



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS GEOLÓGICAS  
E ESTIMATIVAS DA RESISTÊNCIA AO  
CISALHAMENTO DAS DESCONTINUIDADES NA  
MINERAÇÃO DE COBRE DE TINTAYA, PERÚ.**

Arturo Fausto Maldonado Neyra

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 208

BRASÍLIA

2006

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS GEOLÓGICAS E  
ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS  
DESCONTINUIDADES NA MINERAÇÃO DE COBRE DE  
TINTAYA, PERÚ.**

Arturo Fausto Maldonado Neyra

Dissertação de Mestrado em Geologia  
Nº 208

Orientador:

Prof. Dr. José Oswaldo de Araújo Filho (Geo/IG, UnB)

Examinadores:

Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses (Geo/IG, UnB)

Profa. Dra. Noris Costa Diniz (Enc/FT, UnB)

Brasília, 6 de Junho de 2006.

---

# DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a todas as pessoas que acreditam que a vida tem um propósito maior que só as nossas aspirações.*

---

## AGRADECIMENTOS

Quero, finalmente, expressar a minha gratidão a meu orientador o Professor José Oswaldo de Araújo Filho, pela sua amizade, dedicação e paciência empregada durante todo este tempo. Um agradecimento especial endereço ao Professor André Pacheco de Assis, pelas suas sugestões feitas durante nossas conversações.

Aos professores do Instituto de Geociências da UnB. Em particular a Paulo Roberto Meneses e Luiz Del Rey Silva, pelos conhecimentos transmitidos.

Ao programa CAPES pela ajuda financeira, com a bolsa de Mestrado fornecida durante o tempo de estudos.

Aos meus colegas de turma, em particular a Marcus, Gloria, Carlos, Cecília, Miriela, Celestino, Takato, Alejandro Elias, Daniel, Wesley, Luciano, pelo apoio incondicional demonstrado.

A Bhpbilliton Tintaya, pela licença de trabalho outorgada durante o tempo do mestrado, e por permitir a realização da pesquisa com foco na mina Tintaya. Em particular agradeço a Warren Hitchcock, Richard Hasler, Paul Dupree, Jorge Vargas, Jaap Zwan, Franklin Cisneros, Willmer Cancho, César Muñoz, Jaime Yagua, Cláudio Usca e Yovel Quispe, pelo apoio e a colaboração permanente.

A Ivonne e Carmen, pela ajuda brindada, especialmente nos momentos difíceis. A Yamily, Irene, Lucíola, Viviana e Carlos pelo apoio permanente, e aos meus amigos, Luis, Omar, Salome e Verônica, por compartilhar momentos de lembrança e alegria.

A minha família, meus pais Arturo e Dora, meus irmãos Germán, Luis, María e Luisa, por alentar cada dia minha vida.

Ao mais importante, Deus, por me permitir ter vida e continuar com bondade para prosseguir.

Capítulo		Página
<b>1</b>	<b>Introdução</b>	
1.1	Objetivos	2
1.2	Metodologia de trabalho	2
1.3	Organização da dissertação	5
1.4	Localização e acesso	6
1.5	Geomorfologia	7
1.6	Clima e vegetação	8
1.7	Historia da mineração	8
<b>2</b>	<b>Geologia Geral</b>	
2.1	Contexto geológico do Perú	9
2.2	Geologia regional	13
2.2.1	Historia geológica e estratigrafia	13
2.2.2	Rochas intrusivas do batólito de Abancay	15
2.2.3	Geologia estrutural	15
2.3	Geologia do Distrito Mineiro de Tintaya	16
2.3.1	Estratigrafia	17
2.3.2	Rochas intrusivas e evolução magmática	20
2.3.3	Alteração e mineralização	22
2.3.4	Geologia estrutural	22
<b>3</b>	<b>Geologia Estrutural</b>	
3.1	Introdução	24
3.2	Lineamentos estruturais	26
3.2.1	Lineamentos regionais	26
3.2.2	Lineamentos no distrito	26
3.3	Estruturas do Distrito Mineiro Tintaya	29
3.3.1	Sumário	29
3.3.2	Definição de domínios	30
3.3.3	Domínio nordeste	33
3.3.4	Domínio central	35
3.3.5	Domínio norte	40
3.3.6	Domínio sudoeste	43
3.4	Estruturas geológicas no interior da mina	48
3.4.1	Sumário	48
3.5	Evolução estrutural	59
<b>4</b>	<b>Caracterização Geomecânica das Descontinuidades</b>	
4.1	Introdução	62
4.1.1	Geometria dos taludes	63
4.1.2	Trabalhos anteriores	64
4.1.3	Mapeamento geotécnico	64
4.2	Descrição quantitativa de descontinuidades	66
4.2.1	Definição de Setores	67
4.2.2	Famílias de juntas	71

4.2.3	Famílias de camadas	73
4.2.4	Família de falhas secundárias e falhas maiores	73
4.3	Análise cinemática	78
<b>5</b>	<b>Estimativa da Resistência ao Cisalhamento das Descontinuidades</b>	
5.1	Introdução	83
5.2	Teoria da resistência ao cisalhamento	83
5.2.1	Superfícies rugosas	86
5.2.2	Descontinuidades preenchidas	88
5.3	Metodologia utilizada	88
5.3.1	Descontinuidades rugosas	89
5.3.2	Descontinuidades preenchidas	91
5.4	Resultados prévios	92
5.4.1	Ângulo de atrito básico	92
5.4.2	Cálculo do ângulo de atrito residual e do “JCS”	93
5.4.3	Estimativa do JRC	96
5.5	Estimativa da resistência ao cisalhamento	97
5.5.1	Famílias de juntas	97
5.5.2	Famílias de camadas	101
5.5.3	Falhas secundárias e singulares	102
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	
6.1	Considerações finais	105
6.1.1	Contexto estrutural de Tintaya	105
6.1.2	Caracterização geomecânica	107
6.1.3	estimativa da resistência ao cisalhamento	108
6.2	Conclusões	109
6.3	Sugestões para futuras pesquisas	110
	<b>Referências Bibliográficas</b>	112
	<b>Apêndice A: Mapas Elaborados</b>	116
	<b>Apêndice B: Tabelas e Formato de Mapeamento Geotécnico</b>	124
	<b>Apêndice C: Projeções Estereográficas dos Taludes da Mina de Tintaya</b>	132

---

# LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1.1:</b> Composição da imagem radar, com vista em perspectiva da região sul do Perú.	3
<b>Figura 1.2:</b> Mapa de localização do distrito mineiro de Tintaya, no extremo sudeste do cinturão Andahuaylas – Yauri no Altiplano Andino do Perú.	3
<b>Figura 1.3:</b> Mapa de localização da área de pesquisa.	6
<b>Figura 1.4:</b> Fotografia da área de Antapaccay, onde se mostra a morfologia típica da Peneplanície de Yauri.	7
<b>Figura 1.5:</b> Fotografia panorâmica da operação mineira de Tintaya.	8
<b>Figura 2.1:</b> Unidades geomorfológicas do Perú mostrando as deflexões de Abancay e Huancabamba (modificado de INGEMMET, 1995).	10
<b>Figura 2.2:</b> Mapa composto da geologia regional baseada nos quadrângulos geológicos da Carta Nacional do Perú.	11
<b>Figura 2.3:</b> Coluna estratigráfica regional correspondente à área mostrada no mapa da Fig.2.2..	12
<b>Figura 2.4:</b> Mapa geológico simplificado da área do distrito mineiro mostrando os depósitos de Antapaccay, Quéchuas, Coroccohuayco e Tintaya.	16
<b>Figura 2.5:</b> Exemplo de forte grau de fraturamento do quartzo–arenito da Formação Soraya (foto da encosta NW do Cerro Condorsayana)	18
<b>Figura 2.6:</b> Pelito vermelho com intercalações de lamito e arenito cinza de grau fino da Formação Mara (foto da encosta leste do Cerro Condorsayana)	18
<b>Figura 2.7:</b> Calcários com nódulos de silxilito ferruginoso da Formação Ferrobamba (foto na localidade de Huinipampa).	18
<b>Figura 2.8:</b> Andesitos do Grupo Barroso exposto na localidade de Antapaccay.	19
<b>Figura 2.9:</b> Vista panorâmica dos depósitos lacustres e dos sedimentos quaternários da região do Rio Salado, ao leste do distrito mineiro de Tintaya, Peru.	19
<b>Figura 2.10:</b> Mapa geológico da mina Tintaya, mostrando a localização das seqüências sedimentares cretáceas, os escarnitos e as intrusões ígneas. (Maldonado, 2005)	21
<b>Figura 3.1:</b> Diagramas ilustrativos da evolução tectônica dos Andes.	25
<b>Figura 3.2:</b> Ilustração das áreas de mapeamento anteriores aproximadas, e localização dos afloramentos visitados.	25
<b>Figura 3.3:</b> (a) Imagem Radar do ano 2002, utilizada para traçar os lineamentos regionais e Mapa geológico simplificado da área regional (Ingemmet,1996)	27
<b>Figura 3.3:</b> (c) Diagrama de roseta para todos os lineamentos, (d) digramas de roseta referentes ao comprimento dos traços > 10 km, (e) >1 km e < 10 km, (f) < 1 km (f).	28

<b>Figura 3.4:</b>	(a) Área do Distrito coberta pelas fotografias aéreas, do ano 1997 na escala ~1:15000, fotografadas pela empresa Horizons South América S.A.	28
<b>Figura 3.4:</b>	(b) Diagrama de roseta para todos os lineamentos. Digramas de roseta referentes a comprimento dos traços: (c) > 1 km (c), > 0.1 km, e (e) < 1 km (d), e < 0.1 km (e).	29
<b>Figura 3.5:</b>	(b): Perfis da área do Distrito Mineiro de Tintaya elaborados utilizando os dados estruturais coletados e o mapa geológico reinterpretado com base no mapa disponível do Grupo Brownfields.	32
<b>Figura 3.6:</b>	Anticlinal recumbente localizado entre o Cerro Chapi e a Quebrada Ccaccamayo.	34
<b>Figura 3.7:</b>	Estereograma das camadas do anticlinal recumbente do cerro Chapi.	34
<b>Figura 3.8:</b>	Camadas de quartzo arenito de grão médio a fino da Formação Soraya.	36
<b>Figura 3.9:</b>	Superfícies de falha típicas registradas nos quartzo arenitos da Formação Soraya.	37
<b>Figura 3.10:</b>	Falha de atitude 65/260 com dois movimentos relativos diferenciados, o primeiro dextral com estrias 175°/12° e o segundo movimento relativo inverso com estrias 286°/62°.	37
<b>Figura 3.11:</b>	Fotografias da falha Condorsayana.	38
<b>Figura 3.12:</b>	Estereogramas das falhas medidas no Domínio Central nos afloramentos da Formação Soraya.	39
<b>Figura 3.13:</b>	Estereograma (a) e diagrama de roseta (b) das juntas medidas no quartzo arenito.	40
<b>Figura 3.14:</b>	Estereograma das juntas medidas nos afloramentos de diorito localizados no Cerro Supo.	40
<b>Figura 3.15:</b>	Dobramentos do Domínio Norte.	41
<b>Figura 3.16:</b>	Exemplo de falha rúptil registrada no calcário da Formação Ferrobamba.	42
<b>Figura 3.17:</b>	Estereogramas das falhas medidas no Domínio Norte.	43
<b>Figura 3.18:</b>	Dobramentos do Domínio Sudoeste.	44
<b>Figura 3.19:</b>	Vista de anticlinal quilométrico localizado no Cerro Saihuaccata.	45
<b>Figura 3.20:</b>	Falhas no calcário da Formação Ferrobamba.	46
<b>Figura 3.21:</b>	Veios de calcita.	47
<b>Figura 3.22:</b>	Estereogramas referentes a: Camadas, planos de clivagem e veios medidos na caverna Juto.	48
<b>Figura 3.23:</b>	Mapa geológico da área da Mina, baseado no mapa elaborado pelo Departamento de Geologia de Tintaya (a). Mapa estrutural simplificado ilustrando a disposição das dobras e falhas (b).	49
<b>Figura 3.24:</b>	Perfis da área de Mina elaborados utilizando os dados estruturais coletados e os contactos litológicos interpretados pelo Departamento de Geologia de Tintaya.	50
<b>Figura 3.25:</b>	Vista da área norte de Tajo.	51
<b>Figura 3.26:</b>	Vista da área sul de Tajo.	52

<b>Figura 3.27:</b>	Estereogramas ilustrativos de: Camadas na área sudeste de Chabuca com atitude média (35°/192°) (a). Sinclinal com eixo 310/05 localizado no extremo sudoeste de Chabuca (b). Anticlinal pouco definido de eixo 161°/12°, localizado a noroeste de Chabuca (c).	53
<b>Figura 3.28:</b>	Estereogramas ilustrando a ocorrência dos sistemas de falhas nos litotipos hornblenda diorito (a), calcário (b) e monzonito (c). Diagrama explicativo dos sistemas de falhas (d).	54
<b>Figura 3.29:</b>	Falha de atitude 83°/325° em monzonito intemperizado localizada na coordenada 251790 E, 8351796 N, expondo um traço ~30m, 25cm de preenchimento composto de argila, rocha triturada e óxidos de ferro (a). Falha em calcário de atitude 73°/080°, localizada em 250983 E, 8350693 N expondo um traço ~30m e uma espessura de preenchimento de ~1m composto de rocha triturada (calcário) e argila (b).	55
<b>Figura 3.30:</b>	Visada para a superfície plana da falha Tito, em monzonito, com atitude 78°/310°.	56
<b>Figura 3.31:</b>	Estereogramas ilustrando a ocorrência das famílias de juntas nos litotipos hornblenda diorito (a), calcário (b) e monzonito (c). Diagrama explicativo das famílias de juntas (d).	57
<b>Figura 3.32:</b>	Histograma da persistência em metros (comprimento do traço) da família de juntas NE em monzonito (a). Histograma do espaçamento da família de juntas ~NS em monzonito (b).	58
<b>Figura 3.33:</b>	Bloco - diagramas ilustrando a evolução estrutural do Distrito Mineiro de Tintaya.	61
<b>Figura 4.1:</b>	Área de escavação e topografia da mina Tintaya. Indicando os nomes locais de Tajo e Chabuca, o limite dos taludes, as rodovias de terra ou rampas de acesso e alguns níveis de referência das bancadas.	63
<b>Figura 4.2:</b>	Mapa de localização das janelas de amostragem utilizadas no mapeamento geotécnico atual.	65
<b>Figura 4.3:</b>	Mapeamento em janelas de amostragem.	65
<b>Figura 4.4:</b>	Ilustração de um maciço rochoso, indicando as características geomecânicas observadas nas discontinuidades (Wyllie, 1999).	66
<b>Figura 4.5:</b>	Diagrama ilustrando a metodologia utilizada na descrição quantitativa de discontinuidades.	67
<b>Figura 4.6:</b>	Mapa com as unidades litológicas simplificadas da área da mina, com os nomes utilizados na lavra para os dois setores da mina.	68
<b>Figura 4.7:</b>	Mapa com a delimitação de Setores. Os números arábicos utilizados no texto descrevem cada setor.	68
<b>Figura 4.8:</b>	Estereograma para as famílias de juntas do setor 1. Notar valores de orientação média ajustados, através do fator de correção de Terzaghi (w).	70
<b>Figura 4.9:</b>	Exemplos de discontinuidades observadas dentro da mina.	76
<b>Figura 4.10:</b>	Alguns preenchimentos de falhas em monzonito.	77
<b>Figura 4.11:</b>	Principais tipos de ruptura de blocos em taludes, e condições estruturais que causam esses tipos de rupturas.	78
<b>Figura 4.12:</b>	Crerios utilizados na análise cinemática de taludes.	79

<b>Figura 4.13:</b>	Estereograma para a análise cinemática das famílias de juntas do setor 1.	80
<b>Figura 4.14:</b>	Exemplos de rupturas nos taludes de bancada, condicionadas pelas famílias de juntas: (a, b) rupturas planas no maciço de monzonito do setor 4, (c) ruptura por tombamento em blocos no maciço de monzonito do setor 3, e (d) ruptura em cunha no maciço de calcário do setor 7.	80
<b>Figura 5.1:</b>	Relação entre as tensões de cisalhamento e normal sob uma superfície de ruptura para cinco diferentes condições geológicas (Wyllie & Mah, 2004).	84
<b>Figura 5.2:</b>	Definição de resistência ao cisalhamento de uma superfície de descontinuidade com preenchimento (Hoek & Bray, 1994; Wyllie & Mah, 2004).	85
<b>Figura 5.3:</b>	Efeito da rugosidade e do esforço normal sob o ângulo de atrito da superfície de descontinuidade (Wyllie & Mah, 2004).	86
<b>Figura 5.4:</b>	Perfis de rugosidade padrão para a estimativa visual do JRC na escala de 10 cm (Barton & Choubey, 1977).	90
<b>Figura 5.5:</b>	Procedimento para a medição da rugosidade de uma superfície de descontinuidade (Tse & Cruden, 1979).	90
<b>Figura 5.6:</b>	Ensaio de plano inclinado para determinar o ângulo de atrito básico.	92
<b>Figura 5.7:</b>	Ensaio de rebote utilizando o martelo de Schmidt.	93
<b>Figura 5.8:</b>	Diagrama de regressão para os dados da tabela 5.3.	95
<b>Figura 5.9:</b>	Fotografia dum testemunho de calcário contendo uma superfície natural de junta e perfil digital aproximado da rugosidade, da mesma fotografia, com linhas verticais espaçadas 1 mm cada.	96
<b>Figura 5.10:</b>	Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento para as juntas em monzonito e calcário, definidas para os valores estimados e para os valores sugeridos em estudos anteriores.	100
<b>Figura 5.11:</b>	Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento para os planos de acamamento no calcário.	102
<b>Figura 5.12:</b>	Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento para as falhas em geral.	104
<b>Figura 6.1:</b>	Diagrama ilustrando a mudança na direção de convergência das placas, no intervalo de tempo do Cretáceo Superior à época atual. Modificado de Jaillard, G. et al. (2000).	107
<b>Figura A.1</b>	Lineamentos regionais traçados numa imagem radar	130
<b>Figura A.2</b>	Lineamentos traçados utilizando algumas fotografias aéreas de escala 1:15000	131
<b>Figura A.3</b>	Mapa de localização de pontos de mapeamento na área do distrito mineiro de Tintaya.	117
<b>Figura B2.1:</b>	Formato elaborado para o mapeamento geotécnico em janelas de amostragem.	118
<b>Figura B2.2:</b>	Mapa de localização das janelas de mapeamento geotécnico.	119
<b>Figura C1.1:</b>	Estereogramas da definição de famílias do setor 1.	133
<b>Figura C1.2:</b>	Estereogramas da definição de famílias do setor 2.	133
<b>Figura C1.3:</b>	Estereogramas da definição de famílias do setor 3.	134
<b>Figura C1.4:</b>	Estereogramas da definição de famílias do setor 4.	134

<b>Figura C1.5:</b>	Estereogramas da definição de famílias do setor 5.	135
<b>Figura C1.6:</b>	Estereogramas da definição de famílias do setor 6.	136
<b>Figura C1.7:</b>	Estereogramas da definição de famílias do setor 7.	137
<b>Figura C1.8:</b>	Estereogramas da definição de famílias do setor 8.	138
<b>Figura C1.9:</b>	Estereogramas da definição de famílias do setor 9.	139
<b>Figura C2.1:</b>	Análise cinemática do setor 1.	139
<b>Figura C2.2:</b>	Análise cinemática do setor 2.	140
<b>Figura C2.3:</b>	Análise cinemática do setor 3.	140
<b>Figura C2.4:</b>	Análise cinemática do setor 4.	141
<b>Figura C2.5:</b>	Análise cinemática do setor 5.	142
<b>Figura C2.6:</b>	Análise cinemática do setor 6.	142
<b>Figura C2.7:</b>	Análise cinemática do setor 7.	143
<b>Figura C2.8:</b>	Análise cinemática do setor 8.	144
<b>Figura C2.9:</b>	Análise cinemática do setor 8.	145
<b>Figura C2.10:</b>	Análise cinemática do setor 9.	146

---

## LISTA DE TABELAS

	Página
<b>Tabela 4.1:</b> Resumo da geometria da mina em relação aos setores definidos.	69
<b>Tabela 4.2:</b> Famílias de Juntas e estatísticas das características geomecânicas.	72
<b>Tabela 4.3:</b> Famílias de planos de acamamento e estatística das características geomecânicas.	73
<b>Tabela 4.4:</b> Famílias de falhas secundárias e estatísticas das suas características geomecânicas.	74
<b>Tabela 4.5:</b> Falhas com persistência > 30m registradas individualmente e suas características geomecânicas.	75
<b>Tabela 4.6:</b> Resultados da análise cinemática das descontinuidades presentes na mina Tintaya.	81
<b>Tabela 5.1</b> Unidade de peso de rocha para os litotipos da mina Tintaya (extraído do modelo geoestatístico, 2001).	91
<b>Tabela 5.2</b> Valores de resistência ao cisalhamento para descontinuidades com espessura de preenchimento importante. Modificado de Hoek e Bray (1994).	92
<b>Tabela 5.3</b> Resultado do ensaio de inclinação utilizando testemunhos e blocos com superfícies lisas.	93
<b>Tabela 5.4</b> Resultados de ensaios de campo com o martelo de Schmidt em calcário e monzonito e razão $r/R$ (novas medições).	94
<b>Tabela 5.5</b> Resultados do cálculo do JRC0 utilizando os perfis digitalizados.	96
<b>Tabela 5.6 A</b> Valores estimados de resistência ao cisalhamento para as famílias de juntas	98
<b>Tabela 5.6 B</b> Resistência ao cisalhamento de juntas (valores experimentais)	99
<b>Tabela 5.7</b> Valores estimados de resistência ao cisalhamento para os planos de acamamento.	101
<b>Tabela 5.8</b> Valores estimados de resistência ao cisalhamento para as falhas secundárias.	103
<b>Tabela B1.1:</b> Perfis típicos de rugosidade (modificado de ISRM, 1978).	125
<b>Tabela B1.2:</b> Perfis de rugosidade e valores de JRC (ISRM, 1978).	126
<b>Tabela B1.3:</b> Classificação do parâmetro $J_r$ para o índice $Q$ (modificado - Barton et al., 1974)	127
<b>Tabela B1.4:</b> Classificação do parâmetro $J_a$ para o índice $Q$ (modificado - Barton et al., 1974)	127
<b>Tabela B1.5:</b> Classificação qualitativa do grau de alteração de descontinuidades (modificado - ABGE/CBMR, 1983)	128
<b>Tabela B1.6:</b> Permeabilidade e conteúdo de água nas descontinuidades (ISRM, 1981)	128
<b>Tabela B1.7:</b> Ensaio manuais para estimar a resistência de materiais de preenchimento coesivos (modificado - ABGE/CBMR, 1983).	129
<b>Tabela B1.8:</b> Ensaio manuais para estimar a resistência de materiais rochosos (modificado - ABGE/CBMR, 1983)	129
<b>Tabela B1.9:</b> Classificação do tamanho de partícula dos preenchimentos de Wentworth (modificado - ISRM, 1981).	129

# LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

$\alpha$	: Ângulo de inclinação
ABGE	: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia
$\alpha_d$	: Direção de mergulho da descontinuidade
$\beta$	: Mergulho da descontinuidade
C	: Coesão
CBMR	: Comitê Brasileiro de Mecânica de Rochas
$\delta$	: Deslocamento por cisalhamento
Dip	: Mergulho
Dipdir	: Direção de Mergulho
E	: Leste
$\phi$	: Ângulo de atrito
f/m	: Frequência de descontinuidades
$\phi_b$	: Ângulo de atrito básico
$\phi_p$	: Ângulo de atrito de pico
$\phi_r$	: Ângulo de atrito residual
$\gamma$	: Unidade de peso de rocha
H	: Altura do talude
i	: Ângulo efetivo de rugosidade
INGEMMET	: Instituto de Geología, Minería y Metalurgia (Perú).
ISRM	: International Society of Rock Mechanics
Ja	: Índice de alteração de paredes do Sistema – Q
JCS	: Resistência à compressão não confinada da parede de junta
Jr	: Índice de rugosidade do Sistema – Q
JRC	: Coeficiente de rugosidade de Juntas
KN	: Quilonewton
kPa	: Quilopascal
L	: Comprimento
M.G.R.	: Mapeamento Geológico regional
$m^3$	: Metro cúbico
MPa	: Megapascal
N	: Norte
n	: Número de dados
r	: Rebote do martelo de Schmidt em descontinuidade
R	: Rebote do martelo de Schmidt em rocha fresca
S	: Sul
$\sigma$	: Tensão normal
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	: Tensões principais
$\tau$	: Tensão de cisalhamento
tan	: Função tangente
$\tan^{-1}$	: Função inversa de tangente ou ATAN
W	: Oeste
$\psi_i$	: Ângulo de mergulho da linha de intersecção de 2 descontinuidades

**Nota:** Utiliza-se a divisão decimal indicada por ponto em vez de vírgula: e.i. 0.5 em vez de 0,5.

No sul do Perú, no extremo sudoeste da Cordilheira Ocidental Andina, localiza-se o Distrito Mineiro de Tintaya, no qual ocorrem vários depósitos de escarnito contendo Cobre, sendo um deles o depósito de Tintaya, onde atualmente desenvolve-se a operação mineira, e centraliza-se a pesquisa desta dissertação. No *Contexto Geológico*, tanto na área do Distrito, quanto na Mina Tintaya, ocorrem unidades litológicas sedimentares e ígneas, cujas idades abrangem desde o período Cretáceo até Quaternário. O mesmo se dá com as estruturas geológicas rúpteis e dúcteis, com características geométricas e cinemáticas próprias de uma história estrutural complexa. Neste cenário geológico, defini quatro domínios lito-estruturais maiores, estabelecendo, com base nos lineamentos e no mapeamento estrutural da área do Distrito, que existe repetição dos padrões estruturais de dobras, falhas e juntas, a partir da escala regional do Distrito até a escala de detalhe na mina. Destacando estão os padrões NNW – NW e NS, por serem próprios de dobras e cavalgamentos associados, e os padrões NE e ~EW, como próprios de estruturas rúpteis. Contudo, ocorrem estruturas rúpteis nas tendências NW e NS, assim como algumas dobras de orientação EW na área. Concluo que a história geológica deve incluir, pelo menos, quatro fases de deformação, coerentes com a evolução Andina. Já no *Contexto Geotécnico*, dentro da área da mina, as unidades litológicas e a geologia estrutural formam diferentes setores, os quais têm problemas de estabilidade de taludes com um forte controle estrutural. Esses antecedentes motivaram a realização de um mapeamento geotécnico, com base na descrição do *Sistema - Q* (Barton, et al., 1974), permitindo, através da análise estereográfica e estatística, determinar as famílias de descontinuidades (juntas, falhas e acamamentos), e definir as características geomecânicas de cada família e a sua influência na estabilidade dos taludes. O último foi avaliado através de uma análise cinemática simples (Goodman, 1989). Na caracterização defini, de modo genérico, que as juntas ocorrem como superfícies sub-verticais muito persistentes e pouco espaçadas, com paredes planas fechadas e lisas; que os planos de acamamento ocorrem com persistência considerável e espaçamentos moderados, com paredes lisas e ligeiramente fechadas e com preenchimentos de material suave; que as falhas ocorrem com persistências consideráveis e têm superfícies estriadas e preenchimentos de rocha triturada. Adicionalmente, a análise cinemática revelou que os planos de acamamento não influem na estabilidade dos taludes. Entretanto, as juntas e as falhas podem produzir rupturas habituais, nos diferentes domínios da mina. A dissertação trata, no final, da estimativa da resistência ao cisalhamento das descontinuidades, estimativa que se fundamenta na caracterização geomecânica, em alguns ensaios de inclinação e em valores de resistência sugeridos na literatura geotécnica. A estimativa inclui definição dos ângulos de atrito básico por unidade de rocha, e sugere envoltórias de resistência para cada tipo de descontinuidade, constituindo uma importante contribuição para futuras avaliações de estabilidade de taludes na Mina Tintaya.

---

## RESUMEN

En el sur del Perú, sobre el extremo sudoeste de la Cordillera Occidental Andina, se localiza el Distrito Minero de Tintaya, dentro del cual ocurren varios depósitos de skarn de Cobre, siendo uno de ellos el depósito de Tintaya, donde actualmente se desarrolla la operación minera y se centraliza la investigación de esta tesis. En el *Contexto Geológico*, tanto en el área del Distrito como en la Mina Tintaya, se identifican unidades litológicas sedimentarias e ígneas, con edades que abarcan del periodo Cretácico al Cuaternario, así como estructuras geológicas frágiles y dúctiles con características geométricas y cinemáticas propias de una historia estructural compleja. En este escenario geológico, se definen cuatro dominios lito-estructurales mayores, y se entáblese, con base en la interpretación de lineamientos y el mapeo estructural del área distrital, que existe repetición en los patrones estructurales de pliegues, fallas y juntas, partiendo de la escala regional del Distrito a la escala de detalle en la mina, destacando los patrones NNW – NW y NS como propios de pliegues y cabalgamientos asociados, y los patrones NE y ~EW como propios de estructuras frágiles. Sin embargo, también ocurren estructuras frágiles en las tendencias NW y NS, así como algunos pliegues de orientación EW en el área. Concluyendo que la historia geológica al menos debe incluir cuatro fases de deformación, coherentes con la evolución Andina. Por otro lado, en el *Contexto Geotécnico*, dentro del área de la mina, las unidades litológicas y la geología estructural conforman diferentes Sectores, en los cuales se reconocen problemas de estabilidad de taludes con alto control estructural. Estos antecedentes motivaron la realización de un mapeo geotécnico, con base en la descripción del *Sistema - Q* (Barton, et al., 1974), permitiendo, a través del análisis estereográfico y estadístico, determinar las familias de discontinuidades (juntas, fallas y estratos), así como definir, las características geomecánicas de cada familia y su influencia en la estabilidad de los taludes. Esto último fue evaluado a través de un análisis cinemático simple (Goodman, 1989). Así, en la caracterización se define, de modo genérico, que las juntas ocurren como superficies sub-verticales muy persistentes y poco espaciadas, con paredes planas cerradas y suaves; que los estratos ocurren con persistencia considerable y espaciamientos moderados, cuyas paredes lisas y ligeramente cerradas presentan rellenos de material suave; que las fallas ocurren con persistencias considerables y tienen superficies estriadas y amplios rellenos de roca triturada. Además, el análisis cinemática reveló que los planos de estratificación no influyen en la estabilidad de los taludes, entretanto, las juntas y las fallas pueden producir rupturas habituales, en los diferentes dominios de la mina. La tesis culmina con la estimación de la resistencia al corte de las discontinuidades, estimación que se fundamenta en la caracterización geomecánica, en algunos ensayos de inclinación y en valores de resistencia sugeridos en la literatura geotécnica. Esta estimación incluye la definición de los ángulos de fricción básico por unidad de roca, y propone envoltorias de resistencia para cada tipo de discontinuidad, constituyendo una importante contribución para futuras evaluaciones de estabilidad de taludes en la Mina Tintaya.

---

## ABSTRACT

In southern Peru, on the southwesternmost portion of the eastern Andean Range there lies Tintaya Mining district, where many copper skarn deposits occur, one of which being Tintaya, where mining operations take course nowadays and that constitutes the focus of this research. Within the *geological context*, both in the district and in the mining operations area, occur sedimentary and igneous lithotypes, whose ages range from the Cretaceous period to the Quaternary period. Fragile and ductile geological structures, with geometrical and kinematic characteristics, identify a complex structural history. Four major lithological structural domains exist, based on the interpretation of baselines and structural mappings of the district area and its surroundings, displaying a replication of the structural patterns of faults, folds and joints, ranging from the regional district scale to the detail scale of the mine with the following predominant patterns: NNW – NW and NS, due to being typical of folds and associated thrusts and of NE and ~EW-trending of typical fragile structures. However, there also occurs NW and NS-trending fragile structures as well as EW-trending folds in the area. All this leads to the conclusion that geological history should include at least four deformational phases, in accordance with the Andean evolution. The *geotechnical context*, which includes the mining area proper, lithological units and structural geology make up different sectors, where slopes stability problems, with strong structural control, exist. These characteristics led to the development of geotechnical mappings based on the Q-System description (Barton, et al., 1974), allowing to identify, through stereographic and statistical analysis, the families of discontinuities (joints, faults and beddings). Geomechanical characterization of each family and its influence on the stability of the slopes was also evaluated by a simple kinematic analysis (Goodman, 1989). Thus, a generic characterization define the joints as very persistent and frequent sub-vertical surfaces with closed soft flat walls. The beddings have considerable persistency and moderate frequency with slightly closed smooth walls with soft material fills. Faults occur with considerable persistency and have striated surfaces and intensely crushed rock fills. Furthermore, the kinematic analysis revealed that the stratification planes do not have influence on the slopes stability, but the joints and faults can produce usual failures in different domains of the mine. Final conclusions consider shear strength estimation of the discontinuities based on geomechanical characterization, a few tilt tests, and strength values considered by the geotechnical literature. Estimations consider the friction angles for each determined rock unit and shear strength envelope for each type of discontinuity, which means a very important contribution for future slope stability analysis in Tintaya.

# *Considerações Finais e Conclusões*

---

## **6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os três objetivos propostos nesta dissertação foram abordados nos capítulos 3, 4 e 5, e permitiram obter conclusões diversas, não obstante complementares, para o alcance de um entendimento amplo da geologia estrutural da área de estudo. As conclusões são agrupadas segundo os objetivos traçados no início da dissertação.

### **6.1.1 CONTEXTO ESTRUTURAL DE TINTAYA**

No contexto estrutural de Tintaya, interpretei que os padrões de lineamentos são consistentes com eixos de dobras e contactos litológicos de tendências NNW – NW e NS, e estruturas rúpteis de tendências NE ou EW – ENE. Na análise estrutural da área do Distrito, com base no mapeamento estrutural de 2005, torna-se clara uma tendência de repetição nos padrões estruturais de dobras, falhas e juntas, partindo da escala regional do Distrito até a escala de detalhe na mina, possibilitando uma conexão geométrica e cinemática entre as estruturas nas diferentes escalas, como sugere o critério de Pompeley (1894). Também existe conexão entre as unidades litológicas presentes na área do Distrito e aquelas observadas na área da mina, destacando as unidades cretáceas e os corpos ígneos de diorito de tendência NNW e os diques de monzonito de tendência ENE. Estudos anteriores correlacionam esses corpos ígneos com o Batólito de Abancay (vide Capítulo 2).

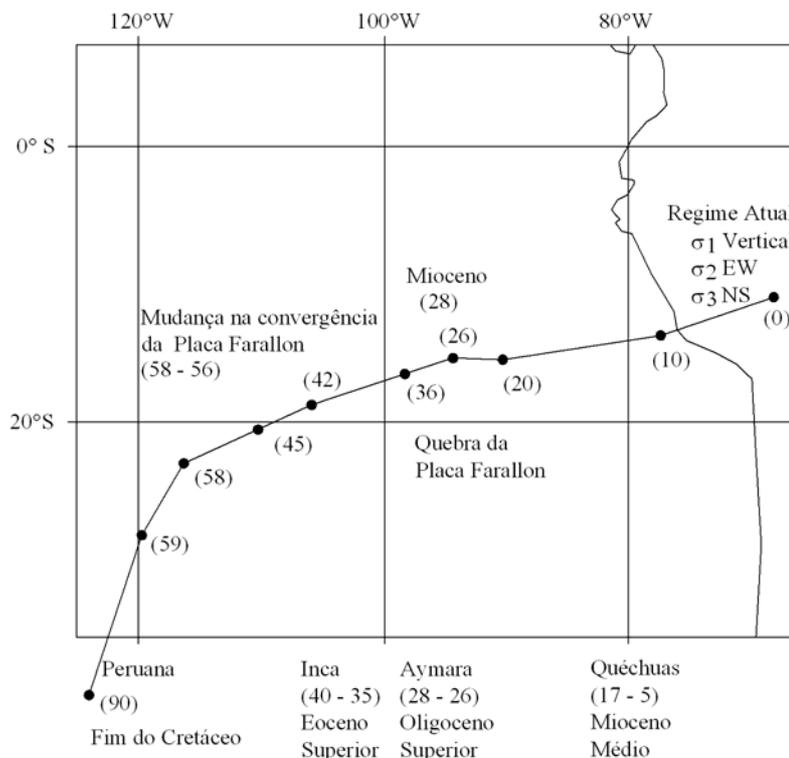
A partir da análise estrutural, há definição de que as dobras ocorrem em diferentes escalas e estilos, com eixos de tendência geral NW – NNW e NS, tanto na escala regional do Distrito, quanto na escala da Mina. As dobras não expõem padrões de interferência, significando uma deformação progressiva. Entretanto, apresentam um incremento da assimetria de Oeste para Leste, concordando com o comportamento das estruturas dúcteis mais regionais do Sul do Perú, que expõem uma vergência similar, fato provavelmente associado à tectônica de empurrões dos Andes Orientais e da faixa Sub-Andina, tema de futuros estudos tectônicos mais aprofundados.

Entre as estruturas rúpteis, as falhas de tendência NE - ENE são as mais relevantes, devido à sua extensão, dominando tanto a área do Distrito quanto a área da mina. Essas falhas cortam as dobras, significando uma deformação posterior com possível movimento direcional, já que os movimentos atuais refletem uma ativação recente por gravidade. Contudo, existem outras falhas nos padrões NW e NS, com diversos movimentos na escala do Distrito. As falhas observadas na mina têm movimentos normais prevalecentes, que expressam uma reativação recente e obliteram os movimentos anteriores.

Os sistemas de juntas ocorrem como planos sub-verticais nos padrões NW, NS, EW e NE, não sendo claro a sua origem, por não expressar uma morfologia típica de juntas (MI) e serem, em geral, superfícies planas e ligeiramente rugosas, com a presunção de sua geração por colapso gravitacional e resfriamento dos corpos intrusivos. Entretanto, as juntas nas rochas sedimentares sugerem alguma associação com tensões remanescentes ou ciclos de distensão (alívio), como é desvendado pelos veios de calcita sub-verticais de orientação EW e NS e os diques sin e pós-intrusões de monzonito.

Da análise cinemática no contexto estrutural, deduzi que a área do distrito tem uma história estrutural complexa, que inclui pelo menos quatro fases de deformação, detalhadas no modelo cinemático proposto no Capítulo 3. Por comparação das fases propostas com as fases definidas em estudos regionais anteriores, há forte indicação de uma concordância com a evolução Andina (e.i. Jaillards, G. et. al., 2000, vide Fig. 6.1). Já a mudança da convergência da placa Farallón, da direção NNE à NE, entre o fim do Cretáceo e o início do Eoceno Superior, é acompanhada de duas fases tectônicas compressivas. A primeira fase é a Peruana e em seguida a Inca, ambas responsáveis pela geração de dobras regionais NNW – NW, provavelmente concordante com a *primeira fase compressiva*. Antes da fase Inca, inicia-se a intrusão dos corpos ígneos de diorito, durante um curto período de alívio regional (Eoceno Médio), correspondente à *segunda fase que é distensiva*. Posteriormente, com a ruptura da Placa Farallón, há uma nova mudança na convergência de placas, na direção EW, dando origem à Fase Aymara no Oligoceno Superior, cuja compressão gera as zonas de cisalhamento NE, correspondente à *terceira fase compressiva*. Posteriormente à geração das zonas de

cisalhamento, ocorrem as intrusões de monzonito, num período de tempo anterior à fase tectônica Quéchuas. Nesta fase, aparentemente produziram-se várias reativações de falhas, sem uma clara distinção na área de pesquisa, que tentativamente correlacionei com a *quarta fase* de deformação. Finalmente, as evidências neotectônicas assinalam um regime atual de extensão NS, onde dominam as falhas com movimento normal.



**Figura 6.1:** Diagrama ilustrando a mudança na direção de convergência das placas, no intervalo de tempo do Cretáceo Superior à época atual. Os valores em parênteses correspondem ao tempo em Ma, onde ocorre mudança da convergência. Na parte inferior, os detalhes das principais fases tectônicas, e seus tempos de duração em Ma entre parêntesis. Modificado de Jaillard, G. et al. (2000).

### 6.1.2 CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA

Os dados do mapeamento geológico – estrutural do Distrito conduzem ao entendimento do Contexto Estrutural dentro do qual está a Mina Tintaya. Adicionalmente, os dados de mapeamento geotécnico dentro da mina permitem definir os padrões das estruturas planas (descontinuidades) e descrever as suas características geomecânicas. A repetitividade dos padrões estruturais permite associar as estruturas regionais com àquelas da mina, melhorando o entendimento a cerca da persistência das estruturas rúpteis, em particular aquelas de tendência NE, que parecem dominar a área da mina. Adicionalmente, as camadas na escala da mina, formam dobramentos menores produzidos pelas intrusões, sendo que estas camadas são também dobradas por dobras regionais maiores pouco identificáveis na escala da mina.

No *Contexto Geotécnico*, os planos estruturais constituem o arcabouço da massa rochosa, que condicionam a forma e as dimensões dos blocos de rocha intacta nos taludes da mina. Porém,

no estudo das descontinuidades, são menos importantes o significado cronológico local, pois este mudaria o foco da pesquisa em relação à descrição quantitativa das **características geométricas e mecânicas**, mais importantes, com a finalidade de avaliação da sua possível influência na estabilidade dos taludes e previsão indireta de uma estimativa da resistência ao cisalhamento das descontinuidades (vide capítulos 4 e 5). A conjugação das unidades litológicas com a geologia estrutural na mina, permitem definir 9 setores estruturais, dentro dos quais as famílias de juntas, se caracterizam por apresentar superfícies sub-verticais muito persistentes e pouco espaçadas, com paredes planas fechadas e lisas. Similarmente, a mudança na atitude dos planos de acamamento tenderia a indicar famílias diferentes em cada setor, mas comumente ocorrem com persistência considerável e espaçamentos moderados, e com paredes lisas, que se caracterizam por possuir um preenchimento fino. As falhas, genericamente, se caracterizam por mostrar superfícies estriadas de persistência considerável, com espessos preenchimentos, compostos, na maioria, por material granular (rocha triturada).

Através da **análise cinemática simples** pude avaliar a possível influência das descontinuidades na estabilidade dos taludes escavados, e assim utilizar de critérios para a formação das rupturas: plana, em cunha e por tombamento, sem considerar a influência do cone de atrito. Na avaliação das rupturas, tanto planas quanto por tombamento, a utilização do cone de variabilidade foi necessária para a família com provável influência na estabilidade, permitindo quantificar o risco de ruptura em cada caso. Entretanto, para as rupturas em cunha identifiquei aquelas linhas de interseção que têm caimento menor do que a inclinação do talude. Uma vez feita a análise cinemática, percebi que não existe influência dos planos de acamamento na estabilidade dos taludes. Entretanto, as famílias de juntas e as falhas secundárias formam rupturas habituais. A observação de campo mostrou que as falhas singulares, com maior persistência, exercem uma influência diversificada na estabilidade dos taludes entre rampas (múltiplas bancadas), delimitando ou propagando rupturas produzidas por juntas sistemáticas ou por falhas secundárias, e controlando, em alguns casos, a percolação de água. Esta percolação de água é devido, tanto à maior persistência destas estruturas, quanto à maior largura dos seus preenchimentos, compostos em geral de material granular permeável.

### **6.1.3 ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO**

Para a **estimativa da resistência ao cisalhamento**, inicialmente obtive valores para o ângulo de atrito básico por unidade litológica. Com base na caracterização geomecânica, optei por utilizar o critério de ruptura de Barton para as famílias de juntas porque, em geral, essas estruturas são fechadas e permitem o contato entre paredes. Entretanto, no caso dos planos de acamamento, onde ocorrem preenchimentos que geram alguma coesão adicional à resistência por atrito, optei por adicionar um valor de coesão apropriado à envoltória não linear de Barton. Já particularmente nas falhas, sendo os preenchimentos, por terem uma largura considerável, controlam a resistência ao cisalhamento, e assim optei por utilizar valores de resistência

sugeridos na literatura técnica, expressando a resistência ao cisalhamento das falhas através da envoltória linear de Mohr – Coulomb.

Comparei os valores estimados para a resistência ao cisalhamento por unidade litológica com alguns valores experimentais (Call & Nicholas, 1995; Hitchcock, 2001), utilizando envoltórias de resistência num diagrama de Mohr. Da comparação das envoltórias adveio que a resistência das juntas em monzonito se aproxima da envoltória:  $\tau = \sigma \tan [29^\circ + 4^\circ \log_{10}(11/\sigma)]$ , e para as juntas em calcário da envoltória,  $\tau = \sigma \tan [26^\circ + 4^\circ \log_{10}(13/\sigma)]$ . Similarmente, para os planos de acamamento, há similitude de que a resistência dos planos de acamamento se aproxima à envoltória:  $\tau = 0.008 + \sigma \tan [25^\circ + 3^\circ \log_{10}(17/\sigma)]$ , sendo 0.008 MPa a coesão adicionada à envoltória de Barton. Entretanto, no caso das falhas tanto singulares quanto secundárias, a observação de que os materiais de preenchimento das falhas são similares, e compostos principalmente de rocha triturada, permitindo a determinação, através da consulta de múltiplos valores sugeridos na literatura geotécnica, de que a resistência ao cisalhamento das falhas se aproxima da envoltória:  $\tau = 0.05 + \sigma \tan(30^\circ)$ .

De modo genérico, as envoltórias definidas pelo critério de Barton resultam próximas do critério linear de Mohr – Coulomb, possivelmente devido ao efeito de escala, que reduz a influência da rugosidade, uma vez que se incrementa o comprimento da descontinuidade. Por outro lado, os valores do ângulo de atrito de pico calculados a partir de  $ATAN(jr/ja)$ , resultam muito próximos dos estimados através da envoltória de Barton, particularmente nas famílias de juntas e nos planos de acamamento. Já para as falhas, os valores parecem ser muito conservadores.

Cumprе enfatizar, que num maciço rochoso, nem todas as descontinuidades são desfavoráveis para a estabilidade dos taludes, ocorrendo geralmente ruptura dos mesmos nos planos livres para escorregamento. Portanto, considereei apropriado determinar a resistência ao cisalhamento de cada família de descontinuidade presente no maciço, em vez de tomar um valor genérico, como mostra o Capítulo 5.

## 6.2 CONCLUSÕES

Dos lineamentos definidos na área regional destaca-se a ocorrência do padrão NNW – NW por ser mais persistente e relacionado a eixos de dobras, contatos e alguns cavalgamentos. Entanto, na área do Distrito domina o padrão ~EW, por ser mais persistente e abundante, e por estar relacionado a um sistema de fraturas próprio dos corpos ígneos.

No contexto geológico as estruturas geológicas, tanto dúcteis quanto rúpteis, ocorrem em padrões semelhantes, a partir da escala mais regional até a escala de detalhe da mina,

demonstrando que existe repetitividade geométrica nas estruturas geológicas, como estabelece o critério de Pompeley (1894).

A definição da diversidade geométrica e cinemática em que ocorrem as estruturas dúcteis e rúpteis leva à conclusão, que a história estrutural da área do distrito é complexa. A proposição de um modelo cinemático tentativo, com base nas evidências de campo, inclui pelo menos quatro fases de deformação. As fases propostas são coerentes com aquelas estabelecidas nos estudos tectônicos regionais da evolução andina.

A ocorrência da vergência para Leste das dobras e empurrões associados, na área do Distrito de Tintaya, não é um fato isolado, já que replica, na área mais regional, o que ocorre no sul do Peru. Dobras associadas a empurrões regionais vergem para E devido ao efeito-anteparo dos Andes Orientais e da faixa Sub-andina, envolvendo o soerguimento do Altiplano Peruano-Boliviano aliado ao Maciço de Arequipa.

A ocorrência semelhante das unidades litológicas e a repetitividade dos padrões estruturais, permite estabelecer uma conexão entre a geologia do Distrito e a geologia da mina. Também discerne a respeito da persistência das estruturas rúpteis, foco de investigação mais detalhada na caracterização geomecânica.

Uma contribuição substancial no contexto geotécnico é a definição dos setores lito-estruturais combinados com a geometria da lavra da mina. Esta contribuição permite descrever as características geométricas e mecânicas das discontinuidades presentes na mina, assim como estabelecer a influência das discontinuidades na estabilidade dos taludes escavados, em cada setor definido. A análise cinemática simples determina que os planos de acamamento não influenciam na estabilidade dos taludes, e que as famílias de juntas, as falhas secundárias e as falhas singulares, ocasionam problemas na estabilidade dos taludes ou formando rupturas, ou exercendo um controle na percolação da água.

A estimativa da resistência ao cisalhamento das discontinuidades é uma importante contribuição para as futuras avaliações de estabilidade de taludes, uma vez que anteriormente só havia consideração de valores com base na literatura e poucos ensaios de laboratório. A partir do presente trabalho, a estimativa da resistência de cada família de discontinuidades, fundamentada na caracterização geomecânica, pode ser incorporada nas análises de equilíbrio limite dos taludes e em eventuais análises numéricas, permitindo melhorar, assim, tanto a análise quanto a confiabilidade dos taludes projetados.

### **6.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

Em pesquisas futuras, com respeito da geologia do Distrito de Tintaya, será prudente ampliar o conhecimento das idades das rochas ígneas, para um melhor entendimento tanto da cronologia das intrusões quanto da compreensão dos fatos evolutivos ou correlativos com as fases de deformação. Além disso, o conhecimento atual existente da espessura das unidades Cretáceas, assim como da coluna estratigráfica em geral, é limitado, sendo recomendável realizar uma pesquisa dedicada a definir a coluna estratigráfica detalhada, a fim de estabelecer as relações estruturais com as bacias regionais.

As dobras de tendência NW e as falhas NE, são essenciais para o entendimento do contexto estrutural da área do Distrito e da mina Tintaya. É recomendável avaliar, nos modelos geológicos interpretativos, a influência destas estruturas na localização de zonas prospectivas, em futuros trabalhos de exploração.

A caracterização geomecânica das descontinuidades realizada nesta dissertação, constitui uns dos primeiros impulsos para futuras pesquisas com um propósito similar, pois poderiam adotar-se outras metodologias existentes na literatura (e.g. Sistema RMI de Palmström) para o estudo das descontinuidades, procurando ajustar os índices ou os parâmetros definidos por pesquisadores experientes, às condições próprias da mina Tintaya.

Em relação à resistência ao cisalhamento das descontinuidades, as pesquisas futuras podem avaliar a estimativa obtida nesta dissertação, através da realização de múltiplos ensaios de corte direto nas superfícies naturais de juntas e camadas, considerando juntamente o coeficiente JRC, e as descrições de preenchimento, percolação e grau de intemperismo. De modo semelhante, no caso das falhas seria recomendável, realizar alguns ensaios de corte do material de preenchimento.

---

# *Estimativa da resistência ao Cisalhamento das descontinuidades*

---

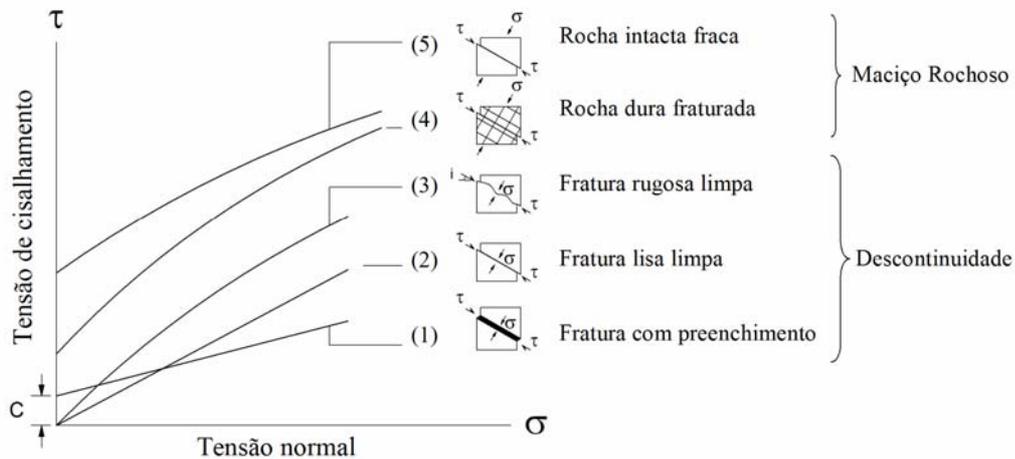
## **5.1 INTRODUÇÃO.**

No início deste capítulo resumo a teoria da resistência ao cisalhamento de descontinuidades, com base na revisão bibliográfica, e prossigo com a descrição da metodologia utilizada para a estimativa da resistência. Esta inclui a utilização da caracterização geomecânica (capítulo 4), assim como os resultados de alguns ensaios mecânicos (plano inclinado e martelo de Schmidt). O capítulo termina com a estimativa da resistência ao cisalhamento para as descontinuidades presentes na mina Tintaya.

## **5.2 TEORIA DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO**

Na avaliação da estabilidade dos taludes inicialmente se faz necessário definir se a quebra do maciço rochoso acontece ao longo das superfícies de descontinuidades presentes ou através da massa rochosa em si mesma. Este conceito é útil para discernir se os valores de resistência apropriados para a avaliação, sejam aqueles das descontinuidades ou próprios do maciço rochoso. Em cada caso existem procedimentos diferentes para determinar as propriedades de resistência. Assim, no caso das descontinuidades, se fazem necessários ensaios de corte direto in-situ ou em laboratório, mas no caso do maciço rochoso são utilizados critérios empíricos, baseados na retro-análise de taludes, para determinar os parâmetros de resistência.

O diagrama de Mohr da Fig. 5.1 ilustra os possíveis comportamentos da resistência ao cisalhamento para três tipos de descontinuidades e dois tipos de maciços rochosos. A inclinação de cada linha ou envoltória expressa o ângulo de atrito, de forma que o intercepto com o eixo do esforço de corte expressa a coesão.

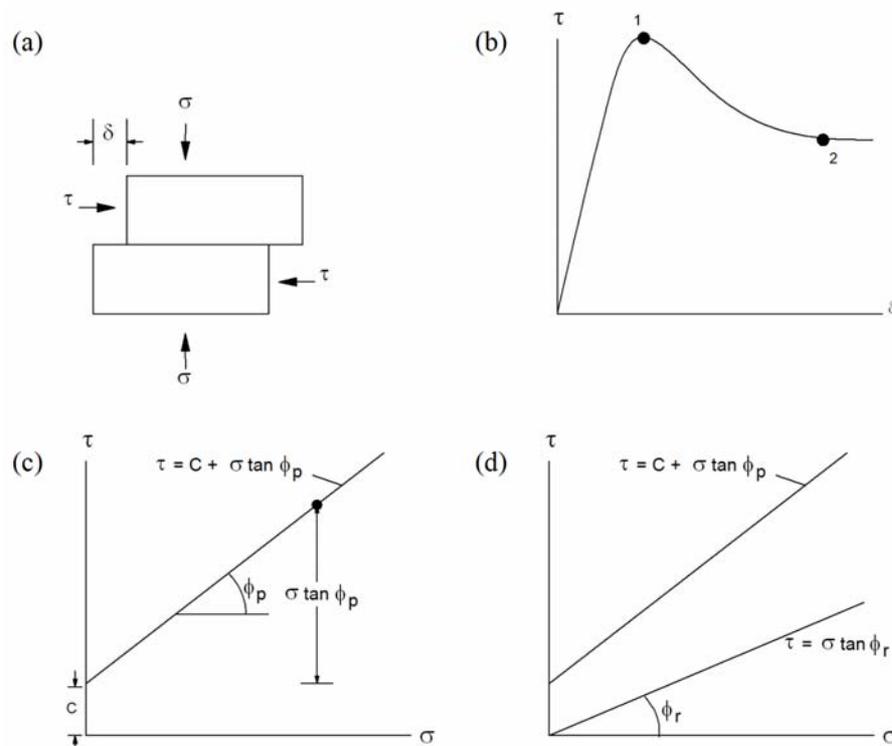


**Figura 5.1:** Relação entre as tensões de cisalhamento e normal sob uma superfície de ruptura para cinco diferentes condições geológicas (Wyllie & Mah, 2004).

Na figura 5.1, no caso da envoltória (1), se as fraturas são preenchidas com material fraco como argilas fracas ou farinha de falha, o ângulo de atrito será baixo, mas poderá existir alguma coesão se o preenchimento não estiver perturbado. Se o preenchimento for composto por calcita, selando as paredes, então a coesão será importante. Na envoltória (2) a coesão é nula e o ângulo de atrito ( $\phi_b$ ) é dependente do tamanho do grão da rocha. Na envoltória (3) a coesão é nula e o ângulo de atrito é composto de uma componente de atrito da rocha ( $\phi_b$ ), e de uma componente (i) relacionada às irregularidades ou asperezas da superfície e da razão entre a resistência da rocha com a tensão normal aplicada. Com o aumento da tensão normal, as asperezas são aplainadas e o ângulo de atrito total diminui progressivamente. No caso da envoltória (4) a ruptura do maciço rochoso ocorre, em parte, através de rocha intacta e parcialmente ao longo das superfícies de descontinuidades, comportamento que se expressa através de uma envoltória não linear, com valores de resistência dependentes da tensão normal atuante, do confinamento, e da densidade das fraturas no maciço rochoso. A envoltória (5) representa maciços rochosos compostos por material de grão fino, como um tufo, o que terá um ângulo de atrito baixo, e na ausência de fraturas, resultará numa alta coesão.

A figura 5.2 ilustra o comportamento de uma descontinuidade preenchida submetida a uma série de ensaios de corte direto. Em cada ensaio, a tensão normal é conservada constante ( $\sigma$ ), e a tensão de corte ( $\tau$ ) é incrementada, enquanto os deslocamentos por cisalhamento ( $\delta$ ) são mensurados (Fig. 5.2 a). Para pequenos deslocamentos, a amostra comporta-se elasticamente, e a tensão de corte se incrementa linearmente (Fig. 5.2, b). Quando se supera a força de resistência ao movimento, a curva chega a ser não linear e progressivamente alcança um máximo, conhecido como resistência de pico da descontinuidade (Fig. 5.2 b, ponto 1). Pouco depois, a tensão necessária para provocar deslocamento decresce e eventualmente alcança um

valor constante, denominado de resistência residual ao cisalhamento (Fig. 5.2 b, ponto 2). Se o registro dos valores das tensões da resistência de pico para diferentes níveis de tensão normal for desenhado num diagrama de Mohr, é gerada uma envoltória aproximadamente linear, cuja inclinação representa o ângulo de atrito e cujo intersepto no eixo das tensões de corte representa a coesão do material de preenchimento. A coesão resulta ser independente da tensão normal, entretanto a componente de atrito incrementa-se com o aumento da tensão normal segundo a relação de *Navier - Coulomb*:  $\tau = c + \sigma \tan \phi_p$ , equação que expressa a resistência de pico (Fig. 5.2 c). De modo similar, se os valores da tensão de corte residual para cada tensão normal aplicada forem desenhados num diagrama de Mohr é gerada uma envoltória linear, que representa a resistência residual ao cisalhamento  $\tau = \sigma \tan \phi_r$ , e neste caso a coesão é anulada, uma vez que o deslocamento quebrou a ligação do preenchimento (Fig. 5.2 d). O ângulo de atrito residual ( $\phi_r$ ) continua é menor ao ângulo de atrito pico ( $\phi_p$ ) já que o deslocamento quebrou as irregularidades da superfície da rocha, alisando a superfície, e tornando-a de menor atrito.



**Figura 5.2:** Definição de resistência ao cisalhamento de uma superfície de descontinuidade com preenchimento: (a) ensaio de corte direto da descontinuidade, (b) diagrama de deslocamento de corte em função da tensão de cisalhamento, (c) diagrama de Mohr para a resistência de pico, (d) diagrama de Mohr para a resistência de pico e resistência residual (Hoek & Bray, 1994; Wyllie & Mah, 2004).

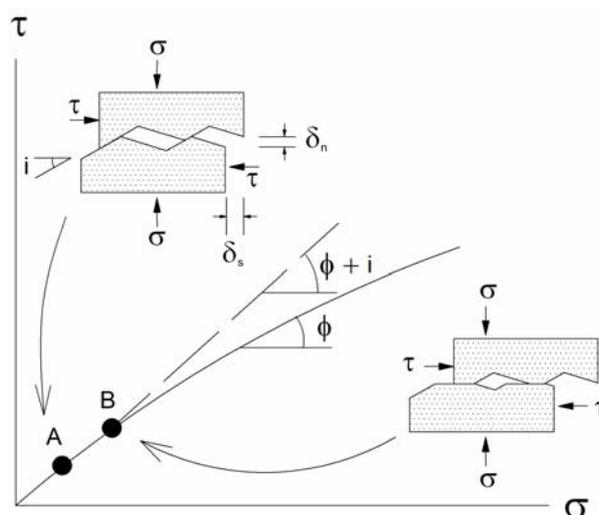
Para uma superfície lisa sem preenchimento, a coesão é anulada e a resistência ao cisalhamento se torna apenas dependente do ângulo de atrito do material da rocha, exposto na superfície de fratura (Fig. 5.1, envoltória 2). Obtem-se assim valores de ângulo atrito pequenos em rochas de grão fino ou ângulos de atrito maiores em rochas de grão grosso. Este ângulo é conhecido como ângulo de atrito básico e normalmente é obtido em ensaios de plano inclinado utilizando ou blocos com superfície polida ou utilizando testemunhos de rocha fresca.

### 5.2.1 SUPERFÍCIES RUGOSAS

Uma vez que todas as superfícies naturais das descontinuidades exibem algum grau de irregularidade ou aspereza, variando de superfícies polidas ou estriadas até superfícies muito ásperas, existe uma consideração de que as irregularidades das superfícies de descontinuidades são formadas por ondulações maiores (irregularidade de primeira ordem) e asperezas menores (irregularidades de segunda ordem). Estas têm influência no ângulo de atrito das descontinuidades. As pesquisas de Patton (1966), utilizando ensaios de corte em superfícies artificiais dentadas e levantamentos fotográficos de superfícies de estratificação em taludes, indicaram que o ângulo de atrito total é igual à somatória do ângulo de atrito básico e o ângulo médio das irregularidades:  $\phi = \phi_b + i$ .

Estudos posteriores, Barton (1973), indicam que o cisalhamento nas de descontinuidades é dependente dos efeitos combinados da rugosidade da fratura, da resistência da rocha na superfície, da tensão normal aplicada e da quantidade de deslocamento. As descontinuidades respondem ao cisalhamento conjugando a dilatação e o aplainamento progressivo das asperezas.

A figura 5.3 ilustra a transição da dilatação ao cisalhamento das asperezas. No ponto A ocorre dilatação normal e deslocamento horizontal, e no ponto B ocorre progressivamente dilatação e cisalhamento das irregularidades. Inicialmente, a superfície rugosa submetida a tensões normais baixas exibe um ângulo de atrito alto ( $\phi_b + i$ ). Com o incremento da tensão normal e do deslocamento, as asperezas sofrem cisalhamento, e o ângulo de atrito diminuirá progressivamente até alcançar um valor mínimo residual, que é o ângulo de atrito básico. Este fenômeno de dilatação – cisalhamento é ilustrado num diagrama de Mohr como uma envoltória não linear com uma inclinação inicial ( $\phi_b + i$ ) que se reduz a  $\phi_b$  em tensões normais altas.



**Figura 5.3:** Efeito da rugosidade e do esforço normal sob o ângulo de atrito da superfície de descontinuidade (Wyllie & Mah, 2004).

Os estudos de Barton (1974), em superfícies rugosas artificiais limpas indicam que o fenômeno de cisalhamento pode ser expresso pela equação empírica:

$$\tau = \sigma' \tan \left( \phi_b + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma'} \right) \right) \dots (1)$$

Sendo,  $JRC$  o coeficiente de rugosidade de junta,  $JCS$  a resistência à compressão da rocha na superfície de fratura e  $\sigma'$  a tensão normal efetiva. O  $JRC$  pode ser determinado ou por comparação visual com os perfis de rugosidade padrão (ISRM, 1981) ou utilizando medições da rugosidade através da técnica de Tse – Cruden (1979). Entretanto, o  $JCS$  pode ser determinado fazendo medições de rebote com o martelo de Schmidt na superfície de fratura. Logo, a tensão normal que atua sobre a superfície de fratura, pode ser calculada em função do peso de rocha subentendido acima da superfície de ruptura.

Na equação de Barton, o termo  $[JRC \log_{10}(JCS/\sigma')]$  é equivalente ao ângulo de rugosidade ( $i$ ). Perante níveis de tensão altos em relação à resistência da rocha, as asperezas são aplainadas, de maneira que o termo  $[JRC \log_{10}(JCS/\sigma')] = 0$ , uma vez que a razão  $JCS/\sigma' = 1$ . Entretanto, perante níveis de tensão baixa a razão  $JCS/\sigma'$  alcança os maiores valores, obtendo uma alta resistência ao cisalhamento. Portanto, é recomendável utilizar valores de  $(\phi_b + i) < 50^\circ$ , enquanto a razão  $JCS/\sigma'$  pode variar entre 3 e 100. Também é recomendável assumir que o ângulo de atrito é independente da tensão normal, quando  $JCS/\sigma' > 50$ , (González, et. al, 2002), com um valor igual a:

$$\phi_p = \phi_r + 1.7JRC \dots (2)$$

Por outro lado, os valores de  $JRC$  e  $JCS$  são influenciados pelo efeito de escala, de modo que, com o incremento da extensão da descontinuidade ocorre uma diminuição nos valores de  $JRC$  e  $JCS$ . A razão para esta relação é que a rugosidade de menor escala resulta ser menos importante, quanto maior for a dimensão da descontinuidade, e eventualmente a ondulação de grão escala terá maior influência do que a rugosidade. O efeito escala é quantificado pelas equações:

$$JRC_n = JRC_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02JRC_0} \dots (3)$$

$$JCS_n = JCS_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.03JRC_0} \dots (4)$$

Nas equações anteriores os sub-índices expressam a distinção entre a escala de laboratório “0” e a escala de campo “n”. Sendo  $JRC_0$  o coeficiente de rugosidade da descontinuidade, determinado numa linha de amostragem de comprimento inicial  $L_0$  (i.e. para um comprimento de 10 cm escreve-se um  $JRC_{10}$ ). Assim, o traço da descontinuidade em campo  $L_n$  é utilizado para o cálculo do  $JRC_n$ , resultando menor que o  $JRC_{10}$ . Analogamente ocorre com a resistência à compressão da rocha na superfície de fratura  $JCS$ , quando se considera uma medição feita numa amostra de laboratório ( $JCS_0$ ) e se ajusta à escala da descontinuidade em campo ( $JCS_n$ ).

