



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

**GABRIEL ZANELLA VERÍSSIMO**  
**LAURA GOMES GIRÃO PAIVA**

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICA, TIPOS DE RUPTURA E**  
**ESTABILIDADE DE TALUDES NA MINA DE FERRO DO BONITO EM**  
**JUCURUTU - RN.**

**FORTALEZA**  
**2014**

**GABRIEL ZANELLA VERÍSSIMO**  
**LAURA GOMES GIRÃO PAIVA**

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICA, TIPOS DE RUPTURA E  
ESTABILIDADE DE TALUDES NA MINA DE FERRO DO BONITO EM  
JUCURUTU - RN.**

Relatório de Graduação submetido a  
Coordenação do Curso de Graduação em  
Geologia da Universidade Federal do Ceará  
(UFC) como parte dos requisito para  
conclusão do curso de Geologia.

Orientador: Prof. Dr. César Ulisses Vieira  
Veríssimo

FORTALEZA  
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Central do Campus do Pici

- 
- V637c Veríssimo, Gabriel Zanella.  
Caracterização geológico e geotécnica, tipos de ruptura e estabilidade de taludes na mina de ferro do Bonito em Jucurutu – RN / Gabriel Zanella Veríssimo, Laura Gomes Girão Paiva. – 2014.  
116 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Fortaleza, 2014.  
Orientação: Prof. Dr. Cesar D’Abronzo Martinelli
1. Taludes (Mecânica do solo). 2. Ferro. I. Paiva, Laura Gomes Girão. II. Título.
- CDD 551

GABRIEL ZANELLA VERÍSSIMO  
LAURA GOMES GIRÃO PAIVA

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICA, TIPOS DE RUPTURA E  
ESTABILIDADE DE TALUDES NA MINA DE FERRO DO BONITO EM JUCURUTU  
- RN.

Relatório de Graduação submetido a  
Coordenação do Curso de Graduação em  
Geologia da Universidade Federal do Ceará  
(UFC) como parte dos requisito para  
conclusão do curso de Geologia.

Aprovado em 06 de fevereiro de 2014

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Msc. Irla Gonsalvez Barbosa  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus, segundo o qual vivemos, nos movemos e existimos; pela oportunidade de desvendar os mistérios de sua criação, para conhecer nela a grandeza de sua insondável sabedoria, e pela dádiva da nossa amada pátria, rica em diversidade e imensa em grandeza, pela qual Ele nos revela a sua divindade e seu eterno poder. Agradecemos aos nossos pais pelo apoio e carinho e a toda nossa família: irmãos, avós, tios e primos envolvidos em nossa criação e crescimento pessoal.

Agradecemos a Universidade Federal do Ceará, em especial ao Departamento de Geologia, por nossa Formação, desenvolvimento intelectual e pelo apoio necessário a formulação do presente relatório. Somos muito gratos ao professor, orientador e amigo Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo que nos concedeu a orientação necessária para a realização deste trabalho e aos demais professores que compõem o corpo docente do Departamento de Geologia que contribuíram no desenvolvimento do nosso conhecimento geológico.

Agradecemos a Mhag Serviços e Mineração S/A<sup>®</sup>, empresa dona dos direitos minerários da área de estudo, por ter concedido os meios para a realização desta pesquisa, bem como a toda equipe de funcionários e técnicos por todo suporte dado. Agradecemos ao NUTEC - Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará, que tornou possível a realização dos ensaios tecnológicos.

Agradecemos também aos colegas e amigos de turma, com os quais compartilhamos muitos momentos de aprendizado, em sala de aula e em campo; em especial àqueles que nos ajudaram na confecção deste trabalho: Phaloma Reis, Diego Farias e Paulo Thales.

## RESUMO

A mina de ferro do Bonito, localizada próxima a sede-municipal de Jucurutu no Rio Grande do Norte está inserida no contexto tectônico da Província Borborema, no Domínio Rio Piranhas-Seridó, pertencente ao Domínio Rio Grande do Norte. Possui minérios de ferro de origem sedimentar e hidrotermal, metamorfizados e deformados, que, juntamente com quartzitos, xistos e mármore das formações Jucurutu e Serra dos Quintos, compõe uma estrutura sinformal quilométrica, com plano axial N-S e eixo mergulhando para sul. Os processos tectonometamórficos, hidrotermais e supergênicos que ocorreram durante a história de evolução da jazida, geraram estruturas dúcteis e rúpteis, provocando modificações nas propriedades físicas e geomecânicas dos minérios e rochas encaixantes. Este conjunto de feições geológicas influencia na resistência ao cisalhamento e estabilidade dos taludes durante as operações mineiras. As investigações geológico-geotécnicas das características e feições da rocha tornam possíveis a identificação de condicionantes que influenciem na estabilidade dos taludes rochosos da mina do Bonito. O comportamento geotécnico é indicado pela conformação das descontinuidades e tipos de rupturas gerados. A foliação principal de origem tectono-metamórfica ( $S_n$ ), comumente paralela e concordante ao acamamento sedimentar ( $S_0$ ), tem orientação preferencial variando entre E-W e NE-SW, mergulhando para SSE. Esta estrutura pode servir como plano de deslizamento e condicionar rupturas planares se considerarmos um avanço preferencial da lavra segundo direção predominante norte. Famílias de fratura de orientação N-S, NNW-SSE e NNE-SSW atuam no desprendimento lateral de blocos de rocha juntamente com a foliação principal. Também descontinuidades bem penetrativas de alto ângulo que mergulham para dentro de taludes de faces que mergulham para SSE condicionam tombamento de blocos. O estudo também mostrou que a presença das descontinuidades somadas a variação tipológica existente nos itabiritos da mina acarreta em diferentes comportamentos geomecânicos da rocha ligados ao grau de faturamento, grau de coerência, grau de alteração e a resistência do maciço rochoso. Foi constatado ainda que, para que o resultado dos estudos geotécnicos chegue próximo de representar a realidade observada em campo, é necessário a análise da contribuição conjunta da maior quantidade de fatores possíveis. Através disso fica clara a importância do conhecimento geológico no avanço da atividade mineira.

Palavras-chave: 1. Estabilidade de taludes. 2. Fatores geológicos. 3. Análise geológico-geotécnica.

## ABSTRACT

Located near the city of Jucurutu in the state of Rio Grande do Norte, the iron mine of Bonito is inserted into the tectonic framework of the Province Borborema. More specifically, in Domain Rio Piranhas-Seridó, neoproterozoic. The iron ores of the Bonito mine are sedimentary and hydrothermal origin, and were metamorphosed and deformed along with quartzites, schists and marbles of Jucurutu and Serra dos Quintos formation. These rocks compose together, a kilometric sinformal structure with axial plane oriented N-S and axis dipping southward. The tectono-metamorphic, hydrothermal and supergene processes that occurred during the evolution history of the deposit, generated ductile and brittle structures, causing changes in the physical and geomechanical properties of the ore and host rocks. This set of geologic features influences the shear strength and slope stability during mining operations. The geological and geotechnical investigations of the characteristics and features of the rock make it possible to identify conditions that may influence the stability of rock slopes of Bonito mine. The geotechnical behavior is indicated by the conformation of the types of discontinuities and disruptions generated. The main tectono-metamorphic foliation ( $S_n$ ), commonly parallel and concordant to the sedimentary layering ( $S_0$ ), has preferred orientation ranging between E-W and NE-SW, dipping SSE. This framework can serve as sliding plane and produce planar disruptions to consider preferential advancement of mining in north predominant direction. Sets of fractures with NS, NNW-SSE and NNE-SSW direction acting on the lateral detachment of rock blocks along with the main foliation. Also, penetrative discontinuities of high angle dipping into the slope faces plunging SSE direction to cause tipping blocks. The study also showed that the presence of discontinuities added to existing typological variation in itabirites mine leads to different geomechanical behavior of the rock linked to the degree of fracturing, coherence, alteration and the resistance of the rock mass. It was also found that an integrated analysis of the largest possible number of factors is necessary for the geotechnical approach the reality observed in the field. Through this it is clear the importance of geological knowledge in advance of mining activity.

Keywords: 1. Slope stability. 2. Geological factors. 3. Geological and geotechnical analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Mapa de acesso rodoviário do Estado do Rio Grande do Norte. Fonte: (Fonte: PRODEEM/CPRM, 2005). .....	20
Figura 2 - a) Estrada de terra que faz o acesso da BR 226 a Mina do Bonito. b) Morro do Bonito em detalhe, onde se localiza a mina do Bonito (Fonte: Autores).....	21
Figura 3 - Foto aérea dos depósitos de ferro da Mina do Bonito. O polígono em vermelho mostra a poligonal da área estudada, cujas coordenadas estão descritas na Tabela 1. (Fonte: Mhag Serviços e Mineração S/A).....	21
Figura 4 - Compartimentação tectônica e principais lineamentos da Província Borborema. (SANTOS 2004) .....	23
Figura 5 - Mapa simplificado da porção setentrional da Província Borborema (adaptado de FETTER et al. 2000) mostrando seus principais blocos crustais. ....	25
Figura 6 - Sistema Orós Jaguaribe no Ceará e seus limites como divisão sugerida por PARENTE & ARTHAUD, 1995 (adaptado de CAVALCANTE, 1999). ....	26
Figura 7 - Mapa Geológico Regional do Rio Grande do Norte 2006. ANGELIM et al. (2006), modificado por BARBOSA (2013). ....	34
Figura 8 - Componentes geométrico de um talude (Fonte: Autores). ....	35
Figura 9 - Definição de orientação espacial em estruturas geológicas planares - $\alpha$ : azimute do plano. (Modificado de MAGALHÃES e CELLA, 1998 apud PINOTTI, 2011). ....	42
Figura 10 - Formas de representação de um plano no Diagrama de Schmidt-Lambert. P é a projeção polar do plano, c é sua projeção ciclográfica (ciclograma) e R é a projeção da reta pendente do mergulho (PINOTTI, 2011). ....	43
Figura 11 - Operação de corte de amostras em lamina diamantada realizadas no NUTEC. Técnico operando a máquina de corte (Fonte: Autores). ....	50
Figura 12 - Medição das arestas do corpo de prova cúbico no laboratório do NUTEC com régua digital (Fonte: Autores).....	50



Figura 13 - Realização do ensaio de compressão uniaxial realizada na Máquina Universal de Ensaio, no laboratório do NUTEC (Fonte: Autores). .....	51
Figura 14 - a) Amostra de mão de gnaiss, contendo porfiroclastos róseos de microclina, biotita e anfibólio. b) Bloco de gnaiss em afloramento, onde é possível observar o bandamento gnáissico, porém incipiente (coordenadas: 723614; 9350846) (Fonte: Autores). .....	55
Figura 15 - a) Contato entre gnaiss e pelitos (coordenadas: 723614; 9350846). b) Contato entre gnaiss e itabiritos, marcado por zonas centimétricas de muscovita-xistos e lentes de quartzito ferruginoso (coordenadas 723678; 9351024) (Fonte: BARBOSA, 2013). .....	55
Figura 16 - Fotomicrografia do gnaiss. a) Nicóis descruzados (4x de aumento); b) Nicóis cruzados (4x de aumento). Em destaque minerais de Quartzo (Qtz), Plagioclásio (Pl), Biotita (Bi) e microclina (Kf) (Fonte: Autores). .....	56
Figura 17 - a) Itabiritos martílicos exibindo estrutura dobrada (Fonte: BARBOSA, 2013). b) Bandada (Fonte: Autores). .....	58
Figura 18 - a) Lâmina delgada de itabirito martílico com nicóis descruzados (4x de aumento); b) Lâmina delgada de itabirito martílico com nicóis cruzados (4x de aumento). Em destaque minerais de Quartzo (Qtz) e Opacos (Opc); c) Lâmina polida de itabirito martílico com aumento de 4x; d) Lâmina polida de itabirito martílico aumento de 10x. Em destaque minerais de Quartzo (Qtz), magnetita (Mg) e goethita (Go) (Fonte: Autores). ....	58
Figura 19 - a) amostra de itabiritos anfibolíticos apresentando estrutura bandada proveniente de furo de sonda; b) de itabiritos anfibolíticos apresentando estrutura bandada amostra colhida em afloramento (Fonte: Autores). .....	59
Figura 20 - a) Lâmina delgada de itabirito anfibolítico com nicóis descruzados (aumento de 4x); b) Lâmina delgada de itabirito anfibolítico com nicóis cruzados (aumento de 4x). É possível observar o bandamento marcante com bandas de quartzo (Qtz) intercaladas com bandas de minerais opacos (Opc) e Anfibólios férricos (Anf); c) Lâmina delgada de itabirito anfibolítico com nicóis descruzados (aumento de 4x); d) Lâmina delgada de itabirito anfibolítico com nicóis cruzados (aumento de 4x). Em destaque minerais de Quartzo (Qtz), Opacos (Opc) e Anfibólios férricos (AnfF); e) Lâmina polida de itabirito	

anfibolítico com aumento de 4x; f) Lâmina polida de itabirito anfibolítico com aumento de 10x. Em destaque minerais de Quartzo (Qtz) e Magnetita (Mg) (Fonte: Autores). .....	60
Figura 21 - a) Amostra de itabirito anfibolítico goethítico com estrutura bandada proveniente de furo de sonda (Fonte: BARBOSA, 2013). b) Amostra de itabiritos anfibolíticos goethíticos com estrutura bandada proveniente de afloramento (Fonte: Autores). .....	61
Figura 22 - a) Lâminas delgadas de itabirito anfibolítico goethítico com nicóis descruzados (aumento de 4x). b) Lâminas delgadas de itabirito anfibolítico goethítico com nicóis cruzados (aumento de 10x). Em destaque minerais de quartzo (Qtz) e opacos (Opc). c) e d) Lâminas polida de itabirito anfibolítico goethítico com aumento de 20x. Em destaque minerais de quartzo (Qtz), goethita (Go), magnetita (Mg) e hematita (He) (Fonte: Autores). .....	62
Figura 23 - Itabiritos martíticos specularíticos com estrutura bandada. a) Amostra recolhida em furo de sonda pela empresa (Fonte: BARBOSA, 2013). b) Amostra de mão encontrada em afloramento (coordenadas 723626; 9350422) (Fonte: Autores). .....	63
Figura 24 - a) Lâmina delgada (Nicóis cruzados, aumento de 10x) de itabirito martítico specularítico. Em destaque os minerais quartzo (Qtz) e opacos (Opc). b) Lâmina polida (aumento de 20x) do itabirito. Em destaque os minerais quartzo (Qtz), martita (Ma) e specularita (Esp) (Fonte: BARBOSA, 2013). .....	63
Figura 25 - Fotografia de uma das cavas onde o minério magnetítico estava presente antes de ser lavrado (Coordenadas: 723767; 9350692) (Fonte: Autores). .....	64
Figura 26 - a) Skarn com estrutura maciça, apresentando feições cavernosas e preenchidas por minérios de ferro (Coordenadas: 724163; 9350586). b) Skarn apresentando estrutura levemente bandada (Coordenadas: 723531; 9350600) (Fonte: Autores). .....	65
Figura 28 - a) Amostra de mãos de mármore de granulação média; b) afloramento de mármore (coordenadas: 723495; 9350170) (Fonte: Autores). .....	67
Figura 29 - Lâminas delgadas de mármore. a) Nicóis descruzados (aumento de 10x); b) Nicóis cruzados (aumento de 10x). Em destaque minerais de Dolomita (Dol) e Muscovita (Mc) (Fonte: Autores). .....	68

Figura 30 - a) Fotografia de quartzo mica xisto onde é possível observar o aspecto foliada da rocha. b) Fotografia mostra o contato entre o quartzo mica xisto abaixo, de coloração mais clara, e o material coluvionar acima, vermelho (Coordenadas: 723491; 9350650) (Fonte: Autores).....	69
Figura 31 - Lâminas delgadas de biotita-muscovita-quartzo xisto. a) Nicóis descruzados (aumento de 4x); b) Nicóis cruzados (aumento de 4x). Em destaque minerais de quartzo (Qtz), muscovita (Mc), biotita (Bi) e opacos (Opc).....	69
Figura 32 - a) Afloramento em corte de estrada (Coordenadas: 723584; 9350742) mostrando o contato entre o quartzito ferruginoso (qf), o quartzo mica xisto (qmx), e o colúvio (col). b) Bloco de quartzito ferruginoso (Fonte: Autores).....	70
Figura 33 - Lâminas delgadas de quartzito. a) Nicóis descruzados (aumento de 4x); b) Nicóis cruzados (aumento de 4x). Em destaque minerais de quartzo (Qtz), Muscovita (Mc) e Opacos (Opc). .....	70
Figura 34 - União de imagens aéreas mostra o contexto estrutural da área estudada. Estrutura sinformal visível, mergulhando para sul (pontilhado vermelho) (Fonte: Mhag Serviços e Mineração S/A).....	71
Figura 35 - Estereogramas Schimidt-Lambert da foliação principal. A esquerda, diagrama de contorno da densidade dos polos. A direita, diagrama de polos. Representação da ciclográfica do plano médio em ambos os diagramas.....	72
Figura 36 - Representação da foliação principal ( $S_n$ ) e clivagens de crenulação ( $S_{n+1}$ ). Notar dissolução de sílica ao longo do plano $S_{n+1}$ demarcado (Fonte: Autores).....	73
Figura 37 - Estereogramas Schimidt-Lambert das fraturas. A esquerda, diagrama de roseta indicando as principais famílias. A direita, diagrama de contorno da densidade dos polos. ....	73
Figura 38 - Detalhe da amostra de itabirito martítico especularítico (Coordenadas 723626; 9350422). Na amostra é possível observar o aspecto laminar dos minerais presentes, marcado pela grande quantidade de specularita na rocha. (Fonte: BARBOSA, 2013) .....	76
Figura 39 - a) Magnetítico maciço encontrado na região em furo de sonda (Fonte: BARBOSA, 2013); b) Amostra de skarn coletada em campo. ....	78

Figura 40 - Foliação (Sn) mergulhando para sul em taludes com face mergulhando para sul.....	80
Figura 41 - Maciço da borda da cava de minério hidrotermal. Caderneta indica o plano da foliação Sn e martelo indica o plano da foliação Sn+1 (Fonte: Autores). ....	81
Figura 42 - Corpo-de-prova com a marcação de setas indicando a face do cubo que sofrerá a pressão do esforço (sigma 1). (Fonte: Autores).....	87
Figura 43 - Amostra GT 37. a) cubo 4, b) cubo 5. Notar diferença de espessura do bandamento. (Fonte: Autores).....	87
Figura 44 - Amostra GT 5A. Aumento da resistência nos corpos da direita para esquerda. a) cubo 11 (R=13,6MPa); b) cubo 10 (R=32,3MPa) e c) cubo 12 (R=89,0MPa). (Fonte: Autores).....	88
Figura 45 - Amostra GT 61. a) cubo 16; b) cubo 17. O corpo 16 apresenta bandas mais espessa de sílica cristalizada que o corpo 17. (Fonte: Autores) .....	88
Figura 46 - Esquema ilustrando a influência de uma estrutura planar na maior ou menor resistência à compressão uniaxial de uma rocha. P = compressão. (IAMAGUTI, 2001). ..	89
Figura 47 - Amostra GT 12. Aumento da resistência nos corpos da esquerda para a direita. a) cubo 14; b) cubo 9; c) cubo 13. (Fonte: Autores).....	89
Figura 48 - Amostra GT 32. Aumento da resistência nos corpos da esquerda para a direita. a) cubo 27 (R=15,5); b) cubo 25 (R=20,4); c) cubo 26 (R=86,4). (Fonte: Autores).....	90
Figura 49 - Amostra GT 55. Aumento da resistência nos corpos da esquerda para a direita. a) cubo 23 (R=19,2); b) cubo 22 (R=67,1); c) cubo 21 (R=116,3). (Fonte: Autores) .....	90
Figura 50 - Amostra GT 16A. Aumento da resistência nos corpos da esquerda para a direita. a) cubo 6 (R=8,8); b) cubo 7 (R=12,3); c) cubo 8 (R=48,8). (Fonte: Autores).....	91
Figura 51 - Amostra GT 16B. Aumento da resistência nos corpos da esquerda para a direita. a) cubo 20 (R=46,8); b) cubo 19 (R=54,9); c) cubo 24 (R=89,8). (Fonte: Autores) .....	91

Figura 52 - Amostra GT 63. Cubo 15. As bandas estão dobradas e possuem espaçamento irregular. (Fonte: Autores).....	92
---	----

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de movimentos de massa e processos correlatos (GOMES, 2003). .....	39
Tabela 2 - Caracterização dos tipos de ruptura (AGUILERA, 2009).....	41
Tabela 3 - Parâmetros para a classificação do Grau de Coerência ou Consistência. ....	47
Tabela 4 - Parâmetros para a classificação do Grau de Fraturamento. ....	48
Tabela 5 - Parâmetros para a classificação do Grau de Alteração.....	48
Tabela 6 - Dados dos cubos ensaiados, por amostra. Destacado em itálico os maiores valores. ....	94

### LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Coordenadas (Geográficas e UTM) da poligonal de estudo da Mhag em Sistema Geodésico Sul-americano SAD 69. ....	19
Quadro 2 - Coordenadas (UTM) das poligonais correspondentes as áreas de estudo geológico-estrutural e geotécnico. ....	19
Quadro 3 - Vias de acessos até a área estudada, partindo de Fortaleza (CE).....	20
Quadro 4 - Vias de acessos até a área estudada, partindo de Natal (RN). ....	20
Quadro 5 - Relações tectonoestratigráficas das unidades litoestratigráficas do Paleoarqueano ao Ordoviciano no Estado do Rio Grande do Norte ANGELIM et al. (2006). ....	28
Quadro 6 - Tipologia dos minérios itabiríticos primários (Fonte: BARBOSA, 2013).....	66
Quadro 7 - Tipologia dos minérios itabiríticos secundários. (Fonte: BARBOSA, 2013)....	66
Quadro 8 - O Quadro mostra a relação entre a tipologia dos minérios de ferro e as estruturas presentes, que funcionam como condicionantes de estabilidade de taludes. ....	79

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1 Justificativa</b> .....	17
<b>1.2 Objetivos</b> .....	18
<b>1.3 Localização e Acessos</b> .....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	23
<b>2.1 Geologia Regional</b> .....	23
<b>2.1.1 Província Borborema</b> .....	23
<b>2.1.2 Domínio Rio Grande do Norte</b> .....	25
<b>2.1.2.1 Domínio Rio Piranhas-Seridó</b> .....	27
<b>2.1.2.1.1 Complexo Caicó</b> .....	27
<b>2.1.2.1.2 Suíte Poço da Cruz</b> .....	30
<b>2.1.2.1.3 Grupo Seridó</b> .....	30
<b>2.2 Conceitos geológico-geotécnicos aplicados a estabilidade de taludes</b> .....	34
<b>2.2.1 Fatores que influenciam na estabilidade dos taludes</b> .....	36
<b>2.2.2 Movimentos de massa e tipos de ruptura em taludes rochosos</b> .....	37
<b>2.2.3 Uso da Projeção Estereográfica na análise dos tipos de ruptura</b> .....	42
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	45
<b>3.1 Etapa pré-campo</b> .....	45
<b>3.1.1 Levantamento Bibliográfico</b> .....	45
<b>3.1.2 Mapas pré-campo</b> .....	45
<b>3.2.1 Caracterização geomecânica dos taludes rochosos – definição dos parâmetro geotécnicos e tipos de ruptura</b> .....	46
<b>3.2 Etapa pós-campo</b> .....	49
<b>3.2.1 Etapa de ensaios laboratoriais</b> .....	49
<b>3.2.2 Etapas de gabinete</b> .....	51
<b>3.2.2.1 Mapas geológico-estruturais</b> .....	51
<b>3.2.2.2 Mapas geotécnicos</b> .....	52
<b>4 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA MINA DO BONITO</b> ..	54
<b>4.1 Geologia Local</b> .....	54
<b>4.1.1 Suíte Poço da Cruz</b> .....	54
<b>4.1.1.1 Meta-granitos e Gnaisses</b> .....	54
<b>4.1.2 Formação Serra dos Quintos</b> .....	56

4.1.2.1	Formações Ferríferas Bandadas (BIFs) .....	56
4.1.2.1.1	Itabiritos: variações tipológicas .....	57
4.1.2.2	Tipologia dos minérios hidrotermais .....	63
4.1.3	Formação Jucurutu .....	67
4.1.3.1	Mármore .....	67
4.1.3.2	Xistos .....	68
4.1.3.3	Quartzitos e Quartzitos Ferruginosos .....	69
4.2	Geologia Estrutural .....	71
<b>5</b>	<b>CONDICIONANTES GEOLÓGICOS E ESTABILIDADE DE TALUDES</b> .....	<b>75</b>
5.1	Tipologia do minério de ferro e estabilidade de taludes .....	75
5.1.1	Tipologia dos Itabiritos .....	75
5.1.1.1	Itabiritos martíticos specularíticos .....	75
5.1.1.2	Itabiritos anfibolíticos .....	76
5.1.1.3	Itabiritos anfibolítico goethíticos .....	77
5.1.1.4	Itabiritos martíticos .....	77
5.1.2	Tipologia dos Minérios Hidrotermais .....	77
5.1.3	Descontinuidades do maciço e tipos de ruptura gerados .....	79
5.1.4	Grau de Fraturamento .....	81
5.1.5	Grau de Alteração .....	82
5.1.6	Grau de Coerência .....	83
<b>6</b>	<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAxIAL DO ITABIRITO DA MINA DO BONITO</b> .....	<b>86</b>
<b>7</b>	<b>DISCUSSÕES E CONCLUSÕES</b> .....	<b>96</b>
7.1	Geologia Regional .....	96
7.2	Estabilidade de taludes .....	96
7.3	Avanço da atividade mineira .....	99
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	.....	<b>101</b>

## **CAPÍTULO 1**



## 1 INTRODUÇÃO

A mina de ferro do Bonito está localizada próximo sede-municipal de Jucurutu, no Rio Grande do Norte - Brasil, e possui minérios de ferro de origem sedimentar e hidrotermal, metamorfizados e deformados, que, juntamente com quartzitos, xistos e mármores das formações Jucurutu e Serra dos Quintos, compõe uma estrutura sinformal quilométrica, com plano axial N-S e eixo mergulhando para sul. As diferenças composicionais dos minérios de ferro itabiríticos e hidrotermais permitem uma subdivisão em massas lavráveis contendo proporções variáveis de magnetita, martita, especularita, cumingtonita-grunerita e quartzo.

Os processos tectonometamórficos, hidrotermais e supergênicos que ocorreram durante a história de evolução da jazida, geraram estruturas dúcteis (foliações, lineações, dobras, zonas de cisalhamento, etc.) e rúpteis (falhas, fraturas e juntas), provocando modificações nas propriedades físicas e geomecânicas dos minérios e rochas encaixantes. Este conjunto de feições geológicas influencia na resistência ao cisalhamento e estabilidade dos taludes durante as operações mineiras. As estruturas representam heterogeneidades ou descontinuidades que induzem zonas de maior ou menor fraqueza mecânica e servem de canais de percolação preferencial no interior das massas rochosas.

Em minas a céu aberto, como no caso da mina do Bonito a escavação e lavra desenvolve-se de cima para baixo, com uma geometria similar a um tronco de um cone, possuindo dimensões maiores na superfície e afunilando com o aumento da profundidade. O aumento exagerado dos ângulos de inclinação dos taludes, gerados durante o processo de extração mineral, pode ocasionar a instabilização dos taludes, provocando deslizamentos de rocha em direção ao fundo da cava e interromper o desenvolvimento da lavra, criando prejuízos de diversos tipos.

No contexto da mineração a céu aberto, a Geologia de Engenharia desempenha o papel base dos aspectos conceituais e metodológicos dos projetos de talude. Para o empreendimento mineiro a estabilidade de taludes é de suma importância, exigindo modelos de estudos geológico-geotécnicos para a avaliação do risco potencial que esse componente está sujeito na lavra do minério.

A proposta em questão aborda o estudo geológico-geotécnico da mina de Bonito, localizada no município de Jucurutu - RN, com objetivo principal de subsidiar estudos geotécnicos de estabilidade dos taludes através do mapeamento geológico e do levantamento

de descontinuidades nas frentes de lavra, considerando as características físicas e geomecânicas dos minérios de ferro.

O levantamento detalhado destas feições tem como objetivo definir áreas estáveis e áreas propícias a instabilização, considerando os diferentes tipos de ruptura normalmente reconhecidos em taludes de corte e escavação (GUIDICINI & NIEBLE, 1976).

### **1.1 Justificativa**

O trabalho em questão se revela importante de duas maneiras. A primeira possui finalidade acadêmica e a segunda acontece devido a importância do estudo geotécnico em minerações tendo em vista o risco humano e econômico que a instabilidade de taludes pode gerar.

Primeiramente, o referido estudo será relevante no conhecimento das estruturas presentes na região. A escala do trabalho realizado também permitiu um conhecimento geológico mais detalhado da mina e gerou um mapa geológico de superfície de maior detalhe da região. Em segundo lugar, sobre a atividade mineira, a instabilização de taludes e suas consequências na atividade mineira, DURAND (1995) escreve da seguinte maneira:

"Em toda atividade mineira, o objetivo é extrair o maior volume possível de minério removendo o menor volume de estéril, o que muitas vezes exige inclinações íngremes. Entretanto, o aumento exagerado do ângulo de inclinação dos taludes pode gerar a instabilização e provocar deslizamentos de pequeno a grande volume de rocha em direção ao fundo da cava e interromper o desenvolvimento da lavra, criando prejuízos de vários tipos: despesas com a remoção do material escorregado, relocação de estradas de rodagem da mina, atrasos na produção do minério, custos adicionais de retaludamento, além de pôr em risco vidas humanas e danificar equipamentos mecânicos".

DURAND (1995) também escreve que a segurança dos taludes e as implicações econômicas que a exploração mineral representa são dois problemas antagônicos, que terão que ser resolvidos de maneira a estabelecer um equilíbrio harmônico entre ambos em todas as etapas da vida de um empreendimento mineiro.

Levando isso em consideração, a importância de um geológico-geotécnico da área selecionada é claramente evidenciado, tendo em vista que tal trabalho definirá áreas propícias a instabilização e dessa forma pode contribuir no planejamento da atividade

mineira, prevenindo acidentes e custos adicionais nas operações de lavra de minério de ferro da mina do Bonito.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal desse trabalho se resume na caracterização geológico-geotécnica da área de estudo localizada em Jucurutu (RN), voltada a estabilidade de taludes. Para isso, fazem-se necessários os seguintes objetivos específicos:

- A realização do mapeamento geológico-geotécnico em escala de detalhe;
- A aferição de parâmetros geomecânicos, em superfície, que influenciem na estabilidade dos maciços rochosos;
- A análise específica dos tipos de ruptura através do levantamento das descontinuidades geradas em frentes de lavra;
- A elaboração de mapas descritivos das informações coletadas em campo.

