

5

Análises de Estabilidade dos Taludes da Mina

5.1.

Mecanismos Potenciais de Ruptura

5.1.1.

Estudo das Descontinuidades Preocupantes

De acordo com as descrições das feições estruturais presentes na mina, as preocupantes, ou seja, as que podem provocar rupturas nos taludes da mina, dependendo de suas atitudes, são as seguintes:

- Foliações: Bandamento Composicional S_0 , Xistosidade S_n , Foliação Milonítica S_m .
- Falhas/Fraturas.

Dentro do material obtido da VALE, dois relatórios continham mapeamentos de estruturas geológicas na mina, elaborados por empresas diferentes (SBC, 2001, e Geoexplore, 2005). Logo, para utilização deste conjunto de informações, adotou-se o seguinte procedimento:

- 1º Comparação entre os resultados fornecidos por SBC (2001) e Geoexplore (2005): o relatório da SBC (2001) fornecia somente os valores dos planos médios dos estereogramas. Estes valores foram plotados em forma de simples projeções estereográficas, com utilização do programa Estereonet 3.03, para poderem ser confrontados com os resultados obtidos da Geoexplore (2005), apresentados no Capítulo 3. Cada empresa mapeou a mina seguindo sua própria setorização, assim, realizou-se esta comparação para verificação da equivalência entre as setorizações, como tentativa de trazer os resultados da Geoexplore (2005) para a setorização da SBC (2001), adotada no presente trabalho (Figura 5.1, Figura 5.2). Observou-se que o Setor I abrange os Setores SW2 e NW, e o Setor II os Setores SW1 e NE, o que direcionou o passo seguinte.

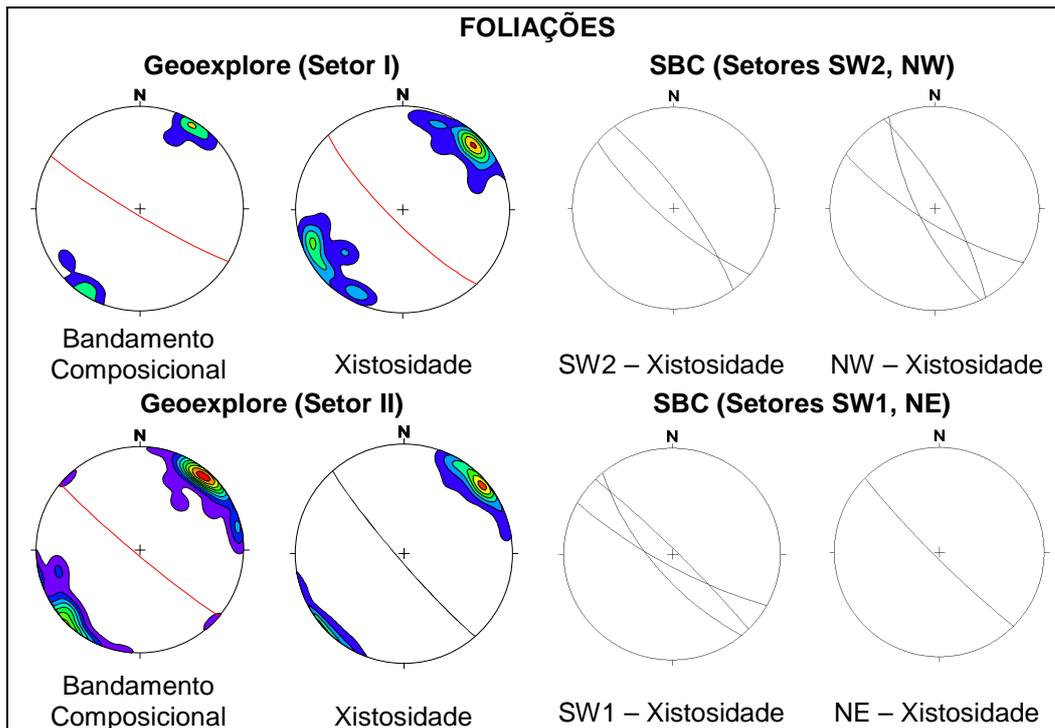


Figura 5.1 – Comparações entre os resultados dos mapeamentos de foliações da Geoexplore (2005) e SBC (2001).

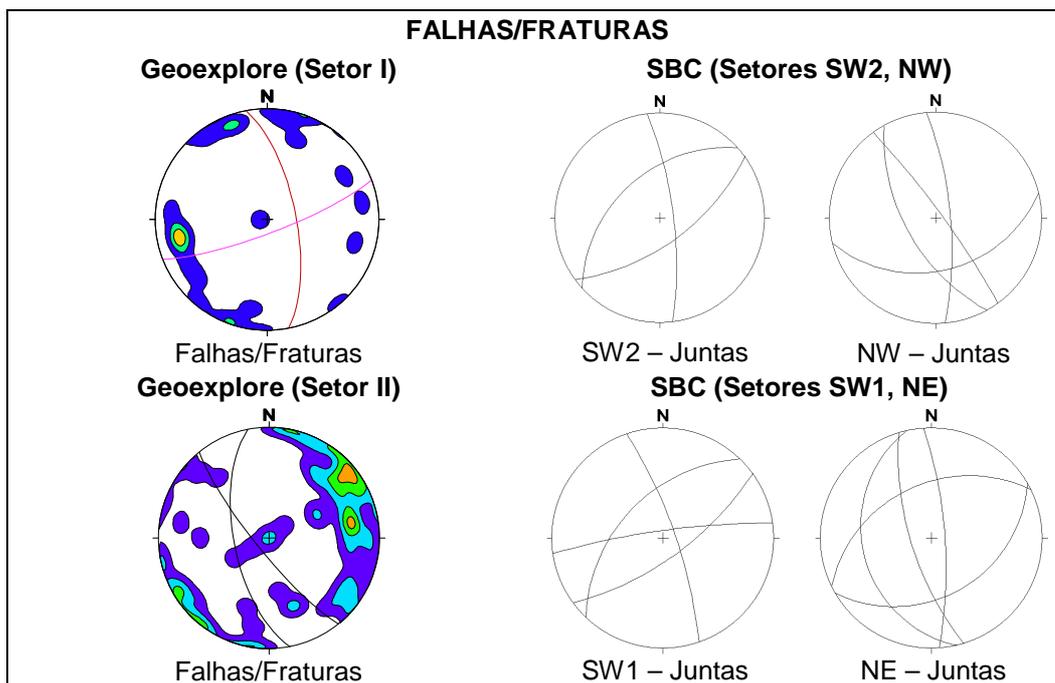


Figura 5.2 – Comparações entre os resultados dos mapeamentos de falhas/fraturas da Geoexplore (2005) e SBC (2001).

- 2º Levantamento das discontinuidades, por setor, dos Mapas de Geologia Estrutural elaborados pela SBC (2001), e Geoexplore (2005), segundo a setorização da SBC (2001), com auxílio do software AutoCAD 2004.

- 3º Elaboração de projeções estereográficas das descontinuidades levantadas, e realização de análises de estabilidade cinemáticas, segundo a setorização da SBC (2001) (Figuras 5.3 a 5.6), com utilização do programa Dips, da Rocscience.

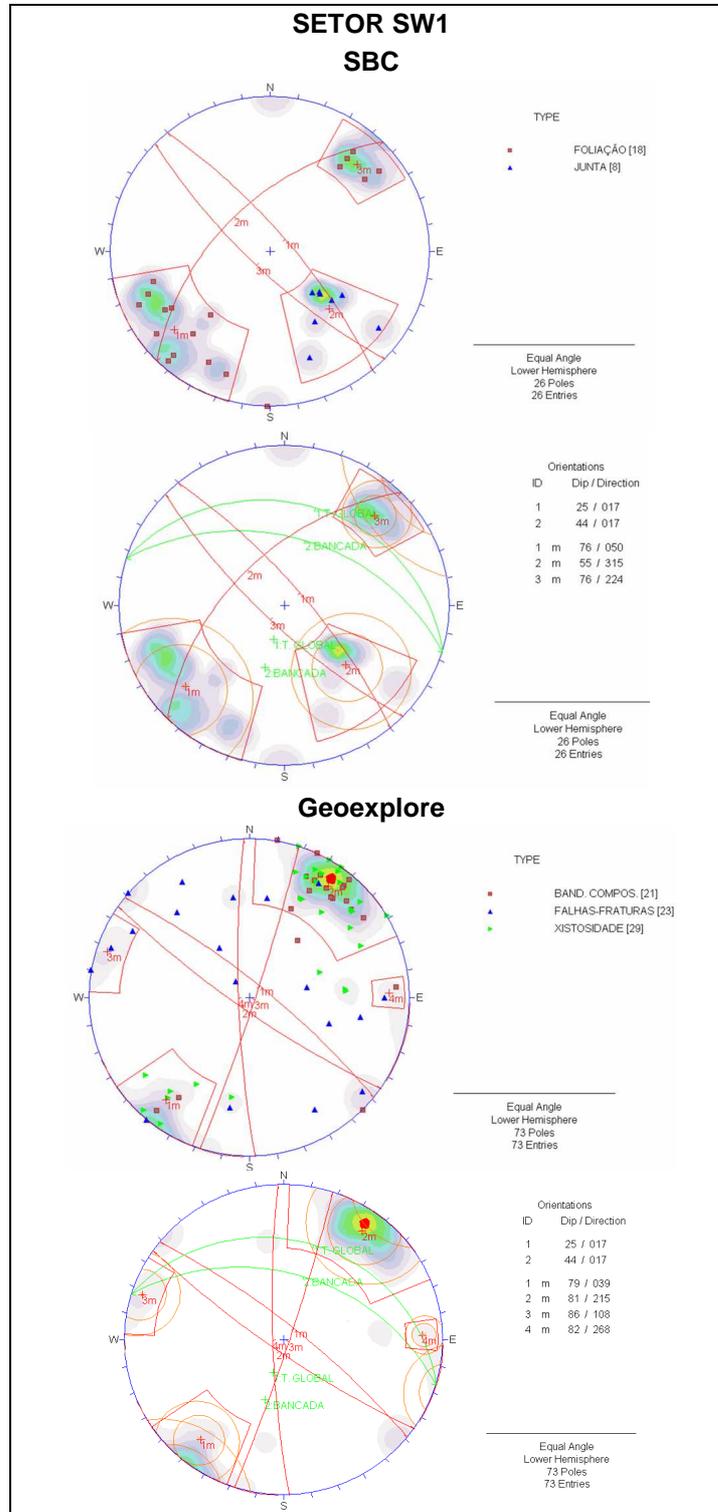


Figura 5.3 – Comparação entre os estereogramas das atitudes das descontinuidades levantadas nos mapas da SBC (2001) e Geoexplore (2005) – Setor SW1.