### 5.2.2 **DESCONTINUIDADES PREENCHIDAS**

O efeito do preenchimento na resistência ao cisalhamento depende tanto da espessura quanto das propriedades de resistência do material de preenchimento. Se a espessura é maior do que 25 – 50 % da amplitude das asperezas, então o contacto entre as paredes da descontinuidade pode ser ausente, e as propriedades de resistência da fratura serão aquelas do material de preenchimento (Goodman, 1970).

Entretanto o exame de diversos resultados de ensaios de corte direto (Barton, 1974), para determinar o ângulo de pico e a coesão de descontinuidades preenchidas, indica que os preenchimentos podem ser classificados em dois grupos, um com argilas e outro com materiais de falhas rúpteis (brechas). No caso de argilas, que têm montmorilonita ou bentonita, o ângulo de atrito varia de 8° a 20° e a coesão entre 0 e 200 kPa. No caso de materiais de falhas rúpteis (brechas), poderia existir uma combinação de argilas com material granular, alcançando-se valores para o ângulo de atrito de 25° a 45° e para a coesão entre 0 e 100 kPa. No caso de farinha de falha em rochas de grão grosso (graníticas) o ângulo de atrito é maior do que nas de rochas de grão fino como calcários.

O deslocamento das descontinuidades preenchidas reduz a sua resistência ao cisalhamento, sendo o ângulo de atrito residual normalmente menor que o ângulo pico em 2° ou 3°, enquanto a coesão residual se anula. Desse modo, uma outra classificação das descontinuidades preenchidas contempla se elas foram recentemente deslocadas ou se elas se conservam sem deslocamento. No primeiro caso se incluem materiais originados por atrito, formados em falhas, zonas de cisalhamento e acamamentos deslocados, tais como farinha de falha, partículas do tamanho de argila e brechas, os quais podem ter valores de resistência próximos aos valores residuais. No caso de descontinuidades sem deslocamento incluem-se preenchimentos originados por migração de fluidos (hidrotermal, precipitação, ou dissolução), os quais podem ter baixa resistência (argilas) ou alta resistência (quartzo).

### 5.3 **METODOLOGIA UTILIZADA**

Durante o mapeamento, para a descrição geomecânica das descontinuidades utilizaram-se os fatores numéricos  $j_r$  (índice de rugosidade) e  $j_a$  (índice de alteração das paredes) da classificação de maciço do Sistema - Q (Barton et al., 1974), com a finalidade de utilizar a função *ATAN* ( $j_r/j_a$ ) como estimativa do ângulo de atrito de pico, entretanto, o índice  $j_a$  permitiu também aproximar o intervalo de valores para ângulo de atrito residual. Cabe assinalar, que a estimativa através da função *ATAN* ( $j_r/j_a$ ) é utilizada em três condições de descontinuidades: i. quando há contacto entre as paredes sem deslocamentos; ii. quando há algum contacto entre as paredes e expõem deslocamentos; iii. quando não há contacto entre as paredes e expõem deslocamentos importantes. Similarmente, durante o mapeamento foram registrados os valores do  $JRC_{10}$  e do rebote do martelo Schmidt, a fim de utilizar o critério de

ruptura de Barton (1977), na estimativa da resistência de pico das descontinuidades fechadas. Além disso, o registro da persistência e do preenchimento serviu para dar uma estimativa dos parâmetros de resistência, com base nos valores apresentados na literatura geotécnica, principalmente no caso das falhas, onde a espessura do preenchimento é importante.

### 5.3.1 DICONINUIDADES RUGOSAS

Para a utilização do critério de ruptura de Barton (1977) foi necessário determinar cada um dos parâmetros que definem a equação (1), como a seguir:

Inicialmente, se fez testes de plano inclinado utilizando-se testemunhos e blocos de rocha fresca, com a finalidade de estimar o ângulo de atrito básico, para cada litotipo de Tintaya. No caso dos testemunhos (Andreev, 1995), o ângulo de atrito básico foi ajustado utilizando a equação (5), onde  $\alpha$  corresponde ao ângulo de inclinação alcançado, quando ocorre o deslocamento dos testemunhos.

$$\phi_b = \tan^{-1}(1.155 \tan \alpha) \dots (5)$$

Uma vez obtido o ângulo de atrito básico, o cálculo do ângulo de atrito residual (Gianni, 1985) se faz utilizando a equação:

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + \frac{r}{R} 20^\circ \dots (6)$$

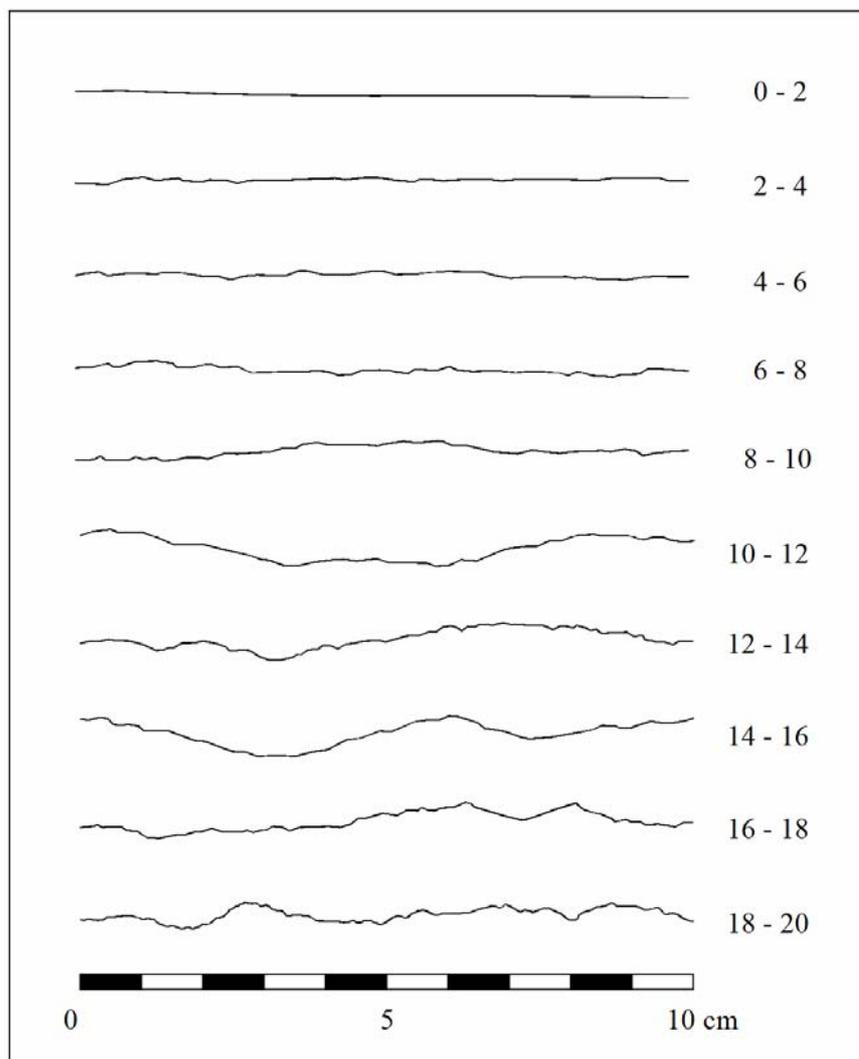
Na equação anterior  $R$  corresponde ao valor de rebote do martelo de Schmidt em superfície de rocha fresca, entretanto  $r$  corresponde ao valor de rebote na superfície de rocha da descontinuidade, sendo  $r < R$ , como consequência do grau de intemperismo na descontinuidade. Assim os valores do ângulo de atrito básico são diminuídos conforme se acrescenta o intemperismo.

Durante o mapeamento de janelas a rugosidade das descontinuidades foi comparada visualmente com os perfis padrão de rugosidade (Barton & Choubey, 1977), registrando-se valores para o  $JRC_{10}$  (Fig. 5.4), que mudam desde 0 até 20, indicando a variação da rugosidade, de lisas a muito rugosas.

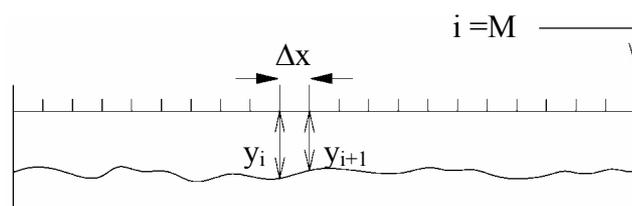
Com a finalidade de avaliar se a estimativa visual do  $JRC$  é aceitável, digitalizei algumas fotografias de juntas naturais em testemunhos, e calculei o  $JRC_{10}$  através das equações de parâmetros estatísticos (Fig. 5.5 e equações 7 e 8), para uma resolução de amostragem  $\Delta x = 1$  mm (Tse & Cruden, 1979).

$$Z2 = \left[ \frac{1}{M(\Delta x)^2} \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{1/2} \dots (7)$$

$$JRC = 64.22(Z2) - 2.31 \dots (8)$$



**Figura 5.4:** Perfis de rugosidade padrão para a estimativa visual do *JRC* na escala de 10 cm (Barton & Choubey, 1977).



**Figura 5.5:** Procedimento para a medição da rugosidade de uma superfície de descontinuidade (Tse & Cruden, 1979).

O cálculo do *JCS* é feito em função do valor de rebote do martelo de Schmidt da superfície de descontinuidade (*r*), e do peso da unidade de rocha (Franklin & Dusseault, 1989), segundo a equação:

$$\text{Log}_{10} JCS = 0.00088\gamma * r + 1.01... \quad (9)$$

Nesta equação, o  $JCS$  é expresso em  $MN/m^2$ , mas a unidade de peso de rocha  $\gamma$  é expressa em  $KN/m^3$ , sendo os valores de  $\gamma$  determinados em estudos anteriores, através de ensaios de laboratório para cada litotipo de Tintaya (Tabela 5.1).

**Tabela 5.1: Unidade de peso de rocha para os litotipos da mina Tintaya (extraído do modelo geoestatístico, 2001).**

Rocha	$\gamma$ (KN/m3)
Andesito	25.1
Arenito	25.0
Calcário	25.7
Diorito	25.8
Escarnito de granada	29.0
Escarnito em monzonito	27.0
Hornfels	25.1
Latito	25.0
microdiorito	24.0
Monzonito	24.9

O cálculo da tensão normal para condições secas é feito através da equação 10, (Wyllie & Mah, 2004). Onde  $\beta$  é o mergulho da descontinuidade,  $H$  é a altura média do talude, e  $\gamma$  é a unidade de peso da rocha em  $MN/m^3$  (i.e.  $\gamma = 0.0249$  para o monzonito).

$$\sigma' = \gamma H \cos \beta \dots (10)$$

### 5.3.2 DESCONTINUIDADES PREENCHIDAS

No caso das descontinuidades com espessura de preenchimento importante (i.e. falhas), é utilizada a relação  $ATAN$  ( $j_r/j_a$ ) para estimar os valores do ângulo de atrito residual e de pico. Também serviram a descrição do preenchimento e a extensão do traço da descontinuidade, para dar uma estimativa dos parâmetros de resistência com base nos valores apresentados na literatura geotécnica. A tabela 5.2 é uma cópia parcial da apresentada por Hoek e Bray (1994), onde se considera a descrição do litotipo, do material de preenchimento e os valores de resistência ao cisalhamento de pico e residuais, encontrados em laboratório por diversos investigadores.

Quando se considera a extensão do traço das estruturas maiores, na literatura geotécnica e praxe, para uma persistência no intervalo de 100 a 1000 m, ângulos de atrito entre  $25^\circ$  a  $30^\circ$  para a resistência de pico, e de  $18^\circ$  a  $25^\circ$  para a resistência residual. Se a persistência está entre 1000 e 10000 m, sugerem-se ângulos de atrito entre  $20^\circ$  e  $25^\circ$  para a resistência de pico e de  $15^\circ$  a  $20^\circ$  para a resistência residual (Pusch, 1994; Karzulovic, 2001).

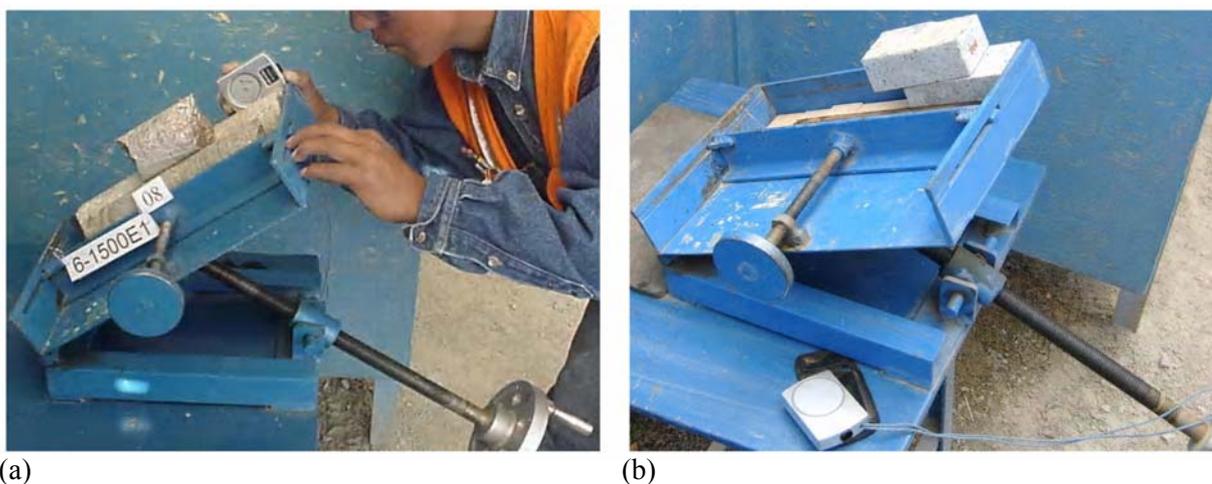
**Tabela 5.2: Valores de resistência ao cisalhamento para descontinuidades com espessura de preenchimento importante. Modificado de Hoek e Bray (1994).**

Rocha	Descrição	Resistência Pico			Resistência Residual		
		C (kg/cm <sup>2</sup> )	C (Kpa)	$\phi^\circ$	C (kg/cm <sup>2</sup> )	C (Kpa)	$\phi^\circ$
Diorito, granodiorito	farinha de falha com argila (2% de argila, PI = 17%)	0	0	26.5			
granito	Falha preenchida com argila	0 - 1	0 - 100	24 - 25			
	Falha preenchida com areia	0.5	50	40			
	Zona de cisalhamento, granitos fragmentados, rocha desintegrada e farinha de falha	2.42	240	42			
Calcário	Preenchimento de argila de 6mm				0	0	13
	Preenchimento de 1 a 2 cm de argila	1	100	13 - 14			
	Preenchimento <1mm de argila	0.5 - 2	50 - 200	17 - 21			
	marga de 2cm	0	0	25	0	0	15 - 24

## 5.4 RESULTADOS PRÉVIOS

### 5.4.1 ÂNGULO DE ATRITO BÁSICO

Na determinação do ângulo de atrito básico utilizei-me de uma mesa de inclinação, onde realizei dois tipos de ensaios: um utilizando testemunhos de rocha HQ (cilindros com 6.35 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento), e outro ensaio utilizando blocos com superfícies polidas (com 11 cm de comprimento, 7 cm de largura e 4cm de altura). Os ensaios foram efetuados numa mesa inclinada até observar movimento (< 1 cm). A medição do ângulo de inclinação foi através de um clinometro de mão com precisão de 0.5° (Fig. 5.6). Ambos os ensaios indicam valores de atrito básico que variam entre 28° e 33° (tabela 5.3).



**Figura 5.6:** Ensaios de plano inclinado para determinar o ângulo de atrito básico. Utilizando testemunhas de rocha cilíndricas (a) e utilizando blocos de rocha com superfícies polidas (b).

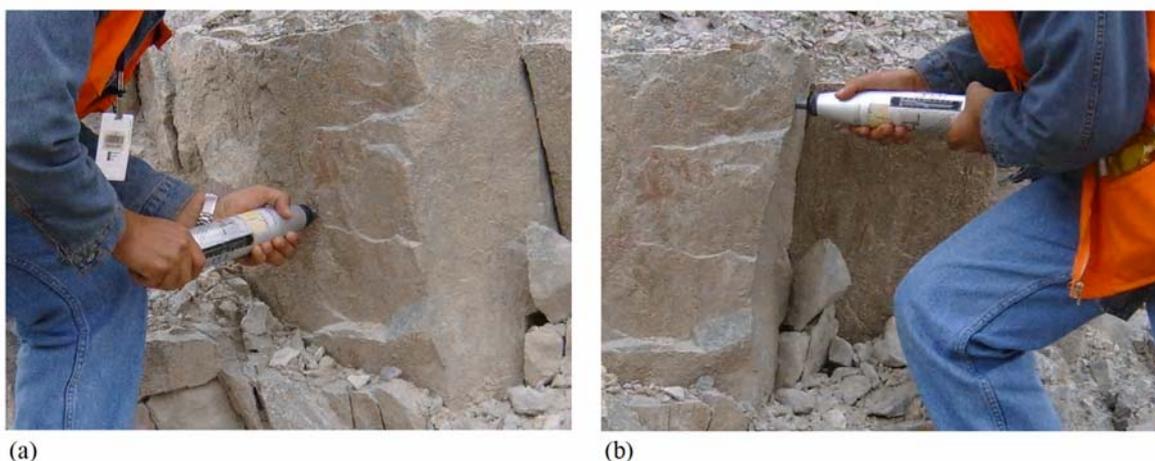
**Tabela 5.3: Resultado do ensaio de inclinação utilizando testemunhos e blocos com superfícies lisas.**

Rocha	Tipo de Ensaio	# Ensaios	ângulo de atrito	
			média	desvio
Andesito	Testemunhas	4	28	1
Andesito	Bloco	18	29	2
Calcário	Bloco	36	32	2
Escarnito de granada	Testemunhas	102	32	2
Escarnito de Magnetita	Testemunhas	42	29	3
Escarnito em monzonito	Testemunhas	18	31	2
Hornfels	Testemunhas	11	30	1
Latito	Testemunhas	3	32	2
Latito	Bloco	24	29	1
Mármore	Testemunhas	46	33	2
Monzonito	Testemunhas	35	29	3
Monzonito	Bloco	30	28	2

Desta tabela 5.3 obtendo-se os ângulos de atrito básico de 32° para o Calcário, 29° para o Monzonito. Entretanto considere 30° para o Diorito, valores utilizados nos cálculos posteriores.

#### 5.4.2 CÁLCULO DO ÂNGULO DE ATRITO RESIDUAL E DO “JCS”

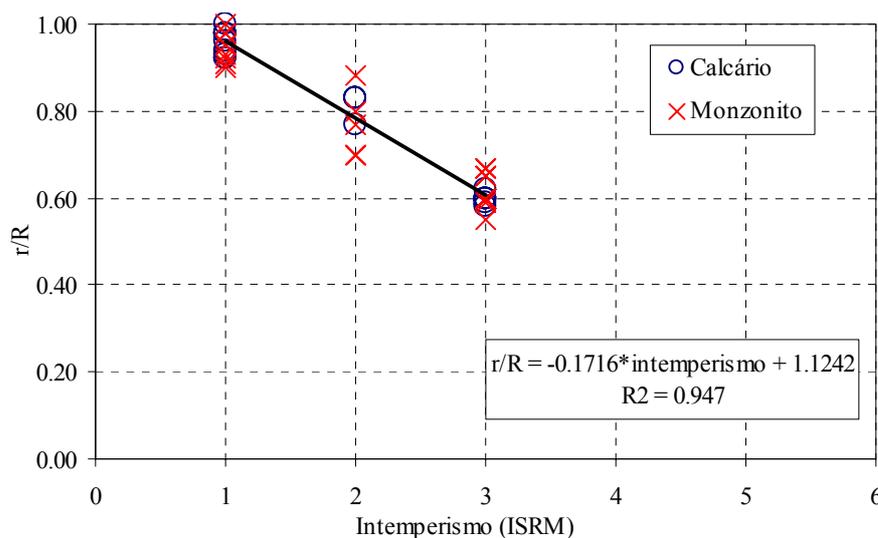
A fim de definir o ângulo de atrito residual é necessário estimar a razão  $r/R$ , de acordo à equação 6. Razão que expressa o grau de redução da resistência à compressão da rocha devido ao intemperismo, sendo necessário utilizar o martelo de Schmidt para medir o rebote na rocha intacta ( $R$ ) e na parede de descontinuidade ( $r$ ). As medições registradas durante o mapeamento entre os anos 2000 e 2003, correspondem só a “ $R$ ” mais o registro do grau de intemperismo observado nas paredes das descontinuidades (tabela padrão, ISRM, 1978). Houve necessidade de realizar algumas novas medições com o martelo de Schmidt nos dois litotipos mais abundantes (calcário e monzonito), a fim de complementar a informação dos dados de mapeamento (Fig. 5.7 e tabela 5.4).



**Figura 5.7:** Ensaio de rebote utilizando o martelo de Schmidt. Em uma parede de descontinuidade em monzonito com intemperismo moderado (a) e em uma fratura artificial produzida pelo fogo da lavra da mina (b).

**Tabela 5.4: Resultados de ensaios de campo com o martelo de Schmidt em calcário e monzonito e razão r/R (novas medições).**

Setor	Rocha	Intemperismo ISRM	Martelo de Schmidt		r/R
			r	R	
3	Monzonito	2	42	48	0.88
		1	55	60	0.92
		1	54	57	0.95
		1	56	62	0.90
		1	54	55	0.98
		1	58	64	0.91
		1	59	59	1.00
		1	56	59	0.95
		1	54	58	0.93
		1	60	61	0.98
		3	41	63	0.65
		3	39	65	0.60
		3	40	62	0.65
		3	42	63	0.67
		2	44	63	0.70
		2	44	63	0.70
		2	37	48	0.77
		3	32	58	0.55
		3	34	58	0.59
		3	32	48	0.67
		2	32	40	0.80
		3	31	52	0.60
		3	38	64	0.60
3	38	64	0.60		
3	30	50	0.60		
3	36	60	0.60		
3	35	58	0.60		
3	41	68	0.60		
8	Calcário	3	34	58	0.59
		3	34	55	0.62
		3	34	59	0.58
		3	31	52	0.60
		3	32	54	0.60
		1	44	46	0.96
		2	38	46	0.83
		1	49	50	0.98
		1	48	49	0.98
		2	45	54	0.83
		1	44	48	0.92
		1	48	49	0.98
		1	43	46	0.93
		1	44	47	0.94
		1	44	48	0.92
2	40	52	0.77		
1	44	44	1.00		
3	29	48	0.60		



**Figura 5.8:** Diagrama de regressão para os dados da tabela 5.3. Notar a definição da equação de correlação entre a razão  $r/R$  e o grau de intemperismo.

A razão  $r/R$ , calculada para as novas medições, manifesta uma boa correlação com o grau de intemperismo (Fig. 5.8). Definindo-se a equação 11, que serve também para inferir o valor de “ $r$ ” daqueles dados de mapeamento dos anos 2000 a 2003.

$$r = R \times (-0.1716 \times \text{intemperismo} + 1.1242) \dots (11)$$

O ângulo de atrito residual é calculado para cada família de discontinuidades (juntas e camadas), considerando o ângulo de atrito básico por litotipo, o grau de intemperismo da parede e o valor de rebote do martelo de Schmidt ( $R$ ). Deste modo, os ângulos residuais calculados são listados nas tabelas 5.6A e 5.7. Cabe assinalar que, sem o valor do rebote de Schmidt, optei por utilizar o valor do índice “ $Ja$ ” para estimar o intervalo de valores do ângulo de atrito residual. Similarmente o fiz no caso das falhas onde o preenchimento tem maior influência na resistência ao cisalhamento, como se apresenta na tabela 5.8.

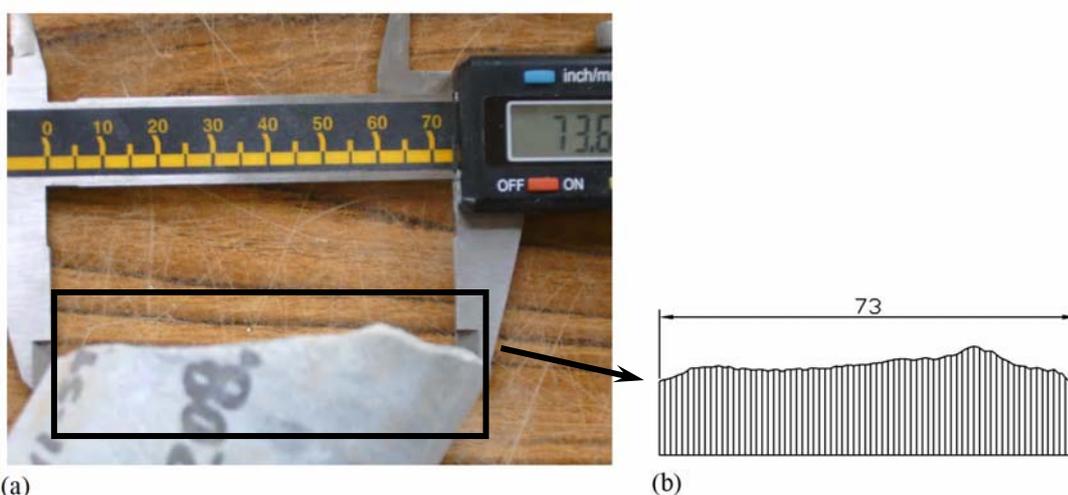
No cálculo da resistência à compressão das paredes ( $JCS_0$ ) utilizei o valor do rebote “ $r$ ” que foi deduzido a partir da equação 11, valor que é assumido como de escala de laboratório, para o qual se calcula um  $JCS_n$  contemplando a persistência média da discontinuidade, utilizando a equação 4. Os valores do  $JCS_0$  e  $JCS_n$  calculados são listados nas tabelas 5.6A e 5.7.

A fim de ampliar a explicação, escolhi os resultados da família 1 de juntas do domínio 1, valores apresentados na tabela 5.6A. É importante lembrar que no capítulo 4 detalhei as características geomecânicas das discontinuidades (Vide a tabela 4.2). Assim, a família 1 tem  $78^\circ/151^\circ$  de atitude média, 22m de persistência,  $10^\circ$  de  $JRC_{10}$ , moderado intemperismo nas paredes e 44.2 de rebote para a rocha fresca. Por conseguinte, o valor do ângulo de atrito básico é de  $29^\circ$  (vide a tabela 5.3), a razão  $r/R = 0.6$  com um  $r = 26.9$  (equação 11), e o ângulo de atrito residual =  $21^\circ$  (equação 6). Assim, o valor de  $r$  permite estimar um  $JCS_0 = 39.8$  Mpa para  $\gamma = 24.9$  KN/m<sup>3</sup> (equação 9 e tabela 5.1). Finalmente, considerando o efeito de escala (persistência e o valor de  $JRC_{10}$ ), resulta um  $JCS_n = 8$  Mpa (equação 4). Como comparação,

cabe assinalar que a família de juntas tem um valor médio de  $J_a = 2.2$ , podendo-se assumir um ângulo de atrito residual no intervalo de  $25^\circ$  a  $30^\circ$ , segundo a estimativa de Barton (1974). No entanto, o valor calculado resulta menor, indicando que ocorre um erro na estimativa visual dos índices da classificação Q, devido a fator de observação subjetiva durante o mapeamento.

### 5.4.3 ESTIMATIVA DO JRC

O  $JRC_{10}$  estimado visualmente durante o mapeamento de campo tem uma precisão de dois graus utilizando a tabela de perfis padrão (Fig. 5.4). No entanto, para conhecer se na estimativa visual existe um erro maior, escolheram-se alguns testemunhos com fraturas naturais, para calcular o valor de  $JRC_{10}$ . A superfície rugosa da fratura é digitalizada a partir de fotografias de perfil (Fig. 5.5, Fig. 5.9 e tabela 5.5).



**Figura 5.9:** Fotografia dum testemunho de calcário contendo uma superfície natural de junta (a), com um  $JRC_{10} = 15.6$  calculado através da metodologia de Tse & Cruden (1979). Perfil digital aproximado da rugosidade, da mesma fotografia, com linhas verticais espaçadas 1 mm cada (b).

**Tabela 5.5: Resultados do cálculo do  $JRC_0$  utilizando os perfis digitalizados e comparação entre o  $JRC_{10}$  calculado e o  $JRC_{10}$  estimado visualmente.**

Amostra	Comprimento Lo (cm)	M	Dx (mm)	Sum(Yi+1 - Yi)^2	Z2	JRC <sub>0</sub>	JRC (10) calculado	JRC (10) tabela
Calcario	7.4	75	1	6.4	0.3	16.5	14.9	12 - 14
Calcario	7.3	74	1	7.0	0.3	17.4	15.6	12 - 14
Monzonito	8.6	65	1	2.5	0.2	10.2	9.9	8 - 10
Monzonito	8.1	82	1	10.2	0.4	20.3	18.7	16 - 18
Monzonito	7.9	80	1	4.2	0.2	12.3	11.6	12 - 14
Monzonito	7.9	80	1	15.6	0.4	26.1	23.0	18 - 20
Monzonito	7.9	80	1	8.6	0.3	18.7	17.1	14 - 16
Monzonito	8	81	1	4.4	0.2	12.6	11.9	14 - 16
Monzonito	8.1	82	1	14.0	0.4	24.3	21.9	18 - 20
Monzonito	6.9	70	1	8.0	0.3	19.4	16.8	14 - 16
Monzonito	6.9	70	1	5.9	0.3	16.3	14.4	14 - 16
Escarnito	7.8	80	1	4.5	0.2	12.9	12.1	12 - 14
Escarnito	7.9	80	1	5.9	0.3	15.1	14.1	10 - 12
Escarnito	7.9	80	1	11.4	0.4	21.9	19.8	12 - 14
Escarnito	6.9	70	1	11.2	0.4	23.4	19.7	12 - 14

Os resultados da tabela 5.5 permitem deduzir que a estimativa visual do  $JRC_{10}$  para as amostras escolhidas é muito próxima do  $JRC_{10}$  calculado de modos que os valores visuais do  $JRC_{10}$ , registrados no mapeamento, sejam suficientemente reais. Cabe assinalar, que o valor do  $JRC_{10}$  registrado durante o mapeamento corresponde ao valor médio do intervalo indicado na tabela padrão (e.i.  $JRC_{10} = 13$  para o intervalo de 12 – 14).

## 5.5 ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

### 5.5.1 FAMÍLIAS DE JUNTAS

A estimativa da resistência de pico, para cada família de juntas, fundamenta-se na equação empírica de Barton (1974), devido ao fato que as paredes de juntas em geral são fechadas, permitindo o contacto entre suas paredes (rocha – rocha). A estimativa é calculada individualmente para cada família de juntas, resultados que são listados na tabela 5.6.

Com a finalidade de ter uma descrição genérica mais simples da resistência das famílias de juntas, a partir dos resultados da tabela 5.6 A, calculei os valores médios de cada parâmetro de resistência, agrupando as famílias de juntas por unidades litológicas, obtendo:

- Um ângulo de atrito básico ( $\phi_b$ ) de 32° para o calcário e de 29° para o monzonito (tabela 5.3).
- Um ângulo de atrito residual ( $\phi_r$ ) médio de 26° para o calcário e de 22° para o monzonito. Entretanto, o ( $\phi_r$ ) obtido a partir do índice  $J_a$  varia no intervalo de 25° a 35°, indistintamente para os litotipos considerados.
- O coeficiente de rugosidade ajustado ( $JRC_n$ ) tem como médias: 3,6 para o calcário e 3,5 para monzonito.
- A resistência à compressão da parede de rocha ( $JCS_n$ ), tem como médias: 13 MPa em calcário e 11 MPa em monzonito.
- A resistência ao cisalhamento de pico das juntas é expressada através da equação de Barton, considerando os valores descritos acima de cada unidade litológica, como:

Rocha	Inserindo ( $\phi_b$ )	Inserindo ( $\phi_r$ ):
Calcário	$\tau = \sigma \tan\left(32^\circ + 3.6^\circ \log\left(\frac{13}{\sigma}\right)\right)$	$\tau = \sigma \tan\left(26^\circ + 3.6^\circ \log\left(\frac{13}{\sigma}\right)\right)$
Monzonito	$\tau = \sigma \tan\left(29^\circ + 3.5^\circ \log\left(\frac{11}{\sigma}\right)\right)$	$\tau = \sigma \tan\left(22^\circ + 3.5^\circ \log\left(\frac{11}{\sigma}\right)\right)$

Certamente, das equações anteriores deduzi que o ângulo de atrito de pico varia no calcário, de 33° a 39° e no monzonito varia de 29° a 36°, desde que se considere uma tensão normal média de 0,14 MPa. Outros valores para o ângulo de atrito de pico são calculados pela função  $atan(jr/ja)$ , utilizando os valores médios dos índices  $jr$  e  $ja$  por cada litotipo resulta para o calcário 39°, e para o monzonito 35°.

**Tabela 5.6 A:** Valores estimados de resistência ao cisalhamento para as famílias de juntas

Domínio	Rocha	família	$\phi b$	Razão r/R	r	$\phi r$	$\gamma$ KN/m <sup>3</sup>	JCS <sub>o</sub> Mpa	JCS <sub>n</sub> Mpa	JRC <sub>n</sub> (°)	$\sigma$ Mpa	JCS <sub>n</sub> / $\sigma$	$\phi p$		
													1	2	3
1	Monzonito	1	29	0.6	26.9	21	24.9	39.8	8.0	3.4	0.1	102.8	35	27	35
		2	29	0.6	25.4	21	24.9	36.9	7.7	3.4	0.1	132.6	35	27	34
		3	29	0.6	26.0	21	24.9	38.0	9.6	3.3	0.3	33.8	34	26	32
		4	29	0.6	29.6	21	24.9	45.5	11.9	3.8	0.1	132.3	35	28	30
		5	29	0.6	21.9	21	24.9	31.0	8.5	3.8	0.1	84.5	35	28	31
2	Monzonito	1	29	0.6	32.1	21	24.9	51.7	8.9	3.0	0.0	194.6	34	26	36
		2	29	0.6	32.9	21	24.9	53.8	12.2	3.6	0.0	623.4	35	27	39
		3	29	0.6	33.8	21	24.9	56.4	12.1	3.4	0.0	310.1	35	27	37
		4	29	0.8	40.9	25	24.9	80.7	13.9	3.2	0.3	48.7	34	30	47
3	Monzonito	1	29	0.7	33.4	23	24.9	55.1	12.5	3.2	0.2	65.1	35	28	36
		2	29	0.6	30.8	21	24.9	48.5	7.9	2.8	0.1	121.2	34	26	39
		3	29	0.6	31.9	21	24.9	51.3	8.8	3.1	0.3	33.3	34	26	41
		4	29	0.6	30.5	21	24.9	47.6	11.1	3.5	0.1	190.5	35	27	37
		5	29	0.7	34.1	23	24.9	57.1	10.1	3.0	0.1	104.2	34	28	42
		6	29	0.6	33.2	21	24.9	54.5	12.8	3.5	0.1	219.8	35	27	40
		7	29	0.8	42.7	25	24.9	88.3	16.9	2.9	0.1	186.6	34	30	36
4	Monzonito	1	29	0.6	12.9	21	24.9	19.6	5.1	3.7	0.1	60.9	35	28	30
		2	29			(25 - 30)	24.9			3.4	0.2				33
		3	29	0.4	6.6	18	24.9	14.3	3.9	3.5	0.1	34.0	34	23	26
		4	29			(25 - 30)	24.9			3.0	0.1				28
		5	29	0.6	8.2	21	24.9	15.5	1.5	2.7	0.3	4.8	31	23	44
5	Calcário	1	32	0.6	20.3	24	25.7	29.4	11.6	4.3	0.0	572.7	39	31	30
		2	32	0.6	21.9	24	25.7	32.1	11.1	4.3	0.1	104.6	39	31	31
		3	32	0.6	22.5	24	25.7	33.1	9.2	4.3	0.1	66.9	39	31	37
		4	32	0.6	28.8	24	25.7	45.9	11.0	3.6	0.1	79.8	38	30	32
	Monzonito	1	29			(25 - 30)	24.9			3.2	0.1				37
		2	29	0.6	32.3	21	24.9	52.2	15.1	3.6	0.1	156.5	35	27	29
		3	29			(25 - 30)	24.9			4.5	0.1				33
		4	29			(25 - 30)	24.9			3.5	0.0				30
		5	29			(25 - 30)	24.9			3.7	0.1				35
		6	29			(25 - 30)	24.9			3.2	0.3				34
6	Monzonito	1	29	0.6	29.3	21	24.9	44.9	12.2	3.8	0.1	187.3	35	28	33
		2	29	0.6	30.7	21	24.9	48.2	15.3	3.5	0.1	104.9	35	27	31
		3	29	0.6	27.4	21	24.9	40.8	12.6	4.6	0.2	63.4	37	29	39
		4	29	0.6	31.0	21	24.9	48.9	12.5	3.3	0.2	58.4	35	27	30
		5	29	0.6	32.4	21	24.9	52.5	13.9	3.9	0.3	52.5	36	28	33
		6	29	0.6	31.7	21	24.9	50.6	11.4	3.4	0.1	220.2	35	27	18
7	Calcário	1	32	0.8	41.9	28	25.7	90.5	16.2	3.6	0.1	135.7	38	34	48
		2	32	0.8	42.2	28	25.7	92.0	9.0	3.6	0.2	38.1	38	33	58
		3	32	0.8	36.2	28	25.7	67.5	18.2	3.5	0.2	94.3	38	34	39
		4	32	0.8	42.7	28	25.7	94.7	19.1	3.3	0.3	72.6	38	33	45
		5	32	0.6	30.5	24	25.7	50.0	9.9	3.8	0.1	87.6	38	31	46
	Monzonito	1	29			(25 - 35)	24.9			3.8	0.3				39
		2	29			(25 - 30)	24.9			2.9	0.1				50
		3	29	0.6	28.0	21	24.9	42.1	8.2	3.4	0.3	28.7	34	26	36
		4	29	0.8	39.1	25	24.9	73.4	20.8	3.6	0.1	247.6	35	31	40
		5	29			(25 - 30)	24.9			3.9	0.1				39
8	Calcário	1	32			(25 - 30)	25.7			3.2	0.2				33
		2	32			(25 - 30)	25.7			3.5	0.2				40
		3	32			(25 - 30)	25.7			3.4	0.2				37
		4	32			(25 - 30)	25.7			3.6	0.0				37
		5	32			(25 - 30)	25.7			3.0	0.2				37
	Monzonito	1	29			(25 - 30)	24.9			3.8	0.2				33
		2	29			(25 - 30)	24.9			3.9	0.1				30
		3	29			(25 - 30)	24.9			3.6	0.2				31
		4	29			(25 - 30)	24.9			3.4	0.3				36
		5	29			(25 - 30)	24.9			3.9	0.1				37
9	Diorito	1	30				25.8				0.3				
		2	30				25.8				0.2				
		3	30				25.8				0.1				
		4	30				25.8				0.1				
		5	30				25.8				0.0				
		6	30				25.8				0.1				

**Nota a respeito da tabela 5.6 A:**

- ❖ A coluna que corresponde ao ângulo de atrito residual ( $\phi_r$ ) tem alguns valores em parêntesis (intervalos), que são estimados com base no índice  $Ja$  da classificação do sistema Q (Barton, 1974). No caso do ( $\phi_p$ ) há três estimativas, considerando o ângulo de atrito básico (1), o ângulo de atrito residual (2) e a função  $\text{atan}(j_r/j_a)$  (3).
- ❖ No cálculo da tensão normal ( $\sigma$ ) de cada família de descontinuidades, considerei que a estrutura corta o pé do talude (15 m de profundidade), obtendo-se valores que variam de 0 a 0.33 MPa (vide a equação 10 e tabela 5.6). Entretanto a razão  $JCS_n/\sigma$  varia de 4.8 a 623, sendo também necessário utilizar a equação 2, para a estimativa do ângulo de atrito de pico, como uma condição adicional.

Dentre a informação disponível, existem alguns poucos ensaios de corte direto, para as juntas em calcário e monzonito (Call & Nicholas Inc., 1995; Hitchcock, 2001), reportando-se que os valores dos ensaios foram ajustados por regressão linear. Eles obtiveram uma coesão aparente e um ângulo de atrito para o critério de Mohr - Coulomb, valores considerados como instantâneos, para uma envoltória não linear, e listados na tabela a seguir:

**Tabela 5.6 B: Resistência ao cisalhamento de juntas (valores experimentais)**

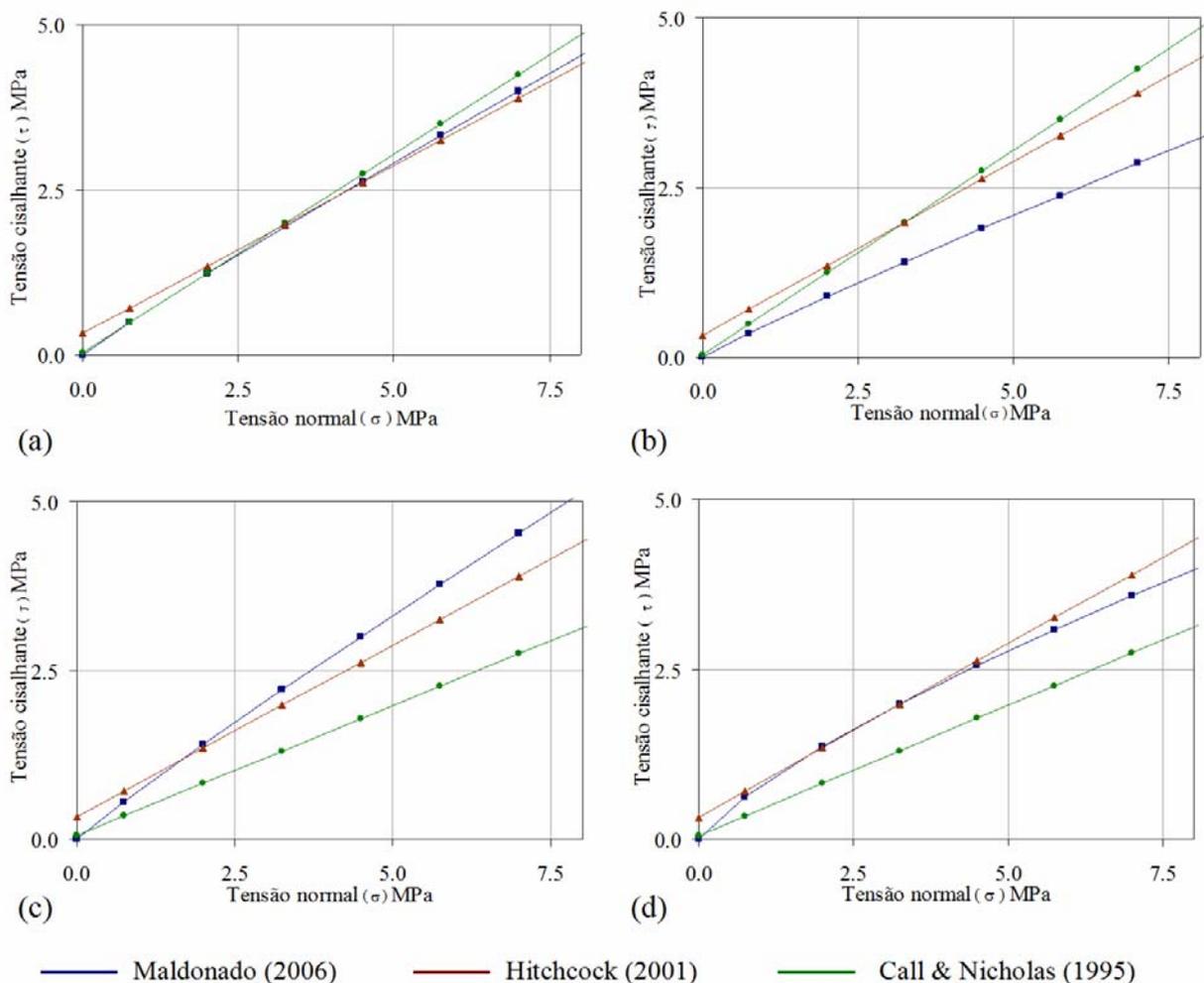
Fonte	Rocha	coesão (Kpa)	ângulo de atrito (°)
Call & Nicholas Inc. (1995)	Calcário	57	21
	Monzonito	42	31
Hitchcock (2001)	--	300	27

É possível que as diferenças existentes entre os valores dos ângulos de atrito estimados (de 29° a 39°) e os experimentais (de 21° a 31°), sejam devidas à quantidade limitada de ensaios realizados, em contraposição à maior quantidade de dados de campo coletada nesta dissertação. Entretanto não se descarta que a coesão aparente, obtida nos ensaios, expresse a influência de algum preenchimento, se houver. Apesar disso, os valores de resistência para o cisalhamento das juntas são comparáveis utilizando envoltórias (Fig. 5.10), definidas aqui pelos critérios empíricos de: Mohr – Coulomb (valores de Call & Nicholas e de Hitchcock) e de Barton (valores estimados na dissertação). É importante mencionar que o valor máximo para a tensão normal ( $\sigma$ ) é estimado em 8 MPa, correspondente à tensão vertical ( $\sigma_v$ ) para uma profundidade de 300m, considerando uma unidade de peso de rocha média de 0.026 MN/m<sup>3</sup>.

Na figura 5.10, as envoltórias definidas segundo o critério de Barton aproximam-se ao critério de ruptura linear de Mohr – Coulomb, devido ao efeito de escala que diminui a influência da rugosidade. Por outro lado, ocorre que o valor da resistência das paredes produz uma envoltória com maior inclinação que os critérios lineares, dependendo das tensões normais consideradas. As envoltórias para as juntas em monzonito são semelhante na mesma figura (Fig. 5.10 a),

quando se considera o ângulo de atrito básico, e coincidentes para uma tensão normal próxima de 3 MPa. No entanto, quando na estimativa do uso do ângulo de atrito residual (Fig. 5.10 b), a envoltória de Barton resulta muito conservadora com respeito às estimativas dos trabalhos anteriores, sendo aceitável aproximar a resistência ao cisalhamento de pico, para as juntas em monzonito, utilizando o ângulo de atrito básico.

Para as juntas em calcário, a envoltória de Barton, definida com o ângulo de atrito básico, dá uma maior resistência do que a estipulada nos estudos anteriores (Fig. 5.10, c). Entretanto, quando utilizo a estimativa do ângulo de atrito residual (Fig. 5.10, d), a envoltória resultante é não linear e se aproxima da estimativa de Hitchcock (2001), para níveis de tensão inferiores a 5 MPa. Contrariamente, a estimativa de Call & Nicholas (1995), resulta muito menor, sendo aceitável aproximar a resistência ao cisalhamento de pico, para as juntas em calcário, utilizando o ângulo de atrito residual.



**Figura 5.10:** Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento para as juntas em monzonito e calcário, definidas para os valores estimados e para os valores sugeridos em estudos anteriores. Para o monzonito, os valores substituídos na equação de Barton em (a) são:  $\phi_b = 29^\circ$ ,  $JRC_n = 3.5$  e  $JCS_n = 11$  MPa, e em (b) utiliza-se  $\phi_r = 22^\circ$ . Para o calcário, os valores ingressados à equação de Barton em (c) são:  $\phi_b = 32^\circ$ ,  $JRC_n = 3.6$  e  $JCS_n = 13$  MPa, e em (d) utiliza-se  $\phi_r = 26^\circ$ .

### 5.5.2 FAMÍLIAS DE CAMADAS

Os planos de acamamento ocorrem com preenchimentos suaves, compostos, em geral por carbonatos ou calcita precipitada, gerando alguma coesão adicional à resistência por atrito. Assim, para a estimativa da resistência ao cisalhamento de pico utilizei a mesma metodologia empregada para as famílias de juntas, com a única diferença da adição de um valor de coesão baseado nos valores experimentais.

Uma descrição genérica dos parâmetros de resistência das famílias de camadas (tabela 5.7) pode ser feita com os valores médios:  $\phi_b = 32^\circ$ ,  $\phi_r = 25.3^\circ$ ,  $JRC_n = 2.7$ ,  $JCS_n = 17.4$ ,  $jr = 1.5$  e  $ja = 2.1$ , permitindo definir a resistência de pico, baseada na envoltória não linear, mais uma coesão relacionada ao preenchimento, assim:

Inserindo ( $\phi_b$ )	Inserindo ( $\phi_r$ ):
$\tau = C + \sigma \tan\left(32^\circ + 2.7^\circ \log\left(\frac{42.3}{\sigma}\right)\right)$	$\tau = C + \sigma \tan\left(25.3^\circ + 2.7^\circ \log\left(\frac{42.3}{\sigma}\right)\right)$

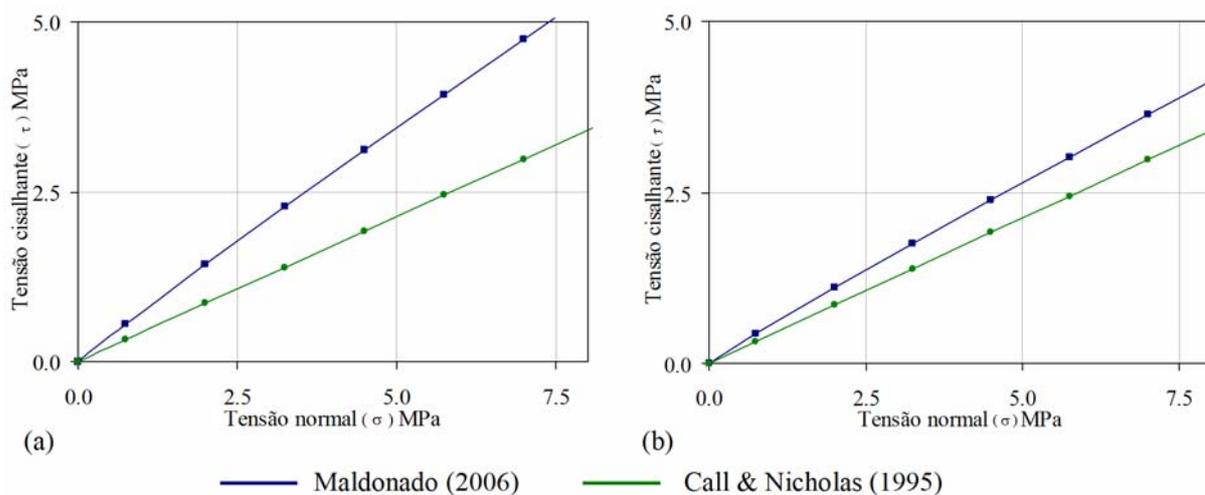
As equações acima permitem deduzir que o ângulo de atrito de pico, nos planos de acamamento, varia de  $31^\circ$  a  $37^\circ$  (para uma tensão normal média de 0.39 MPa). Um outro valor para o ângulo de atrito de pico é calculado substituindo os valores médios dos índices  $jr$  e  $ja$  na função  $atan(jr/ja)$ , obtendo  $35^\circ$ , como valor para dito ângulo.

**Tabela 5.7: Valores estimados de resistência ao cisalhamento para os planos de acamamento.**

$\phi_b$	Razão r/R	r	$\phi_r$	$\gamma$ KN/m <sup>3</sup>	JCS <sub>o</sub> Mpa	JCS <sub>n</sub> Mpa	JRC <sub>n</sub> (°)	$\sigma$ Kpa	$\sigma$ Mpa	JCS <sub>n</sub> / $\sigma$	log(JCs/S)	$\phi_p$		
												1	2	3
32	0.6	22.7	24	25.7	33.4	7.6	3.3	385.4	0.4	19.6	1.3	36	28	36
32	0.6	32.9	24	25.7	56.8	25.5	2.3	385.4	0.4	66.2	1.8	36	28	30
32	0.8	42.6	28	25.7	93.9	19.0	3.1	385.4	0.4					
32			(25 - 30)	25.7			2.4	385.3	0.4			32		39

Os dois ensaios de corte direto realizados para os planos de acamamento (Call & Nicholas Inc., 1995), indicam que a resistência ao cisalhamento, alcança valores de 8 Kpa para a coesão e  $23^\circ$  para o ângulo de atrito.

Tanto os valores estimados como os experimentais são comparados utilizando envoltórias em um diagrama de Mohr(Fig. 5.11).



**Figura 5.11:** Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento para os planos de acamamento no calcário. A envoltória de Call & Nicholas, ilustrada em (a) e (b), é definida por:  $\tau = 0.008 + \sigma \tan(23^\circ)$ , entretanto para a envoltória de Barton existem os valores são:  $\phi_b = 32^\circ$  em (a) e  $\phi_r = 25.3^\circ$  em (b), com  $C = 0.008$  MPa,  $JRC_n = 2.7$ ,  $JCS_n = 17.4$ .

As envoltórias definidas pelo critério de Barton, na Fig. 5.11, são próximas a uma linha reta, devido à baixa influência da rugosidade na resistência ao cisalhamento. No diagrama de Mohr (a), notar também que a envoltória de Barton se afasta da estimativa de Call & Nicholas, quando o emprego do ângulo de atrito básico; o diagrama de Mohr (b), mostra que a envoltória de Barton está mais próxima da estimativa citada, sendo razoável que a estimativa da resistência ao cisalhamento de pico, dos planos de acamamento, se baseia no ângulo de atrito residual.

### 5.5.3 FALHAS SECUNDÁRIAS E SINGULARES

Primeiramente, no caso das falhas secundárias, o método probabilístico de *Pontos de Estimativa* (Gianni, 1988), com os valores médios e os desvios padrões dos índices  $jr$  e  $ja$ , permite obter uma estimativa do ângulo de atrito médio. Também, os valores da tabela 5.2, e os valores propostos por Pusch (1994), comentados anteriormente (Pág. 91), sugerem valores aproximados da coesão e do ângulo de atrito.

A tabela 5.8 é uma listagem dos valores de resistência para as falhas secundárias, onde o valor para o ângulo de atrito residual é aproximado a partir do índice “ $ja$ ”, resultando valores  $\leq 30^\circ$ . Entretanto, para o valor do ângulo de atrito de pico, a utilização dos valores médios dos índices  $jr$  e  $ja$  na função  $\text{atan}(jr/ja)$ , faz obter valores  $\leq 28^\circ$ . Se contemplamos a variação dos índices  $jr$  e  $ja$  com o método de *Pontos de Estimativa* (P.E.), obtemos valores do ângulo de atrito de pico  $\leq 35^\circ$ , por médio da função  $\text{atan}(jr/ja)$ .

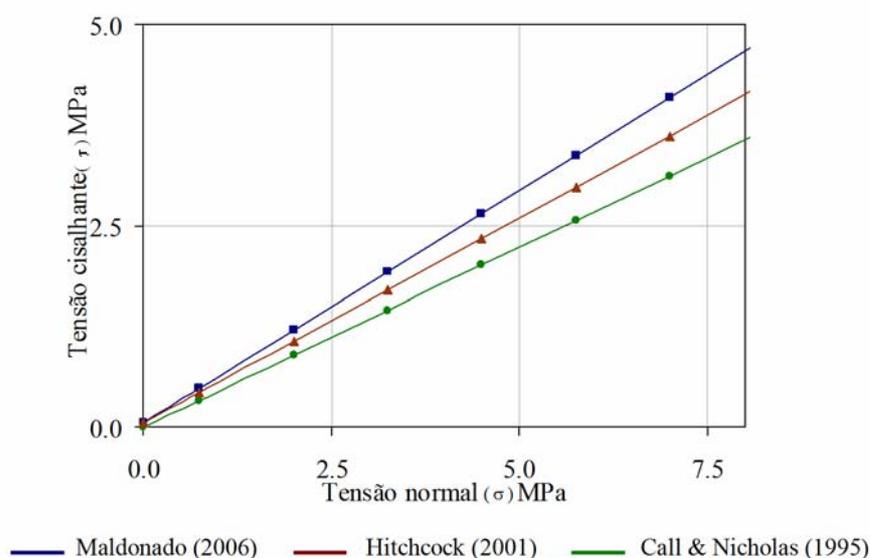
**Tabela 5.8: Valores estimados de resistência ao cisalhamento para as falhas secundárias.**

Domínio	Rocha	familia	dip	dipdir.	$\phi_r$ f(Ja)	$\phi_p$ Atan (jr/ja)	P.E. em atan (jr/ja)				$\phi_p$	
							(++)	(+-)	(-+)	(--)	média	desvio
1	Monzonito	1	80	155	25 - 30	18	17.2	29.4	11.7	20.6	20	7.4
		2	75	232	16 - 24	15	17.6	20.8	10.4	12.4	15	4.8
		3	70	316	25 - 30	20	16.7	32.7	13.1	26.6	22	9.0
		4	72	347	25 - 30	19	16.7	29.4	13.1	23.6	21	7.2
		5	72	282	16 - 24	17	15.3	26.6	12.0	21.3	19	6.5
2	Monzonito	1	89	327	25 - 30	20	18.4	33.1	12.5	23.5	22	8.7
		2	80	213	25 - 30	25	20.5	45.9	14.0	34.5	29	14.3
		3	86	280	16 - 24	15	14.9	14.9	14.9	14.9	15	0.0
3	Monzonito	1	84	113	25 - 30	23	18.8	35.8	16.2	31.6	26	9.6
		2	73	4	25 - 30	24	19.6	45.0	13.4	33.7	28	14.2
		3	74	50	25 - 30	20	15.1	31.0	13.7	28.6	22	9.0
		4	69	335	25 - 30	19	16.7	31.4	11.3	22.2	20	8.6
4	Monzonito	1	67	99	16 - 24	16	13.6	19.9	13.6	19.9	17	3.6
		2	72	158	16 - 24	17	18.4	21.7	12.5	14.9	17	4.0
		3	78	202	16 - 24	17	16.4	25.0	11.1	17.3	17	5.7
		4	52	40	16 - 24	15	17.1	19.5	11.6	13.3	15	3.6
5	Calcário	1	81	290	6 - 24	4	3.4	5.3	3.4	5.3	4	1.1
		2	68	317	6 - 24	4	3.9	5.1	3.9	5.1	4	0.7
	Monzonito	1	78	146	25 - 30	20	18.3	31.0	12.4	21.9	21	7.8
		2	75	33	20 - 25							
6	Monzonito	1	84	338	25 - 30	21	19.2	34.1	13.1	24.3	23	8.9
		2	70	78	20 - 25	28	32.6	32.6	23.1	23.1	28	5.5
7	Calcário	1	64	316	25 - 30	18	16.1	46.9	7.7	26.6	24	16.9
		2	47	357	16 - 24	15	17.7	17.7	12.0	12.0	15	3.3
	Monzonito	1	67	90	25 - 35	22	13.8	46.8	13.8	46.8	30	19.1
		2	57	122	25 - 30	19	14.7	27.5	14.7	27.5	21	7.4
		3	57	34	20 - 25	25	21.4	30.5	21.4	30.5	26	5.2
8	Calcário	1	44	219	25 - 30	15	15.6	29.7	7.2	14.5	17	9.4
		2	75	231	25 - 30	13	10.3	17.5	10.3	17.5	14	4.1
3		50	29	16 - 24	10	9.1	10.5	9.1	10.5	10	0.8	
8	Monzonito	1	63	101	16 - 24	17	15.8	25.8	10.7	17.9	18	6.3
		2	87	163	25 - 30	18	17.1	29.2	11.6	20.5	20	7.4
		3	57	171	16 - 24	16	17.2	21.8	11.6	15.0	16	4.3
		4	85	292	16 - 24	16	17.1	20.1	11.6	13.7	16	3.7
		5	58	49	25 - 30	20	17.2	38.8	11.7	28.2	24	12.0

Na tabela 5.8 os valores para o ângulo de atrito pico  $< 20^\circ$  parecem ser demais conservadores, para serem considerados na estimativa da resistência das falhas, pelo que se faz necessário examinar os materiais de preenchimento, para aproximar valores mais aceitáveis. Mas, ocorre que, tanto nas falhas singulares quanto nas falhas secundárias, os materiais de preenchimento são similares. Considerando a tabela 5.2, as falhas em calcário teriam valores de coesão de pico entre 50 a 200 kPa e de ângulo de atrito pico entre  $17^\circ$  e  $21^\circ$ . Entretanto, as falhas em monzonito poderiam apresentar valores de coesão pico entre 50 e 240 kPa, e de ângulo de atrito pico entre  $24^\circ$  e  $42^\circ$ . Contudo, se o preenchimento é comparado com um solo granular de densidade média, a estimativa é de uma coesão nula e de um ângulo de atrito entre  $36^\circ$  e  $42^\circ$  (González, et. al. 2002).

Os valores de Pusch para falhas maiores (Apud. Karsulovick, 2001) indicam um ângulo de atrito pico, entre 25° e 30° e um ângulo de atrito residual entre 18° y 25° para falhas com traços entre 100 e 1000 m. Mas, a maioria das falhas registradas tem traços <100 m (tabela 4.6, Cap. 4), deduzindo-se que os ângulos de atrito devem ser um pouco maiores do que os valores indicados por Pusch.

Finalmente, os estudos anteriores de Tintaya indicam valores de 27° para o ângulo de atrito, e de 50 KPa para a coesão, segundo Hitchcock (2001), e 24° para o ângulo de atrito com 0 kPa de coesão, segundo Call & Nicholas Inc.(1996, 1998). Estes valores que foram inferidos com base nas suas observações de campo, e que são comparáveis aos valores listados na tabela 5.2, embora pareça apropriado considerar para a resistência de pico das falhas uma coesão entre 0 e 100 kPa e um ângulo de atrito entre 25° e 45°. No entanto, a resistência residual teria uma coesão nula e um ângulo de atrito diminuído entre 2° e 4° em relação aos valores de pico, como indica a literatura técnica para falhas com preenchimentos combinados de rocha triturada e argilas (Wyllie & Mah, 2004). Assim, sugiro para a resistência de pico das falhas uma coesão de 50 kPa e um ângulo de atrito de 30°. Adicionalmente, para a resistência residual seria apropriado considerar uma coesão nula e um ângulo de atrito de 26°(Fig. 5.12).



**Figura 5.12:** Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento para as falhas em geral. Sendo definida a envoltórias para Call & Nicholas como:  $\tau = \sigma \tan(24^\circ)$ , a envoltória para Hitchcock:  $\tau = 0.05 + \sigma \tan(27^\circ)$  e a envoltória proposta como:  $\tau = 0.05 + \sigma \tan(30^\circ)$ .

# *Caracterização geomecânica das discontinuidades*

## **4.1 INTRODUÇÃO.**

O capítulo anterior expõe que as estruturas geológicas presentes no interior da mina têm orientações similares aos padrões do Distrito, como sugere o critério de Pumpeley de repetitividade de estruturas similares. Também, proporciona um esboço interpretativo da evolução das estruturas geológicas da área do Distrito, incluindo a área da mina Tintaya, estabelecendo que a última fase de deformação é responsável pela ativação e geração das estruturas rúpteis, as quais na atualidade, influem na estabilidade dos taludes. Já, o presente capítulo deixa o contexto evolutivo das estruturas, para aprofundar na quantificação das características mecânicas das estruturas planas, constituindo o marco de referência necessário para prever a estimativa da resistência ao cisalhamento, a ser desenvolvida no próximo capítulo.

O capítulo trata sob o ponto de vista geotécnico as estruturas geológicas planas presentes na mina, especificamente, os planos de estratificação, falhas e juntas, genericamente denominadas de discontinuidades, termo utilizado na literatura geotécnica para definir as interrupções naturais de continuidade do maciço rochoso, as quais constituem planos de fraqueza, que modificam as propriedades de resistência, deformabilidade e permeabilidade de um maciço.

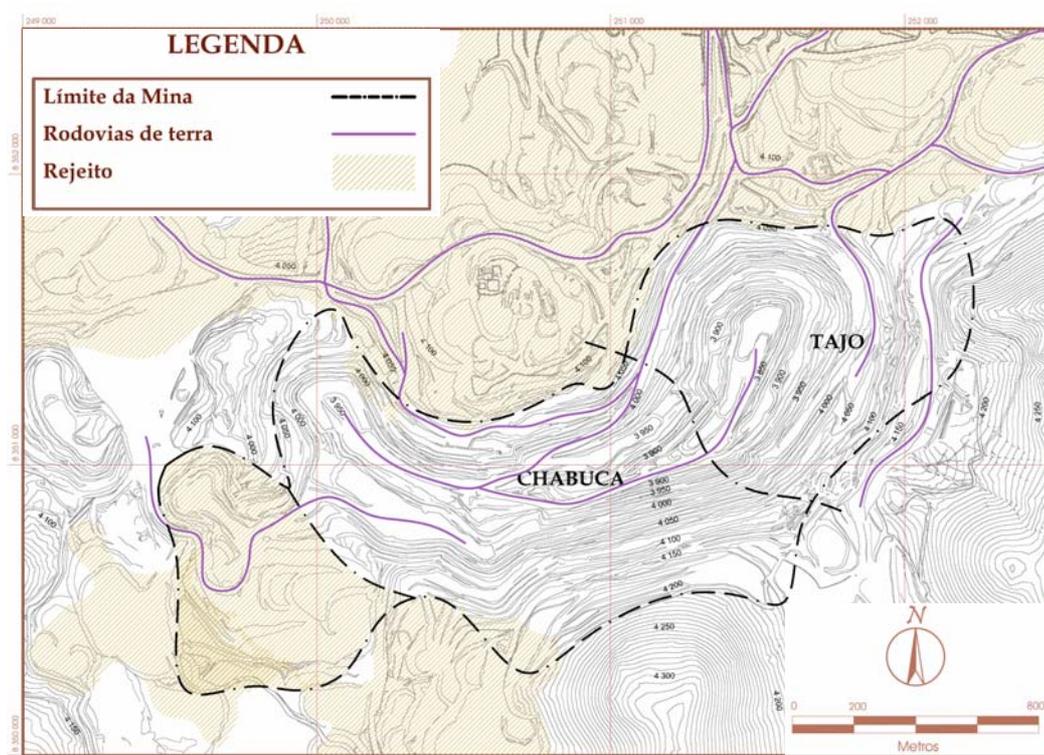
A caracterização geomecânica das discontinuidades refere-se à descrição quantitativa das características mecânicas das discontinuidades, incluindo a disposição espacial (atitude,

persistência e frequência), as características das paredes (abertura, rugosidade, intemperismo, percolação e resistência), e as características dos materiais de preenchimento (tipo de material, resistência e percolação). A descrição quantitativa está baseada nos dados coletados durante o mapeamento geotécnico realizado nos taludes da mina, no qual se utilizaram tanto guias e nomenclaturas propostas na literatura (e.g. Barton, 1977; ISRM, 1978), quanto tabelas elaboradas.

