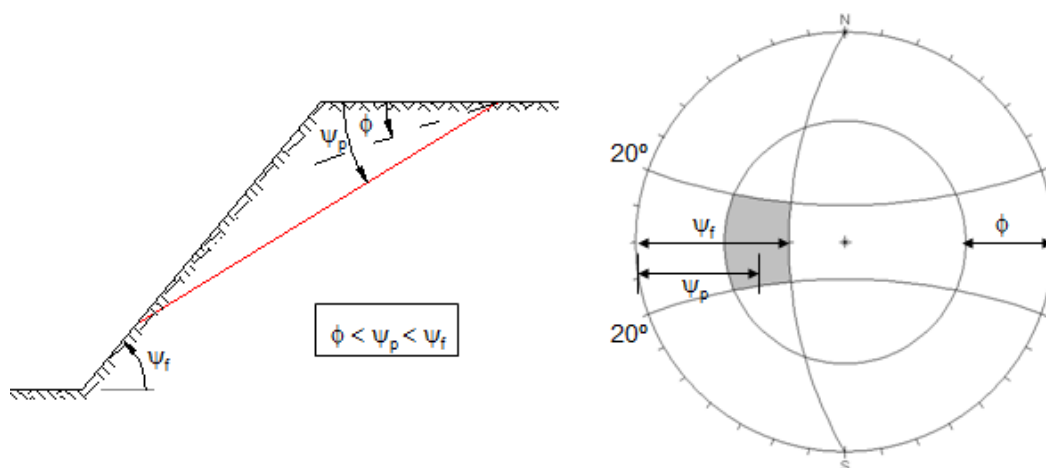


Figura 5.5 – Critérios de ruptura planar (Adaptado de Goodman, 1989 e Hoek & Bray, 1981).

De acordo com essas condições de contorno, para dar início às análises, estimou-se o ângulo de atrito das paredes das fraturas com base em três critérios. O primeiro deles tem base em Armelin & Oliveira (2007), no ensaio de plano inclinado (*tilt test*), cujo resultado é apresentado na Tabela 5.2, onde percebe-se que a amostra com mínimo ângulo de atrito resultou em 33°. Porém, conforme Hoek & Bray (1981), a falta de confinamento com que é realizado esse teste resulta na grande influência de rugosidades de pequena escala, que elevam o ângulo de atrito obtido.

Tabela 5.2 – Ângulo de atrito médio obtido de ensaio de plano inclinado (adaptado de Armelin & Oliveira, 2007).

Registro	ϕ médio (°)
40073.2007	39
40075.2007	33
40076.2007	34
40078.2007	33
40079.2007	33
40080.2007	33

O segundo aspecto é apresentado em tabela citada em Hoek & Bray (1981), que sugere que o ângulo de atrito básico para gnaisses xistosos varia entre 26° e 29°. O terceiro vem de Valeriano (2006), onde consta que a família de fraturas de número 01 apresenta fraturas planares e lisas, o que reduz o ângulo de atrito de cálculo para todo o conjunto, que passa a ser analisado em função do limite mínimo.

Adotou-se então o ângulo de atrito de 30° para o conjunto como um todo e iniciou-se a análise pelo talude montante da casa de força, denominado talude Oeste, como pode ser visualizado na Figura 5.6.

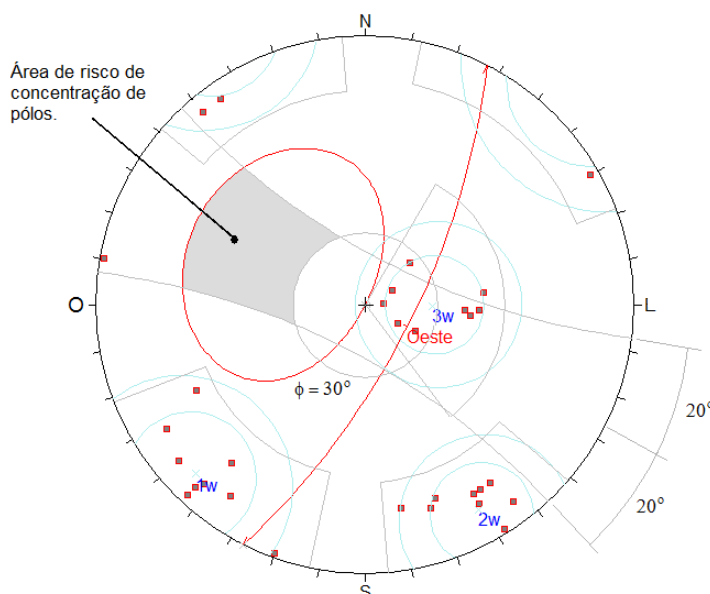


Figura 5.6 – Análise de ruptura planar no talude Oeste da casa de força.

Essa análise, como pode ser observada na Figura 5.6, foi realizada em função da concentração dos pólos de fraturas, onde a elipse em vermelho cerca os pólos das fraturas que afloram na face do talude, o círculo cinza circunda qualquer pólo de fratura com mergulho inferior ao ângulo de atrito (30°) e, o contorno de 20° , representa o paralelismo com a face do talude.

Concluindo, a área sombreada representa o posicionamento de pólos de fraturas em potencial instabilidade. Ela reúne todas as características necessárias à classificação de fraturas como cinematicamente instáveis em relação ao talude analisado.

Se algum pólo, ou envelope de probabilidade de ocorrência de pólos de uma determinada família (representados pelos círculos em verde claro) estiver posicionado nessa área, pode-se dizer que há possibilidade de instabilidade estrutural para esse talude.

Verifica-se então, da Figura 5.6, que o sistema de fraturamento do maciço não representa problema de instabilidade de ruptura planar para o talude Oeste.

Dando sequência, procedeu-se a análise do talude Sul, apresentada na Figura 5.7, onde é verificado um elevado risco de ruptura planar para o talude, uma vez que não só a envoltória de pólos, como também o pólo do plano médio da família 01 estão localizados na área de risco.

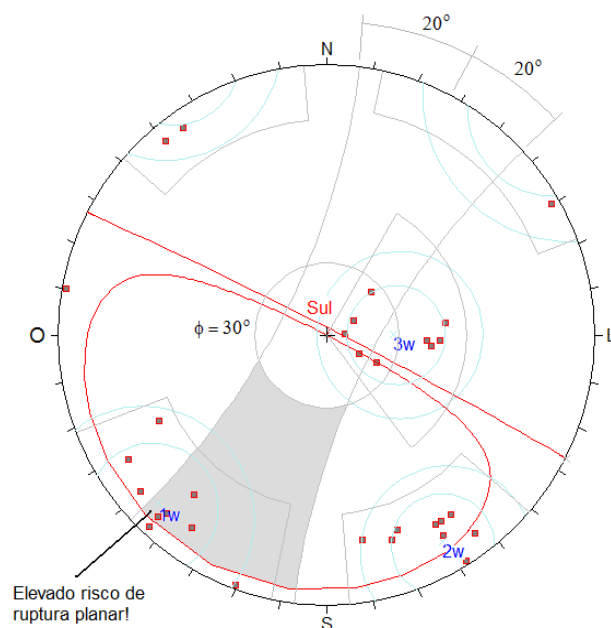


Figura 5.7 – Análise de ruptura planar para talude o Sul da casa de força.