## 1.3 Localização e Acessos

A área de estudo corresponde ao morro do Bonito localizado na zona rural do município de Jucurutu, no Rio grande do Norte. O município faz limite com os municípios de Açu, Triunfo Potiguar, São Rafael, São Fernando, Caicó, Florânia, Santana do Matos, Jardim de Piranhas e Campo Grande e com o Estado da Paraíba, abrangendo uma área de 962 km<sup>2</sup>, inseridos nas folhas Caicó (SB.24-Z-B-I), Currais Novos (SB.24-ZB-II), Augusto Severo (SB.24-Y-D-IV) e Açu (SB.24-X-D-V), na escala 1:100.000, editadas pela SUDENE.

A mina de Bonito é explorada pela empresa Mhag Serviços e Mineração S/A<sup>©</sup>. São 425,44 ha de área requerida para exploração. Nos quadros a seguir são descritas as coordenadas da área estudada, referentes a área de requerimento da empresa (Quadro 1), ao estudo geológico-estrutural e geotécnico (Quadro 2).

Quadro 1 - Coordenadas (Geográficas e UTM) da poligonal de estudo da Mhag em Sistema Geodésico Sul-americano SAD 69.

Vértice	Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM (SAD69)	
	Latitude	Longitude	Oeste	Norte
PA=01	-05° 51' 57"345	-36° 58' 54"080	726.506,420	9.317.667,266
02	-05° 51' 57"345	-36° 57' 58"004	726.489,959	9.313.394,794
03	-05° 52' 52"983	-36° 57' 58"002	727.489,389	9.313.390,931
04	-05° 52' 52"984	-36° 59' 29"028	727.486,571	9.312.662,162
05	-05° 52' 13"431	-36° 59' 29"027	723.681,615	9.312.676,882
06	-05° 52' 13"431	-36° 58' 54"080	723.700,893	9.317.678,041
PA	-05° 51' 57"345	-36° 58' 54"080	726.506,420	9.317.667,266

Quadro 2 - Coordenadas (UTM) das poligonais correspondente as áreas de estudo geológico-estrutural e geotécnico.

Vértice	Área de estudos			
	Geológico-estrutural		Geotécnico	
	Oeste	Norte	Oeste	Norte
01	724.700	9.351.175	723.100	9.351.100
02	724.700	9.350.000	723.900	9.351.100
03	722.650	9.350.000	723.900	9.350.300
04	722.650	9.351.175	723.100	9.350.300

O percurso de acesso à área da mina a partir da cidade de Fortaleza (CE) (Quadro 3) se inicia pela BR 116. Em seguida, segue-se até Mossoró pela CE 040 e BR 304 e de Mossoró até Jucurutu segue-se a BR 110, logo em seguida a RN 233 e por fim a BR 226. Uma estrada batida de aproximadamente 15,5 km faz a conexão do município-sede de Jucurutu a Mina do Bonito (Figura 4).

Quadro 3 - Vias de acessos até a área estudada, partindo de Fortaleza (CE).

Percurso	Acessos
Fortaleza - Mossoró	BR 116 - CE 040 - BR 304
Mossoró - Jucurutu	BR 110 - RN 233 - BR 226
Jucurutu - Mina do Bonito	BR 226 - Estrada (15,5km)

O percurso a partir de Natal é realizado pela rodovia BR 304 até o município de Itajá. Nesse momento segue-se por um entroncamento pela RN 118, passando pelo município de São Rafael, até chegar a cidade de Jucurutu. Deste ponto em diante pega-se a BR 226 em direção a Triunfo Potiguar. Depois de 10 km entra-se em uma estrada de terra, segue-se por ela por mais 15,5 km até chegar a entrada da Mina do Bonito (Quadro 4). As rodovias federais e estaduais do estado do Rio Grande do Norte podem ser vistas no mapa da Figura 1.

Quadro 4 - Vias de acessos até a área estudada, partindo de Natal (RN).

Percurso	Acessos
Natal - Itajá	BR-304
Itajá - São Rafael - Jucurutu	RN-118
Jucurutu - Mina do Bonito	BR 226 - Estrada (15,5km)



Figura 1- Mapa de acesso rodoviário do Estado do Rio Grande do Norte. Fonte: (Fonte: PRODEEM/CPRM, 2005).

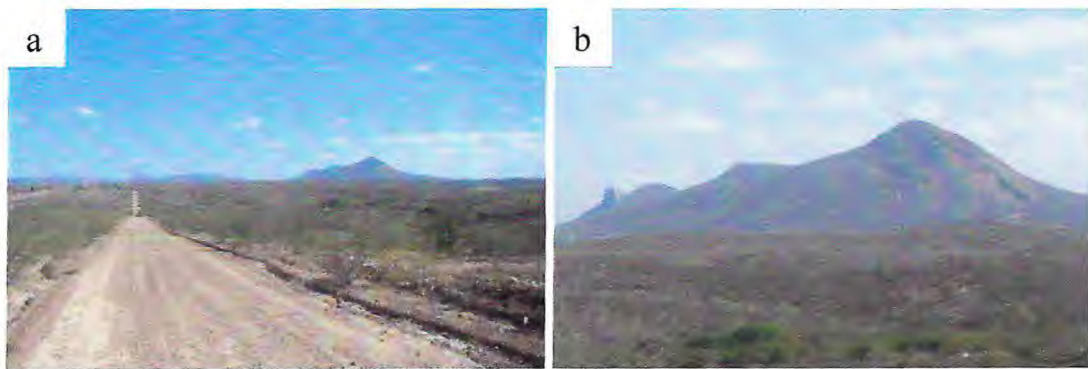


Figura 2 - a) Estrada de terra que faz o acesso da BR 226 a Mina do Bonito. b) Morro do Bonito em detalhe, onde se localiza a mina do Bonito (Fonte: Autores).

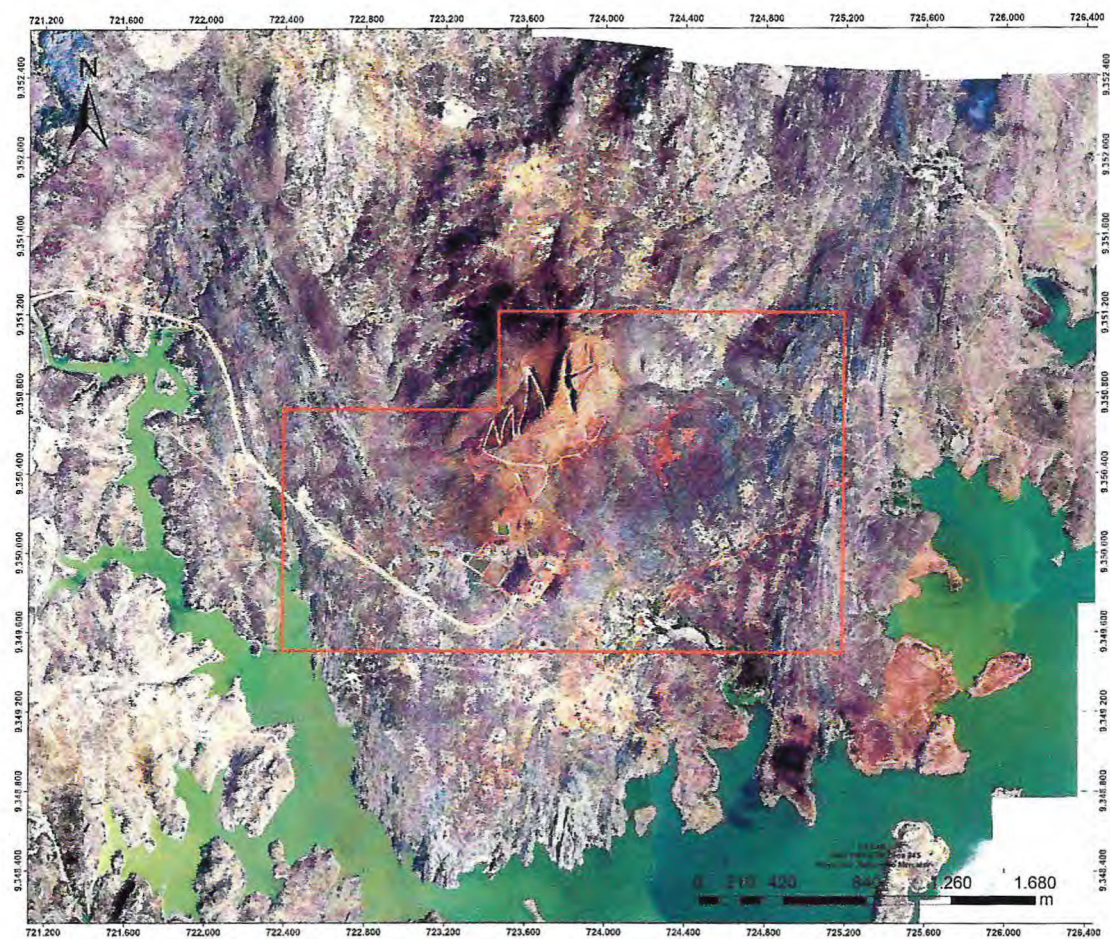


Figura 3 - Foto aérea dos depósitos de ferro da Mina do Bonito. O polígono em vermelho mostra a poligonal da área estudada, cujas coordenadas estão descritas na Tabela 1. (Fonte: Mhag Serviços e Mineração S/A)

## **CAPÍTULO 2**

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Geologia Regional

A área de estudo está inserida no arcabouço tectônico da porção setentrional da Província Borborema, no Domínio geotectônico Rio Grande do Norte, nas unidades paleo e neoproterozóicas do Domínio Rio Piranhas – Seridó.

#### 2.1.1 Província Borborema

A área de estudo está inserida no contexto tectônico da Província Borborema, situada geograficamente no nordeste brasileiro, tendo idade pré-cambriana e que foi palco da atuação do Ciclo Brasileiro/Pan-Africano (Neoproterozóico), marcado por intenso magmatismo granítico e desenvolvimento de extensas Zonas de Cisalhamento transcorrentes.

Na sua configuração, composta por diferentes terrenos crustais separados por falhas e lineamentos importantes (Figura 04), a Província Borborema constitui a parte mais ocidental, em território brasileiro de uma unidade tectônica bem maior encontrada entre os Crátons Oeste – Africano, Amazônico e São Francisco – Congo, estendendo-se ainda sob a bacia sedimentar do Parnaíba (ALMEIDA *et al.* 1977).



Figura 4 - Compartimentação tectônica e principais lineamentos da Província Borborema. (SANTOS 2004).



Tudo indica que sua Formação teve início a partir da junção de vários terrenos. SANTOS (1995) constatou um importante episódio acrescionário em torno de 1.0 Ga (final do Mesoproterozóico) na região central da Província, denominado de Orogenia Cariris Velhos. Assim, a Província Borborema seria o resultado de um orógeno colisional desenvolvido a norte do Cráton São Francisco a partir de uma complexa colagem tectônica associada aos eventos orogênicos Cariris Velhos (mesoproterozóico) e Brasileiro/ Pan-Africano (Neoproterozóico).

BRITO NEVES *et al.* (2000) propuseram uma história evolutiva para Província Borborema baseada na aglutinação diacrônica de massas continentais e a sua subsequente fragmentação, destacando a atuação da Orogenia Transamazônica/Eburniana (Paleoproterozóico) na Formação do supercontinente Atlântica, a Orogenia Cariris-Velhos (final do Mesoproterozóico) associada à Formação do supercontinente Rodinia e finalmente, a influência da Orogenia Brasileira/Pan-Africana (final do Neoproterozóico) no desenvolvimento do supercontinente Gondwana Ocidental.

A compartimentação geotectônica da Província foi sugerida por BRITO NEVES (1975), VAN SCHMUS *et al.* (1995) e finalmente por BRITO NEVES *et al.* (2000), que redefiniram cinco segmentos crustais ou domínios tectônicos para a Província Borborema. São eles: Domínio Médio Coreáú, Domínio Ceará Central, Domínio Rio Grande do Norte, Domínio da Zona Transversal ou Central e Domínio Meridional. Os três primeiros domínios citados correspondem a sua porção setentrional e estão representados na Figura 5.

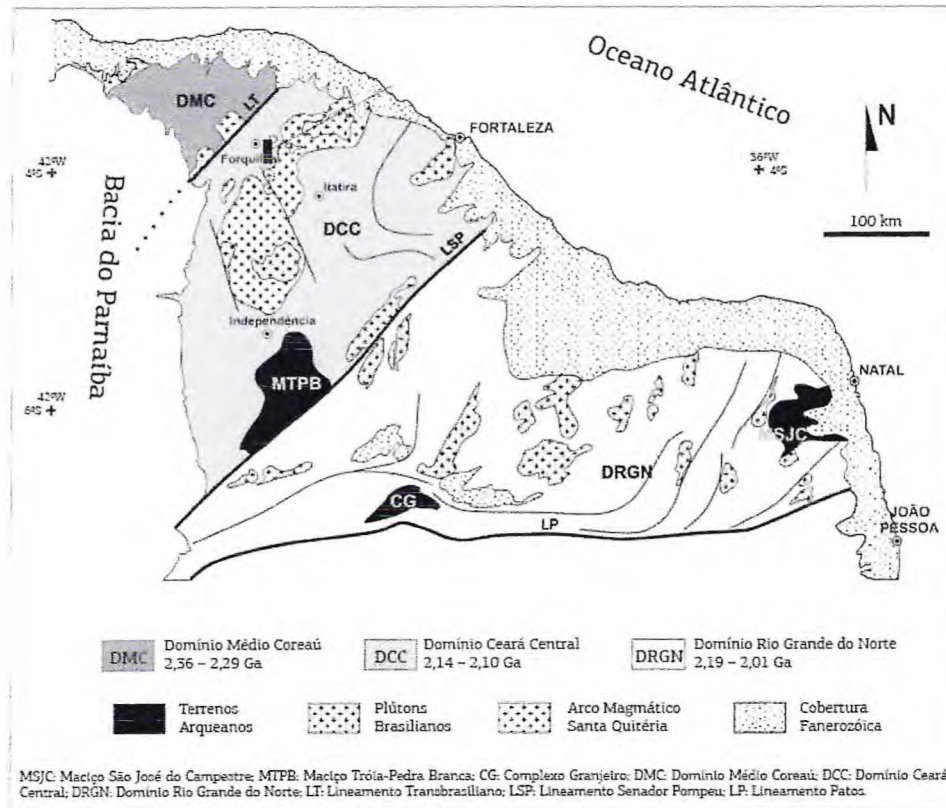


Figura 5 - Mapa simplificado da porção setentrional da Província Borborema (adaptado de FETTER et al. 2000) mostrando seus principais blocos crustais.

### 2.1.2 Domínio Rio Grande do Norte

Localizado na Subprovíncia Setentrional (Figura 5) o Domínio Rio Grande do Norte (DRGN) foi definido como um segmento litosférico, localizado a Norte do Lineamento Patos (LP) e a Leste da Zona de Cisalhamento Senador Pompeu (ZCSP). Esta subdivisão é adotada por autores com por FETTER (1999), mas outra alternativa é dada por Parente & Arthaud, 1995, a qual define o limite do Domínio Ceará Central com o Domínio Rio Grande do Norte pela ZC Orós e Aiuaba (Figura 6). O presente trabalho considerará a compartimentação de FETTER (1999).

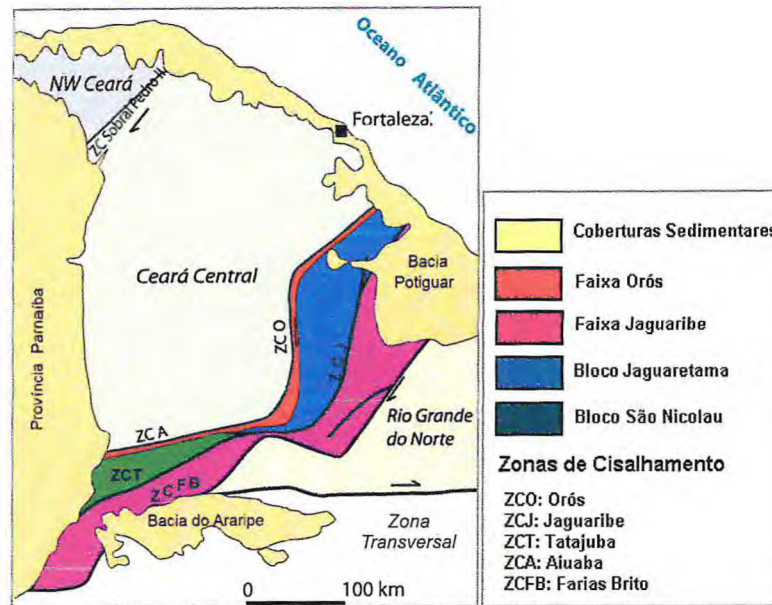


Figura 6 - Sistema Orós Jaguaribe no Ceará e seus limites como divisão sugerida por PARENTE & ARTHAUD, 1995 (adaptado de CAVALCANTE, 1999).

O Domínio é formado pela colagem e amalgamento de fragmentos crustais, envolvendo núcleos arqueanos, blocos gnáissicos migmatíticos de idade paleoproterozóica e sequências supracrustais paleo a neoproterozóicas, durante a Orogênese Brasileira. Todo este conjunto foi afetado por inúmeras intrusões graníticas de idade brasileira, geralmente, associadas a extensas zonas de cisalhamento transcorrentes (JARDIM DE SÁ 1994, VAN SCHMUS *et al.* 1995, DANTAS 1997, BRITO NEVES *et al.* 2000).

As zonas de cisalhamentos que segmentam o Domínio Rio Grande do Norte são consideradas como importantes discontinuidades físicas: Lineamento Patos (NE-SW) de escala intra-continental, zona de cisalhamento Picuí-João Câmara (NE-SW), zona de cisalhamento Portalegre (NE-SW), zona de cisalhamento Senador Pompeu (NE-SW), com cinemática essencialmente dextral (JARDIM DE SÁ 1994, CABY *et al.* 1998, VAN SCHMUS *et al.* 1995, VAUCHEZ *et al.* 1995, JARDIM DE SÁ *et al.* 1997, CASTRO *et al.* 1998, CAMPELO 1999, BRITO NEVES *et al.* 2000, E OLIVEIRA *et al.* 2005B, 2006 *apud* FILHO, *et al.* 2007).

As subdivisões precambrianas do Domínio Rio Grande do Norte cartografadas no Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte, que compõem o embasamento cristalino, são o Domínio Jaguaribeano (DJ), Domínio São José do Campestre (DSJ) e

Domínio Rio Piranhas-Seridó (DPS). A litoestratigrafia presente na área de estudo corresponde ao Domínio Rio Piranhas-Seridó, descrito abaixo.

### **2.1.2.1 Domínio Rio Piranhas-Seridó**

Segundo ANGELIM *et al.* (2006), o Domínio Rio Piranhas-Seridó ocupa uma extensa área na porção central do Estado do Rio Grande do Norte, limitado tectonicamente a oeste com o Domínio Jaguaribeano (DJ) pela zona de cisalhamento Portalegre e, a leste, com o Domínio São José do Campestre (DSJ) por meio da zona de cisalhamento Picuí-João Câmara.

O embasamento desse domínio é constituído, segundo concepção de Jardim de Sá (1984, 1994), pela Unidade metavulcanossedimentar e pela Unidade de ortognaisses, todos de idade paleoproterozóica-riacina, caracterizadas pelo Complexo Caicó (PP2cai) e por uma suíte de *augen* gnaises graníticos paleoproterozóicaoro-siriana, denominada de Suíte Poço da Cruz (PP3γpc). A cobertura é constituída por um segmento de rochas supracrustais do Neoproterozóico designada de Faixa de Dobramentos Seridó (BRITO NEVES, 1975) ou simplesmente Faixa Seridó (FSE), composta pelo Grupo Seridó (NP3s) que engloba as formações Serra dos Quintos (NP3sq), Jucurutu (NP3sju), Equador (NP3se) e Seridó (NP3ss) do Ediacarano.

O Quadro 5 mostra as relações tectonoestratigráficas das unidades litoestratigráficas do Paleoarqueano ao Ordoviciano no Estado do Rio Grande do Norte, isto é, as relações tectonoestratigráficas existentes entre os Domínios Jaguaribeano, São José do Campestre e Rio Piranhas-Seridó e suas unidades litoestratigráficas.

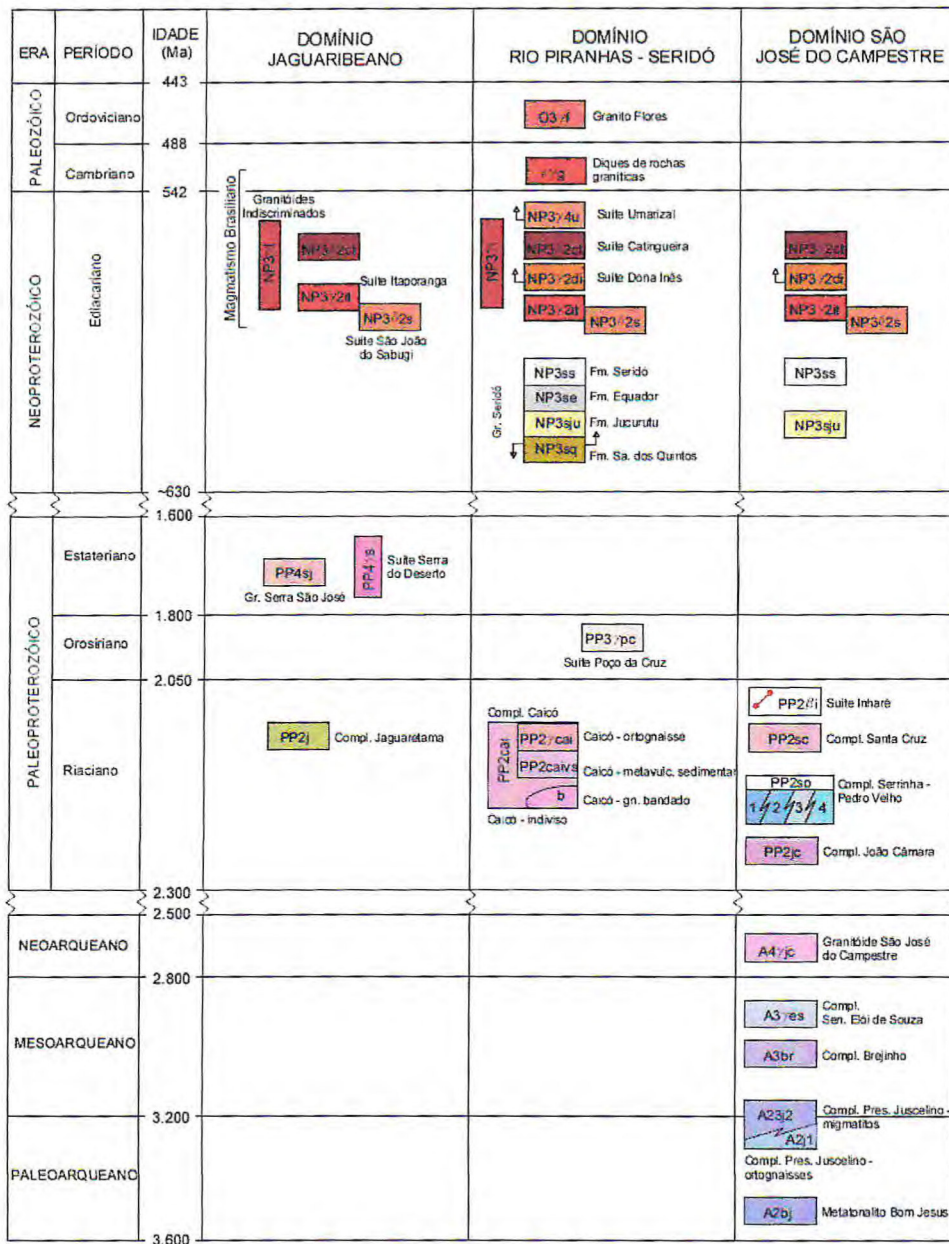
A área estudada se localiza dentro do Domínio Rio Piranhas-Seridó, por essa razão, seus complexos, suítes, grupos e formações serão mais bem especificados neste trabalho, especialmente no que se refere à Formação Serra dos Quintos, a Suíte poço da cruz e a Formação Jucurutu, litotipos encontrados na área de estudo.

#### **2.1.2.1.1 Complexo Caicó**

JARDIM DE SÁ (1994) define o Complexo Caicó como um embasamento gnáissicomigmatítico, incluindo supracrustais mais antigas, em caráter subordinado. FERREIRA & SANTOS (2000), descrevem este mesmo complexo como uma associação de ortognaisses bandados félsico-máficos, ortognaisses dioríticos a graníticos e migmatitos,

com intercalações de rochas metamórficas e subordinadamente rochas supracrustais constituídas principalmente por biotita paragneisses.

Quadro 5 - Relações tectonoestratigráficas das unidades litoestratigráficas do Paleoarqueano ao Ordoviciano no Estado do Rio Grande do Norte ANGELIM *et al.* (2006).



Segundo ANGELIM *et al.* (2006), parte do Complexo Caicó foi subdividido cartograficamente em duas unidades, a unidade metavulcanossedimentar (PP2caivs) e a unidade de ortogneisse (PP2caic) e, outra parte do complexo continuou indivisa, a Unidade indivisa (PP2caib). A unidade indivisa corresponde a uma associação litológica de mapeamento que inclui indistintamente as duas unidades litoestratigráficas referidas, além

dos gnaisses bandados (PP2caib), das rochas anfíbolíticas (PP2caia) e das lentes de mármore (PP2caim), que constituem litotipos mapeáveis de posicionamento estratigráfico *duvidoso*.

A unidade metavulcanossedimentar (PP2caivs) está pobremente representada na cartografia regional, visto que se trata de uma unidade remanescente migmatizada, preservada de forma descontínua no âmbito dos ortognaisses PP2cai. Caicó, no extremo sudoeste do estado e na região da serra do Feiticeiro ANGELIM *et al.* (2006).

A unidade de ortognaisse (PP2χcai) é a unidade predominante no subdomínio do Embasamento Rio Piranhas. Trata-se de uma suíte magmática expandida com composição gabrótica, tonalítica, granodiorítica e granítica, com predominância dos termos tonaliticograníticos (ANGELIM *et al.* 2006).

O Complexo Caicó indiviso (PP2χcai) é uma unidade de mapeamento aplicada às áreas onde se tem conhecimento da presença das unidades PP2caivs e PP2χcai, embora não individualizadas na escala do mapa, como no setor São Vicente-Pedro Avelino ou em áreas com significativa frequência de corpos lenticulares paraderivados e/ou anfíbolitos, a exemplo da região de São João do Sabugi, ou ainda em alguns setores carentes de informações geológicas. Foram incluídos nesta unidade corpos lenticulares cartografados de anfíbolitos, prováveis metabasitos (PP2caia), e de mármore (PP2caim). Os corpos de gnaisses bandados (PP2caib), interpretados como rochas metassedimentares, foram também incluídos nesta unidade, visto que podem incluir indistintamente rochas metaplutônicas. A principal área de gnaisses bandados cartografada se encontra no núcleo dômico de Campo Grande (ex-Augusto Severo). Juntamente com os gnaisses bandados ocorrem biotita gnaisses, muscovita-biotita gnaisses xistosos granadíferos, lentes de anfíbolitos e, na porção central do domo, migmatitos.

As rochas do complexo Caicó apresentam extensivamente uma foliação de baixo ângulo e as idades U-Pb em zircão na região de São Vicente-florânia deram resultados de cerca de 2.150 Ma (DANTAS, 1992).

### 2.1.2.1.2 Suíte Poço da Cruz

Suíte Poço da Cruz e a designação de FERREIRA (1998) para descrever uma suíte de *augen* gnaisses graníticos a quartzo-monzoníticos, correspondente aos granitos G2 de JARDIM DE SÁ (1978).

Os litotipos desta suíte ocorrem no subdomínio do Embasamento Rio Piranhas (ERP), sempre associado ao Complexo Caicó e, em grande parte, posicionados próximos aos contatos tectônicos do embasamento paleoproterozóico/supracrustais neoproterozóicas, associados a zonas de cisalhamento compressionais. Constituem corpos tabulares (*sheets*) de espessuras bastante variáveis ou plutons de dimensões batolíticas. São rochas de composição quartzo monzonítica a granítica, leucocráticas, foliadas, de granulação grossa, contendo porfiroclastos róseos de microclina, imersos em matriz quartzo-feldspática, com biotita e anfibólio em variadas proporções e raramente muscovita (ANGELIM *et al.*, 2006).

### 2.1.2.1.3 Grupo Seridó

FERREIRA & ALBUQUERQUE (1969) definem o Grupo Seridó como constituído pelas formações Equador (base), Jucurutu e Seridó (topo), cabendo a JARDIM DE SÁ & SALIM (1980) e JARDIM DE SÁ (1984) o empilhamento estratigráfico atualmente aceito, com a Formação Jucurutu (NP3sju), na base da seqüência, sucedida pelas formações Equador (NP3se) e Seridó (NP3ss), no topo. Além disso, FERREIRA & SANTOS (2000) descreveram uma seqüência metavulcanossedimentar denominada de Formação Serra dos Quintos (NP3sq) que estaria na base do grupo.

FERREIRA (1998) propunha à Formação Serra dos Quintos um complexo de idade paleoproterozóica. No entanto, VAN SCHMUS *et al.* (2003), baseados em datações U-Pb (SHRIMP) em zircão detrítico das formações Jucurutu e Seridó, admitem a possibilidade de que todo o Grupo Seridó seja mais jovem que 650 Ma. Também baseados na idade de 600 Ma para a deformação e metamorfismo destas unidades, esses autores sugerem a possibilidade de uma deposição para o grupo entre 640-620 Ma.

O Grupo Seridó foi alvo de uma fase de deformação importante, descrita por JARDIM DE SÁ (1984, 1994) e JARDIM DE SÁ *et al.* (1987), em que o bandamento formado em uma fase deformacional posterior foi verticalizado, formando dobras por vezes

isoclinais, e uma foliação NNE-SSW, associadas a uma cinemática transcorrente de idade brasileira, com zonas de cisalhamento, ora destrais, ora sinistrais, com *trend* NE-SW.