No caso de Tintaya, ocorreram múltiplos problemas de estabilidade de taludes condicionados pela disposição espacial das descontinuidades em relação à geometria da escavação da mina. Por esta razão, o capítulo inclui uma análise cinemática simples para determinar os possíveis modos de ruptura, considerando a atitude das famílias de descontinuidades, a orientação dos taludes e os critérios cinemáticos para ruptura plana, em cunha e tombamento (Goodman, 1980).

#### 4.1.1 GEOMETRIA DOS TALUDES

A ocorrência de escarnito, localizado no contacto do calcário com o monzonito, controla a geometria de escavação da mina. A planificação de mina considera: uma escavação de ~250m de profundidade cujos taludes globais têm uma inclinação média ~45°, e taludes de bancada com 15m de altura e inclinações ~63°. Adicionalmente considera rodovias de terra (rampas de acesso) construídas com 10% de gradiente e 30m de largura, comunicando a zona de extração do minério com a planta de benefício e as áreas de descarga de rejeito. (Fig. 4.1).



**Figura 4.1:** Área de escavação e topografia da mina Tintaya. Indicando os nomes locais de Tajo e Chabuca, o limite dos taludes, as rodovias de terra ou rampas de acesso e alguns níveis de referência das bancadas.

### 4.1.2 TRABALHOS ANTERIORES

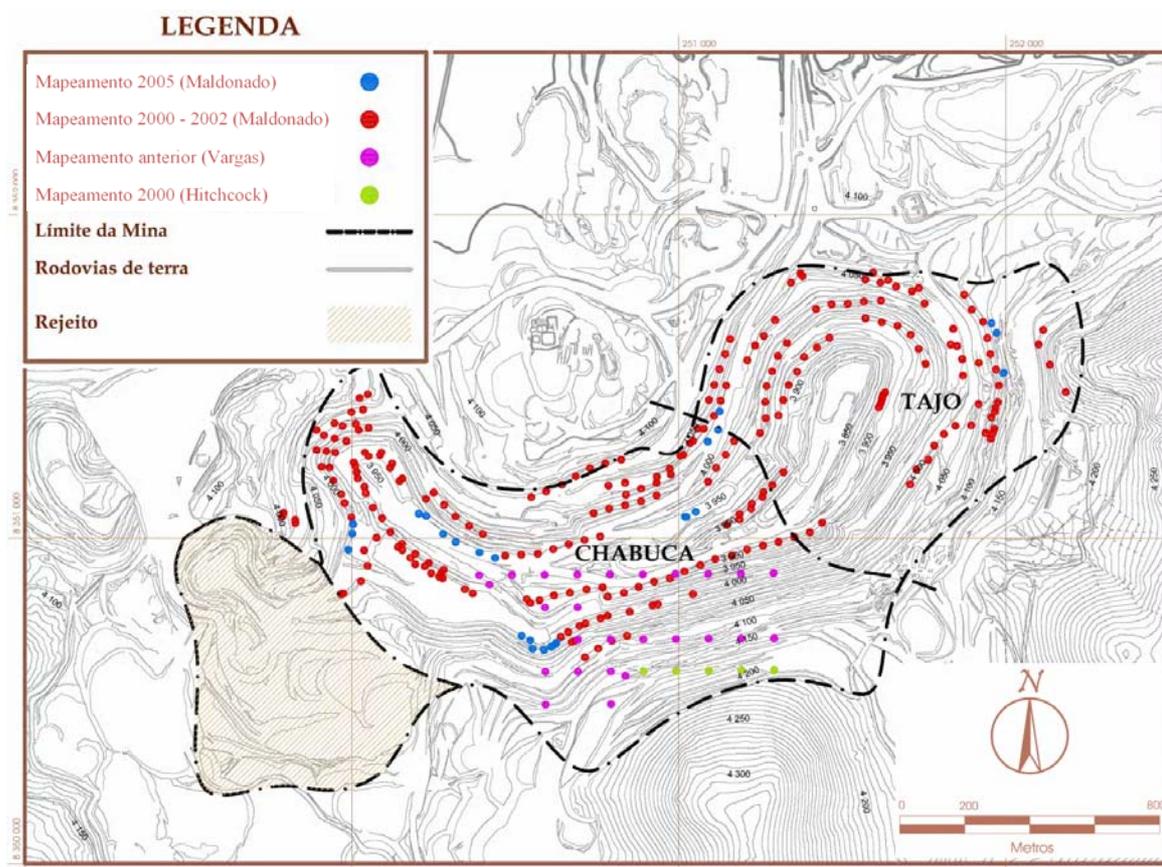
Dentro da área da mina foram realizados vários trabalhos geotécnicos anteriores, tanto por consultores externos (Call & Nicholas, 1996, 1998; Ingerock, 2000, 2001) quanto pelo pessoal do departamento de geotecnia de Tintaya desde 1996. Estes trabalhos incluem: coleta de informação, classificação do maciço rochoso, modelado geoestatístico, avaliação de estabilidade de taludes e monitoramento de zonas instáveis.

A coleta de informação foi baseada na descrição geomecânica de testemunhos, nos mapeamentos geotécnicos de bancadas e nos testes de laboratório. A coleta de informações e a classificação RMR de 1989 foram utilizadas para classificar o maciço rochoso, permitindo estimar os parâmetros de resistência. O modelado geoestatístico foi construído utilizando krigagem para interpolar as propriedades geomecânicas do maciço rochoso, por unidade litológica, incluindo coesão, ângulo de atrito e peso específico. Atualmente o modelo geoestatístico é utilizado para definir zonas com propriedades quase homogêneas dentro do maciço rochoso, permitindo realizar avaliações de estabilidade de taludes, utilizando análise de equilíbrio limite para a definição dos ângulos de escavação dos taludes globais. Porém ainda existem problemas de instabilidade nos taludes de bancada, com controle estrutural, e às vezes na escala de múltiplas bancadas, razão que justifica o mapeamento geotécnico periódico das estruturas geológicas presentes no maciço rochoso.

### 4.1.3 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

O mapeamento geotécnico foi realizado na área da mina, utilizando janelas de amostragem na face dos taludes com dimensões de 15x15m (Fig. 4.2 e Fig. 4.3). A filosofia de amostragem utilizada foi seletiva, registrando as descontinuidades representativas e sistemáticas, e descrevendo de cada uma: A *atitude*, ou orientação espacial dos planos estruturais, utilizando a nomenclatura mergulho e direção de mergulho; A *persistência*, ou comprimento das estruturas planas estimado por comparação visual da altura da janela de amostragem com a extensão do traço de cada descontinuidade; O *espaçamento*, que é a distância entre planos estruturais de uma mesma família, é obtido pela relação inversa da frequência de descontinuidades (e.g.  $f = 4/m$  resulta em 0.25m de espaçamento); A *rugosidade*, ou grau de irregularidade e aspereza da superfície de descontinuidade que é comparada com perfis padrão (ISRM, 1978; Barton, 1974, 1977) e quantificada pelos índices  $J_r$  e  $JRC_{10}$ ; O grau de *intemperismo* ou grau de decomposição da rocha que é descrito pelo índice  $J_a$  (Barton, 1974) e a tabela padrão (ISRM, 1978). Para a estimativa da *resistência* à compressão não confinada e do grau de *percolação* da água, tanto para o caso das paredes quanto para o preenchimento das descontinuidades, utilizei-me das tabelas-padrão existentes na literatura (ISRM, 1978) (Fig. 4.4).

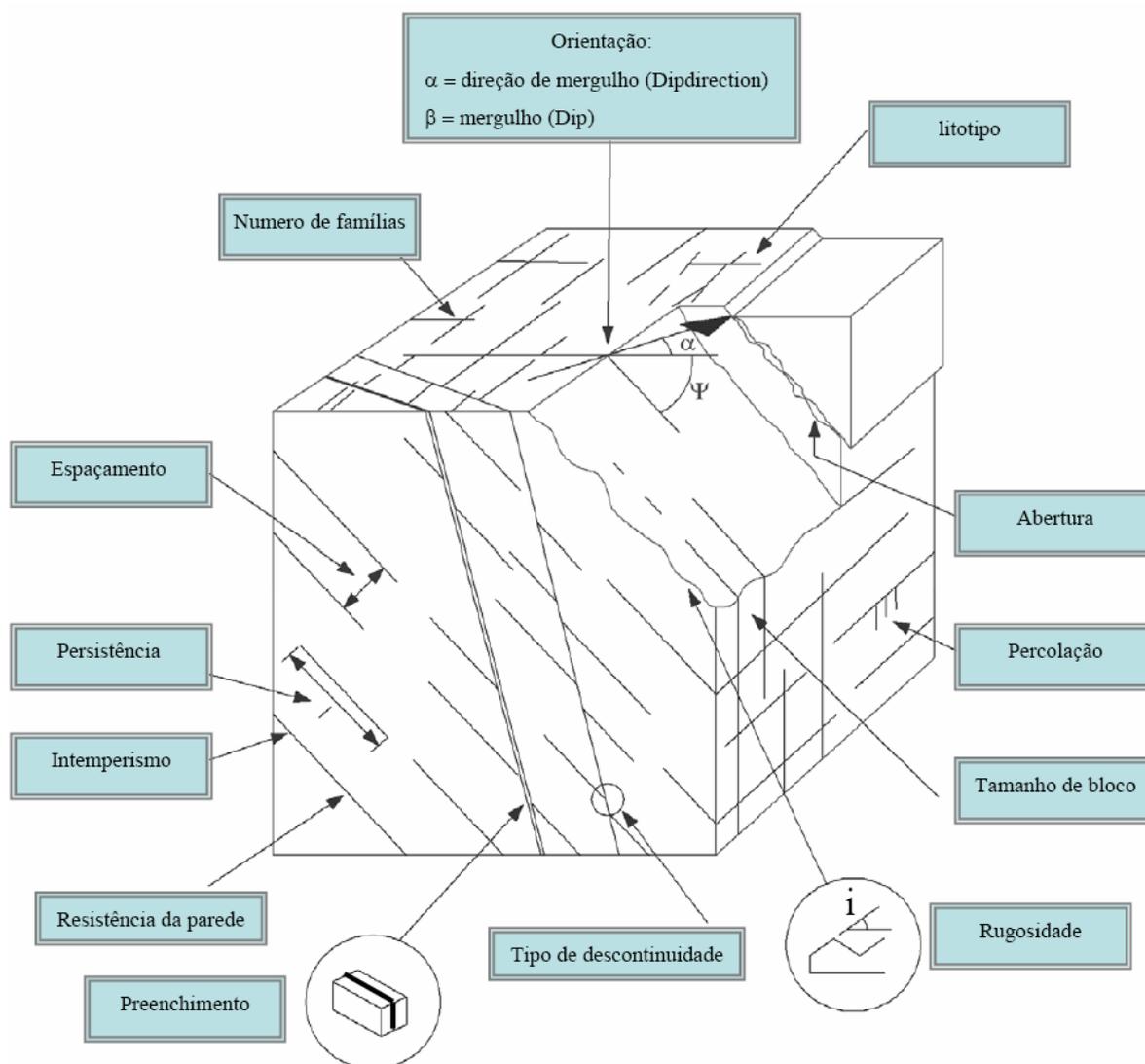
Durante a coleta de dados para esta dissertação foi necessário realizar um mapeamento individual das falhas com comprimento de traço  $> 30m$ , utilizando todas as descrições explicadas anteriormente, excetuando o espaçamento, por serem estruturas singulares.



**Figura 4.2:** Mapa de localização das janelas de amostragem utilizadas no mapeamento geotécnico atual, além dos mapeamentos anteriores realizados por Vargas e Hitchcock (2000) e os mapeamentos anteriores realizados pelo autor entre 2000 a 2005.



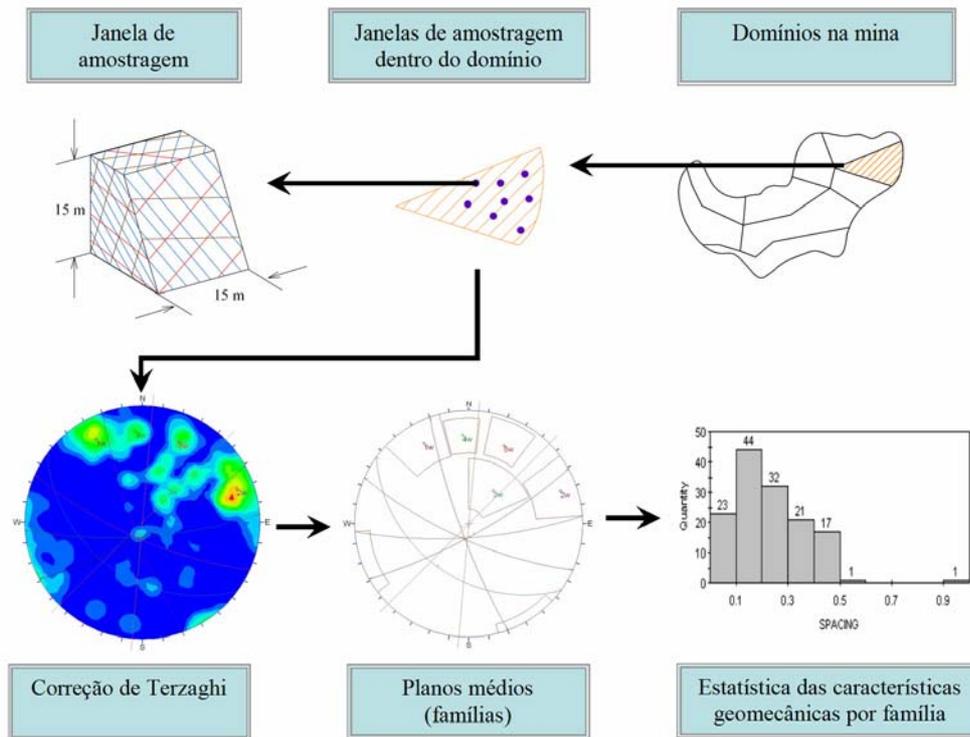
**Figura 4.3:** Mapeamento em janelas de amostragem. A fotografia corresponde a uma janela de amostragem com dimensões de 15 x 15 m (altura e comprimento). A rocha corresponde a calcário pouco intemperizado, onde identifico, como discontinuidades, os planos de estratificação sub – horizontais com direção de mergulho contrário ao talude, gerando um sistema de juntas subparalelo à direção de mergulho do talude com um mergulho forte produzindo escorregamentos planos.



**Figura 4.4:** Ilustração de um maciço rochoso, indicando as características geomecânicas observadas nas descontinuidades (Wyllie, 1999).

## 4.2 DESCRIÇÃO QUANTITATIVA DAS DESCONTINUIDADES

Para a caracterização das descontinuidades dentro da mina, houve necessidade de definição de setores lito – estruturais com base na informação geológica descrita no capítulo 3. Em cada setor se utilizaram projeções estereográficas com o fim de definir as famílias de descontinuidades, ajustando os erros de tendência, pelo emprego da correção de Terzaghi. Em seguida, para cada família de descontinuidades calcularam-se as médias estatísticas de cada característica geomecânica, permitindo elaborar tabelas resumo de cada tipo de estrutura: juntas, camadas e falhas (Fig. 4.5). É importante mencionar que antes da estatística, também se ajustaram os valores do espaçamento utilizando o fator de correção de Terzagui, que se encontra incorporado no programa Dips 5.1. Similarmente, a extensão das descontinuidades (persistência) é aproximada pela divisão do comprimento do traço estimado entre a função: seno do ângulo de mergulho da estrutura.



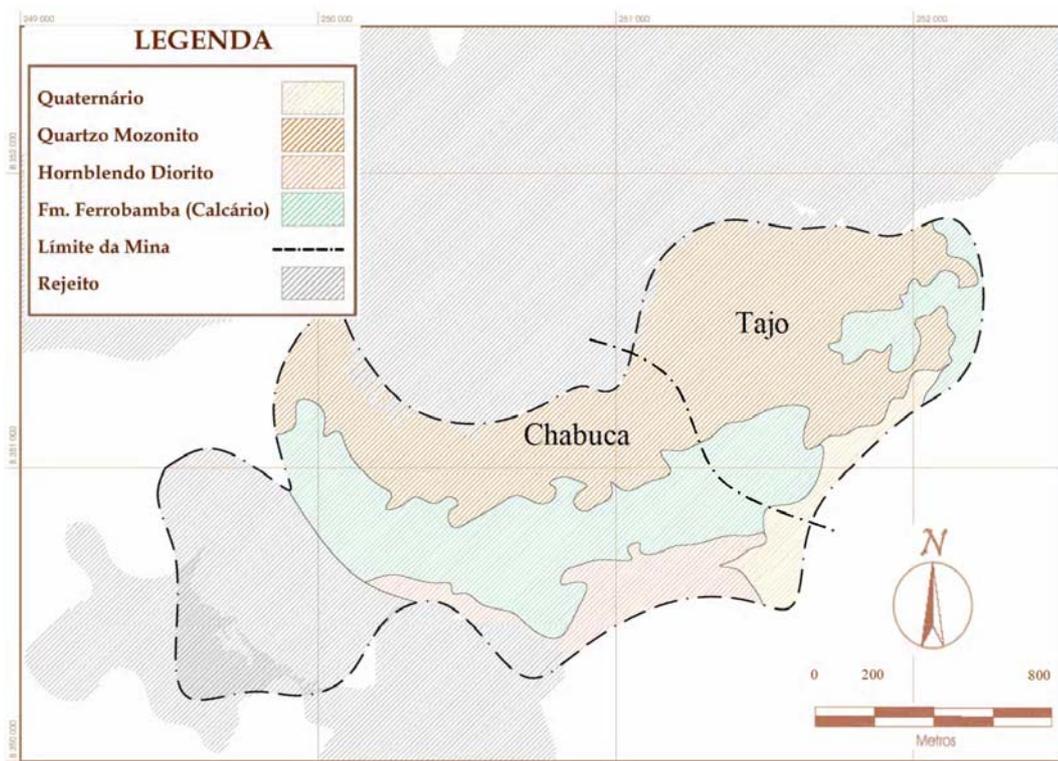
**Figura 4.5:** Diagrama ilustrando a metodologia utilizada na descrição quantitativa de discontinuidades. Notar a definição dos setores na área da mina, o mapeamento geotécnico utilizando janelas de amostragem (15x15m). O método utilizado expõe famílias dentro de um setor, após da correção de Terzaghi. O último quadro, mostra a estatística das características geomecânicas para cada família definida.

#### 4.2.1 DEFINIÇÃO DE SETORES

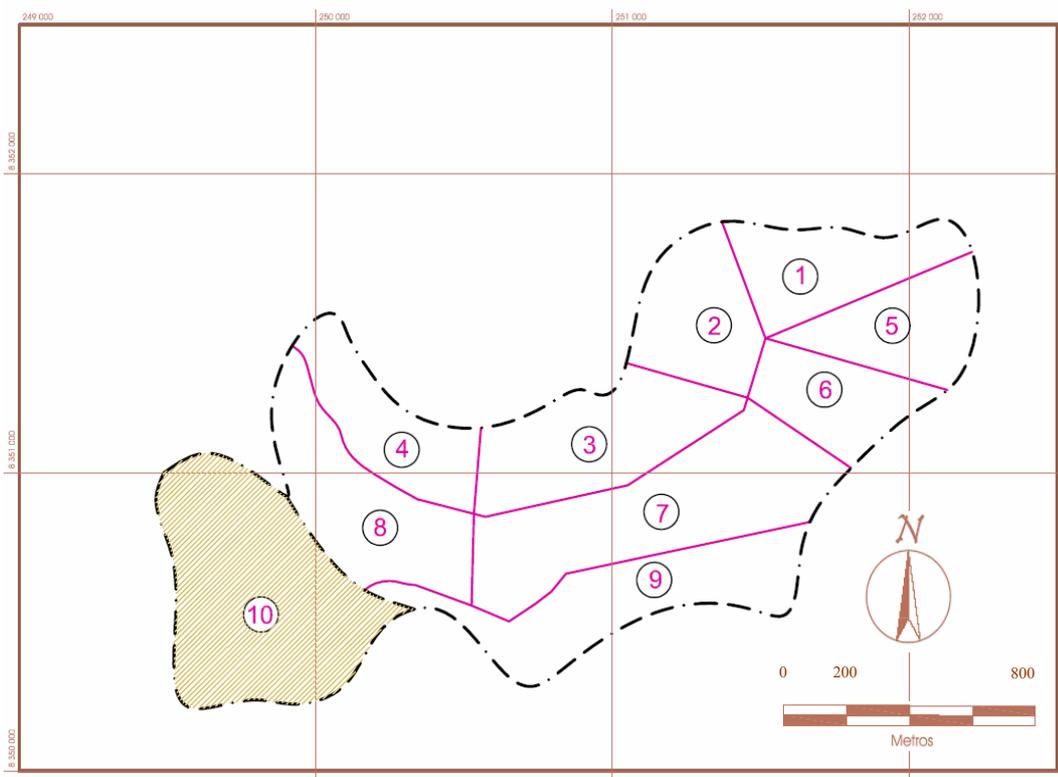
O maciço rochoso na área da mina Tintaya é tipicamente heterogêneo e anisotrópico, por causa dos diferentes tipos litológicos (monzonito, calcário e diorito), presença de discontinuidades (falhas, juntas, acamamento e contactos), e graus variáveis de alteração (e.g. argilização).

Para o estudo das discontinuidades na área da mina é necessário definir setores homólogos com características geológicas similares, a fim de criar uma subdivisão levando em conta: o agrupamento das unidades litológicas homogêneas, a separação ao longo dos contactos litológicos, a subdivisão dentro de cada unidade litológica por similitude estrutural. Porém as grandes estruturas definem o caminho, e finalmente uma última subdivisão considera a geometria da escavação da mina, agrupando as áreas pela orientação do talude. Este último critério é importante na determinação da influência das discontinuidades na escavação dos taludes.

Os setores são designados com números arábicos de 1 a 10 (Tabela 4.1, Fig. 4.6 e Fig. 4.7), e serviram para o estudo estatístico, descrição geomecânica e análise cinemática subsequente das famílias de discontinuidades (juntas, falhas secundárias e camadas).



**Figura 4.6:** Mapa com as unidades litológicas simplificadas da área da mina, e os nomes utilizados na lavra para os dois setores da mina.



**Figura 4.7:** Mapa com a delimitação de setores. Os números arábicos são utilizados no texto para a descrição de cada setor.

**Tabela 4.1:**Resumo da geometria da mina em relação aos setores definidos.

Setor	Rocha Dominante	Orientação do talude	Número de Bancadas	Altura Total (m)	Rampas
1	monzonito	205	19	240	1
2	monzonito	121	18	250	2
3	monzonito	144	17	220	2
4	monzonito	180 e 230	10	140	2
5	calcário / monzonito	280	25	140	2
6	monzonito	300	23	330	1
7	calcário / monzonito	330	17	200	1
8	calcário / monzonito	60 e 130	9	130	1
9	diorito	335	11	100	0

O **Setor 1**: Localizado na parte Norte do Tajo onde o monzonito é a rocha dominante, com ocorrência de corpos alongados menores de escarnito e alguns diques de latito, andesito, Pm2 e Pm3. Estruturalmente, as falhas ocorrem com uma orientação NE e mergulhos sub-verticais. O setor é delimitado no extremo Leste pelo contacto com o calcário e no extremo Oeste pela ocorrência de falhas de orientação ~NS.

O **Setor 2**: Localizado ao extremo Oeste de Tajo, dominado por monzonito com ocorrência de corpos de escarnito e alguns diques menores de latito, andesito e Pm3. Estruturalmente, ocorrem falhas de orientação NE, NS e NW. O setor é delimitado no extremo Sul por um dique de Pm2 de orientação ~EW e no extremo Nordeste pelas falhas de orientação ~NS.

O **Setor 3**: Corresponde à área Norte de Chabuca, litologicamente dominada por monzonito com ocorrência de alguns diques sub-verticais de Pm2 e veios centimétricos de quartzo de orientação ~EW, e falhas seguindo os padrões ~NS e NW. O setor é delimitado no extremo Oeste por um dique de andesito de orientação ~NS e no extremo Nordeste por um dique de Pm2.

O **Setor 4**: Localizado ao extremo Oeste de Chabuca, litologicamente dominado por monzonito com alguns diques de andesito e latito, e estruturalmente com falhas de orientação NE e ~NS. O setor é delimitado pelo dique de andesito de orientação ~NS no extremo Leste, e o contacto com o calcário no extremo Sul. O rio Tintaya influi na área produzindo infiltração e causando um maior intemperismo no maciço em relação aos setores 1, 2 e 3.

O **Setor 5**: Corresponde à área do extremo Leste de Tajo, sendo o calcário, a rocha dominante seguido pelo monzonito, com alguns corpos de escarnito arredor do contacto entre o calcário e o monzonito. O setor é delimitado por uma falha ENE no extremo Sul e pelo contacto com o monzonito no extremo Norte. As falhas neste setor ocorrem nas orientações NE e ENE e são sub-verticais.

O **Setor 6**: Localizado no extremo Sudeste de Tajo, e dominado por monzonito. Estruturalmente, há falhas com orientações NNW a NW, que favorecem a percolação da água procedente das partes altas dos cerros Condorsayana e Huancaruma, causando no maciço um

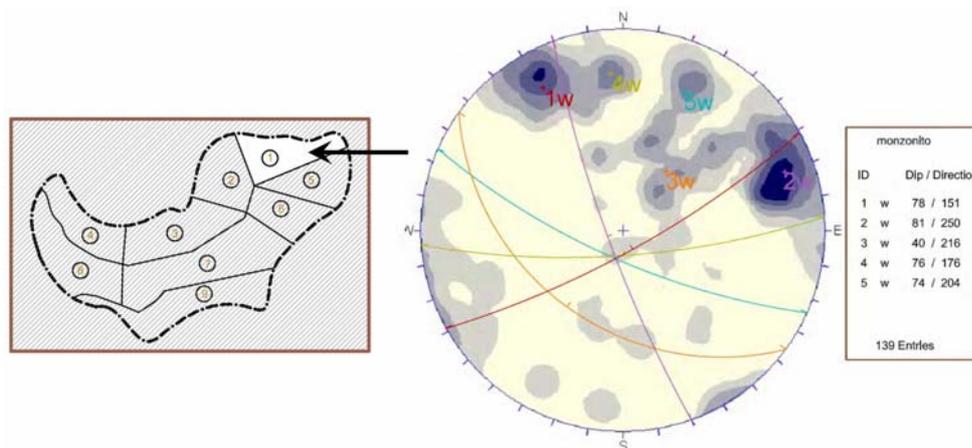
alto intemperismo, além da argilização existente, reduzindo a resistência do monzonito. Este setor é uma zona altamente instável na estação de chuvas. O setor é delimitado pelo contacto com o calcário em ambos os extremos Norte e Sul.

O **Setor 7**: Corresponde ao extremo Sul de Chabuca, dominado por calcário, e delimitado por um dique maior de monzonito no extremo Oeste, e os contactos de diorito na topo e de monzonito no extremo Leste. A estratificação do calcário varia pouco e em geral está próxima de ENE com mergulho moderado SW. O calcário é maciço e apresenta um intemperismo fraco a moderado, constituindo um maciço rochoso de resistência moderada. As falhas ocorrem oblíquas ao acamamento com orientações NW, NS e NE e registram movimentos de gravidade. Na parte inferior do extremo Leste ocorrem algumas dobras com amplitude de dezenas de metros e orientação axial ~EW pouco reconhecíveis.

O **Setor 8**: Localizado no extremo Oeste de Chabuca, dominado por calcário com ocorrência de múltiplos diques de monzonito e alguns diques de Pm3, andesito e diorito porfirítico. O setor é delimitado pelo contacto com monzonito no extremo Norte, pelo contacto com diorito no extremo Sul e por um dique maior de monzonito no extremo Leste. Estruturalmente, ocorre um anticlinal com amplitude de dezenas de metros e orientação axial NW, entretanto, as falhas ocorrem com uma direção NE dominante na área.

**Setor 9**: Corresponde ao setor de diorito no extremo Sul de Chabuca, e está delimitado no extremo Norte pelo contacto com o calcário dos setores 7 e 8. Estruturalmente, o diorito é altamente fraturado e intemperizado, apresentando uma resistência fraca a moderada, entretanto as falhas dominantes ocorrem na orientação NE, e controlam a percolação de água no setor.

A partir dos dados estruturais coletados no mapeamento geotécnico e os setores lito – estruturais, definidos acima, foram geradas as famílias de descontinuidades por setor e unidade litológica, através da análise estereográfica (Fig. 4.8 e Apêndice 3). Para cada família se registraram os valores médios das características geomecânicas, resultando três tabelas diferentes para: juntas sistemáticas (tabela 4.2), camadas nos calcários (tabela 4.3) e falhas secundárias (tabela 4.4).



**Figura 4.8:** Projeção estereográfica das famílias de juntas do setor 1. Notar que os valores de orientação média têm sido ajustados, utilizando o fator de Terzaghi (w).

### 4.2.2 FAMÍLIAS DE JUNTAS

No início, mostra-se a tabela 4.2 onde os valores de orientação das descontinuidades (coluna 4) correspondem à média vetorial corrigida (mergulho e LMD), e os números arábicos das famílias (coluna 3) corresponde à ordem de importância de cada uma, sem ter uma correlação entre as famílias de cada Setor. Assim a família 1 do Setor 1 não tem correlação alguma nem com a família 1 do Setor 2, nem com a família 1 dos restantes setores.

De forma geral, as juntas são sub-verticais e apresentam uma persistência  $> 15\text{m}$ , com espaçamentos próximos de  $0.2\text{ m}$  em quase todas as unidades litológicas, porém podem cortar mais de uma bancada na lavra da mina e formar blocos de tamanho pequeno (Palmström, 1995). No entanto, existem espaçamentos menores no diorito, indicando que esse maciço é altamente frágil e fraturado.

Na escala de rugosidade (ISRM, 1978), as superfícies de juntas variam de onduladas lisas a planas lisas (de 5 a 8), sendo mais dominantes as superfícies suaves e planas (8), concordando com a mudança dos valores no índice  $J_r$ , de 0.7 a 2.3 (Barton, 1974) e os valores do  $JRC_{10}$  que variam de  $7^\circ$  a  $17^\circ$  (ISRM, 1978).

A maioria de juntas ocorrem com uma abertura que varia de 0 e 6mm, entretanto aquelas com preenchimento têm espessuras entre 2 e 27mm, podendo dizer que as paredes variam de fechadas a muito fechadas (Geological Society, 1977), o que sugere a ocorrência do contacto entre paredes (rocha - rocha). Por conveniência, a mineralogia do preenchimento é simplificada aos valores 0, 1 e 3 para indicar ausência de preenchimento, ocorrência de preenchimentos suaves (argilas ou patinas de oxidação) e ocorrência de preenchimentos duros (quartzo, silicatos ou minerais metálicos), respectivamente. Contudo, os preenchimentos mais comuns são pátinas de óxido de ferro e às vezes calcita precipitada ou argila. Entretanto o índice  $J_a$  (Barton, 1974), tem valores que variam de 1 a 2.5, sendo o valor mais comum próximo de 2, indicando que as paredes das juntas estão em contacto e apresentam um fraco intemperismo, com pouco conteúdo ou nenhum de argila. Os parâmetros  $J_r$ ,  $J_a$  e  $JRC_{10}$  são utilizados para estimar a resistência ao cisalhamento das descontinuidades (vide o capítulo 5).

Os valores de rebote do martelo de Schmidt correspondem à média estatística das medidas realizadas nas faces artificiais provocadas por fogo (rocha fresca), encontrando que os valores variam de 13 a 55, próprios de rocha medianamente resistente a resistente (ISRM, 1978). Notar também que os valores mais baixos correspondem ao setor 4 (monzonito) onde também ocorre um intemperismo alto (4). Mas adiante, no capítulo 5, os valores do martelo serão utilizados no cálculo da resistência à compressão não confinada da parede de juntas.

Finalmente, a última coluna da tabela 4.2 indica que a percolação de água nas paredes de juntas varia desde paredes secas até paredes com sinal de umidade, valores de 1 a 3.

**Tabela 4.2:**Famílias de Juntas e estatísticas das características geomecânicas.

Domínio	Rocha	familia	Merg.	LMD	Persist. (m)	Espaça. (m)	Rugosidade			Abert. (mm)	Espess. (mm)	Preen.	Ja	Schmidt	Intemp.	Perco.
							ISRM	Jr	JRC <sub>10</sub>							
1	Monzonito	1	78	151	22	0.21	8	1.5	10.0	1.8		0	2.2	44.2	3	1
		2	81	250	24	0.22	8	1.5	9.6	2.6		0	2.2	41.7	3	1
		3	40	216	25	0.20	8	1.3	8.3	2.0		0	2.0	42.7	3	1
		4	76	176	13	0.26	8	1.3	9.2		3	1	2.2	48.5	3	1
		5	74	204	12	0.14	8	1.3	9.0	2.6		0	2.2	36.0	3	1
2	Monzonito	1	83	289	46	0.23	7	1.6	9.6	1.7		0	2.1	52.7	3	1
		2	87	241	16	0.28	7	1.5	9.7	0.9		0	1.9	54.0	3	1
		3	84	334	23	0.24	7	1.5	9.4	1.3		0	2.0	55.5	3	1
		4	40	114	31	0.13	7	1.6	10.2	1.1		0	1.5	52.4	2	1
3	Monzonito	1	59	113	29	0.18	8	1.3	8.7	5.8		0	1.8	48.0	3	1
		2	80	312	60	0.20	7	1.5	9.5	2.7		0	1.8	50.6	3	2
		3	45	178	34	0.17	7	1.6	10.1	3.7		0	1.8	52.4	3	2
		4	81	12	21	0.25	8	1.4	9.1	2.8		0	1.8	50.0	3	1
		5	75	333	44	0.25	7	1.4	9.5		3	1	1.6	49.0	3	2
		6	81	47	18	0.28	8	1.4	9.2	2.3		0	1.6	54.4	3	1
		7	76	160	57	0.13	8	1.4	8.7	3.0		0	1.9	54.7	2	
4	Monzonito	1	77	155	13	0.14	8	1.4	9.2		4	1	2.5	21.2	3	
		2	64	126	22	0.16	7	1.4	9.9		3	1	2.2		3	
		3	72	93	18	0.21	8	1.3	8.3	3.0		0	2.5	15.2	4	
		4	72	206	44	0.14	8	1.2	8.4		3	1	2.3		3	
		5	34	199	45	0.13	6	2.0	12.8	1.0		0	2.1	13.5	3	2
5	Calcário	1	87	215	5	0.31	8	1.2	8.0	4.3		0	2.1	33.3	3	1
		2	74	250	6	0.16	7	1.3	8.6	1.5		0	2.2	36.0	3	1
		3	69	295	7	0.14	8	1.7	10.1	2.7		0	2.2	37.0	3	1
		4	69	339	17	0.31	8	1.4	9.3	1.5		0	2.2	47.3	3	1
	Monzonito	1	76	232	24	0.18	6	1.8	12.0		8	1	2.4		3	
		2	75	53	15	0.18	8	1.3	8.2	1.5		0	2.3	53.0	3	1
6	Monzonito	3	68	263	4	0.08	8	1.3	8.3	1.0		0	1.9		3	1
		4	86	326	18	0.23	6	1.3	11.0		2	1	2.2		3	1
		5	75	5	15	0.22		1.7	11.6	4.0		0	2.4		3	1
		6	27	287	30	0.16	7	1.6	10.1		2	1	2.3		3	
6	Monzonito	1	80	351	12	0.27	8	1.3	9.1		2	1	2.0	48.1	3	1
		2	67	45	17	0.21	8	1.3	7.4	3.7		0	2.2	50.4	3	1
		3	58	100	5	0.22	8	1.4	10.1		2	1	1.8	45.0	3	
		4	55	147	26	0.3	8	1.2	8.2	3.3		0	2.1	50.9	3	1
		5	45	303	11	0.08	8	1.3	9.4	2.3		0	2.1	53.2	3	1
		6	82	306	23	0.17	8	0.7	9.1	0.0		0	2.2	52.0	3	2
7	Calcário	1	72	325	16	0.2	8	1.6	11.4	0.8		0	1.4	53.6	2	2
		2	52	9	10	0.18	5	2.1	16.7	0.6		0	1.3	54.0	2	1
		3	60	53	18	0.28	8	1.3	8.4		27	1	1.6	46.4	2	
		4	47	202	26	0.34	8	1.4	9.6	1.1		0	1.4	54.7	2	1
		5	73	274	13	0.33	7	1.6	11.2		21	1	1.6	50.0	3	1
	Monzonito	1	46	341	13	0.29	8	1.1	9.3	3.1		0	1.3		3	
		2	78	340	56	0.15	7	2.3	9.1	3.0		0	1.9		3	
		3	40	21	22	0.22	8	1.5	10.1	2.1		0	2.1	46.0	3	3
		4	77	27	16	0.31	8	1.3	8.3		17	1	1.5	50.0	2	
		5	76	262	11	0.24	7	1.4	10.0	3.0		0	1.8		3	
		6	87	293	17	0.2	7	1.4	8.8	2.0		0	2.2		3	
8	Calcário	1	50	19	32	0.23	8	1.3	8.9		3	1	1.9		3	
		2	67	59	19	0.16	7	1.8	11.1	0.0		0	2.1		3	
		3	62	93	21	0.18	8	1.5	9.7		3	1	2.0		3	
		4	90	138	17	0.32	7	1.7	10.9		3	1	2.3		3	
		5	65	240	38	0.26	8	1.7	10.9		3	1	2.2		3	
	Monzonito	1	66	100	12	0.2	8	1.5	9.2		3	1	2.2		3	3
		2	74	155	9	0.19	8	1.4	8.5		3	1	2.5		3	3
		3	50	69	18	0.15	8	1.5	10.4		3	1	2.4		3	3
		4	44	28	21	0.18	8	1.5	8.6		3	1	2.1		3	
		5	76	65	8	0.16	8	1.5	7.6		3	1	2.0		3	
		6	80	16												
9	Diorito	1	49	45		0.14										
		2	51	338		0.02										
		3	68	154		0.06	7									
		4	80	318		0.05										
		5	85	346		0.04	7									
		6	80	16		0.14										

**Nota:** Os nomes das colunas são abreviaturas que correspondem a: Merg. (mergulho), LMD (linha de máxima declividade), Persist. (Persistência), Espaça. (Espaçamento), Abert. (Abertura), Espess. (Espessura), Preen. (Preenchimento), Intemp. (intemperismo), Perco. (Percolação). A rugosidade é descrita utilizando os perfis da ISRM (1978) que variam de “rugosa escalonada” (1) até estriada plana (9), também se utilizam os índices *Ja*, *Jr* e “*JRC<sub>10</sub>*” (Barton, 1974, 77). Entretanto a coluna “Schmidt” corresponde ao valor do martelo na parede de rocha fresca.

### 4.2.3 FAMÍLIAS DE CAMADAS

A tabela 4.3 resume as características geomecânicas para os planos de acamamento, que em geral ocorrem com persistência  $> 30$  m e um espaçamento que varia de 0,3 e 0,4 m. Entretanto, as superfícies de acamamento variam de onduladas lisas a planas lisas, de 6 a 8 (ISRM, 1978). O valor de  $J_r$  varia de 1,3 a 1,6 indicando que os planos de acamamento podem mudar de planos rugosos a planos lisos, e o  $JRC_{10}$  varia de  $4^\circ$  a  $14.5^\circ$ .

Os planos de acamamento ocorrem com espessuras de preenchimento de 3 a 7 mm, composto essencialmente de material suave (calcita precipitada e óxidos) sem sinais de percolação (1), sendo possível que os planos de acamamento tenham coesão adicional na resistência ao cisalhamento. Finalmente, os valores para o índice  $J_a$  variam de 1,9 a 2,2, próprios de superfícies levemente alteradas e livres de argila, concordando com um intemperismo moderado dominante (3).

**Tabela 4.3:** Famílias de planos de acamamento e estatística das características geomecânicas.

Domínio	Rocha	família	Merg.	LMD	Persist. (m)	Espaça. (m)	Rugosidade			Abert. (mm)	Espess. (cm)	Preen.	Ja	Schmidt	Intemp.	Perco.
							ISRM	Jr	JRC <sub>10</sub>							
5	Calcário	1	44	156	26	0.43	8	1.6	8.9		0.5	1	2.2	37.3	3	1
7		1	36	189	83	0.33	7	1.3	4.0	0		1	2.3	54	3	1
8		1	53	18	37	0.23	8				0.3	1		54.5	2	1
		2	52	250	50	0.35	6	1.5	14.5		0.7	1	1.9		3	1

**Nota:** vide nota da tabela 4.2

### 4.2.4 FAMÍLIA DE FALHAS SECUNDÁRIAS E FALHAS MAIORES

A tabela 4.4 lista os valores médios das características geomecânicas das famílias de falhas secundárias. Assim, a persistência está próxima de 40 m, a rugosidade das paredes varia de estriada ondulada a estriada plana, de 6 a 9, e o índice  $J_r$  varia entre 1 e 1,6 indicando que as superfícies das paredes de descontinuidades são ao menos lisas, sejam planas ou onduladas. O  $JRC_{10}$  varia entre 1,6 e 12,3.

Em geral, o material do preenchimento das falhas tem uma largura  $< 1$  m (tabelas 4.4 e 4.5), e pode ser comparado com um solo granular medianamente denso. No entanto o tipo de preenchimento varia de acordo à unidade litológica deslocada. Nos corpos intrusivos é composto por rocha triturada, cujos fragmentos são angulosos e de baixa esfericidade, com tamanhos de partícula similares de um cascalho médio a uma areia média ( $\sim 90\%$ ), englobados em uma matriz fina composta principalmente por areia fina com alguma quantidade de argila ( $\sim 10\%$ ). Também, algumas vezes ocorre quartzo arredondado e sulfetos disseminados, acompanhando os preenchimentos nas rochas intrusivas. No caso do calcário, o preenchimento também é dominado por rocha triturada de características similares às falhas nos corpos intrusivos. Há ausência de uma matriz que cole os fragmentos de rocha, formando um preenchimento cataclástico (brecha), na qual às vezes existe carbonato ou calcita precipitada ( $< 10\%$ ) (Fig. 4.9 e Fig. 4.10).

Nas falhas secundárias existem paredes com um intemperismo que varia de alto a total (de 4 a 5), com preenchimentos umedecidos, mas sem evidência de fluxo e em alguns casos secos. Por outra parte, a resistência do preenchimento varia de R0 a R3, dependendo do conteúdo de rocha triturada e de materiais finos.

No caso das falhas maiores, definidas por uma extensão de traço >30 m (tabela 4.5), o mapeamento individual indica que a rugosidade é dominada por superfícies estriadas, já sejam escalonadas, onduladas ou planas (3, 6 e 9). O intemperismo das paredes varia de moderado a total (de 3 a 5) e a percolação do preenchimento varia de material completamente seco até material com sinais de desgaste por fluxo (de 1 a 4). A resistência do preenchimento também varia de R3 a S6.

**Tabela 4.4:** Famílias de falhas secundárias e estatísticas das suas características geomecânicas.

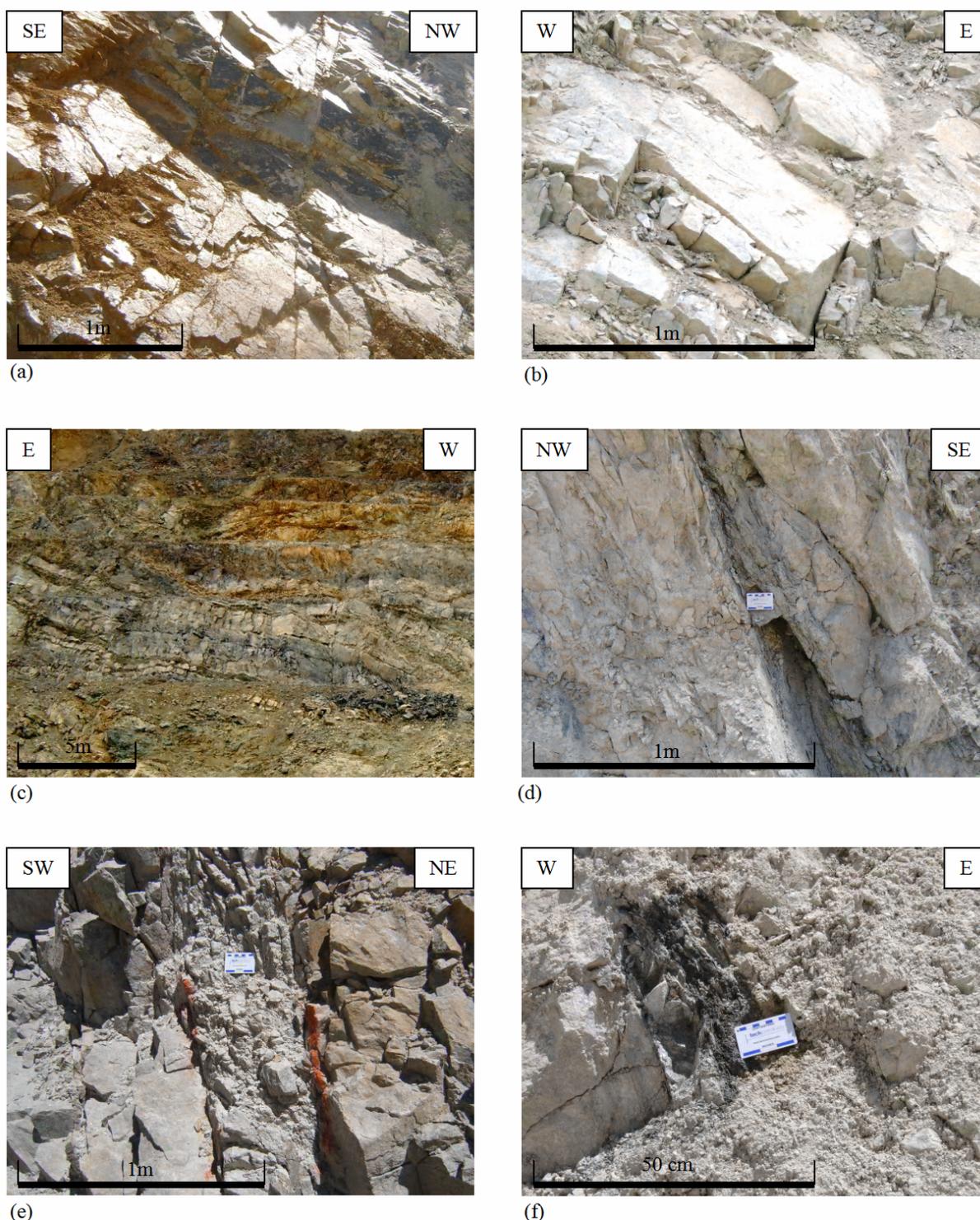
Domínio	Rocha	familia	Merg.	LMD	Persist. (m)	Rugosidade			Espess. (mm)	Preen.	Ja	R	Intemp.	Perco.
						ISRM	Jr	JRC <sub>10</sub>						
1	Monzonito	1	80	155	39	9	1.5	7.5	54.0	Rt-Arg-q	4.5	1	4	2
		2	75	232	36	9	1.5	6.7	70.0	Rt-Arg	5.5	1	5	1
		3	70	316	35	9	1.6	7.1	52.0	Rt-Arg	4.4	1	4	2
		4	72	347	59	9	1.6	7.0	37.7	Rt-Arg	4.6	2	4	2
		5	72	282	33	9	1.6	6.7	66.0	Rt-Arg	5.1	1	4	1
2	Monzonito	1	89	327	38	8	1.6	8.2	110		4.4	1	4	
		2	80	213	24		1.6	7.3	33.0		3.5		3	
		3	86	280	31		1.6	7.3			6.0		5	
3	Monzonito	1	84	113	42	8	1.6	1.6	54.6	Rt-Arg-q	3.8	1	3	1
		2	73	4	37	8	1.6	7.2	105	Rt - Arg	3.7	2	3	1.5
		3	74	50	34	8	1.6	7.9	59.9	Rt-Arg-q	4.5	1	4	2
		4	69	335	60	9	1.6	6.9	44	Rt - Arg	4.8	1	4	2
4	Monzonito	1	67	99	37	9	1.6	7.0	140	Rt - Arg	5.5	0	5	
		2	72	158	47	8	1.6	9.0	100	Rt - Arg	5.3	0	4	
		3	78	202	25	9	1.6	6.9	90	Rt - Arg	5.3	0	5	
		4	52	40	87	8	1.6	8.7	68.3	Rt - Arg	5.8	0	5	
5	Calcário	1	81	290	33	8	1.0	3.1	99	Rt-Arg	13.8	0	5	1
		2	68	317	28	9	1.0	2.0	101	Rt-Arg	13.0	1	4	2
	Monzonito	1	78	146	37	8	1.6	9.4	70	Rt-Arg	4.5	1	4	2
		2	75	33	10				0.6		3.0		3	
6	Monzonito	1	84	338	37	9	1.6	6.9	39	Rt-Arg	4.2	1	4	2
		2	70	78	12	8	1.6	7.3	200	Rt-Arg	3.0		3	1
7	Calcário	1	64	316	35	8	1.2	9.4	78.3	Arg-ca	3.7	1	4	
		2	47	357	98	9	1.6	6.7	170	Rt-Arg-ca	6.0	0	5	
	Monzonito	1	67	90	20	8	1.6	12.3		Rt	4.0	3	1	
		2	57	122	57	9	1.6	6.8	31	Rt-Arg	4.6	2	4	
		3	57	34	39	9	1.6	9.1		Rt-Arg	3.4	1	4	
8	Calcário	1	44	219	44	9	1.2	10.9	42	Rt-Arg	4.4	0	4	2
		2	75	231	37	8	1.0	7.1	93	Arg-ca	4.3		4	
		3	50	29	38	9	1.0	6.9	100	Rt-Arg	5.8	0	5	
	Monzonito	1	63	101	30		1.6	10.5	98	Rt-Arg	5.4	0	5	
		2	87	163	32	8	1.6	11.7	76	Rt-Arg	4.8	0	4	1
9	Diorito	3	57	171	38	8	1.6	7.1	30	Rt-Arg	5.5	0	5	
		4	85	292	33	9	1.6	8.3	86	Rt-Arg-q	5.8	0	5	
		5	58	49	37	8	1.6	10.2	83	Rt-Arg	4.3	0	4	
		1	60	64		6			30	Rt		0		
		3	70	109		6			60	Rt		1		

**Nota:** Para o material do preenchimento as abreviaturas significam: Rt (rocha triturada), Arg, (argila), q (quartzo) e Ca (carbonatos ou calcita). A coluna 13 (R) refere-se à estimativa da resistência à compressão do material de preenchimento, estimada pelo golpe com o martelo de geólogo.

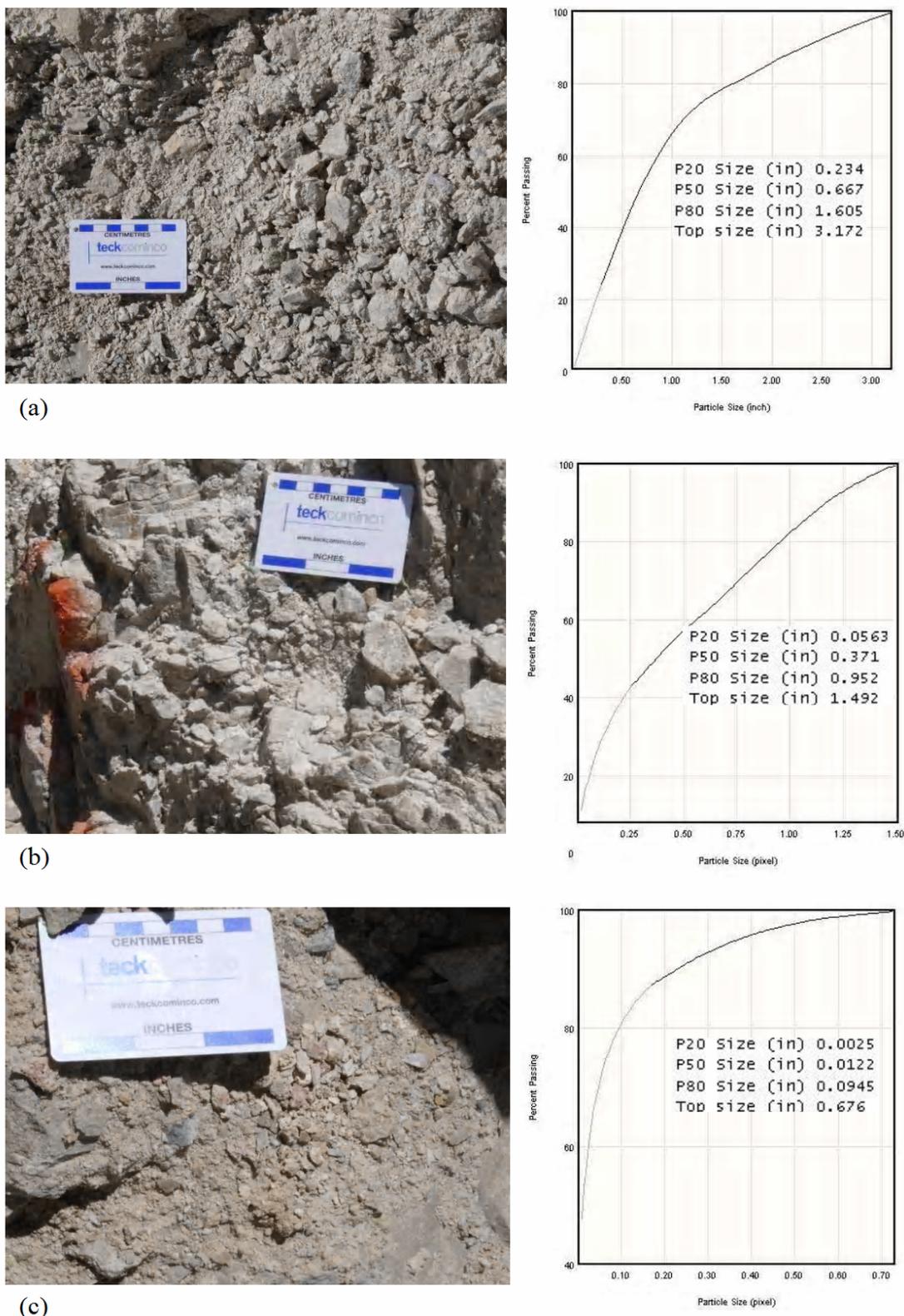
**Tabela 4.5:**Falhas com persistência > 30m registradas individualmente e suas características geomecânicas.

#	Rocha	Leste	Norte	Merg.	LMD	Traço (m)	Espess. (cm)	Preenchimento	Rugosidade (ISRM)	Intemp.	Perco.	S	R
1	Monzonito	251784	8351796	70	281	30	50	Rt, Ox, Arg	7	2	1		0
2		251790	8351792	83	325	30	25	Rt, Ox, Arg	6	3	2	6	
3		251923	8351363	78	310	70	300	Rt	6	2	1		0
4		251850	8351266	80	335	30	75	Rt, Ox, Arg	3	4	3		0
5		250603	8350940	55	95	30	27	Rt, Ox, Arg		3	1		1
6		250892	8351073	50	135	30	25	Rt	9	2	1		0
7		251023	8351166	67	40	40	15	Rt	3	2	1		0
8		251954	8351656	64	300	30	40	Rt, Ox	7	3	4		0
9		251967	8351608	73	175	50	50	Rt, Ox	3	4	1		0
10		251990	8351509	53	135	60	45	Rt		4		6	
11		252001	8351433	78	335	70							
12	Calcário	251996	8351388	80	85	50	30	Rt, Ar, Arg, Ox, Ca	4	4		6	
13		251997	8351391	78	5	30	5	Ox, Ca	3	4	2	6	
14	Monzonito	251378	8351817	45	255	30	30	Rt, Ox, Arg	9	4	3	6	
15		251460	8351775	70	135	100	50	Rt, Ox	4	4	2		1
16		251534	8351770	68	140	40	20	Rt, Ox	3	4	3		2
17		251560	8351773	67	142	50	100	Rt	4	4	3		2
18		251608	8351767	65	152	40	50	Rt, Arg	5	4	3		1
19		251174	8351451	56	55	60	10	Rt	3	2	2		3
20		251213	8351631	72	202	60	200	Rt, Ox	6	4	2		2
21		251723	8351799	80	150	30	15	Rt, Ox	3	4	3		2
22		251688	8351797	80	150	100	100	Ox, Arg	3	5	4	6	
23		251708	8351806	78	147	30	15	Rt, Arg	4	4	4	6	
24		250539	8350928	73	70	60	40	Rt, Arg	3	3	3		1
25		251048	8351236	73	105	50	50	Rt	6	2	2		3
26		250824	8350997	69	70	70	20	Rt, Arg	3	2	2		2
27		250607	8350899	57	110	50	10	Rt, Ox, Arg	9	2	3		3
28	250601	8350888	57	80	30	10	Rt, Ox, Arg	9	2	2		2	
29	Calcário	251594	8350826	85	143	300	130	Rt, Ox, Arg	3	4	4		0
30		251431	8350791	56	43	60	30	Rt	5	4	3		0
31		251048	8350706	67	107	60	40	Rt, Ox	6	4	3		0
32		251057	8350694	75	133	40	30	Rt, Ox, Arg	3	4	3		1
33		250989	8350689	35	52.5	30	10	Rt - Ox	3	3	3		2
34		250983	8350693	73	80	60	150	Rt	9	3	3		1
35		250934	8350674	75	105	90	100	Rt	6	3	4	6	
36		250860	8350651	60	15	30	60	Rt, Ox	6	3	3		1
37	Monzonito	250103	8351271	78	207	60	40	Rt, Ox, Arg	7	5	4		0
38		250120	8351273	58	25	50	20	Rt, Ox, Arg	6	4	4		0
39		250160	8351204	73	154	50	40	Rt, Ox, Arg	3	3	3		1
40		250051	8351265	75	142	90	10	Rt, Arg	6	4	3	6	
41		250040	8351288	65	58	50	40	Rt, Ox e Arg	6	4	4	6	
42		250921	8350864	78	110	90	50	Rt, Arg	6	4	3	6	
43		250860	8350848	65	82	90	100	Rt	9	3	2		1
44		250995	8350887	85	70	50	50	Rt, Arg	3	4	3		0
45		250621	8350673	85	90	30	50	Rt, Arg	3	3	2	6	
46		251008	8351058	60	44	30	20	Rt, Arg	5	3	2		2
47		251135	8351401	81	331	40	20	Rt, Ar, Arg, Ox.	4	4	3	6	
48		251135	8351401	78	328	60	10	Ar, Arg, Ox.	5	4	3	6	
49		249989	8350964	80	335	30	40	Rt, Ox, Arg	6	4	4	6	
50		249989	8350964	60	80	45	50	Rt, Ox, Arg	6	5	4	6	
51		250001	8351014	72	340	30	30	Ar, Arg, Ox.	6	4	3		1
52		251126	8351356	77	62	40	10	Ar, Arg, Ox.	6	4	3		0

**Nota:** Abreviatura do material de preenchimento: Rt (rocha triturada), Ox (óxido), Arg (argila), Ar (Areia), q (Quartzo), Ca (carbonatos ou calcita). As duas últimas colunas (S e R) referem-se à estimativa da resistência à compressão do material de preenchimento, pelo golpe com o martelo de geólogo.



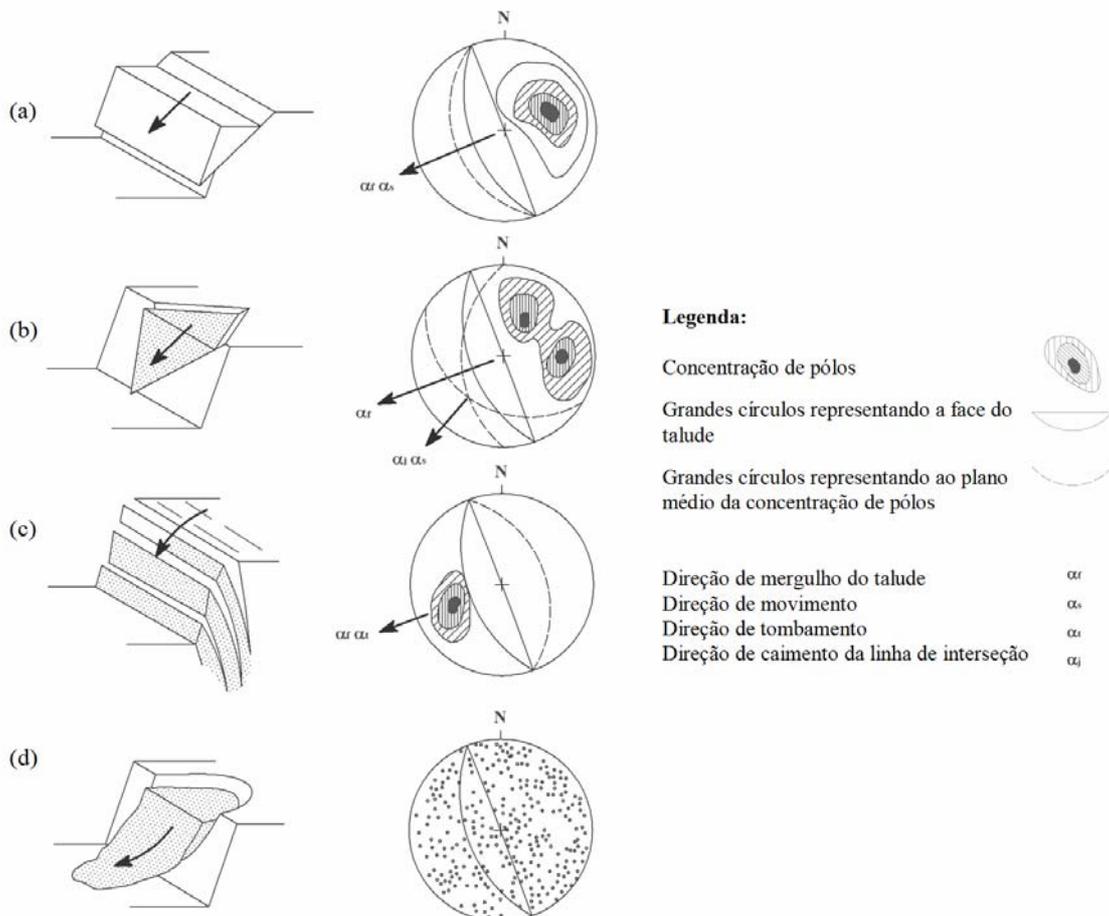
**Figura 4.9:** Exemplos de descontinuidades observadas dentro da mina. (a) Superfícies de juntas planas escalonadas, com traços  $> 10$  m, localizadas no calcário do setor 8. (b) Sistemas de juntas planas, com traços  $> 5$  m, localizadas no monzonito do setor 3. (c) Planos de acamamento do calcário no setor 7. (d) Superfície de falha, com traço  $> 15$  m, localizada no setor 4, expondo preenchimento de rocha triturada com fragmentos próximos ao diâmetro de uma areia média a fina. (e) Superfície de falha, com traço  $< 30$  m, em monzonito do setor 2, expondo preenchimento de rocha triturada com fragmentos angulosos de diâmetro comparável a um cascalho médio. (f) Superfície de falha, com traço  $> 30$  m, localizada dentro do monzonito do setor 4, expondo um preenchimento com espessura  $> 1$  m, composto de areia média na parte central com ocorrência de sulfetos de cobre disseminados e farinha de falha perto do contacto com a parede da rocha.



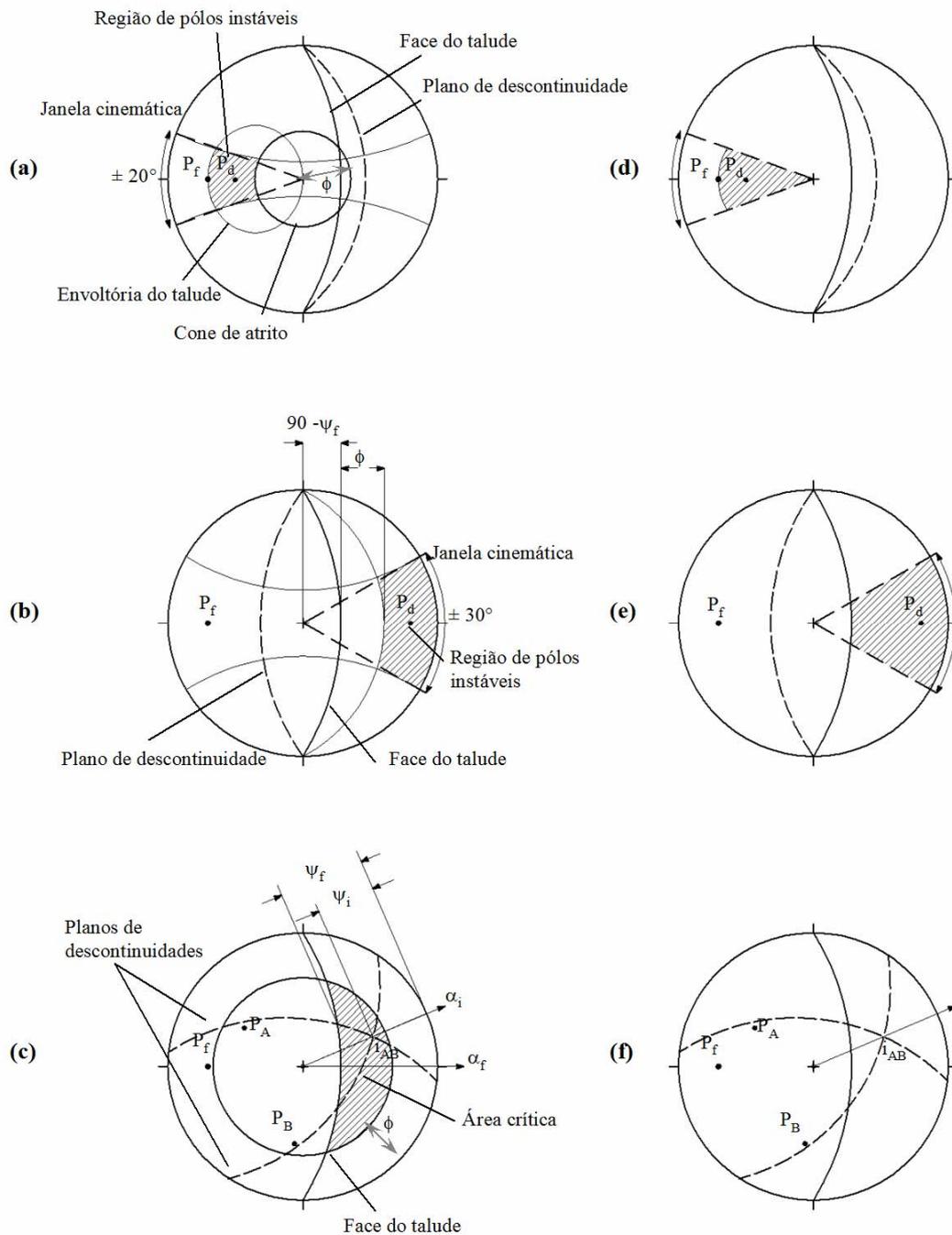
**Figura 4.10:** Alguns preenchimentos de falhas em monzonito, onde há rocha triturada e partículas de menor tamanho. As curvas granulométricas da direita foram processadas no software Split, e correspondem aos tamanhos de partículas, que variam de grânulo grosso a areia fina. Nas fotos, para um 50% de peneirado, os tamanhos são: (a, b) grânulo médio, (c) e areia média. Note-se também que os fragmentos de rocha maiores são angulosos e de baixa esfericidade.