Iniciou-se então a análise do talude Norte, conforme Figura 5.8, onde nota-se uma pequena probabilidade de ruptura viabilizada pelas famílias 01 e 03. Isto se dá porque, mesmo que nenhum pólo de feição efetivamente mapeada em campo se encontre na região sombreada da Figura 5.8, parte dos cones de probabilidade de posicionamento de pólos das famílias 01 e 03 encontram-se nessa região.

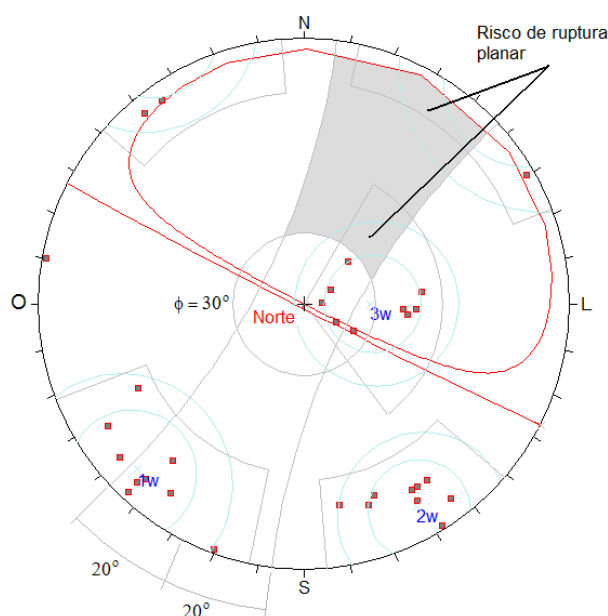


Figura 5.8 – Análise de ruptura planar para o talude Norte da casa de força.

É importante lembrar, contudo, que para que essas análises estruturais apenas indiquem uma probabilidade de ruptura, uma vez que não considera o efeito da água nas fraturas, a redução dos parâmetros de resistência e a

presença de material de preenchimento. Além disso, para indicar probabilidade de ruptura, outras feições estruturais devem agir em conjunto, como a existência de planos de liberdade laterais com resistência desprezível e a persistência das fraturas, que caso sejam pouco persistentes, podem elevar consideravelmente a resistência do plano de ruptura em função da coesão dos trechos de rocha intacta, podendo mesmo assegurar a estabilidade do talude.

Verificada a possibilidade de ocorrência de rupturas, são então efetuadas as análises estáticas, que consideram os parâmetros não observados pelas análises estruturais.

5.1.2. Análise de tombamento

Quando estão presentes no maciço feições estruturais verticais ou sub-verticais e de mergulho contrário à face do talude, pode haver rotação e conseqüente queda de blocos ou colunas segundo um ponto fixo. Conforme apresentado para a ruptura planar, também é necessário um determinado paralelismo entre essas feições. Porém, para o tombamento, Goodman (1989) sugere uma margem de tolerância de 30° .

A Figura 5.9 apresenta as condições necessárias para que ocorra tombamento.

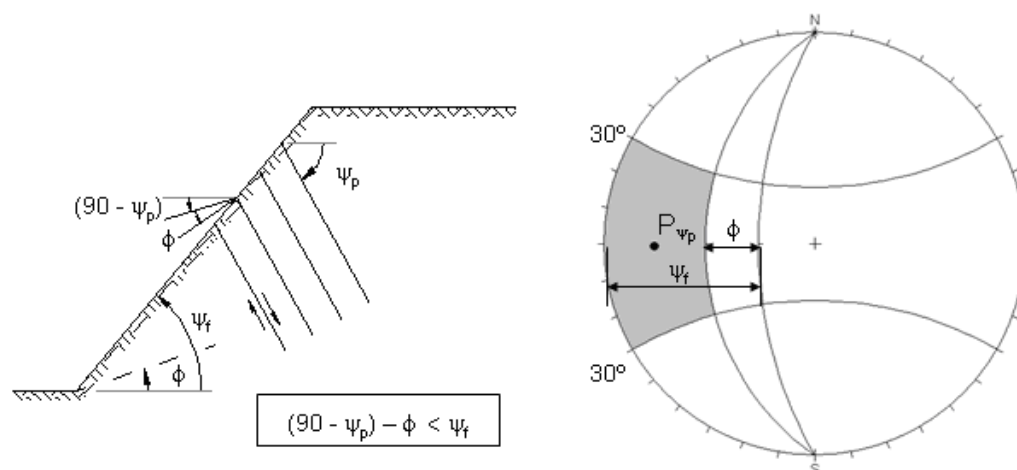


Figura 5.9 – Condições de tombamento ilustradas em corte e estereograma (modificada de Goodman, 1989).

Observa-se que na análise de tombamento o mergulho da feição estrutural instabilizadora é contrário ao da face do talude, diferentemente da análise de ruptura planar, onde a feição mergulha no mesmo sentido que o talude. Dessa forma, verifica-se o porquê do atrito aparecer como um cone central na análise

de ruptura planar e como um valor subtraído do mergulho da face do talude na análise de tombamento.

No primeiro caso o cone delimita os pólos de fraturas que possuem mergulho inferior ao valor do atrito nas paredes das fraturas, enquanto no segundo, subtraindo-se o atrito do ângulo de mergulho do talude encontra-se o posicionamento crítico do pólo da feição estrutural. Demais critérios de análise de tombamento podem ser observados em Goodman & Bray (1976), Hoek & Bray (1981) e Goodman (1989).

Iniciando-se então as análises, observa-se na Figura 5.10 que há risco potencial de tombamento do talude Oeste condicionado pela família 2 e pequeno pela família 3. O risco que a família 2 oferece é elevado porque grande parte da sua envoltória de probabilidade e os pólos de fraturas mapeados estão inseridos na área de risco. Na família 3, apenas pequena parte da envoltória de probabilidade encontra-se inserida nessa área, logo o risco de ruptura é remoto.

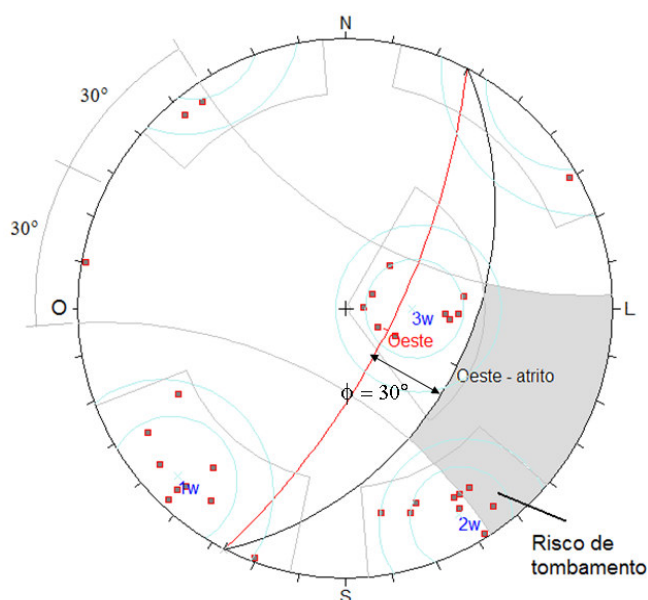


Figura 5.10 – Análise de tombamento para talude Oeste da casa de força.

Analisando agora a projeção estereográfica do talude Sul, na Figura 5.11, nota-se um risco moderado de tombamento oferecido pelas famílias 1 e 3.