#### **i. Formação Serra dos Quintos (NP3sq)**

A Formação Serra dos Quintos é marcada por seqüência de gnaisses e micaxistos, localmente migmatizados, com lentes de quartzitos ferruginosos, formações ferríferas, muscovita quartzitos, anfíbolitos, mármore e skarns. As formações ferríferas são intercaladas por finos níveis de biotita gnaisses, anfíbolitos e clorita-actinolita xistos. O morro do Bonito, correspondente a área de estudo, é considerado área-tipo dessa unidade reconhecido por FERREIRA & SANTOS (2000).

Diversos autores consideram a Formação Serra dos Quintos como uma unidade da porção inferior da Formação Jucurutu, outros a consideram como Formação pertencente ao Grupo Seridó. FERREIRA & SANTOS (2000), por exemplo, interpretam a unidade como uma seqüência metavulcanossedimentar pertencente ao Grupo Seridó, pois se correlacionava estratigraficamente com a Formação Jucurutu, dando a ela, portanto, o status de Formação. Antes disso, FERREIRA (1998) a denominava de *complexo* e seria parte integrante do Complexo Caicó, do paleoproterozoico.

As datações realizadas até o momento pouco ajudam na solução desse debate. ANGELIM et. al. (2006) obteve idade de 630 – 542 Ma para a Formação Serra dos Quintos, e idades de 630 – 580 (U-Pb em zircões SHRIMP) para a Formação Jucurutu, questionando o posicionamento basal da primeira em relação a segunda.

No mapa geológico do estado do Rio Grande do Norte (CPRM, 2006), nas relações tectonoestratigráficas, as formações também possui relação duvidosa uma em relação a outra, não sendo possível determinar se a Formação Jucurutu fica acima da Formação Serra dos Quintos, ou se o mais correto seria o inverso.

#### **ii. Formação Jucurutu (NP3sju)**

Foi definida por FERREIRA & ALBUQUERQUE (1969) para englobar, aproximadamente, o que EBERT (1969) denominou de formações Florânia, Quixaba e Equador. Para aqueles autores, a Formação Jucurutu consta, essencialmente, de gnaisses de cor cinzento azulada com lentes de epidoto, uniformemente distribuídas e que podem evoluir



até formar tactitos, muitas vezes scheelitíferos, com abundantes intercalações lenticulares de mármore, às vezes associados a tactitos scheelitíferos.

ANGELIM *et al.* (2006) escrevem que ela ocorre no interior da faixa dobrada como estreitas camadas bordejando plutons graníticos como no batólito de Acari ou localmente bordejando braquiantiformes da Formação Equador, por vezes aflora em estruturas dômicas como na estrutura a leste de Currais Novos, e na zona de charneira da antiforme da serra das Queimadas (quartzito da Formação Equador) em uma janela erosiva. Na borda oeste do segmento NE-SW, região de São José do Seridó-São Vicente- Pedra Preta, aflora continuamente entre o embasamento do Complexo Caicó a oeste e os metassedimentos superpostos da Formação Seridó a leste. Também ocorre recobrando grandes extensões do Complexo Caicó, preenchendo estruturas sinformais, em contatos discordantes tectônicos ou de não conformidade sobre os litotipos deste embasamento.

A Formação Jucurutu está constituída principalmente por biotita  $\pm$  epidoto  $\pm$  anfibólio paragneisses, com intercalações de mármore (m), rochas calcissilicáticas e skarns (SALIM, 1993), micaxistos, quartzitos (qt), metavulcânicas predominantemente básicas e intermediárias (v), alguns metaconglomerados basais e possíveis níveis de formações ferríferas e metachertes (ch). Inclusos nos paragneisses ocorrem níveis e nódulos de rochas calcissilicáticas e de metagrauvas (bastante feldspáticas) com aspecto maciço. Para JARDIM DE SÁ (1994) os mármore e as formações ferríferas da Formação Jucurutu, junto com a tendência calcítica quartzítica dos paragneisses, indicam um ambiente de deposição marinho raso. (ANGELIM *et al.* 2006).

### iii. Formação Equador (NP3se)

Segundo ANGELIM *et al.* (2006), ela ocorre principalmente na porção central da faixa constituindo serras alongadas na direção NE-SW, tais como serra das Queimadas e da Umurana que constituem estruturas braquiantiformes, ou como cristas de extensões quilométricas como a serra do Feiticeiro.

É constituída predominantemente por muscovita quartzitos com fácies arcoseanas, contendo intercalações de metaconglomerados (NP3secg), rochas calcissilicáticas e micaxistos. Os quartzitos são esbranquiçados até cremes e cinzas, finos a médios, com foliação bem desenvolvida. Os metaconglomerados são mono ou polimíctos, com matriz de coloração cinzenta a esverdeada, predominantemente quartzosa. Eles ocorrem mais

freqüentemente em direção ao topo, precedendo a deposição dos micaxistos da Formação Seridó (ANGELIM, 2006).

Segundo ANGELIM *et al.* (2006), os contatos desta unidade com as formações Jucurutu (sotoposta) e Seridó (sobreposta) dá-se pela alternância de camadas ou variação composicional progressiva entre elas. O quartzito, como parte de uma associação do tipo QPC, pode representar uma sedimentação marinha rasa.

#### iv. Formação Seridó (NP3ss)

A Formação Seridó constitui a principal unidade litoestratigráfica da faixa dobrada em área de afloramento, ocorrendo também como segmentos alóctonos isolados, a leste da faixa dobrada, sobre o embasamento gnáissico-migmatítico do Domínio São José do Campestre. Sua litologia dominante consta de micaxistos feldspáticos ou aluminosos de fácies de médio a alto grau metamórfico, com sítios restritos de fácies de baixo grau metamórfico (ANGELIM *et al.*, 2006).

ANGELIM *et al.* (2006) discutem que a fácies de médio a alto grau metamórfico é representada notadamente por biotita xistos granadíferos, podendo conter  $\pm$  estauroлита  $\pm$  cianita,  $\pm$  andalusita  $\pm$  cordierita  $\pm$  sillimanita, localmente com elevado teor de feldspato ou de quartzo. Na porção inferior da Formação ocorrem intercalações de mármore, rochas calcissilicáticas, paragneisses, rochas metavulcânicas básicas, quartzitos e metaconglomerados (NP3ss).

Segundo o mesmo autor, a *fácies de baixo grau metamórfico* (NP3ssc) ocorre em algumas áreas restritas não cartografáveis na escala do projeto, com exceção de uma extensa área de direção NE-SW a oeste do batólito de Acari, limitada a sul pela cidade de Ouro Branco e estendendo-se para norte, além da cidade de Cruzeta. Suas rochas são de coloração cinza-claro a esverdeada, granulação fina, com acamamento (S0) preservado, constituídas preferencialmente por sericita-cloritabiotita xistos, podendo conter sericita-clorita xistos, filitos e metassiltitos.

Quanto as idades, VAN SCHMUS *et al.* (2003), em datação pelo método U-Pb SHRIMP em zircão detrítico da Formação Seridó, encontraram em amostra de micaxisto da região de Pedra Preta, uma população de zircões com idade mínima de  $628 \pm 16$  Ma, sinalizando, portanto, uma provável idade ediacarana ou mesmo criogeniana ( $\leq 650$  e  $>610$

Ma) para a sedimentação desta sequência. A Figura 7 representa o mapa do contexto geológico de ANGELIM *et. al.* (2006), com a localização da área de estudo de BARBOSA (2013).

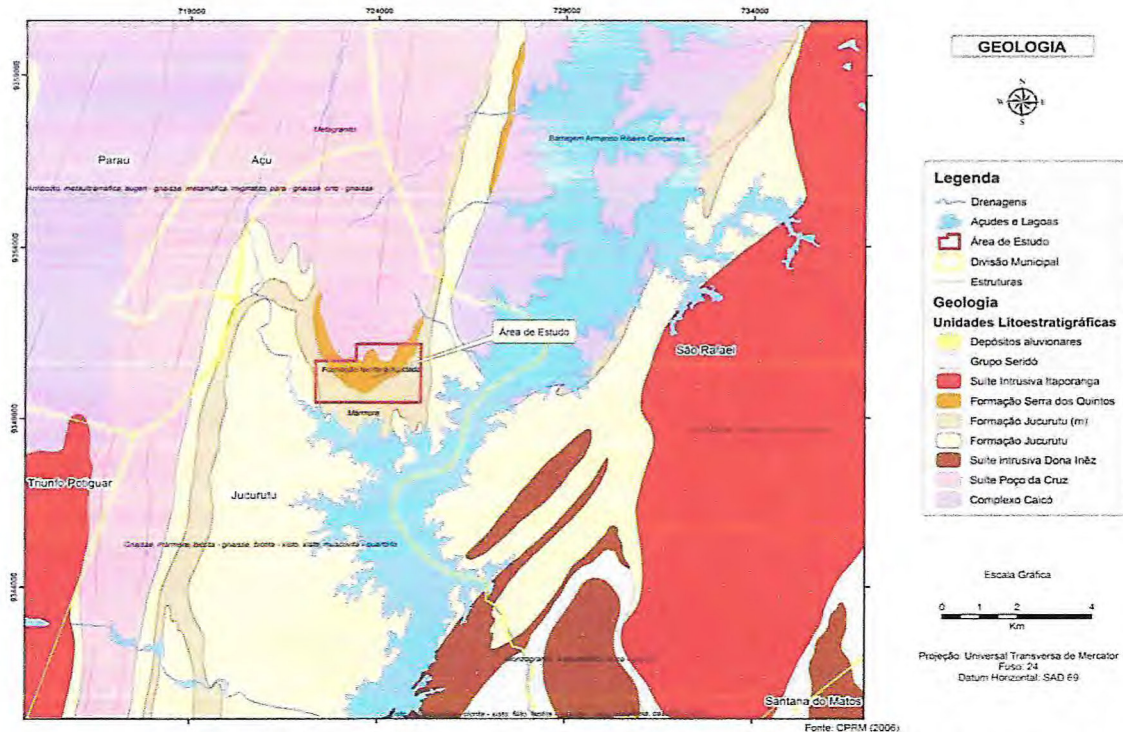


Figura 7 - Mapa Geológico Regional do Rio Grande do Norte 2006. ANGELIM *et al.* (2006), modificado por BARBOSA (2013).

## 2.2 Conceitos geológico-geotécnicos aplicados a estabilidade de taludes

A ocupação do meio-físico pelo homem e sua intervenção como agente modificador e usufruidor dos recursos naturais trouxe consigo a necessidade do entendimento das características e dos processos da dinâmica da Terra. A ciência dedicada ao amparo desse princípio é conceituada de Geologia de Engenharia, definida concisamente por SANTOS (2009) como a Geociência Aplicada responsável pelo domínio tecnológico da interface entre a atividade humana e o meio físico geológico. Essa ciência possibilita o estudo das características e do comportamento geológico-geotécnico dos solos e maciços rochosos, prerrogativas para o estudo de estabilidade de taludes.

Os taludes podem ser divididos em taludes de corte e taludes naturais. Para a mineração, taludes são cortes inclinados projetados para a retirada do material que se quer extrair. Os taludes das minas a céu aberto apresentam geometria específica, envolvendo

parâmetros definidos pela segurança e funcionalidade do empreendimento mineiro somados com a viabilidade econômica da retirada do material minério. A Figura 8 representa os componentes geométricos de um talude.

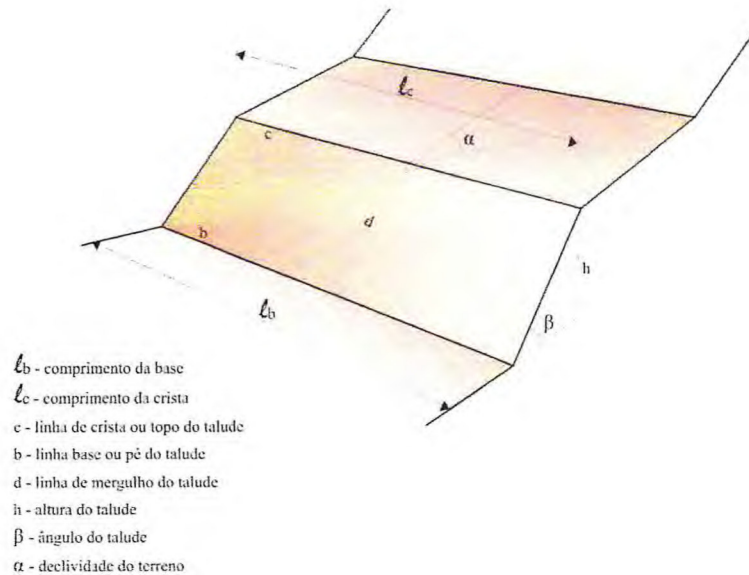


Figura 8 - Componentes geométrico de um talude (Fonte: Autores).

Segundo REIS (2010), o ângulo final do talude representa a otimização do binômio envolvendo a economia e a segurança das escavações de lavra. ABRÃO & OLIVEIRA (1998) defendem que a estabilidade de taludes em mineração é mais complexa em relação aos taludes de obras civis basicamente devido à própria dinâmica de escavação, ao porte dos mesmos, às condições peculiares da exploração (...), possibilidade de rupturas localizadas, convivência com situações causadas por desmontes com uso de explosivos, rebaixamentos de nível de água e variações de geometria com os avanços do processo de lavra.

Nesse contexto, o conhecimento geológico-geotécnico ou geológico-geomecânico do maciço rochoso, o entendimento dos fatores condicionantes de instabilidade e dos possíveis modelos e mecanismos de rupturas que podem ser gerados ao corte do maciço são necessários para a avaliação de projeto dos taludes de mineração. Essa avaliação atende as exigências da segurança da obra combinadas com as exigências econômicas do empreendimento mineiro.

### 2.2.1 Fatores que influenciam na estabilidade dos taludes

Para a análise de estabilidade dos taludes é necessário ter conhecimento dos fatores que influenciam, condicionam e desencadeiam as instabilidades ao longo do tempo. Para discutir esses fatores, GUIDINI & NIEBLE (1984) explicam que as terminologias *agente* e *causa* de movimentos de massas podem ser entendidos conjuntamente como sendo a causa ou o modo como atuam determinados agentes, ou, em outros termos, um agente pode se expressar por meio de uma ou mais causas.

As causas da instabilidade dos taludes são separadas em três grandes grupos por TERZAGHI (1952):

- a) *Causa internas*: são aquelas que levam ao colapso do material, sem que haja mudança no seu aspecto geométrico visível. Atuam reduzindo a resistência interna ao cisalhamento.
- b) *Causas externas*: são aquelas que levam ao colapso em função das modificações na geometria do talude. São devidas às ações externas que alteram o estado de tensões atuantes sobre o maciço, resultando em um acréscimo das tensões cisalhantes que, igualando ou superando a resistência intrínseca do solo, levam o maciço à condição de ruptura.
- c) *Causas intermediárias*: são aquelas que resultam de efeitos causados por agente das duas classes anteriormente definidas.

GUIDINI & NIEBLE (1984) definem os agentes e estão divididos em:

- a) *Agentes predisponentes*: são aqueles formados pelo conjunto de condições geológicas, geométricas e ambientais que irão oferecer ambiente para que os movimentos de massa ocorram. São eles: contexto geológico, morfológico, climático-hidrológico, gravidade, calor solar e tipo de vegetação original.
- b) *Agentes efetivos*: são aqueles diretamente responsáveis pelo desencadeamento de movimentação de massa. São eles: ocorrência de chuva intensa, erosão por água ou vento, terremoto, ação do homem, fusão do gelo e neve.

Com base nos conceitos acima os autores GUIDINI & NIEBLE (1984) apontaram resumidamente os principais condicionantes dos escorregamentos e processos correlatos na dinâmica ambiental brasileira:

- Características climáticas, com destaque para o regime pluviométrico
- Características e distribuição dos materiais que compõem o substrato das encostas/taludes, abrangendo solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas (xistosidade, fraturas, etc.);
- Características geomorfológicas com destaque para a inclinação, amplitude e forma do perfil das encostas (retilíneo, convexo, côncavo);
- Regime das águas em superfície e subsuperfície;
- Características do uso e ocupação, incluindo cobertura vegetal e as diferentes formas de intervenção antrópica das encostas, com cortes, aterros, concentração de água fluvial e servida.

No contexto da mineração, STAVEY (1968) *apud* AGUILERA (2009) descreve uma série de fatores importantes que governam a estabilidade de taludes em lavra a céu aberto:

- As condições das tensões dentro do talude (incluindo o efeito das águas subterrâneas);
- A geologia estrutural (presença de planos, zonas de debilidade e anisotropia do talude);
- A geometria do pit mineiro (altura e inclinação);
- Os fatores geotécnicos relacionados com o comportamento mecânico do talude (resistência da rocha intacta e das descontinuidades).

Esses fatores são os predisponentes de deslocamento de blocos em falhas, assunto abordado a seguir.

### **2.2.2 Movimentos de massa e tipos de ruptura em taludes rochosos**

O maciço rochoso é um conjunto de blocos de rochas, justapostos e articulados, formado pela matriz rochosa, ou rocha intacta, constituinte dos blocos, e pelas superfícies que limitam estes, chamadas descontinuidades. Os maciços rochosos são essencialmente heterogêneos, anisotrópicos e descontínuos, e a sua complexidade resulta da evolução geológica a que foram submetidos (ABGE, 1998).

Segundo a Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE, 1998), a execução de cortes nos maciços pode condicionar movimentos de massa ou, mais especificamente, escorregamento de taludes, desde que as tensões cisalhantes ultrapassem a resistência ao cisalhamento dos materiais, ao longo de determinadas superfícies de ruptura.

REIS (2010) faz a seguinte colocação acerca dos movimentos de massa:

“Os movimentos de massa estão, geralmente, associados ao processo de intemperismo, ocorrem nas encostas e taludes e podem evoluir de maneira muito lenta até a eventos catastróficos. Tais eventos dependem de fatores predisponentes e de causas externas ou internas ao maciço. Neste contexto, a geometria, as interferências climáticas, ações antrópicas e posição do NA são condicionantes para a estabilidade ou não de um dado talude.”

Os movimentos de massa podem ser classificados por diversos critérios, que levam em consideração os principais condicionantes dos escorregamentos e processos correlatos na dinâmica ambiental, já citados. Incluem, por exemplo, os atributos e as feições geológicas, os atributos geomorfológicos, a geometria dos deslizamentos, os tipos de movimentos, as influências relativas de fatores climáticos, umidades, velocidades de movimento, etc.

GOMES (2003) apresenta uma síntese dos principais tipos e sub-tipos de movimentos de massa, incluindo processos correlatos (como erosões, por exemplo) que contribuem decisivamente para que os mesmos sejam desencadeados. A classificação utilizada pelo autor está expressa na tabela abaixo.

Tabela 1 - Tipos de movimentos de massa e processos correlatos (GOMES, 2003).

Processos	Feições Relevantes	Tipos Principais
<b>Rastejos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidades muito baixas e decrescentes com a profundidade</li> <li>• Movimentos contínuos ou intermitentes (sazonais)</li> <li>• Geometria e volume indefinido</li> <li>• Múltiplas superfícies internas de movimentação</li> <li>• Diferentes elementos de indicação superficial do processo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rastejos em rochas</li> <li>• Rastejos em solos</li> <li>• Rastejos tálus</li> <li>• Solifluxão (geleiras)</li> </ul>
<b>Escorregamentos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidades médias a elevadas de movimentação</li> <li>• Superfícies de movimentação bem definidas</li> <li>• Deformações cisalhantes do material</li> <li>• Geometria e volumes variáveis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Translacional</li> <li>• Rotacional</li> <li>• Translacional – Rotacional</li> </ul>
<b>Quedas e Tombamentos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimentos de queda livre, rolamento ou basculamento</li> <li>• Velocidades elevadas de movimentação</li> <li>• Tipicamente associados a blocos e/ou lascas rochosas</li> <li>• Condicionados essencialmente pelas descontinuidades presentes</li> <li>• Geometria variável e volumes limitados</li> <li>• Velocidades rápidas e extremamente rápidas de movimentação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quedas de blocos</li> <li>• Queda de lascas</li> <li>• Tombamentos</li> </ul>
<b>Corrida de Massa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grandes volumes de materiais</li> <li>• Movimentos de grande extensão, mesmo em áreas planas</li> <li>• Associados a materiais com diferentes condições de umidade/saturação</li> <li>• Comportamento de líquidos viscosos em materiais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corridas de dentritos secos</li> <li>• Corrida de dentritos saturados</li> <li>• Corrida de lama</li> </ul>
<b>Processos Mistos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conjugação de mecanismos relativos a dois ou mais dos processos anteriores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipos compostos</li> </ul>
<b>Erosões e Processos Associados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processos diretamente associados aos processos de movimentos gravitacionais de massa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erosão laminar</li> <li>• Erosão em ravinas</li> <li>• Boçorocas</li> <li>• Assoreamentos</li> <li>• Subsidiências</li> </ul>

O estudo dos movimentos de massa ocasionados por instabilidade de controle estrutural são de grande relevância nos projetos e monitoramento de taludes de mineração. Esse tipo de controle depende da orientação, das combinações e das propriedades das descontinuidades.

Para BACZINSKY (2000), nas análises dos taludes nas minas a céu aberto, devem-se considerar principalmente os tipos de instabilidade controlados por falhas que estão tipicamente manifestadas pelos seguintes modos:

- Deslizamento de uma ou mais descontinuidades geológicas (falha do tipo planar, cunha ou tetraédrica);



- Deslizamento com trajetória de falha circular ou quase circular através da rocha intacta ou todo maciço rochoso;
- Ruptura por tombamento;
- Deslizamento que podem exibir até dois ou mais modos de falhas (falhas compostas).



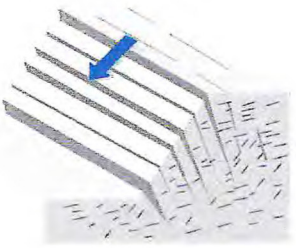
A terminologia Tipo de falha ou Tipo de ruptura, primeiramente definido na literatura como Modo de falha, faz referência a descrição dos aspectos geométricos em que uma ruptura acontece (HUALLANCA, 2004). Os diferentes tipos de ruptura ocorrem dependendo da altura do talude, do grau de faturamento do maciço e da orientação das descontinuidades em relação a inclinação da face do talude. Já o equilíbrio do bloco fraturado depende da resistência ao cisalhamento nas descontinuidades.

COSTA (2009) também explica o que pode influenciar os tipos de ruptura na mineração:

“A geometria das superfícies de ruptura nas minerações de ferro a céu aberto pode variar (...) devido às características como: tipos de materiais envolvidos, geometria elíptica (em planta), grandes profundidades das cavas e às várias descontinuidades presentes.”

Então, podemos definir os principais tipos de ruptura de controle estrutural encontrados em taludes de mineração como: ruptura Tipo Planar (HOEK & BRAY, 1981), ruptura Tipo em Cunha (GOODMAN, 1989) e ruptura de Tombamento (GOODMAN & BRAY, 1976). A Tabela 2 identifica os três tipos de ruptura e suas características.

Tabela 2 - Caracterização dos tipos de ruptura (AGUILERA, 2009).

<p style="text-align: center;"><b>Tipo Planar</b></p> 	<p>O plano sobre o qual o deslizamento ocorre deve formar um ângulo não maior a 20° com a face do talude (condição de sub paralelismo)</p> <p>A descontinuidade deve aflorar na face do talude, ou seja, o ângulo do plano de fraqueza deve ser menor ao ângulo da face do talude</p> <p>O ângulo da descontinuidade deve ser maior ao ângulo de atrito nesse plano (condição de resistência)</p> <p>O ponto final da falha, na zona mais elevada, pode aflorar na face do talude ou no topo, mas a descontinuidade pode se desenvolver em combinação com uma trinca de tração ou uma falha que aflore de igual forma</p> <p>Na prática é necessário que existam planos ou juntas laterais que limitem o deslizamento.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Tipo Cunha</b></p> 	<p>Devem existir duas estruturas ou descontinuidades (planos de fraquezas) que se intersectem definindo um bloco tetraedro (cunha)</p> <p>A linha de intersecção das estruturas deve aflorar na cara do talude</p> <p>O ângulo das estruturas ou descontinuidades e da linha de intersecção devem ser de um valor tal que o ângulo de atrito das estruturas sejam insuficiente para manter a cunha estável.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Tombamento</b></p> 	<p>O plano sobre o qual se encontra a estrutura ou descontinuidade deve formar um ângulo com a face do talude não maior a 30° (condição de paralelismo),</p> <p>A estrutura deve mergulhar na direção oposta do ângulo da face do talude.</p> <p>A estrutura deve cumprir a seguinte condição (Goodman, 1989): <math>\alpha &gt; 90^\circ - \alpha b + \phi 1</math> ; onde <math>\alpha</math> é o ângulo da descontinuidade; <math>\alpha b</math> é o ângulo da face do talude e <math>\phi 1</math> é o ângulo de atrito da descontinuidade, determinado para baixar pressão de confinamento</p>

### 2.2.3 Uso da Projeção Estereográfica na análise dos tipos de ruptura

O estudo no âmbito da Geologia Estrutural exigiu técnicas que facilitassem a análise de dados tridimensionais de estruturas permitindo a decomposição dos numerosos elementos angulares envolvidos. Atendendo a problemática, a Projeção Estereográfica surge como a ferramenta que permite simplificar o tratamento de dados estruturais.

CARNEIRO *et al.* (1996) explica que a Projeção Estereográfica permite a representação em plano de feições espaciais, sejam elas planares ou lineares, e possibilita a realização de inúmeras operações indispensáveis em aplicações específicas em Geologia Estrutural. LOCZY & LADEIRA (1976) dizem que muitos problemas em Mecânica das Rochas em que existem relações angulares entre linhas e planos podem ser resolvidos mais facilmente através do uso da Projeção Estereográfica.

A Projeção Estereográfica no estudo de estabilidade de taludes contribui na visualização rápida e simples dos tipos potenciais de ruptura e representação espacial das relações entre as estruturas geológicas do maciço e as atitudes dos taludes, auxiliando na análise da geometria mais provável a uma possível instabilização. Para isso, a técnica representa a atitude das discontinuidades, definida pela sentido do mergulho (*dip direction*), direção do plano (*strike*) e ângulo de mergulho (*dip*) do plano (Figura 9).

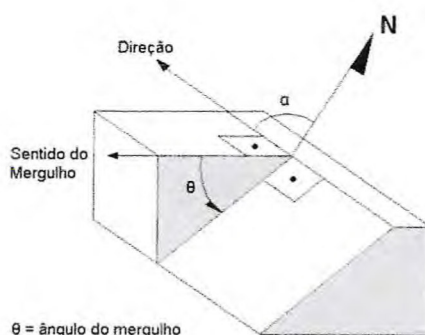


Figura 9 - Definição de orientação espacial em estruturas geológicas planares -  $\alpha$ : azimute do plano. (Modificado de MAGALHÃES e CELLA, 1998 *apud* PINOTTI, 2011).

HASUI & MIOTO (1992) definem Projeção Estereográfica como a projeção da superfície de uma esfera sobre um plano que passa pelo centro da mesma, utilizando como ponto de vista a interseção normal ao plano com a superfície dela. Essa interseção desenha o plano como um círculo. A projeção do plano no hemisfério inferior da esfera é o

componente que representará as atitudes do plano, ou seja, a orientação estrutural e relações angulares do plano no espaço.

A projeção torna-se muito simples quando se reproduz o círculo equatorial da esfera de referência em forma de diagrama. Os dois diagramas de projeção, também chamados de redes, são conhecidos como diagrama de Wuff e diagrama de Igual Área (Schmidt-Lambert). A principal diferença entre eles é que o primeiro distorce a área da unidade de malha enquanto o segundo mantém a mesma área (apesar das distorções próprias da rede) em qualquer ponto de observação.

Quando se lida com numerosos dados a distorção da rede de Wuff impede uma visualização correta da distribuição dando a falsa impressão de orientação preferencial do plano, pois uma área angular no centro da rede é menor que a encontrada junto à borda. Por meio do diagrama de Igual Área pode-se evitar tal deficiência, mesmo que a forma das áreas tenha que ser modificada.

Existem duas maneiras de se representar um plano no diagrama de Igual Área. Um plano pode ser representado por sua projeção ciclográfica, que consiste em uma linha curva. A ciclográfica pode indicar a direção azimutal do plano (*strike*) e projetando-se uma seta perpendicular ao ciclograma no sentido que decai o plano tem-se o sentido ou rumo do mergulho (*dip-direction*). Um plano também pode ser representado por apenas um ponto, sendo esta a sua projeção polar, bastante útil para quando se dispuser de grande número de dados. Para representação desse ponto, também chamado de polo basta contar 90 graus a partir do ciclograma do plano, passando pelo centro do diagrama (Figura 10).

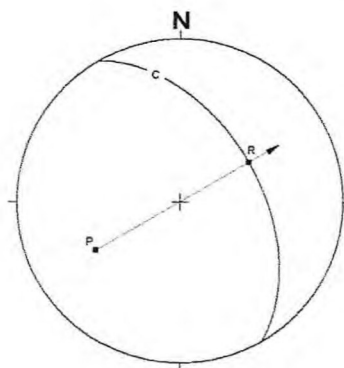


Figura 10 - Formas de representação de um plano no Diagrama de Schmidt-Lambert. P é a projeção polar do plano, c é sua projeção ciclográfica (ciclograma) e R é a projeção da reta pendente do mergulho (PINOTTI, 2011).

## CAPÍTULO 3

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do presente trabalho foram adotadas três etapas específicas e sequenciais que integram a realização da pesquisa. São elas: etapa pré-campo, campo e pós-campo.

#### 3.1 Etapa pré-campo

##### 3.1.1 Levantamento Bibliográfico

Para o entendimento prévio do contexto geológico encontrado em campo, realizamos o levantamento bibliográfico de diversos trabalhos já realizados na região, relatando os aspectos característicos da área estudada. Esse levantamento bibliográfico deu origem ao capítulo Geologia Regional, referente ao capítulo Revisão Bibliográfica.

Para o estudo do caso abordado no presente trabalho pesquisamos na literatura técnica existente os conceitos que fundamentam. Assuntos como: movimentos de massa em taludes rochosos e fatores que geram a instabilidade de taludes, os quais encontram-se discriminados no capítulo Conceitos Geológico-Geotécnicos aplicados a estabilidade de taludes, referente ao capítulo Revisão Bibliográfica.