### 4.3 ANÁLISE CINEMÁTICA

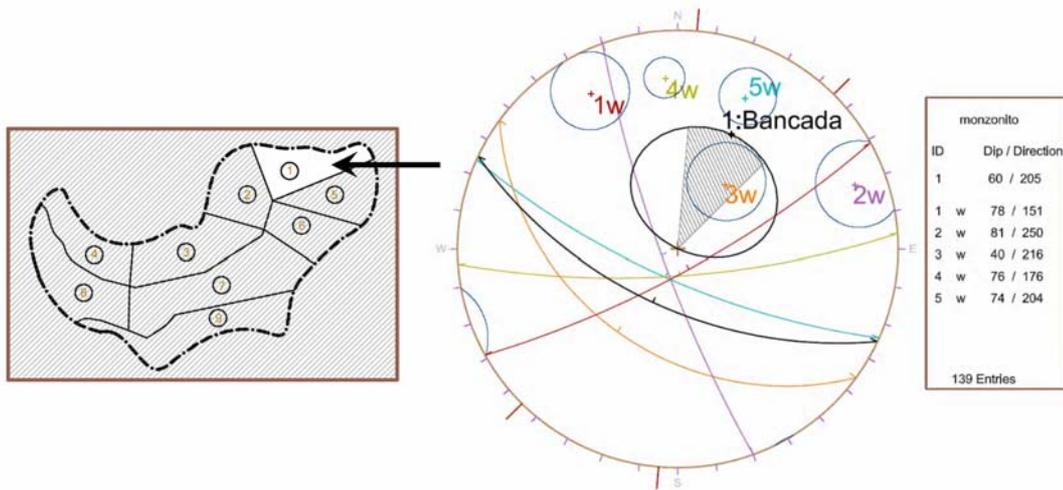
A análise cinemática simples tem a finalidade de avaliar a influência das discontinuidades na estabilidade dos taludes escavados. Nesta análise, os critérios cinemáticos simples indicam a formação de ruptura plana, em cunha e de tombamento (Fig. 4.11 e Fig. 4.12). Geometricamente, se considera a atitude média das famílias de discontinuidades quanto da face do talude em cada setor, e se utiliza o cone de variabilidade com um desvio padrão com respeito à atitude média de cada família (Fig. 4.13). O conceito de envoltória do talude é importante na avaliação de ruptura plana (Daylight envelope), assim como a utilização de uma janela cinemática com 40° de abertura (Fig. 4.12 d). Para avaliar a formação de cunhas, vale a observação de que as linhas de interseção das famílias de discontinuidades tenham um caimento menor que o mergulho do talude, dentro de uma janela cinemática de 90° de abertura. (Fig. 4.12 f e Fig. 4.13). Na avaliação do tombamento é importante observar que o pólo da família de discontinuidades tenha um caimento menor que o ângulo de mergulho do talude, dentro de uma janela cinemática com 60° de abertura (Fig. 4.12 e). Não se emprega o cone de atrito (Fig. 4.12 a, b, c), já que a estimativa do ângulo de atrito para as discontinuidades será tratada no Capítulo 5.



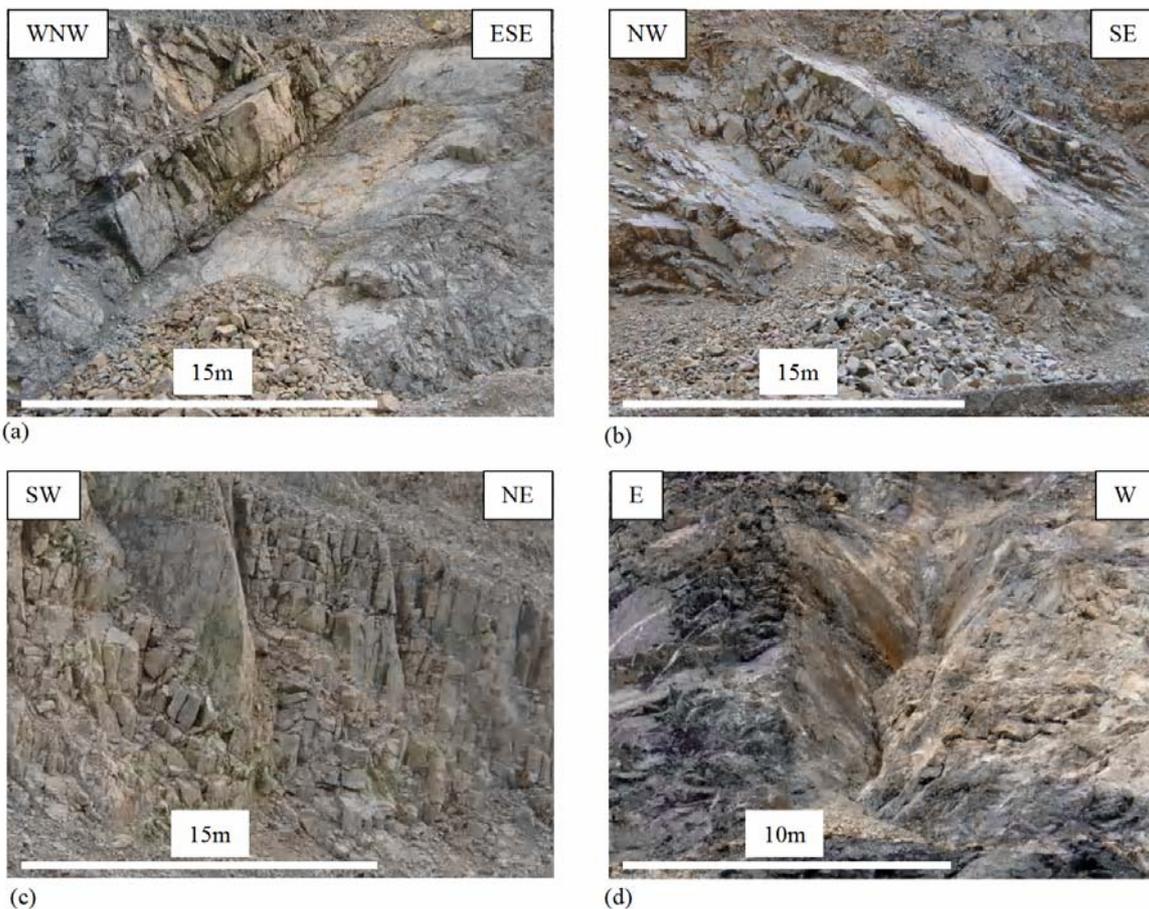
**Figura 4.11:** Principais tipos de ruptura de blocos em taludes, e condições estruturais que causam esses tipos de rupturas. (a) Ruptura plana através de uma discontinuidade persistente, cujo mergulho é menor e em direção do talude; (b) Ruptura por cunha na direção da interseção de duas discontinuidades; (c) Ruptura por tombamento, num maciço com discontinuidades de mergulho forte, em direção contrária à face do talude; (d) Ruptura circular em rocha fraca, muito fraturada com discontinuidades aleatórias.



**Figura 4.12:** Critérios utilizados na análise cinemática de taludes: (a) Ruptura plana, (b) Ruptura por tombamento e (c) ruptura em cunha (Goodman, 1989; Hoek & Bray, 1977). Critérios simplificados para a análise cinemática, sem utilizar o ângulo de atrito: (d) ruptura plana considerando uma janela cinemática de 40° de abertura, e a envoltória do talude, (e) ruptura por tombamento considerando uma janela cinemática de 60° de abertura, e (f) formação de cunha, indicando a direção da linha de intersecção com ângulo de caimento menor que o ângulo de mergulho do talude. Nos estereogramas, os pólos dos planos são indicados pela letra P, sendo o sub-índice f correspondente à face do talude. Finalmente, as letras gregas indicam:  $\psi_f$  o ângulo de mergulho do talude,  $\psi_i$  o ângulo de mergulho da linha de intersecção e  $\phi$  representa o ângulo de atrito.



**Figura 4.13:** Estereograma para a análise cinemática das famílias de juntas do setor 1. Notar que a família 3 produz rupturas planas, enquanto 40% de seu cone de variabilidade se encontra dentro da área instável. A interação das famílias 1 com 2 e das famílias 2 com 4 geram cunhas, cujas linhas de interseção são: 192/73 e 194/75, respectivamente. Em ambos os casos o ângulo de caimento das linhas é maior que o ângulo de mergulho do talude ( $60^\circ$ ), não estando livres para deslizar, e não são listadas na tabela 4.6.



**Figura 4.14:**Exemplos de rupturas nos taludes de bancada, condicionadas por as famílias de juntas: (a, b) rupturas planas no maciço de monzonito do setor 4, (c) ruptura por tombamento em blocos no maciço de monzonito do setor 3, e (d) ruptura em cunha no maciço de calcário do setor 7.

**Tabela 4.6:** Resultados da análise cinemática das descontinuidades presentes na mina Tintaya.

Setor	Face do Talude (LMD)	Rocha	Estrutura	Famílias de descontinuidades e tipos de ruptura					
				Plana		Cunha		Tombamento	
				Famílias	% CV	Famílias	Interseção	Famílias	% CV
1	205	Monzonito	Juntas	3	40%				
			Falhas			1 com 3	239/33		
2	121	Monzonito	Juntas	4	50%			1	40%
			Falhas					3	20%
3	144	Monzonito	Juntas					1	15%
			Falhas					3	30%
3	144	Monzonito	Juntas					2	40%
			Falhas					5	60%
4	180	Monzonito	Juntas	5	30%	2 com 5 3 com 5 3 com 4	195/35 171/31 150/60		
			Juntas	5	20%	3 com 5 2 com 5	171/31 195/35		
5	280	Calcário	Juntas	3	10%				
		Monzonito	Juntas	6	40%	1 com 5	299/58		
6	300	Monzonito	Juntas	5	60%			3	60%
							4	40%	
7	330	Calcário	Juntas			3 com 5 2 com 5	351/39 344/49		
			Falhas	1	15%				
		Monzonito	Juntas	2	10%				
			Juntas	1	40%	3 com 5 1 com 5	342/33 337/46		
8	60	Calcário	Juntas	2	5%	1 com 3	039/48	5	65%
			Falhas					2	65%
		Monzonito	Juntas	3	50%	1 com 4 1 com 3	035/43 035/44		
			Falhas	5	20%	3 com 5 1 com 5	110/37 063/57		
	130	Monzonito	Juntas			2 com 3 2 com 4	086/49 076/32		
			Falhas			3 com 5 1 com 3	110/37 145/54	4	35%
9	335	Diorito	Juntas	2	45%			3	60%
			Falhas					5	20%
			Falhas					2	65%

**Nota:** Na tabela os números que identificam as famílias listadas são os mesmos que aqueles utilizados nas tabelas 4.2 e 4.4.

As famílias de camadas não parecem envolver problemas de estabilidade, porém como se observa na tabela 4.6, são apenas listadas as famílias de juntas e falhas que formam algum tipo de ruptura.

Para quantificar a possibilidade da ruptura plana ou tombamento nos taludes, registra-se a porcentagem estimada do cone de variabilidade (%CV) que fica dentro da região instável, considerando um desvio padrão com respeito à orientação média da descontinuidade. Assim, como exemplo dentro do *Setor 1* o maciço rochoso é formado por monzonito com taludes de bancada cavados na orientação média 205°/60°, existindo um risco de 40% de rupturas planas na família 3 de juntas como se observa na figura 4.13. Cumpre assinalar que a porcentagem das instabilidades assim quantificada pode diminuir se consideramos o cone de atrito, como numa análise cinemática completa.

A formação de cunhas é quantificada só pela orientação da linha de interseção formada pela junção da orientação média dos planos de descontinuidade, esta linha de interseção é descrita na convenção “*direção de caimento/caimento*”. Assim, por exemplo, no *Setor 4* ocorre a formação de cunhas na junção das famílias de juntas 2 e 5, com uma linha de interseção média  $195^{\circ}/35^{\circ}$  (vide a tabela 4.6).

Os resultados da análise cinemática indicam que a ruptura em cunha ocorre em linhas de interseção com caimento variável de  $31^{\circ}$  a  $60^{\circ}$ , e parece ser um modo habitual de ruptura já que só está ausente nos setores 2, 3, 6 e 9. As rupturas planas têm um risco de ocorrência variável entre 5% e 60%, sendo mais importante nos setores 1, 2, 5, 6, 8 e 9 onde têm um risco de ocorrência  $\geq 40\%$ . Finalmente, a ruptura por tombamento torna-se mais importante nos setores 3, 6, 8 e 9 tendo um risco de ocorrência  $> 50\%$ .

A análise anterior considera somente a influência das juntas sistemáticas, planos de acamamento e das falhas secundárias na estabilidade de taludes de bancada, sendo, importante mencionar que as falhas singulares, de maior persistência, exercem uma influência diversificada na estabilidade dos taludes entre rampas (múltiplas bancadas), delimitando em alguns lugares rupturas planas produzidas por juntas sistemáticas ou por falhas secundárias. Em outros locais geram cunhas quando se intersectam com juntas sistemáticas, em múltiplas bancadas. Um problema adicional é o controle que algumas falhas singulares exercem na percolação de água, devido tanto à maior persistência destas estruturas quanto à largura dos preenchimentos, compostos em maioria por material granular permeável (rocha triturada). A água produz um efeito adverso na estabilidade dos taludes, diminuindo a resistência das descontinuidades e incrementando a decomposição química das rochas, o qual também reduz a resistência do maciço rochoso.

Em geral, no *Setor 1* ocorrem duas falhas singulares NE que delimitam algumas rupturas planas produzidas pelas juntas sistemáticas, também formam cunhas de banco quando se conjugam com falhas secundárias NW. No *Setor 2* as falhas singulares NE parecem influir numa deformação maior do talude global por tombamento de múltiplas bancadas. No *Setor 3* As falhas NS e NW delimitam alguns tombamentos no extremo Leste. No *Setor 4* uma falha maior de direção  $\sim$ NS favorece à infiltração das águas provenientes do Rio Tintaya. No *Setor 5* a falha Tito de orientação NE, forma cunhas em múltiplas bancadas, quando se conjuga com as juntas sistemáticas de direção NNW. Nos *Setores 6 e 7* as falhas NE favorecem à percolação das águas procedente das partes altas dos Cerros Condorsayana e Huancaruma, sendo que o *Setor 6* é um maciço fraco muito intemperizado, onde se manifesta uma combinação de ruptura plana, com algum controle estrutural, e uma ruptura circular tipo solo. No *Setor 8*, algumas falhas singulares ENE formam cunhas de múltiplas bancadas, quando se conjugam com juntas sistemáticas NW. Neste setor, os diques de monzonito têm direção NE e formam múltiplos deslizamentos planos, com blocos pequenos. Finalmente, no *Setor 9* as falhas NE controlam a percolação de água procedente das partes altas do cerro Huancaruma.

# *Geologia Estrutural*

---

## **3.1 INTRODUÇÃO**

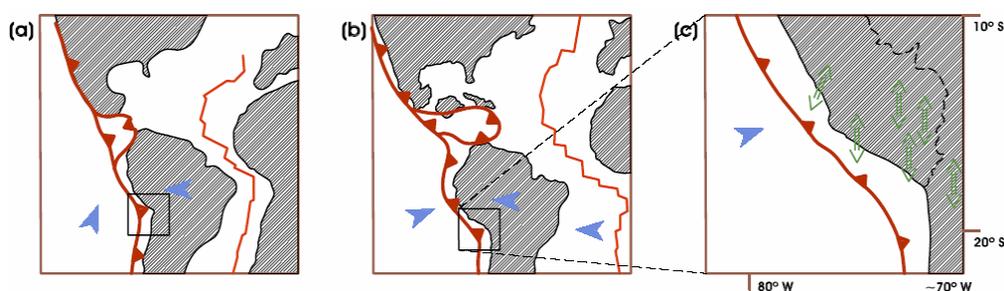
A análise estrutural do presente capítulo, permite detalhar a geometria e os estilos das estruturas geológicas, presentes tanto na escala do Distrito de Tintaya quanto na escala da mineração. Além disso, a análise estrutural permite relacionar as estruturas geológicas em todas as escalas, uma vez que há repetitividade nos padrões das dobras, falhas e juntas, como adverte o critério de Pompeley (1894). A definição dos padrões estruturais começa com a descrição dos lineamentos regionais e do Distrito, e prossegue com a descrição das estruturas existentes, tanto na área do Distrito, quanto na mina de Tintaya. A descrição se fundamenta principalmente nos dados de mapeamento coletados nesta pesquisa e em trabalhos anteriores, aliado à análise geométrica das estruturas através de projeções estereográficas, perfis e mapas, a fim de produzir um modelo cinemático evolutivo da geologia estrutural do Distrito.

Como se verá no presente capítulo, as estruturas geológicas mais importantes na evolução do contexto estrutural do Distrito têm orientações similares aos padrões regionais, com dobras e falhas de orientações ~NNW – NW e NE respectivamente. Do mesmo modo, na mina, as estruturas têm orientações similares aos padrões do Distrito, excetuando algumas dobras menores com eixos ~EW, que ocorrem devido a influências das intrusões de monzonito.

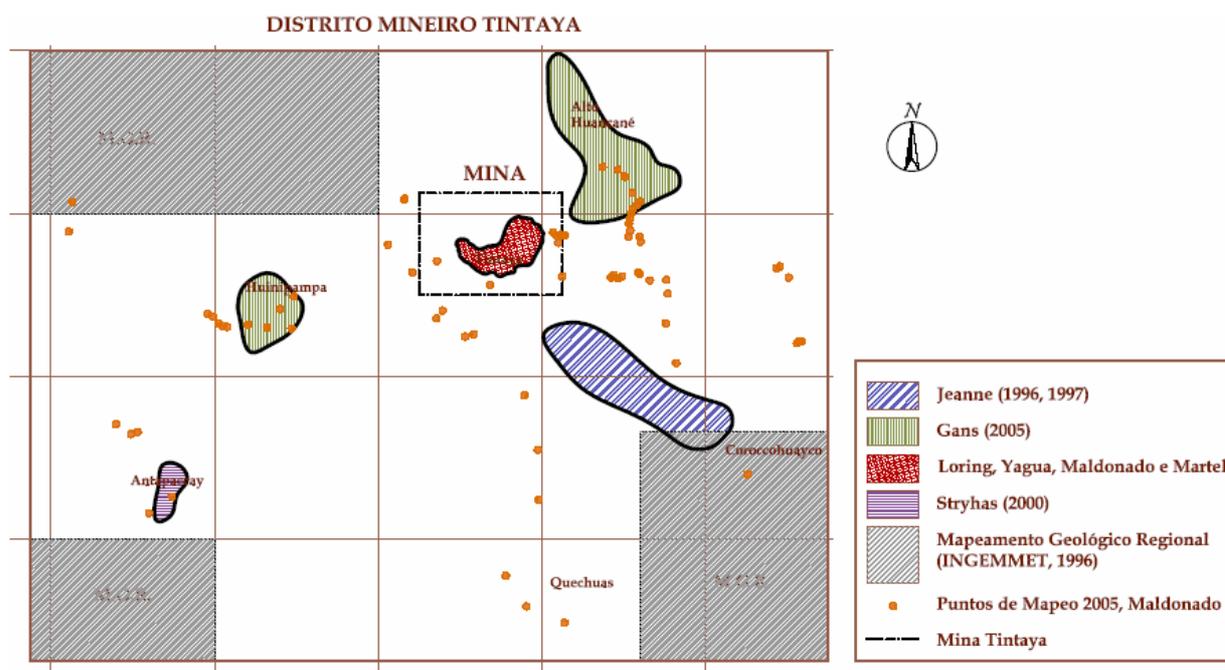
Os trabalhos geológicos anteriores de escala regional, assinalam que a evolução da orogenia andina tem ocorrido em múltiplas fases de deformação, que incluem mudança na direção de convergência de placas de NNE a ~EW com variados regimes de compressão e extensão entre

o Mesozóico e Cenozóico (Jaillard et.al. 2000). Trabalhos de neotectônica também assinalam a existência de um regime de extensão ~NS atual no sul do Perú.(Mercier et. al, 1992). (Fig.3.1).

Trabalhos anteriores do grupo “Brownfields” na área do Distrito contemplam as estruturas geológicas em locais específicos (Fig. 3.2). Assim, os mapeamentos entre as localidades de Coroccohuayco e Tintaya revelam a ocorrência de dobras de orientação NNW nas seqüências cretáceas (Jeanne, 1996, 1997). A utilização de furos de sondagem na localidade Antapaccay permite definir dois padrões de falhas subverticais com orientações NE e NW (Stryhas, 2000) e mapeamentos recentes nas localidades de Alto Huancane e Huinipampa sugerem que a história estrutural do Distrito é complexa e pode incluir múltiplas fases de deformação, sem discernimento claro de cada (Gans, 2005).



**Figura 3.1:** Diagramas ilustrativos da evolução tectônica dos Andes, em tempos do Cretáceo Superior (a), Eoceno, modificado de Jaillard et. al. 2000 (b). Estado de extensão regional atual no sul do Perú, Mercier et. al. (1992) (c).



**Figura 3.2:** Ilustração das áreas de mapeamento anteriores aproximadas, e localização dos afloramentos visitados, onde é coletada a informação estrutural do Distrito.

Na área da mina, trabalhos anteriores de mapeamento geológico e de perfuração de furos sondagem permitiram definir os contactos entre litotipos, a forma dos corpos de escarnito, assim como algumas dobras com eixos NW e ~EW, e falhas métricas. (Departamento de Geologia de Tintaya, 1995-2001; Loring, 2000). Dados de mapeamento geotécnico coligidos entre os anos 2000 – 2002 pelo mestrando, serviram para definir a orientação de padrões de fraturas menores na mineração, informação utilizada para complementar a descrição neste capítulo e à análise no capítulo 4.

## **3.2 LINEAMENTOS ESTRUTURAIS**

Uma imagem Radar e algumas fotos aéreas serviram para traçar lineamentos estruturais de uma área regional e de uma área parcial do Distrito Mineiro, respectivamente (Fig. 3.3 e 3.4). Sendo os critérios utilizados para caracterizar os lineamentos, a quebra de relevo de cristas e vales e as tendências retilíneas das drenagens.

### **3.2.1 LINEAMENTOS REGIONAIS**

A utilização de um diagrama de roseta geral para todos os lineamentos regionais caracteriza a existência de dos padrões NNW – NW, NS, ~NE e ~EW (Fig. 3.3c). Similarmente, três rosetas correspondentes ao comprimento de traço dos lineamentos agrupados em três categorias (Fig. 3.3d, e, f), permitem deduzir que o padrão NW ocorre tanto nos traços superiores a 10 km como naqueles inferiores a 1 km, definindo um padrão muito persistente. O padrão NS parece ser mais significativo nos traços inferiores a 1 km e talvez naqueles próximos de 10 km, constituindo um padrão abundante. No entanto, o padrão NE parece mais significativo que o padrão EW nos traços <1 km. Entretanto, a definição do padrão mais abundante na escala entre 1 km e 10 km é incerta.

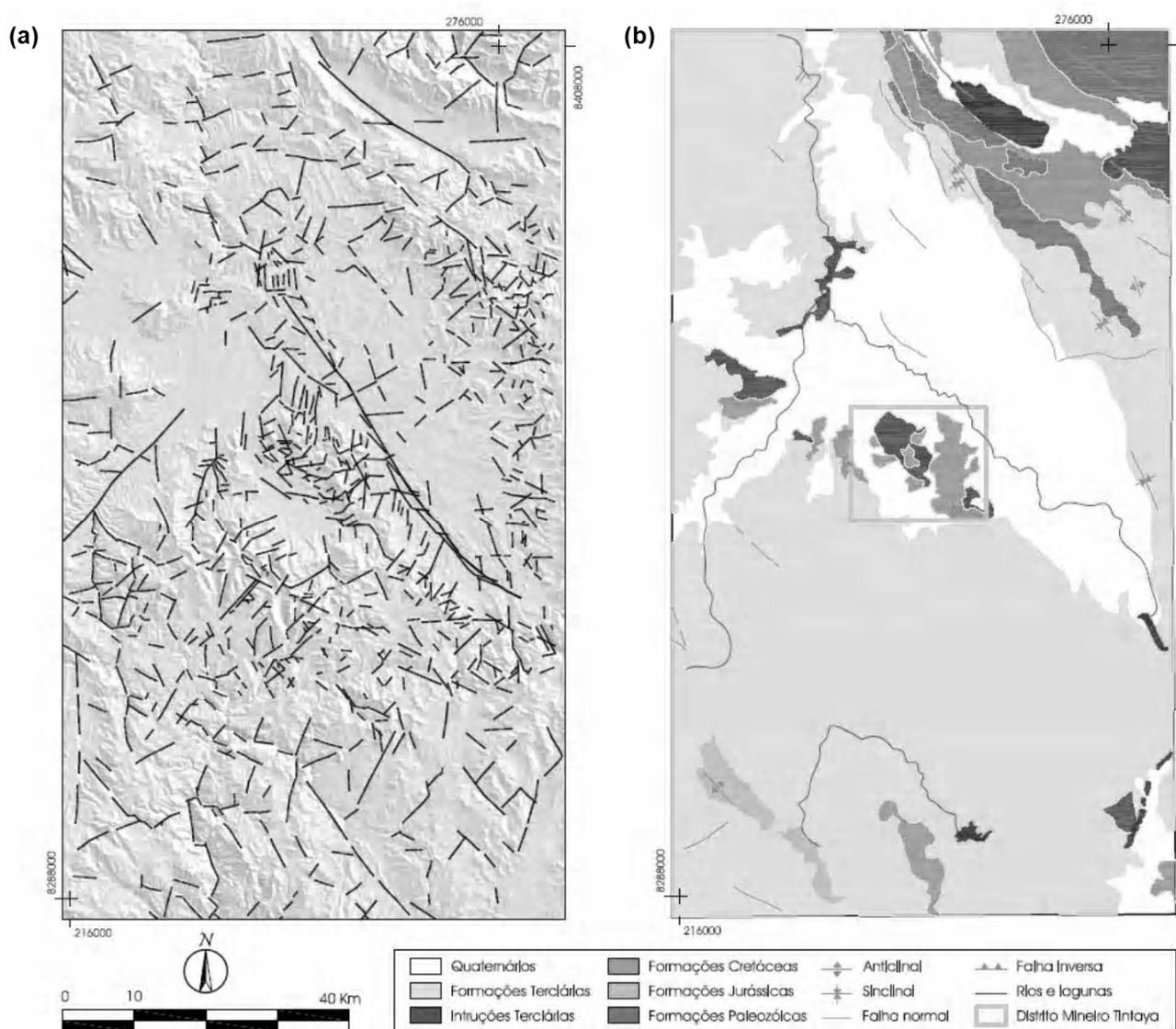
A natureza geológica dos lineamentos é deduzida comparando os contactos litológicos e estruturas definidas no contexto regional com os lineamentos observados (Fig. 3.3). Assim, depressões de vales e drenagem retilínea ocorrem em padrões NNW – NW ou NS, e de modo similar alguns contactos regionais, eixos de dobras e falhas ocorrem com essas orientações. Contudo, algumas drenagens retilíneas podem expressar fraturas regionais (e.g. Rio Salado). A quebra de cristas nos montes em geral ocorre nos padrões NE e EW, e podem representar fraturas ou sistemas de fraturas regionais.

### **3.2.2 LINEAMENTOS NO DISTRITO**

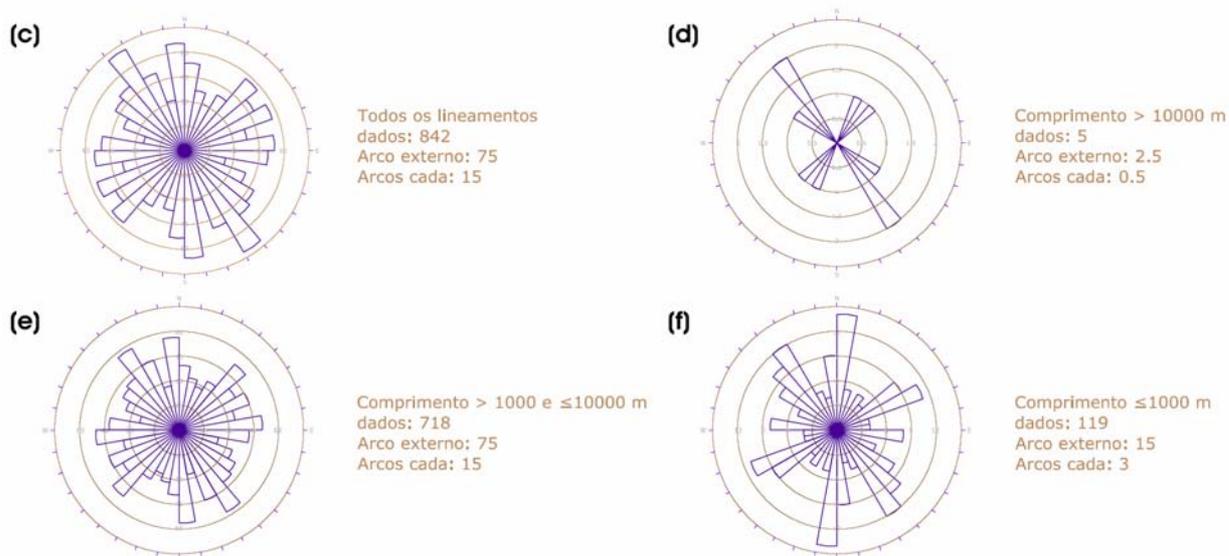
No diagrama de roseta, para todos aos lineamentos traçados nas fotografias aéreas, há 3 padrões de orientação ~EW, NNW e NS (Fig. 3.4b). Similarmente, três rosetas correspondentes ao comprimento de traço (Fig. 3.4c, d, e), permitem deduzir que, o padrão EW é distinguível tanto nos traços superiores a 1 km como naqueles inferiores a 100 m. Portanto, o

padrão EW pode ser considerado como o mais persistente e abundante. O padrão NNW parece ser mais significativo nos traços >1 km e o padrão NS é o menos significativo em todas as escalas.

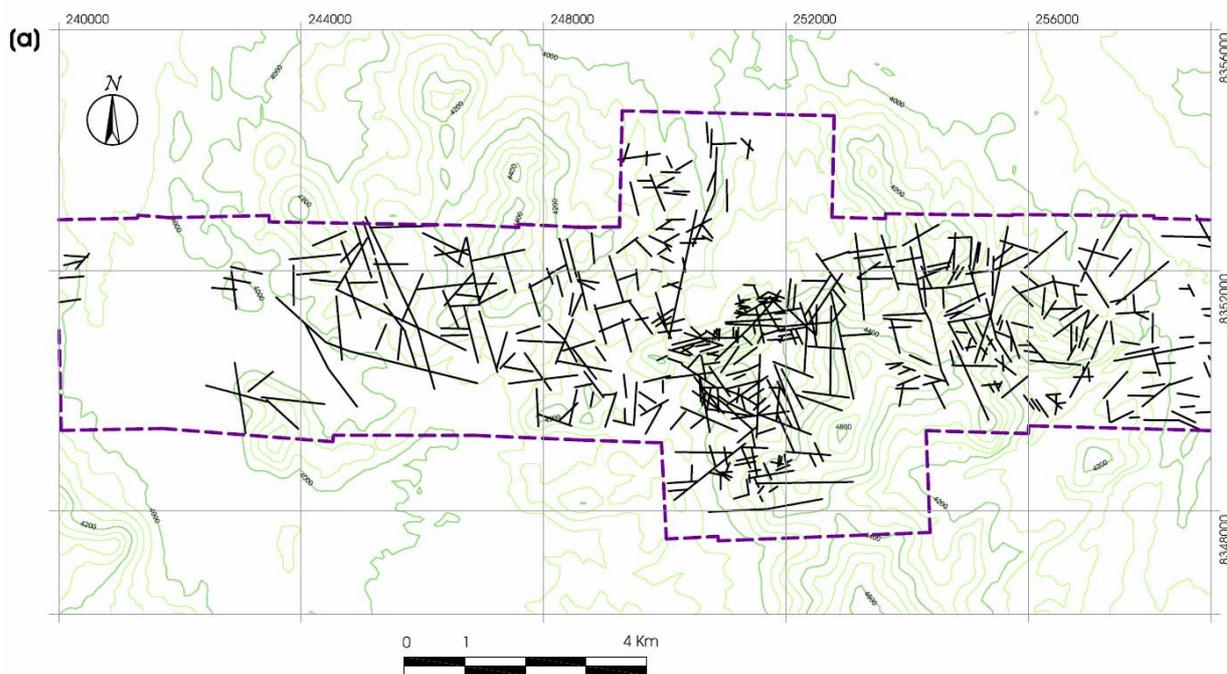
Na área coberta pelas fotos aéreas destaca-se a ocorrência do padrão EW, o que parece contradizer os resultados regionais, onde o padrão dominante é o NNW – NW. O padrão EW pode expressar um sistema de fraturas relacionado com as rochas intrusivas presentes na mineração, tema de consideração mais adiante, neste capítulo.



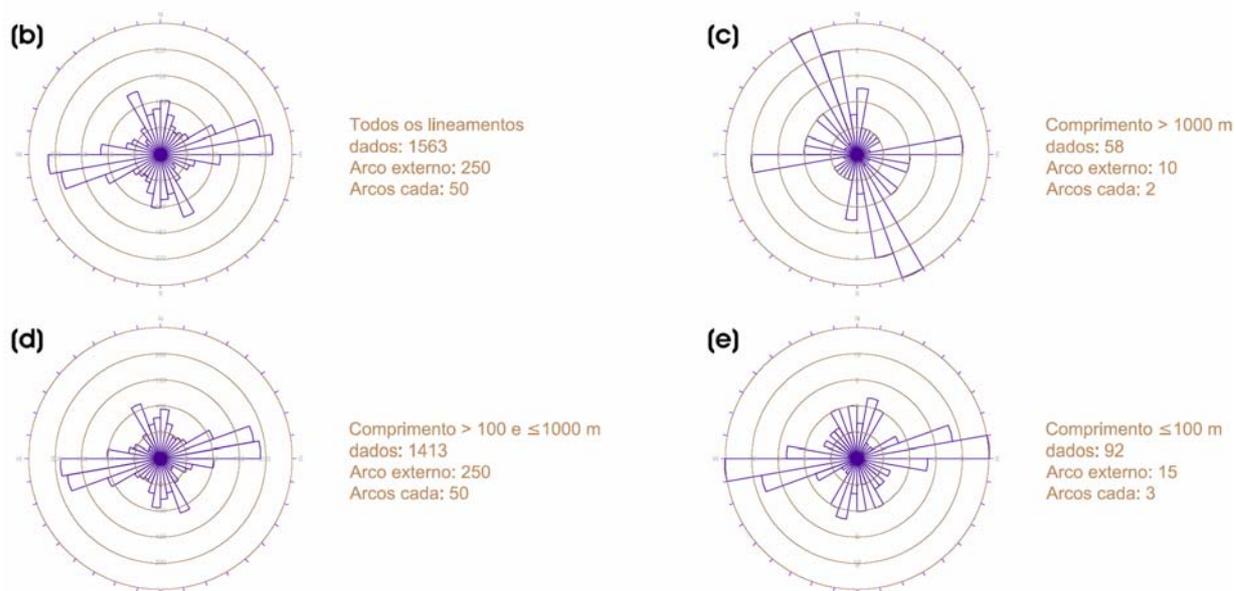
**Figura 3.3:** (a) Imagem digital de terreno, Shuttle, do ano 2002, utilizada para traçar os lineamentos regionais na escala 1:100.000, procedente da Universidade de Maryland (vide no apêndice 1 a Figura A.1); (b) Mapa geológico simplificado de uma área regional (8500 km<sup>2</sup>) que cobre a mesma área da imagem radar, elaborado com ajuda dos mapeamentos regionais de Ingemmet(1996)



**Figura 3.3:** (c) Diagrama de roseta para todos os lineamentos, (d) digramas de roseta referentes ao comprimento dos traços > 10 km, (e) >1 km e < 10 km, (f) < 1 km (f). Notar que os círculos concêntricos não têm a mesma escala, devido à variação da população.



**Figura 3.4:** (a) Área do Distrito coberta pelas fotografias aéreas, do ano 1997 na escala ~1:15000, fotografadas pela empresa Horizons South América S.A.



**Figura 3.4:** (b) Diagrama de roseta para todos os lineamentos. Diagramas de roseta referentes a comprimento dos traços: (c) > 1 km (c), > 0.1 km, e (e) < 1 km (d), e < 0.1 km (e). Notar que os círculos concêntricos não têm a mesma escala, devido à variação da população.

### 3.3 ESTRUTURAS DO DISTRITO MINEIRO TINTAYA

#### 3.3.1 SUMÁRIO

As figuras 3.5(a, b) ilustram a disposição das unidades litológicas e das estruturas geológicas principais que formam a geologia do Distrito, e servem como base para a descrição das estruturas geológicas existentes na área do distrito com seus detalhamentos.

As formações cretáceas mostram dobras na escala de centenas de metros a alguns quilômetros, com eixos de caimento suave a moderado e flancos abertos e suaves. Subordinadamente, também existem algumas dobras normais fechadas, outras ligeiramente assimétricas abertas e às vezes recumbentes com vergência para leste. Os eixos das dobras têm padrões NS, NNW, NW e localmente EW. Superfícies de clivagem de dissolução sob-pressão ocorrem localizadamente nas dobras de calcários da localidade de Antapaccay seguindo um padrão NW subvertical. Na localidade de Huinipampa, Gans (2005) define um padrão de clivagem NNW com mergulho moderado WSW.

As falhas ocorrem em escalas métricas e quilométricas, com diversos movimentos e padrões de orientação, que podem ser simplificados a: NE – NNE, NW – NNW, NS, EW. Assim, as falhas NE – NNE têm mergulhos maiores que  $60^\circ$  e apresentam movimento normal ou sinistral

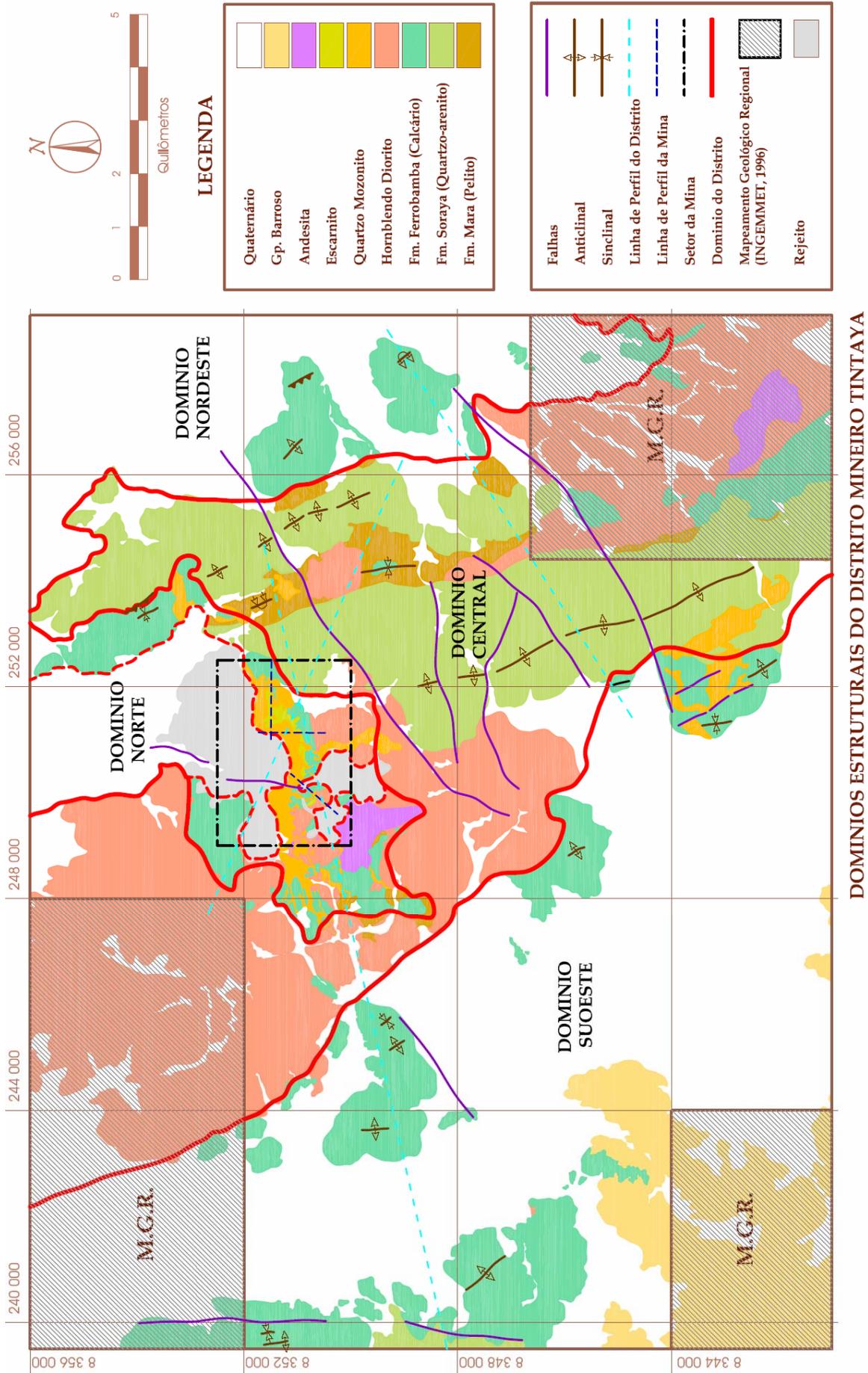
oblíquo. As falhas NW – NNW têm mergulho entre 35° e 60° SW e apresentam movimento dextral, inverso, dextral – inverso e localmente normal. As falhas NS têm mergulho variável entre 45° e 85° W e apresentam movimento reverso, dextral – inverso, reversa – dextral ou normal. As falhas EW têm mergulhos entre 40° e 70° apresentam movimento normal ou dextral.

Os diques intrudem as seqüências cretáceas seguindo padrões próximos do EW, NS e NE, por outro lado alguns veios preenchidos de calcita nos calcários definem dois padrões EW e NS.

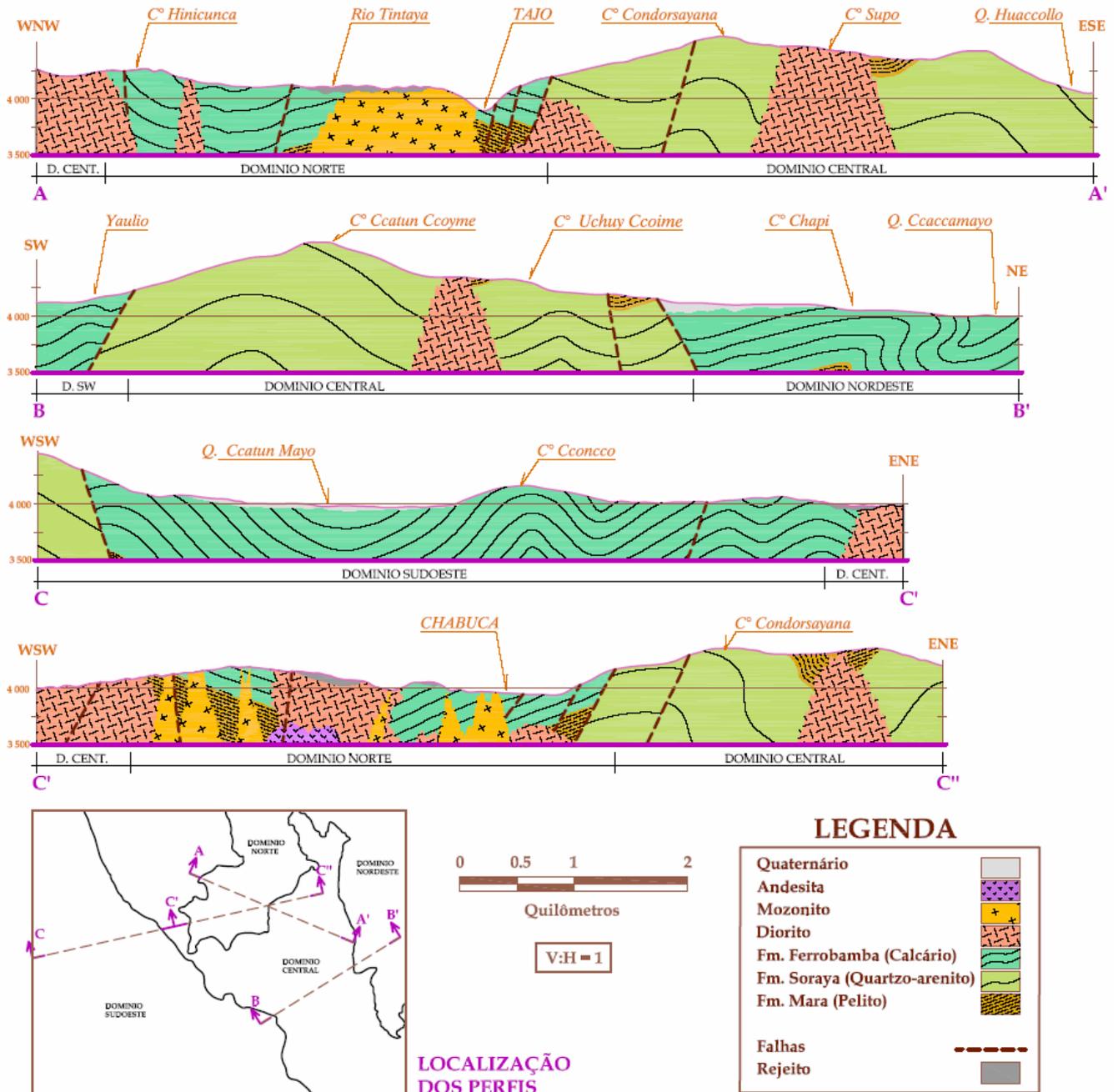
### 3.3.2 DEFINIÇÃO DE DOMÍNIOS

Devido aos domínios estruturais da área do distrito não serem conhecidos e desprovidos de estudos anteriores, uma divisão proposta, para justificar a análise estrutural da área em domínios, considera: 1. A existência de diferentes domínios lito-estratigráficos; 2. A tendência dos contactos destas unidades lito-estratigráficas que, a grosso modo, é NNW – SSE; 3. As freqüências de informações coligidas no campo em relação às estruturas maiores, tais como zonas de dobras e fraturas associadas; 4 A tendência das estruturas associadas. (Fig.3.5a).

A denominação dos quatro domínios estruturais leva em conta a sua posição geográfica na área do distrito, convencionando a descrição de leste para oeste. Assim: o *Domínio Nordeste* inclui os calcários da Formação Ferrobamba, com dobras de tendência NW e lineamentos NE; o *Domínio Central*, compreende o quartzito da Formação Soraya e o corpo intrusivo de Tintaya de composição diorítica, segmentada em porções N e S, por uma faixa ~NS de quartzito com metamorfismo de contato. As estruturas principais são zonas de cisalhamento de tendência ENE, alojando dobras com eixos levemente rotacionados, variando de NW a N e fraturas associadas; o *Domínio Norte* compreende a transição a uma sinforma quilométrica, onde se alojam calcários da Formação Ferrobamba e quartzitos da Formação Soraya, além de monzonito com diques posteriores e escarnito; o *Domínio Sudoeste*, com uma tendência aproximada paralela com o Domínio Central, NW – SE e NS, compreende rochas calcárias da Formação Ferrobamba, cobertura Quaternária do Vale de Canipia e o contato setentrional dos andesitos fraturados do Grupo Barroso. Compreende dobras quilométricas e de centenas de metros com tendência geral NW – SE, localizadas em Quéchuas, Antapaccay e Hunipampa.



**Figura 3.5 (a)** : Mapa geológico simplificado da área do Distrito mineiro de Tintaya, ilustrando a disposição dos litotipos e algumas das estruturas principais. Também se desenham as áreas dos domínios lito-estruturais utilizados na descrição e análise geométrica das estruturas. Notar a localização dos perfis AA', BB', CC' e C'C' definidos na figura 3.5b.



**Figura 3.5:** (b): Perfis da área do Distrito Mineiro de Tintaya elaborados utilizando os dados estruturais coletados e o mapa geológico reinterpretado com base no mapa disponível do Grupo Brownfields. A localização dos perfis é assinalada no mapa geológico do Distrito da Fig.3.5 (a). Na ausência de informações de furos de sondagem e perfis geofísicos, a interpretação geológica nos perfis se baseia na espessura relativa das unidades estratigráficas, a atitude das dobras, os lineamentos estruturais que podem representar estruturas rúpteis, considerando que falhas mesoscópicas registradas no mapeamento refletem a cinemática de possíveis falhas maiores. Na interpretação dos diques e dos corpos intrusivos é importante notar que as zonas de charneira das dobras e as estruturas rúpteis são zonas favoráveis para a intrusão de rochas ígneas. Na cronologia das intrusões o diorito é mais antigo e o monzonito mais novo. O Perfil AA' corresponde a parte do domínio Norte (área de Mina) e central (Cerro Condorsayana e Cerro Supo). O Perfil BB' corresponde a parte do domínio Central (Cerro Ccatun Ccoyme) e domínio Nordeste (Cerro Chapi). O Perfil CC' corresponde ao domínio Sudoeste (Cerro Cconcco). Finalmente, o Perfil C'C'' ilustra parte do Domínio Norte (Chabuca) e parte do Domínio Central (Cerro Condorsayana).

### 3.3.3 *DOMÍNIO NORDESTE*

Corresponde ao extremo nordeste do distrito, onde as camadas de calcários da Formação Ferrobamba ocorrem em duas localidades (Cerro Chapi e Cerro Fito) formando dobras normais abertas de eixos orientados NW, visíveis nas fotos aéreas com traços que se estendem ~200m. Entre o Cerro Chapi e a Quebrada Ccaccamayo ocorre um anticlinal recumbente com eixo NNW, além do falhamento de movimento inverso de orientação NW com moderado mergulho SW no Cerro Fito.

#### *DOBRAS*

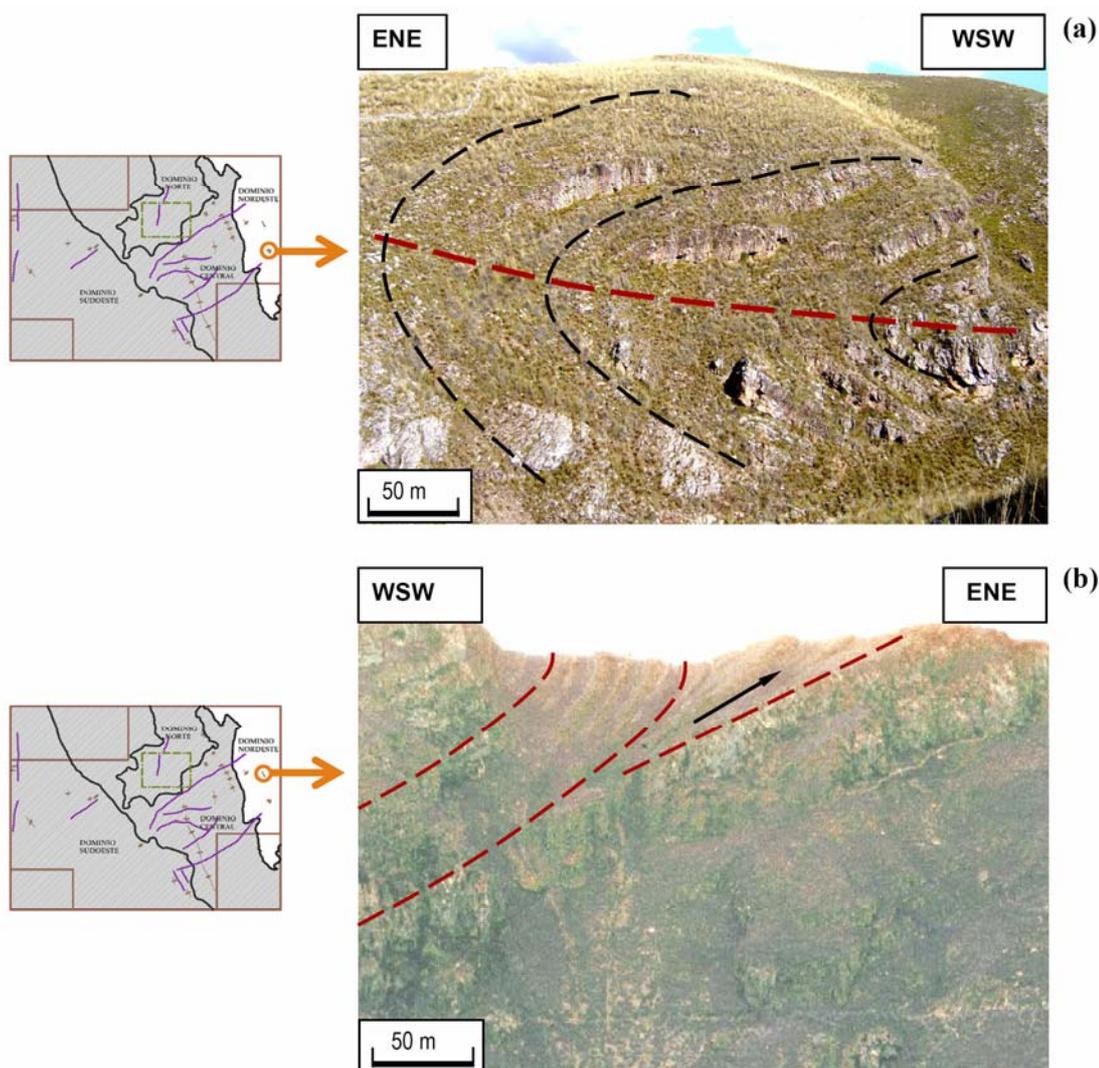
Em geral, as camadas de calcários são maciças com um metro de espessura, de cor cinza-azulada, com veios entrecruzados de calcita sem padrões definidos. Estas camadas, entre o Cerro Chapi e a Quebrada Ccaccamayo, formam um anticlinal cilíndrico recumbente, apertado de eixo 140/12 e superfície axial ~40/214 com as camadas invertidas de atitude 55/221 e as normais 25/207 que formam flancos com suave curvatura.(Fig. 3.6a e Fig. 3.7a).

Cabe assinalar que a dobra recumbente do Cerro Chapi é cortada pelo vale da Quebrada Ccaccamayo com morfologia retilínea, deslocando a charneira em ambas as encostas ~50m, sugerindo a existência duma falha vertical (~90/135) de ~1km de traço. No entanto a superfície de falha não é observada, podendo ser corroborada pelo forte fraturamento observado nas famílias de juntas (90/090 e 78/290) associadas, que atingem frequências de fraturamento superiores a 20/m, no fundo do vale.

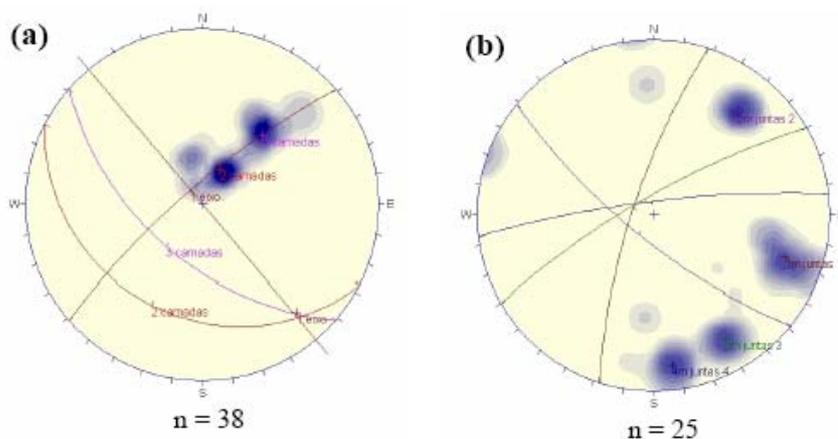
#### *FALHAS E JUNTAS*

A falha de movimento inverso localizada na encosta leste do Cerro Fito é inacessível, mas sua atitude de orientação NW (~ 40/220) foi aproximada visualmente, expondo uma superfície com ~150m de extensão, deslocando os calcários, que exibem camadas parcialmente dobradas (Fig.3.6b). Na localidade, próximo à “falha inversa do cerro Fito”, há uma outra falha inversa de atitude 54/274 com traço ~15m, exibindo uma superfície estriada, com preenchimento de farinha de falhas argilosa de 20cm, e um rejeito de ~5m que desloca os calcários.

Perto do cerro Fito, as famílias de juntas ~NS, NW, NE e EW de orientação media 76/288, 74/219, 78/330, 81/353 respectivamente(Fig.3.7b), mostram traços parcialmente expostos, com superfícies suaves planas a ligeiramente onduladas, com frequências de fraturamento de 2 a 4/m.



**Figura 3.6:** Anticlinal recumbente localizado entre o Cerro Chapi e a Quebrada Ccaccamayo, com coordenadas aproximadas 258336 E, 8348856 N. (a). Visada do plano de falha de movimento inverso no topo do Cerro Fito, de coordenadas aproximadas 257734 E, 8350660 N. (b). Notar que os quadrinhos da esquerda correspondem à Fig. 3.5 (a).



**Figura 3.7:** Estereograma das camadas do anticlinal recumbente do cerro Chapi, indicando a orientação do eixo 140/12 e a atitude media das camadas (a). Estereograma ilustrando a atitude media das quatro famílias de juntas sub-verticais que ocorrem perto do cerro Fito (b).

### 3.3.4 DOMÍNIO CENTRAL

Localizado do lado leste do distrito, se estende de sul a norte, dominado litologicamente pelas camadas de quartzito da Formação Soraya, e subalternamente por alguns afloramentos de camadas de pelito da Formação Mara que foram perturbados por intrusões de diorito e monzonito. Estruturalmente, este domínio compõe uma faixa dobrada de orientação geral NNW que se estende de sul a norte entre as localidades de Quéchuas e Tintaya (Jeanne, 1996, 1997). Esta faixa dobrada parece ser deslocada por falhas subverticais de orientação geral NE, que no dizer de Gans (2005), têm movimentos oblíquos normais.

#### **DOBRAS**

Os afloramentos da Formação Soraya, constituídos por camadas de quartzo arenito de grão médio a fino, definem dois anticlinais maiores com charneiras parcialmente erodidas. No extremo Leste, ocorre um anticlinal normal aberto com eixo 330/10, que se estende por ~6 km, cujos flancos suaves apresentam camadas com mergulhos entre 15° e 40° em ambos os flancos (Fig.3.8b). No extremo Oeste, um outro anticlinal normal aberto se estende por ~10 km, de eixo geral 159/10, cujos flancos suaves são definidos por camadas com mergulho entre 20° e 40° em ambos os flancos (Fig.3.8c). Entre os dois anticlinais ocorrem afloramentos da Formação Mara, cujas camadas de pelitos definem um sinclinal aberto que se estende por 6 km, com eixo variável entre 170/20 a 155/10 (Fig.3.8d) e uma simetria que muda de sul a norte de normal a quase recumbente, com ambos os flancos que mergulhando entre 35° e 45°.

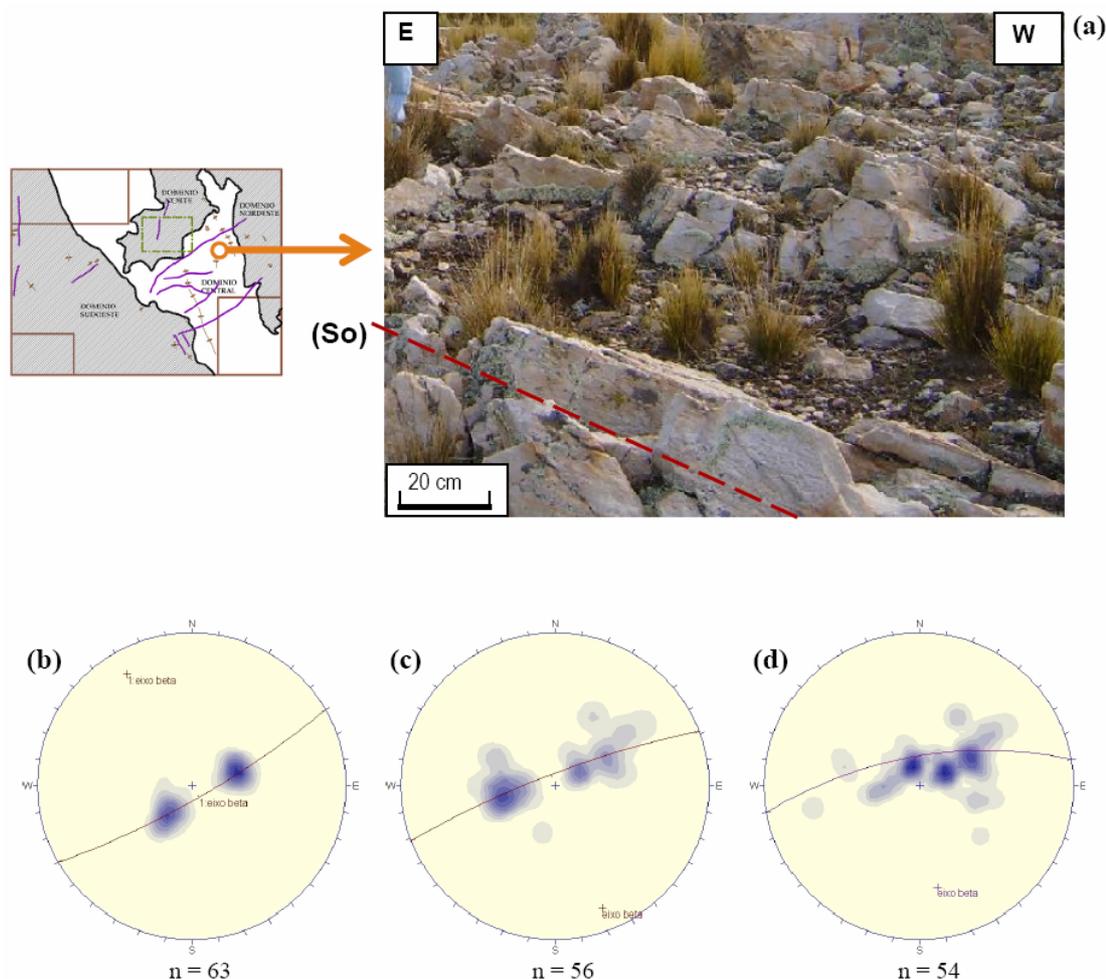
#### **FALHAS E JUNTAS**

As falhas observadas na Formação Soraya ocorrem como superfícies de 2 a 3 m de comprimento, parcialmente expostas, e em geral com ausência do teto e do preenchimento, dificultando a estimativa do rejeito. As superfícies expostas têm um intemperismo moderado com pátinas de oxidação de ferro e as suas formas incluem superfícies planas lisas, planas com ressaltos, onduladas estriadas e planas estriadas, permitindo definir, na maioria das falhas, os seus movimentos relativos.

As falhas ocorrem em três locais diferentes, sendo nove ao longo do anticlinal leste, entre o Cerro Chuañuma e a Quebrada Huacollo, cinco na encosta oeste do Cerro Ccatun Ccoyme, e uma na encosta oeste do Cerro Condorsayana. (Fig. 3.9 – Fig. 3.12).

As falhas no anticlinal leste apresentam movimento normal (47/079, 35/075, 40/032, 49/275 e 45/185), movimento inverso (35/045, 45/245), movimento oblíquo dextral inverso (45/275) e movimento dextral (Fig. 3.9). A última falha de orientação ~EW e mergulho subvertical está localizada na encosta Sul do Cerro Chuañuma com um traço quase retilíneo, visível na fotografia aérea por mais de 1 km, sendo uma das poucas falhas com ambos os blocos

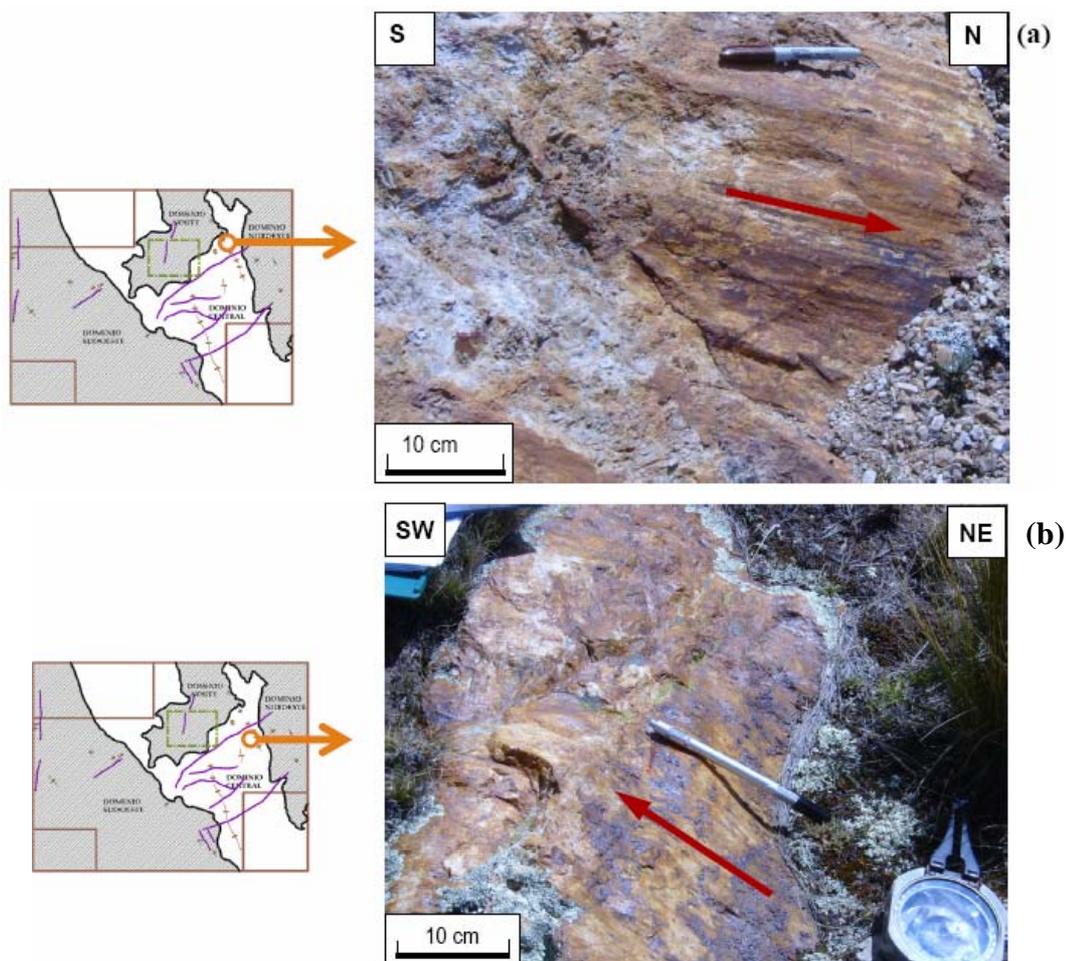
observáveis, podendo-se estimar um rejeito maior que 3m, e um preenchimento de 40 cm de espessura, composto por fragmentos de 1 a 2 cm de quartzito triturado.