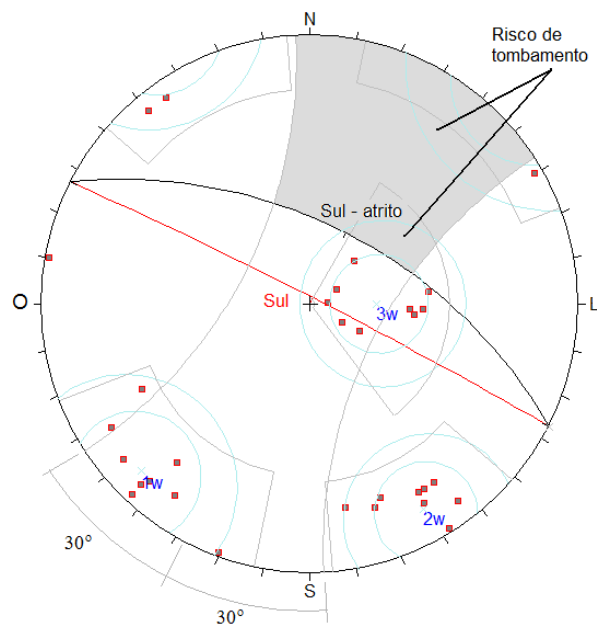


Figura 5.11 – Análise de tombamento para o talude Sul da casa de força.

Nota-se que o risco é moderado porque nenhuma feição mapeada em campo é observada dentro da área sombreada, porém, parte das envoltórias de prováveis feições das duas famílias está ali inserida.

A Figura 5.12 apresenta a análise para o talude Norte, onde se verifica risco elevado de ruptura proporcionado pela família 1, já que boa parte das feições mapeadas em campo, bem como o pólo médio de fraturas dessa família, se encontra na área de risco.

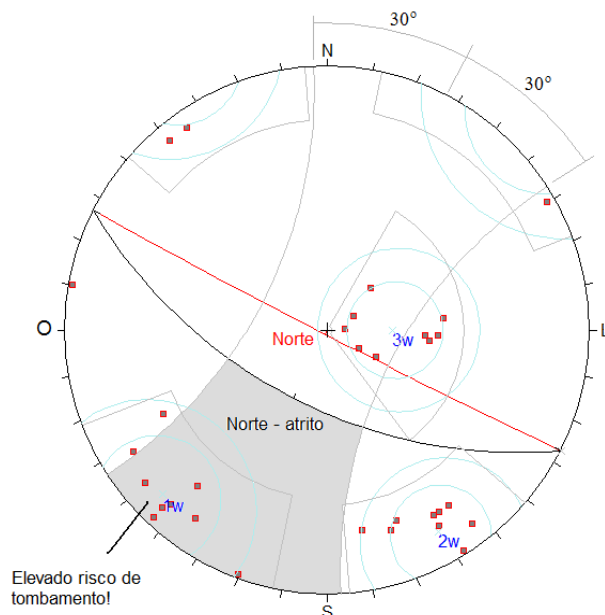


Figura 5.12 – Análise de tombamento para talude Norte da casa de força.

5.1.3. Análise de ruptura em cunha

A análise de ruptura em cunha, ao contrário da ruptura planar e do tombamento, não é realizada em função da envoltória de pólos, mas da interseção entre os planos das famílias componentes do sistema de fraturamento do maciço rochoso.

Uma vez determinadas as interseções, tem-se a orientação do vetor de mergulho da cunha e, conseqüentemente, a direção de deslizamento ditada pela coexistência dessas duas famílias. Percebe-se que, como a direção de deslizamento é comandada pelo confinamento lateral que as próprias famílias de fraturas impõem, não há uma tolerância de paralelismo com a face do talude. Basta então que o vetor de interseção aflore na face do talude tenha mergulho superior ao valor do ângulo de atrito.

Essas condições de ruptura em corte e em projeção estereográfica são ilustradas na Figura 5.13.

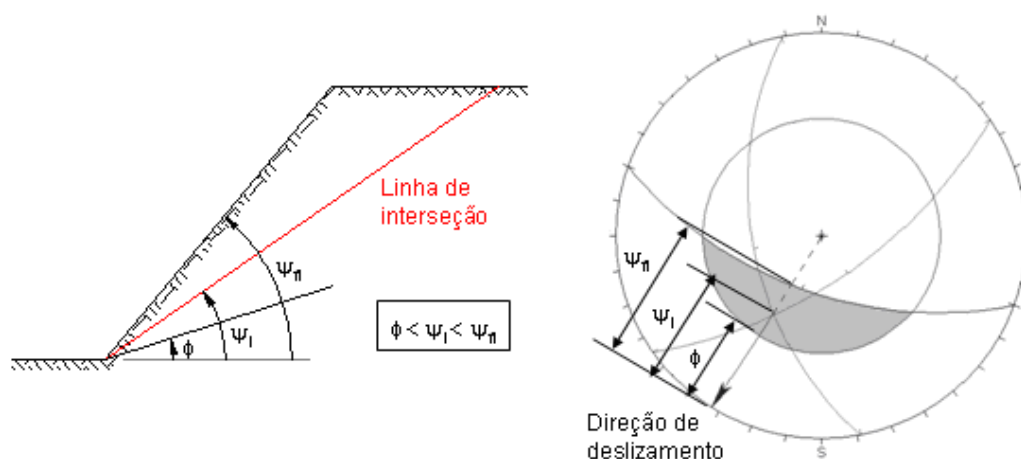


Figura 5.13 – Condições de ruptura em cunha ilustradas em corte e estereograma.

Caso sejam atendidas essas todas as condições de ruptura, a interseção deve estar inserida na área sombreada.

Analisando-se então as famílias de fratura do maciço, verifica-se que não há risco de ruptura em cunha para o talude Oeste, apresentado na Figura 5.14.

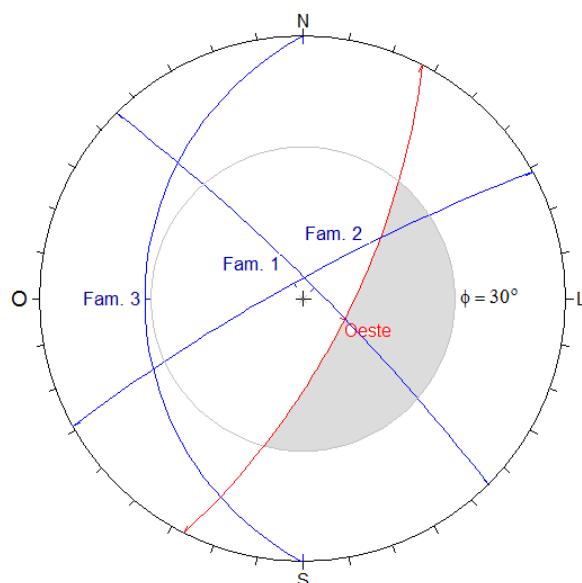


Figura 5.14 – Análise de ruptura em cunha para o talude Oeste da casa de força.

Quanto ao talude Sul, Figura 5.15, há risco elevado de ruptura em cunha para o mesmo. A interseção entre as famílias 1 e 2, ambas subverticais, forma uma cunha com mergulho do vetor de interseção também subvertical, caracterizando potencial elevado de ruptura caso as feições acima citadas realmente apareçam em conjunto na face do talude.