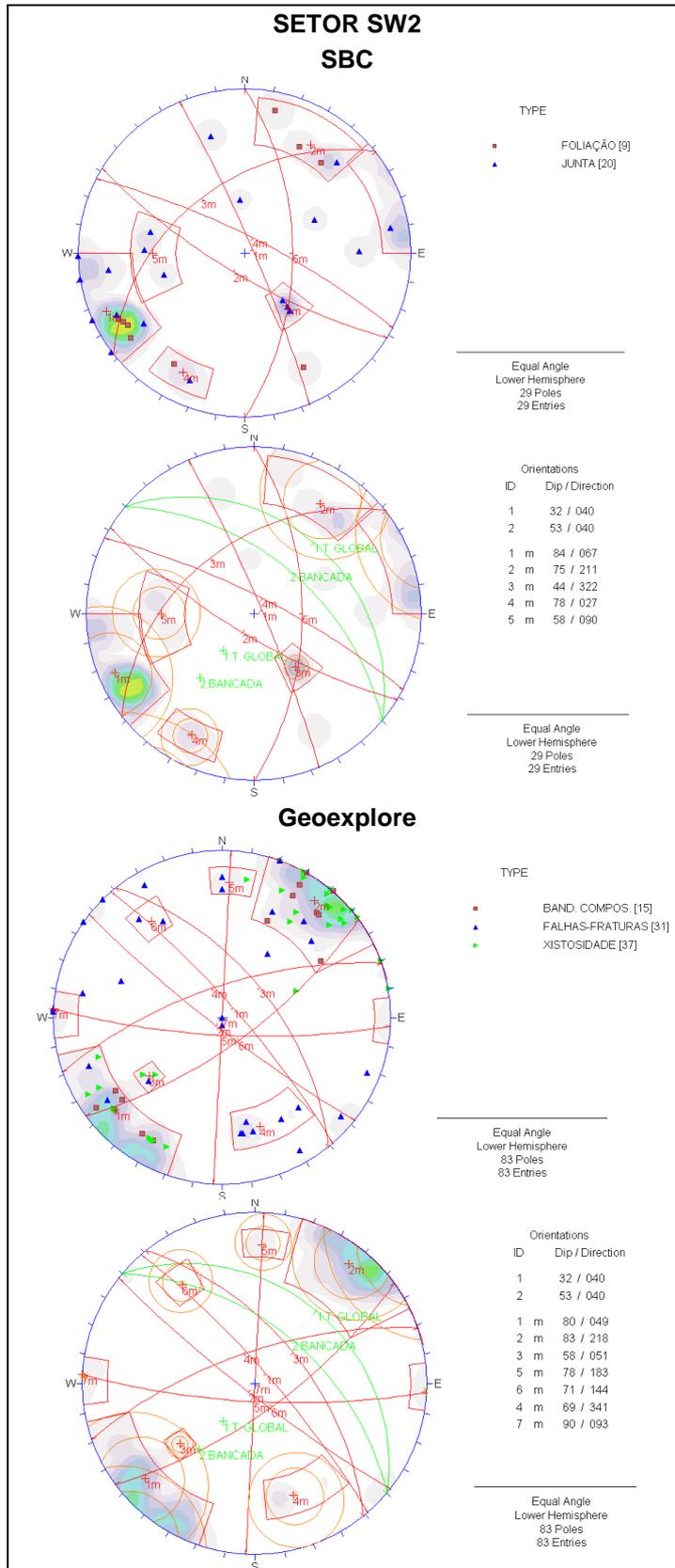


Figura 5.4 – Comparação entre os estereogramas das atitudes das discontinuidades levantadas nos mapas da SBC (2001) e Geoexplore (2005) – Setor SW2.

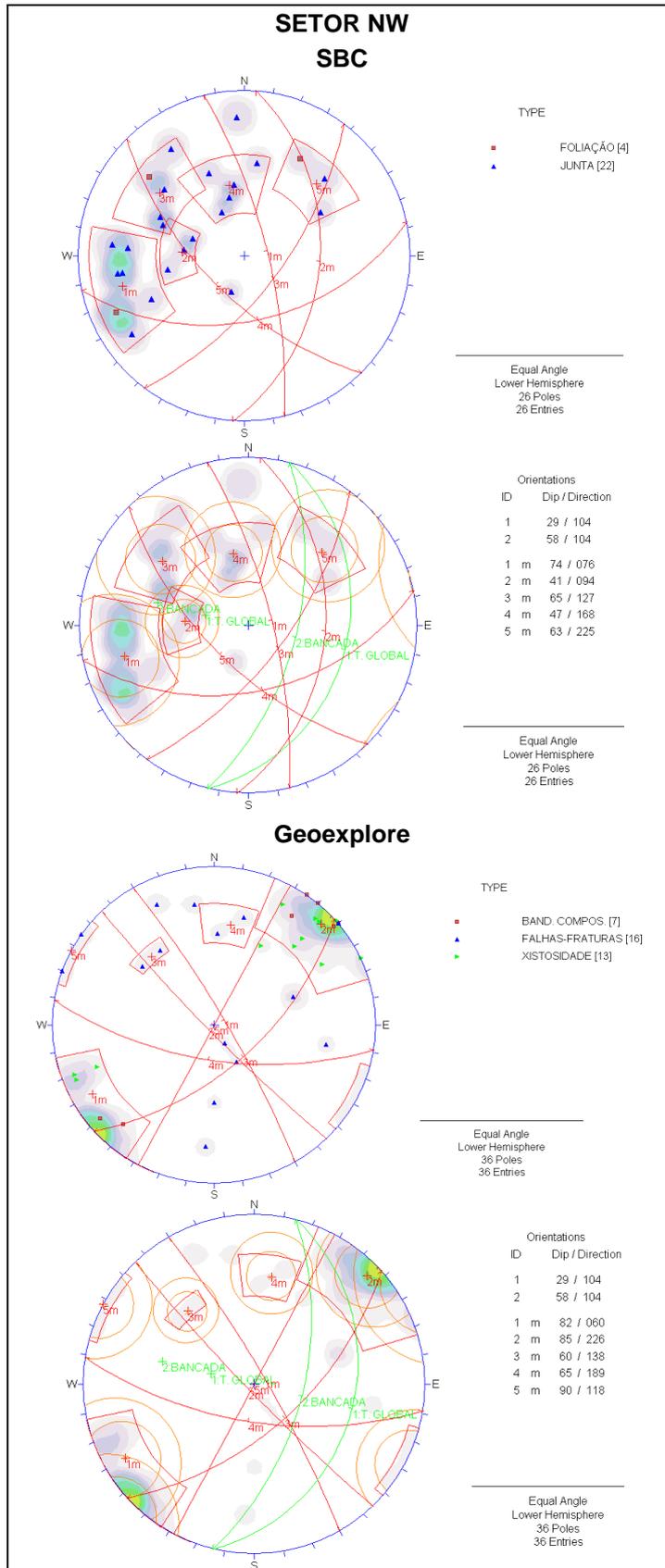


Figura 5.5 – Comparação entre os estereogramas das atitudes das discontinuidades levantadas nos mapas da SBC (2001) e Geoexplore (2005) – Setor NW.

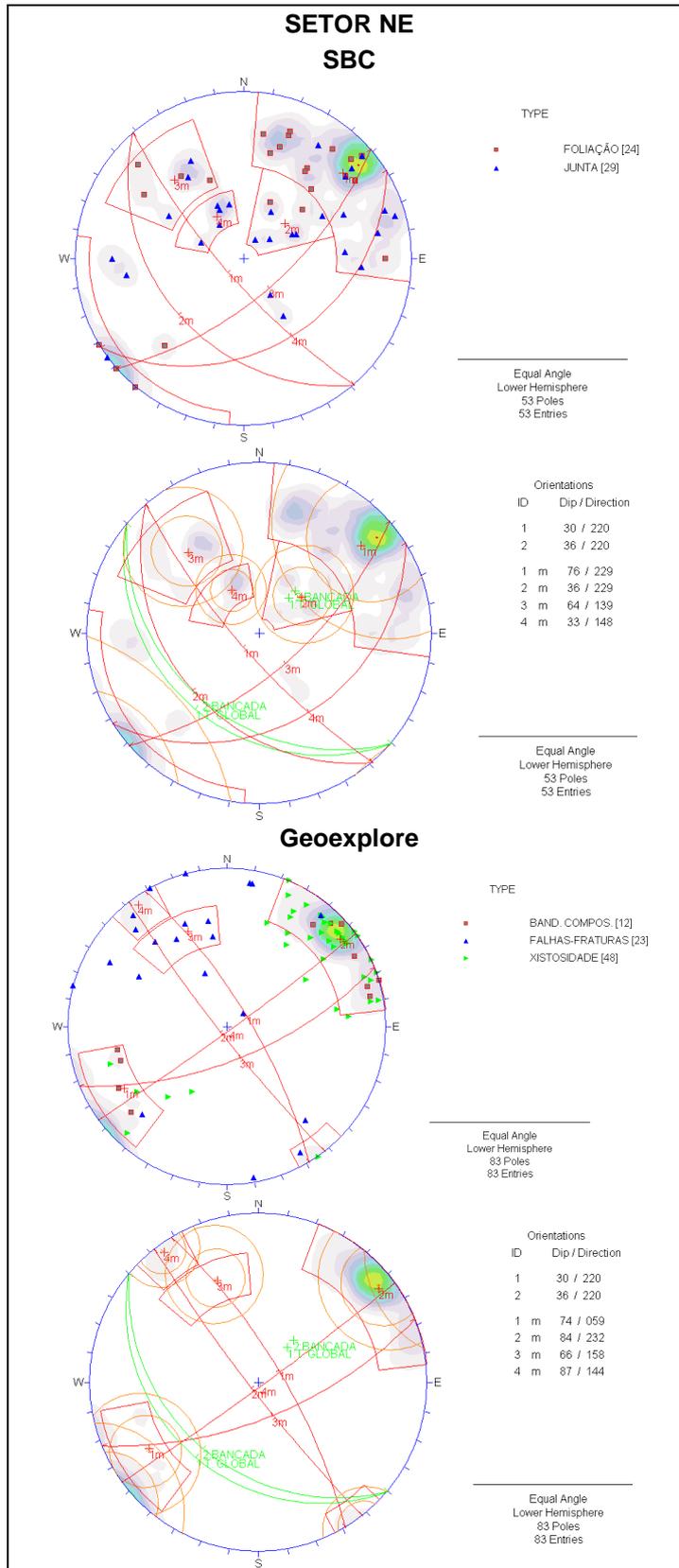


Figura 5.6 – Comparação entre os estereogramas das atitudes das discontinuidades levantadas nos mapas da SBC (2001) e Geoexplore (2005) – Setor NE.

Todos os resultados estão coerentes com o que era esperado encontrar, de acordo com a gênese das estruturas da região apresentada no Capítulo 3, obtendo-se resumidamente o expresso na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Resultados esperados de acordo com a gênese das estruturas presentes na cava da mina de Morro da Mina.

	Direção (Strike)	Mergulho (Dip)
Foliações	NW ou SE	NE ou SW subvertical
Falhas/Fraturas	NW ou SE	NE ou SW subvertical
Falhas/Fraturas \perp	NE ou SW	NW ou SE subvertical

5.1.2.