As metodologias utilizadas em campo abordam sistemas de classificação geomecânica para fins de análises de estabilidade de taludes dentro da realidade da localidade e na perspectiva dos objetivos da pesquisa. As normas e metodologias dos ensaios laboratoriais referentes à determinação da resistência da rocha realizados na etapa pós-campo também foram pesquisadas nessa etapa do trabalho.

##### 3.1.2 Mapas pré-campo

Os mapas pré-campo foram confeccionados contendo informações necessárias a logística da área. Os acessos, as estradas principais e outras informações importantes foram retiradas de imagens de satélite do programa *Google Earth 7.1.2*. Depois do georreferenciamento da imagem com a utilização do *software Global Mapper™ Version 8.03*, esses dados foram vetorizados com a utilização do *software Arc Map™ Version 9.3* e deram origem ao nosso mapa pré-campo.

### 3.2 Etapa de campo

Os trabalhos desenvolvidos em campo foram realizados em duas outras etapas: (1) realização do mapeamento geológico convencional da área de estudo e (2) o mapeamento geotécnico, com a caracterização geotécnica dos taludes da mina. Essas etapas foram precedidas por duas idas ao campo relativas à confecção do relatório da bolsa de iniciação científica, o qual os autores do presente trabalho realizaram nos anos de 2012-2013.

Realizamos o mapeamento através da coleta de dados ao longo das estradas de acesso as cavas e frente de lavra existentes, dos acessos secundários e de picadas. Para a caracterização geotécnica especificamente, o levantamento foi feito nos taludes das frente de lavra, realizado com a aferição de pontos num espaçamento médio de vinte em vinte metros.

Os materiais utilizados foram: bússola *Brumpton* (para a medição das atitudes de foliações e fraturas), lupa (para a identificação mesoscópica dos minerais presentes nas rochas), martelo geológico, marreta, canivete, imã (para a identificação de minerais e rochas magnéticos), Sistema de Posicionamento Global (GPS) em projeção cartográfica *South American Datum 69* (para localização em campo), câmera digital (para registro das feições), mapas de auxílio (acessos), caderneta de campo e planilhas para coleta de informações.

O mapeamento geológico teve como objetivo a caracterização geológica da área estudada. Nesta etapa as litologias foram identificadas e as atitudes de foliações e fraturas foram medidas.

O mapeamento geotécnico foi realizado através: (1) da análise dos parâmetros de caracterização geomecânica dos diferentes tipos de minério rochosos presentes em frentes de lavra e (2) do levantamento e análise geométrica das famílias de descontinuidades existentes.

#### 3.2.1 Caracterização geomecânica dos taludes rochosos – definição dos parâmetro geotécnicos e tipos de ruptura

Para a caracterização geomecânica dos taludes rochosos seguimos a orientação da ABGE (1998), que impõe ao estudo geológico-geotécnico de um maciço rochoso o procedimento de evidenciar os atributos ou parâmetros da rocha que definem as características associadas a determinados comportamentos às condições daquele material.

Os parâmetros e as suas características foram determinados em campo através de meios expeditos aferidos em uma extensão de cinco a dez metros de face dos taludes. Os resultados foram apresentados em formas de classes ou graus de itensidade.

Os parâmetros foram selecionados para a avaliação do controle da resistência mecânica e deformacional do maciço. Eles são encontrados nos critérios de classificação de GUIDICINI & NIEBLE (1984) e ITP (1984). São os seguintes parâmetros geotécnicos: o Grau de Coerência ou Consistência, o Grau de Fraturamento e o Grau de Alteração.

O *Grau de Coerência* ou *Consistência* é aplicado para a classificação de resistência da rocha. Coerência é definida com base nas propriedades de tenacidade, coesão, dureza e friabilidade das rochas. A coerência é um critério relativo utilizado para comparação entre as variações de um mesmo litotipo. É baseado na apreciação tátil - visual feita pela aplicação de golpes do martelo geológico na rocha, elaborando-se assim uma escala de níveis de acordo com a resposta da rocha aos golpes. Também se avalia o comportamento consistente da rocha pelo risco da lâmina do canivete (GUIDICINI *et al.*, 1976). Este parâmetro está discriminado em suas classes na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros para a classificação do Grau de Coerência ou Consistência.

Grau de Coerência ou Consistência (GUIDICINI & NIEBLE, 1984)		
Classe	Situação	Características
C1	muito coerente	quebra com dificuldade ao golpe do martelo, produzindo fragmentos de bordas cortantes. Superfície dificilmente riscável por lâmina de aço. Somente escavável a fogo.
C2	coerente	quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo. Superfície riscável com lâmina de aço.
C3	pouco coerente	quebra facilmente ao golpe de martelo, produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente. Superfície facilmente riscável com lâmina de aço.
C4	friável	esfarela ao golpe do martelo. Desagrega sob pressão dos dedos. Pode ser cortada com lâmina de aço. Friável e escavável com lâmina.

O *Grau de Fraturamento* é determinado pela simples contagem de fraturas ao longo de uma direção, utilizando-se normalmente o número de fraturas por metro linear. É encontrada na Literatura a avaliação do espaçamento entre as fraturas - quanto menor for o espaçamento entre as descontinuidades de um maciço, maiores serão as deformações. O grau



de faturamento equivale ao inverso da medida dos espaçamentos, incluindo todos os sistemas presentes. Este parâmetro está discriminado em suas classes na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros para a classificação do Grau de Fraturamento.

Grau de Fraturamento (IPT, 1984)		
Classes	Situação	Fratura(s) por metro
F1	ocasionalmente fraturado	< 1
F2	pouco fraturado	1 a 5
F3	medianamente fraturado	6 a 10
F4	muito fraturado	11 a 20
F5	extremamente fraturado	> 20
F6	em fragmentos	torrões ou pedaços de diversos tamanhos, caoticamente dispostos

O *Grau de Alteração* é um parâmetro baseado na avaliação macroscópica das características petrográficas de alteração do maciço baseadas nas variações de brilho, cor dos minerais, cor da rocha, da tenacidade e friabilidade. A sua importância é atribuída ao fato de os processos intempéricos provocarem diminuição da resistência mecânica, aumento da deformabilidade e modificação texturais das rochas. É comum referir-se a maior ou menor facilidade com que se parte o material utilizando um martelo geológico, fazendo referência ao parâmetro de Consistência da rocha. Este parâmetro está discriminado em suas classes na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros para a classificação do Grau de Alteração.

Grau de Alteração (IPT, 1984)		
Classe	Situação	Características
A1	são ou praticamente são	Apresenta minerais primários sem vestígios de alteração ou com alterações físicas e químicas incipientes. Neste caso, a rocha é ligeiramente descolorida.
A2	medianamente alterado	Apresenta minerais medianamente alterados e a rocha é bastante descolorida.
A3	muito alterado	Apresenta minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis.
A4	extremamente alterado	Apresenta minerais totalmente alterados e a rocha é intensamente descolorida, gradando para cores de solo.

Para a estimativa dos tipos de ruptura optamos por coletar as medidas de orientação em notação do tipo *CLAR*, o qual determina a intensidade e sentido do mergulho dos planos.

Fizemos o registro fotográfico em cada ponto de coleta de dados. O ângulo de inclinação da face dos taludes foi anotado para se fazer a correlação com a geometria das descontinuidades presentes e inferir os tipos de ruptura em representação estereográfica.

Para a determinação de ensaios físicos, foram coletadas amostras do minério itabirítico de dez pontos estratégicos segundo as diferenças mineralógicas e estruturais dos maciços rochosos.

### 3.2 Etapa pós-campo

#### 3.2.1 Etapa de ensaios laboratoriais

Outro parâmetro abordado na análise do estabilidade dos maciços rochosos da mina foi o Grau de Resistência, determinado através do ensaio de resistência a compressão uniaxial. A resistência a compressão de rochas exprime à ruptura material pétreo quando submetido a uma carga de ruptura. Os ensaios de compressão uniaxial, orientados pela Norma ABNT-NBR 12.767, visam quantificar o esforço (carga/unidade de superfície) que provoca a ruptura da rocha, quando submetida à compressão uniaxial (IAMAGUTI, 2001).

Para a execução preparam-se corpos-de-prova cúbicos que são submetidos lentamente a cargas, em prensas hidráulicas, até a sua ruptura. A tensão de ruptura é calculada pela Equação 1, expressa em Mpa (mega pascal):

Equação 1 - Cálculo da resistência da rocha à tensões aplicadas a área.

$$\delta_R = \frac{P}{A}$$

$\delta_r$  = tensão de ruptura (MPa)  
 P = esforço de ruptura (KN) aplicada pela prensa  
 A = área de carga do corpo-de-prova (m<sup>2</sup>) submetida ao esforço

Os ensaios foram realizados no laboratório do NUTEC (Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará), localizado na Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, com a Máquina Universal de Ensaio marca EMIC (certificado de calibração EMIC nº617/13, 01/08/2013), que possui capacidade de 100 toneladas (Figura 13).

Para a realização dos ensaios, as amostras coletadas em campo foram cortadas com lâmina diamantada (Figura 11) em cubos de aproximadamente 5 centímetros de aresta (5cmx5cmx5cm), e em seguida medidos com régua digital (Figura 12) para determinação

exata das suas arestas. Com a medida das arestas é possível determinar a área do corpo de prova.

O resultado do ensaio fornece o esforço de ruptura em kN (kilo-newton). Com essas duas medidas, é possível calcular a Tensão de Ruptura ou Resistência do corpo de prova.



Figura 11 - Operação de corte de amostras em lamina diamantada realizadas no NUTEC. Técnico operando a máquina de corte (Fonte: Autores).



Figura 12 - Medição das arestas do corpo de prova cúbico no laboratório do NUTEC com régua digital (Fonte: Autores).



Figura 13 - Realização do ensaio de compressão uniaxial realizada na Máquina Universal de Ensaio, no laboratório do NUTEC (Fonte: Autores).

### 3.2.2 Etapas de gabinete

Nesta etapa, foram gerados mapas que representassem os dados obtidos em campo. Dados de furo de sondagem disponibilizados pela Mhag Serviços e Mineração S/A<sup>©</sup> foram integrados às informações coletadas por esta pesquisa para interpretação dos contatos geológicos de superfície e subsuperfície.

Foi confeccionado o Mapa de Situação, que é um mapa geral da área de posse da Mhag Serviços e Mineração S/A<sup>©</sup> com as poligonais das áreas correspondente aos três mapas gerados em maior detalhe. Este mapa também contém o conjunto de pontos aferidos em campo e é encontrado no “APÊNDICE A” deste trabalho.

Os três mapas referidos no parágrafo anterior representam a compilação da análise do dados obtidos em campo, e estão relacionados aos dois tipos de mapeamento feitos (mapeamento geológico e mapeamento geotécnico). São eles: o Mapa Geológico da Mina do Bonito (1:5.000), o Mapa Estrutural da Mina do Bonito (1:4.000) e o Mapa de Análise Geotécnica (1:1.500); encontrados respectivamente nos “APÊNDICES B1, B2 E B3” deste trabalho. Suas especificações estão descritas nos próximos tópicos.

#### 3.2.2.1 Mapas geológico-estruturais

No Mapa Geológico da Mina do Bonito estão inseridas informações sobre as litologias e foliações principais em escala de 1:5.000. Foi utilizado o *software Arc Map*<sup>TM</sup>

*Version* 9.3 e 10.0 para a representação das informações de campo em mapa. No Mapa Estrutural da Mina do Bonito estão representadas as feições dúctil-rúpteis das área: foliações, fraturas, dobras e elementos das dobras; em escala de 1:4.000.

### **3.2.2.2 Mapas geotécnicos**

No Mapa de Análise Geotécnica estão inseridos os dados das feições estruturais em projeções esféricas, os tipos de rupturas gerados e informações dos parâmetros geomecânicos avaliados em campo. Para a identificação dos parâmetro foi definido uma legenda com as iniciais a cada um: para *Grau de Coerência* a letra “C”, para *Grau de Fraturamento* a letra “F” e para *Grau de Alteração* a letra “A”. As classes dentro de cada parâmetro receberam a indicação de um número, combinando assim letras e números (Tabelas 3, 4 e 5).

Em relação aos tipos de ruptura, para a representação e melhor entendimento das relações espaciais das descontinuidade foi utilizado a projeção estereográfica dos planos no diagrama de Igual Área (rede de Schmidt-Lambert). As projeções contaram com um número de 232 dados espaciais, entre foliações e fraturas, e foram geradas nos *softwares Stereonet for Windows Version 8.8.3* e *Georient Version 9.5.0*.

## CAPÍTULO 4

## 4 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA MINA DO BONITO

### 4.1 Geologia Local

A área de estudo compreende as formações Serra dos Quintos e Jucurutu do Grupo Seridó e a Suíte Poço da Cruz, cartografadas por ANGELIM (2006). São encontradas sequências sedimentares químicas e terrígenas proterozóicas sotopostas a um embasamento granito-gnássico, onde todo pacote participou da deformação brasileira gerando feições dobradas e metamorfozadas.

#### 4.1.1 Suíte Poço da Cruz

##### 4.1.1.1 *Meta-granitos e Gnaisses*

Essa unidade é encontrada na porção norte da área, em contato com itabiritos e xistos e é caracterizada por metagranitos de granulação média a grossa e composição variando entre sienito a monzogranitos, contendo porfiroclastos róseos de microclina imersos em matriz quartzo-feldspática, com biotita e anfibólio em proporções variadas (Figura 14). Na porção NE da área, são encontrados augen-gnaisses graníticos com maiores teores de K-feldspato, mostrando feições miloníticas e zonas de cisalhamento localizadas. Nessa região, os itabiritos não estão presentes e os augen gnaisses fazem contato direto com os mármore, o mesmo ocorrendo no sul da área.

A partir da observação das seções transversais elaboradas a partir dos furos de sondagem rotativa realizados pela Mhag Serviços e Mineração S/A, os metagranitos e gnaisses da região norte aparecem na base da sequência litoestratigráfica, sobrepostos pelos xistos e itabiritos que afloram na Mina do Bonito. Em direção sul da região, os xistos e itabiritos dão lugar aos mármore da Formação Jucurutu, com os quais os augen-gnaisses se encontram em contato direto.

Representa o litotipo menos afetado pelo metamorfismo e pelos processos hidrotermais. Onde o metamorfismo foi suficiente para gerar estruturas gnássicas, a rocha possui bandas félsicas com espessura milimétrica a centimétrica, de coloração rosa, contendo predominantemente feldspatos, e máficas, contendo biotita e anfibólio.

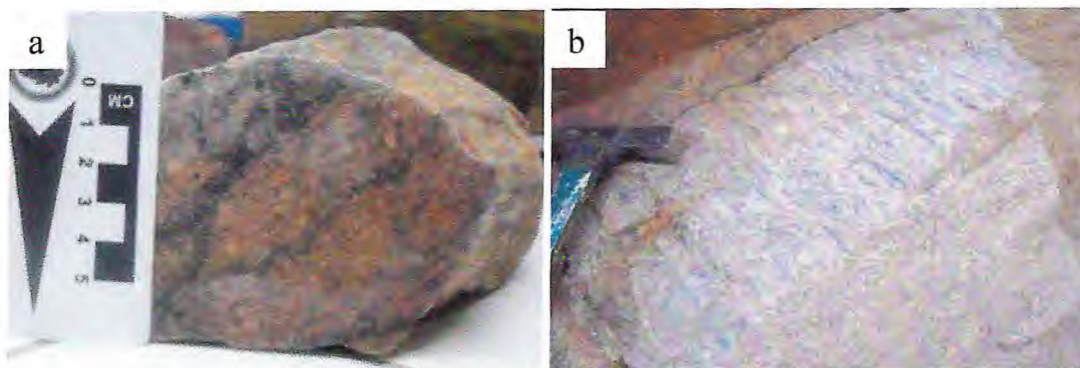


Figura 14 - a) Amostra de mão de gnaiss, contendo porfiroclastos róseos de microclina, biotita e anfibólio. b) Bloco de gnaiss em afloramento, onde é possível observar o bandamento gnáissico, porém incipiente (coordenadas: 723614; 9350846) (Fonte: Autores).

No contato com outras litologias (Figura 15a) ou em zonas de cisalhamento apresentam-se foliados. No contato com as Formações Ferríferas, ele possui zonas centimétricas de muscovita e lentes de quartzito ferruginoso (Figura 15b). A magnetita está presente como mineral acessório.

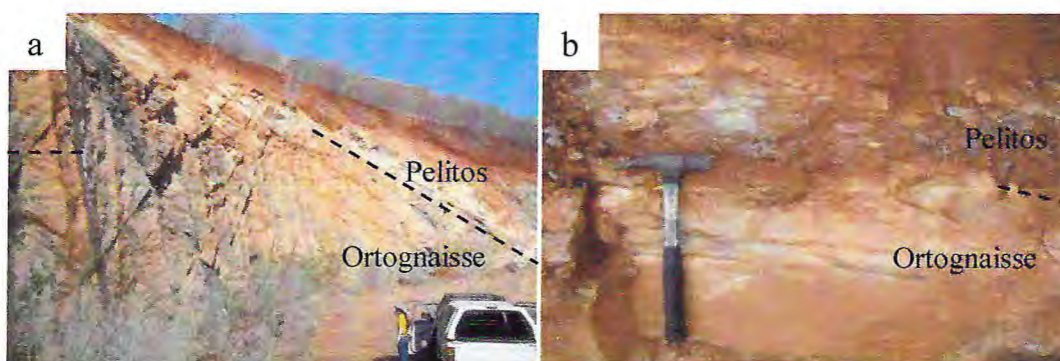


Figura 15 - a) Contato entre gnaiss e pelitos (coordenadas: 723614; 9350846). b) Contato entre gnaiss e itabiritos, marcado por zonas centimétricas de muscovita-xistos e lentes de quartzito ferruginoso (coordenadas 723678; 9351024) (Fonte: BARBOSA, 2013).

Microscopicamente apresenta textura inequigranular (Figura 16). Os minerais essenciais são quartzo (40%), microclina + ortoclásio (45%), plagioclásio (15%) e biotita (8%). Os minerais secundários são clorita e sericita. Os acessórios são zircão, apatita, opacos (minerais de ferro - hematita, magnetita).



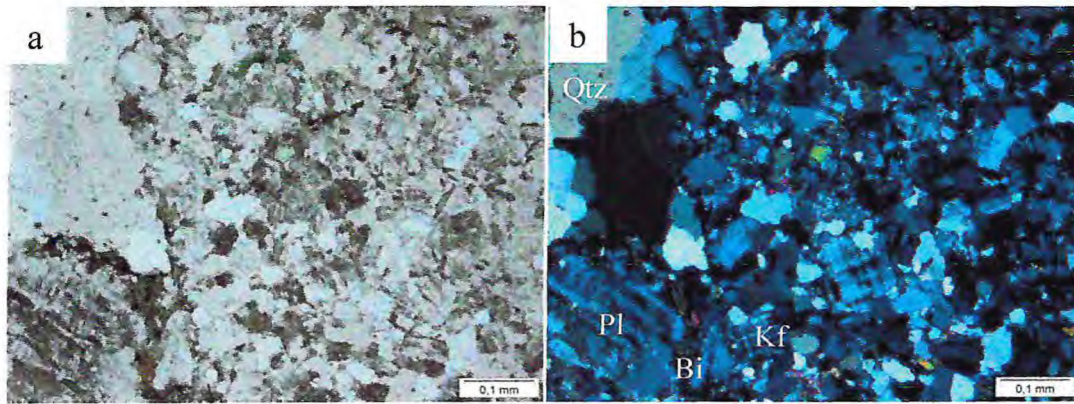


Figura 16 - Fotomicrografia do gnaiss. a) Nicóis descruzados (4x de aumento); b) Nicóis cruzados (4x de aumento). Em destaque minerais de Quartzo (Qtz), Plagioclásio (Pl), Biotita (Bi) e microclina (Kf) (Fonte: Autores).

#### 4.1.2 Formação Serra dos Quintos

Na literatura essa unidade é composta por sequências metavulcanosedimentares. Os litotipos dominantes na área são as Formações Ferríferas Bandadas (BIFs) ou itabiritos (termo brasileiro) que apresentam-se localmente enriquecidos por hidrotermalismo.

O material presente envolve sequências deposicionais químicas de contribuição vulcano-exalativa, que são as Formações Ferríferas Bandadas, intercaladas por sequências psamo-pelíticas. Essa sedimentação indica ambiente marinho raso, relativamente calmo/confinado, com aporte sedimentar continental. Localmente observam-se transformações nos itabiritos e geração de minérios ricos (magnetitos) com Formação de scarns associados.

##### 4.1.2.1 Formações Ferríferas Bandadas (BIFs)

Os itabiritos apresentam cores variadas, dependendo dos minerais presentes e grau de alteração superficial: variando de pretos, verdes, vermelhos e alaranjados. Possuem estrutura bandada de espessura milimétrica a centimétrica, intercalando bandas claras contendo maior proporção de quartzo, alternadas com níveis e bandas escuras, contendo minerais de ferro como hematita, magnetita, martita ou especularita.

Essa litologia possui grande representação na região. Ocorre em superfície na porção central da área, e faz contato com quase todas as litologias: mármores, clorita xistos, sericita

xistos, quartzitos ferruginosos e magnetitos. Em profundidade também faz contato com diversas litologias.

#### **4.1.2.1.1 Itabiritos: variações tipológicas**

O minério itabirítico da mina possui heterogeneidade tipológica evidente. BARBOSA (2013), escreve que, em função de sua composição mineralógica, com os minerais de ferro predominantes dando nome ao tipo e/ou subtipo de itabirito, os tipos/subtipos de Itabiritos dividem-se em anfíbolítico, anfíbolítico goetítico, martítico e martítico especularítico. As hematitas podem ser, predominantemente, martíticas ou especularíticas. Ocorre ainda, um alto conteúdo de pseudomorfos de magnetita.

A mesma autora também utilizou como critério secundário de classificação as propriedades magnéticas dos Itabiritos, subdividindo-as em: alta intensidade magnética (atrai à magnetita primária e secundária - imã de 600 G), média intensidade magnética (atrai martita - imã de 3.000 G) e baixa intensidade magnética (atrai especularita - imã de 7.500 G).

Este parâmetro foi utilizado nos itabiritos para avaliar o grau de influência do hidrotermalismo (percolação de fluídos rico em magnetita) em cada tipo estudado, bem como, para otimizar o processo de beneficiamento da empresa Mhag Serviços e Mineração S/A, a cerca, da separação magnética (BARBOSA, 2013).

#### ***j) Itabiritos Martíticos***

Segundo a autora, os itabiritos (Figura 17) representam a maior unidade presente na Mina do Bonito, com porcentagem estimada de volume em 40%. Ocorrem em superfície na porção central norte da área em contato com os ortognaisses, xistos, quartzitos ferruginosos e os itabiritos anfíbolíticos, anfíbolíticos goetíticos e martíticos especularíticos. Apresentam-se com estrutura bandada, movimentada e dobrada, granulação variando de fina à grossa, onde as bandas de cores cinza azulada-esbranquiçado, intercalam-se com níveis alaranjados. Apresentam intensidade magnética baixa (predominante) e alta (BARBOSA, 2013).

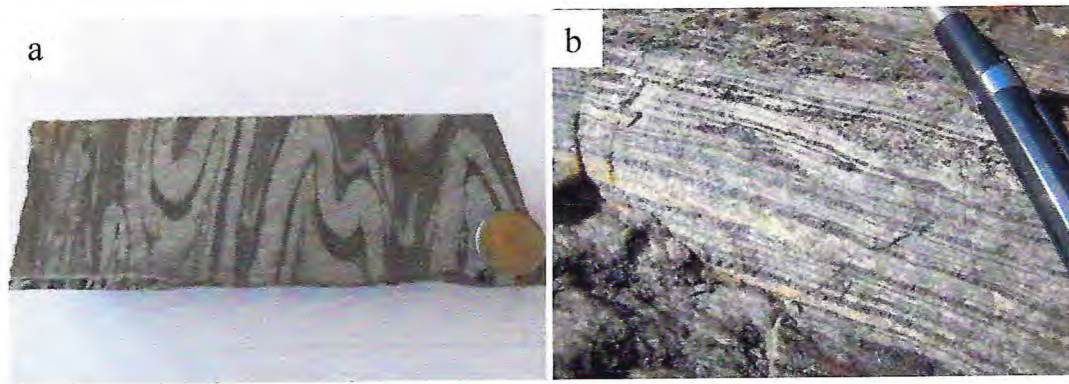


Figura 17 - a) Itabiritos martítics exibindo estrutura dobrada (Fonte: BARBOSA, 2013). b) Bandada (Fonte: Autores).

Microscopicamente apresentam textura granoblástica e estrutura. Mineralogicamente apresentam quartzo (60%), martita/magnetita (25%), goethita (10%) e especularita (5%) (Figura 18).

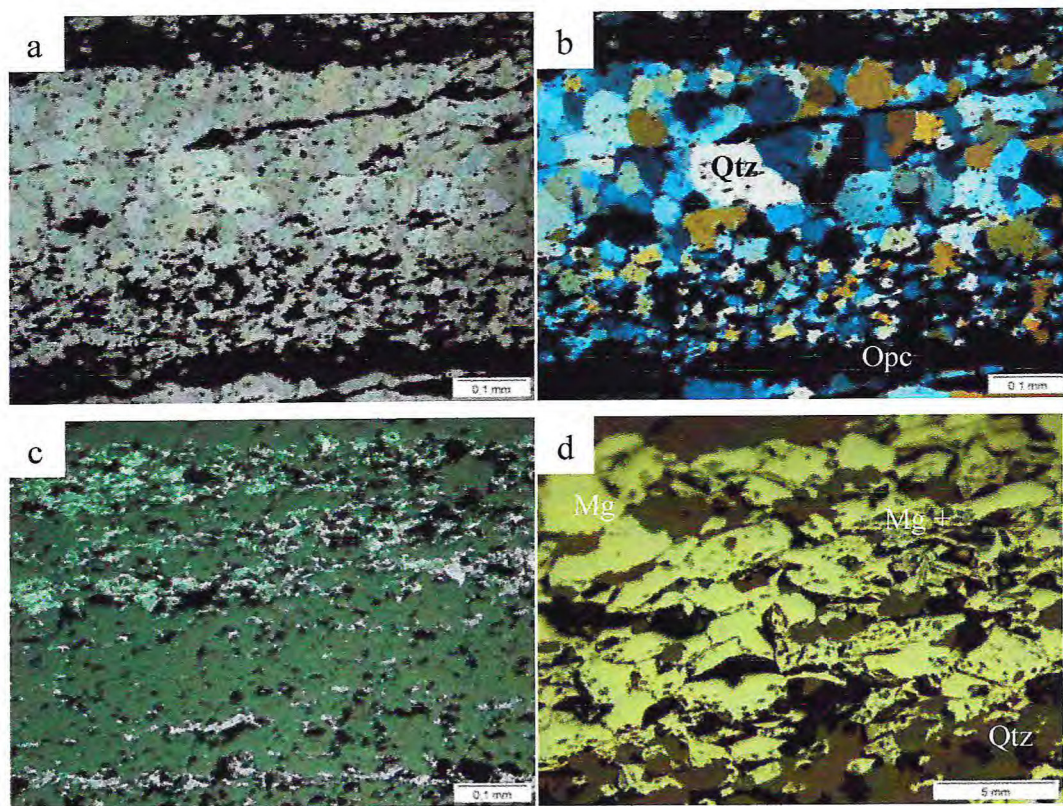


Figura 18 - a) Lâmina delgada de itabirito martítico com nicóis descruzados (4x de aumento); b) Lâmina delgada de itabirito martítico com nicóis cruzados (4x de aumento). Em destaque minerais de Quartzo (Qtz) e Opacos (Opc); c) Lâmina polida de itabirito martítico com aumento de 4x; d) Lâmina polida de itabirito

martítico aumento de 10x. Em destaque minerais de Quartzo (Qtz), magnetita (Mg) e goethita (Go) (Fonte: Autores).

## ii) Itabiritos Anfibolíticos

Os itabiritos anfibolíticos (Figura 19) representam a segunda maior unidade presente na Mina do Bonito, com porcentagem estimada de volume em 30%. Ocorrem em superfície no extremo oeste da área em contato com os mármore, xistos e os itabiritos martíticos e anfibolíticos goetíticos. Em profundidade aparecem intercalados aos mármore, xistos e skarns. Apresentam estrutura bandada, de granulação variando de fina à média e cor cinza esbranquiçada e preto, intercalando-se com níveis esverdeados. A intensidade magnética é alta e quase não apresenta variações de composição (BARBOSA, 2013).

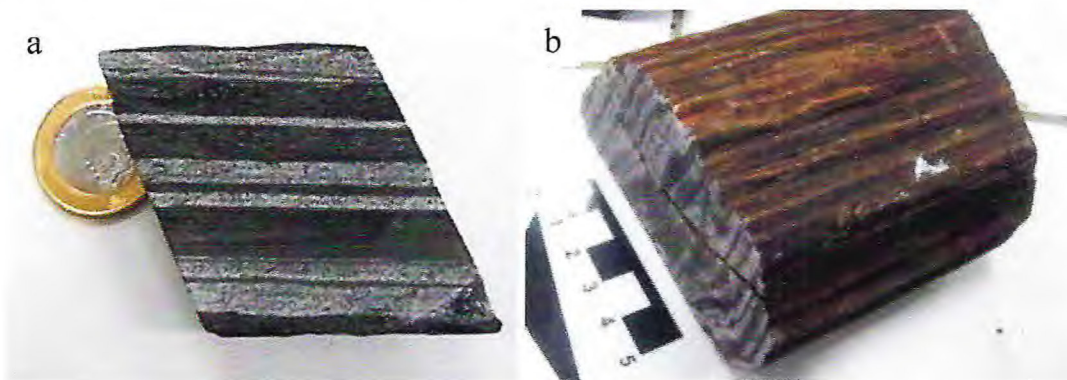


Figura 19 - a) amostra de itabiritos anfibolíticos apresentando estrutura bandada proveniente de furo de sonda; b) de itabiritos anfibolíticos apresentando estrutura bandada amostra colhida em afloramento (Fonte: Autores).

Microscopicamente apresentam textura granoblásticas e estrutura bandada (Figura 20). Mineralogicamente possui anfibólios ferríferos da série tremolita-ferro-actinolita (30%) quartzo (45%); magnetita (23%) e apatita (2%).

A análises de difratometria de raio X de níveis contendo anfibólios permitiu a determinação do tipo de anfibólio como tremolita, com distâncias interplanares representadas pelos picos de identificação de 3,32419 Å (100%), 3,11914 Å (59%) e 8,31088 Å (44%) e fórmula química  $\text{Ca}_2 \text{Mg}_5 \text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$ , encontrado no “APÊNDICE C”.