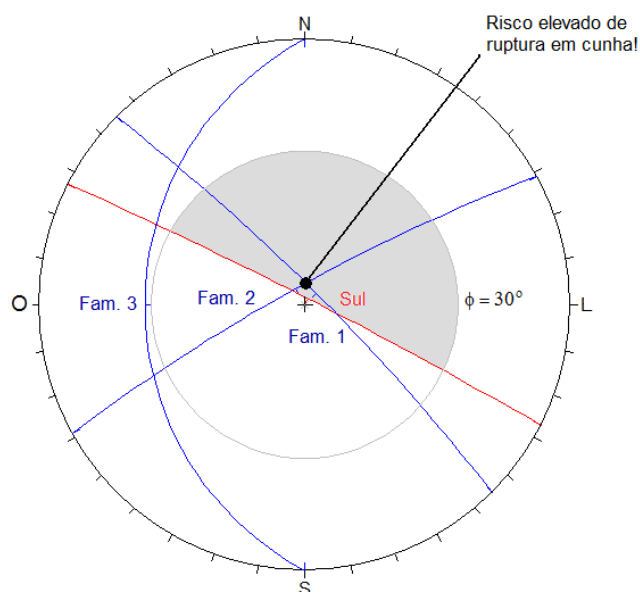


Figura 5.15 – Análise de ruptura em cunha para o talude Sul da casa de força.

Concluindo as análises de ruptura em cunha, estudou-se o talude Norte, que tem por estereograma a Figura 5.16, onde nota-se que não há risco de ruptura em cunha para o talude Norte.

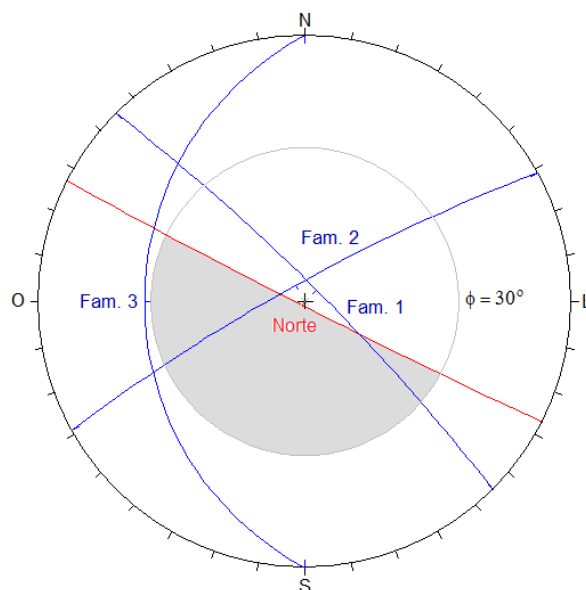


Figura 5.16 – Análise de ruptura em cunha para o talude Norte da casa de força.

5.1.4. Síntese dos resultados da análise estrutural

Para concluir as análises estruturais de ruptura foi elaborada a Tabela 5.3, onde são sintetizadas todas as feições possivelmente instabilizadoras em paralelo com os taludes por elas instabilizados. Nessa tabela são também atribuídos os graus de risco observados nas análises das projeções estereográficas.

Tabela 5.3 – Síntese das possíveis formas de ruptura e potenciais associados (onde *** = risco elevado; ** = risco moderado e; * = baixo risco)

Modo de ruptura	Talude	Família(s) instabilizadora(s)
Planar	Sul	(1) ***
	Norte	(1 e 3) *
Tombamento	Oeste	(2) ** e (3) *
	Sul	(1 e 3) *
	Norte	(1) ***
Cunha	Sul	(1 e 2) ***

O critério adotado para a definição desses graus consiste em atribuir risco elevado aos casos onde tanto os pólos pertencentes a leituras de campo quanto aquele calculado como sendo o plano médio da família de fraturas encontram-se na região de risco referente a um determinado talude no estereograma. O risco moderado foi adotado para os casos onde alguns pólos encontram-se na área de risco, mas o pólo do plano médio não se apresenta nessa região. O baixo risco corresponde aos casos onde a presença de pólos na área de risco é quase inexistente.

As situações mais críticas apresentadas pela análise estrutural foram simuladas e apresentadas pela

Figura 5.17, onde se supõem fraturas bastante persistentes posicionadas no contexto das escavações de maciço. Os planos em amarelo representam um suposto posicionamento de planos com a atitude da família 1 e em azul, da família 2.

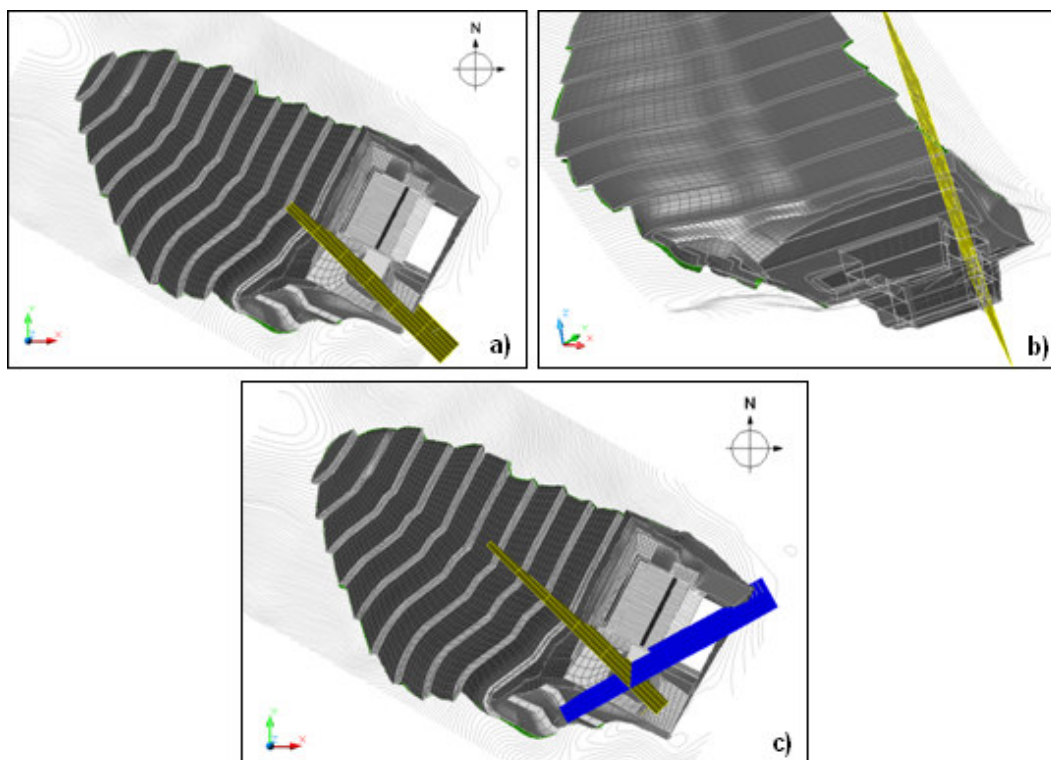


Figura 5.17 – Síntese de situações críticas possíveis – a) Ruptura planar do talude Sul em função da família 1; b) Ruptura por tombamento do talude Norte em função da família 1; c) Ruptura em cunha do talude Sul em função da interseção entre as famílias 1 e 2.

Vale ressaltar que os planos traçados compreendem a orientação dos planos médios das famílias de fratura, porém, são lançados em escala expandida em relação ao desenho e locados de forma estimada, podendo ou não estar presentes no local sugerido.