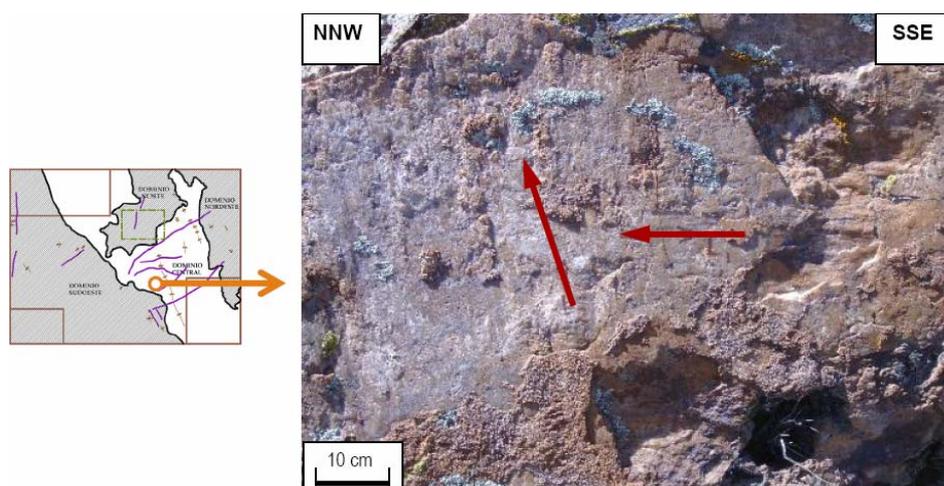
**Figura 3.8:** Camadas de quartzito de grão médio a fino da Formação Soraya localizados na coordenada 254409 E, 8351309 N (a). Estereogramas das dobras no domínio central, do anticlinal leste com eixo 330/10 (b), do anticlinal no extremo oeste com eixo 159/10 (c) e do sinclinal com eixo 170/22 (d). Notar que o quadrinho da esquerda corresponde à Fig. 3.5 (a).

As falhas localizadas na encosta oeste do Cerro Ccatun Ccoyme tem movimento inverso (56/260, 43/256, 57/255), movimento normal (70/130) e duplo movimento (65/260). Esta última falha apresenta duas estrias diferenciadas que indicam um movimento inverso novo e um outro movimento aparente dextral velho. (Fig. 3.10).

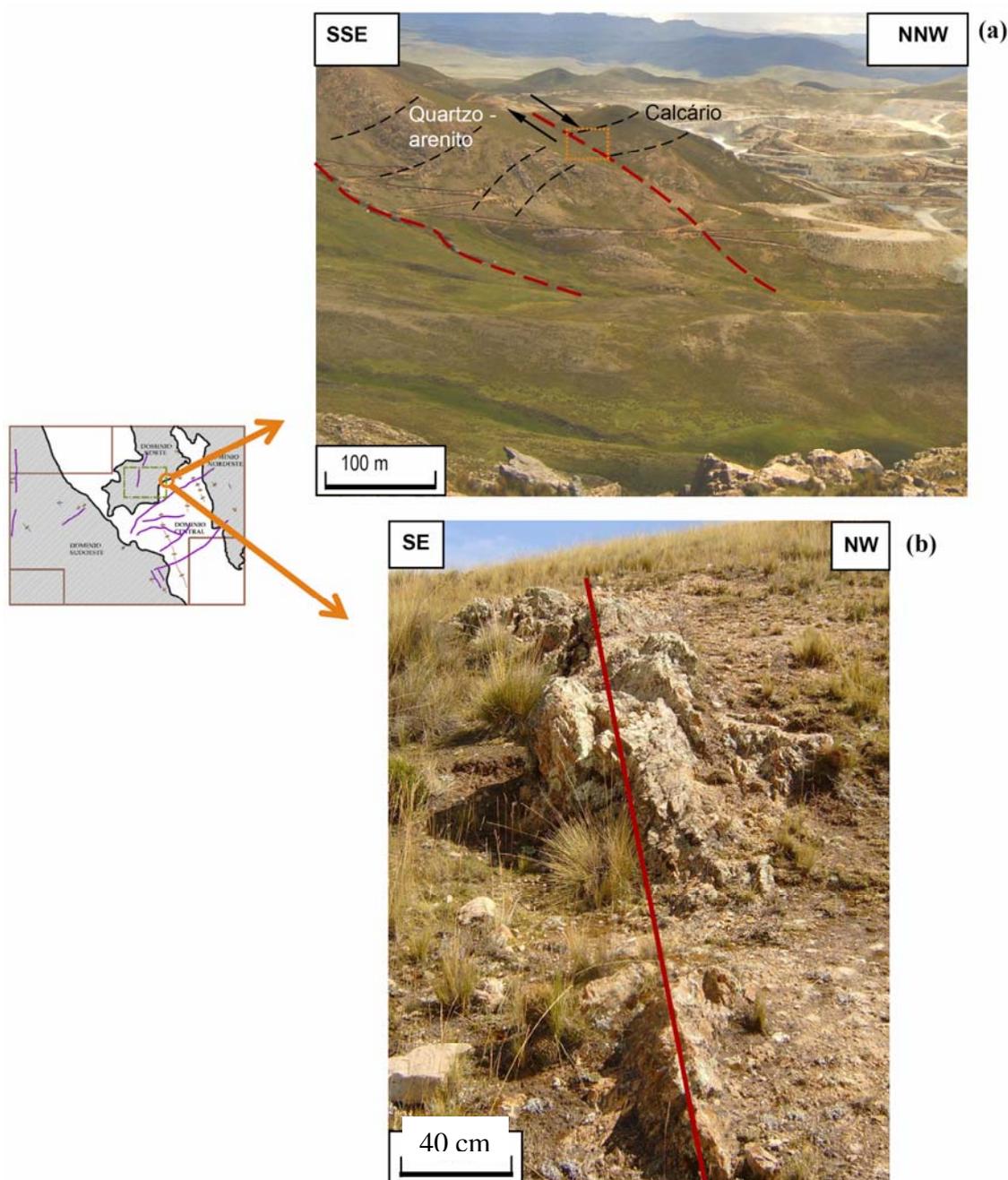
Na encosta oeste do Cerro Condorsayana, o contacto entre as camadas de quartzito da Formação Soraya com as camadas de calcários da Formação Ferrobamba ocorre pela falha aqui denominada de Condorsayana, com atitude média 60/310 e movimento normal, cujo traço curvilíneo é visível em fotografia aérea por mais de 2 km. O rejeito não é determinado devido à ausência de estratos homólogos. A separação entre o quartzito e o calcário atinge ~5m, com cobertura vegetal que impede medir a espessura real do preenchimento, composto por fragmentos de quartzito, areia e argila. (Fig. 3.11).



**Figura 3.9:** Superfícies de falha típicas registradas nos quartzo arenitos da Formação Soraya, localizadas entre o Cerro Chuañuma e a Quebrada Huacollo. Falha normal de atitude 35/075 e estrias 010/20 localizada nas coordenadas 254389 E, 8352291 N (a) e falha inversa de atitude 35/045 e estria 026/30, localizada nas coordenadas 255067 E, 8350344 N(b). Notar que os quadrinhos da esquerda correspondem à Fig. 3.5 (a).



**Figura 3.10:** Falha de atitude 65/260 com dois movimentos relativos diferenciados, o primeiro dextral com estrias 175/12 e um outro movimento relativo inverso com estrias 286/62. A falha se localiza na encosta oeste do Cerro Ccatun Ccoyme, perto do ponto 251900 E, 8346194 N. Notar que o quadrinho da esquerda corresponde à Fig. 3.5 (a).



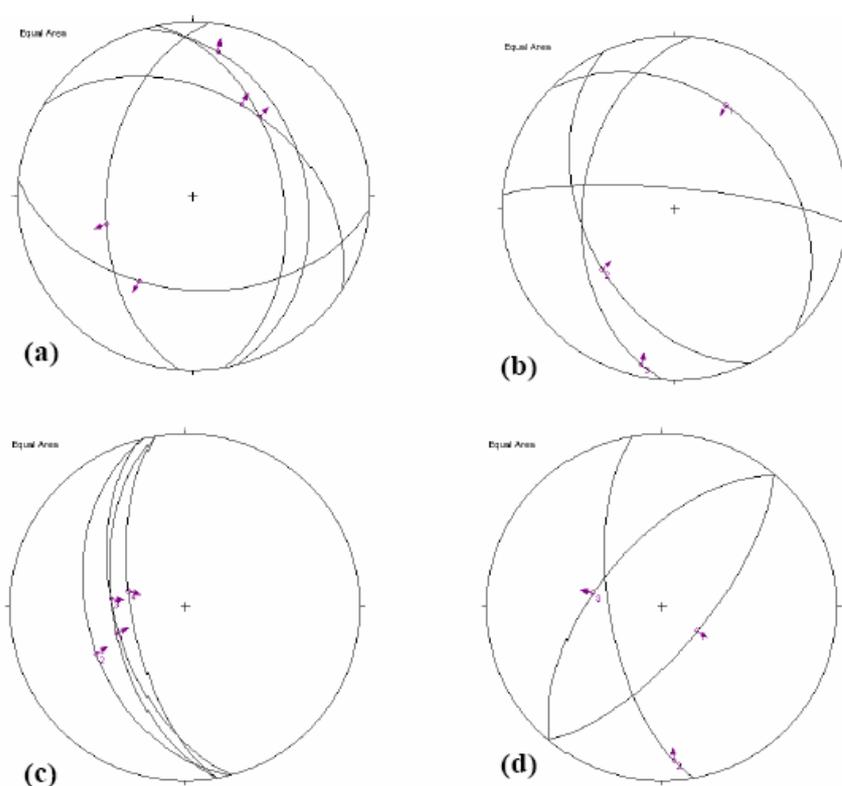
**Figura 3.11:** Fotografias da falha Condorsayana. Vista panorâmica da encosta oeste do cerro Condorsayana (a), onde o traço vermelho indica a superfície de falha de atitude média 60/310 e as setas pretas o movimento normal. No extremo SSE sobressaem as camadas de quartzo arenito e no bloco teto as camadas de calcário. A fotografia inferior (b) expõe a superfície de falha parcialmente erodida, localizada nas coordenadas 252480 E, 8351466 E. Notar que o pequeno encarte à esquerda corresponde à Fig. 3.5 (a).

Uma característica mecânica das camadas de quartzo arenito da Formação Soraya é o forte fraturamento expresso por 4 famílias de juntas subverticais (90/170, 80/143, 90/279, 85/061) de superfícies planas e suaves, cujas frequências de fraturamento variam de 9/m a 14/m. É importante assinalar que existe coincidência entre os padrões de lineamentos identificados nas fotos aéreas com as famílias de juntas encontradas, destacando a família 90/170 (padrão EW) por ser mais abundante. (Fig.3.13).

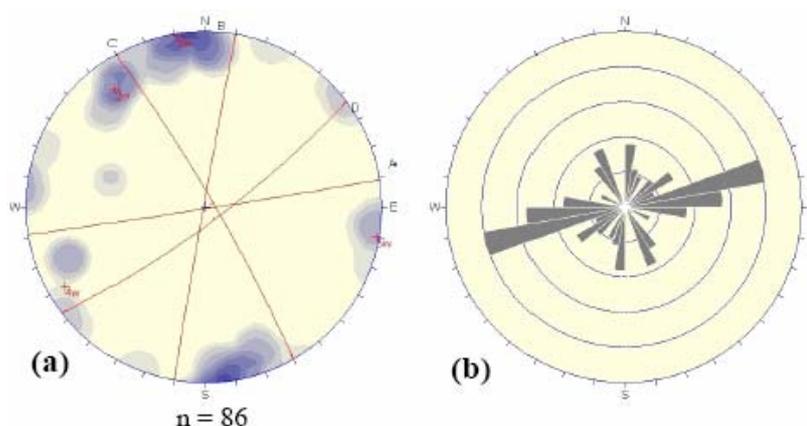
### INTRUSÕES DE DIORITO

O corpo de hornblenda diorito localizado no Cerro Supo é observado em afloramentos dispersos e erodidos ao longo das encostas, sem mostrar claramente os contactos com as Formações Soraya e Mara, que são mascarados pela cobertura. Em afloramento há variações faciologicas e apresenta uma textura fanerítica de grão fino, com composição média de hornblenda (~25%), plagioclásio (~55%) e magnetita (~5%), mostrando em geral um intemperismo moderado. O hornblenda diorito também exhibe três famílias de juntas subverticais (Fig.3.14) com superfícies onduladas rugosas, formando padrões de traços em forma de X, sendo que a família de juntas mais abundante (75/144) tem uma frequência de fraturamento média de 7/m, e as outras duas famílias (80/355 e 84/084), frequências de fraturamento similares que variam entre 3/m e 4/m.

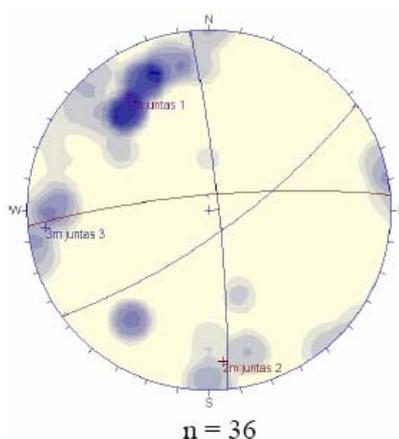
Os corpos maiores de hornblenda diorito localizados no extremo sudeste e noroeste do Domínio Central têm uma composição similar do diorito do Cerro Supo. No entanto apresentam um maior conteúdo de magnetita (~10%), gerando escarnitos de magnetita nos contatos com o calcário da Formação Ferrobamba. Estruturalmente, ocorrem lineamentos retilíneos no diorito (imagem radar) com orientações NE, ~NS e EW – WNW, expressando sistemas de fraturas.



**Figura 3.12:** Estereogramas das falhas medidas no Domínio Central nos afloramentos da Formação Soraya. As setas indicam a atitude das estrias de atrito e o movimento relativo das falhas. Cinco das falhas normais medidas nos afloramentos no anticlinal leste (a). Duas falhas inversas e duas de movimento direcional localizadas no anticlinal leste (b). Quatro falhas com movimento inverso medidas no cerro Ccatum Ccoyme (c). Duas falhas normais (incluindo a falha Condorsayana) e uma falha de movimento destal medida no cerro Ccatum Ccoyme (d)



**Figura 3.13:** Estereograma (a) e diagrama de roseta (b) das juntas medidas no quartzo arenito. Destacando as 4 famílias de juntas subverticais a família EW por ter uma maior população. Subalternamente um padrão ENE pode ser distinguido do padrão EW.



**Figura 3.14:** Estereograma das juntas medidas nos afloramentos de diorito localizados no Cerro Supo. Distinguindo-se três famílias de juntas subverticais, das quais a família ~N 60° E é mais abundante (75/144).

### 3.3.5 DOMÍNIO NORTE

Corresponde ao extremo norte do Distrito, onde os afloramentos ao redor da mineração incluem litotipos heterogêneos (calcário, monzonito, diorito e andesito) parcialmente alterados pela lavra da mineração (cobertos ou erodidos). Estruturalmente, ocorrem dobras simétricas abertas de escalas entre 50 m a ~1 km, cujos eixos seguem dois padrões, um NW e outro ~EW. As falhas são sistemáticas e seguem os padrões NE, NW e NS com relações de intersecções (corte) ambíguas, coincidentes com estudos anteriores (Loring, 2000; Gans, 2005).

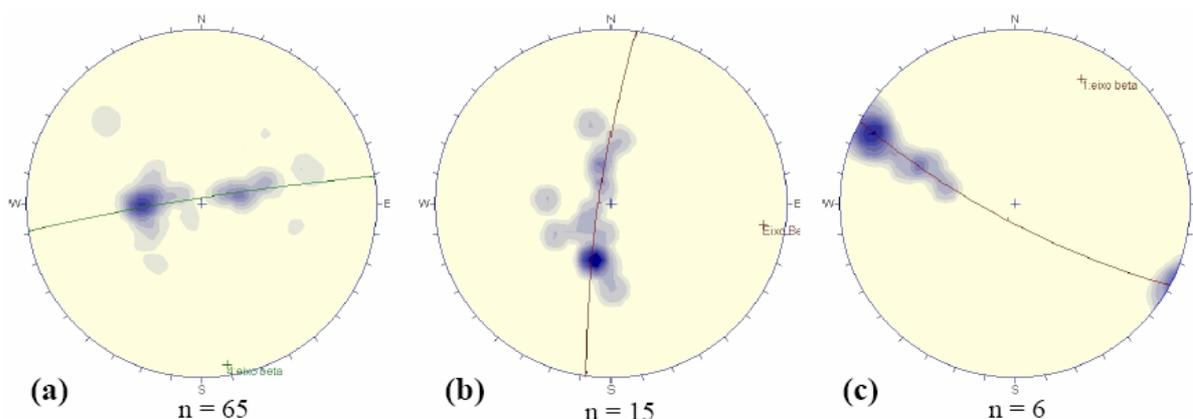
#### DOBRAS

Na localidade de Alto Huancané, a nordeste da mineração, o calcário forma dobras normais abertas com comprimento de onda <100 m, cujos eixos variam entre NS (200/10) e NNW (170/05), apresentando superfícies axiais geralmente empinadas mergulhando na direção WSW.(Fig.3.15a). Adicionalmente, na encosta norte do cerro Condorsayana, as dobras são

recumbentes com superfícies axiais mergulhando para SW, nos afloramentos de pelitos da Formação Mara (Gans, 2005).

No calcário da encosta oeste do cerro Condorsayana, ocorre um sinclinal normal aberto com comprimento de onda <200 m e eixo próximo de EW (097/08), cujos flancos são de curvatura suave (Fig. 3.15b). Dobras de similar orientação ocorrem no interior da mineração e são descritas no título “*Estruturas geológicas no interior da mina*”.

Similarmente, as camadas de calcário no topo do cerro Huinicunca formam um provável sinclinal, com eixo ~NS (028/12), sem contudo uma definição do estilo da dobra, devido à influência de escarnitos de magnetita, que mascaram as medidas. (Fig. 3.15c).



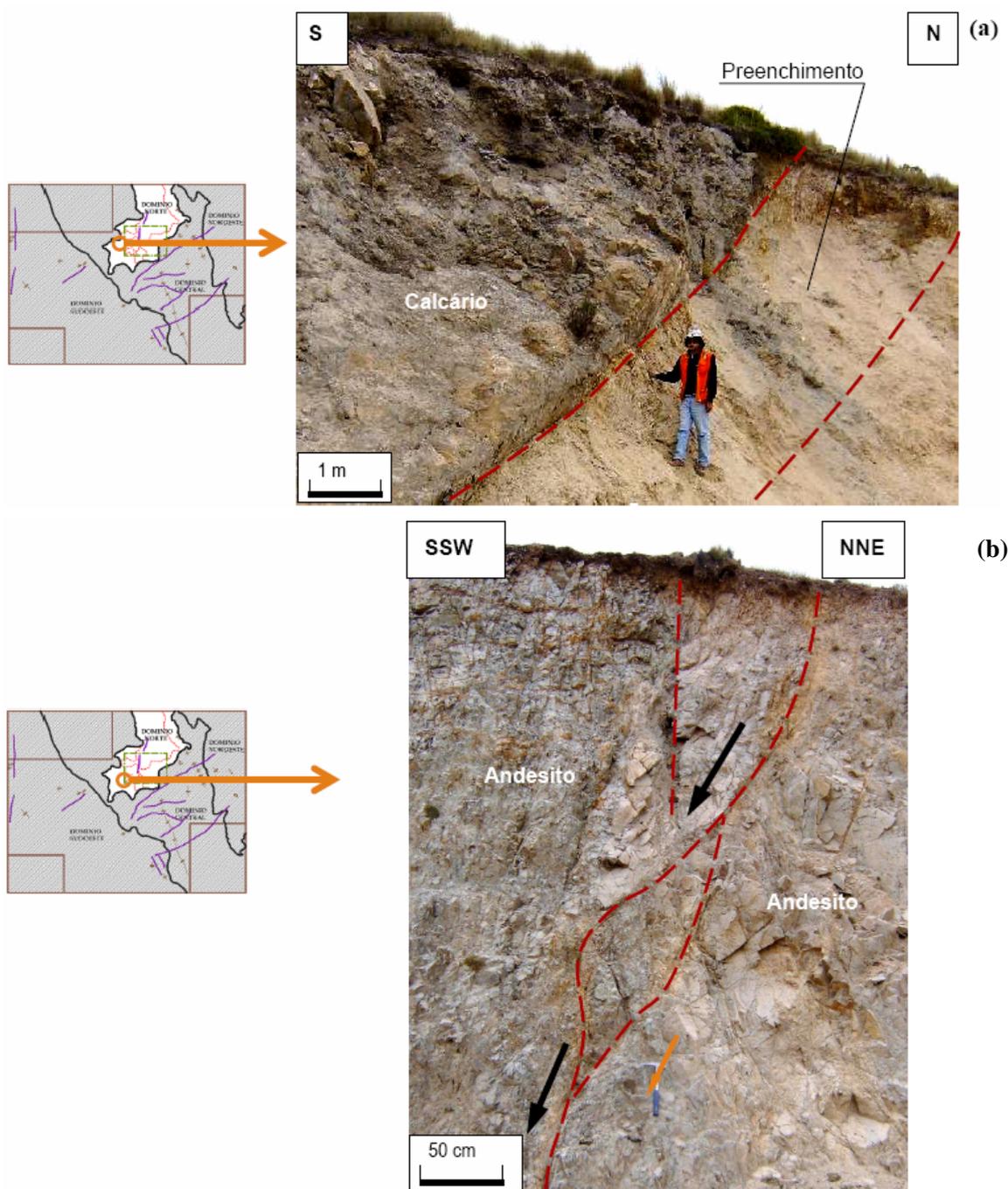
**Figura 3.15:** Dobramentos do Domínio Norte. Anticlinal normal aberto da área de Alto Huancané com eixo 170/05 (a). Sinclinal normal aberto da encosta leste do cerro Condorsayana com eixo 097/08 (b). Provável sinclinal localizado no topo do cerro Huinicunca com eixo 028/12 (c).

### FALHAS

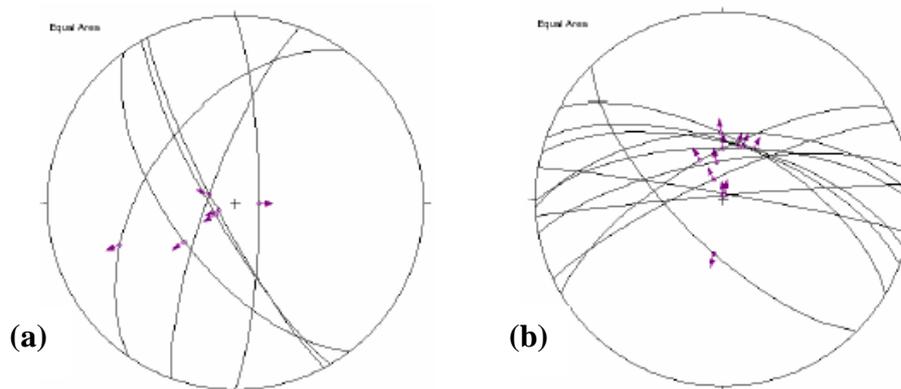
Estudos recentes na localidade de Alto Huancané (Gans, 2005), assinalam a existência de um padrão de falhas NE com alto mergulho para NW que corta as dobras de direção NNW. O padrão de falhas NE teria uma cinemática normal, concordando com as observações feitas na “Falha Condorsayana” no lado leste da mineração. No entanto, em Alto Huancané as superfícies das falhas do padrão NE são obscurecidas pela erosão, impedindo uma clara determinação dos rejeitos. Falhas menores de orientação similar ocorrem na mineração tanto nos intrusivos (monzonito e diorito) como no calcário de Formação Ferrobamba.

Uma falha métrica de orientação ~NS (83/265) ocorre na encosta oeste do cerro Huancaruma, paralela ao contacto entre o corpo de diorito e um dique de monzonito, que se estende de norte a sul por mais de 1 km, fato que indica pelo menos nesta área, que os diques de monzonito foram controlados pela preexistência de estruturas rúpteis de similar orientação.

Múltiplas falhas métricas medidas em diferentes locais mostram movimentos normais, tanto nos calcários (~80/090, 80/240, 82/242, 78/290, 50/305, 62/233) como nos afloramentos de andesito (73/350, 88/355, 70/330), evidenciando que a área ao redor da mineração é dominada por falhas de movimento normal, e revelando pelo menos dois padrões de falhas NNW – NW e ~EW. (Fig. 3.16 e 3.17).



**Figura 3.16:** Exemplo de falha rúptil registrada no calcário da Formação Ferrobamba, localizada no extremo oeste da mineração, no ponto de coordenadas 248236E, 8351231 N. A falha tem atitude 62/233, expõe pequenas dobras de arrasto no material de preenchimento, de 1,5 m de espessura de farinha, com possível movimento normal, localizada (a). Exemplo de falha com superfície anostomasada, mapeada nos afloramentos de andesito, localizada no ponto de coordenadas 248829 E, 8350555 N. A seta indica o movimento relativo normal da falha. Notar que os quadrinhos da esquerda correspondem à Fig. 3.5 (a).



**Figura 3.17:** Estereogramas das falhas medidas no Domínio Norte. Seis das falhas normais medidas em calcário (a) e nove falhas normais medidas nos afloramentos de andesito (b). As setas indicam a atitude das estrias de atrito.

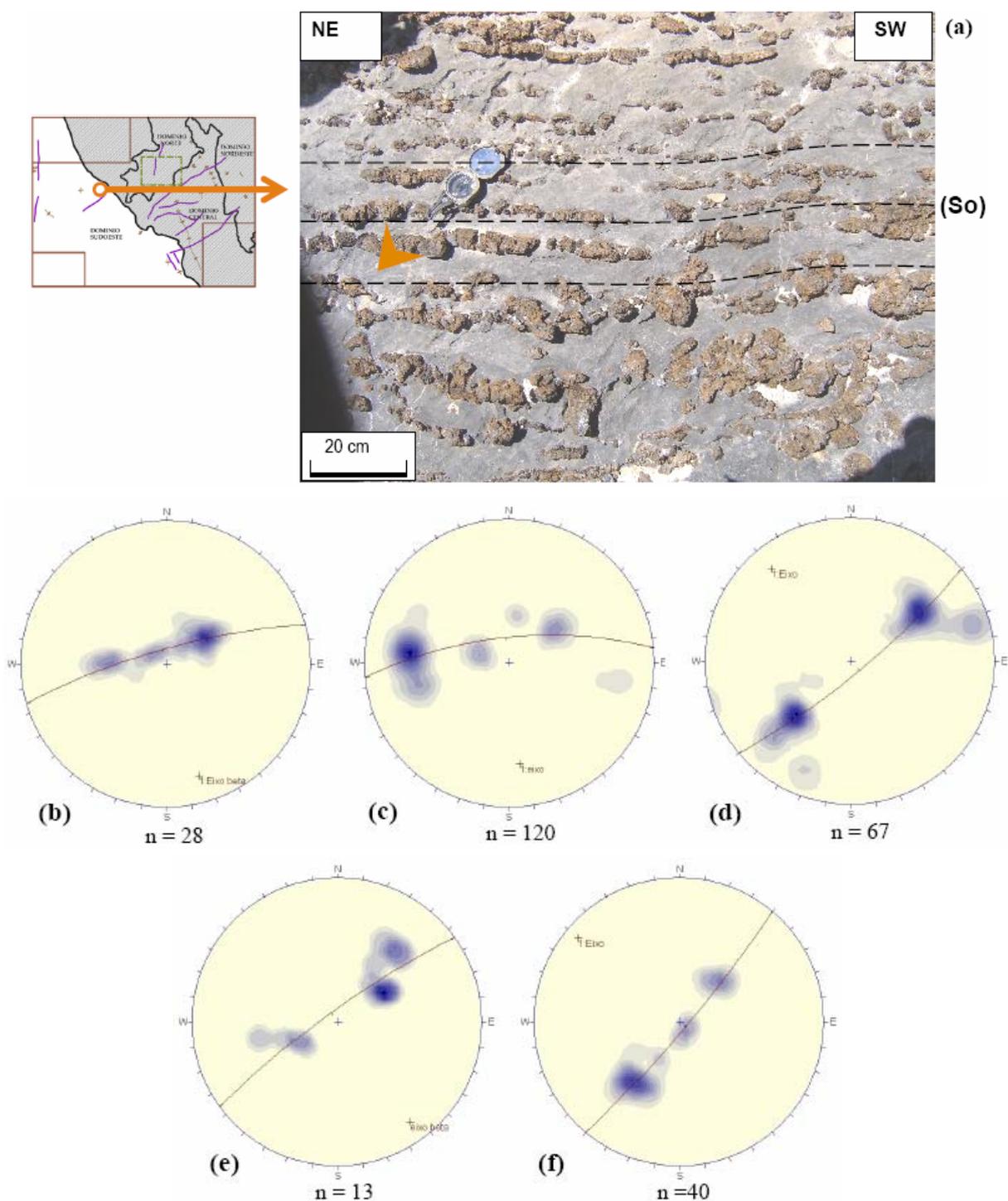
### 3.3.6 DOMÍNIO SUDOESTE

Localizado do lado oeste e sudoeste do Distrito, ao longo do vale Cañipia, onde a cobertura quaternária predomina, e a Formação Ferrobamba é distribuída em afloramentos que compõem os Cerros (e.g. Cerro Lopinaria, Cerro Concco, Cerro Quello Quello, Cerro Llallahua). As camadas de calcários da Formação Ferrobamba formam dobras com amplitudes <1 km, pouco assimétricas, com eixos de orientações NW, NNW e ~NS. Deslocando as camadas, ocorrem algumas falhas de rejeito direcional subverticais e outras falhas com movimentos normais, de escalas métrica a quilométrica. Também são freqüentes os veios centimétricos, preenchidos de calcita, formando dois padrões (~EW e ~NS) predominantes.

#### DOBRAS

Na localidade de Quéchuas, ao longo da encosta oeste do Cerro Lopinaria e na localidade Yaulio, os calcários formam dobras normais abertas com eixos subparalelos (164/12), com flancos suaves definidos por camadas com mergulho entre 30° e 40° (Fig. 3.18 b). O traço axial das dobras atinge uma extensão entre 300 e 700m. Na Loma Micayo ocorrem outras dobras normais, que foram mapeadas pela equipe Brownfields, com eixos subparalelos (145/01) de flancos planos definidos por camadas que mergulham entre 40° e 60°.

As camadas de calcário do Cerro Concco, na localidade de Hunipampa, apresentam superfícies onduladas e suaves, que são intercaladas com nódulos de silixtito ferruginoso de cor marrom (~3 cm de espessura média) (Fig. 3.18). As camadas apresentam diversas atitudes formando dobras quase normais e abertas com eixos ~NS de caimento suave sul (Fig. 3.18c). As dobras têm flancos suaves, traços axiais que se estendem por mais de 500m e superfícies axiais empinadas. (Conferir perfil CC' na Fig. 3.5 b).

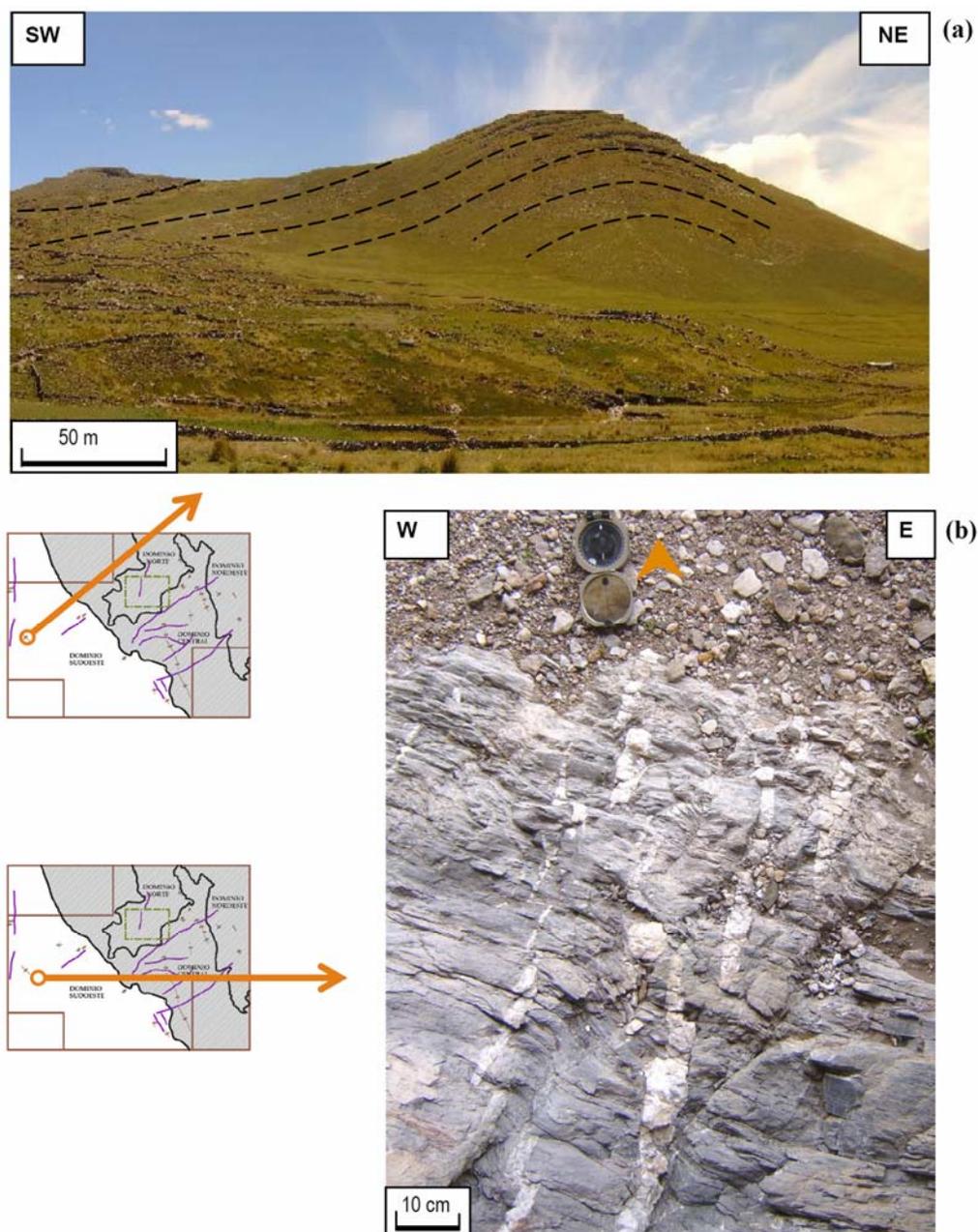


**Figura 3.18:** Dobramentos do Domínio Sudoeste: Em (a) camadas de calcário do Cerro Cconcco na localidade de Hunipampa exibindo nódulos de silexito ferruginoso de cor marrom. Dobramentos do calcário na localidade de Lopinaria, com eixo de atitude 164/12 (b), no cerro Cconcco com eixo 174/20 (c), na localidade de Antapaccay, com eixos de atitude 320/10 (d) e 144/09 (e), e o Anticlinal do cerro Saihuaccata de eixo 310/06 (f). Notar que o quadrinho da esquerda corresponde à Fig. 3.5 (a).

No extremo sudoeste, na localidade de Antapaccay, as camadas da Formação Ferrobamba sugerem a presença de um anticlinal normal fechado com comprimento de onda ~100m e charneira erodida, seu eixo com orientação 320/10 (Fig. 3.18d). Outro anticlinal normal aberto

com ~150m de traço axial de atitude 144/09, foi registrado pela equipe Brownfields, o qual se localiza na encosta oeste do cerro Quello Quello. (Fig. 3.18e).

No interior da caverna Juto, ao N de Antapaccay, as camadas de calcário, com atitude media 43/222 geram superfícies de clivagem espaçada pelo mecanismo da dissolução-sob-pressão, que deslocam localmente veios de calcita de espessura centimétrica (Fig.3.19). A atitude da clivagem espaçada (~76/023) sugere uma correlação com a atitude da superfície axial (85/220) de um anticlinal quilométrico localizado no Cerro Saihuaccata a NE da caverna Juto, com eixo 310/06 (Fig. 3.18f e 3.19).

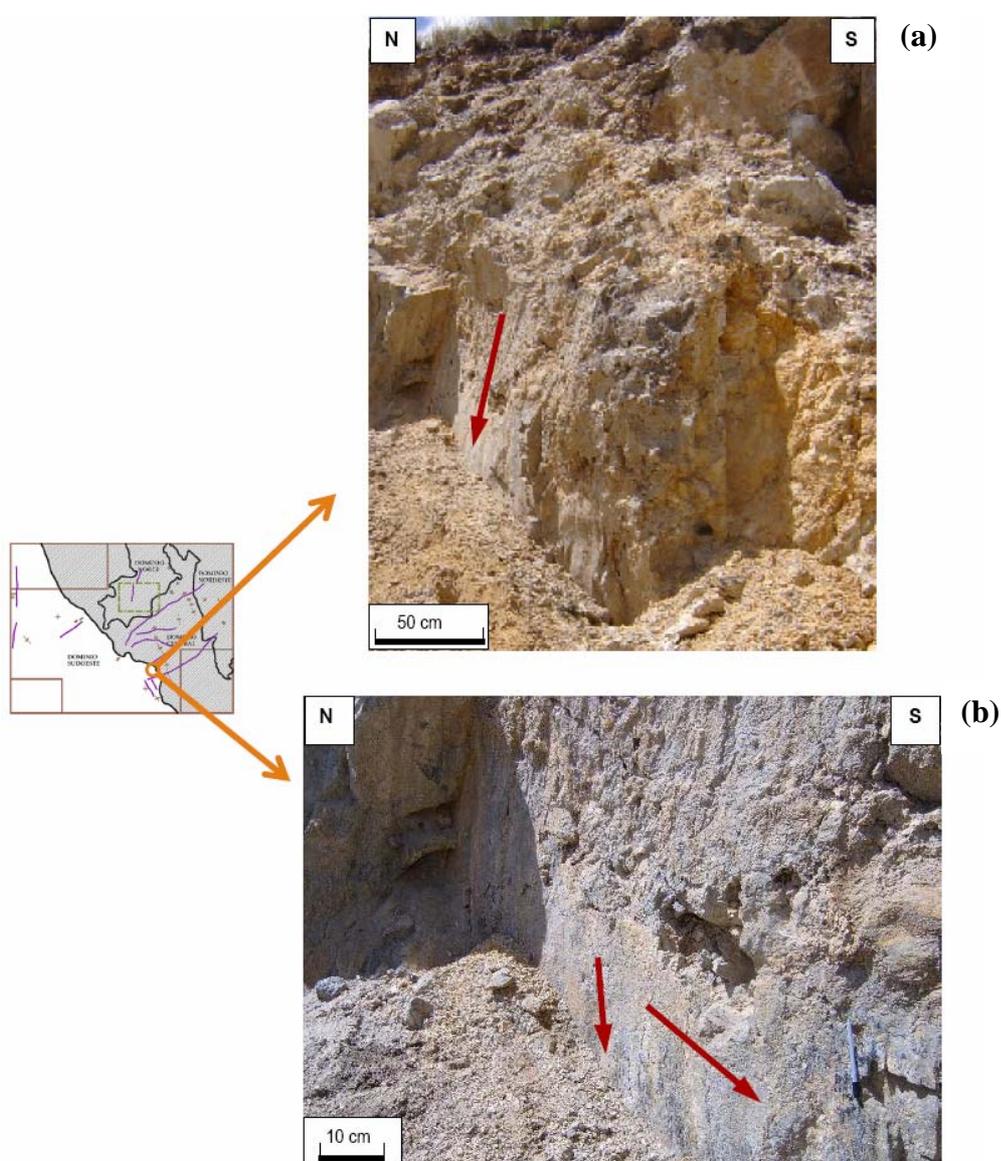


**Figura 3.19:** Vista de anticlinal quilométrico localizado no Cerro Saihuaccata a NE da caverna Juto, com eixo 310/06 (a). Planos de clivagem espaçada (~76/023) gerada por solução-sob-pressão, deslocando veios de calcita (84/096) (b), mapeados no interior da caverna Juto no ponto de coordenadas 241957 E, 8346573 N. Notar que os quadrinhos da esquerda correspondem à Fig. 3.5 (a).

Na topo do cerro Llallahua, ao norte da caverna Juto, os mapeamentos regionais indicam a existência de algumas dobras com eixos em direção NS a NNW (Ingemmet, 1996). As camadas medidas na encosta leste do cerro com atitude média 28/216 podem ser parte dessas dobras.

### FALHAS, VEIOS E JUNTAS

Na localidade de Yaulio, as falhas observadas têm traços próximos de 15m, e preenchimentos semelhantes, compostos de fragmentos de calcário e argilas. (Fig.3.20), sendo uma destas falhas (75/099) com movimento normal e superfície ondulada estriada parcialmente erodida, e outra falha (86/290) de superfície plana estriada apresentando dois movimentos diferenciados, o primeiro sinistral normal e o segundo normal.



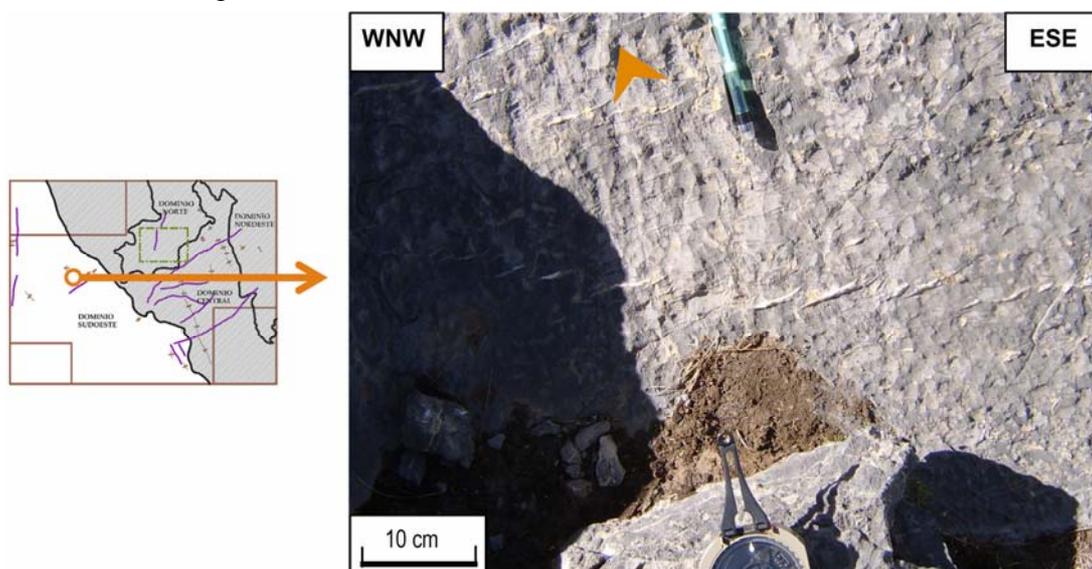
**Figura 3.20:** Falhas no calcário da Formação Ferrobamba, na localidade de Yaulio, perto do ponto de coordenadas 251918 E, 8344970 N. Falha normal de atitude 75/099 e estria 175/42 (b) e falha de atitude 87/290 com dois movimentos relativos, um primeiro sinistral com estria 205/57 e um posterior movimento normal com estria 284/86. Notar que o quadrinho da esquerda corresponde à Fig. 3.5 (a).

Os mapeamentos de Brownfields, na localidade de Quéchuas, inferem a existência de duas falhas transcorrentes subparalelas com movimento dextral, de orientação NNW, com traços próximos de 1 km e rejeitos próximos de 100 m.

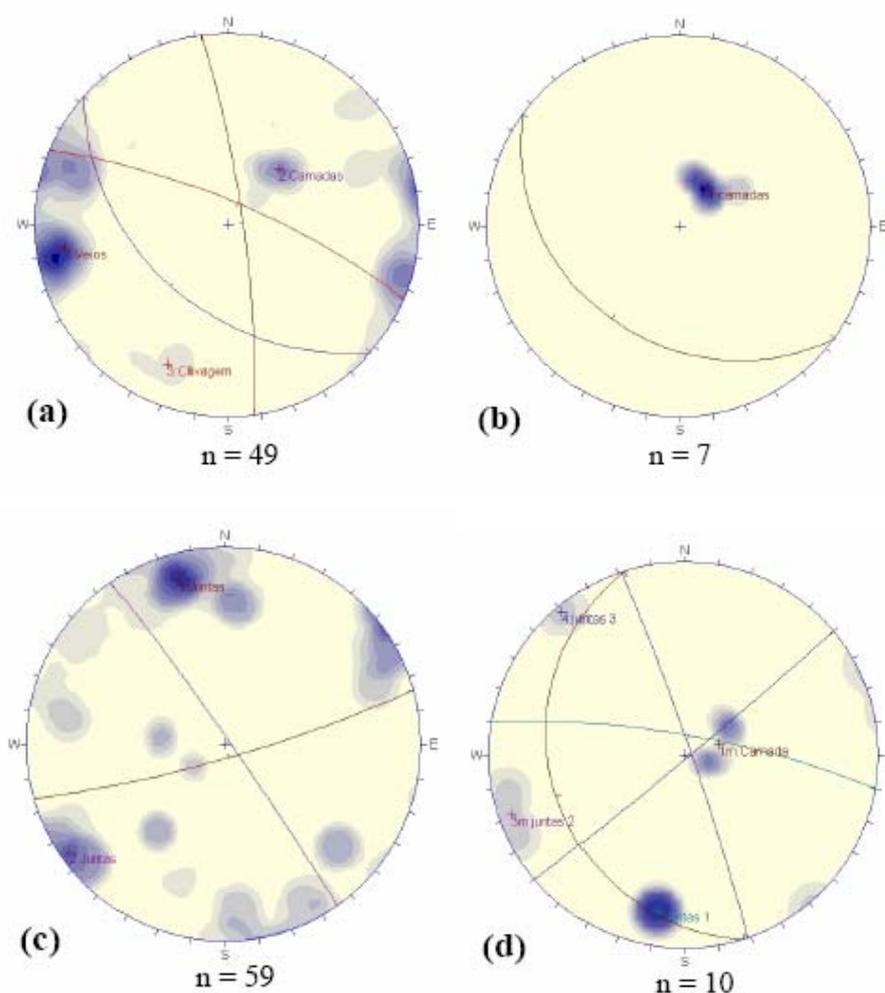
As juntas têm pouca variação na sua atitude, sendo a família ENE mais abundante (82/164) seguida da família NW (87/055) (Fig. 3.22 c). Nas duas famílias de juntas, a frequência de fraturamento é semelhante, variando de 5/m a 7/m, entretanto as suas superfícies variam de planas suaves a onduladas suaves.

Os veios são preenchidos por calcita, com espessuras variáveis <5cm, e ocorrem nos calcários com traços ondulados de fraca rugosidade, formando um padrão EW(63/003) na localidade de Huinipampa (Fig. 3.21) e um padrão NS(84/096) na caverna Juto(Fig.3.19 b). Nesta última localidade, os planos de clivagem espaçada de dissolução sob pressão geram um deslocamento sinistral dos veios.

No extremo sul de Antapaccay, no Cerro Quello Quello, aflora o Grupo Barroso em forma discordante sobre a Formação Ferrobamba. Os afloramentos são constituídos por andesito de textura porfirítica de cor preto-cinza formando uma fraca disjunção colunar, em três famílias de juntas subverticais (78/010, 86/071 e 88/140), que ocorrem com frequências de fraturamento entre 1/m e 4/m (Fig. 3.22 d).



**Figura 3.21:** Veios de calcita formando um padrão de atitude 63/003 localizados na topo do cerro Cconcco, nas coordenadas 243824 E, 8349526 N, da localidade de Huinipampa. Note-se um arranjo em T dos veios indicando uma extensão ~NS. Notar que o quadrinho da esquerda corresponde à Fig. 3.5 (a).

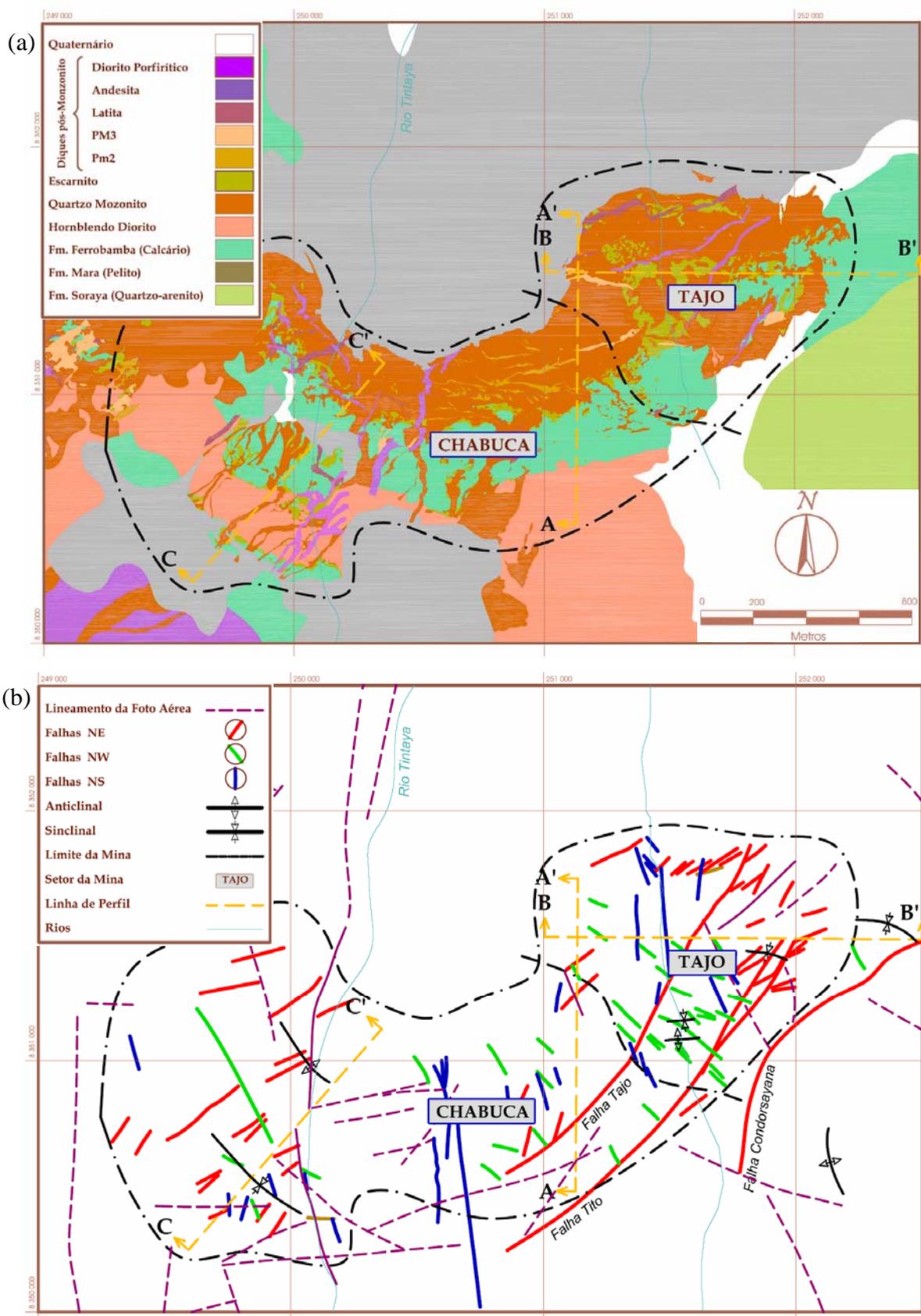


**Figura 3.22:** Estereogramas referentes a: Camadas, planos de clivagem e veios medidos na caverna Juto (a). Atitude de camadas de calcário no cerro Llallahua (b). Atitude das juntas no calcário, destacando duas famílias ~EW e ~NW (c). Atitude de juntas e provável acamamento dos afloramentos de andesito do grupo Barroso na localidade de Antapaccay.

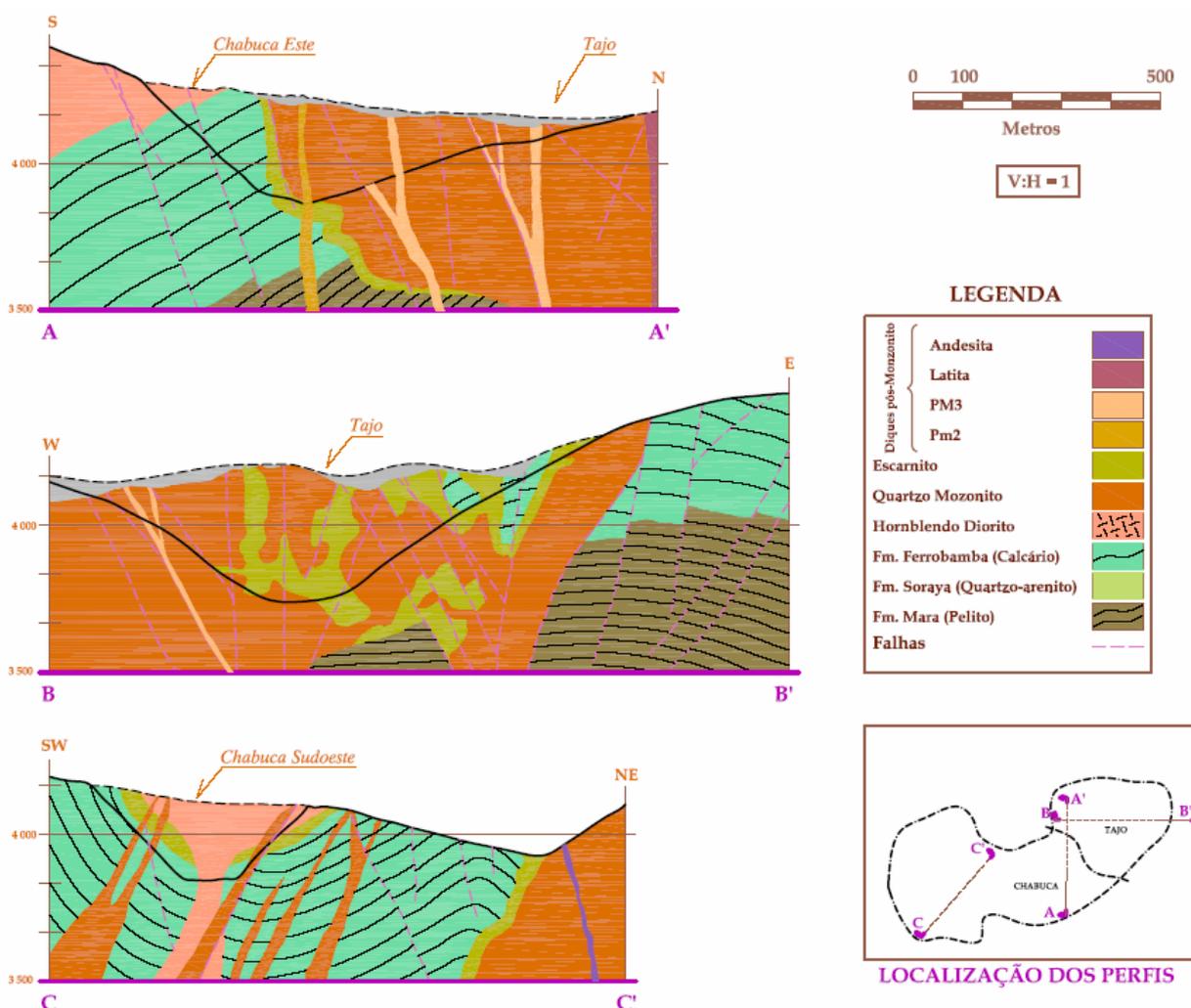
### 3.4 ESTRUTURAS GEOLÓGICAS NO INTERIOR DA MINA

#### 3.4.1 SUMÁRIO

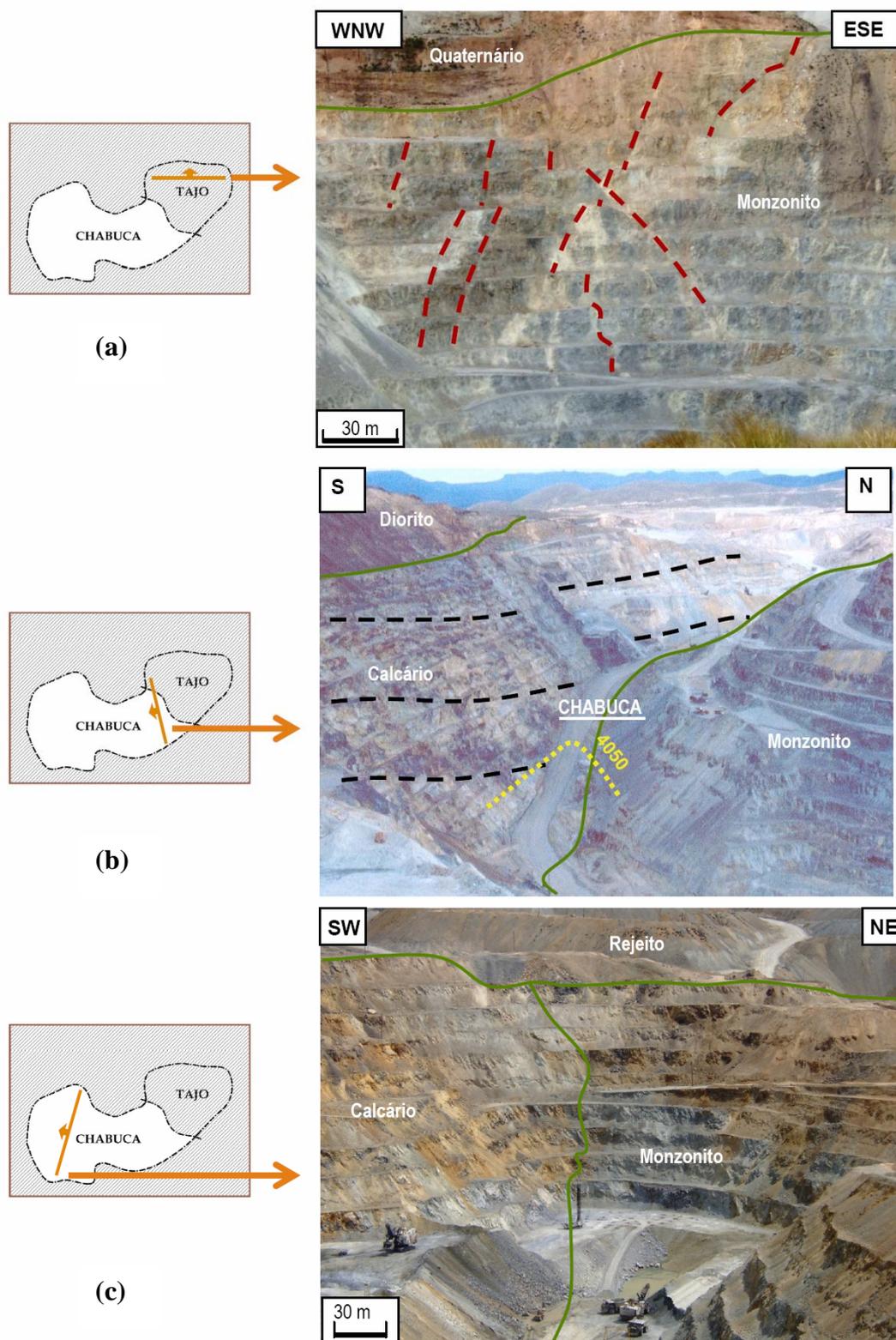
A mina se localiza no domínio norte do distrito e é dominada por monzonito, calcário e horblenda diorito. A escavação segue o contacto entre o monzonito e o calcário, onde ocorrem os corpos de escarnito, e envolve uma área próxima de 3km<sup>2</sup> que localmente é subdividida nas áreas “Tajo” e “Chabuca” (Fig.3.23 e Fig. 3.24). Estruturalmente, nos calcários ocorrem algumas dobras menores decamétricas de orientação EW e dobras maiores de centenas de metros de orientação NW. As estruturas rúpteis ocorrem em todos os litotipos, expressando falhas com padrões dominantes NE e NW e dispersas NS, e juntas com padrões similares às falhas tendo um padrão adicional disperso EW. Os diques de intrusões posteriores ocorrem segundo a distribuição de falhas e juntas.



**Figura 3.23:** Mapa geológico da área da Mina, baseado no mapa elaborado pelo Departamento de Geologia de Tintaya (a). Mapa estrutural simplificado ilustrando a disposição das dobras e falhas (b). Notar a subdivisão das áreas da mina com os nomes de “Tajo” e “Chabuca” os quais são referidos no texto para facilitar a descrição.



**Figura 3.24:** Perfis da área de Mina elaborados utilizando os dados estruturais coletados e os contatos litológicos interpretados pelo Departamento de Geologia de Tintaya. O perfil AA' é um corte NS da área de Chabuca, visando para W. No extremo sul, parte superior (encosta do cerro Huancaruma) o hornblenda diorito é concordante com o calcário, ambas unidades são deslocadas por falhas ~N 60° E de mergulhos ~80°NW. Os rejeitos parecem ser >50m com traços de falhas retilíneas >400m. Na parte central do perfil AA' o contato entre monzonito e calcário forma corpos alongados sub-verticais de escarnito. O monzonito é cortado por falhas sub-verticais NE de mergulho forte NNW ou NW, sendo alguns diques posteriores de composição monzonítica colocados na direção EW (Pm3) ou de latito na direção ENE dentro do monzonito. Na parte inferior, camadas de pelito são parcialmente deslocados pelas falhas NE. O perfil BB' é um corte EW da área de Tajo, visando a N. Na parte leste, encosta do cerro Condorsayana, as unidades de calcário e pelito são deslocadas por falhas de orientação ~NS, de movimento normal com rejeitos >50m. Na parte central, falhas de orientação NE com mergulhos fortes a NW e as falhas NW com mergulhos >60°NE deslocam o escarnito e o monzonito. As falhas NE no monzonito mergulham para SE. O perfil CC' é um corte obliquo NE – SW, da área sudoeste de Chabuca, com visada para NW. Do extremo SW à parte central do perfil, o intrusivo de diorito adquire a forma do sinclinal do calcário (Soleira). Falhas NNE (~NS) de mergulhos fortes E deslocam o calcário com rejeitos <20m. Falhas NNE de mergulhos fortes S controlam as intrusões de monzonito. Entre a parte central e o extremo NE, o calcário forma um anticlinal menor com eixo paralelo ao sinclinal (NW), cuja charneira é afetada pela conjunção de Falhas ~NE e fraturas ~EW, finalmente no extremo NE o contacto do corpo de monzonito e calcário forma corpos alongados de escarnito de mergulho forte SW.

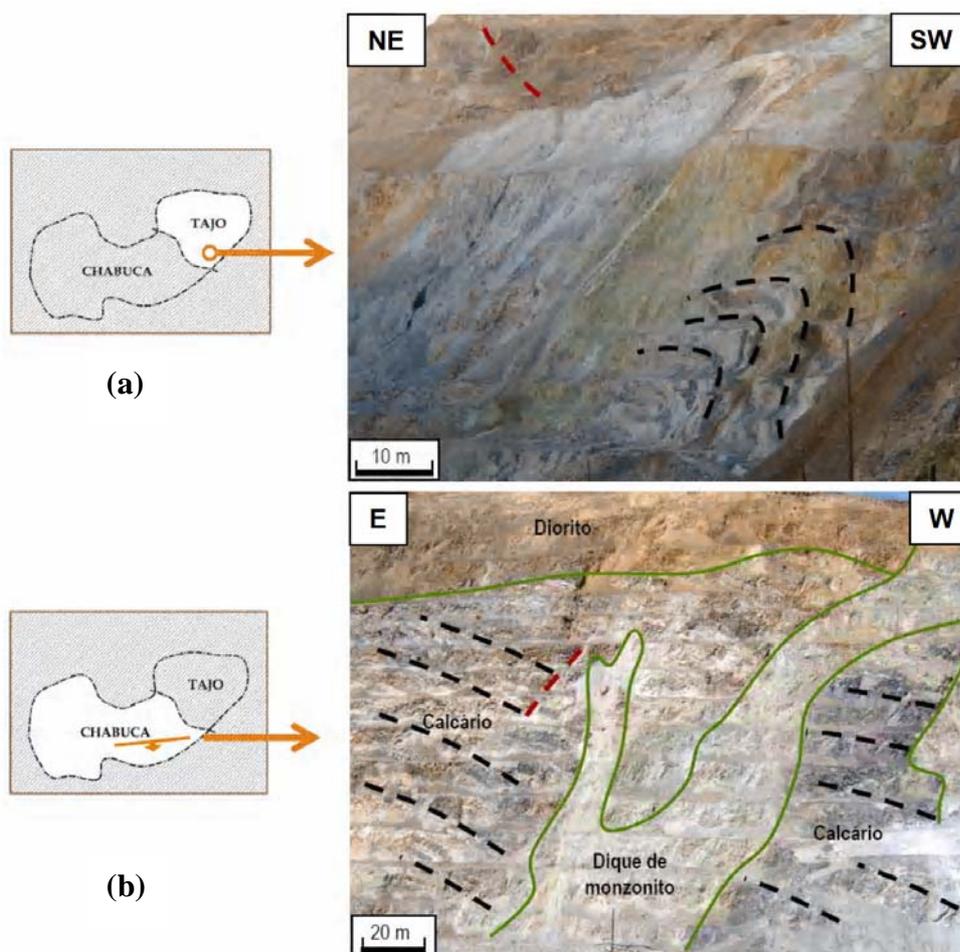


**Figura 3.25:** Vista da área norte de Tajo (a). Os traços em vermelho indicam algumas superfícies de falhas NE e NW subverticais que cortam o monzonito, na parte superior destaca a cobertura quaternária. Visada da área de Chabuca (b) ilustrando a disposição dos principais litotipos, o diorito no extremo superior sul repousando sobre o calcário, e monzonito no extremo norte (traço de pontos amarelos representam o nível topográfico). Visada em direção NW do extremo oeste da área de Chabuca, mostrando (c) o contacto aproximado do calcário com o monzonito. Notar que os quadrinhos da esquerda correspondem à Fig. 3.23.