Orientação dos Taludes em Relação às Descontinuidades

Com a plotagem das atitudes levantadas dos mapas fornecidos, obtiveram-se resultados coerentes com as conclusões apresentadas pela SBC (2001), sendo que estas puderam ser aprofundadas, devido à presença dos dados de mapeamento da Geoexplore (2005), que possuem maior quantidade e abrangência diferente da dos pontos levantados pela primeira empresa, logo, um maior número de famílias pôde ser considerado, inclusive nos dados da própria SBC (2001).

A orientação dos taludes em relação às descontinuidades é a seguinte:

- Setores SW1 e NE: Para estes taludes as atitudes das estruturas geológicas variam, mergulhando ora para dentro, ora para fora do talude (SW, NE), porém sempre com ângulos de mergulhos fortes e com direção média paralela ao mesmo; ocorrem também estruturas com direções aproximadamente transversais aos taludes.
- Setor SW2 e NW: Estes taludes apresentam descontinuidades com atitudes completamente variadas, apresentando-se paralelas aos taludes, com mergulhos favoráveis e desfavoráveis, e com direções transversais e oblíquas, com mergulhos para diversas direções, e todos os mergulhos fortes, até mesmo subverticais.

Desta forma, conclui-se que nos taludes da mina pode ocorrer um dos três tipos de rupturas cinemáticas (Planar, Cunha, Tombamento) principalmente em nível de bancadas, pois ocorrem famílias de descontinuidades com direções paralelas, perpendiculares, e oblíquas, que podem se combinar ou atuar sozinhas sobre estas. Além disto, como o processo intempérico ocorre em direção aos taludes da região sul da cava, a partir da superfície, afetando os

setores SW1 e SW2, e existem feições estruturais com direção de mergulho desfavorável, nos taludes dos setores SW1 e SW2 podem ocorrer rupturas circulares, e não-circulares.

5.2. Análises de Estabilidade Cinemáticas

No ano de 2000, a empresa SBC (2001) realizou análises de estabilidade dos taludes da mina, onde as análises cinemáticas foram voltadas para a determinação do ângulo de face mais adequado para cada setor, levando-se em conta a menor chance de ocorrer rupturas em cunha, pois em seus estudos sobre as estruturas geológicas foi concluído que este tipo de ruptura possuía maior possibilidade de suceder. Entretanto, no presente trabalho, as análises cinemáticas estão voltadas apenas para estudo da estabilidade dos taludes, com observação dos outros tipos de ruptura (planar e tombamento) não analisados pela SBC (2001), e utilização de boa quantidade de descontinuidades levantadas pela empresa Geoexplore (2005).

Os dados apresentados na Tabela 5.2 foram utilizados nas análises cinemáticas, através do programa Dips, da Rocscience, onde os ângulos médios dos taludes e das bancadas foram obtidos do mapa topográfico da mina com auxílio do programa AutoCAD 2004, e os parâmetros de resistência das descontinuidades foram os fornecidos pela SBC (2001), obtidos através do Critério de Resistência de Barton-Bandis (1990). Os resultados são mostrados nas Figuras 5.7 a 5.11.

Tabela 5.2 – Dados para análise de estabilidade cinemática.

Setor	Talude no Setor		α_0 (Ângulo Médio Talude Global)	α_B (Ângulo Médio das Bancadas)	ϕ_j (Ângulo de Atrito da Descontinuidade) (SBC, 2001)
	Strike	Dip Direction			
SW1	N73°W	17°	25°	44°	30°
					40°
SW2	N50°W	40°	32°	53°	30°
					40°
NW	N14°E	104°	29°	58°	30°
					40°
NE	N50°W	220°	30°	36°	30°
					40°

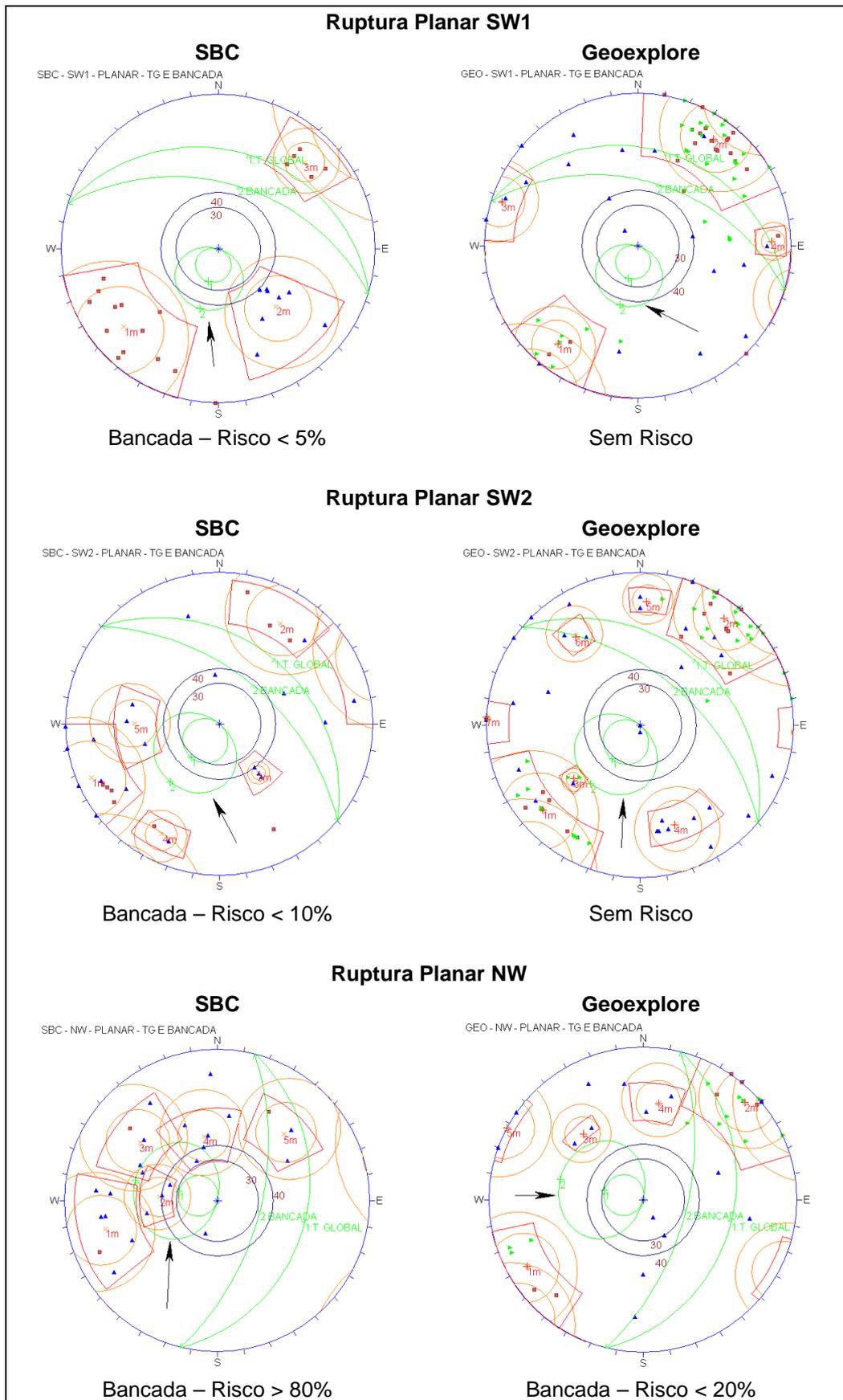


Figura 5.7 – Resultados das análises cinemáticas – Ruptura Planar.

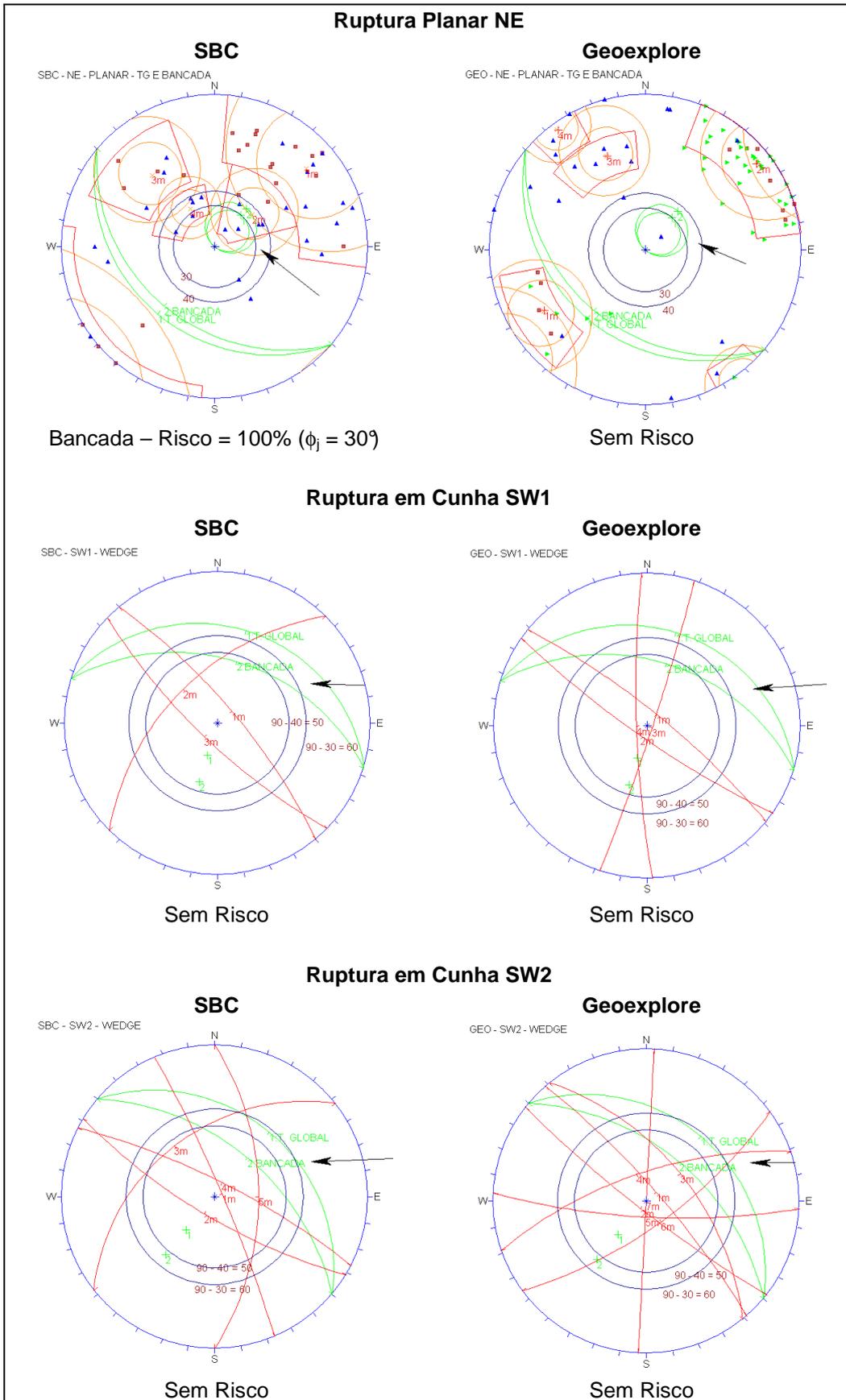


Figura 5.8 – Resultados das análises cinemáticas – Ruptura Planar e Cunha.