Observa-se que o talude Oeste é o único que se apresenta cinematicamente estável, contudo, a modelagem geológico-geomecânica do maciço no PETRELTM evidencia que a massa rochosa a montante desse talude é bastante preocupante se considerado o faturamento e o baixo valor do RMR nessa região. Nesse caso, esse talude também será objeto de estudo das análises estáticas de estabilidade.

5.2. Análise estática

Uma vez sugeridas as instabilidades potenciais do objeto de estudo, iniciaram-se as análises determinísticas, onde são avaliados os fatores de segurança associados aos taludes de escavação. As situações adotadas para estas análises são aquelas apresentadas como críticas pela análise estrutural, além da análise do talude de montante como um todo.

Para tais análises foram utilizados os seguintes programas da *Rocscience*: ROCPLANE® para ruptura planar; SWEDGE® para ruptura em cunha e; SLIDE® para ruptura complexa.

5.2.1. Ruptura planar

Supondo a fratura persistente o bastante para cortar todo o talude de escavação, o que seria o caso crítico, foram adotados os seguintes dados para a análise de ruptura planar do talude Sul em função da família 1:

- $\gamma = 27 \text{ KN/m}^3$ (peso específico médio obtido dos ensaios);
- $H=24,25\text{m}$ (altura do talude conforme Figura 5.3);
- $\psi_f = 87^\circ$ (mergulho da face do talude Sul);
- $\psi_p = 83^\circ$ (mergulho da família de fraturas 1);
- $\phi = 30^\circ$ (ângulo de atrito);
- $c = 0\text{t/m}^2$ (coesão nula, supondo que a fratura seja persistente ao longo de toda a elevação do talude e que não exista qualquer preenchimento na mesma);
- $\alpha = 0,05g$ (valor sugerido de sismicidade induzida para cálculos de estabilidade de taludes de barragens);
- Sem trinca de tração.

Estabelecidos os dados de entrada procedeu-se no ROCPLANE® a análise de estabilidade para o talude seco segundo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

O resumo dos resultados encontrados para tal análise e o corte esquemático do talude e das forças atuantes são apresentados na

Figura 5.18.

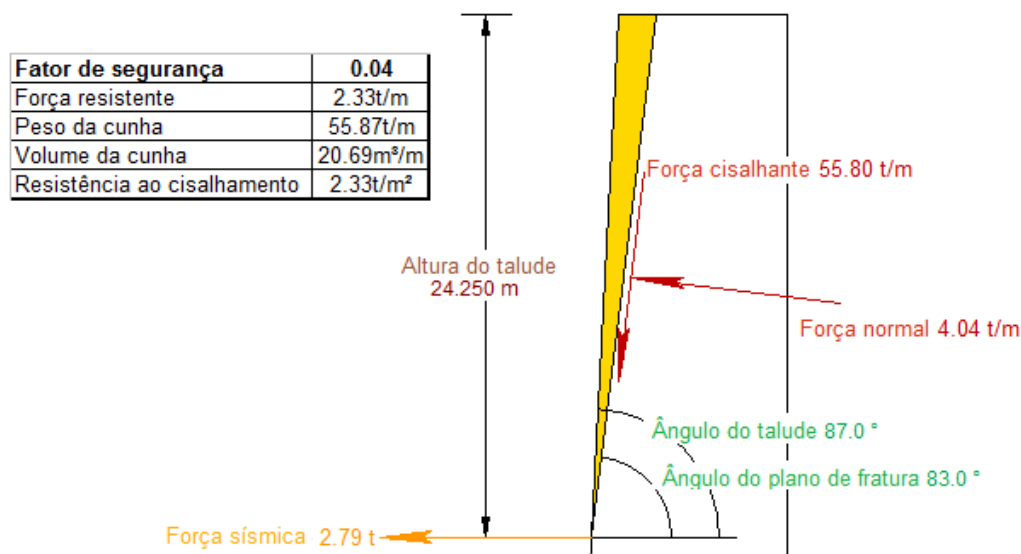


Figura 5.18 – Análise de ruptura planar do talude Sul com a família 1.

Verifica-se que, mesmo que o talude fosse suficientemente drenado para que estivesse totalmente seco, o fator de segurança se apresentaria próximo do valor nulo. Tal comportamento era esperado, pois a família de fraturas é muito inclinada. Essa inclinação elevada faz com que a componente do peso normal ao plano de fraturas seja proporcionalmente muito pequena, logo, a força de atrito torna-se pouco eficaz em manter a estabilidade do talude.

Conclui-se então que, se houver alguma fratura que persista como o sugerido e que esteja assim posicionada em relação ao talude, a probabilidade de uma ruptura planar é bastante elevada.

Supondo agora que esta fratura não persista ao longo de todo o talude, estima-se que as possíveis pontes de rocha ofereçam resistência por coesão. Segundo Hoek & Bray (1981), a coesão de gnaisses intactos varia de 20 a 40 MPa. Adotando conservativamente o valor mínimo e supondo uma redução de 50% em função da alteração, a coesão média da rocha seria de 10MPa, aproximadamente 1.000t/m².

Para simular então uma fratura com paredes alteradas e com algumas pontes de rocha, como no cálculo do fator de segurança a coesão é aplicada ao longo de toda a área da fratura, optou-se por reduzir o valor da coesão ao invés da área de aplicação, adotando-se um procedimento bastante simplificado. Supondo que 1% dessa área seja composta de pontes de rocha, estimou-se então a coesão em 10t/m². O gráfico da Figura 5.19 apresenta uma análise de sensibilidade do fator de segurança com o aumento da coesão.

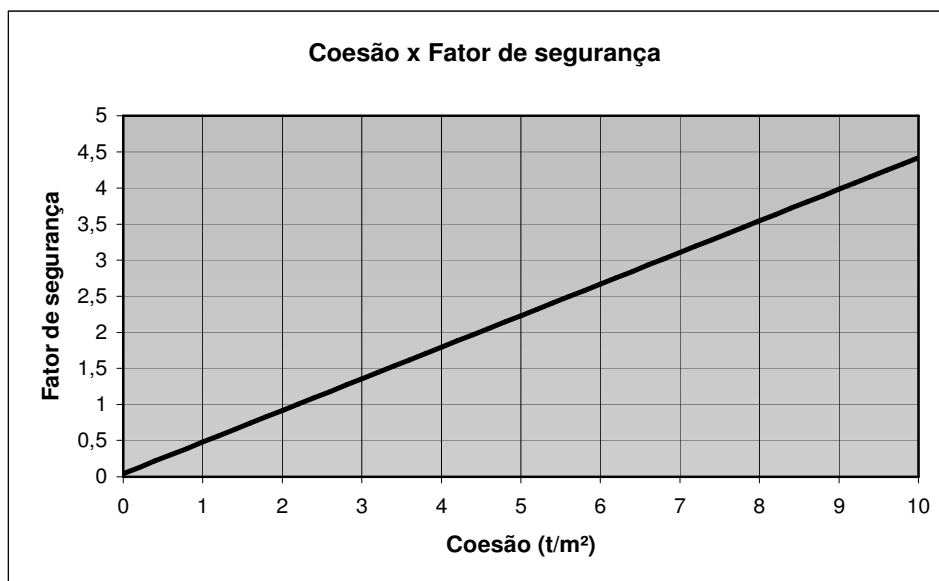


Figura 5.19 – Análise de sensibilidade do talude Sul em relação à presença de coesão.