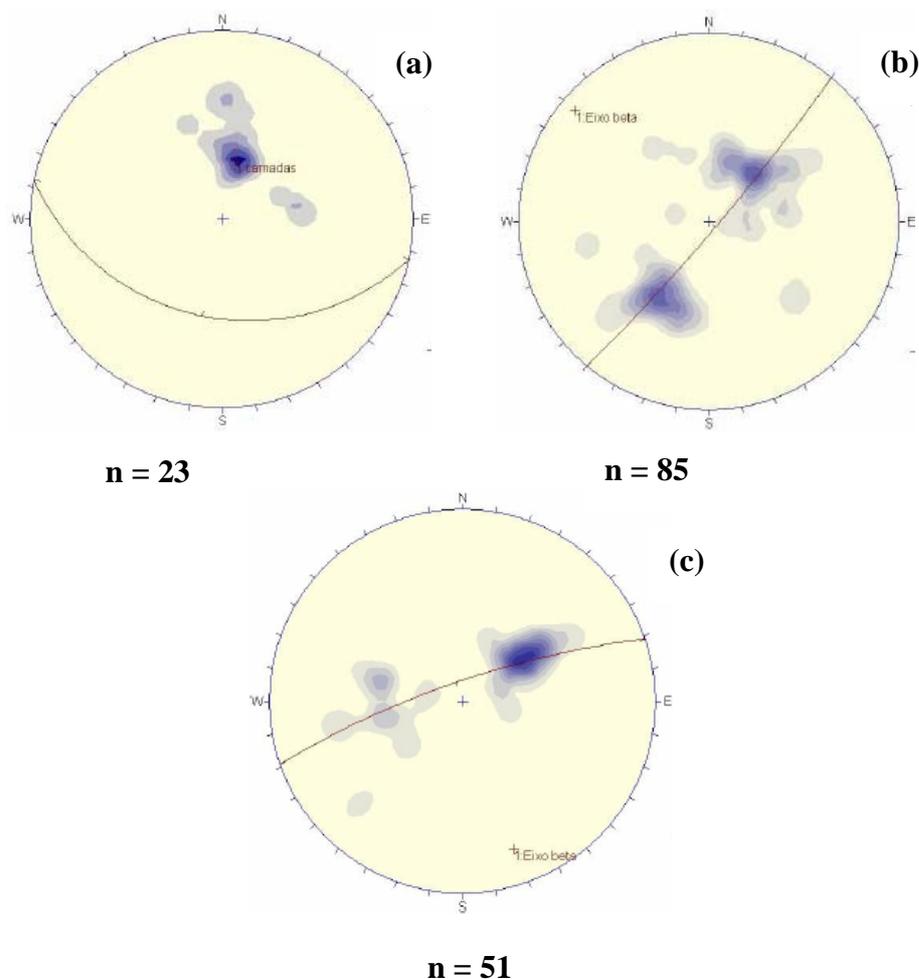
**DOBRAS**

Nas áreas oeste e sul de Tajo, os mapeamentos anteriores (Departamento de Geologia de Tintaya, 1995 - 2001) indicam a existência de dobras decamétricas fechadas de eixos ~EW ( $100^{\circ}$  –  $080^{\circ}$ ) de caimento suave para W, que ocorrem segmentadas por falhas de orientação NE, NNW. Atualmente, as dobras são pouco visíveis, pois já erodidas pela atividade da mineração. (Fig. 3.26a)

Na área sudeste de Chabuca, as camadas de calcários apresentam uma atitude média EW – WNW ( $35/192$ ) sem dobramentos, que são deslocadas por sistemas de falhas NE (Fig. 3.26b e Fig. 3.27a). No extremo sudoeste de Chabuca, as camadas definem um sinclinal aberto simétrico de amplitude ~500m com eixo 310/05, sendo a charneira da dobra ausente, onde ocorre o diorito concordante com as camadas, assemelhando-se a uma soleira (Perfil CC' na Fig. 3.24 e Fig. 3.27b). No norte do sinclinal, a noroeste de Chabuca, ocorre um anticlinal pouco definido de eixo 161/12, de amplitude <100m (Perfil CC' na Fig. 3.24 e Fig. 3.27c).



**Figura 3.26:** Vista da área sul de Tajo (a), expondo na parte inferior dobras decamétricas no calcário com assimetria para SSW, cujos eixos têm orientação ~EW de caimento suave W. Estas dobras também ocorrem na parte central do corpo intrusivo de monzonito (cor cinza claro) e na parte superior do calcário com o traço da falha Tito >90m. Visada da área de Chabuca (b), indicando a atitude das camadas de calcário com traços pretos, uma falha de orientação NE em traço vermelho e o contacto aproximado com um dique de monzonito com linha verde (rocha de cor cinza claro). Notar que os quadros da esquerda correspondem à Fig. 3.23.



**Figura 3.27:** Estereogramas ilustrativos de: Camadas na área sudeste de Chabuca com atitude média (35/192) (a). Sinclinal com eixo 310/05 localizado no extremo sudoeste de Chabuca (b). Anticlinal pouco definido de eixo 161/12, localizado a noroeste de Chabuca (c).

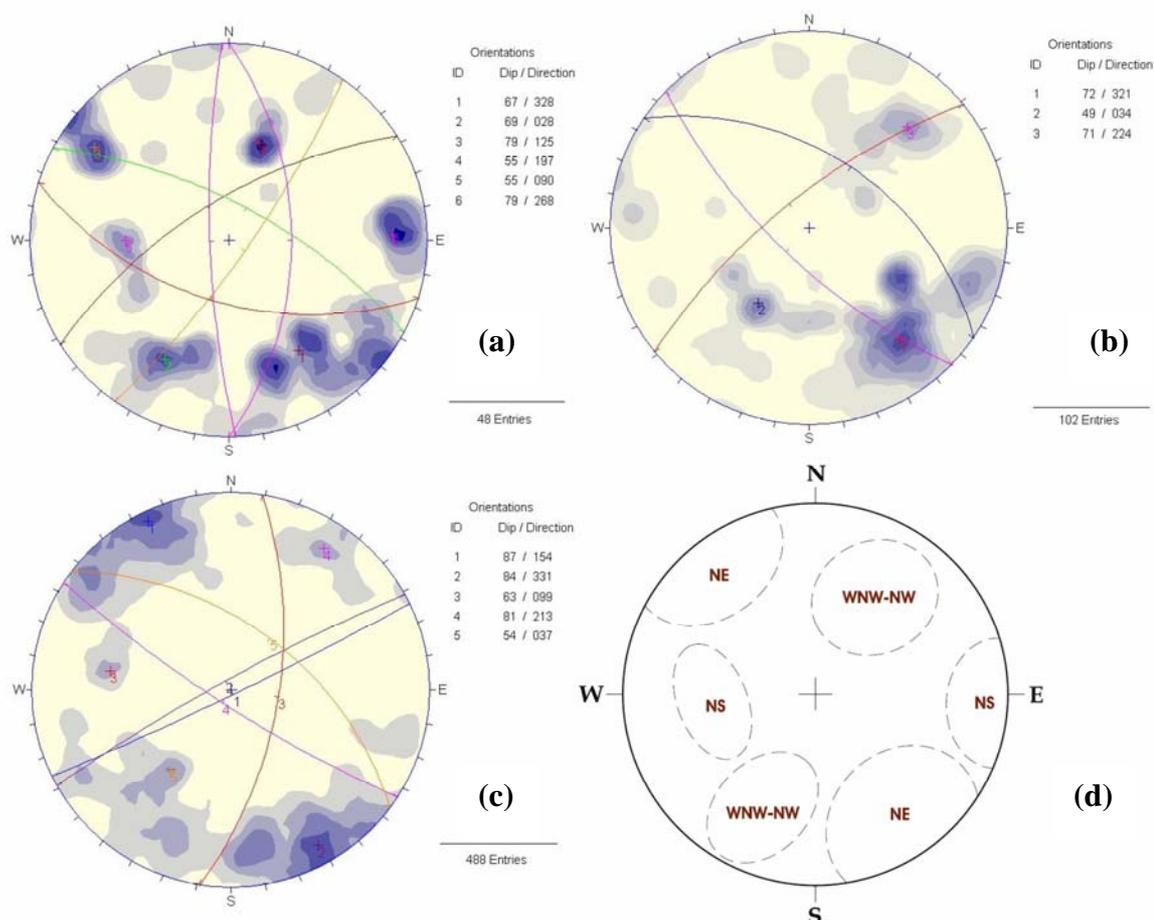
### **FALHAS**

Na mineração as falhas ocorrem em diversas orientações cortando quase todas as unidades e controlando as intrusões de diques posteriores à colocação do corpo principal de monzonito (Fig. 3.28). Contudo, as falhas podem ser agrupadas em dois sistemas dominantes (NE e NW – NNW) e um sistema disperso (~NS).

O sistema de falhas NE (~N60E) é dominante nas áreas norte e leste de Tajo, corta o monzonito, e também alguns corpos de escarnito, controla as intrusões de latito e andesito, e desloca os calcários. O sistema tem mergulhos fortes ( $>70^\circ$ ) e atinge um espaçamento entre 30 a 50 m.

O sistema de falhas NW – NNW ocorre tanto no leste de Chabuca como no sudeste de Tajo, cortando principalmente o monzonito, os diques posteriores (Pm2), calcário e diorito. As falhas mergulham entre  $50^\circ$  e  $70^\circ$ , nas direções NE ou SE, formando às vezes um par conjugado.

O sistema de falhas NS ocorre tanto no leste de Chabuca como no norte de Tajo cortando o monzonito, o diorito, os diques posteriores (Pm2), e os sistemas de falhas NE e NW – NNW. Seus mergulhos entre 55° e 90° nas direções leste ou oeste.

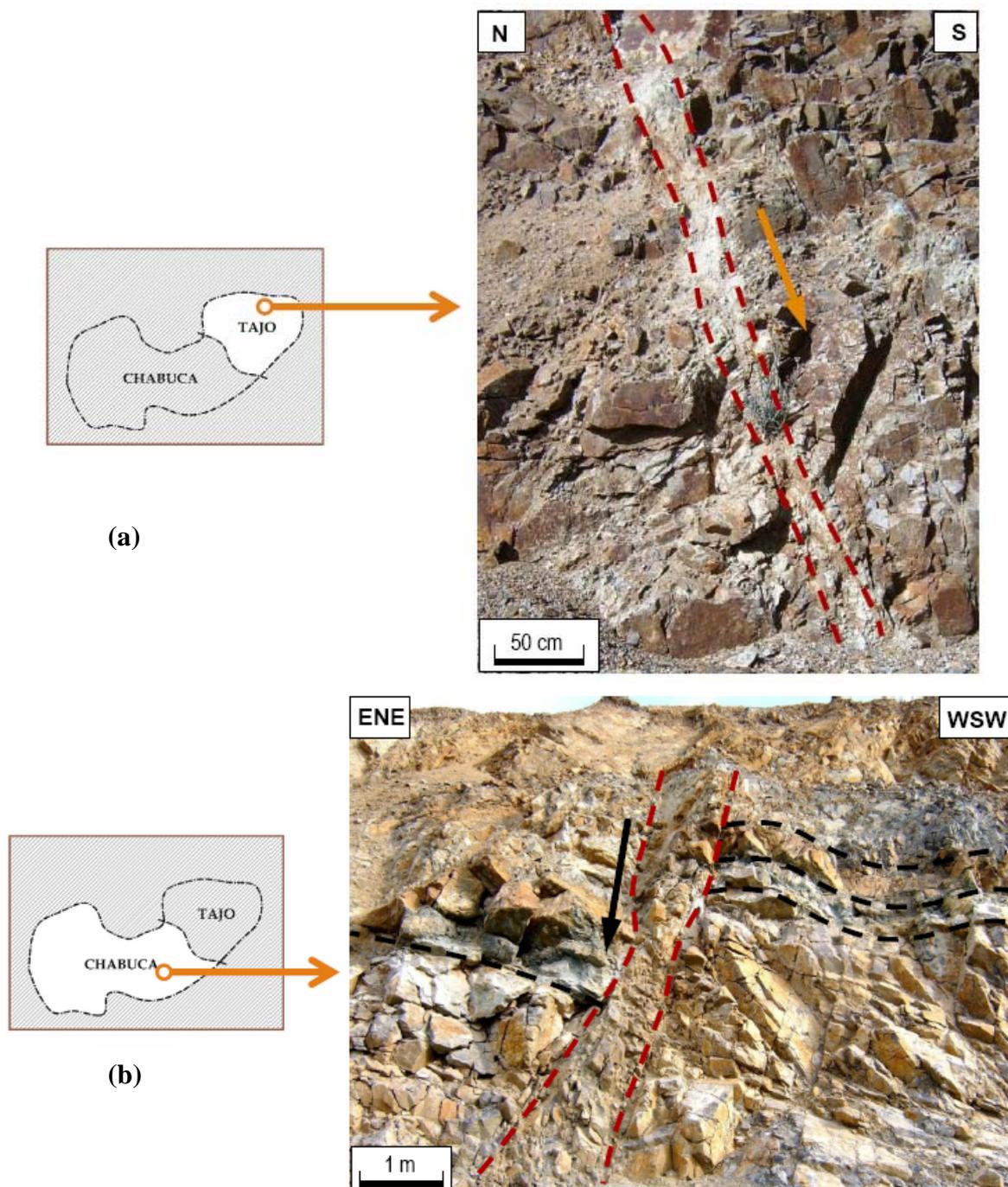


**Figura 3.28:** Estereogramas ilustrando a ocorrência dos sistemas de falhas nos litotipos hornblenda diorito (a), calcário (b) e monzonito (c). Diagrama explicativo dos sistemas de falhas (d). Notar que o sistema NE destaca-se em todos os litotipos, seguido pela família de falhas NW, enquanto as falhas NS parecem definir-se melhor no diorito.

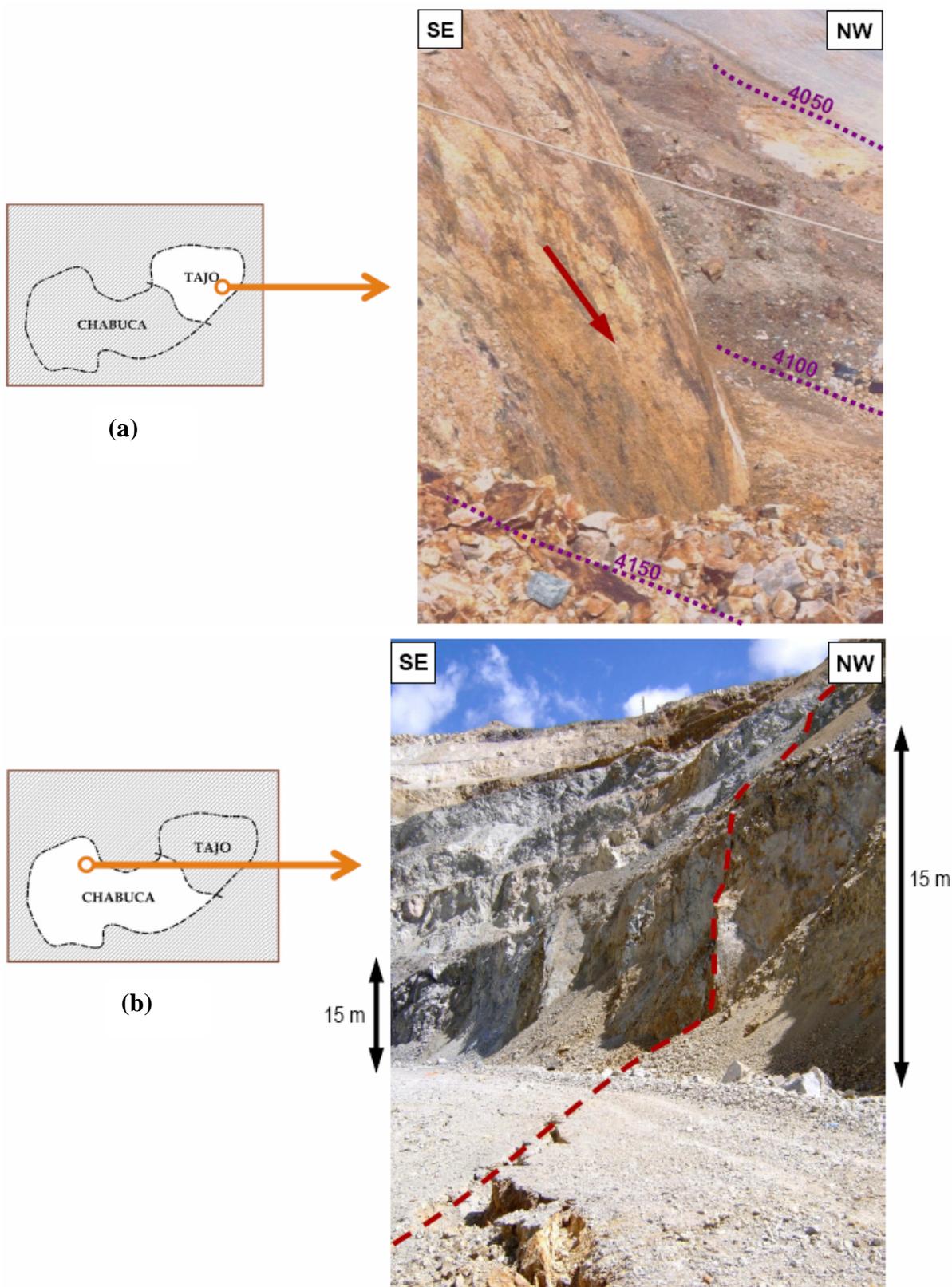
Todos os sistemas de falhas expõem características similares, com superficiais planas suaves ou ligeiramente onduladas, e estrias pouco evidentes, preenchimentos medianamente densos compostos por fragmentos angulosos de rocha triturada, areia fina, alguma quantidade de argila, e às vezes quartzo arredondado no monzonito ou carbonatos no calcário (Fig.3.29). As espessuras dos preenchimentos são em geral ~50 cm, no entanto, existem algumas falhas com preenchimento >1m de espessura.

Os movimentos das falhas nem sempre são evidentes. As estrias observadas indicam uma ativação recente de extensão regional, não sendo possível distinguir os movimentos anteriores, predominando falhas com movimentos normais oblíquos e ausência de movimentos inversos. Similarmente, os rejeitos são variáveis e pouco conhecidos. As falhas NE no calcário têm rejeitos ~10 m e localmente as falhas NW têm rejeitos ~5m.

A determinação da persistência dos sistemas de falhas é afetada pela escala de observação. Dentro da mineração as falhas podem ser comparadas com a altura das bancadas que é de 15m. Utilizando fotos panorâmicas a estimativa é  $>15\text{m}$  ou utilizando-se de fotos aéreas a resolução aumenta por centenas de metros (Fig. 3.30). Nas fotos aéreas existem três falhas de orientação NE com traços  $>1,5\text{ km}$  (Falhas Condorsayana, Tito e Tajo), uma falha NNW com traço  $\sim 0,8\text{ km}$  no oeste de Chabuca, e traços  $\sim \text{NS}$  de  $1\text{ km}$  (e.g. encosta oeste do cerro Huancaruma e o rio Tintaya).



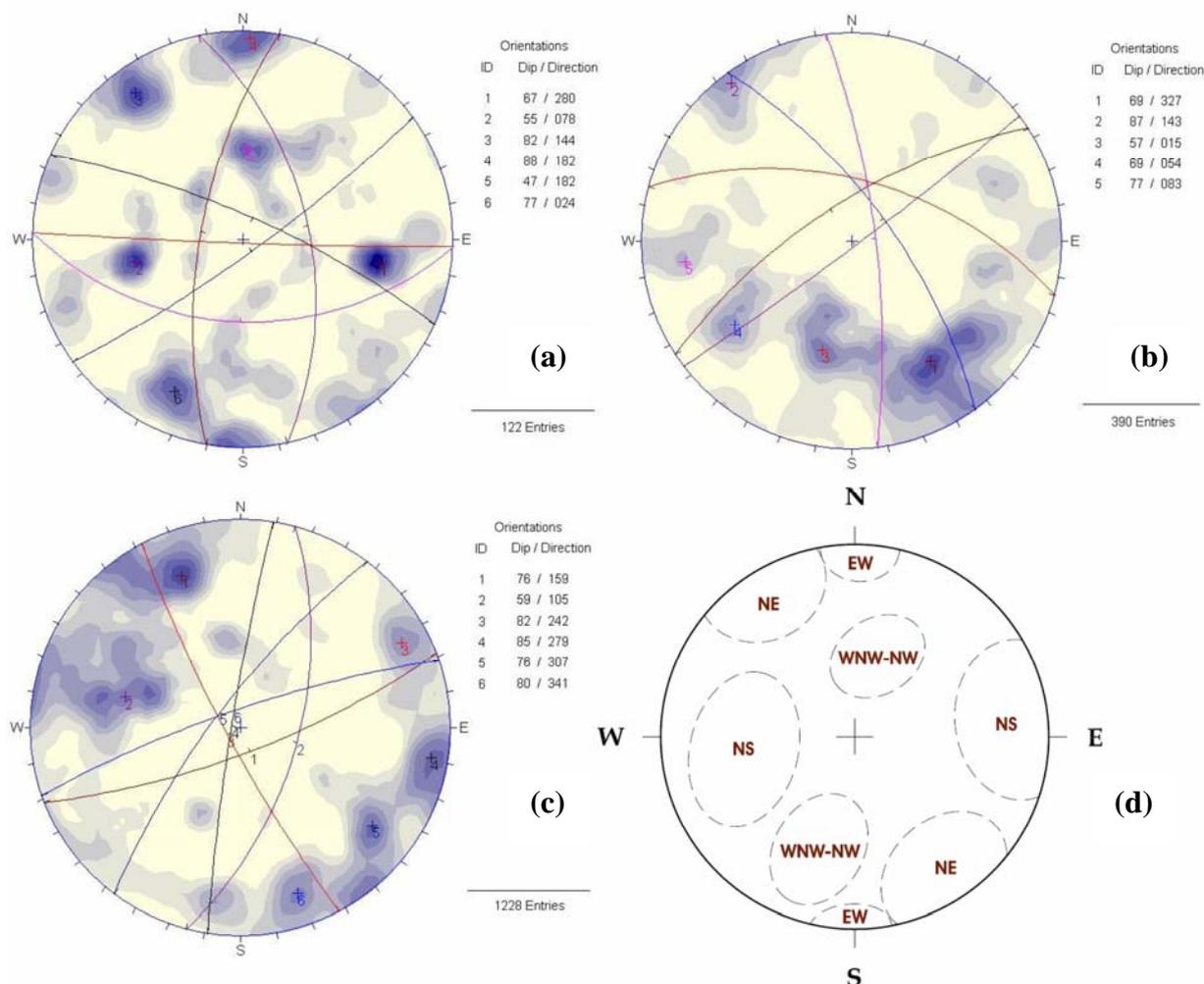
**Figura 3.29:** Falha de atitude 83/325 em monzonito intemperizado localizada na coordenada 251790 E, 8351796 N, expondo um traço  $\sim 30\text{m}$ , 25cm de preenchimento composto de argila, rocha triturada e óxidos de ferro (a). Falha em calcário de atitude 73/080, localizada em 250983 E, 8350693 N expondo um traço  $\sim 30\text{m}$  e uma espessura de preenchimento de  $\sim 1\text{m}$  composto de rocha triturada (calcário) e argila (b). Notar que os quadrinhos da esquerda correspondem à Fig. 3.23.



**Figura 3.30:** Visada para a superfície plana da falha Tito, em monzonito, com atitude 78/310 (a), observada na coordenada 251923 E, 8351796 N. Na fotografia os traços descontínuos indicam os níveis topográficos, permitindo estimar um traço >50m. Falha de atitude média 78/207 em monzonito (b), localizada na coordenada 250103 E, 8351271 N. Na fotografia o traço descontínuo indica a projeção da falha em vários níveis, atingindo um traço >60m. A espessura de preenchimento tem 40cm com rocha triturada e argila. Notar que os quadrinhos da esquerda correspondem à Fig. 3.23.

**JUNTAS**

As juntas ocorrem em sistemas subverticais similares às falhas e em geral são de difícil distinção, devido à ocorrência de dispersão. As juntas podem ser simplificadas aos sistemas NE, NW – NNW, ~NS e ~EW (Fig.3.31), caracterizados por espaçamentos variáveis e persistências que podem obedecer a uma distribuição exponencial ou lognormal (Fig. 3.32). No entanto, a descrição das características das famílias de juntas, é feita pelos seus valores médios.



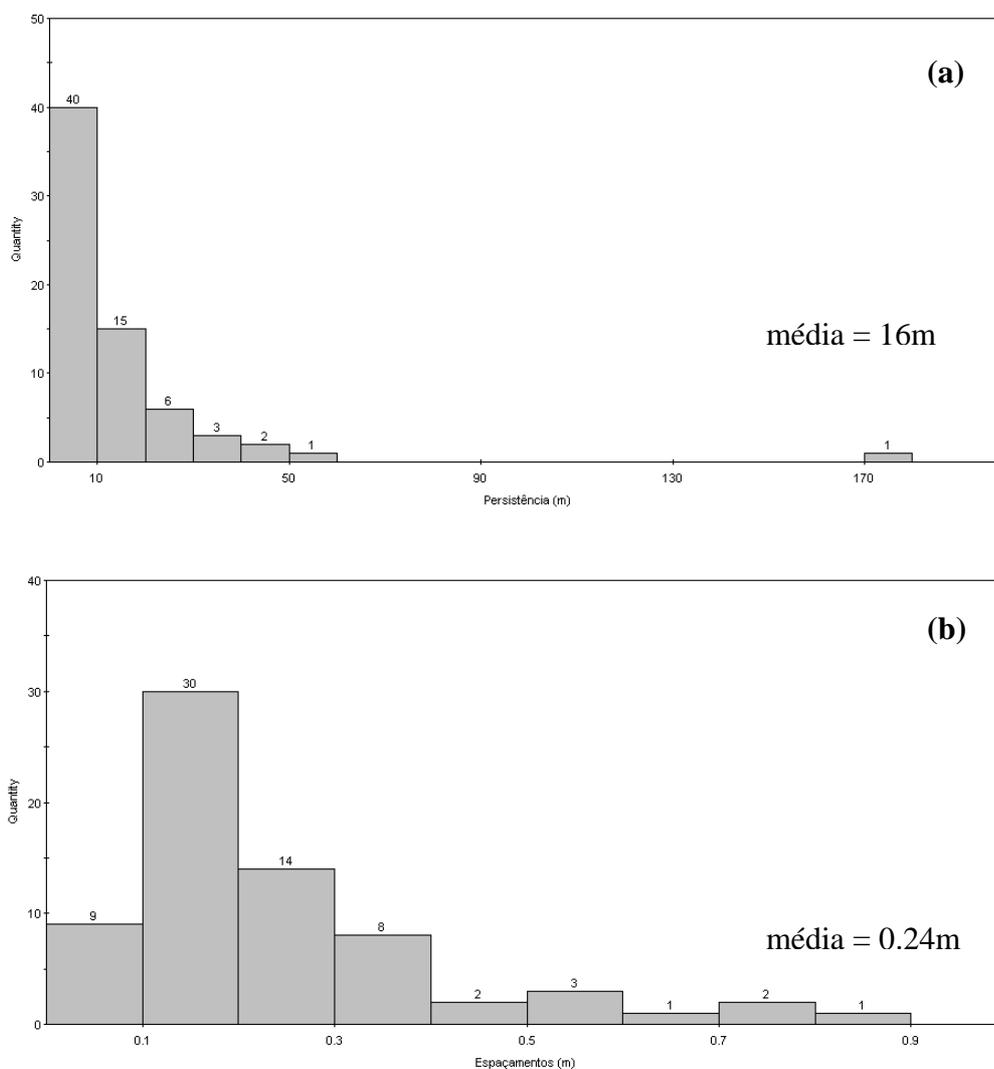
**Figura 3.31:** Estereogramas ilustrando a ocorrência das famílias de juntas nos litotipos horblenda diorito (a), calcário (b) e monzonito (c). Diagrama explicativo das famílias de juntas (d). Destacando a dispersão na orientação das juntas que evita a distinção dos sistemas. Com tudo é claro que a família NE ocorre em todos os litotipos e a existência de uma família de juntas ~EW no diorito e monzonito.

O sistema NE é o mais definido e presente em todas as unidades litológicas, e ocorre com persistências médias ~15m e espaçamentos no calcário entre 0,2 e 0,3m. No monzonito ocorre entre 0,1 e 0,2m. As superfícies são planas e ligeiramente rugosas no monzonito, e suaves planas no calcário.

O sistema NW é mais definido no calcário que no monzonito e quase ausente no horblenda diorito, com persistências médias ~15m e espaçamentos variáveis no monzonito, entre 0,18 e 0.4m e no calcário entre 0,13 e 0,23. As superfícies das juntas em ambos os litotipos são suaves e planas.

O sistema NS, ocorre mais frequentemente no monzonito e no horblenda diorito, sendo quase ausente no calcário, com persistências ~20 m, e espaçamentos similares entre 0,1 e 0,2 m. As superfícies são em geral planas a ligeiramente rugosas.

O sistema EW é variável mudando às vezes para WNW ou ENE e ocorre em todos os litotipos, com persistências médias entre 14 e 17m e espaçamentos no calcário entre 0,16 e 0,2m, no monzonito entre 0,25 e 0,3 m e no diorito entre 0,25 e 0,4m. As superfícies são planas suaves nos calcários e ligeiramente rugosas no monzonito.



**Figura 3.32:** Histograma da persistência em metros (comprimento do traço) da família de juntas NE em monzonito (a). Histograma do espaçamento da família de juntas ~NS em monzonito (b).

## **DIQUES**

Os diques ocorrem preenchendo zonas de fraturas (falhas ou juntas) com rochas ígneas de composição similar ao corpo de quartzo monzonito ou do diorito (vide no capítulo 2), constituindo estruturas tabulares subverticais de espessuras >20 m e comprimentos próximos a 500m. A cronologia dos diques foi determinada por critérios de campo utilizando-se da regra das intersecções relativas das estruturas (Loring, 2000). Sendo os diques de quartzo monzonito relativamente mais antigos e subdivididos cronologicamente de mais velho a mais novo em três famílias, denominadas de Pm1, Pm2, Pm3, e os diques mais novos em ordem cronológico de latito, andesito e diorito pórfiro (Fig.3.23a). Em geral os diques se alinham em direção NE, ~EW e NW, conforme se detalha a seguir:

- Diques de quartzo monzonito (PM1) de direção NE cortam os calcários e os corpos de diorito no extremo sudoeste de Chabuca.
- Diques de quartzo monzonito (PM2) encontram-se alinhados EW, na área nordeste de Chabuca.
- Diques de quartzo monzonito (PM3) alinham-se próximos de EW, na área de Tajo e próximos a NE no extremo oeste de Chabuca.
- Diques de latito têm orientações EW em Tajo e NE ou NS em Chabuca, e são deslocados por falhas NS na área de Tajo.
- Diques de andesito têm orientações NE na área de Tajo e WNW em Chabuca, e são algumas vezes deslocados por falhas NW com movimento normal dextral.
- Diques de diorito pórfiro têm orientações NE.

## **3.5 EVOLUÇÃO ESTRUTURAL**

A análise estrutural permite elaborar uma interpretação evolutiva com base nas evidências estruturais observadas tanto na área do Distrito, quanto dentro da mina Tintaya. A evolução das estruturas é apresentada como fases de deformação, utilizando-se a notação  $D_1$ ,  $D_2$ , ...,  $D_n$  para indicar a seqüência de fases de mais antiga para mais nova, descritas a seguir:

**Fase  $D_1$ .** Primeiro pulso compressivo gerando dobramentos progressivos de eixos regionais NW a NNW. Fase caracterizada por dobras regionais quilométricas e parasíticas de 2° e 3° ordens decamétricas e métricas, que mostram polaridade de deformação para NNE e NE. Há diminuição paulatina do mergulho das superfícies axiais de SW para NE. A vergência para NE é determinada pelas dobras assimétricas na área central do Distrito, gerando na sua porção NE dobras de propagação de falhas semi-recumbentes a cavalgamentos. Não há evidências de interferência de dobras, o que leva a interpretação de uma deformação progressiva, e um corredor de transporte tectônico com pequeno ângulo de dispersão das tensões (~25°),  $\sigma_1$  variando entre NNE e NE e formando um trem contínuo de dobras. (Fig.3.33a).

**Fase D<sub>2</sub>.** Fase distensiva com localização do corpo diorítico de Tintaya entre o Eoceno Médio e Oligoceno Superior. Uma fase muito provavelmente relacionada à mudança de regime de convergência da placa de Nazca, causa uma distensão no local do Distrito mineiro de Tintaya, estabelecendo um regime de zonas de cisalhamento com componente tracional (regime transtraccional), que aloja o batólito de Abancay, numa orientação que hoje é próxima de ~NS. A atividade magmática gerou corpos ígneos menores, dentro os quais o corpo intrusivo de composição diorítica de Tintaya, com tendência estrutural ~NS – NNW (Fig.3.33b).

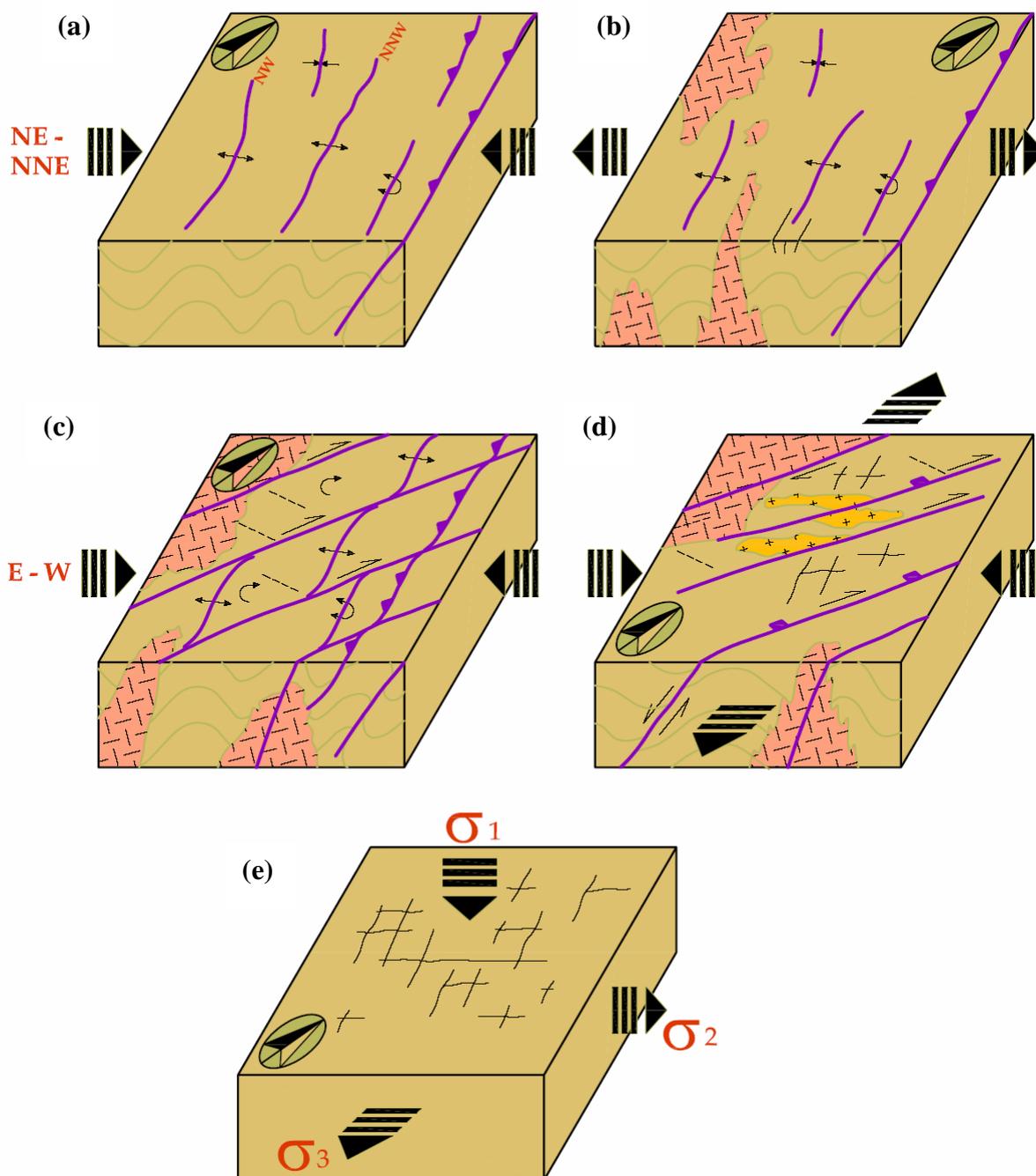
**Fase D<sub>3</sub>.** Segundo pulso compressivo com geração de zonas de cisalhamento (ZC) NE. Um novo pulso compressivo deu início à geração de zonas de cisalhamento regionais subparalelas no Distrito de Tintaya, fazendo com que contactos das unidades cretáceas e do corpo intrusivo diorítico fossem deslocados. O subparalelismo das zonas de cisalhamento rotacionou destralmente estruturas anteriores principalmente os eixos de dobras e foliações associadas, fazendo com que houvesse arrasto em porções justapostas às zonas de cisalhamento. Alguns eixos de dobras se reposicionaram ~NS, gerando dobras medianamente abertas, pouco assimétricas como as de Alto Huancane, no extremo norte do Distrito. Devido a rotação dos eixos das dobras, formaram-se sigmóides nos blocos de cisalhamento, principalmente naqueles próximos ao contacto corpo intrusivo – calcário encaixante. Na região do cerro Ccatum Ccoyme, a rotação é menos intensa entre as falhas mais espaçadas NE a ENE, em quartzo – arenito. A compressão máxima  $\sigma_1$  é ~EW, gerando zonas de cisalhamento de rejeito direcional predominantemente NE, com raros pares conjugados NW a WNW (Fig.3.33c).

**Fase D<sub>4</sub>.** Magmatismo monzonítico, geração de estruturas rúpteis e ativação de falhas (Neogeno – Quaternário).

Os veios preenchidos de calcita têm orientação EW – WNW – ENE e registram um regime de extensão NS que poderia ser concomitante a uma fase de compressão EW. Os corpos intrusivos de monzonito e os diques associados expressam o mesmo regime, durante o qual as falhas são reativadas e alguns sistemas de juntas subparalelos às falhas são desenvolvidos, condicionando a intrusão dos diques (Fig. 3.33 d). Uma deformação plástica localizada no calcário é produzida pela ascensão do magma monzonítico, desenvolvendo dobras assimétricas decamétricas de eixos sub-horizontais ~EW.

Os sistemas de juntas NS ou EW parecem expressar um conjunto de juntas ortogonais desenvolvido num regime distensivo (Fig.3.33f) concomitante ou tardi – cinemático à intrusão de diques tardios. A tensão máxima  $\sigma_1$  seria vertical, sendo que as tensões intermediária e mínima localizam-se no plano horizontal, concordando com os estudos de neotectônica realizados no extremo sul de Perú (Jaillard, 2000).

Esta última deformação é importante para o presente estudo, pois as estruturas rúpteis são na maioria as que controlam os problemas de instabilidade de taludes da mina, dificultando a extração do minério de cobre de Tintaya. Por consequência, no seguinte capítulo a caracterizo geomecânicamente as estruturas rúpteis no interior da mina e outras superfícies de fraqueza, tais como as camadas de calcário.



**Figura 3.33:** Bloco - diagramas ilustrando a evolução estrutural do Distrito Mineiro de Tintaya. Primeiro pulso compressivo de dobramentos progressivos de eixos regionais NW a NNW (a). Fase distensiva, com localização do corpo diorítico de Tintaya (b). Segundo pulso compressivo, com geração de zonas de cisalhamento (ZC) NE (c). Magmatismo monzonítico e ativação de falhas (d) e geração de juntas ortogonais neotectônicas(e).

# *Geologia Geral*

---

O capítulo é dividido em três partes, a primeira é uma sinopse introdutória da geologia do Perú, a segunda parte é uma síntese da geologia regional ligada à área de estudo e a terceira é um apanhado da geologia do Distrito Tintaya. As duas primeiras partes estão baseadas na Carta Geologia Nacional do Perú, e a última é baseada nos trabalhos realizados por consultores contratados pela mina Tintaya.

## **2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO DO PERU**

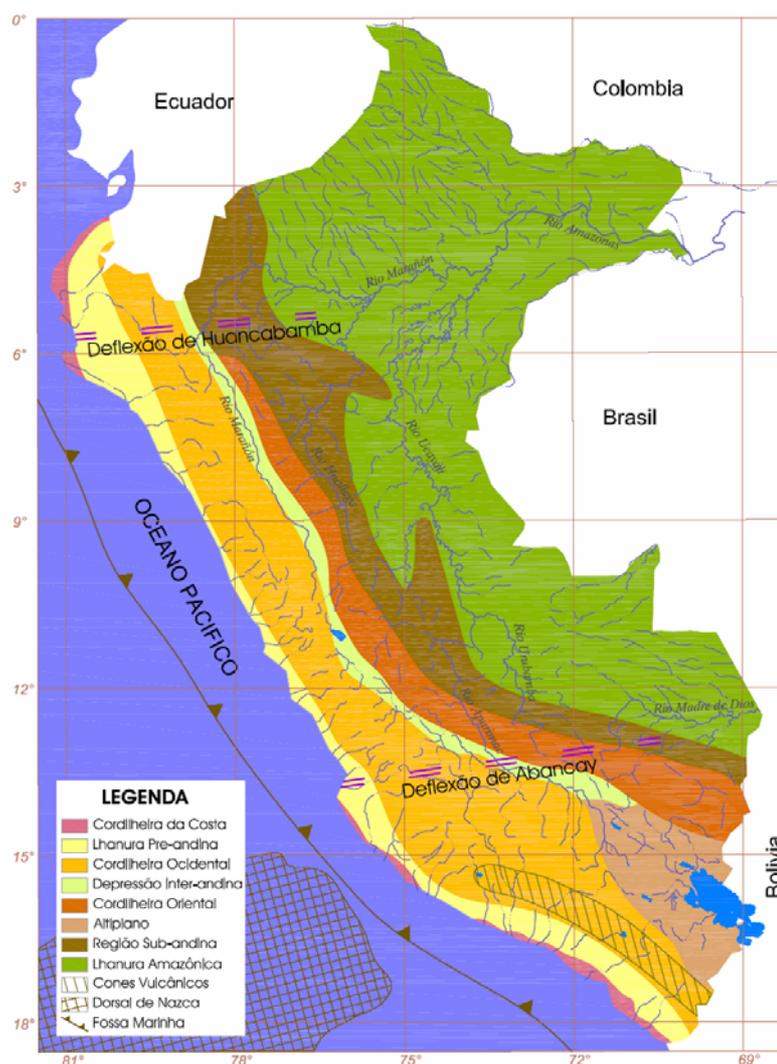
O relevo do território peruano é o fruto de sucessivos ciclos orogênicos que compreendem várias etapas de sedimentação, deformação, soerguimento e finalmente de erosão e peneplanização. Assim, o território está formado por uma ampla seqüência de rochas sedimentares, vulcânicas e metamórficas, cortadas por importantes corpos plutônicos. As idades das rochas abrangem o período Pré-cambriano até o Quaternário recente, sendo que as rochas pré-cambrianas constituem o embasamento.

O território peruano está subdividido em oito unidades geomorfológicas, partindo da Cordilheira da Costa até a Planície Amazônica (Fig. 2.1), destacando entre elas as Cordilheiras Ocidental e Oriental, por serem os traços orográficos mais proeminentes do Perú (Chacón, 1995).

No dizer de Palácios (1995, p. 16), os ciclos orogênicos das rochas pré-cambrianas são pouco conhecidos, uma vez que as deformações das rochas paleozóicas são atribuídas a uma Orogenia Caledoniana no norte do Perú e a uma Orogenia Herciniana na Cordilheira Oriental do centro e

sul do Perú. Esta última orogenia inclui as fases Eo-herciniana (350 Ma), Tardi-herciniana (290 – 265 Ma) e Fini-herciniana (250 Ma). O Ciclo Andino é reconhecido nas rochas mesozóicas e cenozóicas incluindo múltiplas etapas de sedimentação e as fases de deformação: Peruana (80 Ma), Incaica (35 – 30 Ma), Aymara (28 – 26 Ma) e pelo menos três fases Quéchuas (17 – 5 Ma).

As deformações andinas atuais são evidenciadas pela atividade sísmica, resultante da subducção da Placa de Nazca sob a Placa Sul-Americana iniciada entre o Triássico Médio e Jurássico Inferior, sendo, por sua vez, precursora do desenvolvimento dos principais elementos estruturais dos Andes peruanos, como: dobras, falhas, alinhamento de corpos ígneos e cones vulcânicos com uma orientação geral NW – SE. No entanto, há duas mudanças de orientação na cordilheira andina conhecidas no Peru como *deflexões*, que seriam resultados da tectônica Herciniana (340-230 Ma): a Deflexão de Huancabamba aos 6° latitude sul, onde os Andes mudam para orientação N, e a Deflexão de Abancay a 14° latitude sul, onde a cordilheira arqueia na direção E – W para logo voltar à direção NW – SE (Fig. 2.1).



**Figura 2.1:** Unidades geomorfológicas do Perú mostrando as deflexões de Abancay e Huancabamba (modificado de INGEMMET, 1995).



Ma	ERA	PERIODO	UNIDADES	ESPESS. (m)	COLONA	DESCRIÇÃO DE LITOLIPOS			
1.6	CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	Holoc.	Depósitos recentes	30 - 80		Conglomerados, clastos, grânulos, areias e argilas		
			Pleistoceno	Fm. Yauri	230		Sedimentos lacustres não consolidados compostos por conglomerados, areias, argilas, lamias, tufos e localmente por diatomáceas de água doce.		
				Fm. Casa Blanca	170		Conglomerados com siltes e argilas vermelhas com alguns tufos.		
		NEOGENO	Plioceno	Grupo Barroso	310		Fase explosiva (Formação Huaycha) composta por tufos dacíticos e riolíticos, e fase eruptiva (Formação Casanuma) constituída por lavas de andesitos. Datadas com K-Ar, Kaneoka e Guevara, 1984.		
				Grupo Palca	100		Tufos, arenitos arcossianos e piroclastos branco-amarelo		
		PALEOGENO	Oligoceno	Grupo Tacaza	700		Fluxos vulcânicos de andesitos e dacitos, tufos de composição riolítica e alguns sedimentos tufaceos lacustres. Aflora no cuadrangulo de Condorama. Datadas com K-Ar Noble 1974.		
				Eoceno	Grupo Puno	500 - 1600		Arenitos arcossianos feldespaticas, conglomerados, clastos de origem fluvial.	
			Paleoceno						
		65	MESOZÓICO	CRETÁCEO	Superior	Fm. Arcurquina (Fm. Ferrobamba)	300 - 800		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Camadas de calcários maciço e abundante, nódulos de silixtito</li> <li>• Marga brechada e calcários maciço com nódulos de silixtito</li> <li>• Camadas macicas de calcários micríticos</li> <li>• Discordância angular de baixo ângulo com a Formação Mara</li> </ul>
						Médio	Fm. Murco Fm. (Mara)	480	
Inferior	Fm. Hualhuani (Fm. Soraya)				800 - 1000		Bancos de quartzo, arenitos amarelos de granulação fina arredondados. Intercalações locais de pelitos pretos e arenitos cinzas.		
JURÁSSICO	Fm. Vellille (Fm. Cachios)			600		Arenitos cinzas, intercalados com lutitos pretos. É correlacionado com a Formação Cachios (Jurássico Superior). Aflora nos quadrângulos de Coylloma e Condorama.			
260	PALEOZÓICO			PERMIANO	Superior	Grupo Mitu	710		Seqüência vulcano - sedimentar, composta de lavas andesíticas e camadas grossas de arenitos arcossianos de grão fino a medio. A unidade apresenta uma cor vermelha. Tem discordância erosional com o Grupo Copacabana. Datadas com K-Ar, Kontak, 1985.
		Inferior	Grupo Copacabana			425		Calcários micríticos fossilíferos em camadas grossas. Datados por paleontologia, Newell 1953	

**Figura 2.3:** Coluna estratigráfica regional correspondente à área mostrada no mapa da Fig.2.2. (modificado de: Palácios, et.al., 1995).

## **2.2 GEOLOGIA REGIONAL**

### **2.2.1 HISTORIA GEOLÓGICA E ESTRATIGRAFIA**

Num contexto regional, as rochas mais antigas e próximas à área de pesquisa, correspondem à seqüência de calcários do Grupo Copacabana do Permiano Inferior, seqüência que foi depositada num ambiente de transgressão marinha e paulatina regressão do mar. O Grupo Copacabana aflora na Cordilheira Oriental a 48 km ao NNE da área de estudo.

Ao final do Permiano Inferior, a fase Tardi-herciniana produz o desenvolvimento da Deflexão de Abancay (Marocco, 1978) e na Cordilheira Oriental gera dobras e falhas inversas de direção NW – SE, nas rochas do Carbonífero e Permiano Inferior. A conseguinte regressão do mar provoca erosão e acumulação de molassas vermelhas continentais, que se depositam durante o Permiano Superior, com discordância angular sobre Permiano Inferior. O regime de distensão da fase Fim-herciniana ativa os blocos falhados da fase Tardiherciniana, gerando falhas transversais de orientação ENE – WSW, fato que é concomitante ao início de um vulcanismo que continua até inícios do Mesozóico na Cordilheira Oriental. Tais episódios originam as seqüências vulcano-sedimentares do Permiano Superior até Triássico, que formam o Grupo Mitu no quadrângulo de Sicuani, expostas na localidade de Langui – Layo a 22 km ao ENE da área de estudo (Audebaud, E. 1973).

O início da subducção entre o Triássico Médio e Jurássico Inferior dá origem ao Ciclo Andino, começando com um primeiro período de extensa sedimentação marinha (Triássico Médio – Cretáceo Superior), prosseguindo um segundo período que inclui lapsos de deformações intercaladas com épocas sem deformação. Este segundo período abrange o Cretáceo Superior até a época atual (Palácios, 1995).

Durante o Mesozóico, são produzidos períodos de regressão e transgressão marinha que se iniciam no Triássico Médio, com ciclos de sedimentação condicionados ao paleo-relevo e aos movimentos de subsidência nas bacias, e terminam no Cretáceo Superior com a deformação compressiva da fase Peruana. Esses ciclos de sedimentação são evidenciados pelas intercalações de seqüências de arenitos, lutitos e calcários, entre o Jurássico e o Cretáceo. As seqüências de arenitos de idade Jurássica são representadas pela Formação Velille do Grupo Yura, que estão expostas a 35 km ao SW da área de estudo.

A deposição das rochas cretáceas se inicia com a Formação Hualhuani num ambiente regressivo (Cretáceo Inferior), continuando com a Formação Murco (Cretáceo Médio) num ambiente transgressivo e culmina com a Formação Arcurquina (Cretáceo Superior) durante uma paulatina regressão marinha. Estas seqüências cretáceas afloram na área de estudo (Zweng, 1996).

A fase tectônica compressiva ao final do Cretáceo (Fase Peruana) dá origem ao soergimento das seqüências sedimentares, formando amplos dobramentos e reativando e invertendo falhas de origem Herciniana, finalizando a sedimentação marinha e iniciando a sedimentação continental. No intervalo do Cretáceo Final e Paleoceno inicial, uma grande erosão origina a deposição de molassas vermelhas, que cobrem com discordância as rochas cretáceas. Os materiais vulcânicos piroclásticos presentes nas molassas, indicam que houve atividade vulcânica ao longo da Cordilheira Ocidental. As molassas depositadas no Altiplano formaram o Grupo Puno (Cretáceo Terminal – Terciário Inferior) que aflora a 16 km ao E da área de estudo (De La Cruz, N. 1995).

A convergência da Placa Farallón muda de N ou NNE a NE durante o Paleoceno Superior, originando elevação de áreas e incremento da deposição de molassas, que são fracamente deformadas no Eoceno Superior devido à fase tectônica compressiva Incaica (Jaillard, et al. 2000).

A atividade magmática durante o Eoceno Médio e Oligoceno no sul de Perú produz uma seqüência de stocks e estruturas sub-vulcânicas que originaram o Batólito de Abancay, o qual formou os depósitos minerais de escarnitos de ferro e cobre do Cinturão Andahuaylas – Yauri, seguido de um vulcanismo ativo que é representado pelo Grupo Tacaza (Jaillard, G. et al. 2000).

No Oligoceno Superior acontece a Fase Aymara (28 – 26 Ma) devido à quebra da Placa Farallón em Cocos e Nazca. Este fato muda a direção de convergência da subducção para EW. Após tal evento continua a atividade vulcânica do Grupo Tacaza, onde se registra uma fraca discordância atribuída à Fase Quéchuá 1 (17 – 15 Ma), deformação que causou dobras, inversão de falhas e elevação do território Peruano durante o Mioceno Médio. Ao final desta deformação, uma erosão forte forma o Altiplano a uma altitude de ~1000 m, que logo é sepultado em desconformidade pela intensa atividade vulcânica explosiva que gerou os Grupos Palca e Maure no Mioceno Superior. A distensão da fase Quéchuá 2 (9 – 8 Ma) reativou as falhas longitudinais profundas formando uma depressão localizada nos quadrângulos de Sicuani e Nuñoa (Jaillard, et al. 2000).

No intervalo do Mioceno Superior – Plioceno a tectônica compressiva da fase Quéchuá 3 (7 – 5 Ma) elevou os Andes e o Altiplano acima de ~4000 m. Ao mesmo tempo, a Cordilheira de Nazca inicia a sua subducção, provocando um regime de distensão e a atividade magmática que forma o arco vulcânico do Barroso, nas partes altas da Cordilheira Ocidental, e os estratos vulcânicos que se alinham em direção NNW. O Grupo Barroso encerra a seqüência vulcânica terciária da região Andina e aflora na parte SW da área de pesquisa. Ao final deste período, o regime de extensão permite o espessamento de seqüências lacustres que forma a Formação Casa Blanca, sobreposta ao Grupo Barroso (Palácios, 1995; Jaillard et al., 2000).

No Pleistoceno, continua o levantamento dos Andes e alguns derrames de lava do final do Terciário, produzem o represamento de rios formando extensos depósitos lacustres nas zonas andinas (Formação Yauri). Posteriormente, a glaciação afeta à região andina em etapas alternadas com climas quentes, formando depósitos de morenas sobre os depósitos lacustres. No fim do Pleistoceno e inícios do Holoceno, repetidos períodos de degelo provocam uma notável degradação do terreno pela ação glácio-fluvial, e formam novas lagoas sobre os vales. Finalmente, a ação dos rios produz acumulação de depósitos aluviais no Altiplano durante o Holoceno, constituindo os sedimentos Quaternários que formam a maior parte do relevo do Distrito de Tintaya (Lopez, 1996).

### **2.2.2 ROCHAS INTRUSIVAS DO BATÓLITO DE ABANCAY**

O Batólito forma o cinturão de Andahuaylas – Yauri com depósitos minerais de escarnito (Santa Cruz et al., 1979) e está localizado na parte central do Departamento de Apurímac, com uma orientação geral E-W, prolongando-se até a parte sul do departamento de Cusco com uma direção NS. Geralmente é composto por granodioritos leucocráticos de grão grosso até médio de composição cálcio-alcálico (Sanchez e León, 1995).

As intrusões cortam as estruturas andinas e atravessam as camadas vermelhas do Oligoceno (Grupo Puno). Entretanto, a datação pelo método K/Ar de outras intrusões análogas localizadas entre os quadrângulos de Sicuani e Ayaviri, atingem uma idade de Oligoceno Superior.

Os plutões localizados na área de estudo são atribuídos ao Batólito de Abancay e foram subdivididos contemplando a sua composição e a possível cronologia dos pulsos de magma em diorito, monzonito, latito e diorito porfirítico. (Zweng, 1996; Myers, 2001).

### **2.2.3 GEOLOGIA ESTRUTURAL**

As feições estruturais com influência regional (Fig. 2.2.), no entorno da área do Distrito Mineiro Tintaya são pouco conhecidas, e descritas como se mostra a seguir:

As feições estruturais são agrupadas em duas unidades. A primeira é a Bacia de Yura que se estende até Arequipa com seqüências sedimentares do Jurássico – Cretáceo cobertas por rochas vulcânicas terciárias que são perturbadas por intrusões ígneas, como em Tintaya. Nessa unidade são reconhecidos dois sistemas de falhas com orientação NW - SE e NE - SW e mergulhos  $> 70^\circ$ . A segunda unidade corresponde a uma faixa de rochas do Paleógeno, denominada como Alto de Yauri, onde se reconhecem dois sistemas de falhas com orientação NW – SE e ENE. (De La Cruz, 1995).

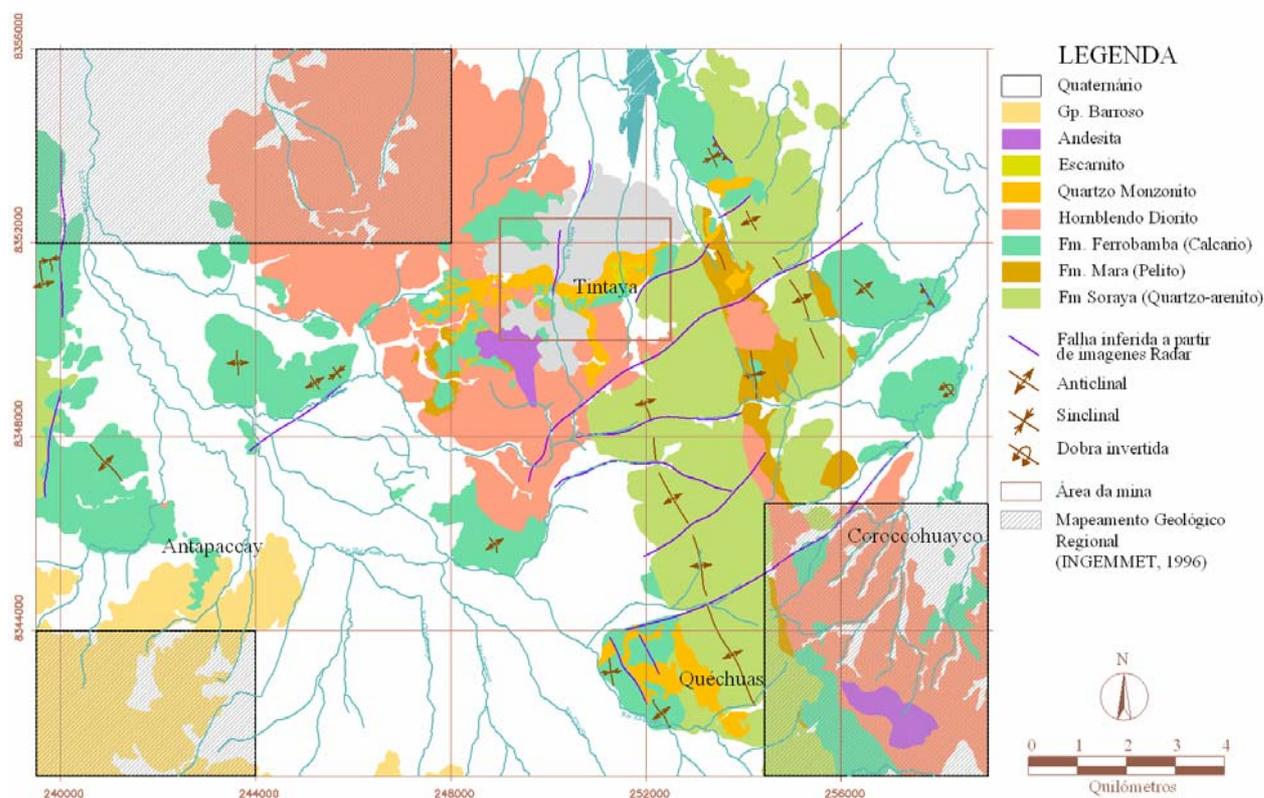
Na localidade Langui Layo, existe uma faixa dobrada de rochas com idades paleozóicas e cretáceas, com uma orientação NW – SE e vergência SW (Adebaud, 1973). Os dobramentos

das seqüências paleozóicas são vinculados à tectônica Tardi-herciniana. No entanto os dobramentos das rochas cretáceas são relacionadas à Tectônica Peruana. (Lopez, 1996).

A 40 km ao norte da área de estudo, localiza-se o sistema de falhas Vilcanota entre 14°30' latitude Sul e 71° e 71° 30' longitude Leste, atingindo uma extensão de 90 km até Urcos (Cusco) com uma orientação média NNW – SSW e mergulho variável entre 60° – 70° SW. O movimento reativo do sistema é normal sinistral e evidencia um estado de distensão NS no Quaternário. A faixa falhada separa os sedimentos Mesozóicos – Cenozóicos ao sudeste das formações Paleozóicas da Cordilheira Oriental ao nordeste (Sébrier et al., 1985).

### 2.3 GEOLOGIA DO DISTRITO MINEIRO DE TINTAYA

A estratigrafia se caracteriza por apresentar rochas cretáceas no substrato, divididas tradicionalmente em Formação Hualhuani, Formação Murco e Formação Arcurquina. As rochas cretáceas foram deformadas regionalmente durante as deformações Andinas, formando dobras e falhas. As intrusões do Eoceno - Oligoceno atribuídas ao Batólito de Abancay cortam as rochas cretáceas em diferentes pulsos magmáticos formando os depósitos de escarnito do distrito de Tintaya. Na localidade de Antapaccay aflora o Grupo Barroso em contacto com rochas cretáceas e intrusivas. Finalmente, a maior parte da área é coberta pela Formação Yauri e os depósitos quaternários (Fig.2.4).



**Figura 2.4:** Mapa geológico simplificado da área do distrito mineiro mostrando os depósitos de Antapaccay, Quéchuas, Coroccohuayco e Tintaya. A área delimitada pelo retângulo mostra a localização da mina Tintaya, onde se centraliza o estudo da dissertação (Adaptado do Grupo Brownfields: Maldonado, 2005; Vide Apêndice 1).

### **2.3.1 ESTRATIGRAFIA**

#### **2.3.1.1 FORMAÇÃO HUALHUANI (SORAYA)**

Tem uma espessura que varia de 800 a 1000 m, constituída por bancos de quartzo-arenito branco amarelado de granulação média a fina, intercalado com arenito cinza e lilito vermelho a cinza. A Formação Hualhuani, do topo do Grupo Yura que aflora em Arequipa, localmente é denominada como Formação Soraya. A correlação estratigráfica indica uma idade Neocomiano, do Cretáceo Inferior (Jenks, 1948).

Esta formação, por ter comportamento rúptil, mostra uma tendência superficial a uma alta frequência de fraturamento e, conseqüentemente, a uma alta permeabilidade secundária (Fig. 2.5).

#### **2.3.1.2 FORMAÇÃO MURCO (MARA)**

Tem uma espessura de 480 m, constituída por três membros, sendo que o primeiro membro está constituído por pelito marrom e verde intercalado com arenito branco; o segundo membro constituído por quartzo-arenito; o terceiro membro formado de pelito vermelho com intercalação de lamito e arenito cinza de grão fino (Fig. 2.6).

A formação Murco que se estende desde Apurimac em direção sudeste, é reconhecida em Tintaya onde é denominada localmente como Formação Mara. Atribui-se uma idade de Cretáceo Médio – Inferior por correlação estratigráfica e localmente está sotoposta por desconformidade com a Formação Arcurquina (Espirilla, 2001).

As rochas da Formação Murco são metamorfoseadas localmente a hornfels, sem nenhuma mineralização importante, embora apresente veios de quartzo, calcopirita e pirita (Espirilla, 2001).

#### **2.3.1.3 FORMAÇÃO ARCURQUINA (FERROBAMBA)**

Tem uma espessura que varia de 300 até 800 m, constituída de camadas maciças de calcários na parte superior, no meio formada de calcários com nódulos de silixtito separados por horizontes argilosos e na parte inferior uma fina estratificação de calcários cinza intercalados com arenitos. Uma das características distintivas da Formação Arcurquina é a presença de veios de calcita entrecruzados.

Esta Formação constitui a principal seqüência de rochas hospedeiras da mineralização de escarnitos no Cinturão Andahuaylas – Yauri e localmente forma o escarnito de granada em contato com o monzonito porfirítico. A Formação Arcurquina, que se estende desde Arequipa, é denominada como Formação Ferrobamba em Apurimac, atribuindo uma idade do Cretáceo Superior (Benavides, 1962).



**Figura 2.5:** Exemplo do intenso fraturamento do quartzo-arenito da Formação Soraya (foto da encosta NW do Cerro Condorsayana)



**Figura 2.6:** Pelito vermelho com intercalações de lamito e arenito cinza de grau fino da Formação Mara (foto da encosta leste do Cerro Condorsayana)



**Figura 2.7:** Calcários com nódulos de silixtito ferruginoso da Formação Ferrobamba (foto na localidade de Huinipampa).

#### 2.3.1.4 GRUPO BARROSO

O Grupo aflora ao sudoeste com uma espessura de 310 m, está constituído de uma fase explosiva composta por tufos de dacitos e riolitos e uma fase eruptiva constituída por fluxos e brechas vulcânicas de composição andesítica. O Grupo está sobreposto em discordância angular ao Grupo Tacaza e foi datado com K/Ar por Kaneoka e Guevara (1984) em Mioceno Superior – Pleistoceno (Sanchez e Leon, 1995).



**Figura 2.8:** Andesitos do Grupo Barroso exposto na localidade de Antapaccay. O afloramento mostra uma população de juntas sub-verticais muito persistentes.

#### 2.3.1.5 FORMAÇÃO YAURI E DEPÓSITOS QUATERNÁRIOS

A Formação Yauri tem uma espessura de 230 m, constituída de sedimentos lacustres não consolidados composta de seixo, areia, argila, lama, tufo e localmente por diatomáceas de água doce. Estes sedimentos cobrem a maior parte da Peneplanície de Yauri. (Plioceno Superior - início do Pleistoceno). No entanto, os depósitos quaternários estão constituídos por conglomerados, clástonos, grânulos, areias e argilas; correspondentes a sedimentos fluviais, glaciais e aluviais. Tem uma espessura que varia de 30 m a 80 m.