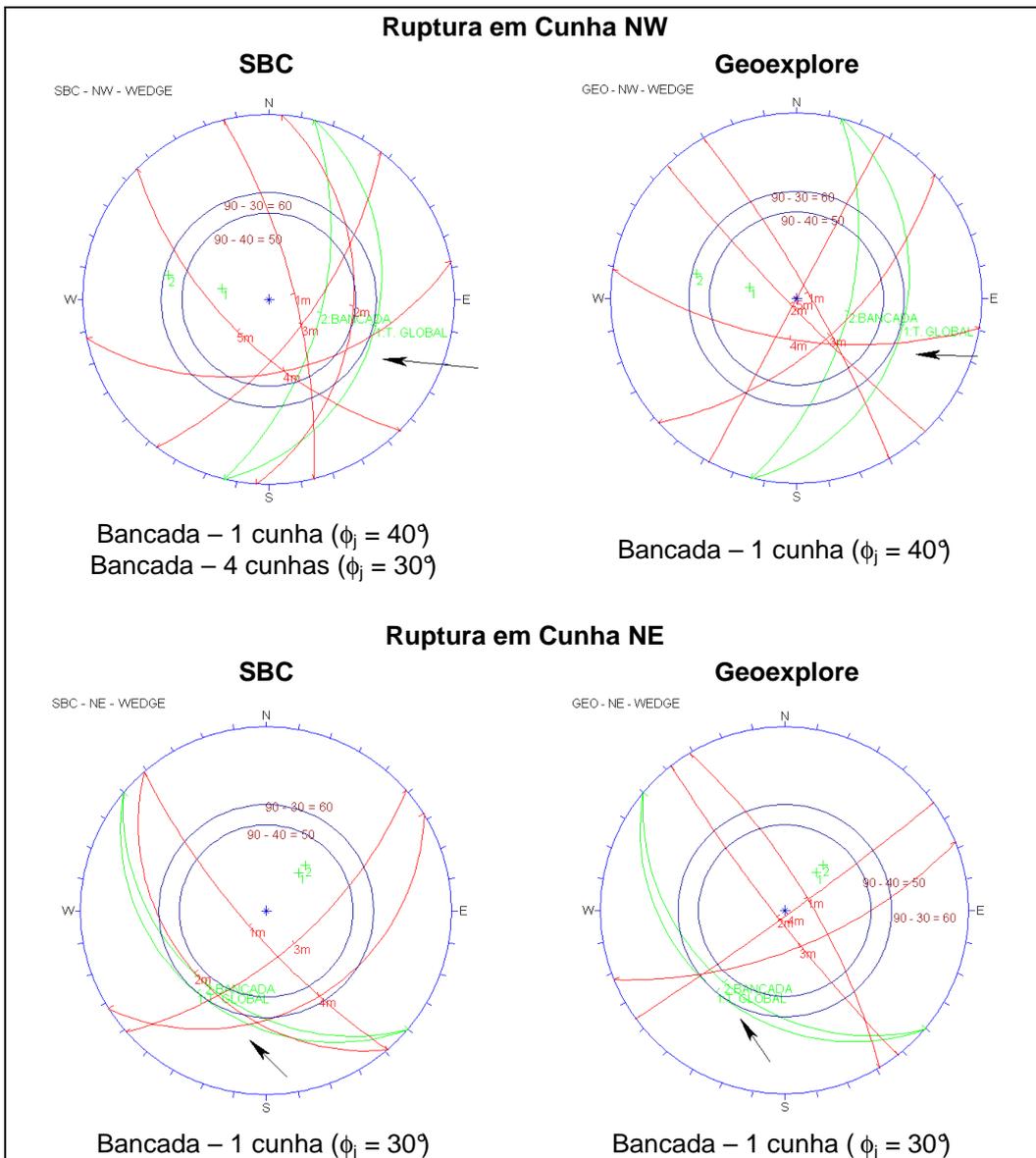


Figura 5.9 – Resultados das análises cinemáticas – Ruptura em Cunha.

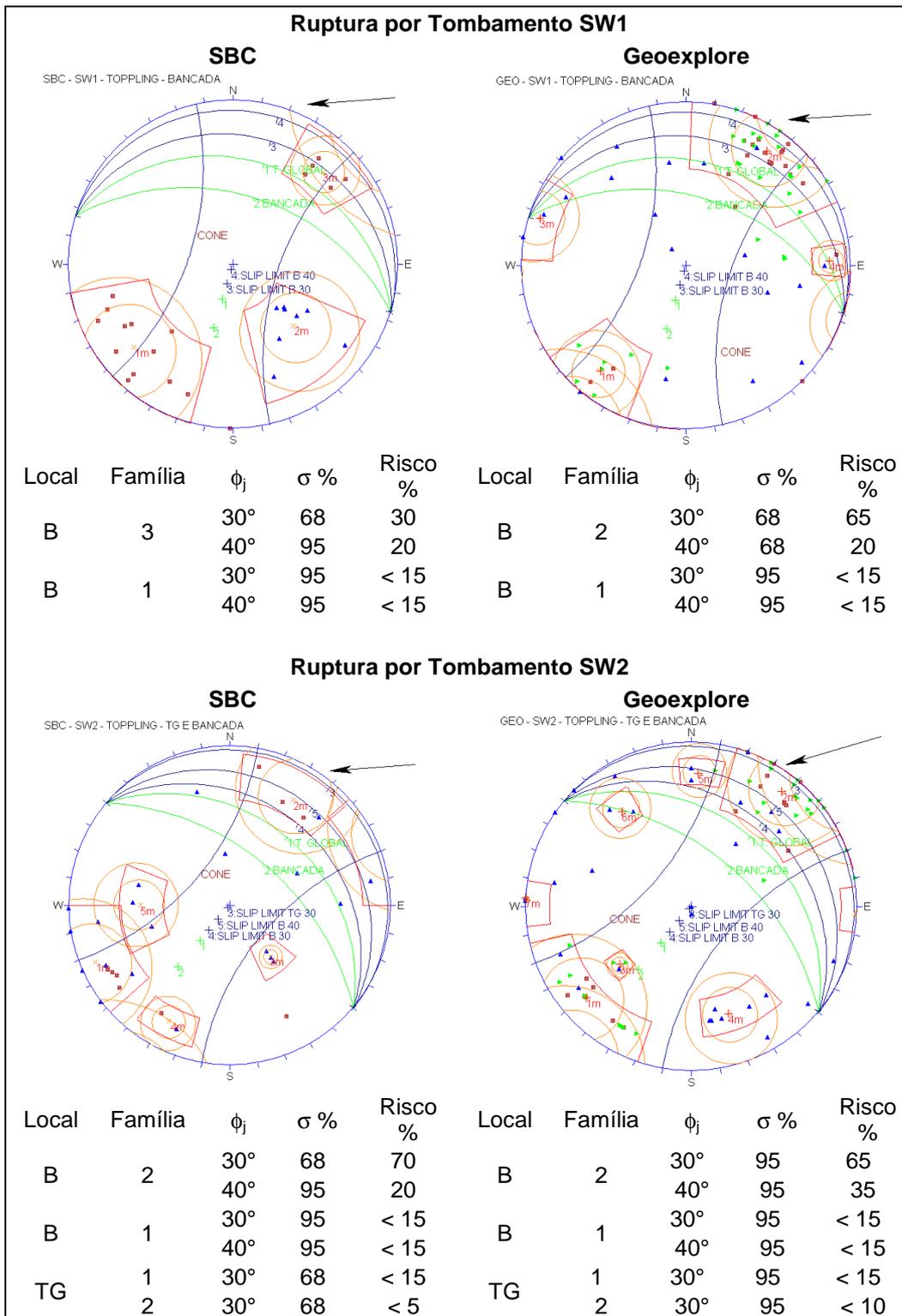


Figura 5.10 – Resultados das análises cinemáticas – Ruptura por Tombamento – SW1, SW2.

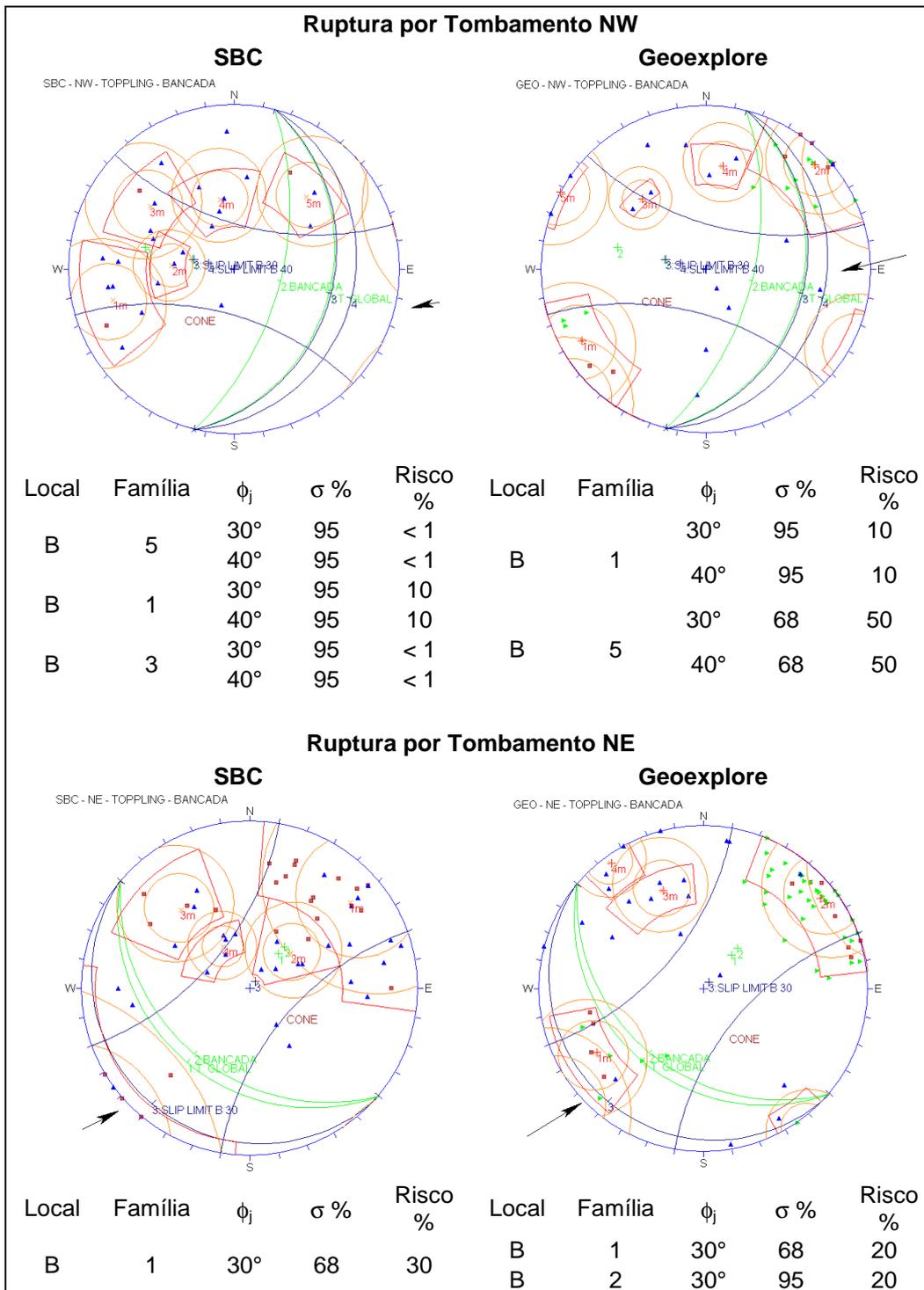


Figura 5.11 – Resultados das análises cinemáticas – Ruptura por Tombamento – NW, NE.