Nota-se que o talude é bastante sensível coesão, que elevam consideravelmente sua estabilidade e o tornam estável para as condições acima citadas.

Contudo, as análises realizadas consideram o talude como seco, porém, dos furos de sondagem SR-17 e SR-3001, localizados nas proximidades do talude Sul (ver Figura 3.14), verifica-se que o nível d'água encontra-se a aproximadamente 15 metros de profundidade, ou seja, aproximadamente 40% da altura do talude está abaixo do nível d'água natural do terreno.

De Valeriano (2006), sabe-se que a família 1 é caracterizada por fraturas abertas, o que facilita a entrada de água em caso de chuvas. Analisa-se então o comportamento desse talude com coesão de 10t/m² em relação ao preenchimento da fratura com água, conforme Figura 5.20.

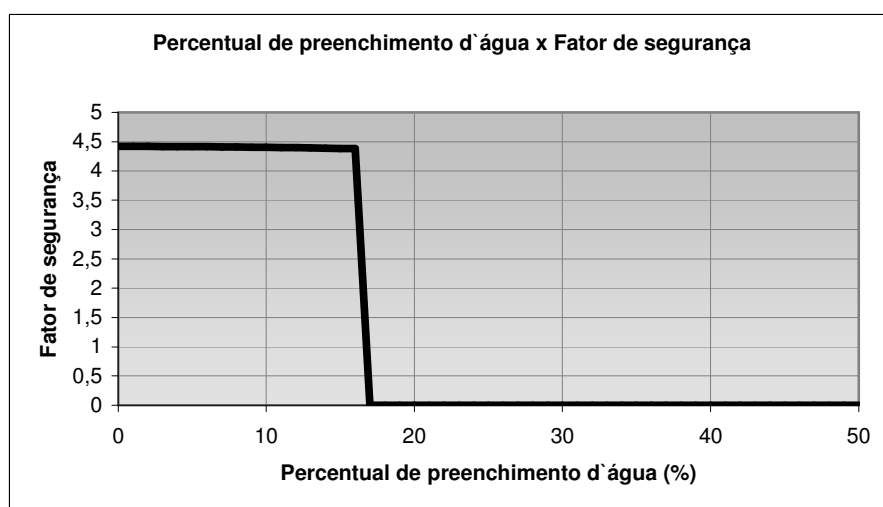


Figura 5.20 – Análise de sensibilidade do talude Sul ao preenchimento com água.

Nota-se que menos de 20% de preenchimento já se torna suficiente para desestabilizar a massa rochosa, mostrando que, caso não existam pontes consideráveis de rocha no plano, uma chuva forte que supere a capacidade de drenagem pode levar à ruptura do talude.

5.2.2. Ruptura em cunha

Para o cálculo de ruptura em cunha é considerado o conjunto formado pelo talude Sul e as famílias de fraturas 1 e 2. Os dados de entrada para o programa SWEDGE[®] são apresentados abaixo:

- $\gamma = 27 \text{ KN/m}^3$;
- $H = 24,25 \text{ m}$;
- $\psi_f = 87^\circ$; direção de mergulho = 27° (crista horizontal);
- $\psi_{p1} = 83^\circ$; direção de mergulho = 045° ; $\theta_1 = 30^\circ$ (família 1);
- $\psi_{p2} = 82^\circ$; direção de mergulho = 331° ; $\theta_2 = 33^\circ$ (supondo, de Valeriano (2006), que essa família apresente paredes rugosas, adotou-se o mínimo valor encontrado no ensaio de plano inclinado);
- $c = 0 \text{ KN/m}^2$ (coesão nula, supondo fratura persistente e aberta);
- $\alpha = 0,05g$ (sismicidade induzida horizontal aplicada na linha de interseção);
- Sem trinca de tração.

A cunha formada pela interseção entre as fraturas e o talude é realçada em vermelho na Figura 5.21, onde a seta ocre representa a direção de aplicação da força sísmica. Notar que não foi proposta a existência de trincas de tração.

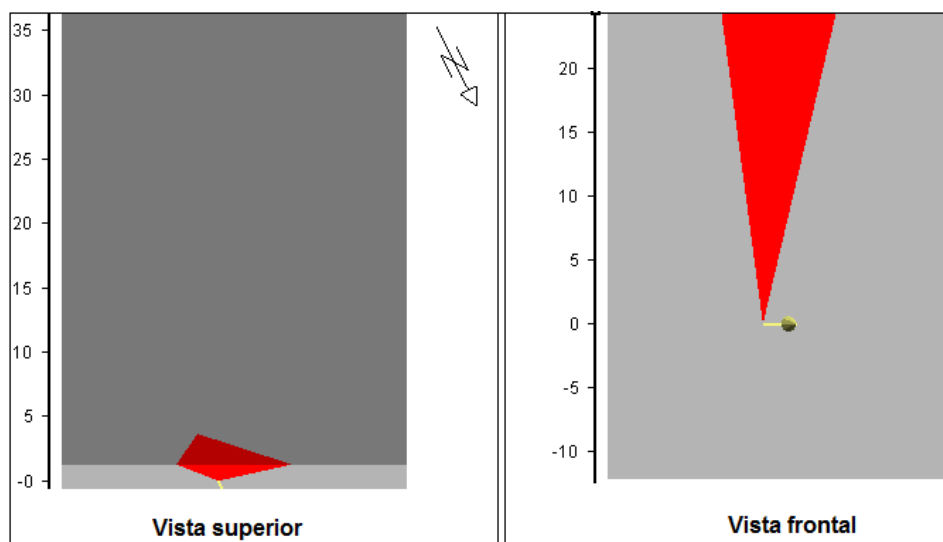


Figura 5.21 – Vistas da provável cunha formada pelas famílias 1 e 2 no talude Sul.

Dessa figura observa-se que para a análise em cunha também foi adotada uma persistência elevada. Para uma primeira análise segundo o critério de Mohr-Coulomb, o talude foi considerado seco, obtendo-se o fator de segurança igual a 0,09. Novamente era esperado que para uma cunha tão íngreme como a apresentada o fator de segurança associado seria muito baixo.

Adotou-se então para estas fraturas uma coesão de 10t/m^2 , assim como na ruptura planar, para simular a presença de pequenas pontes de rocha. O novo fator de segurança encontrado foi de 5,66. Porém, conforme citado anteriormente, o nível d'água natural do maciço nas proximidades do talude de corte encontra-se a aproximadamente 15 metros de profundidade.

Então, para testar a resistência desse talude com coesão em casos de chuva forte, onde as fraturas possam ser totalmente preenchidas com água, procedeu-se nova análise de estabilidade. Esse novo caso, onde 100% do comprimento das fraturas estão preenchidos, retorna um fator de segurança nulo. Analisou-se ainda um novo caso, onde são supostas pontes de rocha maiores, que elevem a coesão a 100t/m^2 , porém, se as fraturas estiverem preenchidas, o fator de segurança continua sendo nulo.

Conclui-se então que, caso as fraturas realmente existam nesta posição crítica e que persistam desde topo e face do talude até a interseção entre as mesmas, pode haver ruptura em cunha mesmo em épocas de baixa precipitação, apenas com a presença do nível d'água. Dessa forma, a água apresenta-se como fator limitador para o talude em questão, pois mesmo que se eleve a coesão, a presença da água reduz drasticamente o fator de segurança, podendo levar à ruptura em cunha do talude Sul.