**Figura 2.9:** Vista panorâmica dos depósitos lacustres e dos sedimentos quaternários da região do Rio Salado, ao leste do distrito mineiro de Tintaya, Peru.

### 2.3.2 ROCHAS INTRUSIVAS E EVOLUÇÃO MAGMÁTICA

As rochas intrusivas estão constituídas por hornblenda diorito, quartzo monzodiorito, latito e diorito porfirítico. Estas rochas foram estudadas e classificadas com base na descrição petrográfica e a sua composição mineralógica, durante os trabalhos prospectivos entre 1997-2001, realizados principalmente na mina Tintaya, e em menor proporção nos prospectos de Antapaccay e Corcohuayco. (Sweng 1997; Brooks, 1999; Loring, 2000; Myers, 2001). A classificação atualmente utilizada baseia-se no conhecimento acumulado da mineração de Tintaya (Fig. 2.10).

**Hornblenda diorito:** É a rocha ígnea mais antiga reconhecida em Tintaya e forma soleiras e alguns diques ou apófises. As soleiras atingem centenas de metros de espessura e são compostas de diorito com textura fanerítica fina, rica em hornblenda, enquanto que os diques apresentam uma textura de fluxo, com fenocristais alinhados de plagioclásios (Myers, 2001).

**Quartzo Monzodiorito (Pm1):** Forma um stock que corta o hornblenda diorito e está associada à geração do minério. Tem uma textura porfirítica média e se caracteriza por apresentar quartzo (>7%), cristais de biotita entre 3 – 6 mm de tamanho (5%), hornblenda tabular (5%), titanita como mineral acessório e ~10 – 15% de matriz (Zweng, 1996).

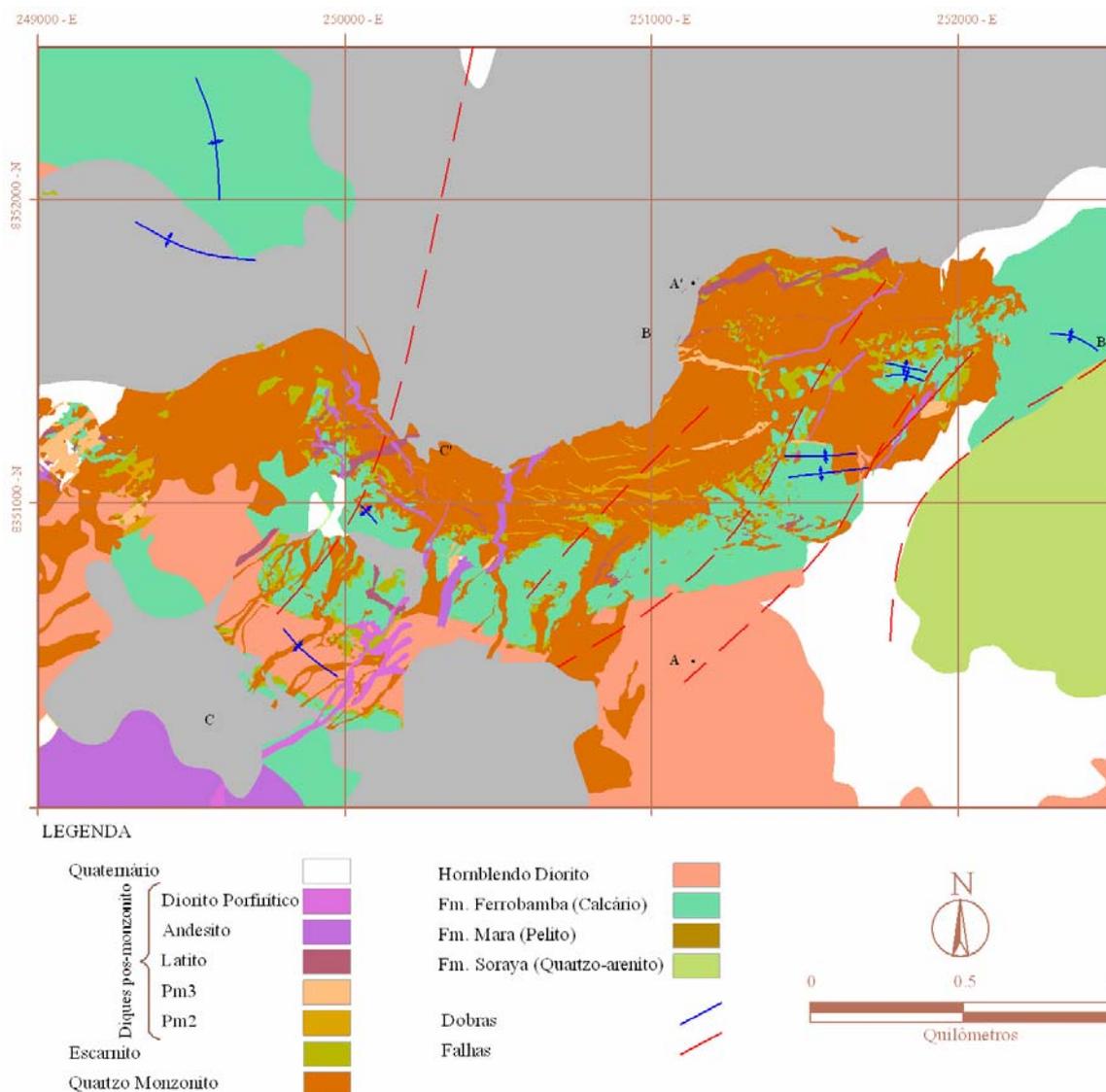
O stock quartzo monzodiorito é cortado por diques de orientação NW, NE e EW. Eles são denotados localmente por Pm2, Pm3, latito e diorito porfirítico, com base nas pequenas variações de textura e composição mineralógica, sendo as suas principais diferenças a porcentagem de fenocristais de quartzo e a razão de hornblenda com biotita.

**Pm2** tem poucos fenocristais de quartzo (<5%), uma quantidade significativa de hornblenda (10%), pequenos cristais de biotita (>4%) e tem de 15 -25% de matriz.

**Pm3** é fracamente porfirítica com textura seriada, com quartzo (2%), fenocristais de hornblenda (5%) e biotita (1 - 3%) e contem veios sem conteúdo de cobre.

**Latito:** Têm textura bimodal, com conteúdo de plagioclásio (80%), pouco quartzo (1%), hornblenda (6%), biotita (4%) e matriz de composição cálcioalcalina.

**Diorito porfirítico:** tem textura porfirítica com plagioclásio (40%), hornblenda tabular (8%), biotita (1%) e matriz afanítica. Caracteriza-se pela ampla faixa de tamanhos dos fenocristais de plagioclásios (0.05 – 1 cm). O dique de diorito porfirítico corta todas as rochas.



**Figura 2.10:** Mapa geológico da mina Tintaya, mostrando a localização das seqüências sedimentares cretáceas, os escarnitos e as intrusões ígneas (Modificado de Myers, 2001 e adaptado com os mapeamentos, 2005; vide Apêndice 1).

A evolução do sistema magmático - hidrotermal começa com a intrusão e cristalização dos corpos ígneos de hornblenda diorito. Durante esse período de cristalização uma fração enriquecida com água magmática migra formando corpos de escarnitos de magnetita adjacentes às soleiras de hornblenda diorito. Os escarnitos contêm traços de cobre sem importância econômica (Myers, 2001).

A evolução do sistema magmático prosseguiu com a cristalização dos corpos intrusivos de quartzo monzonito (Pm1), devido à restituição do conteúdo de água dentro da cristalização do magma e o incremento da relação biotita – hornblenda. Esse momento de diferenciação magmática constitui o ponto crítico da evolução do sistema metassomático, marcando a maior migração das soluções que formaram os escarnitos com minério de cobre importante. Durante a cristalização de Pm1, a migração de soluções foi saturada de ferro, cobre, ouro, prata e molibdênio, que foram mobilizados em fluidos ácidos de alta temperatura formando corpos de

escarnito e veios. Com menor volume de água, houve geração de uma maior quantidade de hornblenda, desenvolvendo-se os diques de Pm2 que cortam o stock de monzonito principal. Um maior incremento de água, devido a cristalização de hornblenda e silicatos, gerou um segundo período com cristalização de biotita – hornblenda em proporção similar, manifestada nos diques Pm3. A migração de soluções em Pm3 é muito irregular com insignificante formação de escarnitos e minérios. Os diques posteriores revelam eventos de menor importância metassomática em condições relativamente secas. Após intrusão de Pm3, se distinguem os diques de latito e diorito porfirítico, por suas altas proporções de biotita – hornblenda e ausência de escarnitos associados (Zweng, 1996; Myers, 2001).

### **2.3.3 ALTERAÇÃO E MINERALIZAÇÃO**

O escarnito é uma aureola de alteração formada por metassomatismo de contato. Apresenta-se dentro do corpo intrusivo de quartzo monzonito e ao longo do contacto entre o corpo intrusivo e as rochas encaixantes calcárias da Formação Ferrobamba (Santa Cruz, 1979).

As rochas ígneas Pm1 e Pm2 formam escarnitos estéreis de granada e piroxênio, onde a intensidade da alteração muda desde tênue até total modificação da composição da rocha ígnea. Em Pm3 não se encontraram escarnitos, mas há apenas uma alteração dominada por epidoto e clorita (Myers, 2001).

O escarnito de contacto tem mineralização associada de Cu +/- (Au – Ag ), que ocorre formando corpos sub-verticais irregulares. O zoneamento é típico de escarnito: Intrusivo – granada – piroxênio – magnetita e sulfeto – mármore – calcário. O minério de cobre se instala em veios, disseminações e principalmente no escarnito, sendo que a calcopirita ocorre mais frequentemente que a bornita.

### **2.3.4 GEOLOGIA ESTRUTURAL**

A maioria dos estudos anteriores, concernentes com a geologia estrutural do distrito de Tintaya, foram realizados por consultores entre os anos 1996 e 2005, e se enfocaram principalmente nas áreas específicas da mina Tintaya e nos prospectos de Antapaccay e Coroccohuayco. Esses estudos têm diferentes interpretações, testemunhando a complexidade do distrito de Tintaya.

Uma das primeiras interpretações compreende as áreas de Coroccohuayco e Tintaya, e foi baseada em mapeamento detalhado, concluindo que as principais estruturas do distrito de Tintaya são dobras de orientação NNW, e falhas locais de direção leste de movimento inverso. Todavia, na interpretação não se detalhou a geometria, a cinemática, nem a seqüência deformacional (Jeanne 1997).

Após uma análise estrutural regional do Perú (incluindo o Distrito de Tintaya), que foi baseado principalmente na interpretação de lineamentos Landsat, informação geofísica e mapeamento regional anterior, a conclusão é que as intrusões e os minérios foram dominados pela intersecção de falhas transcorrentes NS e NW – SE, atribuídas ao encurtamento andino ocorrido entre o Terciário Inicial e Médio. Adicionalmente, o lineamento estrutural NE - SW é interpretado como próprio de falhas normais que possivelmente estão relacionadas a complexos plutônicos ocultos. No entanto, estas interpretações carecem de comprovação em campo (Rankin, 2000).

As estruturas da mina Tintaya foram modeladas como um sistema de falhas normais de orientação NS, relacionadas ao alívio provocado por um sistema de falhas transcorrentes dextral de orientação WNW, o que favorece a intrusão ígnea e à formação do minério do depósito de Tintaya. Nesta interpretação, a evolução das estruturas foi simplificada a um único evento de deformação coincidente com a atividade intrusiva (Loring, 2000).

A análise estrutural do depósito de Antapaccay teve como base um mapeamento superficial limitado, e no estudo de furos utilizando “televiwer”. Nesta análise, há definição de dois sistemas de falhas principais, um de orientação NE a ENE e mergulho NW sub-vertical, e um outro de orientação NW – NNW e mergulho NE sub-vertical. Mas, o sentido de movimento das falhas foi incerto, embora a natureza conjugada das falhas e a relação com as fraturas de extensão sugeriram deslocamentos predominantemente normais (Stryhas, 2000).

Os trabalhos de mapeamento, nas áreas de Huinipampa e Alto Huancané, serviram para construir um modelo estrutural preliminar, contemplando uma historia estrutural formada de múltiplas fases deformativas, incluindo: uma fase inicial compressiva ~EW, deduzida das dobras de orientação NS a NW, uma segunda fase de extensão NS, deduzida de veios, diques e falhas normais de orientação EW a ENE, uma terceira fase associada à ativação das falhas de orientação NE, e uma quarta fase à ativação de falhas inversas NNW. No entanto, a ordem cronológica das fases não é definitiva (Gans, 2005).

## *Introdução*

No flanco oriental da cordilheira ocidental andina do sul do Perú, entre aproximadamente 14 e 15 graus de latitude sul, localiza-se o cinturão metalogénico de Andahuaylas – Yauri, com uma extensão de 300 km que se prolonga em direção NW – SE, entre os departamentos de Apurímac e Cusco (Fig. 1.1 e Fig. 1.2). Neste cinturão ocorrem os distritos mineiros Tintaya, Charcas, Katanga e Bambas, que foram produzidos pelo contato metassomático entre rochas sedimentares cretáceas e rochas intrusivas ácidas do Eoceno – Oligoceno.

A área de estudo da presente dissertação se localiza na borda sudeste do cinturão Andahuaylas – Yauri no Altiplano Andino, dentro do distrito mineiro Tintaya, onde se encontram os depósitos de escarnito de cobre de Tintaya, Coroccohuayco, Quéchuas e Antapaccay (Fig. 1.2).

Na área de estudo, trabalhos anteriores de pesquisa referentes à geologia econômica, geoquímica e geologia estrutural, originaram informações valiosas para a prospecção dos depósitos de escarnito (Zweng, 1996; Jeanne, 1997; Stryhas, 2000; Loring, 2000; Myers, 2001; Gans, 2005). Contudo, o *Contexto Estrutural* do distrito foi apenas superficialmente investigado, justificando a elaboração de uma interpretação estrutural mais completa e integrada do distrito, que definisse os padrões, os estilos e a evolução das estruturas geológicas, com base em um mapeamento estrutural da área do Distrito e adjacências da Mina. Devido ao fato, de que as instabilidades dos taludes rochosos, na mina Tintaya, terem um alto controle estrutural, há necessidade de analisar um *Contexto Geotécnico*, que justifica uma caracterização geomecânica das estruturas geológicas planas, denominadas genericamente de *descontinuidades*, com base no mapeamento geotécnico dos taludes da Mina. Isto permite

também poder estimar a resistência ao cisalhamento das descontinuidades para futuras análises de estabilidade, melhorando, assim, a confiabilidade dos taludes a serem projetados. Existe, assim, uma conexão entre dois contextos, buscando objetivos diferentes, devido ao fator geológico da existência da repetitividade nos padrões estruturais, da escala do Distrito até a Mina, confirmando o critério de Pompeley (1898), e contribuindo para um amplo conhecimento da geologia estrutural de Tintaya.

## **1.1 OBJETIVOS**

Este estudo tem como objetivos específicos:

- Reconhecimento das feições estruturais ao redor da mina Tintaya, quanto à sua geometria, extensão e padrões de orientações dominantes.
- Caracterização geomecânica das estruturas rúpteis dentro da mineração, segundo a metodologia proposta por Barton.
- Estimativa da resistência ao cisalhamento das descontinuidades dentro da mina de Tintaya, baseada na descrição geomecânica das descontinuidades.

## **1.2 METODOLOGIA DE TRABALHO**

### **1.2.1 COMPILAÇÃO E ELABORAÇÃO DE INFORMAÇÃO PRELIMINAR**

Procedi inicialmente uma revisão de relatórios internos e trabalhos anteriores da geologia de Tintaya, assim como uma bibliografia relacionada com a mecânica de rochas, geologia estrutural, estatística, dissertações e apostilas.

Parte da informação compilada são as cartas topográficas da empresa Tintaya nas escalas 1: 25.000 e 1: 5.000, e os mapas geológicos regionais elaborados por INGEMMET, principalmente os quadrângulos de Yauri e Condoroma de escala 1:100.000. Adicionalmente, utilizei algumas fotografias aéreas na escala 1: 15.000 (1997) e uma imagem digital de terreno, Shuttle, na escala 1: 100.000. No tratamento da imagem utilizei o sistema de coordenadas UTM com referência ao “Datum” Provisional South América 1956 meio da zona 19 S.

As fotografias aéreas e a imagem de sensores remotos serviram para definir os lineamentos estruturais, entretanto as folhas topográficas e mapas geológicos da área de estudo e arredores, serviram para a realização do mapeamento e posterior interpretação da geologia estrutural.

O emprego de metodologias, nomenclaturas e tabelas padrão durante a etapa de mapeamento, permitiram uma boa coleta de dados, tanto para o mapeamento geológico quanto para o mapeamento geotécnico.



## **1.2.2 MAPEAMENTO E LABORATÓRIO**

O mapeamento se divide em:

- Mapeamento estrutural do Distrito Mineiro, utilizando uma escala de observação de 1: 25.000 para registrar feições estruturais como dobras, falhas, sistemas de juntas e indicadores cinemáticos. Este trabalho foi efetuado com a colaboração do professor orientador durante 9 dias.
- Mapeamento estrutural e geomecânico da mina Tintaya dividido em duas etapas, uma de 8 dias para registrar as estruturas rúpteis com persistência maior de 30 m e a outra de 7 dias para descrever os sistemas de juntas menores. Ambas as etapas de mapeamento foram realizadas utilizando amostragem seletiva das discontinuidades, das quais se descreveram as características superficiais, mediante tabelas padrões propostas pela ISRM e Barton. A escala de representação escolhida foi de 1: 10.000.

Conjuntamente com a etapa de mapeamento geomecânico, os testes realizados com o martelo Schmidt permitem aproximar a resistência à compressão das paredes de juntas, acamamento e algumas falhas. Concomitante ao mapeamento, os testes de inclinação utilizando testemunhos e blocos de rocha, permitiram determinar o ângulo de atrito básico por litotipo.

## **1.2.3 INTERPRETAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS**

Os lineamentos obtidos da imagem de sensores remotos e algumas fotografias aéreas, forneceram múltiplas diagramas de roseta para visualizar os padrões estruturais.

A análise dos dados do mapeamento estrutural (Maldonado, 2005), de alguns mapas e de relatórios geológicos anteriores do Distrito Mineiro, permite elaborar uma interpretação estrutural da área do Distrito Mineiro e da área da mineração, utilizando diagramas de roseta, estereogramas de contorno, mapas e algumas secções geológicas e estruturais (Capítulo 3).

Para a caracterização geomecânica das discontinuidades presentes na mina, a análise dos dados do mapeamento geotécnico permite definir tanto as famílias de discontinuidades, quanto as suas características geomecânicas: persistência, espaçamento, rugosidade, resistência e intemperismo (Capítulo 4).

A estimativa da resistência ao cisalhamento é alcançada utilizando as médias estatísticas de cada característica geomecânica, para cada família de discontinuidades. Já no caso particular das estruturas singulares, as características do preenchimento servem para aproximar os valores de resistência com base na literatura especializada. A estimativa de resistência ao cisalhamento é expressa utilizando as envoltórias de Mohr-Coulomb (1776) e de Barton (1971) (Capítulo 5).

Na etapa da análise de dados e apresentação de resultados utilizei os seguintes softwares: AutoCad e ArcView para o desenho de mapas, ENVI para o trabalho com imagens de sensores

remotos, Corel Draw para a confecção de diagramas e tratamento de fotos, Ms Office para a redação e cálculos dos dados, Dips na análise de orientação das estruturas e na estatística das características geomecânicas, e finalmente, Split para a análise granulométrica dos preenchimentos de algumas falhas.

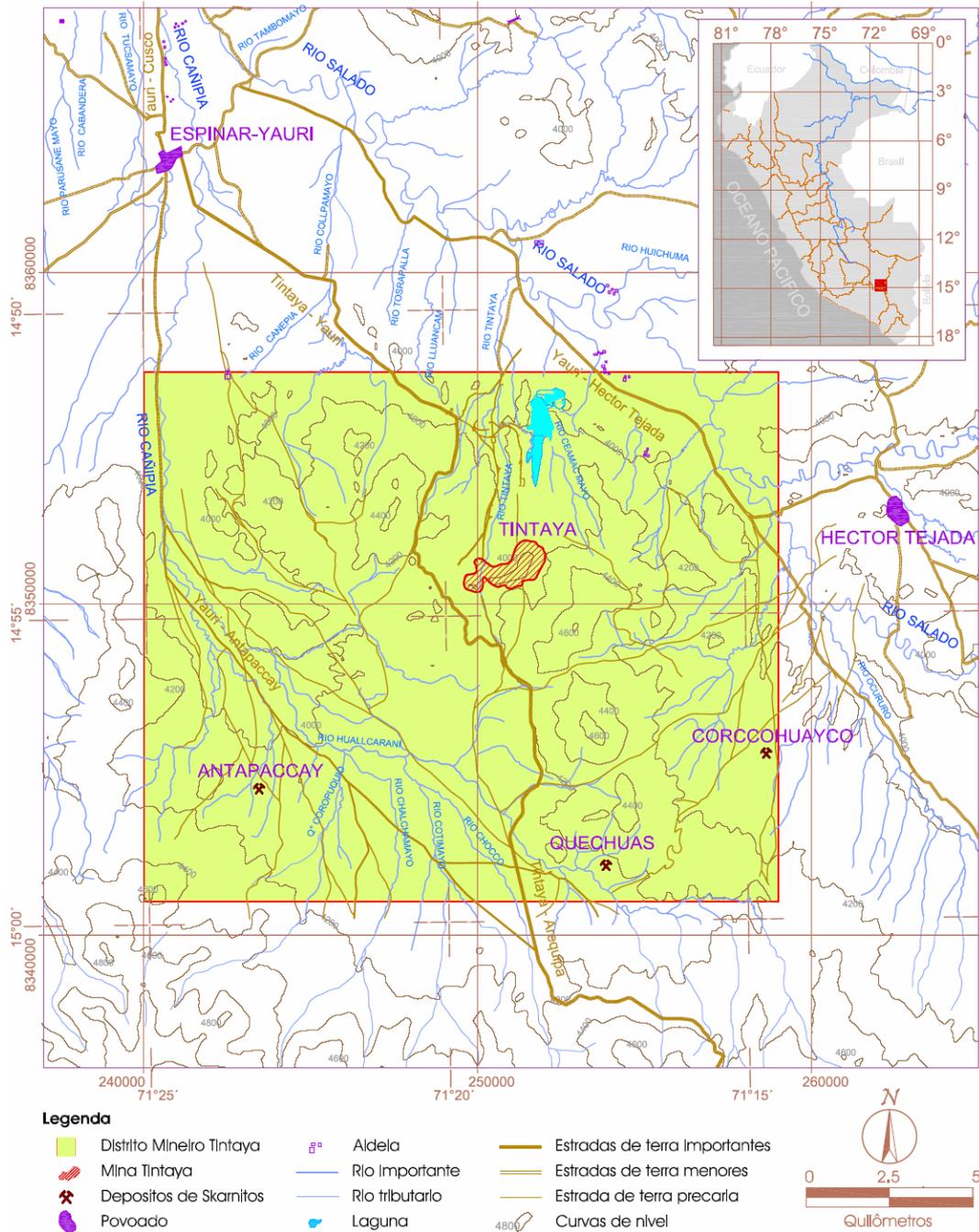
### **1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A organização desta dissertação em seis capítulos e três apêndices, facilita um melhor acompanhamento do seu conteúdo. Os seis capítulos são:

- Capítulo 1 - mostra a importância, motivação e relevância do tema estudado, seus objetivos, assim como a metodologia adotada para estes objetivos.
- Capítulo 2 – resume de modo geral a geologia, estratigrafia, rochas ígneas, mineralização e geologia estrutural do contexto regional e da área do Distrito Mineiro.
- Capítulo 3 - está dividido em três partes. A primeira desenvolve a análise estatística dos lineamentos regionais e ao redor da mineração. A segunda parte descreve as estruturas do Distrito Mineiro, baseado tanto nos dados coletados durante o mapeamento e na análise estatística e geométrica, quanto nas interpretações anteriores referentes à geologia do Distrito Mineiro. A terceira parte descreve as estruturas geológicas presentes nos taludes da mina. Complementando este capítulo o Apêndice 1 compila os mapas e perfis elaborados.
- Capítulo 4 – expõe a caracterização geomecânica das estruturas planas presentes na mina. Estruturas que são definidas como descontinuidades sistemáticas ou singulares. Inicialmente, são determinadas as famílias de descontinuidades, para logo proceder a estatística das características geomecânicas de cada família e finalizar com a análise cinemática simples. A análise tem a finalidade de definir a influência das descontinuidades na estabilidade dos taludes. O apêndice 2 compila as tabelas padrão utilizadas, os formatos de mapeamento elaborados, e mostra num mapa a localização das janelas de mapeamento geomecânico. O Apêndice 3 compila as projeções estereográficas das famílias de descontinuidades e da análise cinemática em cada setor da mina.
- Capítulo 5 – expõe inicialmente a teoria da resistência ao cisalhamento das descontinuidades, prosseguindo com a descrição da metodologia utilizada, e culminando com a estimativa da resistência ao cisalhamento das estruturas presentes nos taludes da mina.
- Capítulo 6 – Expõe as conclusões obtidas nos capítulos 3, 4 e 5, onde foram abordados os objetivos específicos desta dissertação, e apresenta algumas sugestões para futuras pesquisas.

### 1.4 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área de estudo está localizada no distrito de Yauri, departamento de Cusco, no canto sudeste do cinturão Andahuaylas – Yauri do sul do Perú. A dissertação tem o seu foco na mina Tintaya, com uma área aproximada de 12 km<sup>2</sup>, embora a área do Distrito Mineiro compreenda um total de 300 km<sup>2</sup>. A área do distrito é demarcada pelas coordenadas UTM: N 8'357 000, E 259 000 e N 8'341 000, E 240 000 como se mostra na Figura 1.3.



**Figura 1.3:** Mapa de localização da área de pesquisa, mostrando as principais vias de acesso, os rios e os prospectos mineiros. Notar a localização da mina de Tintaya, na parte central do distrito, o foco da presente dissertação.

A área de pesquisa tem um acesso difícil, com poucas rodovias asfaltadas ou estradas de terra, mas as principais vias são:

- Rodovia asfaltada Arequipa – Imata e estrada de terra Imata – Tintaya (255 km)
- Rodovia asfaltada Cusco – Sicuani e estrada de terra Sicuani – Yauri – Tintaya (256 km)

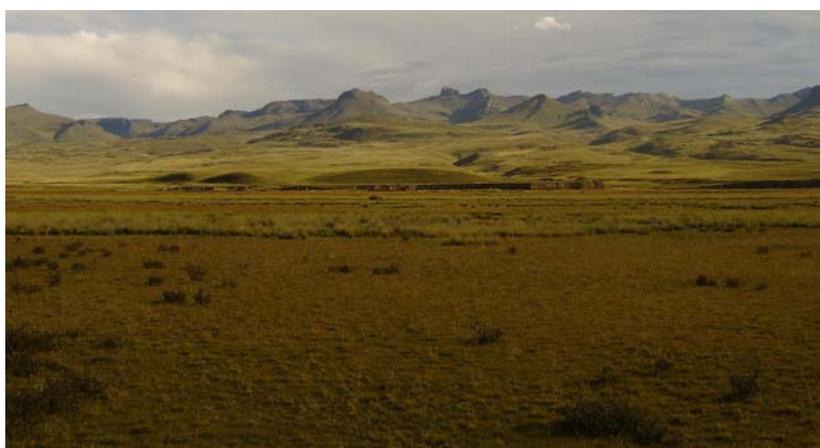
Existem também, outras estradas de terra partindo de Tintaya, destacando-se entre elas: Tintaya – Hector Tejada e Tintaya – Antapaccay (Fig.1.3).

## 1.5 GEOMORFOLOGIA

O distrito de Tintaya está localizado entre a Cordilheira Ocidental e Oriental dos Andes do Perú, numa altitude que varia de 3850 até 4700 m, constituindo uma zona mista conformada de altiplano, montanhas e colinas, conhecida como Peneplanície de Yauri (Fig. 1.4).

A zona de montanhas se estende ao SE e constitui localmente a Cordilheira de Laramani com uma superfície ondulada e quebras de relevo moderadas. A zona montanhosa envolve a peneplanície que apresenta áreas planas e algumas colinas e morros remanescentes, configurando uma topografia ondulada e de suaves declividades de encostas, com quebras de relevo suaves por onde escoam as águas dos rios, sendo comum a formação de banhados nas cercanias dos cursos d'água principais.

A drenagem é controlada pelas estruturas geológicas rúpteis, seguindo padrões de drenagem retangular entre o Rio Salado de direção NW e seus afluentes de direção NE. Existe também um padrão subparalelo entre os tributários de direção NS. Por outro lado, entre o Rio Salado e seu tributário, o Rio Tintaya, e outros menos importantes, há um padrão sub-dendrítico (Fig.1.3). Hidrograficamente, a drenagem presente na Peneplanície de Yauri é atribuída à Bacia Hidrográfica do Rio Apurimac.



**Figura 1.4:** Fotografia da área de Antapaccay, de morfologia típica da Peneplanície de Yauri, com montanhas de suave declividade de encostas e uma superfície plana.

## 1.6 CLIMA E VEGETAÇÃO

Caracteriza-se por ter um clima típico do altiplano, frio e seco, com uma estação chuvosa entre outubro e abril e uma estação seca de maio até setembro (Strahler, 1960). Estas estações apresentam precipitações médias de 166 mm na estação chuvosa e 4 mm na estação seca. O vento dominante é de direção N, com uma velocidade média de 6.2 km/h.

Apresenta uma temperatura média anual de 7,7°C, com flutuações entre 4,2°C e 10,6°C. A temperatura mínima registrada neste lugar foi de -17,8°C (março, 1998). Em julho do ano 2000 registrou-se uma temperatura de -11,9°C. A máxima registrada foi de 28,8°C em fevereiro do mesmo ano. A umidade relativa tem uma média anual de 56%.

A característica ecológica da área de estudo é subalpina subtropical, comum no árido Altiplano Andino. Os recursos biológicos da área formam um total de 82 espécies de flora incluindo pastos, arbustos, cactos, plantas com florescência e uma espécie de conífera, destacando dentre eles o pasto “Ichu” (stepa obtusa) como a espécie de maior difusão. A fauna é escassa e tem 27 espécies, sendo a maior parte formada de aves, além de ter anfíbios, répteis e mamíferos.

## 1.7 HISTÓRIA DA MINERAÇÃO

Tintaya foi prospectada por várias companhias desde 1917 até 1985, data em que iniciou a sua produção como Empresa Mineira Especial. Posteriormente foi adquirida por Magma Copper em 1994 e finalmente desde 1996 a transnacional BHPBilliton continuou a expansão da operação mineira produzindo cobre concentrado e catodos de cobre, sustentando desde então altos padrões de segurança ocupacional e proteção ambiental.(Fig. 1.5)



**Figura 1.5:** Fotografia panorâmica da operação mineira de Tintaya. Visada a partir da localidade de Alto Huancané ao NE de Tintaya.

---

## *Referências Bibliográficas*

- Audebaud, E., 1973. Geología de los Cuadrángulos de Sicuani e Ocongate . INGEMMET , Lima , 180 p
- ABGE, 1983. Métodos para a descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos . CBMR , São Paulo , 132 p
- Araújo Filho, J.O.de e Kuyumijiam R. M. , 2000 . Structurally –controlled gold mineralization in the southern Brazilian thrust belt of central and southeastern Goiás, Brazil . 31th International Geological Congress, Rio de Janeiro. Vol. 2, 289 – 292p.
- Bandis, S., Lumsden, A., Barton, N., 1981. Experimental Studies of Scale Effects on the Shear Behavior of Rock Joints. Pergamon Press, Great Britain, 21 p
- Bandis, S., Lumsden, A., Barton, N., 1983. Fundamentals of Rock Joint Deformation. Pergamon Press , Great Britain , 249 -268 p
- Barton, N., 1976. Rocks Mechanics Review, Shear Strength of Rock and Rock Joints . Pergamon Press, Great Britain, 255 - 279 p
- Barton, N., Choubey, V., 1977. The Shear Strength of Rock Rocks in Theory and Practice. Springer - Verlag , New York , 54 p
- Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering rock mass classifications. John Wiley & Sons, 251 p.
- Brady, B. G. H. e Brown, E. T., 1985. Rock mechanics for underground mining. George Allen & Unwin, London, 527 p
- Carvalho Maia, J. A., 2003 . Metodos probabilisticos aplicados a estabilidade de taludes e cavidades em rocha . UNB - Dept. Eng. Civil e Ambiental , Brasilia , 196 p
- De La Cruz, N. 1995. Estudio Geológico de los Cuadrángulos de Velille, Yauri, Ayaviri y Azangaro. INGEMMET , Lima
- Espirilla, C, 2003. Estudio de venillas en el distrito de Tintaya. U.N.S.A., Arequipa - Peru, 66 p
- Ferreira, A.B. De H., 2004. Míni Aurélio: O minidicionário da língua portuguesa. Posigraf, 896 p
- Fiori, A. P., 1997. Analise da deformação. UFPR, 249 p
- Fiori, A. P. e Carmigniani, L., 2001. Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: Aplicações na Estabilidade de Taludes. UFPR, 550 p
- Fonseca, J. S., 1996. Curso de Estatística. Atlas, 320 p
- Franklin, J. e Dusseault, M., 1989. Rock engineering. McGraw-Hill Bock Company, 591 p

- 
- Gans, P., 2005. Structural framework of the Tintaya district: a preliminary assessment. Exploration department report, 23 p
- Giani, G. P., 1988. Rock slope stability analysis. Balkema, Rotterdam, 361 p
- González, E., 2002. Ingeniería Geológica. Prentice Hall, 800 p
- Goodman, R., 1980. Introduction to rock mechanics. John Wiley & Sons, 562 p
- Hann, G. e Shapiro, S., 1967. Statistical models in Engineering. John Wiley & Sons, 347 p
- Hasui, Y.e Mito, J.A., 1992 . Geologia estrutural aplicada . ABGE - Votorantim S.A., 459 p
- Hoek, E e Bray, J., 1977. Rock slope Engineering. The institution of mining and metallurgy, London, 358 p
- Hoek, E. e Brown, E. T., 1980. Underground Excavation in rock. The institution of mining and metallurgy, 527 p
- Hudson, J e Harrison, J, 1995. Engineering Rock Mechanics. Pergamon Press, Oxford, 444 p
- Hunt, R.E., 1986. Geotechnical engineering techniques and practices. McGraw-Hill Bock Company, 729 p
- Hustrulid, Mccarter e Van Zyl, 2000. Slope Stability in Surface Mining. SME, Colorado, 442 p
- ISRM, 1981. Rock characterization, testing and monitoring - ISRM, suggested methods. Pergamon Press, London , 211 p
- Jaillard, E., 2000. Tectonic Evolution of The Andes of Ecuador, Perú, Bolivia and Northernmost Chile. Congresso Rio de Janeiro, 481 - 559 p
- Jeanne, R. A., 1997. Geology of the Tintaya concession, Cuzco Department, Peru. Consulting Geologist, Reno, Nevada, USA, 30 p
- Johnson, R. e Degraff, J, 1988. Principles of engineering geology. John Wiley & Sons, 497 p
- Kearey, P.e Vine, F.J., 1999. Global tectonics. Blackwell Scientific Publications, 302 p
- Landim, P.M.B. , 2003 . Analise estatística de dados geológicos. Editora UNESP , 254 p
- Lauro Vargas, C. A., 2001. Modelo probabilístico de distribuição tridimensional de descontinuidades em maciços rochosos fraturados. UNB - Dept. Eng. Civil e Ambiental, 253 p
- Lopez, J. , 1996 . Geología del Cuadrángulo de Nuñoa. INGEMMET, Lima , 169 p
- Loring, R. B., 2000. Preliminary structural geology of the Chabuca Este (Oeste). Consulting Geologist, Reno, Nevada, USA, 20 p
- Marshak, S e Mitra G., 1988. Basic methods of Structural Geology. Prentice Hall, 446 p

- 
- Mcclay, Z., 1987. The mapping of geological structures. Geological Society, HandBook series, 161 p
- Means, W. D., 1976. Stress and Strain: Basic concepts of continuum mechanics for geologists. Springer - Verlag, New York, 333 p
- Meneses, P. R., 2004. Fundamentos de sensoramento remoto. UNB - Lab.S.R. , 138 p
- Meneses, P. R.e Madeira, J.N., 2001. Sensoramento remoto y refletância dos alvos naturais . Editora UNB & Embrapa, Brasília, 262 p
- Milone, G, 2004 . Estatística geral e aplicada. Thompson, 483 p
- Myers, G., 2001. Geologic report of the Tintaya mine area, Cusco department, Peru. Geology Department Report , 38 p
- Oliveira, A.M.do S. e Brito S. N. A., 1998. Geologia de Engenharia. ABGE, Sao Paulo, 586 p
- Oyarzún, J. , 2000 . Andean Metallogensis . Congresso do Rio de Janeiro, 725 - 753 p
- Palacios, O., Sanchez, A., Canchaya; S., 1995. Geologia del Peru, Boletín 55 . INGEMMET , Lima , 177 p
- Park, R. G., 1987. Geological Structures and Moving Plates. Chapman & Hall, 337 p
- Priest, S. D., 1985. Discontinuity analysis for rock engineering. Chapman & Hall, 473 p
- Priest, S. D., 1985. Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics. George Allen & Unwin, London, 124 p
- Ramos, V.; Aleman, A., 2000. Tectonic Evolution of The Andes. Congresso Rio de Janeiro , 635 - 685 p
- Ramsay, J.G., 1969. Plegamiento y fracturamiento de rocas. McGraw-Hill Bock Company & Hermann Blume Edic., Madrid, 590 p
- Ramsay, J. G. e Hubber, M. J., 1983. The techniques of modern structural geology (volume 1). Academic Press , 307 p
- Ramsay, J. G. e Hubber, M. J., 1987. The techniques of modern structural geology (volume 2) . Academic Press , 308 - 700 p
- Santa Cruz, Guerrero, T., Castilla, F. e Caro, E., 1979. Geologia de yacimientos de cobre en "skarn" en la region sur-oriental del Peru . SGP , Lima , 153 - 174 p
- Sheorey, P. R., 1997. Empirical rock failure criteria. Balkema, Rotterdam, 176 p
- Strailher, A. N, 1963. The earth sciences. Harper and Row

- Stryhas, B., 2000. Structural interpretation of bore hole televiewer results from Antapaccay porphyry copper deposit Tintaya, Peru. Exploration Department Report, 28 p
- Teixeira, W., Toledo, M. C. M. de, Fairchild, T. R., Taioli, F., 2003 . Decifrando a Terra. Oficina de Textos, 558 p
- Twiss, R. e Moores, E., 1992. Structural Geology. W.H.Freeman & Company, N. York, 532 p
- Veiga Fleury, S., 2001. Analise de distribuição de tensões em descontinuidades de rocha utilizando a técnica da fotoelasticidade. UNB - Dept. Eng. Civil e Ambiental , Brasilia , 144 p
- Wyllie, D. e Mah, C., 2004. Rock slope Engineering. Spon Press, London - New York , 431 p
- Zweng, P. L., 1996. The Cu - (Au, Ag) Skarn deposits at Tintaya, Peru. Geology department report , 12 p

# ***Tabelas e Formato de Mapeamento Geotécnico***

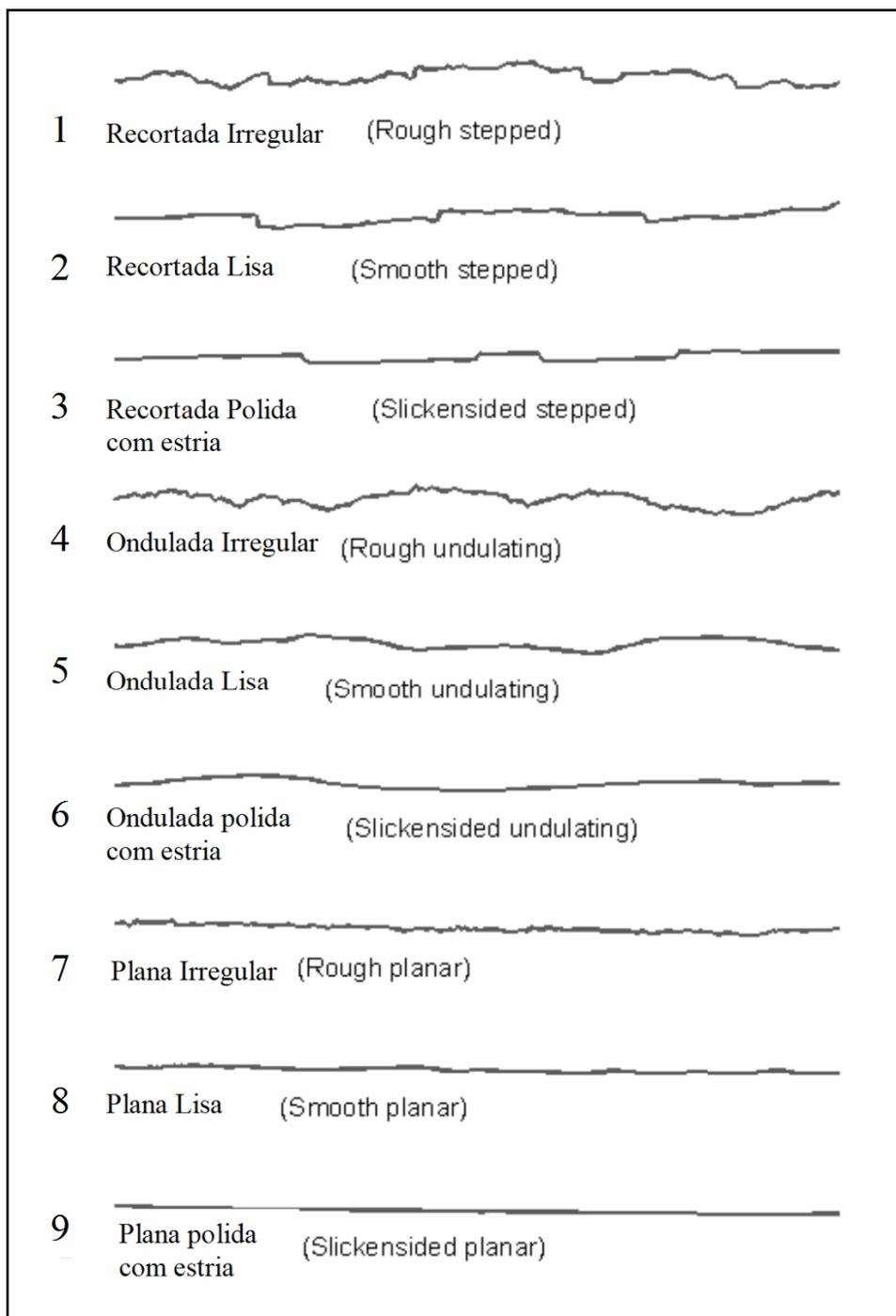
---

***B.1 TABELAS PADRÃO UTILIZADAS***

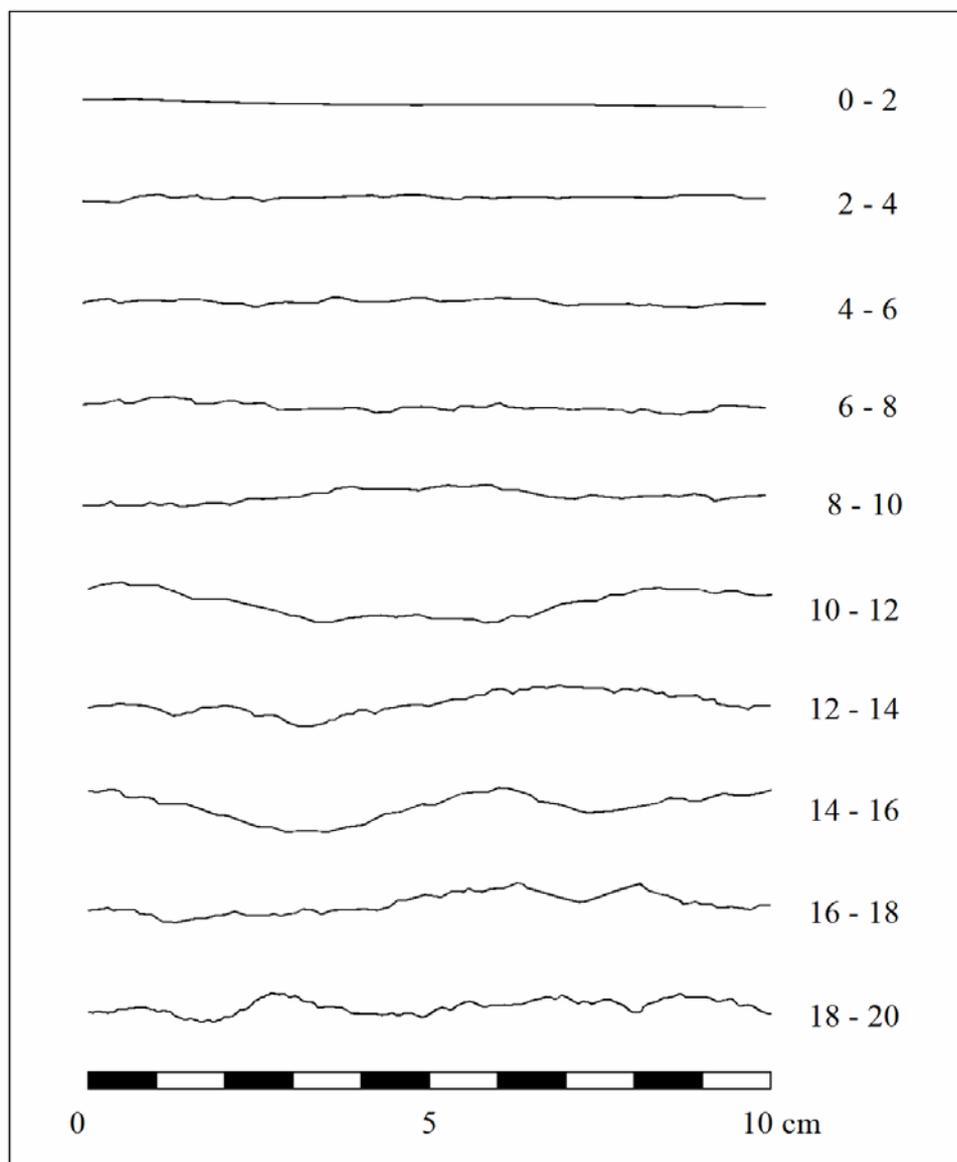
***B.2 FORMATO DE MAPEAMENTO ELABORADO***

***B.3 MAPA DE LOCALIZAÇÃO DE JANELAS***

**Tabela B1.1:** Perfis típicos de rugosidade e nomenclatura usada. O comprimento de cada perfil varia entre 1 e 10 m. As escalas verticais e horizontais são iguais (modificado de ISRM, 1978).



**Tabela B1.2:** Perfis de rugosidade e correspondente campo de variação dos valores de JRC associados (ISRM, 1978).



**Tabela B1.3:** Classificação do parâmetro Jr para o índice Q (modificado – Barton et al., 1974)

3. CONDIÇÃO DE RUGOSIDADE DAS PAREDES	Jr	NOTAS
a. Paredes das descontinuidades em contato		1. Acrescentar 1,0 se o espaçamento entre descontinuidades for > 3 m. 2. Jr = 0,5 no caso de descontinuidades planas e estriadas e com orientação na direção da tensão mínima
b. Paredes das descontinuidades em contato com deslocamentos diferenciais < 10 cm		
A. Descontinuidades não persistentes	4	
B. Descontinuidades rugosas ou irregulares, onduladas	3	
C. Descontinuidades lisas e onduladas	2	
D. Descontinuidades polidas e onduladas	1,5	
E. Descontinuidades rugosas ou irregulares e planas	1,5	
F. Descontinuidades lisas e planas	1	
G. Descontinuidades polidas ou estriadas e planas	0,5	
c. Sem contato entre as paredes das descontinuidades quando cisalhadas		
H. Descontinuidades preenchidas com material argiloso	1	
J. Descontinuidades preenchidas com material granular	1	

**Tabela B1.4:** Classificação do parâmetro Ja para o índice Q (modificado - Barton et al., 1974)

4 CONDIÇÕES DE ALTERAÇÃO DAS PAREDES	Ja	$\phi_r(^{\circ})$	NOTAS
a. Descontinuidades com contato rocha/rocha e sem deslocamento relativo entre as paredes			1. $\phi_r$ ângulo de atrito residual (indicativo das propriedades mineralógicas dos produtos de alteração)
A. Paredes duras, compactas, com preenchimento de materiais impermeáveis	0,75	-	
B. Descontinuidades sem alteração, pigmentação superficial incipiente	1	25-35	
C. Paredes levemente alteradas; películas de materiais arenosos ou minerais abrasivos	2	25-30	
D. Paredes com películas de material siltoso com pequena fração argilosa	3	20-25	
E. Paredes com películas de material mole (micas, clorita, talco, gesso, grafite etc.), eventualmente com minerais expansivos	4	8-16	
b. Descontinuidades com contato rocha/rocha e com deslocamento relativo incipiente entre as paredes (deslocamento diferencial inferior a 10 cm)			
F. Paredes com partículas arenosas, fragmentos de rocha etc.	4	25-30	
G. Paredes com preenchimento contínuo e poucos espessos (< 5 mm) de material argiloso fortemente superadensado	6	16-24	
H. Paredes com preenchimento contínuo e pouco espesso (< 5 mm) de material argiloso pouco ou medianamente superadensado.	8	12-16	
J. Paredes com preenchimento de materiais argilosos expansivos; valores variáveis com a porcentagem dos argilo-minerais expansivos presentes e com a ação conjugada da água intersticial.	8-12	6-12	
c. Descontinuidades sem contato rocha/rocha e com deslocamento relativo entre as paredes			
K. Zonas de preenchimento com fragmentos de rocha	6		
L. Rocha e material argiloso (ver G, H e J para caracterizar as condições das argilas)	8		
M.	8-12	6-24	
N. Zonas de preenchimento com material arenoso ou siltoso-argiloso, sendo pequena a fração argilosa	5		
O. Zonas contínuas de preenchimento com material argiloso	10-13		
P e R (ver G, H e J para a condição das argilas)	6-24		

**Tabela B1.5:** Classificação qualitativa do grau de alteração de descontinuidades (modificado - ABGE/CBMR, 1983)

Termo	Descrição	Grau
Fresca	Nenhum sinal visível de material rochoso alterado: talvez leve descoloração nas principais superfícies da descontinuidade.	1
Levemente alterada	Descoloração indica alteração do material rochoso e das superfícies de descontinuidade. Todo o material pode estar descolorido pelo intemperismo e mais fraco externamente do em sua condição original	2
Moderadamente alterada	Menos da metade do material rochoso está decomposto e/ou desintegrado em solo. Rocha fresca ou descolorida estão presentes em uma estrutura contínua ou em pedaços	3
Altamente alterada	Mais da metade do material rochoso está decomposto e/ou desintegrado em solo. Rocha fresca ou descolorida esta presente como uma estrutura descontínua ou em pedaços.	4
Completamente alterada	Todo material está decomposto e/ou desintegrado em solo. A estrutura original do maciço está intacta.	5
Solo residual	Todo o material rochoso foi convertido em solo e estrutura original destruída. Houve uma grande mudança no volume, mas o solo não foi significativamente transformado.	6

**Tabela B1.6:** Permeabilidade e conteúdo de água nas descontinuidades (ISRM, 1981)

Descontinuidades sem preenchimento	Descontinuidades preenchidas	Grau
A descontinuidade é muito fechada e seca, não parecendo ser possível o aparecimento de fluxos d'água.	Os materiais de preenchimento são fortemente consolidados e secos, improvável presença de fluxos d'água significativos devido à baixa permeabilidade.	1
A descontinuidade é seca com nenhuma evidência do fluxo d'água.	Os materiais de preenchimento estão úmidos, mas não apresentam água livre.	2
A descontinuidade é seca, mas mostra evidência de fluxo d'água, i.e. manchas de ferrugem, etc.	Os materiais de preenchimento estão molhados, com gotas de água ocasionais.	3
A descontinuidade é úmida, mas não existe água livre.	Os materiais de preenchimento mostram sinais de lavagem e fluxo d'água contínua (estimar l/min)	4
A descontinuidade apresenta percolação, ocasionalmente apresenta gotas d'água, mas não apresenta fluxo contínuo.	Os materiais de preenchimento estão lavados localmente, apresentando fluxo considerável d'água ao longo dos canais de carregamento (estimar vazão l/min e pressão, i.e., baixa, média, alta).	5
A descontinuidade mostra um fluxo contínuo d'água (vazão estimada em l/min e pressão, i.e. baixa, média, alta)	Os materiais de preenchimento apresentam-se completamente lavados e existe considerável pressão d'água, principalmente na primeira exposição (estimar vazão l/min e pressão, i.e., média, alta).	6

**Tabela B1.7:** Ensaios manuais para estimar a resistência de materiais de preenchimento coesivos (modificado - ABGE/CBMR, 1983).

S	Descrição	Identificação no Campo	Valor Aproximado de $\sigma_c$ (kPa)
1	Argila muito mole	Facilmente penetrada algumas polegadas com o pulso	< 25
2	Argila mole	Facilmente penetrável algumas polegadas com o dedo polegar	25 – 50
3	Argila firme	Possibilidade de ser penetrável algumas polegadas com o dedo polegar com esforço moderado	50 – 100
4	Argila rígida	Prontamente amoldada com o dedo polegar, porém penetrável somente com grande esforço	100 – 250
5	Argila muito rígida	Prontamente riscada com a unha	250 – 500
6	Argila dura	Riscada com dificuldade com a unha	> 500

**Tabela B1.8:** Ensaios manuais para estimar a resistência de materiais rochosos (modificado - ABGE/CBMR, 1983)

R	Descrição	Identificação no Campo	Valor Aproximado de $\sigma_c$ (MPa)
0	Rocha extremamente fraca	Riscada com a unha	0,25 - 1,0
1	Rocha muito fraca	Esmigalhada com golpes firmes com a ponta do martelo de geólogo e pode ser raspada com canivete	1,0 - 5,0
2	Rocha fraca	Pode ser raspada com dificuldade com canivetes, marcas podem ser feitas com a ponta do martelo de geólogo	5,0 - 25
3	Rocha medianamente resistente	Não pode ser raspada ou riscada com canivete, mas as amostras podem ser fraturadas com golpes de martelo de geólogo	25 - 50
4	Rocha resistente	As amostras necessitam de mais que um golpe com martelo de geólogo para fraturar-se	50 - 100
5	Rocha muito resistente	As amostras necessitam de muitos golpes com martelo de geólogo para fraturar-se	100 - 250
6	Rocha extremamente resistente	As amostras podem somente ser lascadas com martelo de geólogo	< 250

**Tabela B1.9:** Classificação do tamanho de partícula dos preenchimentos de Wentworth (modificado – ISRM, 1981).

#	Material	mm
1	Matação (Boulders)	200 - 600
2	Pedregulho (cobbles)	60 - 200
3	Cascalho grosso (Coarse gravel)	20 - 60
4	Cascalho médio (Medium gravel)	6 - 20
5	Cascalho fino (Fine gravel)	2 - 6
6	Areia grossa (Coarse sand)	0.6 - 2
7	Areia média (Medium sand)	0.2 - 0.6
8	Areia fina (Fine sand)	0.06 - 0.2
9	Silte, argila (Silt, Clay)	< 0.06

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO EM JANELA:**

**Desenho da janela:**

**Localização:** \_\_\_\_\_

**Litologia dominante:** \_\_\_\_\_

**Coordenadas:**

Ponto	Leste	Norte	Nível
Início:	_____	_____	_____
Fim:	_____	_____	_____

**Janela (Face do talude):**

Comprimento (m): \_\_\_\_\_

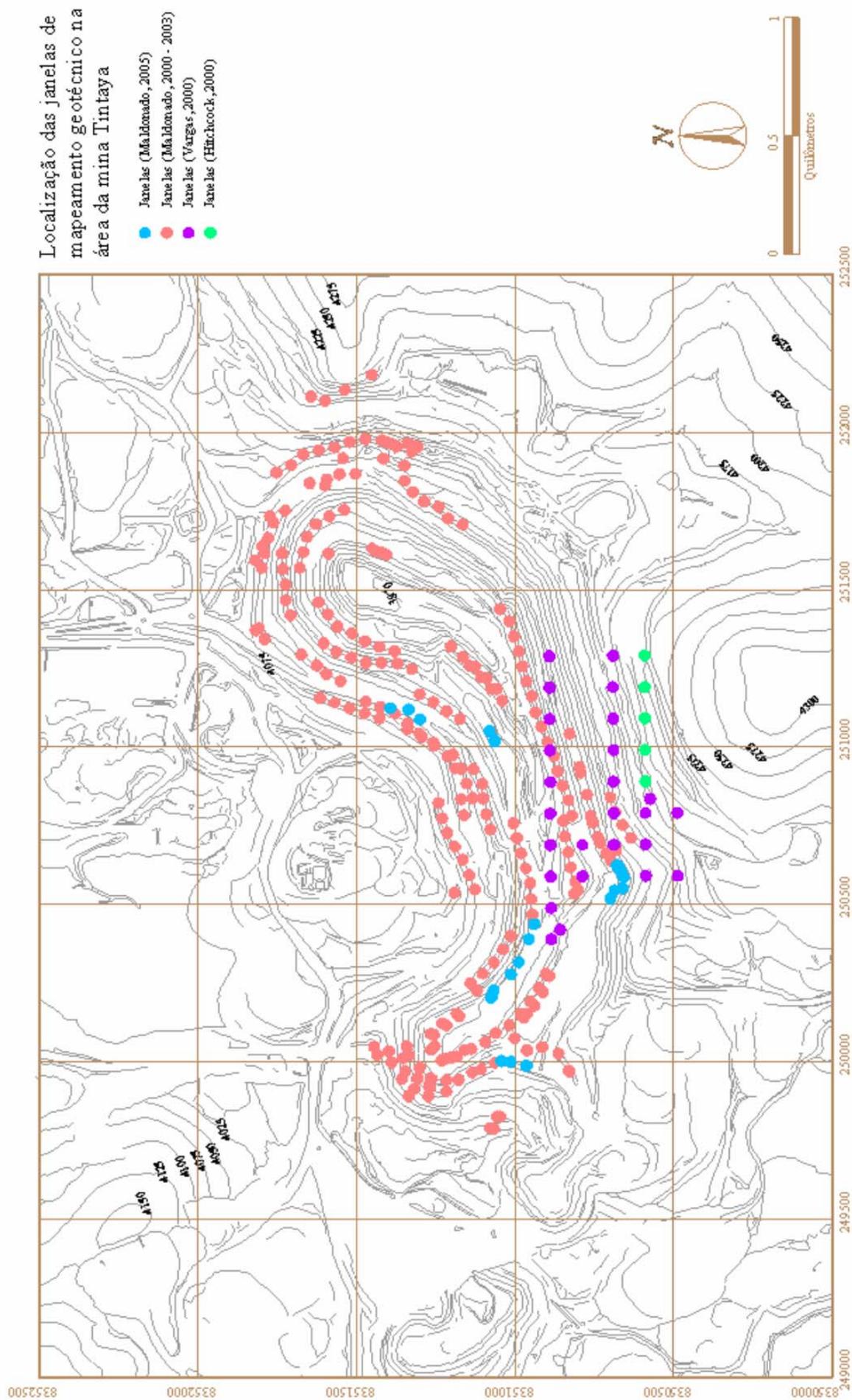
Altura (m): \_\_\_\_\_

Mergulho: \_\_\_\_\_

Direção de Mergulho: \_\_\_\_\_

#	Distância (m)	Traço (m)	Terminação	Tipo	# Fig	f/m	Mergulho	Direção de mergulho	Abertura (mm)	Rugosidade			Percolação das paredes	R	Schmidt		Preenchimento			
										ISRM	Jr	JRC10			#	ângulo	Espessura (cm)	Diâmetro	Material dominante	Percolação do preenchimento
1																				
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				

**Figura B2.1:** Formato elaborado para o mapeamento geotécnico em janelas de amostragem. Na parte inferior, na quarta coluna nomeada de “terminação” é descrito pelas letras “D” para indicar que a descontinuidade observada termina seu traço em outra estrutura, assim mesmo se utiliza a letra “R” para indicar que a terminação da descontinuidade ocorre em rocha intacta, e finalmente, se utiliza a letra “X” para indicar que a descontinuidade tem traço maior que às dimensões da janela. Por outro lado, o tipo de estrutura é descrito pelas letras: “J” para juntas, “S” para falhas, “B” para planos de acamamento, “V” para veios. Para a descrição dos minerais de preenchimento se utilizaram as duas primeiras letras do nome do mineral, i.e. “ca” para indicar calcita.



**Figura B3.1:** Mapa de localização das janelas de mapeamento geotécnico, incluindo os mapeamentos realizados anteriormente (Vargas e Hitchcock, 2000), o mapeamento realizado pelo mestrado no período de 2000 – 2003 e do ano 2005.

## ***Mapas elaborados***

---

- A.1 LINEAMENTOS REGIONAIS (ESCALA GRÁFICA)***
- A.2 LINEAMENTOS NO DISTRITO (ESCALA GRÁFICA)***
- A.3 PONTOS DE MAPEAMENTO NO DISTRITO (ESCALA GRÁFICA)***
- A.4 MAPA GEOLÓGICO – ESTRUTURAL DO DISTRITO***
- A.5 PERFÍS DA ÁREA DO DISTRITO***
- A.6 MAPA GEOLÓGICO – ESTRUTURAL DA MINA***
- A.7 PERFÍS DA MINA***



**Figura A.1:** Lineamentos regionais traçados, utilizando a imagem digital de terreno “Shuttle” na escala 1:100,000 com direção inicial de iluminação de 030°. A imagem foi obtida da internet (Universidade de Maryland).

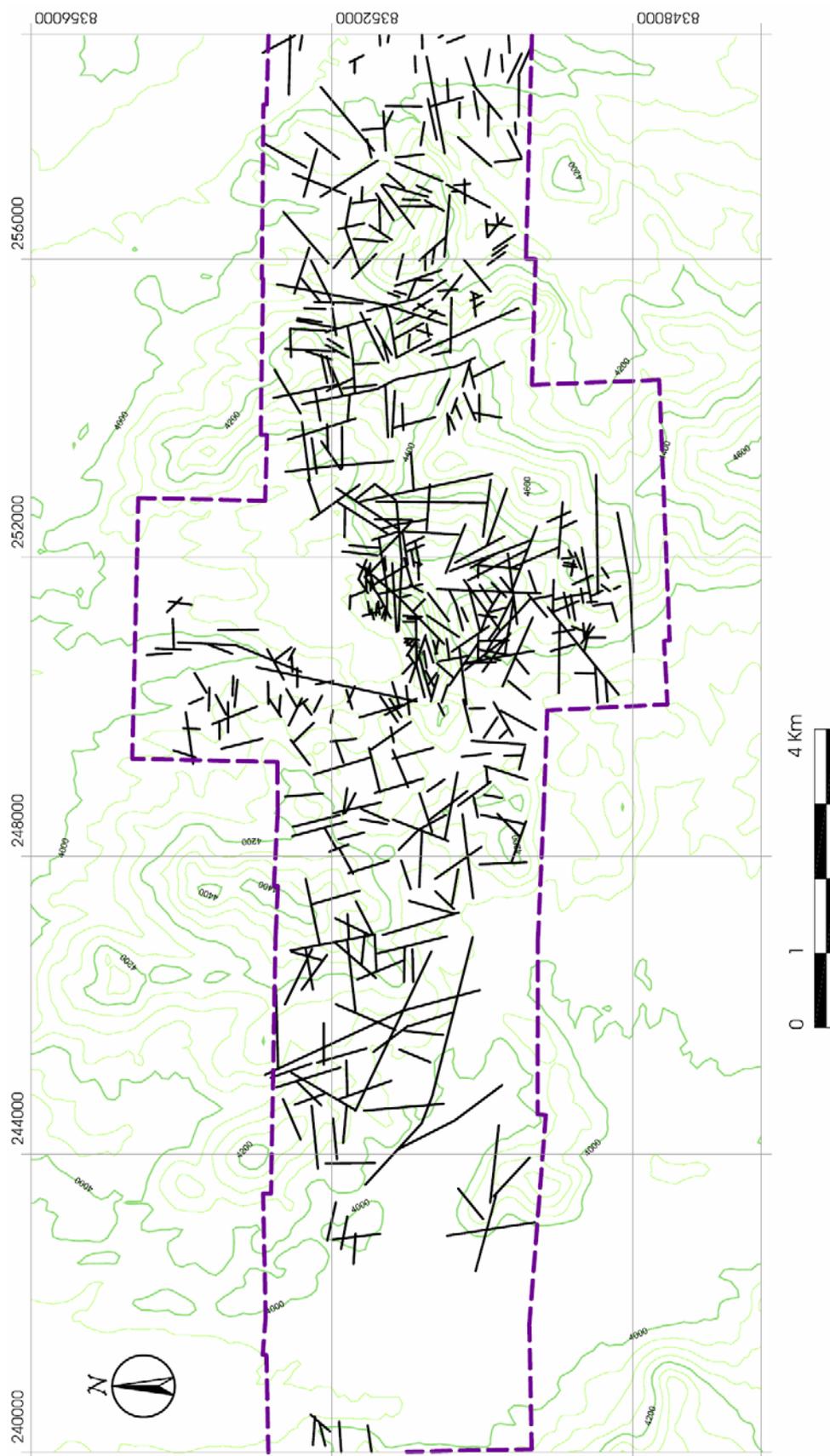


Figura A.2: Lineamentos traçados utilizando fotografias aéreas de escala 1:15000

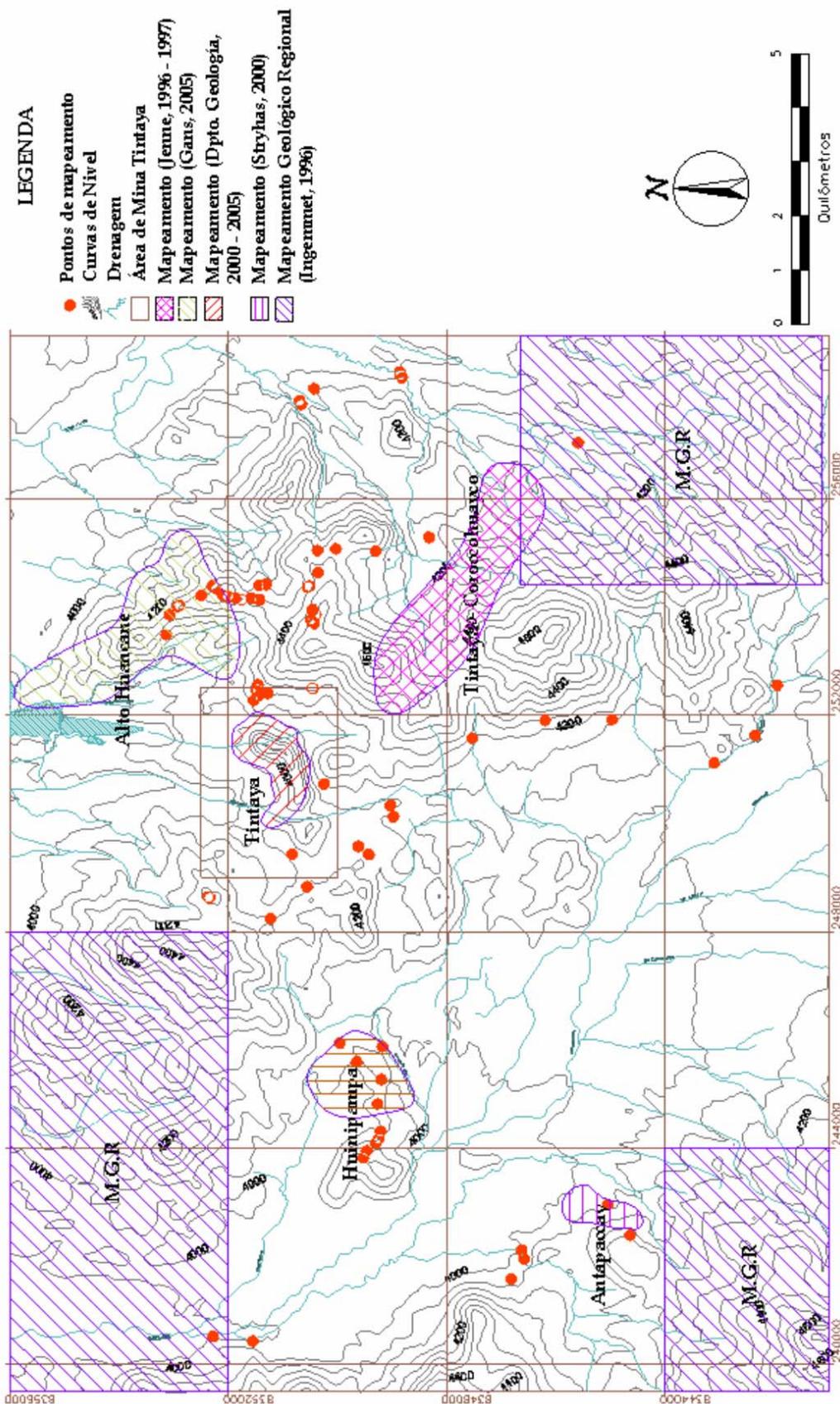


Figura A.3: Mapa de localização de pontos de mapeamento na área do distrito mineiro de Tintaya.