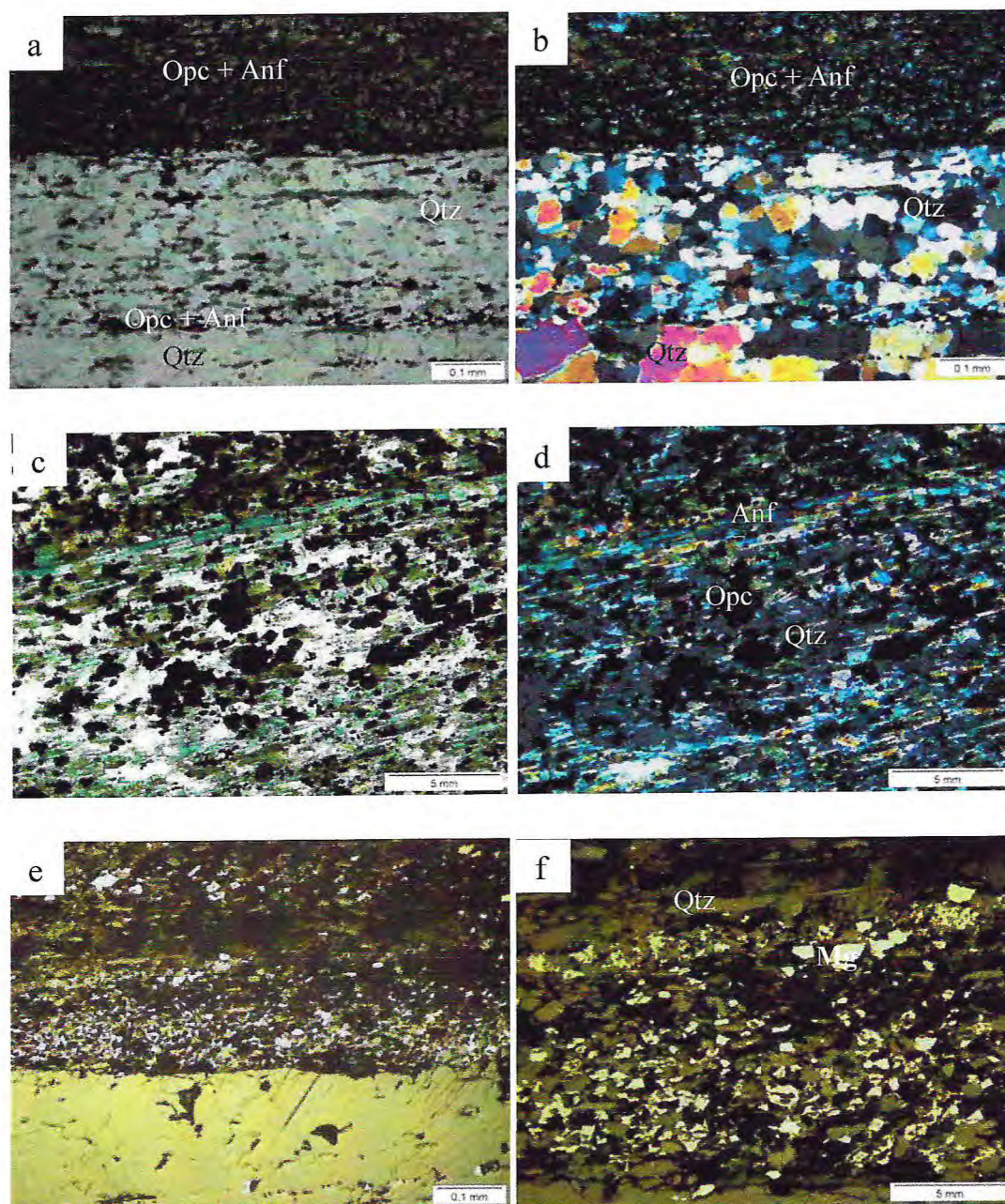


Figura 20 - a) Lâmina delgada de itabirito anfibolítico com nicóis descruzados (aumento de 4x); b) Lâmina delgada de itabirito anfibolítico com nicóis cruzados (aumento de 4x). É possível observar o bandamento marcante com bandas de quartzo (Qtz) intercaladas com bandas de minerais opacos (Opc) e Anfibólios férricos (Anf); c) Lâmina delgada de itabirito anfibolítico com nicóis descruzados (aumento de 4x); d) Lâmina delgada de itabirito anfibolítico com nicóis cruzados (aumento de 4x). Em destaque minerais de Quartzo (Qtz), Opacos (Opc) e Anfibólios férricos (AnfF); e) Lâmina polida de itabirito anfibolítico com aumento de 4x; f) Lâmina polida de itabirito anfibolítico com aumento de 10x. Em destaque minerais de Quartzo (Qtz) e Magnetita (Mg) (Fonte: Autores).

### iii) Itabiritos Anfibolíticos Goethíticos

Os itabiritos anfibolíticos goethíticos (Figura 21) representam a terceira maior unidade presente na Mina do Bonito, com porcentagem estimada de volume em 15%. Ocorrem em superfície na porção central da área em contato com os xistos, magnetitos, skarns e os itabiritos martílicos, martílicos especularíticos e anfibolíticos. Corresponde ao itabirito anfibolítico em processo avançado de alteração e/ou enriquecimento supergênico. Apresentam-se com estrutura bandada, de granulação variando de fina à média, onde as bandas de cor vermelho-ocrê-alaranjada, intercalam-se com níveis cinza-esbranquiçada a preto. A intensidade magnética é média (BARBOSA, 2013).

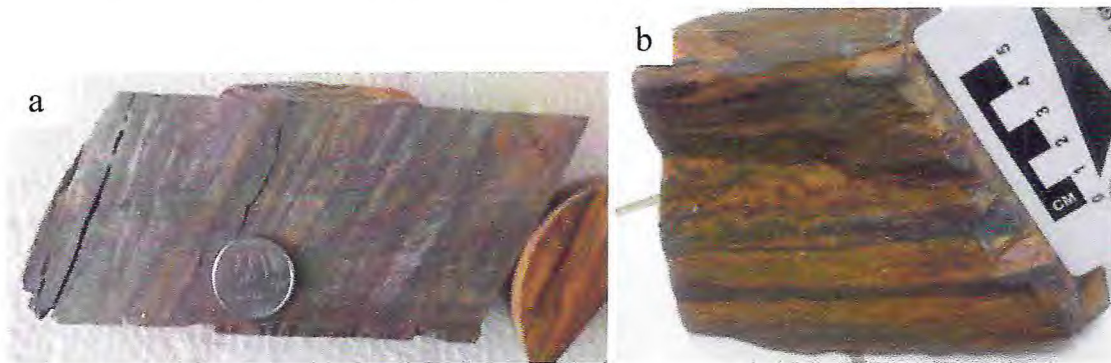


Figura 21 - a) Amostra de itabirito anfibolítico goethítico com estrutura bandada proveniente de furo de sonda (Fonte: BARBOSA, 2013). b) Amostra de itabiritos anfibolíticos goethíticos com estrutura bandada proveniente de afloramento (Fonte: Autores).

Microscopicamente apresentam padrão textural granoblástico e estrutura bandada (Figura 22). Mineralogicamente é formada por quartzo (50%), hematitas (25%), goethita (20%), e magnetita (5%).

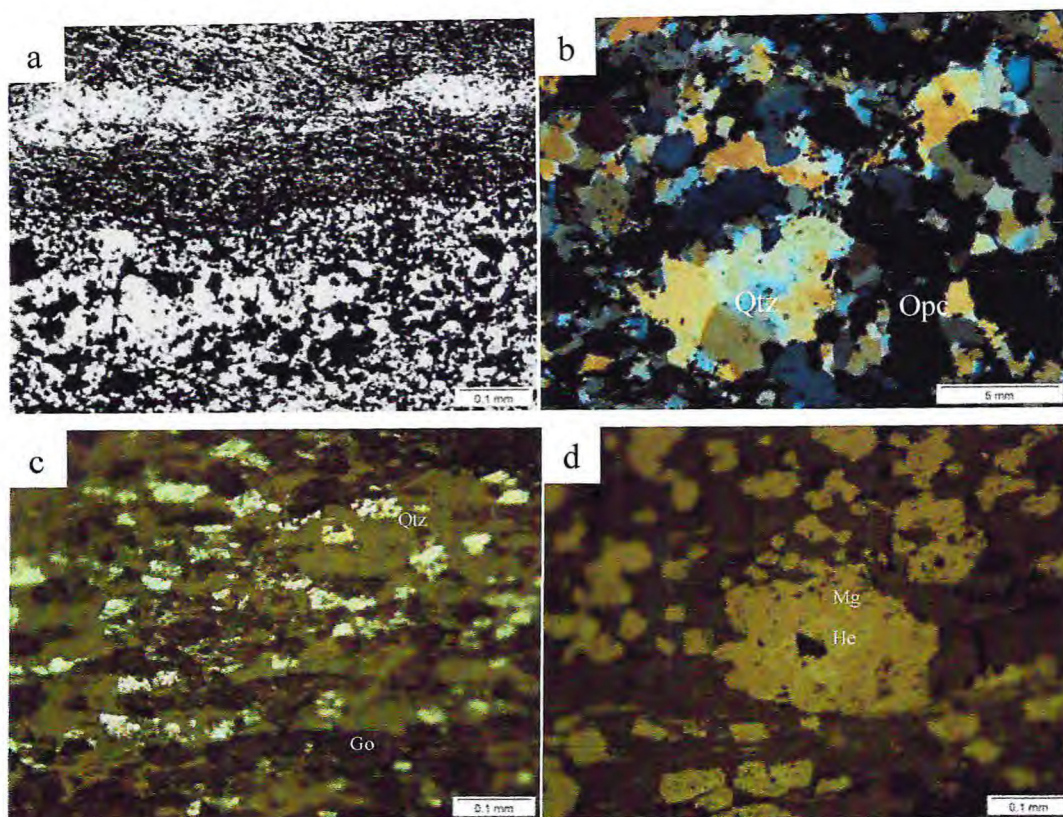


Figura 22 - a) Lâminas delgadas de itabirito anfíbolítico goethítico com nicóis descruzados (aumento de 4x). b) Lâminas delgadas de itabirito anfíbolítico goethítico com nicóis cruzados (aumento de 10x). Em destaque minerais de quartzo (Qtz) e opacos (Opc). c) e d) Lâminas polida de itabirito anfíbolítico goethítico com aumento de 20x. Em destaque minerais de quartzo (Qtz), goethita (Go), magnetita (Mg) e hematita (He) (Fonte: Autores).

#### **iv) Itabiritos Martíticos Especularíticos**

Os itabiritos martíticos specularíticos (Figura 23) representam a menor unidade presente na Mina do Bonito, com porcentagem estimada de volume em 10%. Ocorrem em superfície na base da seqüência dos itabiritos, circulando-os. Os minerais de minérios são: a martita (hematita granular) e a specularita (hematita lamelar), ambas proveniente da transformação da magnetita. Apresentam-se com estrutura levemente bandada, granulação variando de fina à grossa, onde as bandas de cores cinza azulada, intercalam-se com níveis cinza esbranquiçado. Apresenta intensidade magnética baixa (BARBOSA, 2013).

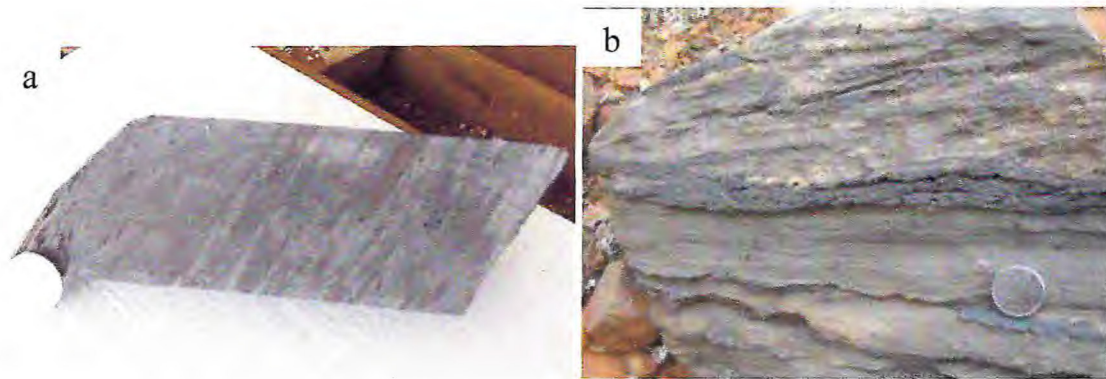


Figura 23 - Itabiritos martíticos especularíticos com estrutura bandada. a) Amostra recolhida em furo de sonda pela empresa (Fonte: BARBOSA, 2013). b) Amostra de mão encontrada em afloramento (coordenadas 723626; 9350422) (Fonte: Autores).

Microscopicamente apresentam textura granolepidoblástica definida principalmente pela orientação lamelar da especularita e grãos orientados de quartzo e martita (Figura 24). Os minerais identificados em ordem decrescente de abundância são: quartzo (60%), martita (27%) e especularita (10%). Como minerais acessórios aparecem Apatita e zircão (BARBOSA, 2013).

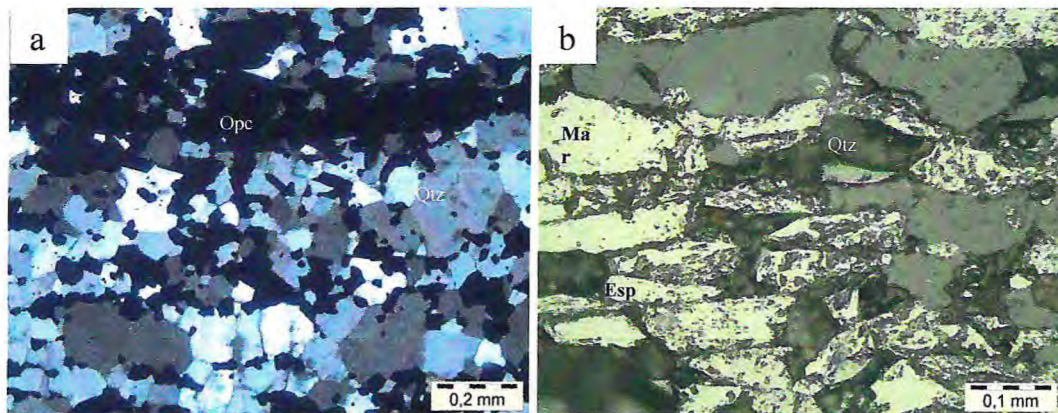


Figura 24 - a) Lâmina delgada (Nicóis cruzados, aumento de 10x) de itabirito martítico especularítico. Em destaque os minerais quartzo (Qtz) e opacos (Opc). b) Lâmina polida (aumento de 20x) do itabirito. Em destaque os minerais quartzo (Qtz), martita (Ma) e especularita (Esp) (Fonte: BARBOSA, 2013).

#### 4.1.2.2 Tipologia dos minérios hidrotermais

Além dos diferentes tipos de itabiritos, os quais BARBOSA (2013) define como primários, a autora também diferencia os litótipos de origem secundária, formados por alteração hidrotermal. A alteração hidrotermal produziu zonas hidrotermais, que afetaram as rochas encaixantes, modificando-as. Com base em sua nova composição mineralógica,



BARBOSA (2013) subdividiu os minérios hidrotermais da Mina do Bonito em três tipos distintos: magnetítico, skarn magnesiano e skarn tremolítico com actinolita.

Os magnetíticos são rochas homogêneas, constituídos quase exclusivamente por magnetita, com cor preta metálica e estrutura maciça. Possuem teores elevados de ferro e ocorrem associados aos skarns, sob a forma de estruturas lenticulares, inseridos nos itabiritos. O minério magnetítico foi quase totalmente lavrado. Atualmente é possível encontrá-los somente sob a forma de pequenos blocos soltos nas cavas de onde foram retirados (Figura 25).

Os skarns encontradas na região possuem pequena representação. Foram encontradas somente em dois pontos diferentes e se apresentam na forma de pequenas lentes dobradas, inseridas no quartzo mica xisto.



Figura 25 - Fotografia de uma das cavas onde o minério magnetítico estava presente antes de ser lavrado (Coordenadas: 723767; 9350692) (Fonte: Autores).

Apresentam estrutura maciça (Figura 26a) e bandada. Algumas vezes apresentavam feições cavernosas ias ou preenchidas com minerais de ferro (Figura 26b), outras vezes apresentavam cristais milimétricos de magnetita. Essas feições são indicativos da interação da rocha com fluidos hidrotermais ricos em ferro.

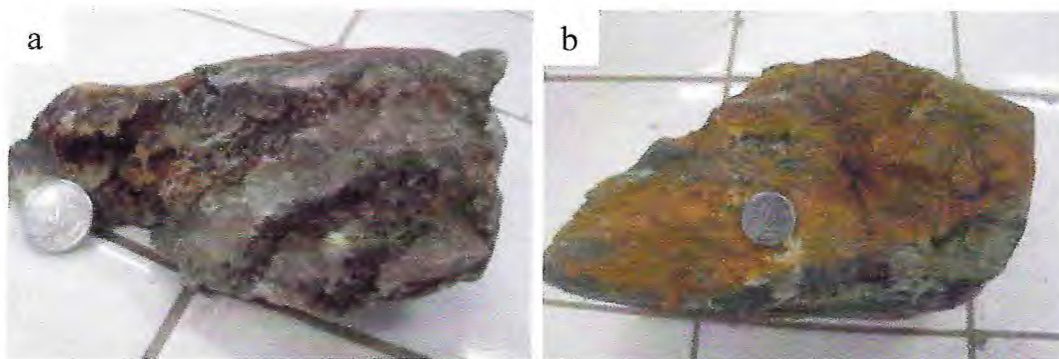


Figura 26 - a) Skarn com estrutura maciça, apresentando feições cavernosas e preenchidas por minérios de ferro (Coordenadas: 724163; 9350586). b) Skarn apresentando estrutura levemente bandada (Coordenadas: 723531; 9350600) (Fonte: Autores).

Os dois quadros apresentados nesse capítulo (Quadros 6 e 7) resumem as subdivisões propostas pela autora na classificação dos minerais de ferro primários e secundários encontrados na Mina do bonito e o mapa no “ANEXO A”, proposto pela mesma, define as áreas de predominância desses diferentes minérios na região estudada.

Quadro 6 - Tipologia dos minérios itabiríticos primários (Fonte: BARBOSA, 2013).

ORIGEM		VULCANOSSEDIMENTAR - TIPOLOGIA DOS MINÉRIOS ITABIRÍTICOS PRIMÁRIOS											
TIPOS SUBTIPOS	SIGLA	PARÂMETROS MINERALÓGICOS (% ESTIMADA EM MASSA)	INTENSIDADE MAGNÉTICA (Gaus)			PARÂMETROS QUÍMICOS (%)							
			600 G	3.000 G	7.500 G	Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	MnO	MgO	P. F
Itabirito anfíbolítico	la	Essenciais: anfíbolio ferríferos (série tremolita-ferro-actinolita (35%) e grunerita - (5%), quartzo (35%); magnetita martitizada (20%), pirita (2%) e apatita (2%); Acessórios: apatita, epidoto e carbonatos (<= 1%); Alteração: clorita, hematita em martita, goethita e/ou limonita.	Alto			22,22 - 26,25	32,20 - 38,04	48,42 - 61,83	2,19 - 4,45	0,03 - 0,05	0,26 - 0,36	3,55 - 4,97	<0,01 - 0,26
Itabirito anfíbolítico goethítico	lag	Essenciais: quartzo (50%), hematitas (martita - 23% e especularita - 5%); goethita ( 19%), e magnetita (2%); Acessórios: apatita e zircão(<= 1%); Alteração: goethita e/ou limonita.		Média		25,93 - 41,61	37,58 - 60,30	34,02 - 60,11	0,20 - 0,50	0,02 - 0,04	0,03 - 0,28	0,03 - 1,86	<0,01 - 1,29
Itabirito mártítico	lm	Essenciais: quartzo (55%), martita/magnetita (30%) e goethita e/ou limonita (10%) e especularita (4%); Acessórios: apatita e zircão(<= 1%); Alteração: goethita e/ou limonita.	Alto		Baixa	19,55 - 30,13	39,85 - 43,66	51,88 - 59,16	*0,20 - 0,46 * GLBTO-78-708 6,37 ppm	0,03 - 0,05	0,06 - 0,46	<0,01 - 4,91	*0,47 - 0,81 * GLBTO-78-708 2,89 ppm
Itabirito mártítico especularítico	lme	Essenciais: quartzo (50%), martita (30%) e especularita (19%) Acessórios: Apatita e zircão (<1%). Alteração: goethita (1%)			Baixa	21,37 - 33,95	30,97 - 49,21	47,04 - 56,25	*0,25 - 0,29 * GLBTO-30-295 2,84 ppm	<0,01 - 0,06	0,15 - 0,19	<0,01 - 4,34	* <0,01 - 0,40 * GLBTO-30-295 1,38 ppm

Quadro 7 - Tipologia dos minérios itabiríticos secundários. (Fonte: BARBOSA, 2013).

ORIGEM		HIDROTHERMAL - TIPOLOGIA DOS MINÉRIOS SECUNDÁRIOS										
TIPOS SUBTIPOS	SIGLA	PARÂMETROS MINERALÓGICOS - ORDEM DECRESCENTE DE ABUNDÂNCIA (% ESTIMADA EM MASSA)	PARÂMETROS QUÍMICOS (%)									
			Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	MnO	MgO	CaO	P. F	
Magnetitito	Mag	Essenciais: magnetita secundária/martita (94%), carbonato (3%) e clorita (2%); Acessórios: goethita e/ou lepidocrosita(<= 1%); Alteração: clorita e argilo minerais.	63,20 - 65,00	91,60 - 94,20	1,03 - 5,13	1,02 - 1,24	0,02	0,62 - 4,10	0,67 - 2,23	0,04	(-0,05) - (-0,06)	
Skarn Magnesiano	Smg	Essenciais: magnetita/martita (50%), anfíbolio (antofilita 19%), especularita (10%), granada (10%), carbonato (5%) e pirita (5%); Acessórios: serpentina (<= 1%); Alteração: clorita magnesiânica e talco.	41,61 - 49,91	60,30 - 72,33	2,40 - 25,80	0,32 - 0,63	0,01 - 0,1	0,12 - 0,67	3,84 - 11,06	0,08 - 2,80	0,92 - 2,80	
Skarn tremolitito com actinolita	Stm	Essenciais: tremolita/actinolita (50%), magnetita (25%), martita (12%), especularita (7%), e pirita (5%); Acessórios: apatita, carbonatos, clorita, quartzo (<= 1%); Alteração: carbonato, martita, especularita e clorita.	25,36 - 33,43	36,76 - 48,45	33,84 - 46,61	0,20 - 3,27	0,03 - 0,07	0,20 - 0,90	7,55 - 17,23	0,45 - 4,69	<0,01 - 2,31	

### 4.1.3 Formação Jucurutu

A relação dessa Formação com a que está abaixo, a Formação Serra dos Quintos, sugere o tipo de associação quartzo-pelíto-carbonática (QPC), característica de um contexto deposicional calmo, relacionado a um rifte intracontinental, e que teria progredido até a Formação de uma margem passiva do “protocontinente Caicó”.

Na área de estudo, essa Formação é identificada pelos mármore granulares que verificados em furos de sondagem evidenciam ser intercalados por faixas curtas de material pelítico. Também são encontradas lentes de clacissilicática por vezes com magnetita, diferentes tipos de xisto, quartzitos e quartzitos ferruginosos.

#### 4.1.3.1 Mármore

Os mármore (Figura 27) representam a unidade de maior representação na área de estudo e ocupam a porção sul e extremo leste da área. No extremo leste, aparecem em contato direto com gnaisses e itabiritos. Na porção sul, faz contato com xistos e itabiritos. Possuem cor cinza e grande quantidade de impurezas, granulação fina a média e pouco ou nenhuma alteração superficial.

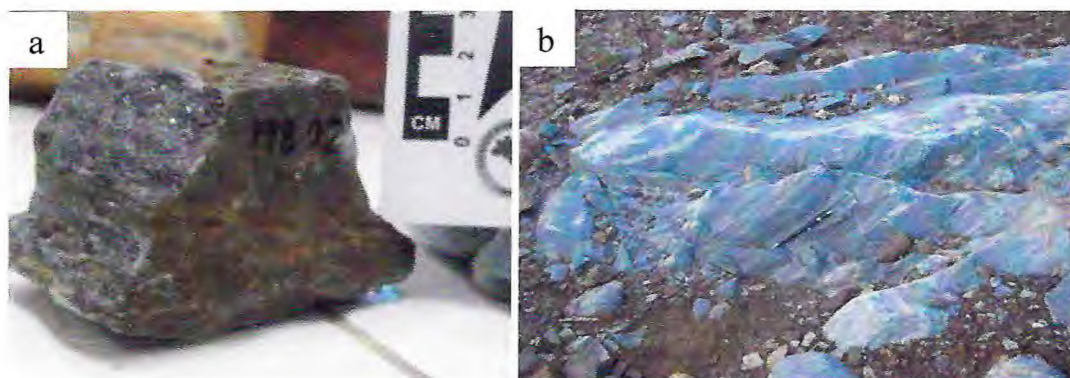


Figura 27 - a) Amostra de mãos de mármore de granulação média; b) afloramento de mármore (coordenadas: 723495; 9350170) (Fonte: Autores).

Microscopicamente possuem textura granonematoblástica (Figura 28). É composta essencialmente por dolomita (90%), porém possui grande quantidade de impurezas, especialmente muscovita (8%) e tremolita (2%).

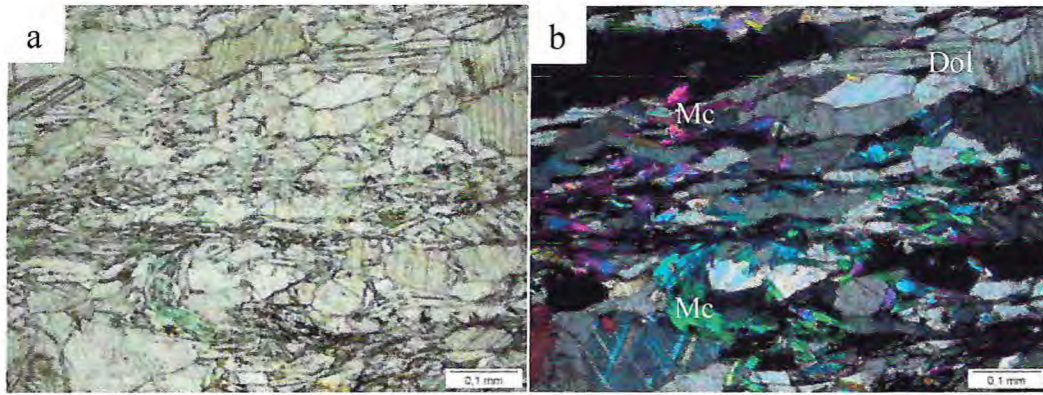


Figura 28 - Lâminas delgadas de mármore. a) Nicóis descruzados (aumento de 10x); b) Nicóis cruzados (aumento de 10x). Em destaque minerais de Dolomita (Dol) e Muscovita (Mc) (Fonte: Autores).

#### 4.1.3.2 Xistos

Os xistos encontrados na Mina do Bonito compõe, em superfície, a unidade de menor representação, dentre as quatro principais (mármore, gnaisse, itabirito e xisto). São encontrados especialmente inseridos e intercalados com itabiritos, mas por vezes também se encontram em contato com gnaisse e mármore.

São rochas heterogêneas e possui grande variação de cor e composição. São encontrados xistos de coloração branca, verde, claro e escuro. Dentre as principais variações composicionais são encontrados quartzo mica xistos e clorita xistos.

Os quartzo mica xistos (Figura 29) são os mais representativos, apresentam-se, em superfície, na forma de grandes lentes, dobrados, com estruturas foliadas onde predominam minerais micáceos, especialmente muscovita, que determinam a foliação principal da rocha.

Os clorita xistos possuem coloração mais esverdeada, dada a presença de clorita na rocha, e textura mais fina. Se encontram, na maioria das vezes, inseridos nos quartzo mica xistos, sob a forma de pequenas lentes, mas também fazem contato com itabiritos e quartzitos ferruginosos.

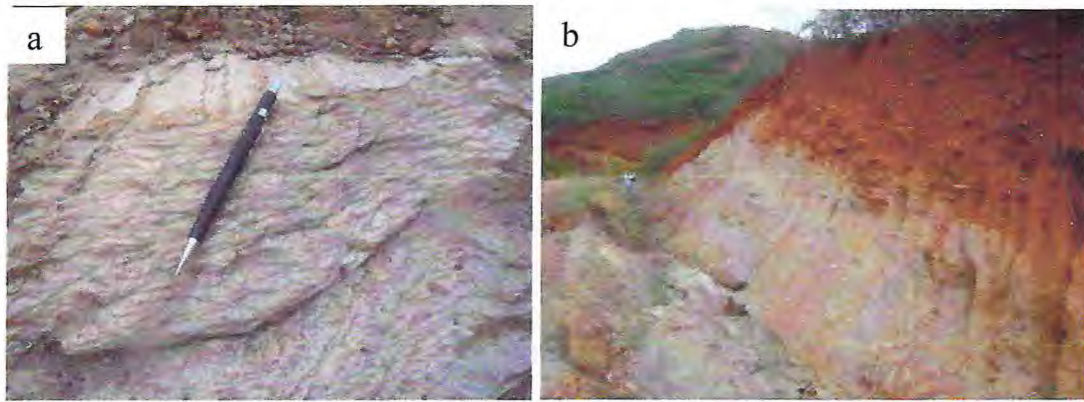


Figura 29 - a) Fotografia de quartzo mica xisto onde é possível observar o aspecto foliada da rocha. b) Fotografia mostra o contato entre o quartzo mica xisto abaixo, de coloração mais clara, e o material coluvionar acima, vermelho (Coordenadas: 723491; 9350650) (Fonte: Autores).

Microscopicamente os xistos mais representativos da região apresentam textura granolepidoblástica (Figura 30). Os minerais essenciais são quartzo (65%), muscovita (20%) biotita (10%), e opacos (5%). Portanto, pode ser classificado como biotita-muscovita-quartzo xisto.