5.2.3. Ruptura complexa

Assim como as análises de ruptura planar e em cunha seguiram a indicação das análises estruturais de estabilidade, a seção indicada como crítica pela modelagem tridimensional sugeriu o estudo da estabilidade do talude Oeste em toda a sua extensão.

Para tal análise essa seção crítica foi exportada do PETREL™ com os valores de RMR em relação às respectivas coordenadas e cotas no espaço em arquivo de texto. Porém, não foi possível entrar com esses dados diretamente no SLIDE®, já que este programa só trabalha com seções bidimensionais e possui limite espacial que não contempla a dimensão total das coordenadas UTM.

Foi necessário então realizar um tratamento prévio dos dados, onde esse arquivo exportado, disposto em colunas, foi levado ao EXCEL para projetar as coordenadas para o plano (x,z), por meio de transformações de álgebra linear, e para mover o ponto de coordenadas mínimas da seção para o eixo (0,0). Realizadas as devidas projeções e movimentações, ainda nessa planilha foram atribuídos os valores de c e ϕ em função do RMR conforme Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Atribuição de c e ϕ aos valores de RMR-1989.

Classe V - Muito pobre			Classe IV - Pobre			Classe III - Regular		
RMR	ϕ ($^{\circ}$)	c (KPa)	RMR	ϕ ($^{\circ}$)	c (KPa)	RMR	ϕ ($^{\circ}$)	c (KPa)
1	0,8	5,0	21	15,5	105	41	25,5	205
2	1,5	10,0	22	16,0	110	42	26,0	210
3	2,3	15,0	23	16,5	115	43	26,5	215
4	3,0	20,0	24	17,0	120	44	27,0	220
5	3,8	25,0	25	17,5	125	45	27,5	225
6	4,5	30,0	26	18,0	130	46	28,0	230
7	5,3	35,0	27	18,5	135	47	28,5	235
8	6,0	40,0	28	19,0	140	48	29,0	240
9	6,8	45,0	29	19,5	145	49	29,5	245
10	7,5	50,0	30	20,0	150	50	30,0	250
11	8,3	55,0	31	20,5	155	51	30,5	255
12	9,0	60,0	32	21,0	160	52	31,0	260
13	9,8	65,0	33	21,5	165	53	31,5	265
14	10,5	70,0	34	22,0	170	54	32,0	270
15	11,3	75,0	35	22,5	175	55	32,5	275
16	12,0	80,0	36	23,0	180	56	33,0	280
17	12,8	85,0	37	23,5	185	57	33,5	285
18	13,5	90,0	38	24,0	190	58	34,0	290
19	14,3	95,0	39	24,5	195	59	34,5	295
20	15,0	100,0	40	25,0	200	60	35,0	300
Classe II - Bom			Classe I - Muito bom					
RMR	ϕ ($^{\circ}$)	c (KPa)	RMR	ϕ ($^{\circ}$)	c (KPa)			
61	35,5	305,0	81	45,5	410,0			
62	36,0	310,0	82	46,0	420,0			
63	36,5	315,0	83	46,5	430,0			
64	37,0	320,0	84	47,0	440,0			
65	37,5	325,0	85	47,5	450,0			
66	38,0	330,0	86	48,0	460,0			
67	38,5	335,0	87	48,5	470,0			
68	39,0	340,0	88	49,0	480,0			
69	39,5	345,0	89	49,5	490,0			
70	40,0	350,0	90	50,0	500,0			
71	40,5	355,0	91	50,5	510,0			
72	41,0	360,0	92	51,0	520,0			
73	41,5	365,0	93	51,5	530,0			
74	42,0	370,0	94	52,0	540,0			
75	42,5	375,0	95	52,5	550,0			
76	43,0	380,0	96	53,0	560,0			
77	43,5	385,0	97	53,5	570,0			
78	44,0	390,0	98	54,0	580,0			
79	44,5	395,0	99	54,5	590,0			
80	45,0	400,0	100	55,0	600,0			

Também nessa planilha onde os dados estão vinculados às posições no plano, os pontos externos à superfície de escavação foram extraídos, já que o maciço foi modelado até a superfície e que o PETREL™ não permite interferências como corte de volumes em função de superfícies posteriormente inseridas. A extração de tais pontos foi realizada após a preparação da geometria do talude de corte, realizada em ambiente AutoCAD® com as devidas projeções necessárias. Essa geometria é apresentada na Figura 5.22.

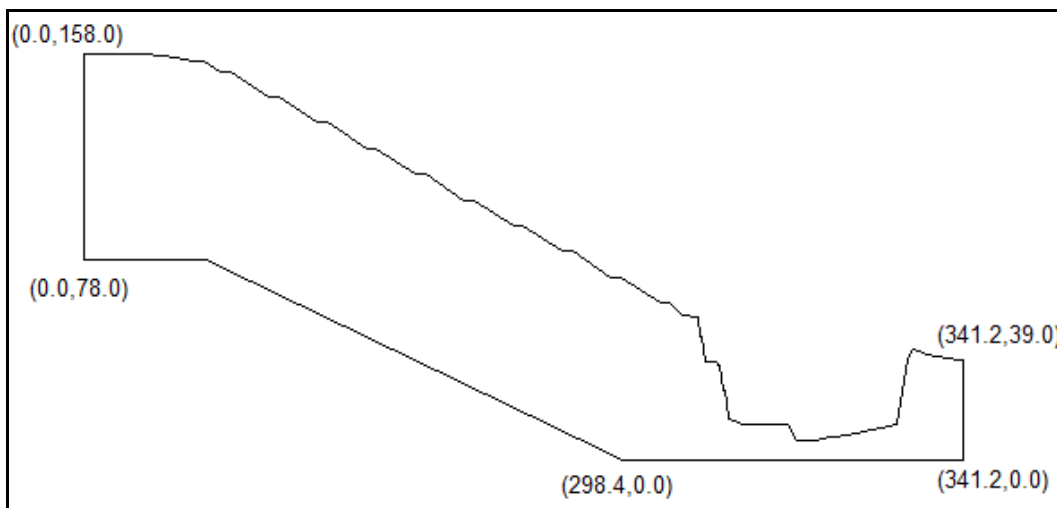


Figura 5.22 – Seção de corte projetada no AutoCAD® para entrada no SLIDE®.

O arquivo já tratado para a entrada de dados no SLIDE® consistiu então de um arquivo de texto com colunas que informavam respectivamente as coordenadas (x,z) dos pontos contendo os valores estimados de c e ϕ , conforme Figura 5.23.

File	Edit	Format	View	Help
0.000	78.264	330	38	
0.000	80.264	330	38	
0.000	82.264	345	39.5	
0.000	84.264	335	38.5	
0.000	86.264	325	37.5	
0.000	88.264	325	37.5	
0.000	90.264	320	37	
0.000	92.264	315	36.5	
0.000	94.264	305	35.5	
0.000	96.264	300	35	
0.000	98.264	300	35	
0.000	100.264	285	33.5	
0.000	102.264	275	32.5	
0.000	104.264	265	31.5	
0.000	106.264	265	31.5	
0.000	108.264	260	31	
0.000	110.264	260	31	

Figura 5.23 – Arquivo de entrada de dados de resistência do maciço no SLIDE®.