Tabela 5.3 – Resumo dos resultados das análises cinemáticas.

Tabela Resumo dos Resultados das Análises Cinemáticas				
Ruptura	Setor	Local	Dados	Risco
Planar	NW	Bancada	SBC	Elevado
	NE			
Cunha	NW	Bancada	SBC	Até 4 Cunhas
			Geo	1 Cunha
	NE	Bancada	SBC	1 Cunha
			Geo	
Tombamento	SW1	Bancada	Geo	Médio
	SW2	Bancada	SBC	Elevado
			Geo	Médio
	NW	Bancada	Geo	Médio

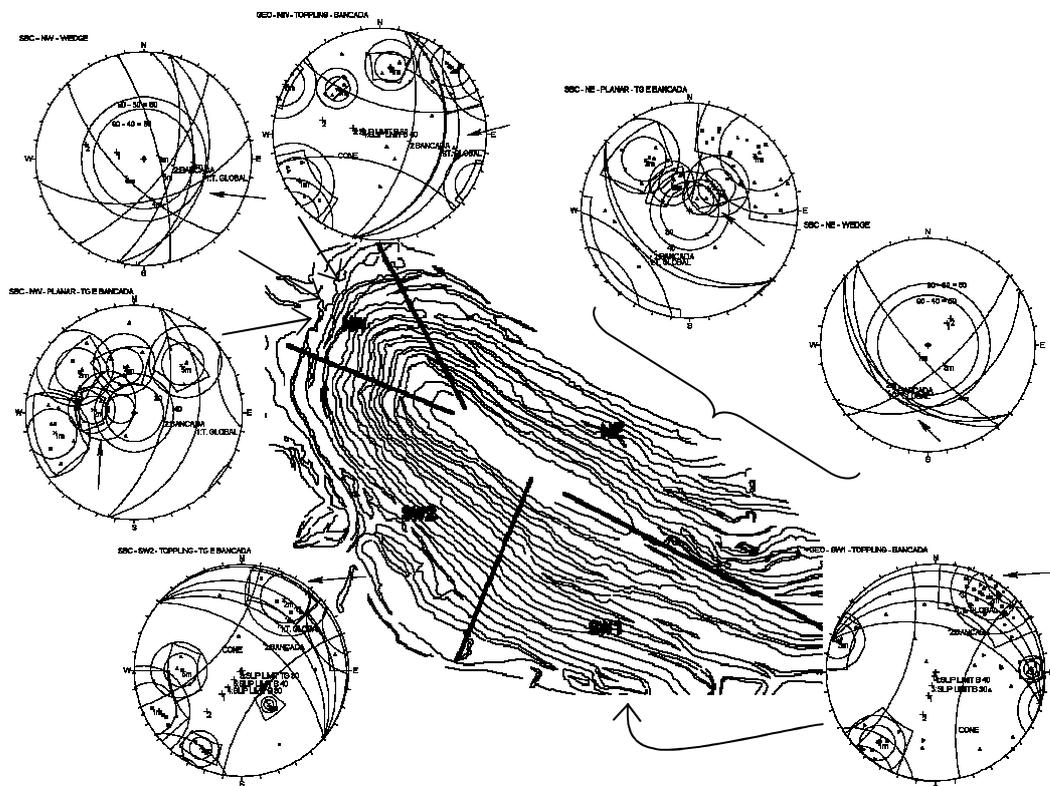


Figura 5.12 – Setores da cava com seus respectivos tipos de ruptura possíveis de ocorrer.

5.2.1. Análise Crítica dos Resultados

Os dois conjuntos de dados utilizados acusaram rupturas em nível de bancadas, confirmando o que era previsto pela observação das atitudes das estruturas em relação aos taludes da cava. No caso da ruptura planar, somente o conjunto de dados da SBC (2001) acusou este tipo de ruptura, pois se nota neste mapeamento uma maior quantidade de atitudes paralelas ao talude, com

mergulhos desfavoráveis, o que não acusa no levantamento da Geoexplore (2005). Por outro lado, os dados da Geoexplore (2005) foram bastante úteis, pois mostraram a possibilidade de ocorrência de rupturas não apresentadas pela SBC (2001) (tombamento no setor SW1 e NW), e confirmaram rupturas apontadas como prováveis por esta empresa.

Logo, assim como é interessante utilizar-se de dois sistemas de classificação de maciços rochosos diferentes, é proveitoso trabalhar-se com dados de mapeamentos realizados por duas empresas diferentes, quando possível, pois um conjunto de informação pode dar peso aos resultados obtidos com o outro, ou podem-se perceber situações em um conjunto que talvez não sejam observadas no outro.

Quedas de blocos advindos das possíveis rupturas em cunha e tombamento poderiam ter sido estudadas, como continuidade das análises cinemáticas, assim como análises de estabilidade por elementos finitos podem ser realizadas, porém não constam no escopo do presente trabalho, ficando assim como sugestão para continuidade nos estudos relacionados à estabilidade dos taludes rochosos da mina de Morro da Mina.

5.3. Análises de Estabilidade por Equilíbrio Limite de Seções Típicas

As análises por equilíbrio limite realizadas pela SBC (2001) foram globais, e em quatro seções geomecânicas (S77N, S80N, S83N, e S86N) divididas em seções SW e NE, de acordo com a sua setorização, totalizando 8 taludes globais para análise de ruptura circular. Como os estudos hidrogeológicos da época não estavam concluídos, a empresa adotou hipóteses em relação ao nível d'água nos taludes, considerando estes secos, e com alguns níveis d'água, dependendo da seção. Os resultados obtidos por esta empresa foram os seguintes:

- Taludes secos: os resultados para todos os taludes estudados foram superiores ao valor mínimo de fator de segurança adotado para empreendimentos mineiros (1,30). Os taludes foram considerados estáveis.
- Taludes com nível d'água: dependendo da seção, duas ou mais análises de estabilidade foram realizadas. As seções S77N-SW, S83N-NE e S86N-SW apresentaram resultados abaixo de 1,30 quando o nível d'água foi assumido próximo da superfície, porém, concluiu-se

que provavelmente os taludes não sofrerão influência significativa do NA.

Entretanto, no presente trabalho, as análises por equilíbrio limite foram voltadas para o estudo da estabilidade quanto à possibilidade de ruptura circular e não-circular dos taludes globais e das bancadas, não verificadas desta forma pela SBC (2001), e procurou-se comparar os resultados finais de ambos os trabalhos como tentativa de validar a metodologia que está sendo apresentada, onde os parâmetros de resistência adotados nas seções foram obtidos da modelagem geomecânica proposta no Capítulo 4. O programa utilizado foi o Slide 5.0, da Rocscience.

Desta forma, a escolha das posições das seções para as análises foi baseada no seguinte critério:

- Utilização de seções em taludes importantes para o funcionamento da mina, possuindo as rampas de acesso ao interior da cava (basicamente os taludes dos setores SW1, SW2, e NW);
- Escolha de seções semelhantes às do estudo da SBC (2001), para possibilidade de comparação entre os resultados (seções SW);
- Escolha de locais onde seja possível, ou onde já ocorreu, ruptura circular, ou não-circular, levando-se em conta também os resultados das análises cinemáticas;
- Procura de seções próximas a furos de sondagem para garantir uma certa exatidão nos valores interpolados.

Logo, as seções escolhidas são as apresentadas a seguir e na Figura 5.13, onde seus nomes são os mesmos dos setores aos quais pertencem:

- Seção SW1: análises somente circular, tendo em vista que este tipo de ruptura já ocorreu em nível de bancadas no talude, e que nesta parte da mina, o intemperismo atuou de forma intensa, ou seja, o material do talude apresenta-se comprometido.
- Seção SW2: análise somente circular. Esta parte da mina também está comprometida pelo intemperismo.
- Seção NW: análises do tipo circular e não-circular, pois pela análise cinemática, este talude possui grande chance de sofrer ruptura planar, em nível de bancada, então, existem planos que podem colaborar para uma possível ruptura não-circular. Portanto, este tipo de ruptura foi estudado na região do talude NW, onde foi mapeada uma destas descontinuidades com atitudes desfavoráveis.

- Seção NE: não foi analisada, porque não possui furos de sondagem em seu talude, logo, os dados gerados são extremamente duvidosos, e o talude está menos intemperizado que os das outras seções.

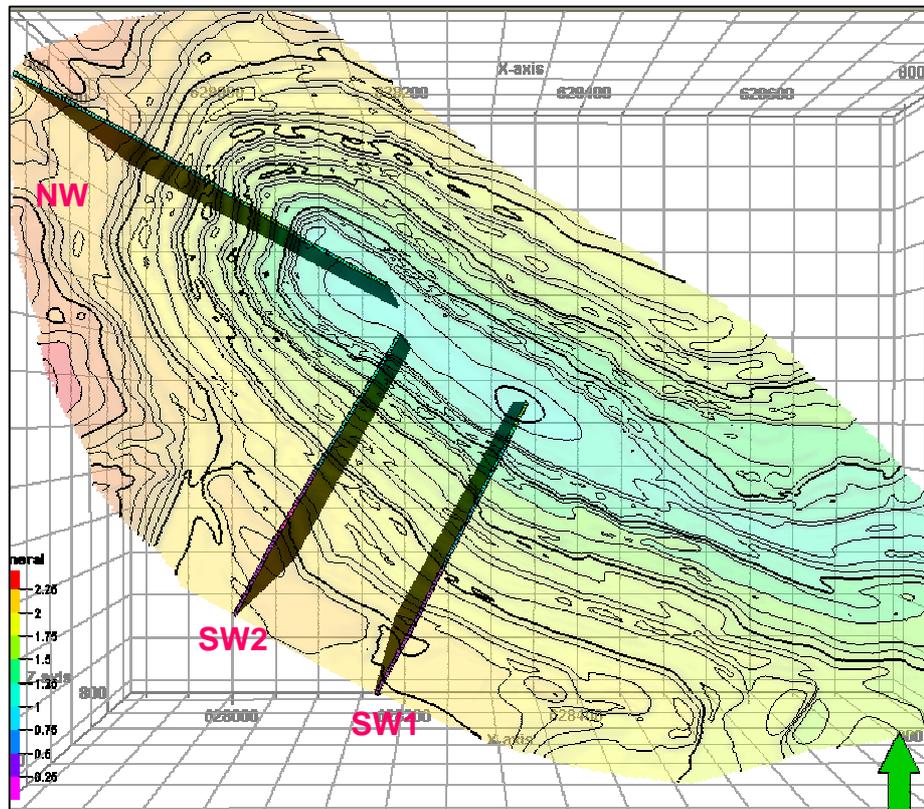


Figura 5.13 – Representação da localização das seções escolhidas para as análises de estabilidade.