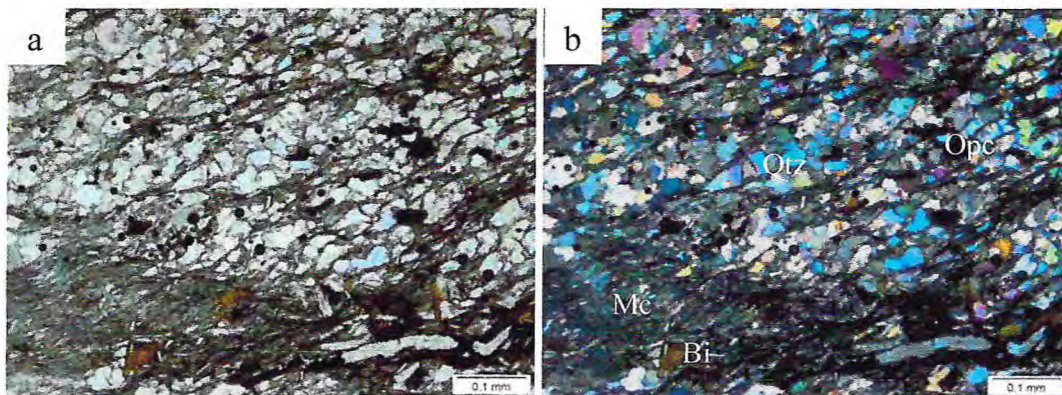


Figura 30 - Lâminas delgadas de biotita-muscovita-quartzo xisto. a) Nicóis descruzados (aumento de 4x); b) Nicóis cruzados (aumento de 4x). Em destaque minerais de quartzo (Qtz), muscovita (Mc), biotita (Bi) e opacos (Opc).

#### 4.1.3.3 *Quartzitos e Quartzitos Ferruginosos*

Os quartzitos e quartzitos ferruginosos são rochas homogêneas, constituídas basicamente por quartzo, e apresentam cores branca, laranja ou vermelha. São uma litologia de menor representatividade na Mina do Bonito e ocorrem principalmente inseridos em quartzo mica xistos, dobrados, sob a forma de lentes.

Os quartzitos ferruginosos (Figura 31) possuem as colorações mais escuras (vermelho). Isso ocorre provavelmente devido à proximidade com os itabiritos, quando sofrem influência de fluidos ricos em ferro. Se diferencia do quartzito por possuírem maior teor de ferro.

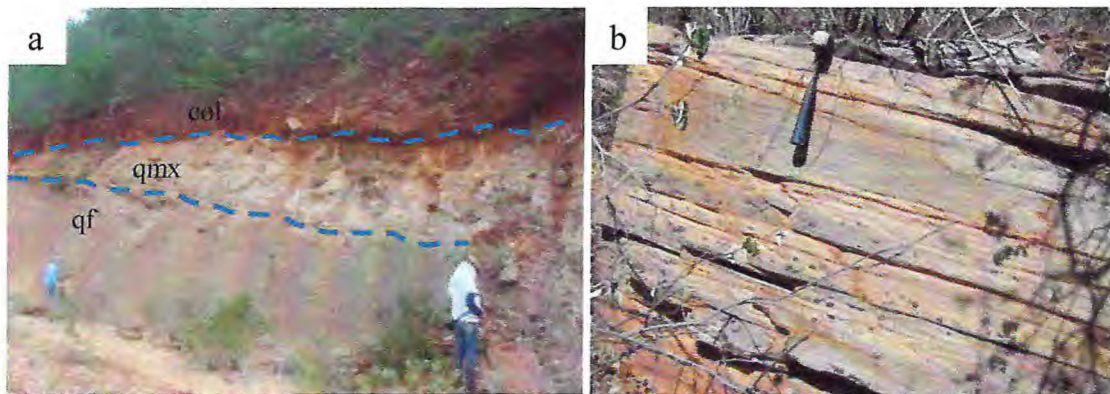


Figura 31 - a) Afloramento em corte de estrada (Coordenadas: 723584; 9350742) mostrando o contato entre o quartzito ferruginoso (qf), o quartzito mica xisto (qmx), e o colúvio (col). b) Bloco de quartzito ferruginoso (Fonte: Autores).

Microscopicamente os quartzitos apresentam textura granolepidoblástica (Figura 32). Os minerais essenciais são quartzo (90%), muscovita (8%) opacos (2%). Portanto, pode ser classificado como um biotita-muscovita-quartzo xisto.

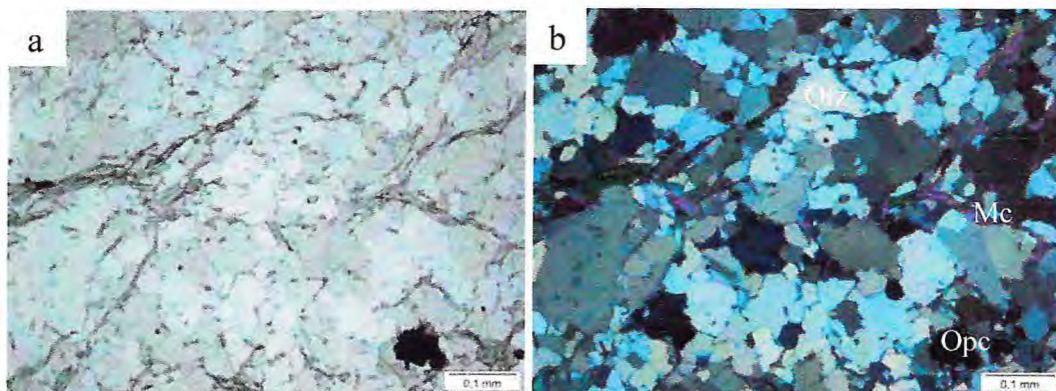


Figura 32 - Lâminas delgadas de quartzito. a) Nicóis descruzados (aumento de 4x); b) Nicóis cruzados (aumento de 4x). Em destaque minerais de quartzo (Qtz), Muscovita (Mc) e Opacos (Opc).

## 4.2 Geologia Estrutural

A mina do Bonito está inserida no contexto estrutural de uma grande dobra de dimensões quilométricas com plano axial orientado NNE - SSW, concordante aos principais lineamentos do Domínio Rio Piranhas-Seridó: as zonas de cisalhamento São Vicente e Picuí-João Câmara. A mina localiza-se na charneira de uma estrutura sinformal de eixo mergulhando para sul (Figura 33).

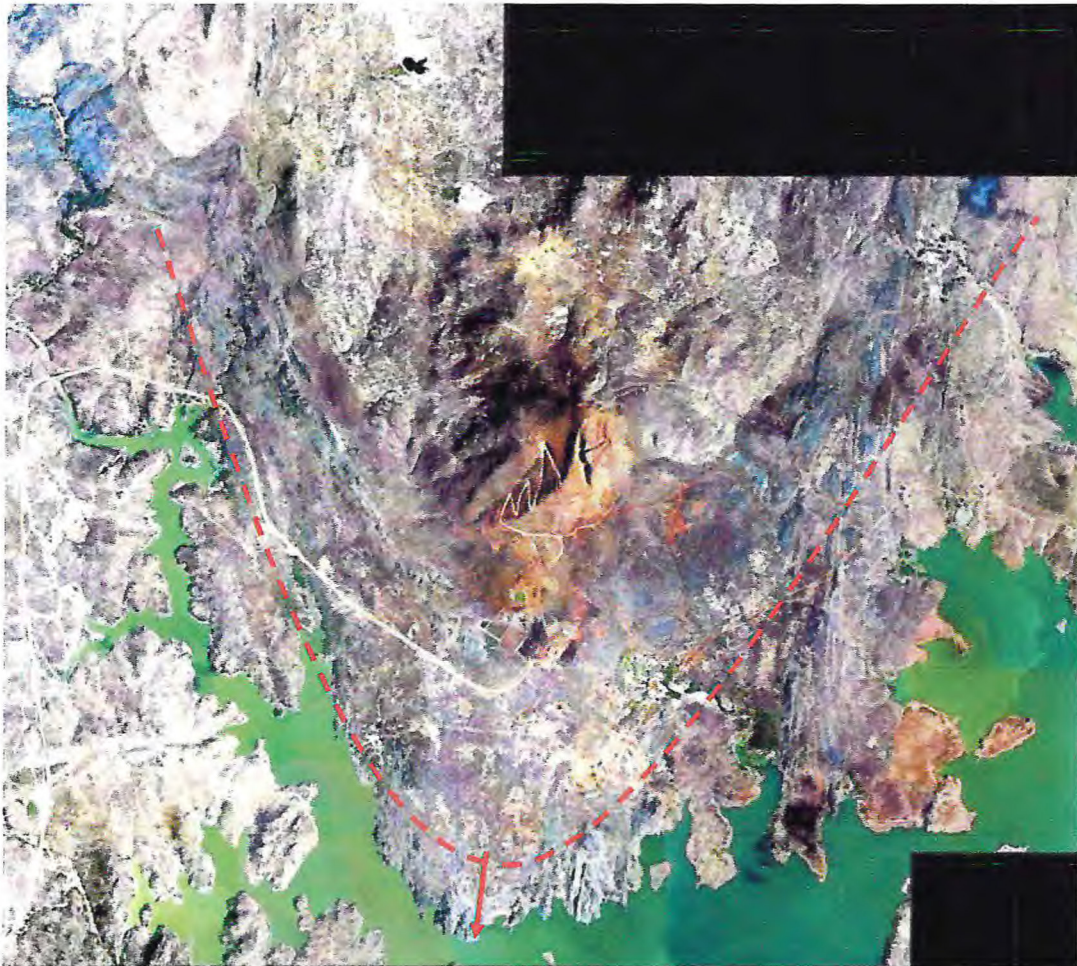


Figura 33 - União de imagens aéreas mostra o contexto estrutural da área estudada. Estrutura sinformal visível, mergulhando para sul (pontilhado vermelho) (Fonte: Mhag Serviços e Mineração S/A).

As principais estruturas planares presentes e investigadas na mina do Bonito podem ser divididas em: (a)  $S_n$  – foliação principal, definida pelo bandamento composicional e xistosidade; (b)  $S_{n+1}$  – foliação plano-axial associada às clivagens de crenulação e fratura geradas em condições dúctil a dúctil-rúptil nas fases de dobramentos do ciclo brasileiro; (c) ZCDs – zonas de cisalhamento dúcteis localizadas em alguns contatos entre litologias, geralmente subparalela



aos contatos entre as unidades mapeadas, ou como zonas discretas afetando os mármorees na porção sul da área; e, (d) F1, F2, F3... – fraturas e juntas desenvolvidas em condições essencialmente rúpteis: fraturas e/ou falhas.

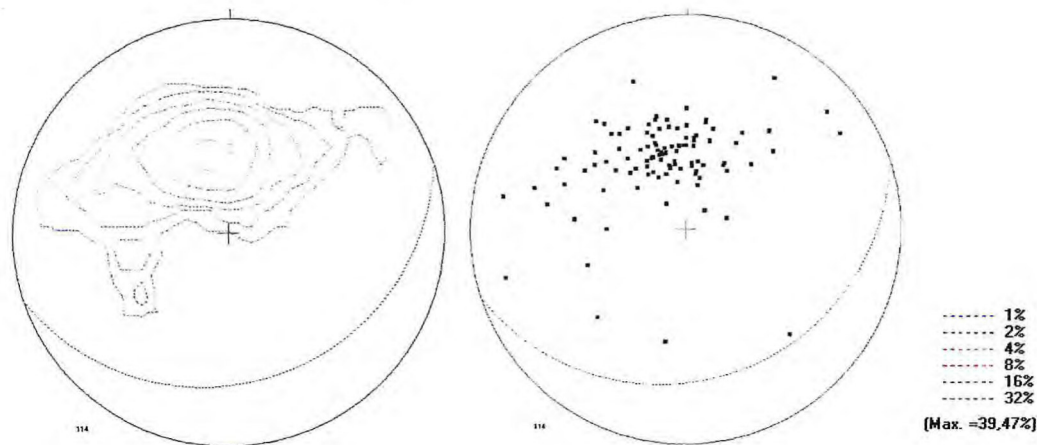


Figura 34 - Estereogramas Schimidt-Lambert da foliação principal. A esquerda, diagrama de contorno da densidade dos polos. A direita, diagrama de polos. Representação da ciclográfica do plano médio em ambos os diagramas.

A foliação principal  $S_n$  apresenta orientação preferencial de E-W a NE-SW, mergulhando em média com 60 graus para S-SE, como mostra a concentração de polos no diagrama da Figura 34. Algumas destas estruturas podem mergulhar para SW ou NE em função dos dobramentos superpostos. Ela corresponde ao bandamento dos itabiritos, que apresentam alternância de níveis claros (quartzo) e escuros (óxidos de ferro) de espessura milimétrica a centimétrica.

As estruturas transpostas a foliação principal são caracterizadas por foliações secundárias subparalelas ao plano axial de dobras, e por discretas zonas de cisalhamento transcorrentes destrais. A foliação plano-axial  $S_{n+1}$  tem direção preferencial NW-SE, com mergulhos de alto ângulo, subverticalizados. A Figura 35 mostra as feições das foliações  $S_n$  e  $S_{n+1}$ .

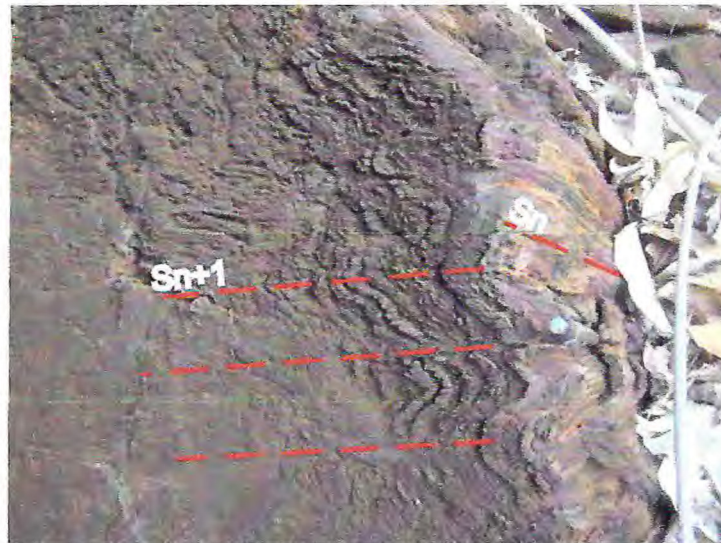


Figura 35 - Representação da foliação principal ( $S_n$ ) e clivagens de crenulação ( $S_{n+1}$ ). Notar dissolução de sílica ao longo do plano  $S_{n+1}$  demarcado (Fonte: Autores).

As fraturas desenvolvidas em condições rúpteis podem transversais ao eixo da dobra (rupturas de extensão) (F1), longitudinais aos eixos da dobra (F2), fraturas associadas a pares conjugados (cisalhantes) (F3 e F4), e outras famílias dispersas e descontínuas. Estatisticamente, estas estruturas se dispõem preferencialmente E-W e N-S (Figura 36).

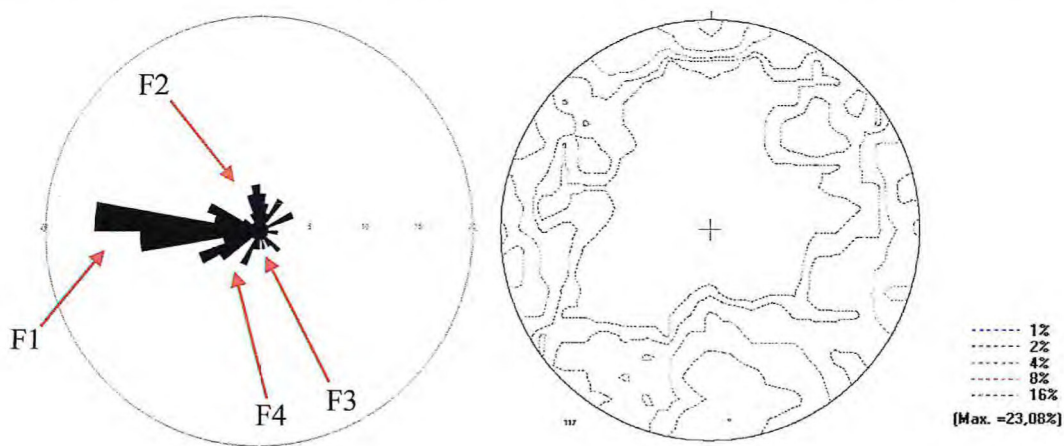


Figura 36 - Estereogramas Schmidt-Lambert das fraturas. A esquerda, diagrama de roseta indicando as principais famílias. A direita, diagrama de contorno da densidade dos polos.

## CAPÍTULO 5

## 5 CONDICIONANTES GEOLÓGICOS E ESTABILIDADE DE TALUDES

### 5.1 Tipologia do minério de ferro e estabilidade de taludes

#### 5.1.1 Tipologia dos Itabiritos

Como já comentado no capítulo referente à caracterização geológico-estrutural da mina de Bonito, BARBOSA (2013), propôs uma subdivisão entre os itabiritos, baseada principalmente na composição mineralógica, com os minerais de ferro predominantes dando nome ao tipo e/ou subtipo de itabirito.

A diferença composicional e textural entre os quatro tipos de Itabiritos (anfíbolítico, anfíbolítico goethítico, martítico e martítico especularítico), pode gerar comportamento geotécnico diferenciado entre eles.

Essas rochas possuem estrutura bandada, marcada por camadas intercaladas de sílica e minérios de ferro. As camadas silicosas apresentam contatos predominantemente poligonais entre os grãos de quartzo o que confere coesão muito forte entre suas partículas, entretanto, a existência de intercalações entre as bandas quartzosas e as bandas contendo minerais de minério de ferro, possibilita a Formação de uma zona de maior fragilidade na rocha, onde é de se esperar que ocorra uma diminuição da resistência ao cisalhamento e, eventual, desprendimento de blocos em função da presença dessas estruturas.

Além da própria estrutura bandada (Quadro 8), a predominância dos minerais existentes nas camadas de ferro em detrimento de outros também poderá ser um fator condicionante de estabilidade. Tal fato ocorre porque cada um desses minerais (anfíbólios, goethita, martita e especularita) possui diferenças texturais, hábitos, forma, tipos de contato entre os grãos e dureza que lhes conferem características diferentes.

##### 5.1.1.1 *Itabiritos martíticos especularíticos*

A especularita, por exemplo, é um mineral de ferro lamelar. Sua presença em quantidades elevadas na rocha pode facilitar o desprendimento de blocos em função da Formação de níveis e bandas planares/laminares de elevada fissibilidade, semelhantes ao comportamento das micas. Portanto, é de se esperar que nos itabiritos martíticos especularíticos, a presença desse mineral, influencie como fator importante no comportamento geotécnico deste tipo de minério.

A área de predominância dos itabiritos martíticos especularíticos foi representada no Mapa Tipológico da Mina do Bonito elaborado por BARBOSA (2013) (Figura 27), e se encontra no capítulo referente a geologia local e estrutural do presente trabalho. Eles ocorrem na região central da mina, em contato com os mármorees ao sul e com xistos e itabiritos ao norte.

Em campo, nos afloramentos onde existe a predominância de itabiritos martíticos especularíticos é possível observar o desprendimento de blocos ocorrendo em razão dos níveis ricos em especularita, paralelos aos planos de foliação tectono-metamórfica (Figura 37).



Figura 37 - Detalhe da amostra de itabirito martítico especularítico (Coordenadas 723626; 9350422). Na amostra é possível observar o aspecto laminar dos minerais presentes, marcado pela grande quantidade de especularita na rocha. (Fonte: BARBOSA, 2013)

#### **5.1.1.2 Itabiritos anfíbolíticos**

Os itabiritos anfíbolíticos, por outro lado, não apresentam uma estrutura intensamente foliada como os itabiritos martíticos especularíticos. No entanto, a predominância deste tipo na jazida e maior presença de níveis e bandas contendo anfíbólios intercaladas com bandas martíticas/magnéticas e bandas quartzosas fazem com que estas rochas apresentem os menores graus de coerência quando comparadas com os demais tipos de itabiritos. A presença dos anfíbólios entre as camadas de ferro foi provavelmente um fator determinante nesse processo. Como será discutido a seguir, isso não ocorre com os itabiritos

anfíbolíticos que se encontram em avançado processo de substituição do anfíbólio por goethita.

#### **5.1.1.3 Itabiritos anfíbolítico goethíticos**

A alteração supergênica de anfíbólios férricos formando goethita originou o minério anfíbolítico goetítico. Esse mineral, proveniente de alteração supergênica, é mais estável em condições superficiais e funciona como uma espécie de cimento ferruginoso, substituindo e envolvendo outros minerais, gerando uma rocha mais coesa. Observando o mapa tipológico e o mapa de análise geotécnica, é possível verificar que há maior coerência nos itabiritos anfíbolítico goetítico, quando comparados com o anfíbolítico. É provável que esse fator esteja ligado a presença desse mineral supergênico.

#### **5.1.1.4 Itabiritos martíticos**

Os itabiritos martíticos são marcados pela presença de magnetita e martita. Este último é derivado da recristalização da magnetita em hematita, preservando, no entanto, o hábito daquele mineral. Por causa do hábito cúbico preservado do minério de ferro, é de se esperar que o fator mineralógico e textural desse tipo litológico conceda ao mesmo um comportamento geotécnico diferente, um pouco mais rígido do esperado para os itabiritos martíticos especularíticos. Em relação a isso, os itabiritos martíticos se assemelham aos Itabiritos anfíbolítico goethíticos.

### **5.1.2 Tipologia dos Minérios Hidrotermais**

A alteração hidrotermal relacionada ao evento mineralizador de ferro, além de afetar mineralogicamente as rochas circunvizinhas, como observou BARBOSA (2013), também mudou seu comportamento geotécnico. As alterações provocadas por hidrotermalismo geraram três tipos litológicos diferentes: magnetititos, skarns magnesianos e skarns tremolíticos com actinolita (Figuras 38).

Essas rochas, no entanto, são de pequena representatividade na região. Os magnetititos encontram-se quase exclusivamente associados a região das cavas já lavradas. Os scarns, na maioria das vezes, aparecem em contato direto com os magnetititos, no entorno das cavas, outras vezes aparecem em pequenas lentes inseridas em quartzo mica xistos.

Apesar da pequena representatividade é importante relatar as consequências das alterações hidrotermais no comportamento geotécnico dessas rochas. Os magnetitos possuem estrutura maciça devido a concentração de ferro epigenético, contendo também unicamente magnetita martitzada, estável em condições superficiais.

Entre os skarns, existe certa variação em sua textura. Alguns skarns possuem estrutura maciça, outros, devido a presença de tremolita, talco e caulim (gerados pela alteração de anfibólios cálcicos e magnesianos), podem possuir estruturas bandadas, localmente foliadas. O Quadro 7 mostra a relação entre a tipologia dos minérios de ferro e suas estruturas.

Portanto, o hidrotermalismo modificou as propriedades dessas litologias, gerando texturas mais ora mais rígidas, ora mais frágeis. Por vezes, o processo gerou a eliminação do bandamento e a Formação de rochas com mais de 90% de magnetita, outras vezes ocasionou a Formação de minerais que conferiram a rocha certa xistosidade. É de se esperar, portanto, que as diferentes tipologias em minério de ferro, geradas por alteração hidrotermal, possuam comportamento geotécnico diferente dos itabiritos, ora mais rígidos, ora mais frágeis.

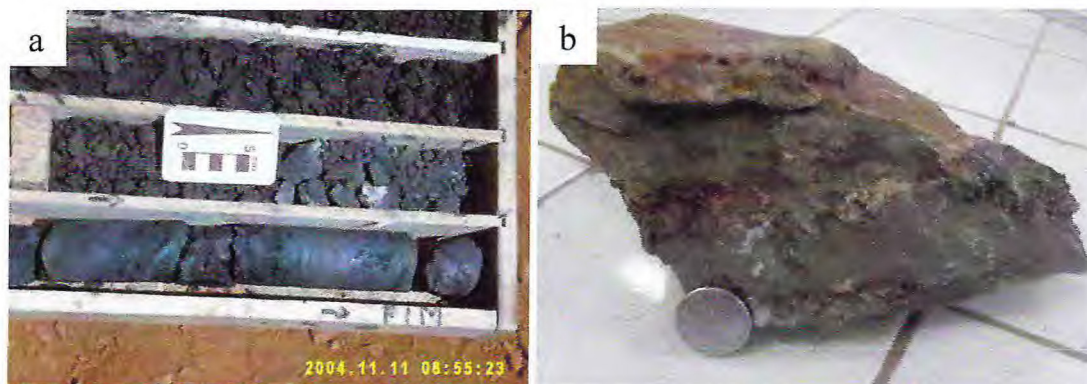


Figura 38 - a) Magnetitito maciço encontrado na região em furo de sonda (Fonte: BARBOSA, 2013); b) Amostra de skarn coletada em campo.

Quadro 8 - O Quadro mostra a relação entre a tipologia dos minérios de ferro e as estruturas presentes, que funcionam como condicionantes de estabilidade de taludes.

<b>TIPOLOGIA DOS MINÉRIOS DE FERRO</b>	<b>ESTRUTURA</b>
1 - Magnetitos; 2- Scarns;	MACIÇA/LEVEMENTE BANDADA
1 - Scarns 2- Itabiritos anfibolíticos; 3 - Itabiritos anfibolíticos goetíticos; 4- Itabiritos martílicos.	BANDADA/FOLIADA
1 - Itabiritos martílicos especularíticos	INTENSAMENTE FOLIADA/XISTOSA

### 5.1.3 Descontinuidades do maciço e tipos de ruptura gerados

As descontinuidades geológicas constituem um fator determinante à estabilidade das massas rochosas nos taludes da mina do Bonito. Ao analisar a orientação, a continuidade e a distribuição do conjunto de descontinuidades existentes, foi possível montar o modelo estrutural que rege o comportamento mecânico do maciço rochoso, considerando os tipos de rupturas e a geração de blocos instáveis.

A foliação principal de origem tectono-metamórfica ( $S_n$ ), comumente paralela e concordante ao acamamento sedimentar ( $S_0$ ), tem orientação preferencial variando entre E-W e NE-SW, mergulhando para SSE. Esta estrutura pode servir como plano de deslizamento e condicionar rupturas planares se considerarmos um avanço preferencial da lavra e corte dos taludes mineiros segundo direção predominante norte.

Podemos identificar na Figura 39 que na estrada de acesso as cavas, os taludes cujas faces mergulham para S-SE estão sujeitos a deslizamento de blocos devidos aos planos de foliação  $S_n$  estarem mergulhando na mesma direção, ou seja, para fora do talude. As principais descontinuidades que atuam na liberação desses blocos no plano de deslizamento



são as famílias que possuem orientação N-S, NNW-SSE e NNE-SSW, que agem no desprendimento lateral da rocha.

Famílias de fraturas transversais também podem contribuir para o desprendimento dos blocos, porém esse desprendimento pode ocorrer normalmente, ao longo de irregularidades, devido ao peso da massa rochosa. Essas discontinuidades são identificadas como clivagens de crenulação e fratura geradas em condições dúctil a dúctil-rúptil durante as fases de deformação e dobramentos pré-cambrianos e a fraturas desenvolvidas em condições essencialmente rúpteis.

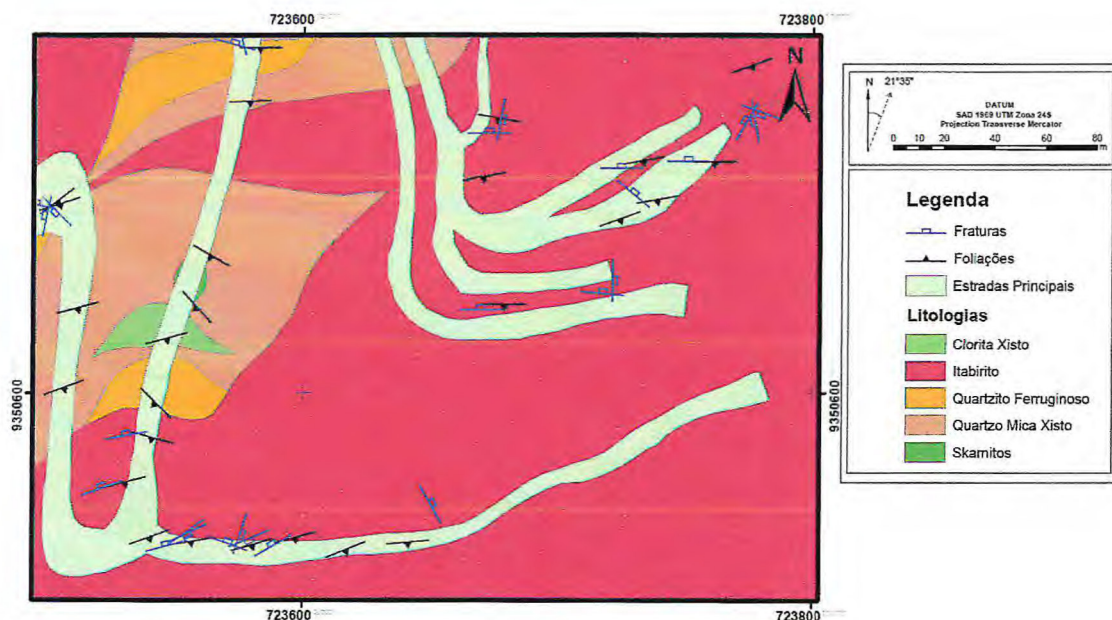


Figura 39 - Foliação ( $S_n$ ) mergulhando para sul em taludes com face mergulhando para sul.

As feições estruturais nas proximidades das cavas do minério magnetítico (Figura 40), possuem característica associadas a charneira das grandes dobras. Nesse caso, a foliação plano-axial  $S_{n+1}$  se apresenta mais penetrativa que a foliação  $S_n$  e é verticalizada, com altos valores de mergulhos preferenciais para E ou W. Neste caso, nos taludes cujas faces mergulham, para W e E, estas estruturas podem condicionar tombamento de blocos.



Figura 40 - Maciço da borda da cava de minério hidrotermal. Caderneta indica o plano da foliação Sn e martelo indica o plano da foliação Sn+1 (Fonte: Autores).

#### 5.1.4 Grau de Fraturamento

Na análise do Grau de Fraturamento (classificação segundo IPT, 1984), todas as classes de fraturamento foram evidenciadas nos maciços da mina, entretanto, no universo de pontos coletados, predomina a categoria dos maciços extremamente fraturados (Gráfico 1).