Preparados os arquivos, os mesmos foram importados para o SLIDE[®] para a análise de estabilidade do talude segundo a variação ponto a ponto dos parâmetros de resistência. Também foi necessário, para tal análise, atribuir as propriedades de resistência à capa de solo existente sobre o material rochoso e não estudada durante o desenvolvimento desse trabalho.

De Gomes da Silva (2006) foram compilados valores de c e ϕ de solos residuais de gnaise disponíveis na literatura para os estados limítrofes da região de estudo, conforme Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Tabela de valores de c e ϕ disponíveis na literatura (compilado de Gomes da Silva, 2006).

c (KPa)	ϕ (°)	Local	Autor
25	28	Soberbo (RJ)	Silveira & Lacerda (1993)
16	42	Jacarepaguá (RJ)	Feijó <i>et al.</i> (2001)
13 a 15	24 a 38	Ponte Nova (MG)	Marchi <i>et al.</i> (2005)
15	23	Niterói (RJ)	Springer (2006)

Adotou-se então para a coesão o valor de 20KPa e para o ângulo de atrito o valor de 26°. Foi preciso então assumir um valor para o peso específico desse solo e, sabendo que o valor médio adotado para o peso específico da rocha foi de 27KN/m³, adotou-se para o solo o valor de 20KN/m³.

De acordo com os perfis de sondagem foi então adotado o nível d'água em torno de 13m de profundidade em relação à superfície do terreno e, considerando o rebaixamento do mesmo nas proximidades da casa de força. A disposição desses dados no SLIDE[®] é apresentada na Figura 5.24.

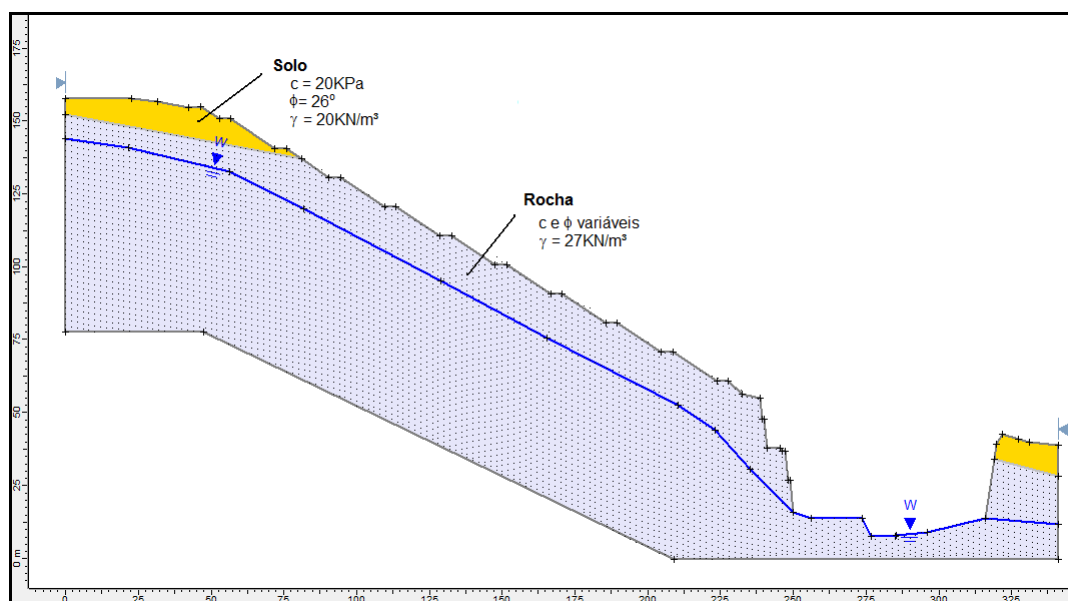


Figura 5.24 – Dados de entrada da seção do talude Oeste no SLIDE[®].

Uma vez lançados os dados necessários as análises de estabilidade no SLIDE[®], foram então sugeridos pontos de referência para o estudo da estabilidade do talude por métodos dos elementos finitos, os métodos de fatias de Janbu Simplificado e Bishop Simplificado. Novamente foi adotado o coeficiente de aceleração sísmica de 0,05. O mínimo fator de segurança foi encontrado pelo método de Janbu simplificado e a superfície crítica está destacada na Figura 5.25.

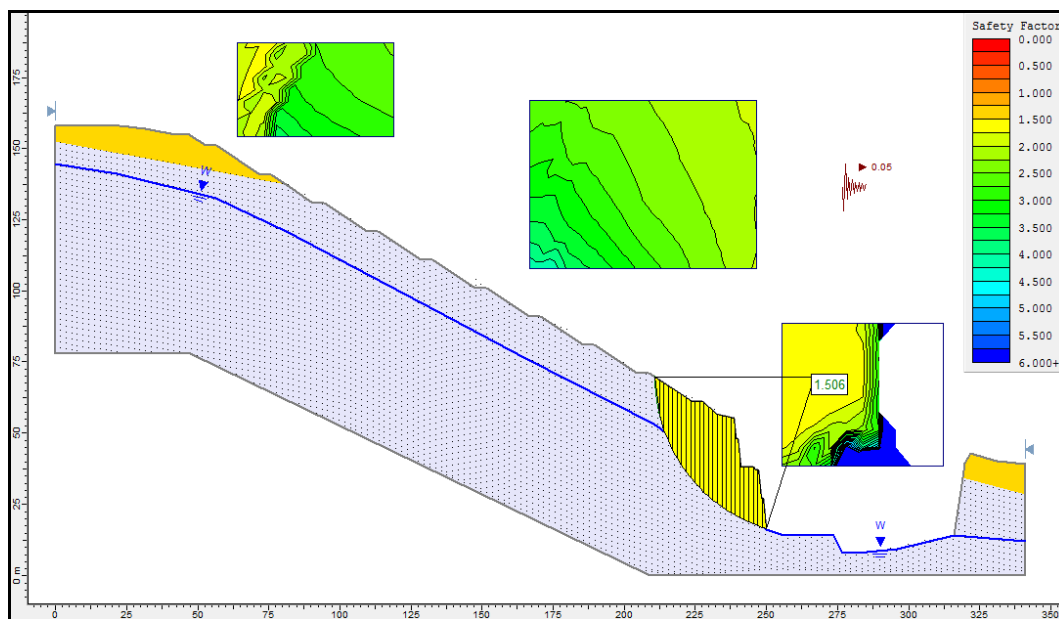


Figura 5.25 – Análise de estabilidade do talude Oeste por Janbu simplificado.

Observa-se dessa figura que a superfície crítica de ruptura encontrada coincide com a região sugerida pela modelagem como fraturada e com valores de RMR que evidenciam má qualidade do maciço. Contudo, segundo esta análise, o talude apresenta-se estável para a situação sugerida, já que seu fator de segurança excede o valor de 1,5.

Nessa figura destacam-se ainda o padrão de cores associado ao fator de segurança para os pontos centrais de possíveis superfícies e a distribuição das fatias utilizada na superfície crítica de estabilidade sugerida.

De acordo com a análise apresentada o talude mantém-se estável, mas de qualquer forma nota-se a eficiência da modelagem ao indicar uma seção crítica em relação ao maciço como um todo, evidenciando a sua grande utilidade na compreensão espacial do meio e no complemento das análises de estabilidade, varrendo pontos de fraqueza não mapeados pelas análises estruturais.