Os valores de parâmetros de resistência utilizados foram os obtidos na etapa de modelagem geomecânica da mina. O Petrel 2004 gera arquivos de saída com extensão .txt possuindo os valores dos dados modelados e as locações 3D dos centros das células, onde estão localizados os dados. Portanto, elaborou-se uma planilha para que estas locações fossem transformadas em 2D (com utilização de Transformação Linear), para possibilitar a entrada dos parâmetros no Slide 5.0 (Figura 5.14).

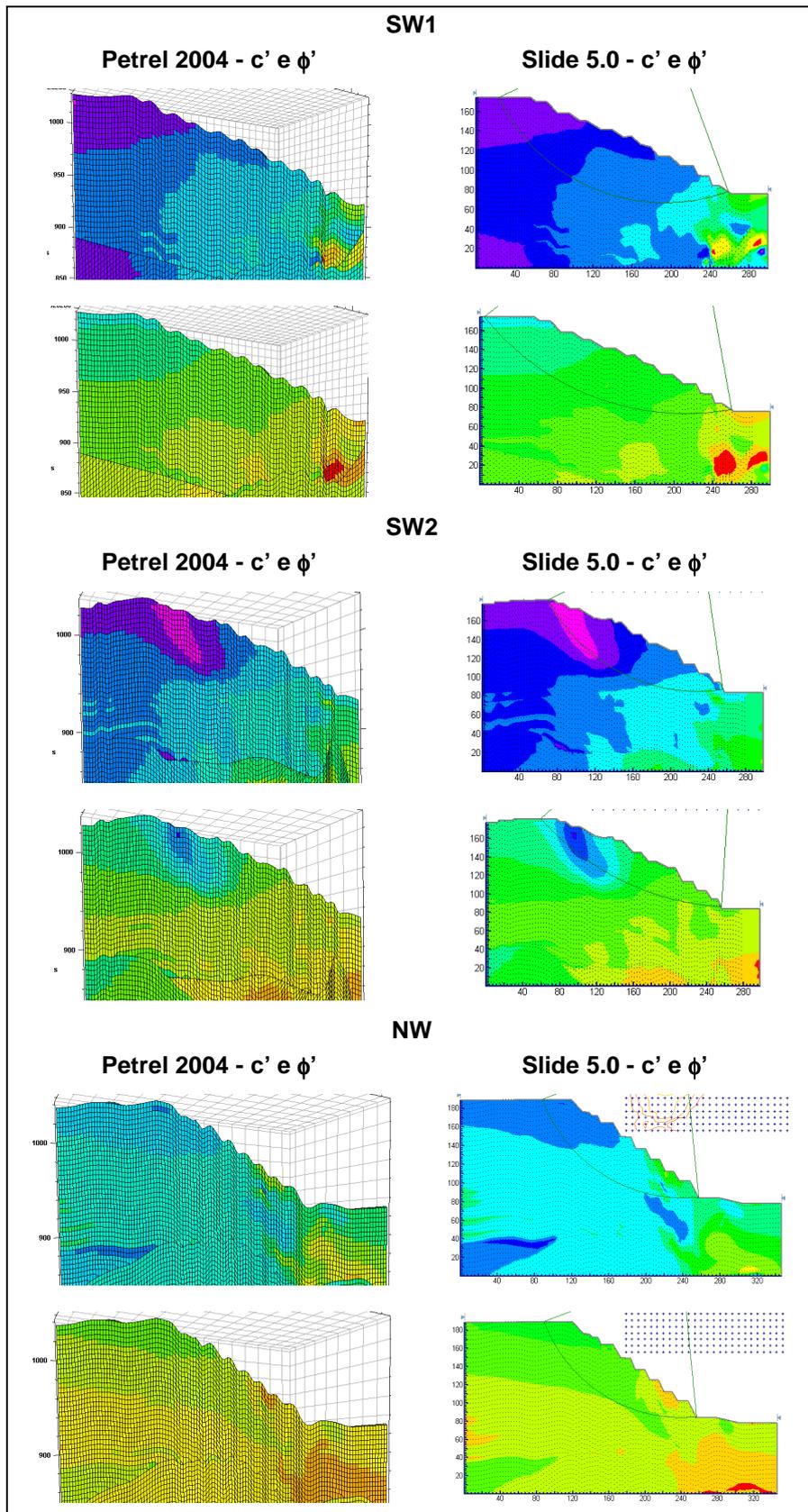


Figura 5.14 – Utilização dos parâmetros de resistência obtidos do Petrel 2004 no programa Slide 5.0.

A profundidade das seções foi até a cota 850 m, e a geometria destas foi retirada do programa AutoCAD 2004, pois os detalhes delas são perdidos na apresentação dos resultados no Petrel 2004, e o Slide 5.0 aceita a importação de arquivos de desenho com extensão .dxf, gerados pelo AutoCAD 2004. Entretanto, no Petrel 2004, as seções de informações se apresentam perpendiculares entre si, mas não totalmente perpendiculares ao local da onde se deseja obter as propriedades, pois são criadas de forma automática, de acordo com o *Grid*, e o programa não permite rotacioná-las posteriormente para uma posição desejada. Desta forma, para suavizar este problema, no início da modelagem geométrica, girou-se o *Grid* do modelo inteiro (o que é permitido) em um ângulo médio aos 3 taludes de interesse ($61,5^\circ$), de forma que estas seções ficassem o mais perpendiculares possíveis a estes, mas ainda assim, a seção SW2 gerada pelo programa se apresentou bem oblíqua em relação ao talude do setor SW2. As outras seções dos outros setores estão de forma aceitável. Para manter a coerência entre as informações geradas e a sua localização no talude, respeitou-se esta conformação na retirada da geometria no AutoCAD 2004.

Com relação ao nível d'água, de acordo com o relatório da MDGEO (2001), a mina de Morro da Mina está inserida dentro de um sistema aquífero fraturado anisotrópico, onde duas unidades aquíferas foram identificadas, e 4 nascentes foram mapeadas, 2 situadas dentro da cava, e 2 situadas nos taludes. De modo geral, este sistema é pouco expressivo, se apresentando localizado, e possuindo pouca probabilidade de sofrer influência dos córregos e nascentes ao redor da região da cava. Sendo assim, estudaram-se dois tipos de caso, em relação à água:

- Talude seco;
- Talude com um nível d'água hipotético, onde a linha freática encontra as nascentes.

Para realização das análises de estabilidade com o software Slide 5.0, foi necessária ainda a definição de camadas de materiais diferentes ao longo das seções inseridas no programa, pois o software permite que c' e ϕ' sejam assumidos pontualmente por toda uma seção, mas o peso específico da rocha (γ) não, logo, torna-se importante definir camadas de material onde cada uma possua seu próprio valor de γ . Adotou-se o seguinte procedimento para isto:

Como não se extrapolou valores de γ para o modelo todo, analisou-se qual das 5 propriedades modeladas (RQD, Q, RMR, c' , ϕ') teria uma melhor correlação com o γ , para definir-se as camadas de acordo com as divisões

geradas no Petrel 2004, e não de acordo com as posições de litologias representadas nos mapas geológicos elaborados pela empresa SBC Ltda., pois, para análises de estabilidade, mais importante do que a representação de litologias são os valores dos parâmetros de resistência distribuídos pontualmente, junto com a posição de estruturas geológicas que podem influenciar na estabilidade, assim, preferiu-se seguir a divisão das propriedades geradas pelo Petrel, e não a posição suposta para as litologias abaixo da superfície representadas nos mapas. Adotou-se a divisão gerada para ϕ' (Figura 5.15).

Verificou-se uma correlação entre os valores de γ estimados para entrada no programa RocData 4.0 e os valores de ϕ' calculados por este programa, ambos apresentados no Capítulo 3. Porém, não foram levados em conta os valores para o Minério e para o Filito, pois estes são discrepantes dos das demais rochas (Figura 5.16).

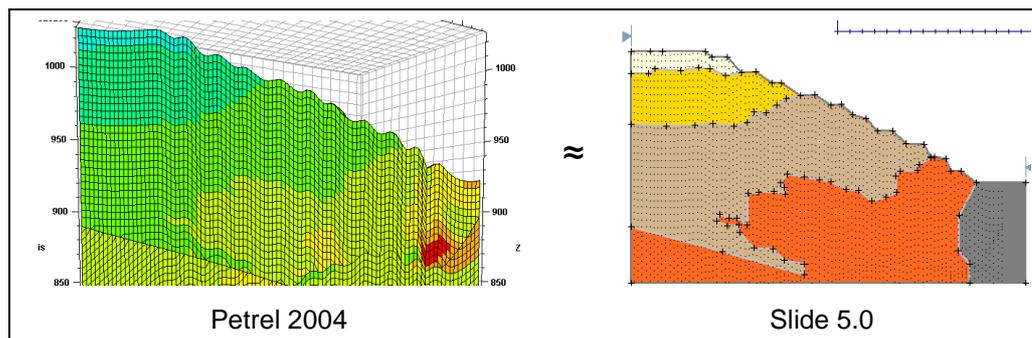


Figura 5.15 – Idealização das camadas de material no programa Slide 5.0, a partir dos resultados obtidos do programa Petrel 2004, para a propriedade ϕ' .

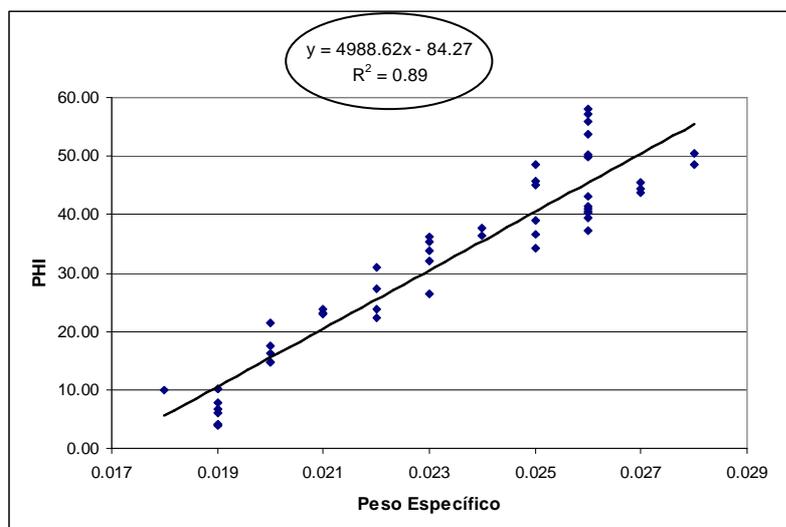


Figura 5.16 – Correlação entre os valores de ϕ' ($^{\circ}$) e γ (MN/m^3) assumidos para as rochas da mina de Morro da Mina.