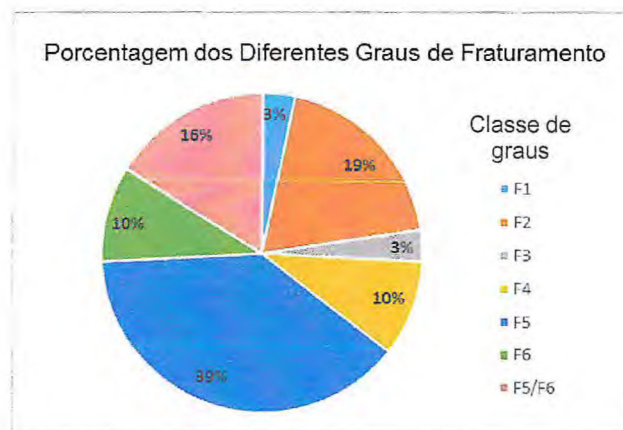


Gráfico 1 - Porcentagem de 31 dados coletados dos diferentes graus de fraturamento dos maciços rochosos. F1: ocasionalmente fraturado, F2: pouco fraturado, F3: medianamente fraturado, F4: muito fraturado, F5: extremamente fraturado, F6: em fragmentos e F5/F6: parte extremamente fraturado e parte em fragmentos (Fonte: Autores).

A intensidade do grau de fraturamento nos maciços da mina pode ser condicionada por fatores geológicos diferentes, relacionados a deformação, espessura e composição das bandas nos minérios de ferro itabiríticos. Podemos identificar um alto grau de fraturamento nas zonas das charneiras dos grandes dobramentos, onde são geradas clivagens de fratura e crenulação ( $S_{n+1}$ ), e outras famílias correlatas a pares cisalhantes e fraturas de extensão. Neste caso, a foliação  $S_{n+1}$  induz a Formação de blocos unitários retangulares centimétricos a métricos, onde uma direção é três a quatro vezes maior que as outras duas, gerando feições em forma de “lápiz” ou “charuto”.

De outra forma, uma alta densidade de fraturas por metro linear pode ser observada principalmente em itabiritos do tipo anfibolítico e especularítico. No primeiro caso ocorrem bandas finas de anfibólios de hábito acicular e fibroso intercaladas com bandas de quartzo e bandas magnetíticas/martíticas de maior espessura. No segundo, intercalam-se bandas quartzosas e bandas magnetíticas/martíticas mais espessas, com bandas de espessura milimétrica, ricas em hematita de hábito especular ou placóide. Estas características que afetam no comportamento geomecânico da rocha são associadas ao intenso fraturamento dos minérios, gerando feições retangulares ou quadradas de pouca espessura, do tipo “chapinha”.

### 5.1.5 Grau de Alteração

Na análise do Grau de Alteração, 70% dos dados resultaram em maciços muito alterados, e extremamente alterados (Gráfico 2).

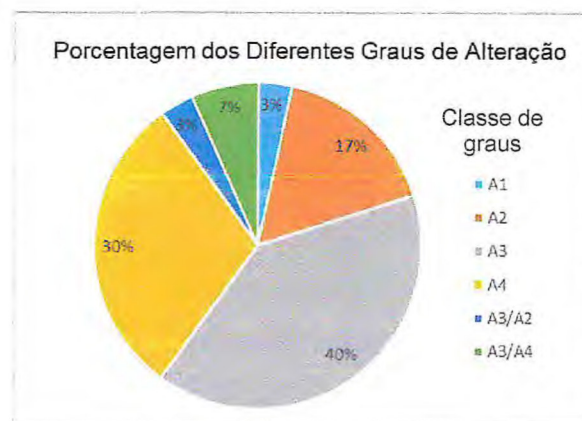


Gráfico 2 - Porcentagem de 30 dados coletados dos diferentes graus de alteração dos maciços rochosos. A1: são ou praticamente são, A2: medianamente alterado, A3: muito alterado, A4: extremamente alterado (Fonte: Autores).

Na análise do grau de alteração do minério de ferro da mina, observamos que os critérios de definição das classes usados pelo IPT, 1984 não se aplicam totalmente para esse tipo de rocha. Isto porque a alteração supergênica de anfibólios férricos conduz a Formação preferencial de goethita originando minério anfibolítico goetítico, que é mineralogicamente mais coeso e não se enquadra na dedução de que um material mais alterado possui naturalmente menor coesão, afetando em maior grau a estabilidade dos taludes dessa faixa do minério.

Apesar disso, nos minérios goethitizados observamos que bandas de *chert* apresentavam-se pulverulentas e que a rocha possuía coloração ocre intensa e isto foi levado em conta na classificação do grau de alteração definido para esse minério.

Nos demais tipos de itabiritos onde predominam os óxidos magnetita e hematita, as alterações limitam-se a oxidação da magnetita transformando-se em hematita, mas preservando a forma da magnetita (hematita pseudomórfica ou martita). Alterações mais significativas referem-se ao intemperismo de micas, anfibólios não ferríferos, e outros minerais associados a níveis pelíticos intercalados aos itabiritos e zonas hidrotermalizadas.

A alteração nos xistos gerando talco clorita xistos ou pequenas lentes filíticas pulverulentas permitiu a aferição de um grau alto de alteração que, correlacionando com o grau de coerência, permitiu que pedaços esfrelassem manualmente. Por outro lado, uma parte do gnaiss que apresentava minerais feldspáticos pulverulentos foi classificado como muito alterado, mais manteve seu grau de coerência elevado.

#### **5.1.6 Grau de Coerência**

Na avaliação do Grau de Coerência, 42% dos pontos analisados registram que dos maciços da mina tem grau coerente e 23% registraram grau muito coerente (Gráfico 3).

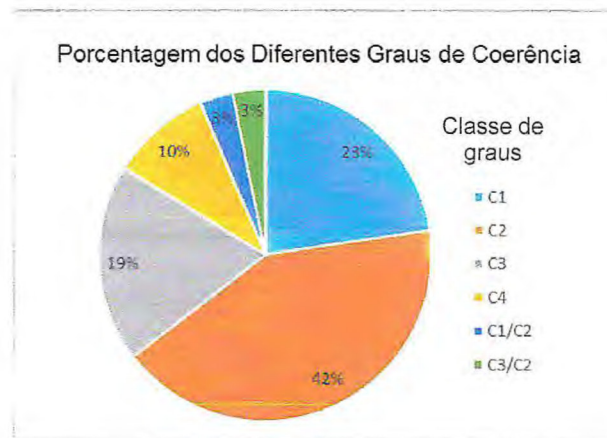


Gráfico 3 - Porcentagem de 31 dados coletados dos diferentes graus de faturamento do maciço rochoso. C1: muito coerente, C2: coerente, C3: pouco coerente, C4: friável, C1/C2: parte muito coerente e parte coerente e C3/C4: parte pouco coerente e parte friável (Fonte: Autores).

Dos maciços da mina, os compostos por litotipos quartzo-xistosos eram os que apresentavam menor coerência. As faces dos taludes que apresentavam quartzitos mais resistentes gradando a mica xistos menos resistentes apresentavam uma considerável variação de consistência ao longo de poucos metros.

Feições erosivas bem pronunciadas são encontradas nas faces dos taludes compostos por essas rochas psamo-pelíticas metamorizadas. A retirada por erosão desse material pode culminar na queda ou tombamento de porções da camada que se dispõe logo acima, principalmente quando são compostas por litotipos mais consistentes, incluindo blocos de colúvios com material bastante heterogêneo.

O Grau de Coerência também mostra grande variação e influencia na estabilidade de taludes da mina ao lado dos corpos de magnetitito gerados por hidrotermalismo. Nas bordas do *boudin* do minério enriquecido, a segregação/lixiviação de ferro e sílica gerou zonas silicificadas (ricas em sílica), zonas ricas em ferro e zonas mais pobres contendo clorita, anfíbolios e outros minerais associados a *skarns* que quando alterados geram zonas friáveis e pulverulentas ao lado de zonas muito coesas ricas em ferro e sílica. A presença destes materiais menos e mais coerente nas estruturas verticalizadas Sn+1 podem provocar o colapso do talude rochoso.

## CAPÍTULO 6

## 6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL DO ITABIRITO DA MINA DO BONITO

O ensaio de resistência a compressão uniaxial busca encontrar a maior carga por unidade de área que a rocha pode suportar sem romper, ou seja, possibilita a determinação da tensão de ruptura da rocha quando submetida a esforços compressivos (ALENCAR, 2013). Os corpos amostrados foram submetidos lentamente a cargas, em prensa hidráulica, até a ruptura, para o cálculo da tensão de ruptura expressa em MPa (Mega Pascal).

Foi coletada uma amostra de cada nove pontos, rochas do minério itabirítico, representativo dos tipos anfíbolítico, goethítico, martítico e especularítico. Os métodos de ensaio foram utilizados baseados na norma ABNT NBR 15.845:2010, aplicados para rochas de revestimento. Para a execução dos ensaios foram consideradas algumas adaptações da norma embasada devido a realidade do tipo de rocha amostrado:

- Adotou-se corpos-de-prova em forma cúbica com arestas de 5x5x5cm, devido o material ser perturbado por descontinuidades que facilitam o rompimento no momento do corte.
- Confeccionou-se três corpos-de-prova de cada amostra
- Procurou-se aplicar o esforço da carga tanto paralelo como perpendicular à foliação nos corpos-de-prova.
- Os cubos não passaram por secagem em estufa, mas foram ensaiados a seco em condições ambiente.

Os ensaios obtiveram resultados que levaram a inferir determinadas características que influenciavam nos valores de resistência dos materiais. Essas influências foram identificadas principalmente com relação a espessura e textura dos bandamentos e a orientação, penetratividade e homogeneidade das estruturas planares. As fotografias dos corpos-de-prova foram tiradas antes do ensaio, e as demarcações de pincel na faces dos cubos estão indicadas na Figura 41.

Quanto a espessura do bandamento composicional, observamos amostras que apresentavam maior resistência à medida que exibiam bandas mais espessas. É o caso da amostra GT 37, em que o cubo de uma porção de bandas mais finas demonstrou resistência de 6,5 MPa ao passo que o cubo de bandas mais espessas e descontínuas rompeu com resistência de 32,0 MPa (Figura 42).

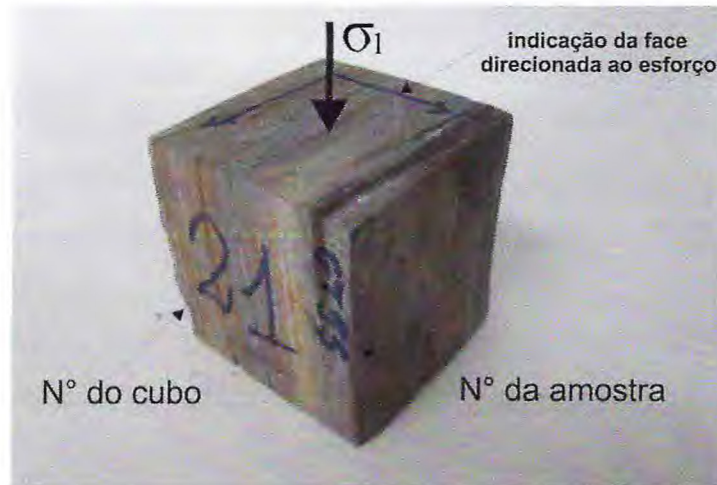


Figura 41 - Corpo-de-prova com a marcação de setas indicando a face do cubo que sofrerá a pressão do esforço (sigma 1). (Fonte: Autores).

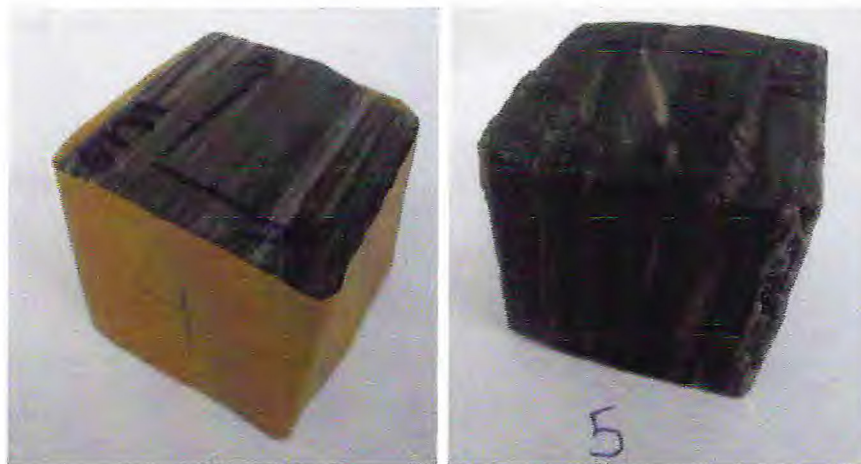


Figura 42 - Amostra GT 37. a) cubo 4, b) cubo 5. Notar diferença de espessura do bandamento. (Fonte: Autores).

Na amostra GT 5A (Figura 43) o cubo 11 que apresenta bandas menos espaçadas e mais penetrativas tem menor resistência que os de bandas maiores, mais espaçadas, descontínuas e mais difusas em relação a primeira. Seguramente, a composição dos cubos 10 e 12 tem mais quartzo/sílica.





Figura 43 - Amostra GT 5A. Aumento da resistência nos corpos da direita para esquerda. a) cubo 11 ( $R=13,6\text{MPa}$ ); b) cubo 10 ( $R=32,3\text{MPa}$ ) e c) cubo 12 ( $R=89,0\text{MPa}$ ). (Fonte: Autores)

Bandas espessas de sílica tornam os corpos-de-prova mais resistentes, por conta da textura mineralógica poligonal que dá mais coesão a essas camadas. Observamos essa influência na amostra GT61 (Figura 44), representante dos itabiritos silicificados próximo aos skarns das bordas do minério hidrotermal.



Figura 44 - Amostra GT 61. a) cubo 16; b) cubo 17. O corpo 16 apresenta bandas mais espessa de sílica cristalizada que o corpo 17. (Fonte: Autores)

A influência do posicionamento da foliação em relação ao esforço aplicado na rocha pode ser demonstrado na Figura 45, que representa corpos com estrutura penetrativa paralela, oblíqua e perpendicular à direção da compressão. Aparentemente este padrão pode ser demonstrado no caso da amostra GT 12 (Figura 46), onde o cubo 14 em que foi aplicada a compressão paralelo obteve resistência de  $29,5\text{MPa}$ , ao passo que o cubo 13, que teve esforço perpendicular a estrutura obteve  $102,3\text{MPa}$  de resistência.

Pode-se observar na Figura 46 que os cubos 13 e 14 apresentam algumas camadas obliquas, o que baliza a alteração dos resultados de um e outro quanto a resistência *versus* estrutura. Já o cubo 9, apesar de ter sofrido esforço perpendicular a estrutura, obteve resistência baixa relativamente aos outros corpos provavelmente porque ele apresenta outra estrutura associada oblíqua/perpendicular a estrutura principal. A amostra aparenta ser de um itabirito goethítico (goethita pode funcionar cimentando a rocha e dando maior resistência a compressão).



Figura 45 - Esquema ilustrando a influência de uma estrutura planar na maior ou menor resistência à compressão uniaxial de uma rocha. P = compressão. (IAMAGUTI, 2001).



Figura 46 - Amostra GT 12. Aumento da resistência nos corpos da esquerda para a direita. a) cubo 14; b) cubo 9; c) cubo 13. (Fonte: Autores)

Os ensaios de dois cubos da amostra GT 32 também acusaram baixa resistência por terem sofrido compressão aplicada obliquamente a foliação.

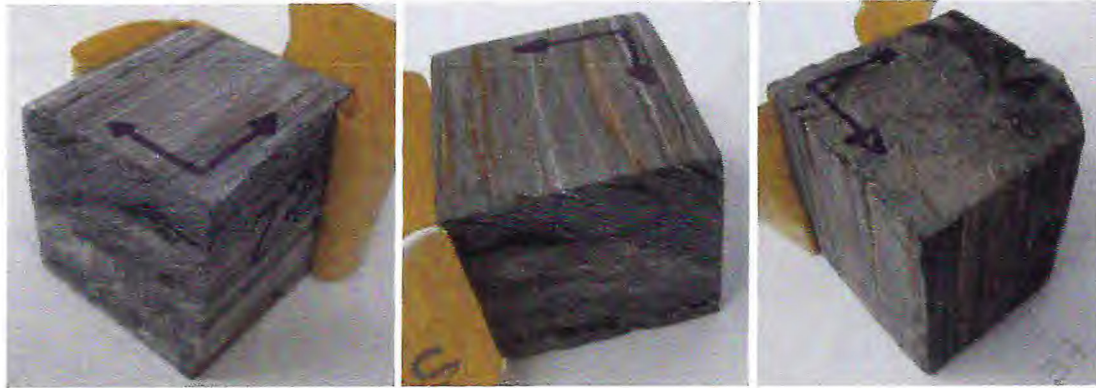


Figura 47 - Amostra GT 32. Aumento da resistência nos corpos da esquerda para a direita. a) cubo 27 (R=15,5); b) cubo 25 (R=20,4); c) cubo 26 (R=86,4). (Fonte: Autores)

No entanto, o padrão teórico apresentado na Figura 45 aparentemente não foi confirmado em todos os corpos amostrados. É o caso da amostra GT 55 (Figura 48), que ensaiados dois corpos com esforço aplicado paralelo a foliação, obtiveram resistência maior que o corpo-de-prova que sofreu compressão perpendicular a foliação.



Figura 48 - Amostra GT 55. Aumento da resistência nos corpos da esquerda para a direita. a) cubo 23 (R=19,2); b) cubo 22 (R=67,1); c) cubo 21 (R=116,3). (Fonte: Autores)

A amostra GT 16A (Figura 49) também foge à regra descrita na Figura 46. Em geral, as resistências obtidas foram baixas devido à presença de foliação de clivagem de fratura/crenulação bem penetrativa e fina, a presença de outras estruturas (pequenas juntas transversais a foliação) e a alteração pronunciada em alguns planos estruturais. O cubo 8 provavelmente foi mais resistente a compressão devido a remobilização de sílica que se observa no corpo.



Figura 49 - Amostra GT 16A. Aumento da resistência nos corpos da esquerda para a direita. a) cubo 6 ( $R=8,8$ ); b) cubo 7 ( $R=12,3$ ); c) cubo 8 ( $R=48,8$ ). (Fonte: Autores)



Figura 50 - Amostra GT 16B. Aumento da resistência nos corpos da esquerda para a direita. a) cubo 20 ( $R=46,8$ ); b) cubo 19 ( $R=54,9$ ); c) cubo 24 ( $R=89,8$ ). (Fonte: Autores)

A amostra GT 16B (Figura 50) corresponde a uma porção mais coerente relativa mesma rocha da amostra GT 16A e comparativamente a esta, apresentou maior resistência à compressão uniaxial. A localização de ambas as amostras perfaz a faixa de itabirito anfíbolítico goethitizado, porém a silicificação da amostra GT 16B é a provável razão dos valores mais altos de resistência em comparação a GT 16A.

Na amostra GT 63 (Figura 51), os três corpos amostrados apresentaram valores de resistência 12,0; 19,4 e 14,1 MPa, mostrando um padrão muito coerente e bem representativo, perfazendo a média de 15,0 MPa. As amostras estão dobradas e as bandas são descontínuas e rompidas.



Figura 51 - Amostra GT 63. Cubo 15. As bandas estão dobradas e possuem espaçamento irregular. (Fonte: Autores).

Os resultados de resistência a compressão uniaxial das amostras coletadas estão discriminados na Tabela 6. Em geral, a disparidade dos valores obtidos constataram que a heterogeneidade do minério e as características geológicas e geomecânicas dos tipos itabiríticos interferem no comportamento da resistência da rocha a tensões uniformes.

VAZ (1996) indica valores de resistência a compressão uniaxial para diferentes tipos de rochas (Gráfico 4). Valores normalmente obtidos para itabiritos (como rocha intacta) estão entre um curto intervalo de aproximadamente 100 a 180 MPa, constituindo-se, em geral, rochas duras.

Quanto as nove amostras representativas dos itabiritos da mina do Bonito, seis corpos de seis pontos coletados apresentaram valores entre 82,0 a 116,3 Mpa de resistência. No entanto, obtivemos discrepantes valores de resistência em diferentes cubos de uma mesma amostra (Ver legenda da Figura 49). Esta diferença pronunciada observada em algumas amostras (Ex.: amostras GT 32, 53 e 55) pode ser evidencia de que realmente fatores como o espaçamento/espessura do bandamento, a textura da rocha e a penetratividade e orientação das estruturas *versus* o esforço aplicado influenciam na resistência da rocha.



Tabela 6 - Dados dos cubos ensaiados, por amostra. Destacado em itálico os maiores valores.

Amostra	N° do cubo	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistência (MPa)
GT 63	15	2640,1	74,9	12,0
	2	2632,5	51,1	19,4
	3	2731,6	38,5	14,1
GT 16A	6	2647,5	17,2	8,8
	7	2661,4	85,2	12,3
	8	2761,0	24,2	48,8
GT 37	1	2776,3	34,2	28,4
	4	2860,6	139,6	6,5
	5	2557,4	147,9	32,0
GT 32	25	2559,6	82,6	20,4
	26	2446,5	33,2	<b>86,4</b>
	27	2464,7	202,2	15,5
GT 5A	10	2759,1	282,3	32,3
	11	2730,3	80,6	13,6
	12	2731,9	32,8	<b>82,0</b>
GT 16B	19	2721,1	261,3	54,9
	20	2783,5	127,9	46,8
	24	2878,6	87,3	<b>89,8</b>
GT 61	16	2714,3	149,1	<b>96,0</b>
	17	2632,3	123,3	45,9
	18	2899,7	337,2	30,3
GT 12	13	2807,7	188,5	<b>102,3</b>
	14	2668,9	51,2	29,5
	9	2637,2	236,9	57,8
GT 55	21	2673,4	54,5	<b>116,3</b>
	22	2652,9	229,2	67,1
	23	2725,7	42,4	19,2

## CAPÍTULO 7



## **7 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES**

### **7.1 Geologia Regional**

Com relação a geologia regional, o mapeamento em escala de detalhe realizado na Mina do Bonito e a análise dos furos de sonda evidenciam a forte correlação existente entre as formações descritas na literatura como Serra dos Quintos e Jucurutu. A princípio é observado, tanto no mapeamento geológico de superfície como na análise dos furos de sonda, que a chamada Formação Jucurutu, representada principalmente pelos mármores, se encontra acima da chamada Formação Serra dos Quintos, representada principalmente por Formações Ferríferas Bandadas e Xistos de composição variada. A Formação Serra dos Quintos se encontra logo acima da Suíte Poço da Cruz, representada pelos gnaisses graníticos.

A diferenciação proposta em duas unidades, uma representada pela Formação Serra dos Quintos e outra pela Formação Jucurutu não foi confirmada neste trabalho. Na área estudada essas duas formações aparentemente constituem uma única sequência tipo QPC (quartzo-pelito-carbonática), onde rochas químicas e psamo-pelíticas metamorfizadas, representadas pelos quartzitos, xistos e formações ferríferas gradacionam para os mármores da Formação Jucurutu, caracterizando um ambiente marinho proximal margeando o continente, representado por rochas graníticas (Suíte Poço da Cruz).

Portanto, se os mármores são definidos como pertencentes a Formação Jucurutu, é mais razoável supor que os BIFS e Xistos encontrados na região também sejam, tendo em visto o contato gradacional entre essas litologias.

### **7.2 Estabilidade de taludes**

São diversos os fatores que influenciam a estabilidade dos taludes da mina. Dentre esses fatores foram destacados a tipologia dos minérios de ferro, a presença de descontinuidades, os graus de fraturamento, alteração e coesão do maciço rochoso. Cada um desses fatores possuem, independentemente um do outro, importância na estabilidade dos taludes.

Quanto a variação tipológica dos minérios de ferro, foi possível observar que as diferenças composicionais e texturais entre os quatro tipos de itabiritos também pode gerar comportamento geotécnico diferenciado entre eles. A presença de minerais como magnetita,

martita, goethita e especularita em variadas proporções fornece a rocha características distintas, que se manifestam em diferentes graus de resistência e coerência.

Dessa forma, itabiritos anfibiólíticos apresentaram menor grau de coerência onde a presença dos anfibólios entre as camadas de ferro foi provavelmente um fator determinante nesse processo. A alteração supergênica de anfibólios férricos formando goethita, mineral mais estável em condições superficiais, aparentemente concede aos itabiritos anfibiólíticos goethíticos maior coesão. Os planos gerados pela presença de especularita, mineral de ferro lamelar, é mais um fator importante na estabilidade dos taludes, normalmente, reduzindo a resistência ao cisalhamento. Fato observado nas frentes de lavra, e em duas amostras mais ricas neste mineral quando submetidas ao ensaio de compressão uniaxial.

Além disso, as alterações hidrotermais que geraram a mineralização de ferro enriquecido foram importantes porque geraram rochas maciças, com comportamento geotécnico diferenciado em relação aos itabiritos.

A orientação, a continuidade e a distribuição do conjunto de descontinuidades existentes nas rochas rege o comportamento mecânico do maciço rochoso, a despeito da geração de blocos instáveis e dos tipos de rupturas. A foliação principal de origem tectono-metamórfica, por exemplo, pode servir como plano de deslizamento e condicionar rupturas planares. As descontinuidades presentes nas rochas (fraturas, clivagens de fratura e crenulação de dobramentos) podem também atuar na liberação de blocos, gerando o desprendimento lateral da rocha, com a geração de rupturas planares e tombamentos. De forma geral, verificamos que os taludes de direção N-S apresentarão predominância de tombamentos em relação a rupturas planares, já os taludes de direção E-W apresentarão predominância de rupturas planares.

É possível identificar na mina zonas com alto grau de fraturamento. São zonas de charneira de dobras, onde são geradas clivagens de fratura e crenulação que induzem a Formação de blocos unitários de rocha, condicionando o abatimento do bloco do talude. Portanto, é de se esperar que nessas áreas, onde o grau de fraturamento é maior, seja maior o número de blocos gerado e maior o número e o risco de deslizamento e queda de blocos.

Em relação ao grau de alteração, verificamos que nem sempre a rocha mais alterada causará maior problemas com estabilidade de taludes. Em minérios de ferro, como foi observado na área, a alteração supergênica gera a Formação de um mineral que dá mais

coesão a rocha, a goethita. Por outro lado, xistos e filitos que apresentaram grau de alteração elevado parecem produzir rochas mais friáveis, que facilmente se deterioram e se desprendem do talude.

Em relação ao grau de coesão das rochas foi possível observar que os litotipos xistosos apresentaram menor coerência quando comparados com rochas mais rígidas como quartzitos e itabiritos. É de se esperar, dessa forma, que isso implique em comportamentos geotécnicos diferentes. Taludes que apresentavam quartzitos mais coerentes gradando a mica xistos menos resistentes apresentarão considerável variação em seu comportamento geotécnico. De maneira geral, rochas menos coesas se desprenderão mais facilmente do talude, gerando maiores problemas com estabilidade de taludes.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial constataram que as características geológicas e geomecânicas da rocha influenciam consideravelmente nos valores de resistência do material rochoso a tensões uniformes. Os fatores de influência foram detectados como sendo principalmente relacionados a orientação e espessura do bandamento ou foliação, a textura ligada a mineralogia dos itabiritos, a alteração e a difusão de planos de descontinuidades.

Quanto a espessura do bandamento composicional, observamos amostras que apresentavam maior resistência à medida que exibiam bandas mais espessas. Bandas espessas de sílica tornam os corpos-de-prova mais resistentes, por conta da textura mineralógica poligonal que dá mais coesão a essas camadas.

A influência do posicionamento da foliação em relação ao esforço aplicado na rocha foi verificado quando corpos de prova de mesma litologia foram submetidos a compressão em sentido paralelo e perpendicular à estrutura.

Se, por um lado, é possível observar a importância de cada um desses fatores independentemente, por outro lado, a relevância desses fatores é maximizada quando avaliados conjuntamente. Isso é bastante obvio quando consideramos que na natureza esses fatores não acontecem separadamente, eles formam um conjunto que dará a rocha um comportamento geotécnico complexo, onde a análise de um ou mais parâmetro isolados não trará ao geólogo ou ao engenheiro de mina um resultado que represente a realidade com precisão.

Portanto, o simples fato da rocha possuir alto fator de segurança, não significa necessariamente que os problemas com estabilidade de taludes no avanço da lavra na atividade mineira serão pequenos, se, por exemplo, o grau de fraturamento for alto. Uma rocha mais alterada e menos coesa não necessariamente apresentará maiores problemas de estabilidade de taludes do que rochas mais coesas e maciças, uma rocha mais alterada nem sempre resultará em menor coerência, e assim por diante.

Não é possível estudar estabilidade de talude somente pela análise de ensaios de compressão realizados em laboratório e obtenção de um fator de segurança. Tal estudo não leva em consideração a heterogeneidade que existe nos corpos rochosos e, portanto não representará a realidade de campo.

Dessa forma, para que o resultado chegue próximo de representar a realidade observada em campo, é necessário a análise da maior quantidade de fatores possíveis. Através disso fica visível a importância do conhecimento geológico no avanço da atividade mineira.

### **7.3 Avanço da atividade mineira**

O levantamento do padrão estrutural e análise do arranjo espacial das discontinuidades na área de estudo possibilitou a inferência e planejamento do avanço da lavra na mina, correlacionado a estabilidade dos taludes mineiros.

Constatamos que, pelo fato da foliação principal mais penetrativa (Sn) possuir trend ENE - WSE mergulhando para S-SE, os taludes que apresentarem esta mesma direção estarão sujeitos a problemas de rupturas planares pelo fato dos blocos deslizarem no plano de foliação para fora do talude. Entretanto, devido aos dobramentos a foliação pode ter, por vezes, mergulhos para SW. Nesses casos, serão geradas rupturas planares insipientes se os taludes tiverem direção ENE – WSE.

Associadas a estas rupturas planares podem ocorrer, também, tombamento de blocos devido a presença de fraturas penetrativas de alto ângulo de mesma direção ou aproximada à direção da foliação principal que, neste caso, mergulham para norte, para dentro do talude.

De outra forma, é possível que sejam gerados tombamentos de blocos em taludes que apresentarem direção N-S devido a presença de estruturas de alto ângulo que mergulham

para o interior dos talude e que condicionarão, juntamente com a foliação principal, o desprendimento de blocos unitários de rocha.