Mapa geológico – estrutural do distrito

## Perfis do distrito

## Mapa da Mina

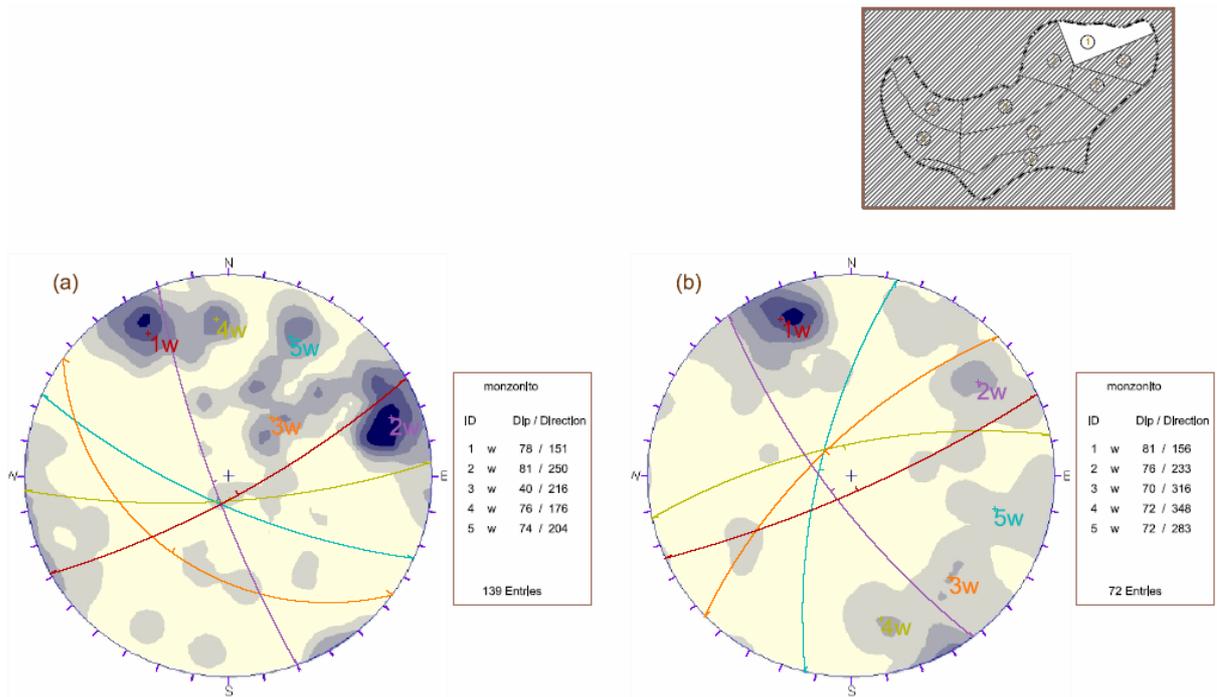
## Perfis da Mina

***Projeções Estereográficas  
dos Taludes da Mina de  
Tintaya***

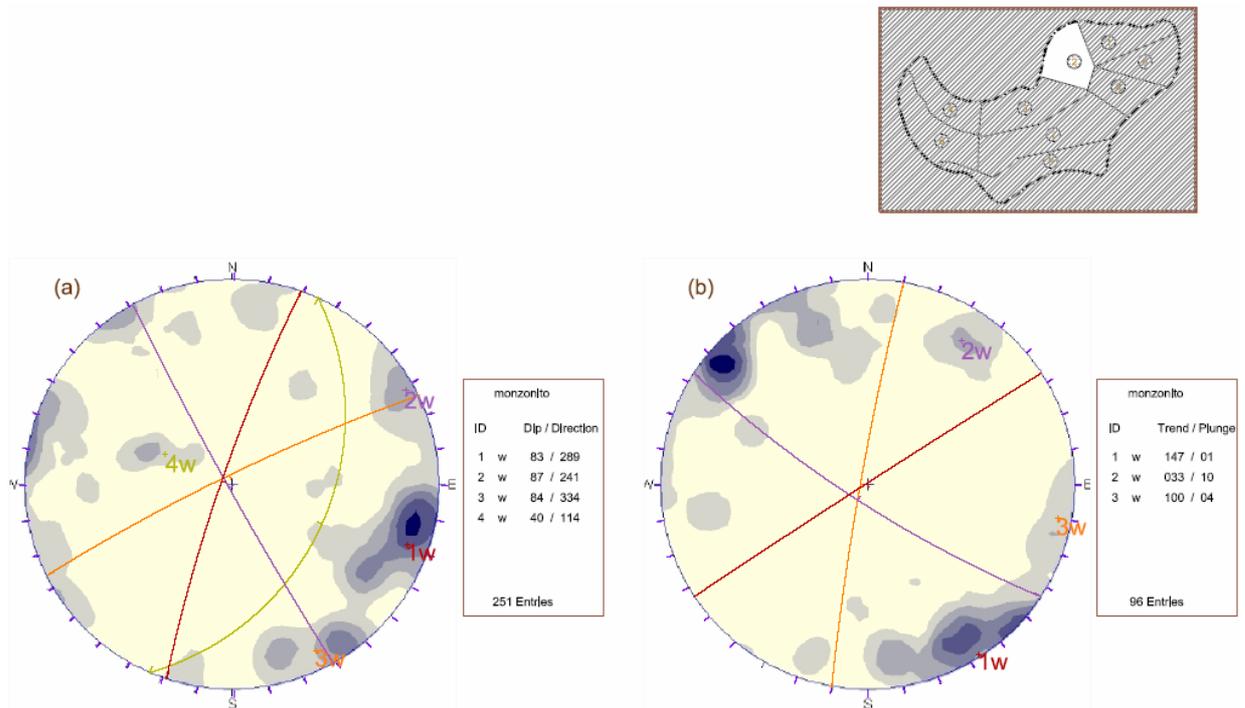
---

***C.1 DAS FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES***

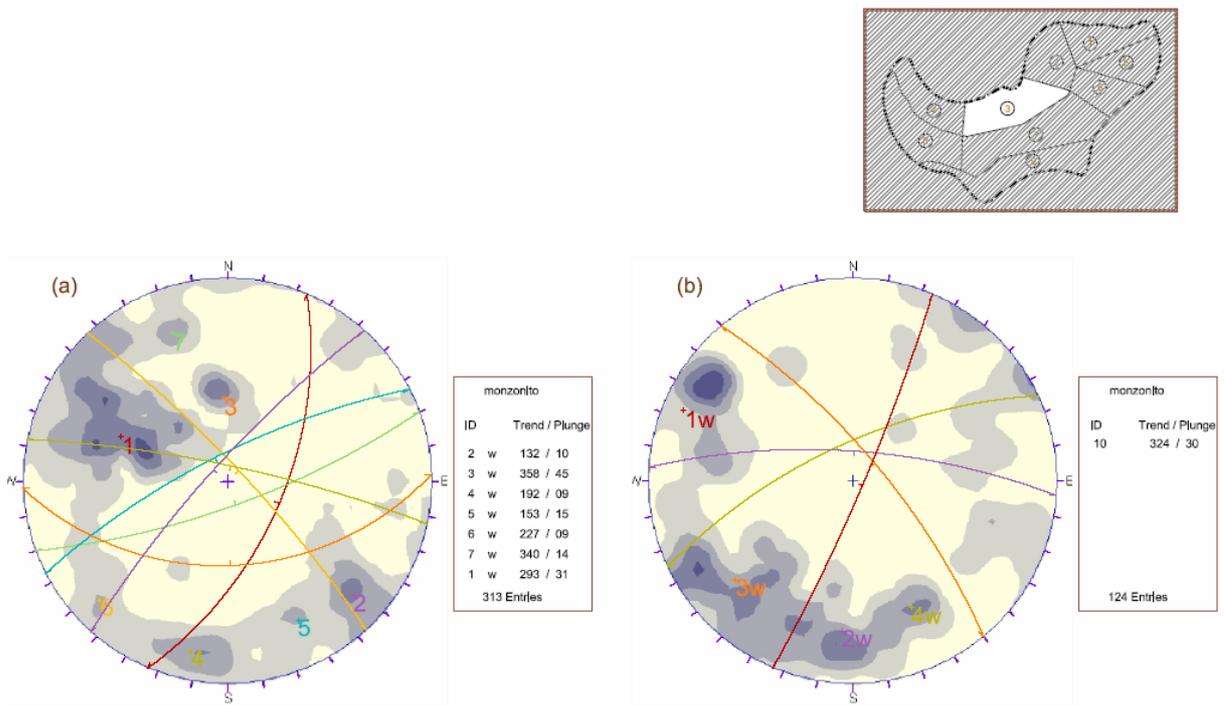
***C.2 DA ANÁLISE CINEMÁTICA***



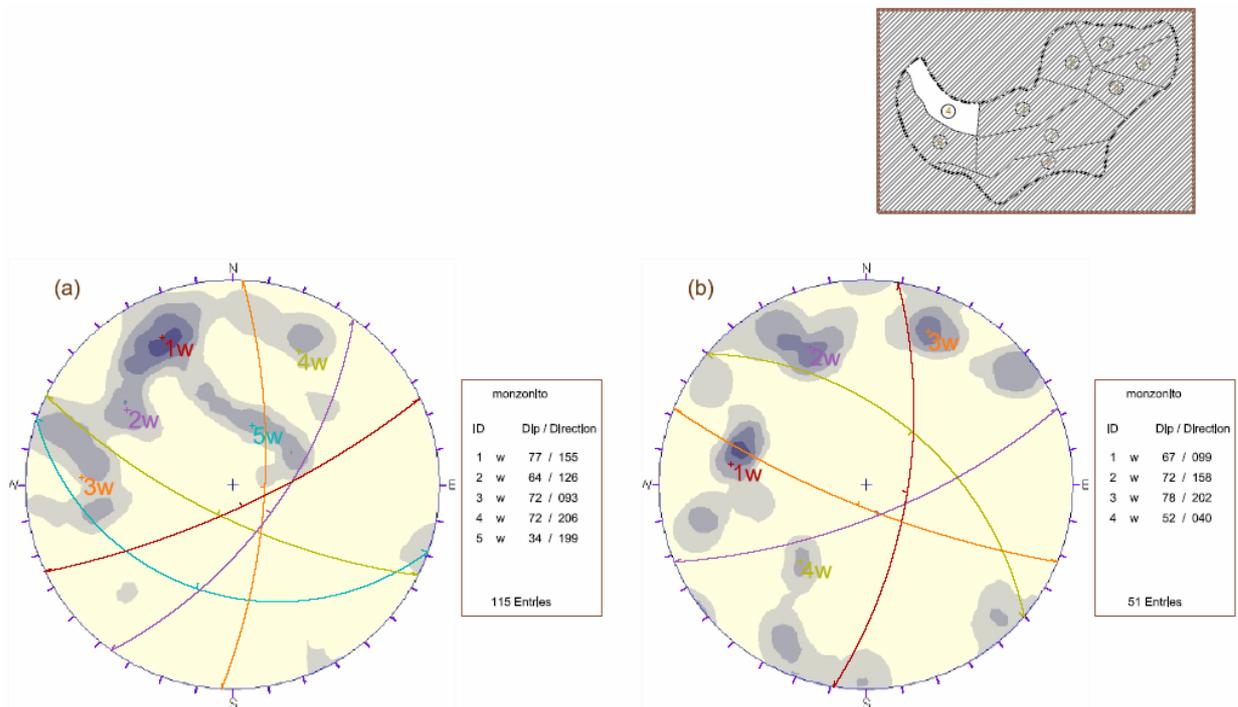
**Figura C1.1:** Estereogramas da definição de famílias do Setor 1. (a) Para as Juntas e (b) para as falhas secundárias.



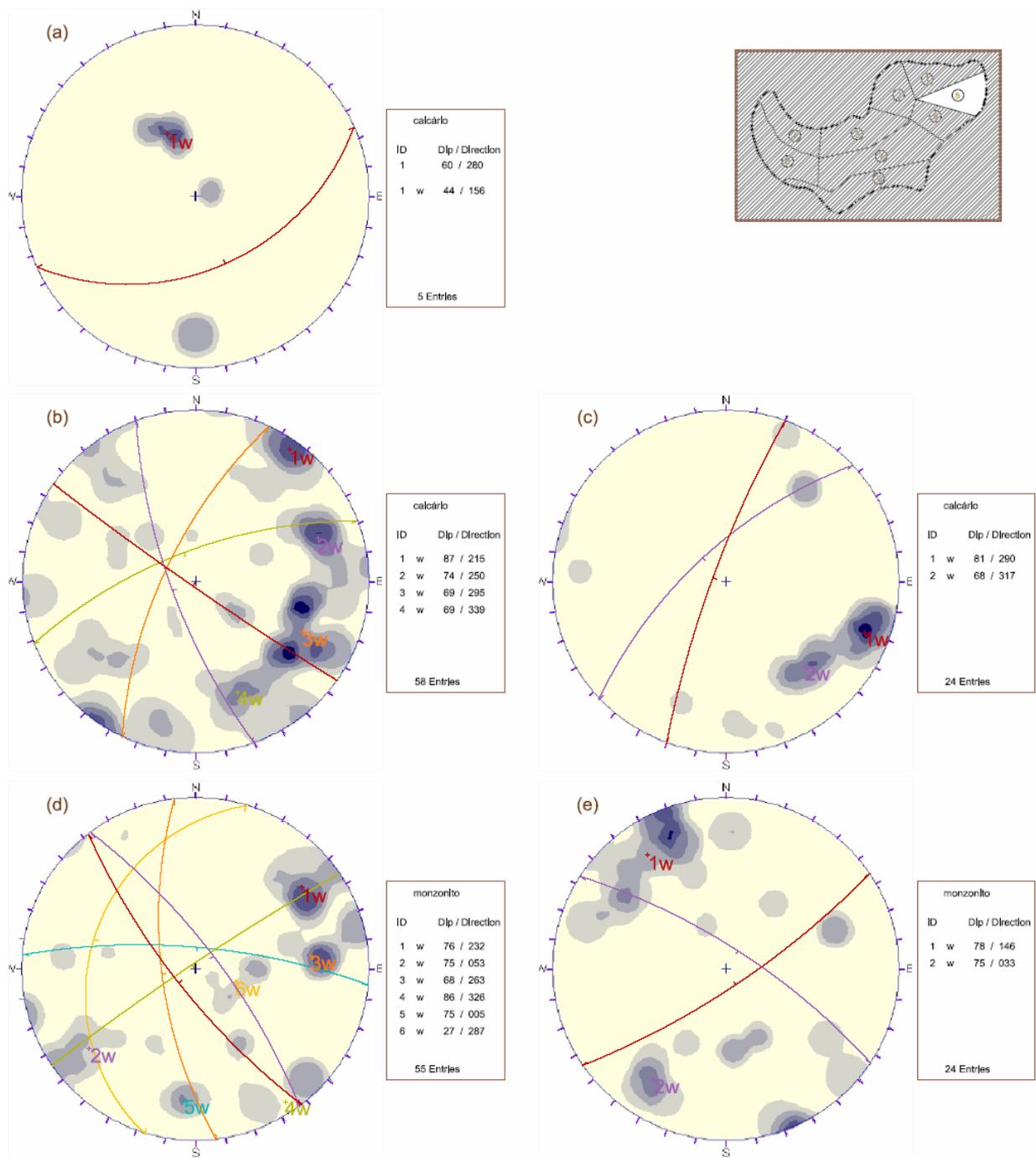
**Figura C1.2:** Estereogramas da definição de famílias do Setor 2. (a) Para as Juntas e (b) para as falhas secundárias.



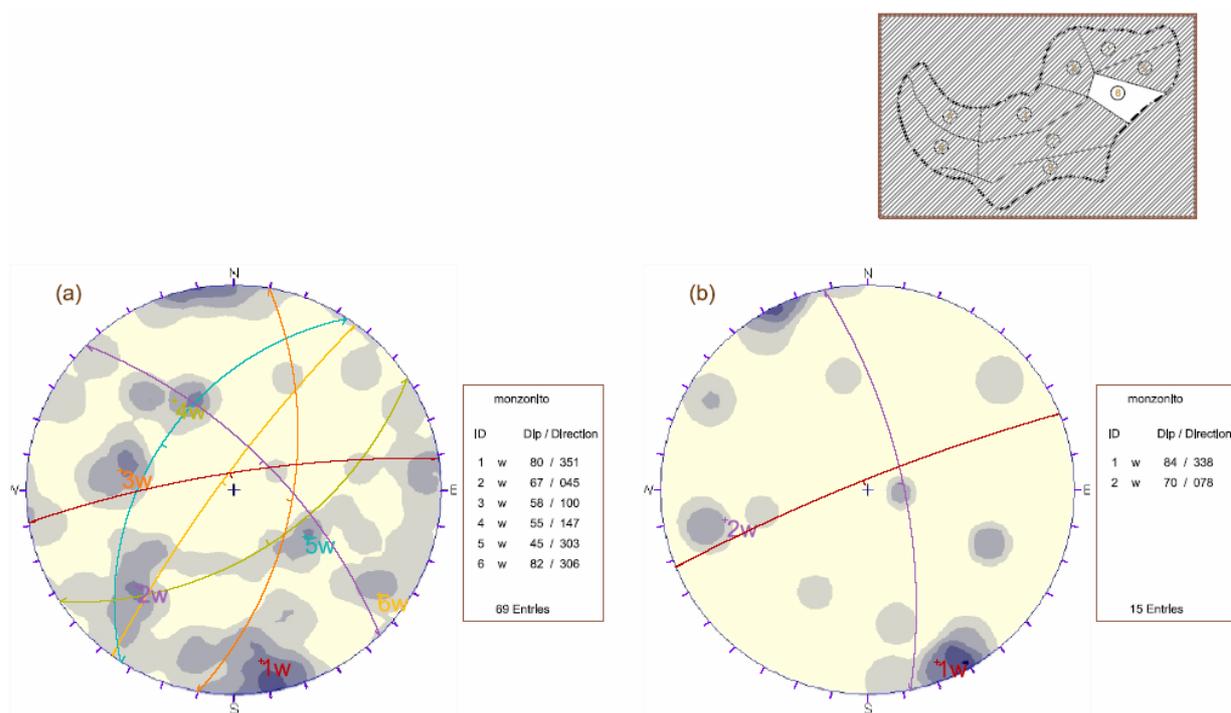
**Figura C1.3:** Estereogramas da definição de famílias do Setor 3. (a) Para as Juntas e (b) para as falhas secundárias.



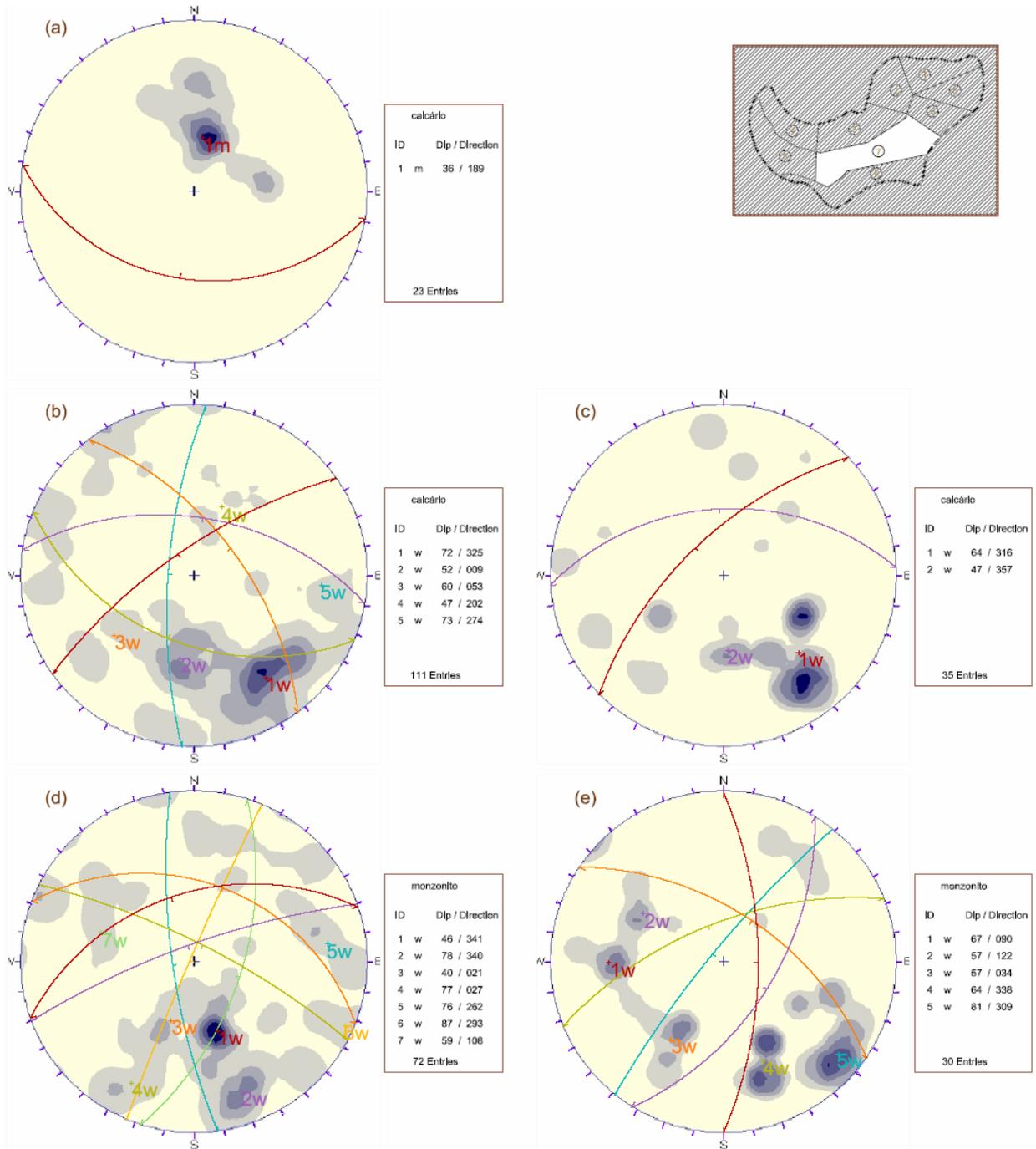
**Figura C1.4:** Estereogramas da definição de famílias do Setor 4. (a) Para as Juntas e (b) para as falhas secundárias.



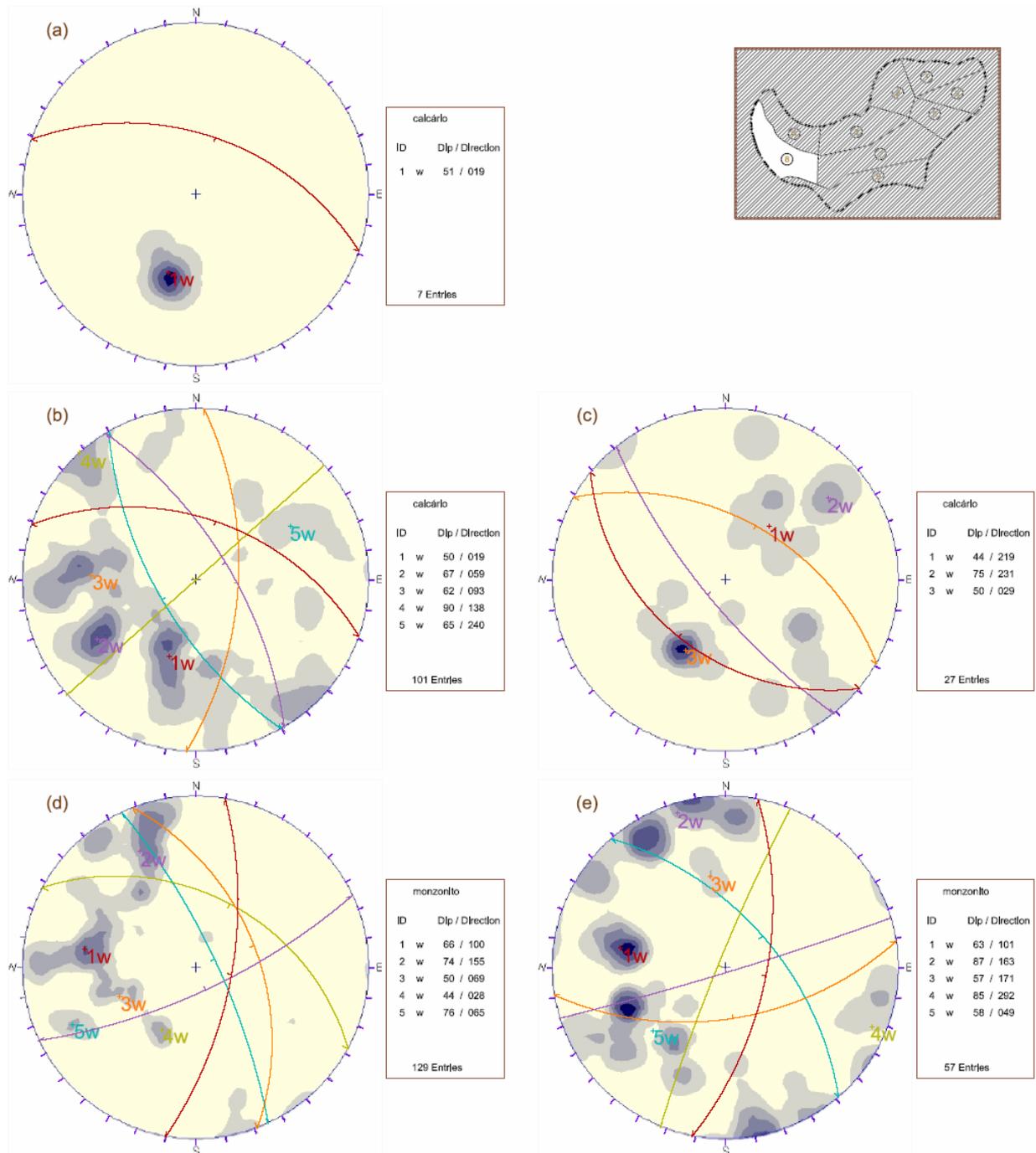
**Figura C1.5:** Estereogramas da definição de famílias do Setor 5. (a) Camadas em calcário. (b) Para as juntas em calcário. (c) Para as falhas em calcário. (d) Para as juntas em monzonito e (e) para falhas secundárias em monzonito.



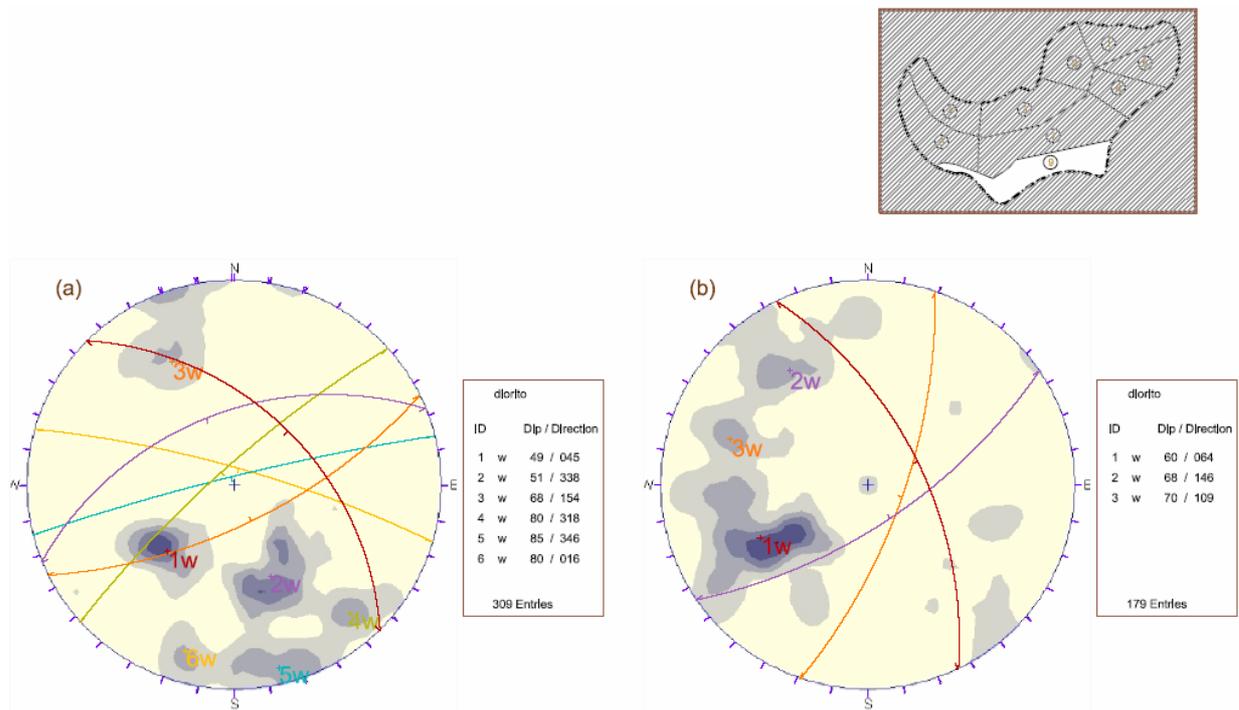
**Figura C1.6:** Estereogramas da definição de famílias do Setor 6. (a) Para as juntas e (b) para as falhas secundárias.



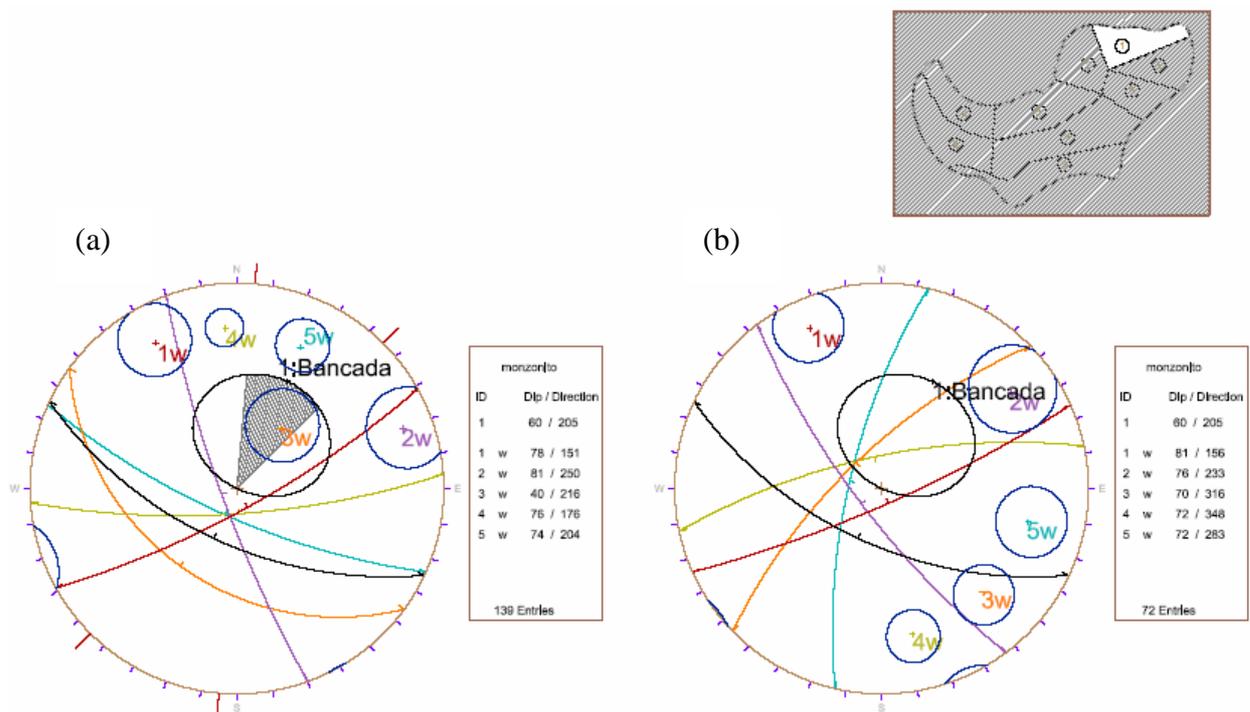
**Figura C1.7:** Estereogramas da definição de famílias do Setor 7. (a) Para as camadas em calcário. (b) Para as juntas em calcário. (c) Para as falhas secundárias em calcário. (d) Para as juntas em monzonito e (e) para as falhas secundárias em monzonito.



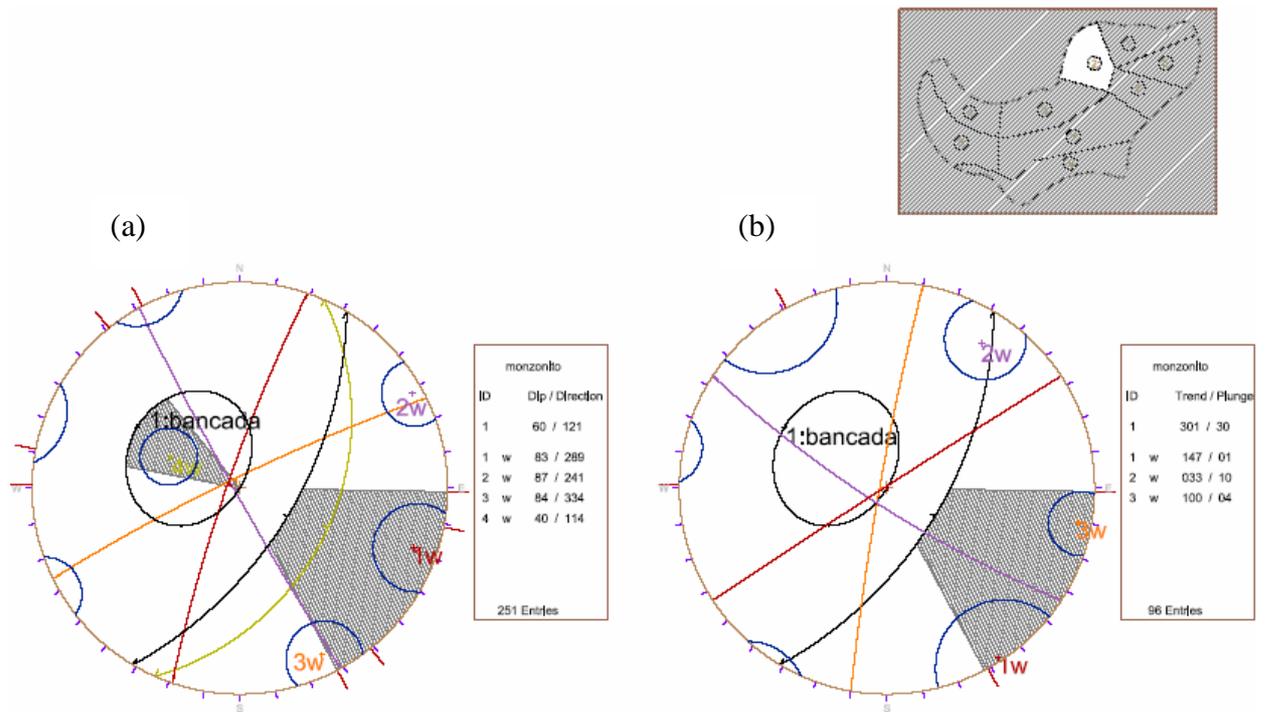
**Figura C1.8:** Estereogramas da definição de famílias do Setor 8. (a) Para as camadas em calcário. (b) Para as juntas em calcário. (c) Para as falhas secundárias em calcário. (d) Para as juntas em monzonito e (e) para as falhas secundárias em monzonito.



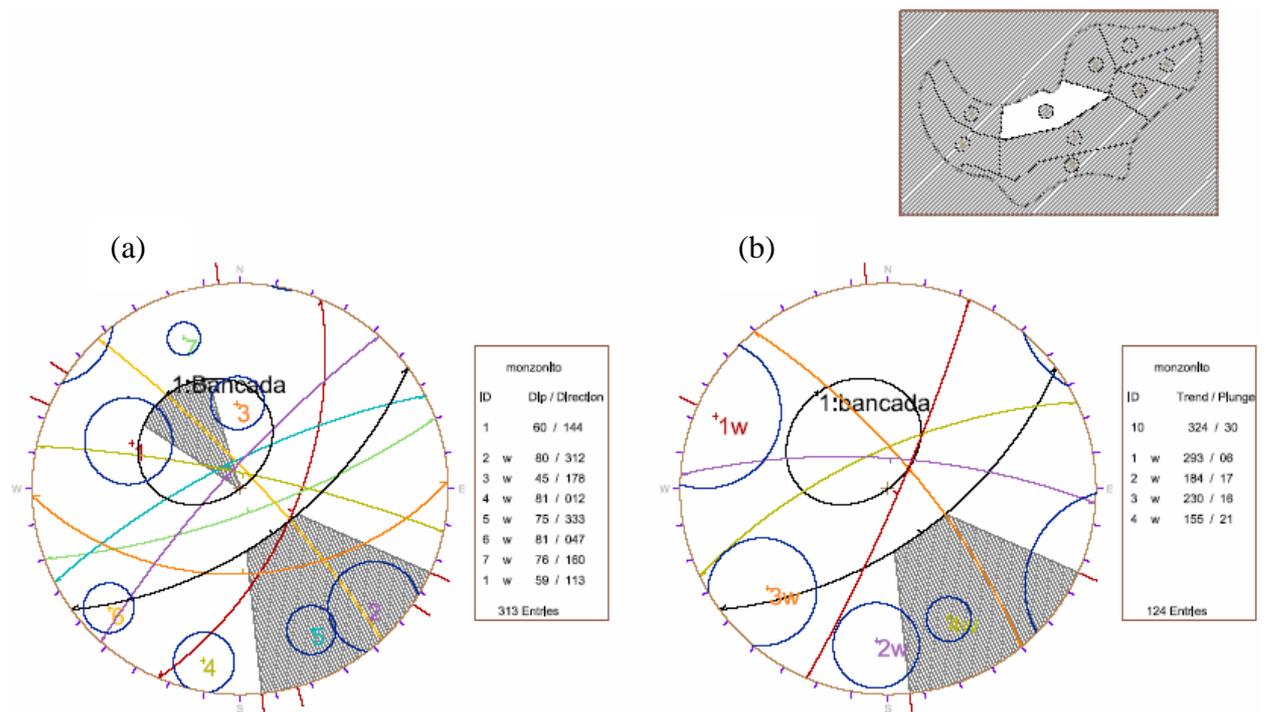
**Figura C1.9:** Estereogramas da definição de famílias do Setor 9. (a) Para as juntas e (b) para as falhas secundárias em diórto.



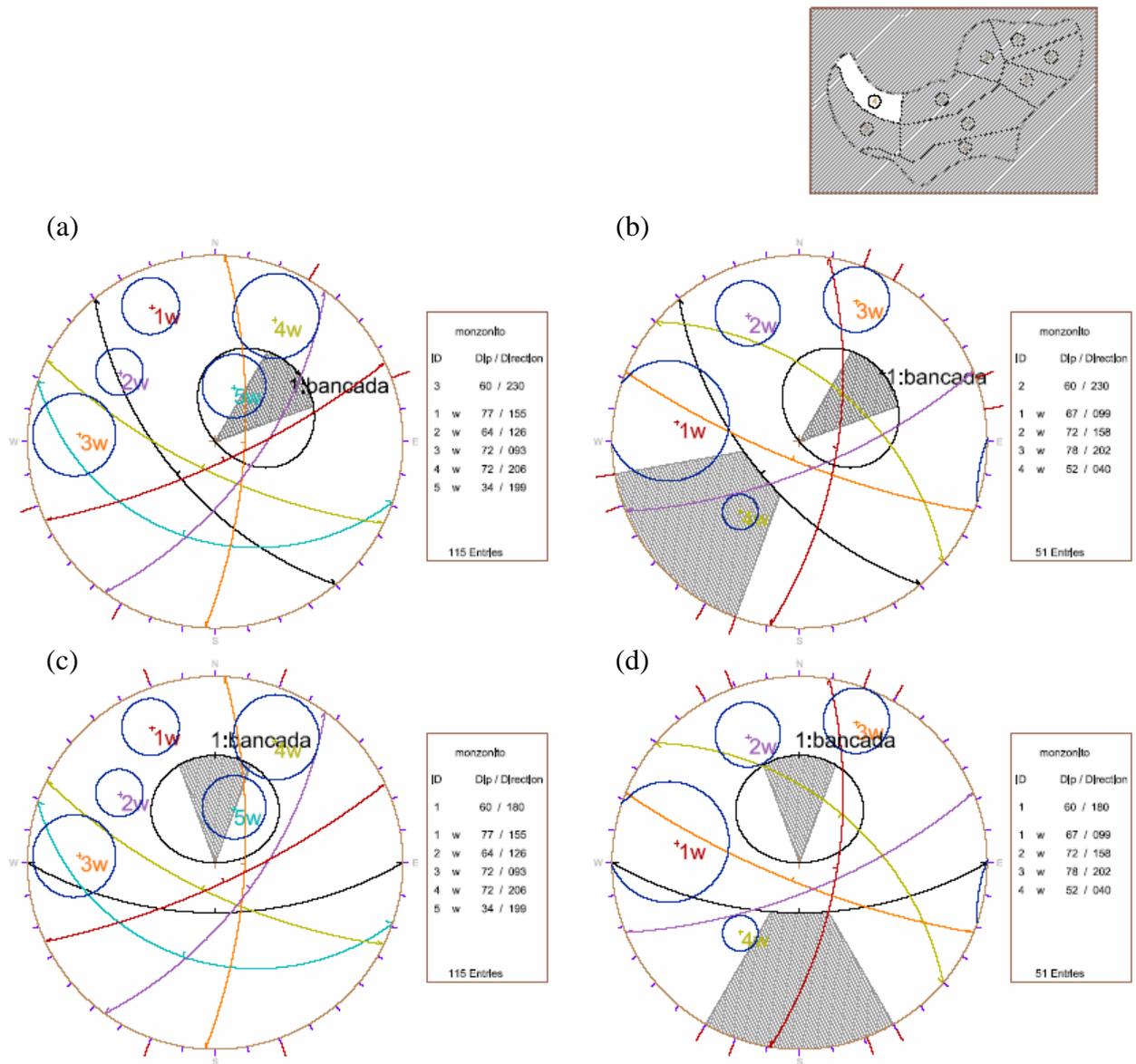
**Figura C2.1:** Análise cinemática do Setor 1: (a) Para as famílias de juntas e (b) para as famílias de falhas. O talude tem uma atitude de 60/205.



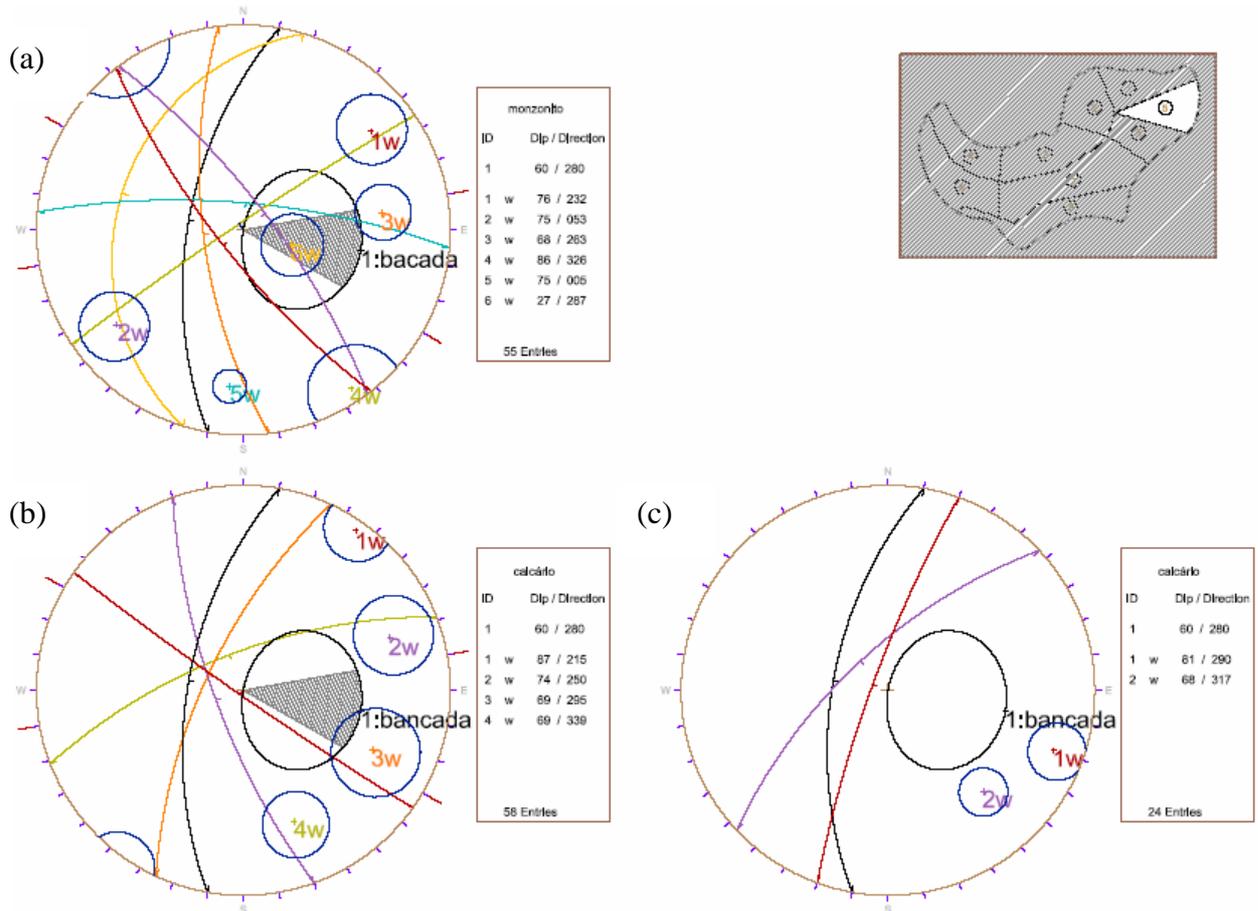
**Figura C2.2:** Análise cinemática do Setor 2. (a) Para as famílias de juntas e (b) para as famílias de falhas. O talude tem uma atitude de 60/121.



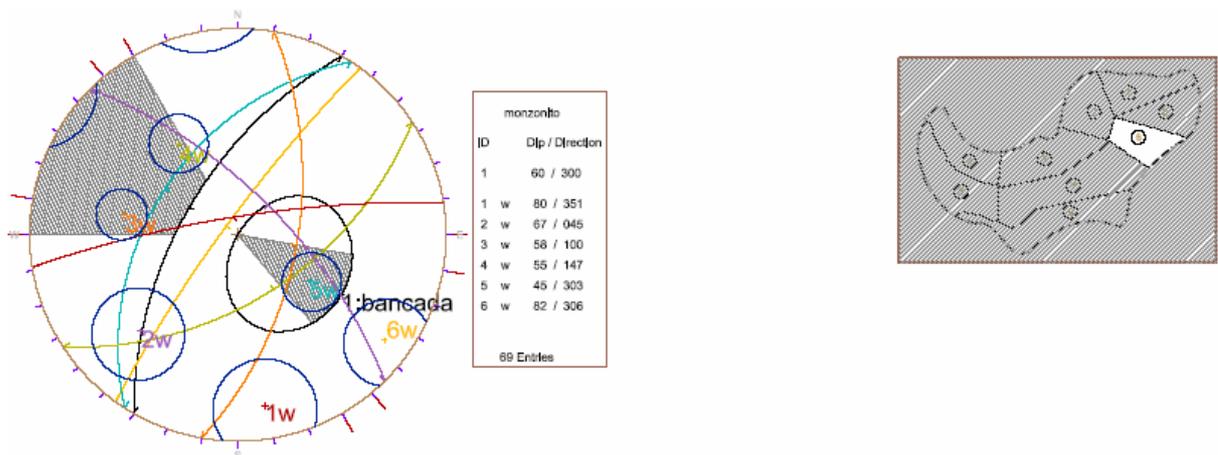
**Figura C2.3:** Análise cinemática do Setor 3. (a) Para as famílias de juntas e (b) para as famílias de falhas. O talude tem uma atitude de 60/144.



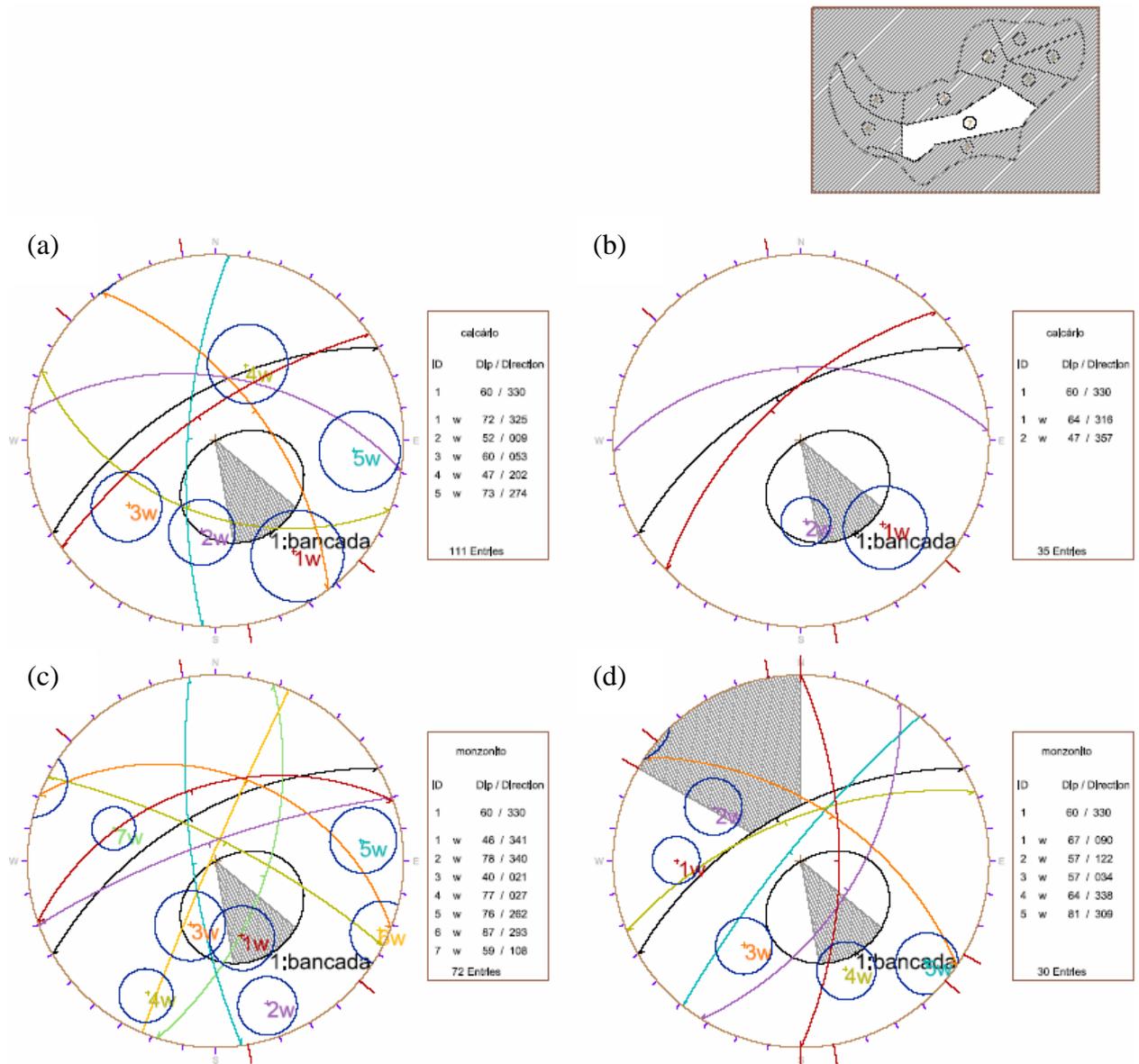
**Figura C2.4:** Análise cinemática do Setor 4. (a) Para as famílias de juntas e (b) para as famílias de falhas, com um talude de atitude 60/230. (c) Para as famílias de juntas e (d) para as famílias de falhas, com um talude de atitude 60/180.



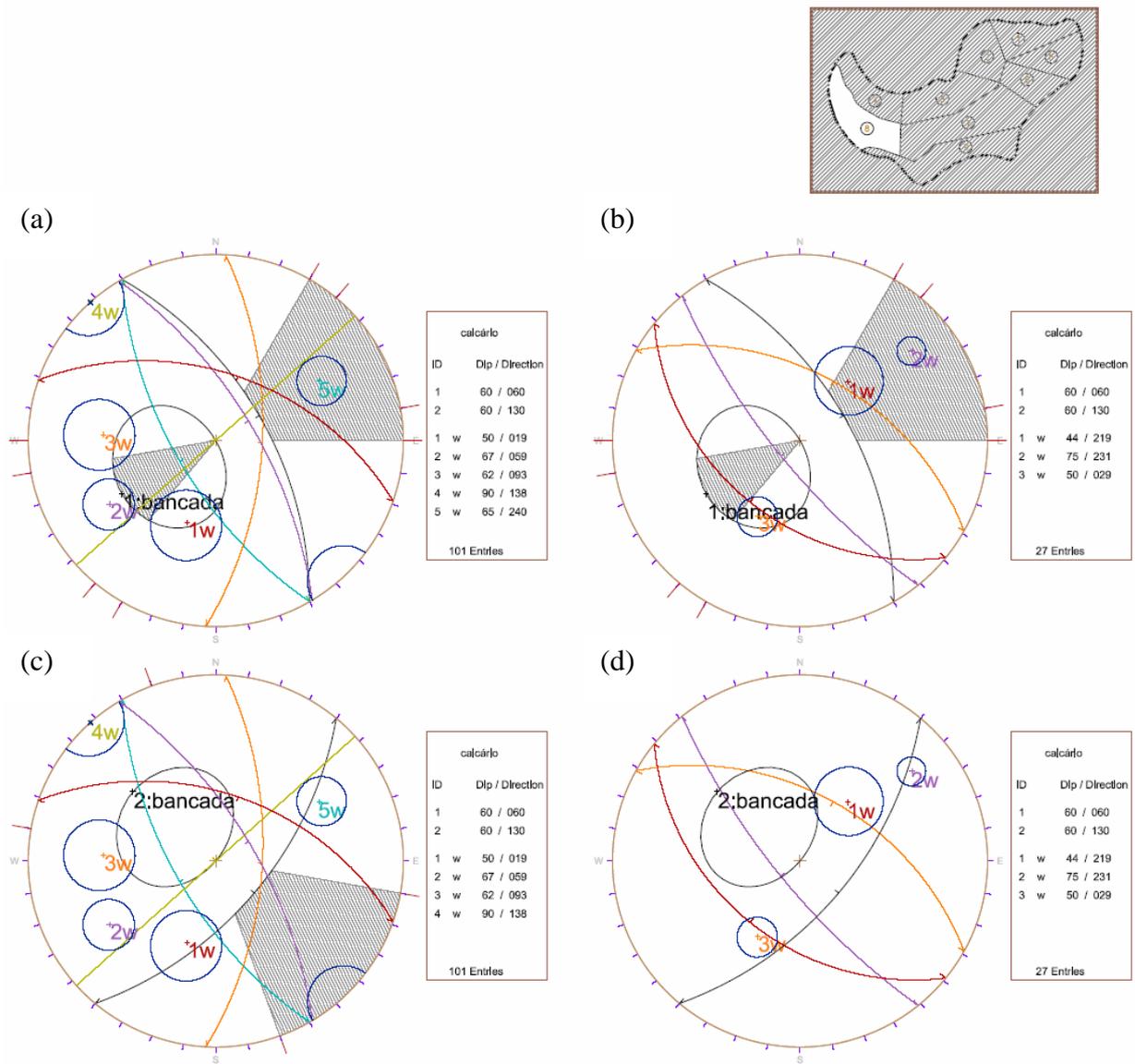
**Figura C2.5:** Análise cinemática do Setor 5. (a) Para as famílias de juntas em monzonito. (b) Para as famílias de juntas em calcário. (c) Para as famílias de falhas em calcário. O talude tem uma atitude 60/280.



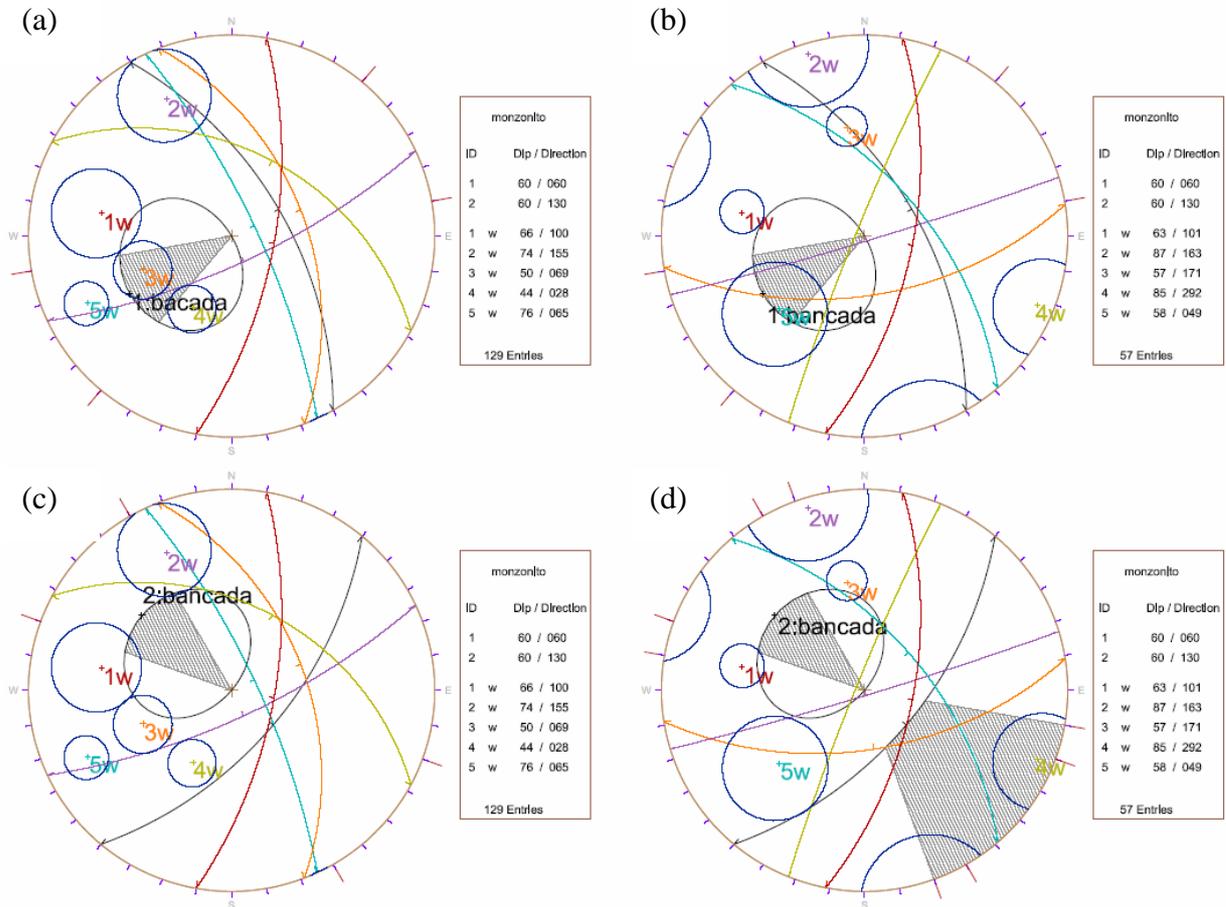
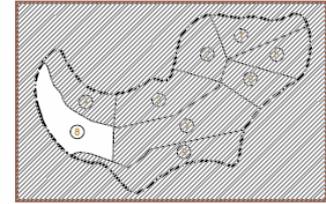
**Figura C2.6:** Análise cinemática do Setor 6, das famílias de juntas em monzonito. O talude tem uma atitude de 60/300.



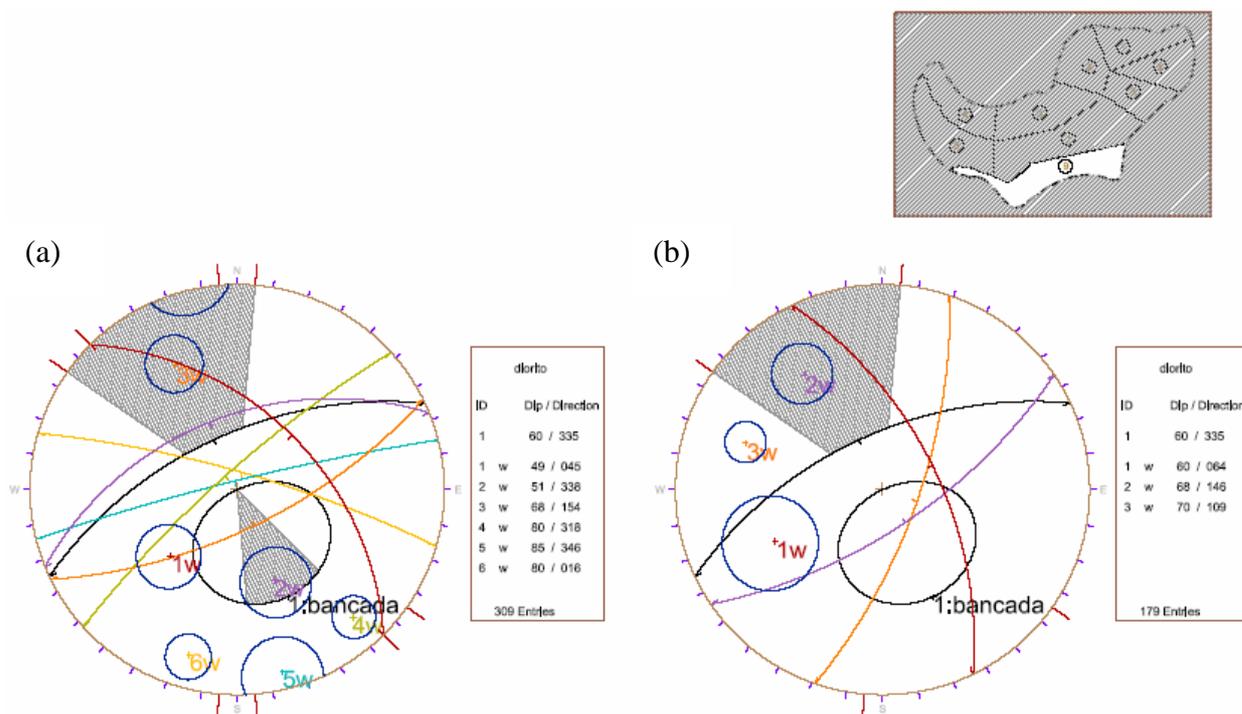
**Figura C2.7:** Análise cinemática do Setor 7. (a) Para as famílias de juntas e (b) para as famílias de falhas em calcário. (c) Para as famílias de juntas e (d) para as famílias falhas em monzonito. O talude tem uma atitude de 60/300.



**Figura C2.8:** Análise cinemática do Setor 8. (a) Para as famílias de juntas e (b) para as famílias de falhas em calcário, considerando um talude de atitude 60/060. (a) Para as famílias de juntas e (b) para as famílias de falhas em calcário, considerando um talude de atitude 60/130.



**Figura C2.9:** Análise cinemática do Setor 8. (a) Para as famílias de juntas e (b) para as famílias de falhas em monzonito, considerando um talude de atitude 60/060. (a) Para as famílias de juntas e (b) para as famílias de falhas em monzonito, considerando um talude de atitude 60/130.



**Figura C2.10:** Análise cinemática do Setor 9. (a) Para as famílias de juntas e (b) para as famílias de falhas em diorito. Considerando um talude de atitude 60/330.