A partir das divisões de ϕ' geradas pelo Petrel 2004, definiram-se as camadas de material no Slide 5.0, e os valores de γ para estas camadas foram calculados com utilização da correlação anterior e dos valores médios de ϕ' obtidos destas divisões no Petrel 2004, conforme mostra o esquema da Figura 5.17.

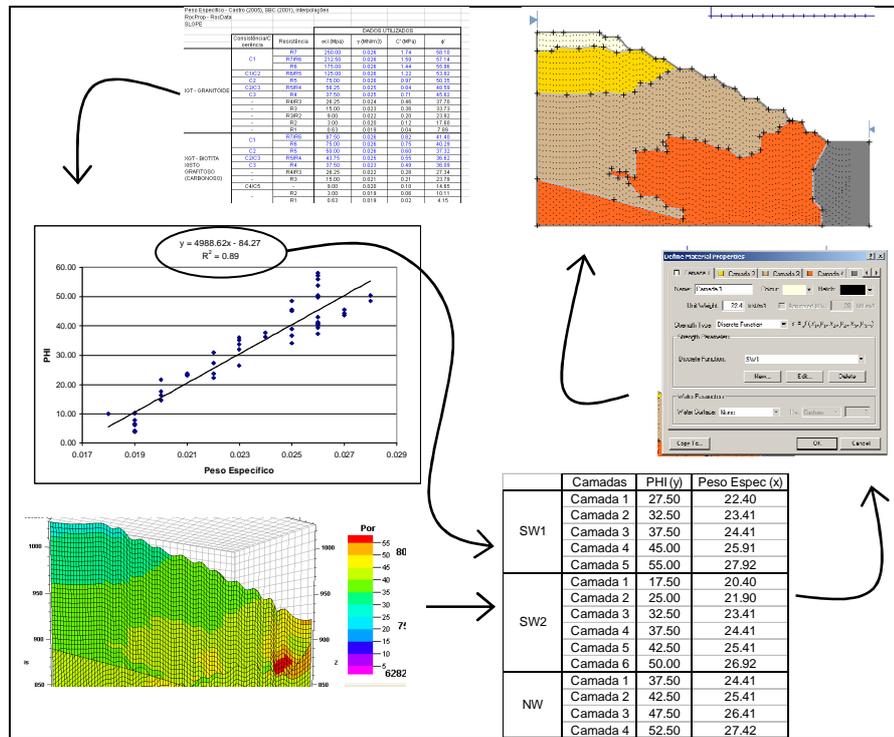


Figura 5.17 – Esquema ilustrativo das etapas de definição de γ para as camadas de material no programa Slide 5.0.

O programa Slide 5.0 oferece diversos métodos de cálculo para as análises de estabilidade, assim, utilizaram-se os seguintes métodos consagrados: Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Spencer, e Morgenstern-Price. A Tabela 5.4 resume os casos estudados, e nas Figuras 5.18 a 5.20 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 5.4 – Resumo dos casos estudados.

Seções	Talude Seco	Talude com Nível d'água
SW1	Circular - Global	Circular - Bancada 2
	Circular - Bancada 1	Circular - Bancada 3
SW2	Circular - Global	Circular - Bancada 1
	Circular - Bancada 2	Circular - Global
NW	Circular - Global	Circular - Bancada 1
	Não-Circular - Global	Circular - Bancada 2

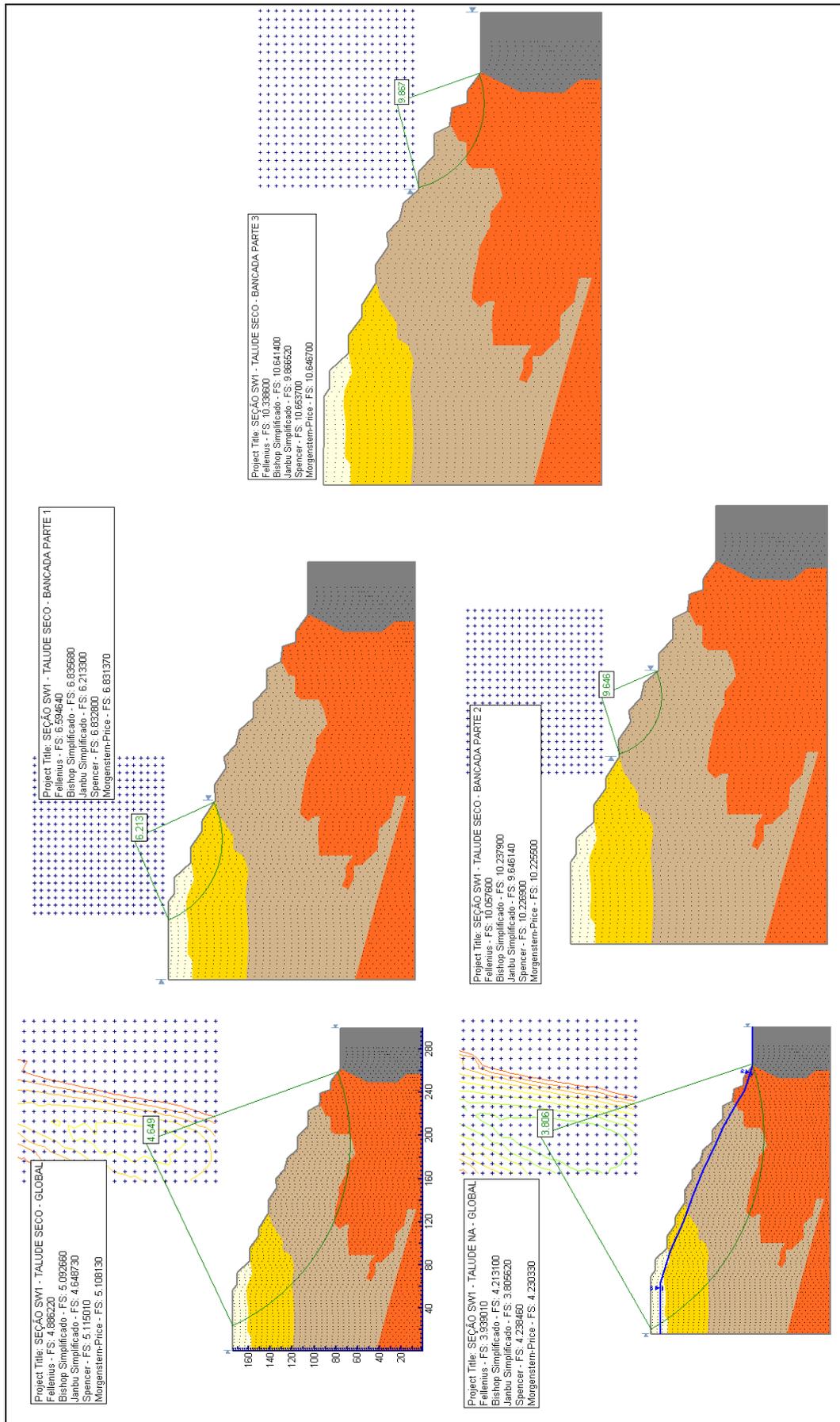


Figura 5.18 – Resultados das análises de estabilidade para a Seção SW1.

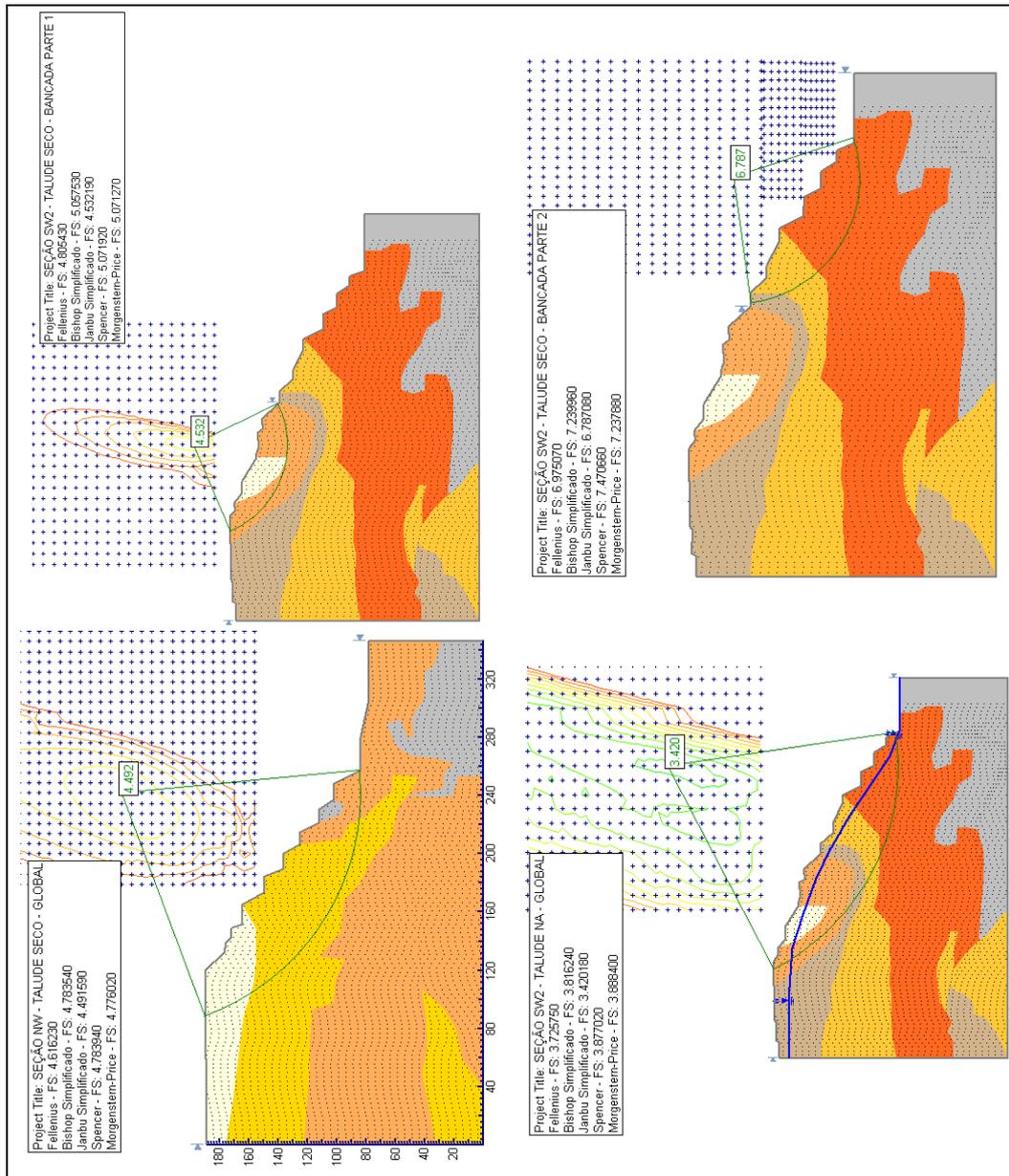


Figura 5.19 – Resultados das análises de estabilidade para a Seção SW2.

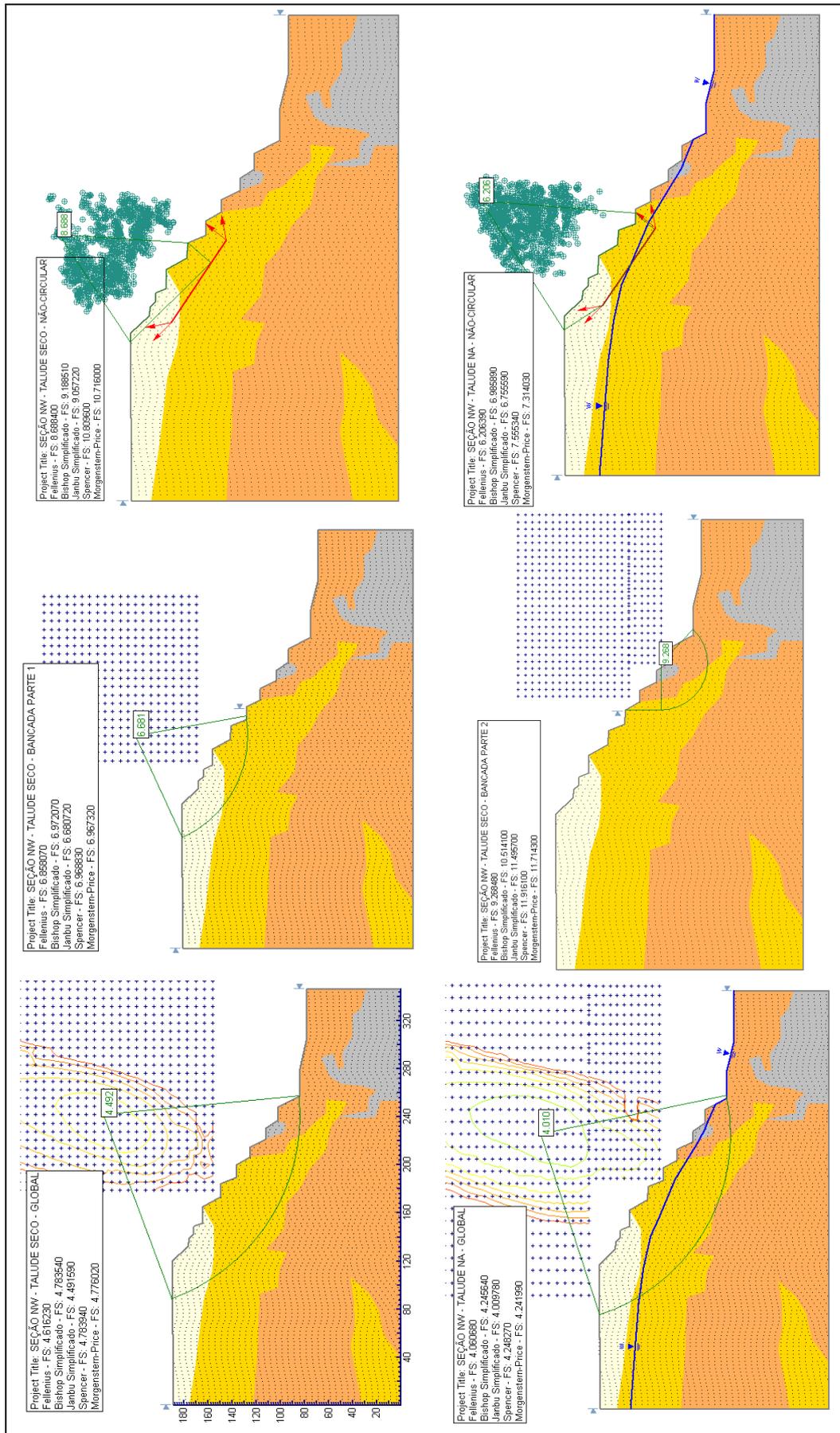


Figura 5.20 – Resultados das análises de estabilidade para a Seção NW.

5.3.1. Análise Crítica dos Resultados

Obtiveram-se Fatores de Segurança extremamente elevados (entre 3,420 e 11,916), ou seja, de acordo com estes resultados não é esperado ocorrerem rupturas, o que não condiz com a realidade, pois na região superior da seção SW1 já ocorreu uma ruptura circular em nível de bancadas. Os resultados elevados de FS podem ser devido aos seguintes fatores, apresentados em ordem decrescente de relevância:

- Os valores dos parâmetros de resistência estimados: conforme exposto no Capítulo 3, foi necessário estimar os parâmetros devido a não existência de ensaios de laboratório, porém obtiveram-se valores de c' muito elevados, o que torna as estimativas pouco conservadoras, contribuindo fortemente para a elevação dos FS;
- A geometria das seções analisadas: conforme já explicado, não se trabalhou com as inclinações verdadeiras das bancadas, pois as seções não estão completamente perpendiculares aos taludes, gerando assim bancadas com inclinações mais suaves que as reais;
- O resultado da Krigagem: de acordo com o mencionado anteriormente, a influência da interpolação pode ser observada na Figura 5.21, onde estão representados juntos os resultados do *Upscaling* e da Krigagem. Esperava-se que a camada de material fraco (cor rosa) se distribuisse na região onde os furos apresentam esta informação, mas isto não ocorreu, acreditando-se que seja devido aos valores pequenos de alcances dos semivariogramas;
- A distribuição de camadas adotadas: por ser baseada nas divisões geradas pelo Petrel 2004, este motivo tem vínculo com o do resultado da Krigagem.

Com relação a não perpendicularidade das seções aos taludes, este problema poderia ter sido evitado criando-se modelos separados para cada setor da mina, onde cada um teria uma definição diferente de *Grid*, e assim, estas seções poderiam ficar exatamente perpendiculares aos taludes da cava da mina. Porém, a análise geoestatística poderia ser afetada, pois devido à distribuição espacial dos furos de sondagem, alguns modelos possuirão mais furos que os outros, influenciando no resultado final total, que poderá possuir mais regiões com informações pouco confiáveis. A utilização de modelos separados fica como

sugestão para futuras pesquisas, sendo interessante testar em uma distribuição espacial de furos mais regular que a apresentada no presente trabalho.

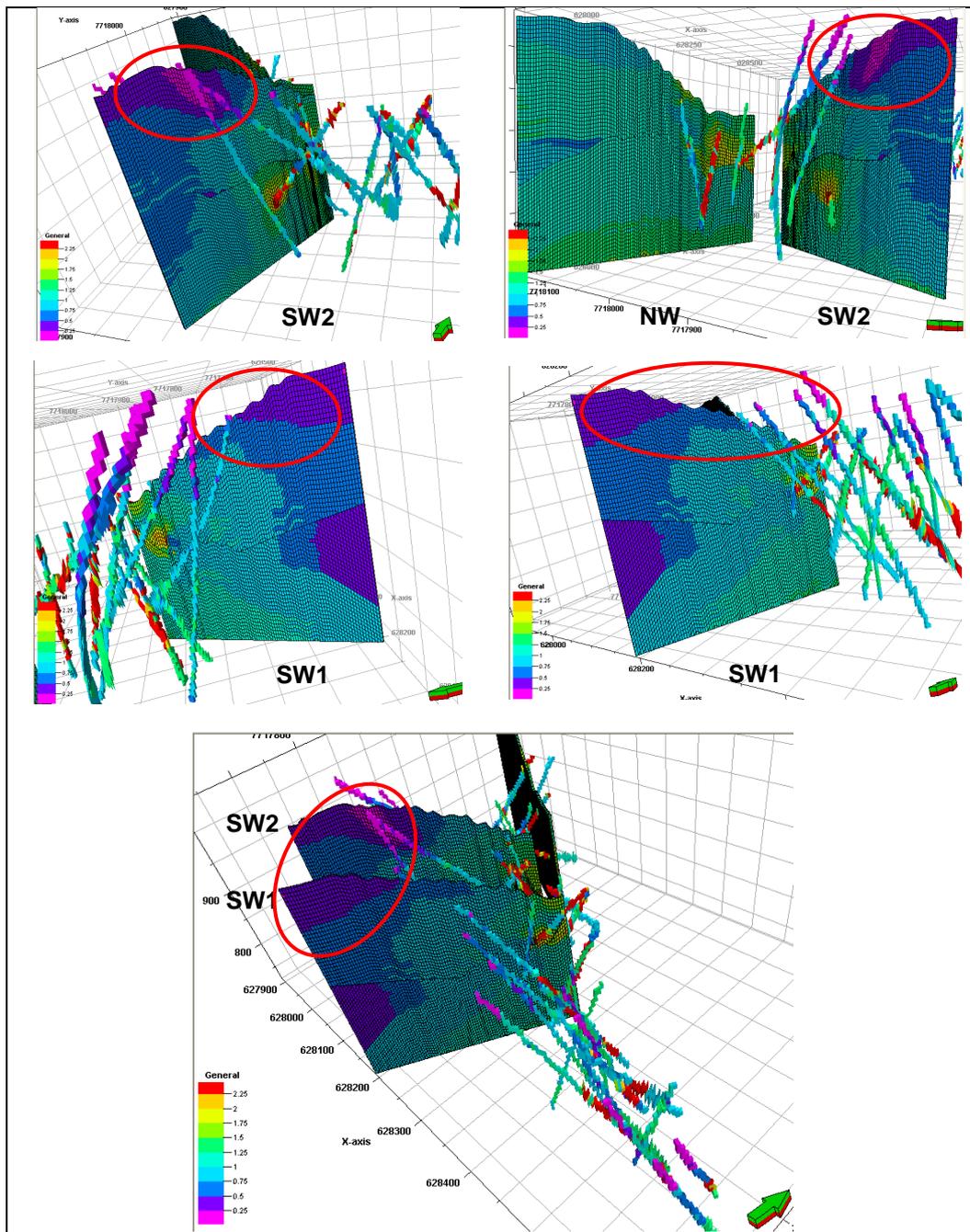


Figura 5.21 – Visualização dos resultados do *Upscaling* e da interpolação por Krigagem da propriedade c' .

Na etapa de definição das camadas de material, poder-se-ia ter usado os valores de σ_{ci} (estimados para entrada no programa RocData 4.0) para obter uma correlação com γ , porém, depois seria necessário verificar qual das 5 propriedades modeladas pelo Petrel 2004 representaria a possível divisão de σ_{ci}

caso tivesse sido interpolado, e ainda obter uma correlação com ele, o que em comparação com o procedimento adotado seria menos exato, por ser mais indireto.

Os resultados de Fatores de Segurança da SBC (2001) possuem ordem de grandeza coerentes com o que geralmente se obtém na prática, o que não foi alcançado no presente trabalho, entretanto, não foi possível averiguar a geometria e as camadas de material adotadas na época para as análises no Slide 5.0, pois estas informações não se encontravam no conjunto obtido.