Especial atenção deve ser dada nas áreas de charneiras de dobras, onde ocorre um intenso fraturamento da rocha e a geração de uma clivagem de crenulação penetrativa, gerando blocos unitários centimétricos. Se, por um lado, essas áreas podem ser mais facilmente lavradas devido ao fácil desprendimento das rochas, maiores serão, os problemas relacionados a estabilidade de taludes. As regiões de charneiras de dobras estão indicadas no mapa estrutural, nos anexos do referente trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

ABGE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. (1998). *Geologia de Engenharia*. (A. M. Brito, Ed.) ABGE.

ABGE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. (1983). *Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos*. Tradução nº. 12. 132p.

ABRÃO, P. C.; OLIVEIRA, S. L.(1998). *Mineração. Geologia de Engenharia*. 4ªReeimpessão. São Paulo: ABGE. p. 431-438.

AGUILERA, C. E. (2009). *Aplicação de Métodos de Análise de Estabilidade de Taludes Grande Altura em Mineração*. Rio de Janeiro.

ALENCAR, C. R. A. (1969). *Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais*. Instituto Euvaldo Lodi - Regional do Espírito Santo. Cachoeiro de Itapemirim/ES: IEL, 2013. 242 p.

ALMEIDA, F. F. M.; BRITO NEVES B. B. de; FUCK, R. A. (1977). *Províncias estruturais brasileiras*. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8, 1977, Campina Grande. Atas do. Campina Grande: SBG. Núcleo Nordeste, 1977. 499p. il. (Boletim do Núcleo Nordeste da SBG, 6) p.363-391.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI Y.; BRITO NEVES B. B. de;, FUCK, R. A. (1981). *Brazilian structural provinces: an introduction*. Earth Science Review, v.17, p.1-19.

AMARAL, W. S. (2007). *Integração de dados aerogeofísicos e geológicos e sua contribuição a evolução geodinâmica do domínio Ceará central, Província de Borborema*. Dissertação de Mestrado – Unicamp, Campinas, SP.

ANGELIM, L. A. de A.; NESI J. de R; TORRES H. H. F; MEDEIROS V. C; SANTOS C. A.; VEIGA JUNIOR J. P.; MENDES V. A. (2006). *Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte*. Programa geologia do brasil. Convênio de cooperação e apoio técnico - científico CPRM. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

ARTHAUD, M. H. (2007). *Evolução neoproterozóica do grupo Ceará (domínio Ceará central, NE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasileira*. Brasília: Universidade de Brasília.

BACZYNSKI, N. R. P. (2000). *STEPSIM4 "Step-Path" Method for Slope Risks*. *Proceedings*, GeoEng2000, an International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Australian Geomechanics Society, Melbourne. CD paper reference SNES0213, 2000. 6 pp.

BARBOSA, I. G. (2013). *Mina do Bonito, tipologia e geoquímica dos minérios de ferro (Jucurutu) - RN - Brasil. Dissertação de Mestrado. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA. Fortaleza, novembro de 2012.*

BIZZI L. A., SCHOBENHAUS C., VIDOTTI R. M., GONÇALVES J. H. (2001). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: Sistema de Informações Geográficas - SIG e mapas na escala 1:2.500.000* - Brasília: CPRM. 4 CD-Rom. ISBN: 85-7499-006-X.

BIZZI L. A., SCHOBENHAUS C., VIDOTTI R. M., GONÇALVES J. H. (2003). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas & SIG* / organizadores: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Brasília, 692 p. Folha Itatira - SB.24-V-B-V, escala 1:100.000. Itatira, Quixeramobim e Boa Viagem - PROGRAMA GEOLOGIA DO BRASIL (PGB) - Contrato CPRM-UFC. CPRM 2008.

BRITO NEVES, B. B. de. *Regionalização geotectônica do Pré-cambriano Nordeste*. São Paulo, 1975. 198p. il. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1975.

BRITO NEVES, B. B. de; SANTOS, E. J. dos; VAN SCHMUS, W. R. The tectonic history of the Borborema Province. In: CORDANI, U. G. (Ed.) et al. Tectonic evolution of South America. Rio de Janeiro: 31 International Geological Congress, 2000. 856p. il. p.151-182.

CARNEIRO, C. D. (1996). *Projeção estereográfica para análise de estruturas. Programas ESTER e TRADE. Fundamentos Teóricos, Exercícios e Aplicações em Microcomputador, Laboratório e Campo*. Campinas: CPRM, IG, UNICAMP, IPT-DIGEO.

CAVALCANTE, B. F. (1999). *Limites e evolução geodinâmica do sistema Jaguaribeano, Província Borborema, Nordeste do Brasil*. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

COSTA, T. A. (2009). *Caracterização Geológico-Geotécnica e Modos de Ruptura do Minério Hematítico Friável nas Minas da Vale Borda Oeste do Quadrilátero Ferrífero - MG*.

DANTAS, E. L. (1992). *Evolução tectonomagmática do maciço polidiapírico São Vicente/Florânia-RN*. Rio Claro: Universidade Estadual de São Paulo.

DANTAS, E. L. (1997). *Geocronologia U/Pb e Sm/Nd de terrenos arqueanos e paleoproterozóicos do maciço Caldas Brandão, NE do Brasil*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro: Universidade Estadual de Campinas.

DUNCAN, C. W.; CHRISTOPHER, W. M. *Rock Slope Engineering, Civil and Mining*. Based on the third edition by E.Hoek and J. Bray. 4th Edition Spons Press, Taylor & Francis Group, London and New York. 2004.

DURAND, A. F. (1995). *Estudo de Estabilidade de Taludes em Mineração a partir de Classificação Geomecânica*. Universidade de Brasília, Engenharia Civil. Brasília: Universidade de Brasília.

EBERT, H. (1962). *Bastil und regional metamorphose in Prakambrischen grundgebirge brasiliens*. Tschermarks Min. U. Petr. Mitt. v.8, p.49-81.

EBERT, H. (1969). *Geologia do Alto Seridó: nota explicativa da folha geológica de Currais Novos*. Recife: SUDENE, 120p. (Série Geologia Regional, 11).

FERREIRA, J. A. de M.; ALBUQUERQUE, J. do P. T. (1969). *Sinopse da geologia da folha Seridó*. Recife: SUDENE, 47p. il. (Série Geologia Regional, 18).

FERREIRA, C. A. (1998). *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Caicó. Folha SB.24-Z-B - Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte*. Escala 1:250.000. Brasília :CPRM, 152p. il; + mapas.

FERREIRA, C. A.; SANTOS, E. J. dos. (2000). *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Jaguaribe SE. Folha SB. 24-Z. Estados do Ceará, Rio Grande do Norte*



e Pernambuco. Escala 1: 500.000. Geologia e Metalogênese. CPRM. Recife: CPRM, 1 CD ROM.

FETTER, A. H. (1999). *U/Pb and Sm/Nd Geochronological Constraints on the Crustal Framework and Geologic History of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the Assembly of Gondwana*. Department of Geology. Kansas: Kansas University.

FILHO, A. F. da S.; GOMES, H. de A. G.; OSAKO, L. S.; GUIMARÃES, I. de P.; BRASIL, E. de A.; LIMA, D. R.; COCENTINO, L.; ROLIM, V. G. V.; VASCONCELOS, C. de L. V. (2007). *Garanhuns- SC.24-X-B-VI, escala 1:100.000: nota explicativa.* Pernambuco/Alagoas: UFPE /CPRM, 2007.

GOODMAN, R.E.; BRAY, J.W. (1976). *Toppling of Rock Slopes. Proc. Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*. Boulder, Colorado, ASCE Vol.2, pp. 201-234.

GOODMAN, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. 2nd ed. J.Wiley & Sons, New York.

GOMES, R. C. (2003). *Estabilidade de Taludes em Solos*. UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto.

GUIDICINI, G.; NIEBLE C. M. (1984). *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. Edgard Blücher.

GUIDICINI, G.; NIEBLE C. M. (1976). *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo: Edgard Blücher.

HASUI, Y., & MIOTO, J. A. (1992). *Geologia Estrutural Aplicada*. São Paulo: ABGE.

HOEK, E.; BRAY, J. (1981). *Rock Slope Engineering*. 3rd ed., IMM, London.

HUALLANCA. (2004). *MECANISMO DE RUPTURA EM TALUDES ALTOS DE MINERAÇÃO A CEU ABERTO*. São Carlos.

IAMAGUTI, A. P. S. (2001). *Manual de Rochas Ornamentais para Arquitetos*. Dissertação De Mestrado. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS. Rio Claro. UNESP.

ITP. (1984). *Estudos geológico-geotécnicos para caracterização e classificação de maciços rochosos para projetos de engenharia (túneis, lavra a céu aberto e barragens)*. São Paulo: ITP - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO.

JARDIM DE SÁ, E. F. (1978). *Revisão preliminar sobre a Faixa Dobrada do Seridó e eventuais correlatos no Nordeste*. Rev. Ciência, UFRN, v.1, p.77-83, 1978.

JARDIM DE SÁ, E. F. (1984). *Geologia da região do Seridó: reavaliação dos dados*. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE 11, 1984, Natal. Atas... Natal: SBG. Núcleo Nordeste, 473p. il (Boletim do Núcleo Nordeste da SBG, 9).

JARDIM DE SÁ, E. F. (1987). *Proterozoic granitoids in a polycyclic setting: the Seridó region, NE Brazil*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRANITES AND ASSOCIATED MINERALIZATIONS - ISGAM, 1, 1987, Salvador. Extended abstracts. Salvador: Superintendência de Geologia e Recursos Minerais - SGM, 298p.

JARDIM DE SÁ, E. F. (1994). *A faixa Seridó (Província Borborema NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira / Pan-Africana*. Instituto de Geociências. Brasília: Universidade de Brasília.

LOCZY, L.; LADEIRA, E. A. (1976). *Projeção Estereográfica Aplicada à Geologia Estrutural*; In *Geologia Estrutural e Introdução a Geotectônica*. Editora Brücher. São Paulo. 627p.

MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE (1:500.000), (2006). *Projeto Geologia E Recursos Minerais Do Estado Do Rio Grande Do Norte - Programa Geologia Do Brasil (PGB)*. CPRM/FAPERNA.

MARINOS, V.; MARINOS, P.; HOEK, E. (2005). *The geological Strength index: applications and limitations*. Bull. Eng. Geol. Environ. 64, 55-65.

PARENTE, C. V.; ARTHAUD, M. H. (1995). O Sistema Orós-Jaguaribe no Ceará-NE do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 297-305.

PINOTTI, A. M. (2011). *Técnicas De Geologia Estrutural Para Previsão E Contenção De Queda De Blocos Em Encostas: Aplicação Na Área Do Granito Santos, Santos, SÃO PAULO*. Campinas: UNICAMP.

REIS, R. C. (2010). *ESTUDO DE ESTABILIDADE DE TALUDES DA MINA DE TAPIRA-MG*. UFOP.

SALIM, J. (1993). *Geologie, petrologie et géochimie des skarns a scheelite de la mine Bre juí, Currais Novos, region du Seridó, NE du Brésil*. Louvain, Belgique. 272p. These (Doctorat) - Université. Catholique de Louvain I.

SANTOS, Á. R. (2009). *Geologia de engenharia conceitos metodos e pratica*. ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.

SANTOS, E. J.; NUTMAN, A. P.; BRITO NEVES, B. B. *Idades SHRIMP U-Pb do Complexo Sertânia: implicações sobre a evolução tectônica da Zona Transversal, Província Borborema*. Geol. USP, Sér. cient., São Paulo, v. 4, n. 1, Apr. 2004. Encontrado em <[http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S151974X2004000100001&lng=en&nrm=iso](http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151974X2004000100001&lng=en&nrm=iso)>.

SANTOS, E. J. (1995). *O complexo granítico Lagoa das Pedras: acreção e colisão na região de Floresta (Pernambuco), Província Borborema*. Instituto de Geociências. São Paulo: Universidade de São Paulo.

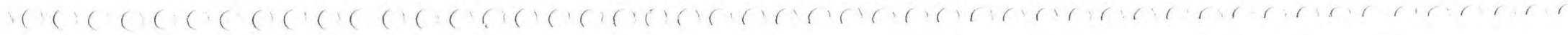
TERZAGHI, K. (1952). *Mecanismo dos escorregamentos de terra*. São Paulo.

VAN SCHMUS, W. R.; BRITO NEVES, B. B. de; HACKSPACHER, P. C.; BABINSKI, M.; FETTER, A.; DANTAS E. (1995). Neoproterozoic and Late Mesoproterozoic sedimentary and volcanic sequences in the Borborema province, NE Brazil. *SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE*. 14, pp. 391-392. Recife: SBG.

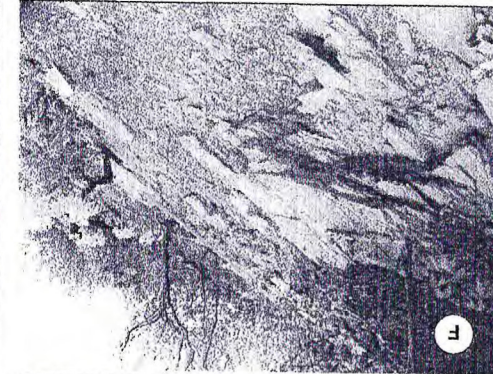
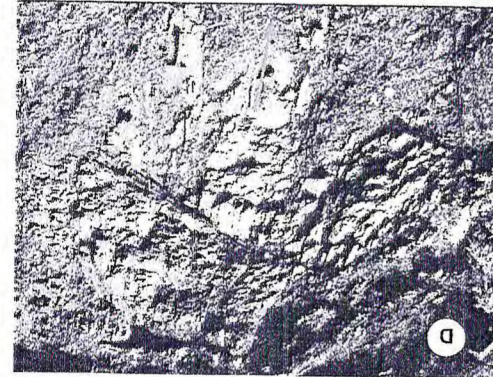
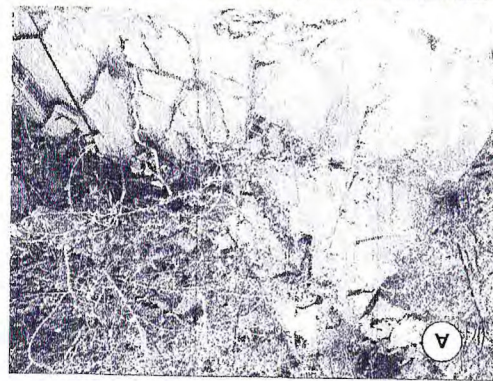
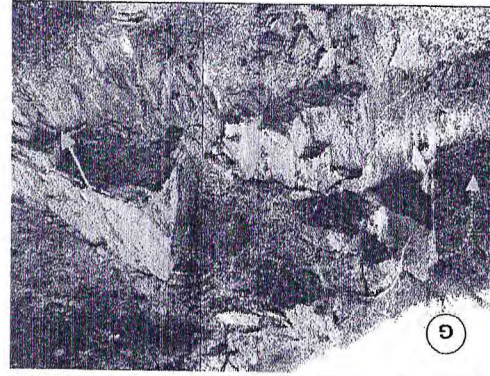
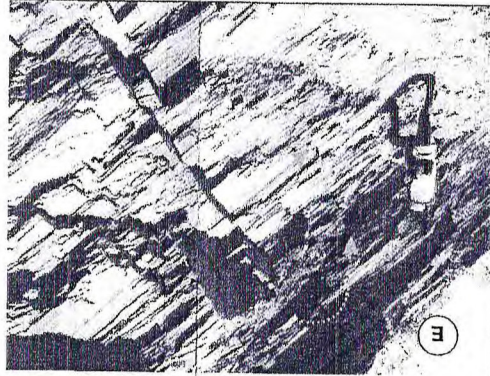
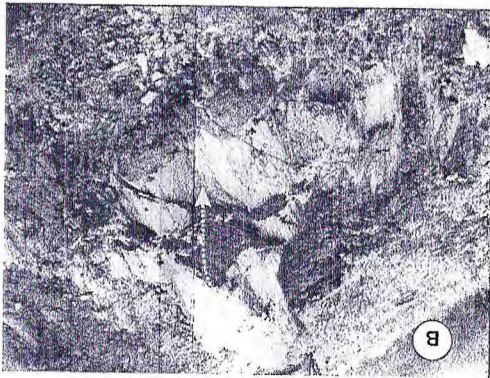
VAN SCHMUS, W. R.; BRITO NEVES, B. B.; WILLIAMS, L. S.; HACKSPACHER, P. C.; FETTER, A. H.; DANTAS, E. L.; BABINSKI, M. (2003). *The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre- to syn-collisional basin in West Gondwana: insights from*

*SHRIMP U-Pb detrital zircon ages and Sm-Nd crustal residence (TDM) ages. Precambrian Research, v. 127, n.4, p.287 - 327.*

VAZ, L. F. (1996). *Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rochas em regiões tropicais. Solos e Rochas, v. 19, nº. 2, p. 117-136.*









UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

### MAPA ESTRUTURAL DA MINA DO BONITO - JUCURUTU, RN

**PROJETO:**  
Estabilidade de Taludes: Tipos de Ruptura e  
Condicionantes Geológicos da Mina do Bonito - Jucurutu (RN)

**AUTORES:**  
Gabriel Zanella Veríssimo  
Laura Gomes Girão Palva

**LOCAL/MUNICÍPIO/ESTADO/PAÍS:**  
Mina do Bonito  
Jucurutu - Rio Grande do Norte - Brasil

**ORIENTADOR:**  
Prof. Dr. César Ulisses V. Veríssimo

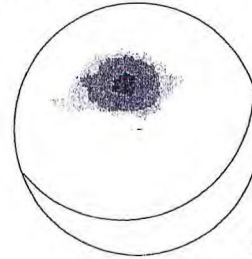
**ESCALA NUMÉRICA:**  
1:5.000

**ÁREA (km²):**  
2,41

**TAMANHO DO PAPEL:**  
A2

### DADOS ESTRUTURAIS - PROJEÇÃO ESFERICA DE IGUAL ÁREA

Foliação Principal (Sn) - Polos em Contorno



>1%  
>2%  
>4%  
>8%  
>16%  
>32%  
Max. = 42,98%

Nº de Planos = 114  
Orientação Média = 161/30°

Família de Fraturas - Diagrama de Roseta



Nº de Planos = 118  
Vetor Médio = 277,7° Az



1:5.000

DATUM  
SAD 1968 UTM Zona 24S  
Projection Transverse Mercator

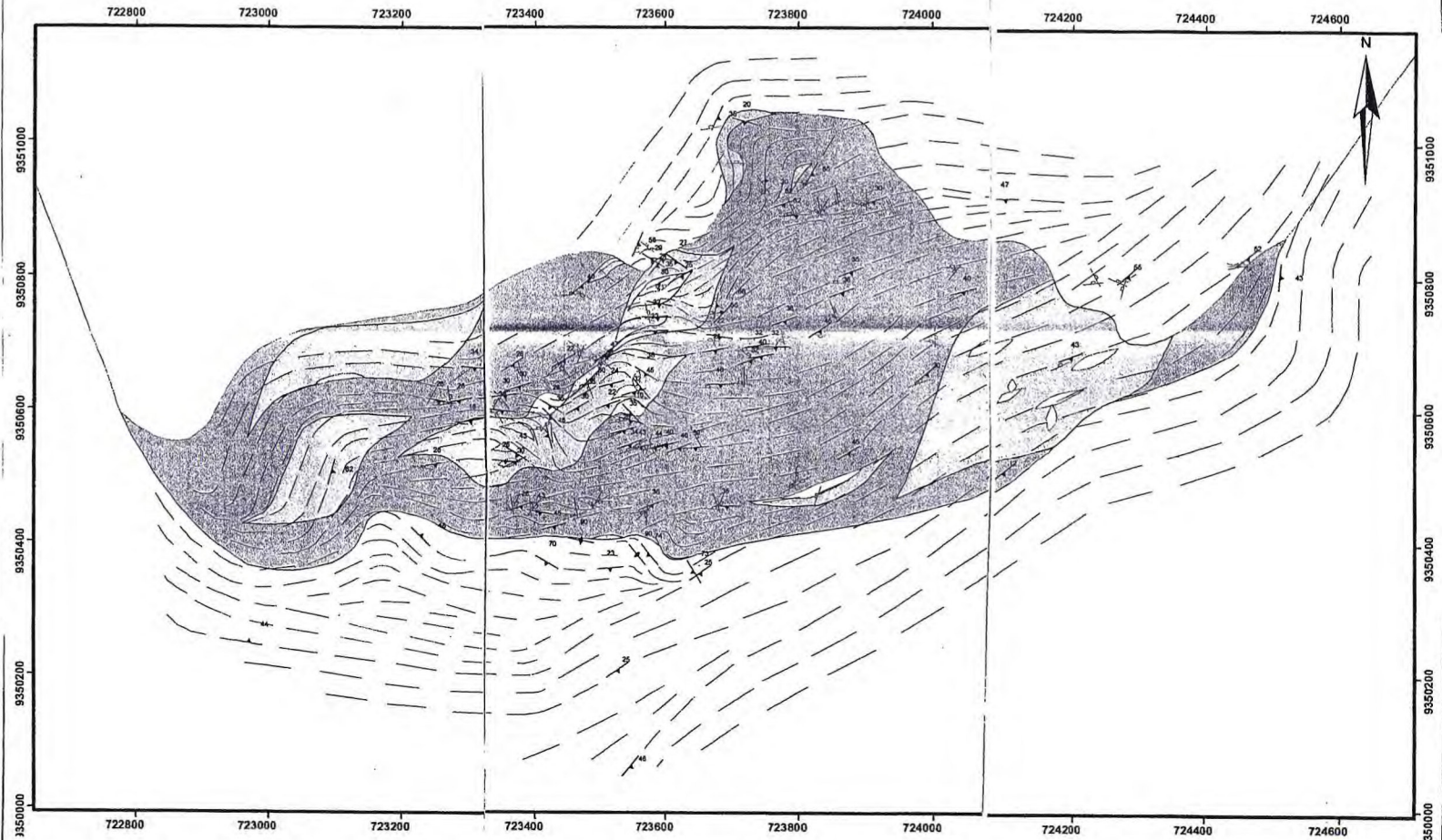
0 50 100 200 300 400 m

#### Legenda

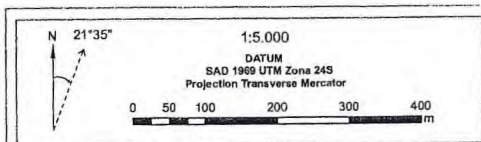
- Fraturas
- Foliações
- Zona de Cisalhamento
- Dobras anticlinais
- Dobras sinclinais
- Linhas de Forma

#### Litologias

- |  |               |  |                       |
|--|---------------|--|-----------------------|
|  | Clorita Xisto |  | Quartzito             |
|  | Gnaise        |  | Quartzito Ferruginoso |
|  | Itabrito      |  | Quartzito Mica Xisto  |
|  | Mármore       |  | Skamitos              |







**Legenda (mapa)**

- ▲ Foliações
- Perfis

**Litologias**

- Skarnito
- Mármore
- Quartzito
- Quartzito Ferruginoso
- Clorita Xisto
- Itabirito
- Quartzo Mica Xisto
- Gnaíссе

**Legenda (perfis)**

- FS 27 Furos de sonda

**Litologias**

- Colúvio
- Mármore
- Quartzito Ferruginoso
- Anfibolitos
- Quartzo Mica Xisto
- Itabirito
- Gnaíссе

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

**MAPA GEOLÓGICO DA MINA DO BONITO - JUCURUTU, RN**

**PROJETO:**

Estabilidade de Taludes: Tipos de Ruptura e Condicionantes Geológicos da Mina do Bonito - Jucurutu (RN)

**AUTORES:**

Gabriel Zanella Veríssimo  
Laura Gomes Girão Palva

**LOCAL/MUNICÍPIO/ESTADO/PAÍS:**

Mina do Bonito  
Jucurutu - Rio Grande do Norte - Brasil

**ORIENTADOR:**

Prof. Dr. César U. Vieira Veríssimo

**ESCALA NUMÉRICA:**

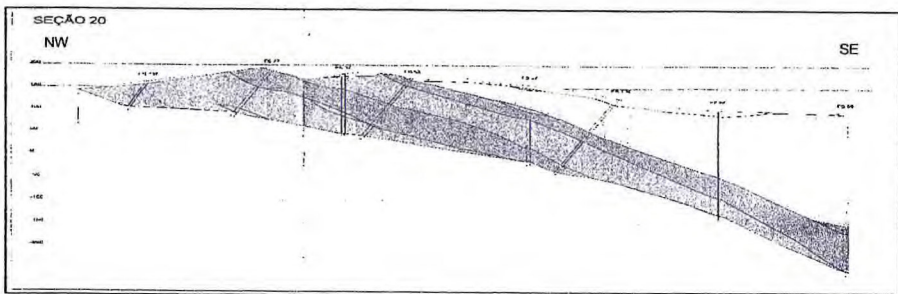
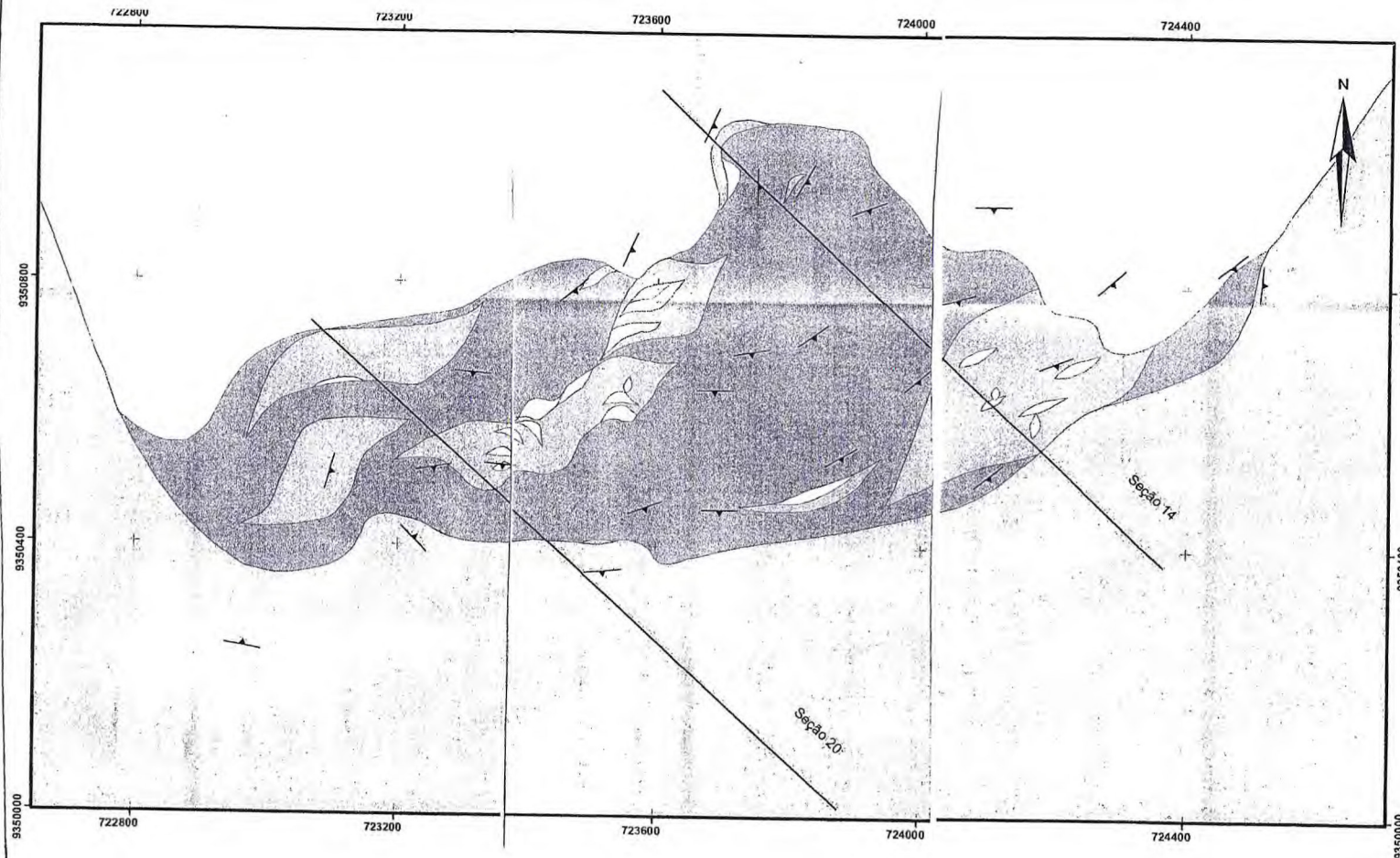
1:5.000

**ÁREA (km²):**

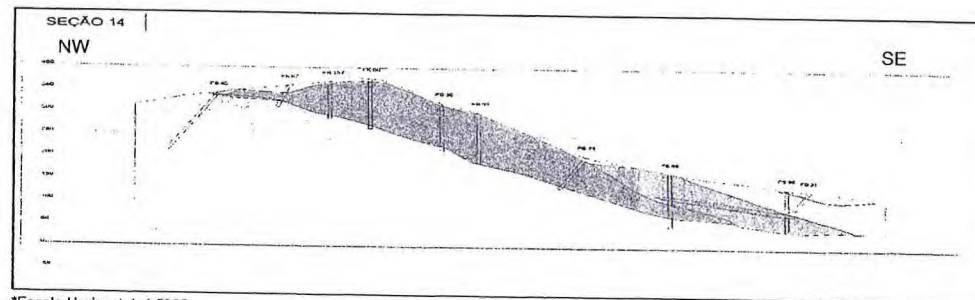
2,41

**TAMANHO DO PAPEL:**

A2



**SEÇÕES**



Escala Horizontal: 1:5000  
Escala Vertical: 1:8000

## Litologia

- Clorita Xisto
- Gnaisse
- Itabirito
- Mármore
- Quartzito Ferruginoso
- Quartzo Mica Xisto
- Skarnito



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

## MAPA DE SITUAÇÃO DA MINA DO BONITO - JUCURUTU, RN

### RELATÓRIO:

Estabilidade de Taludes: Tipos de Ruptura e  
Condicionantes Geológicos da Mina do Bonito - Jucurutu (RN)

### AUTORES:

Gabriel Zanella Veríssimo  
Laura Gomes Girão Paiva

### LOCAL/MUNICÍPIO/ESTADO/PAÍS:

Mina do Bonito  
Jucurutu - Rio Grande do Norte - Brasil

### ORIENTADOR:

Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo

### ESCALA NUMÉRICA:

1:5.000

### ÁREA (km<sup>2</sup>):

4,2544

### TAMANHO DE PAPEL:

A1

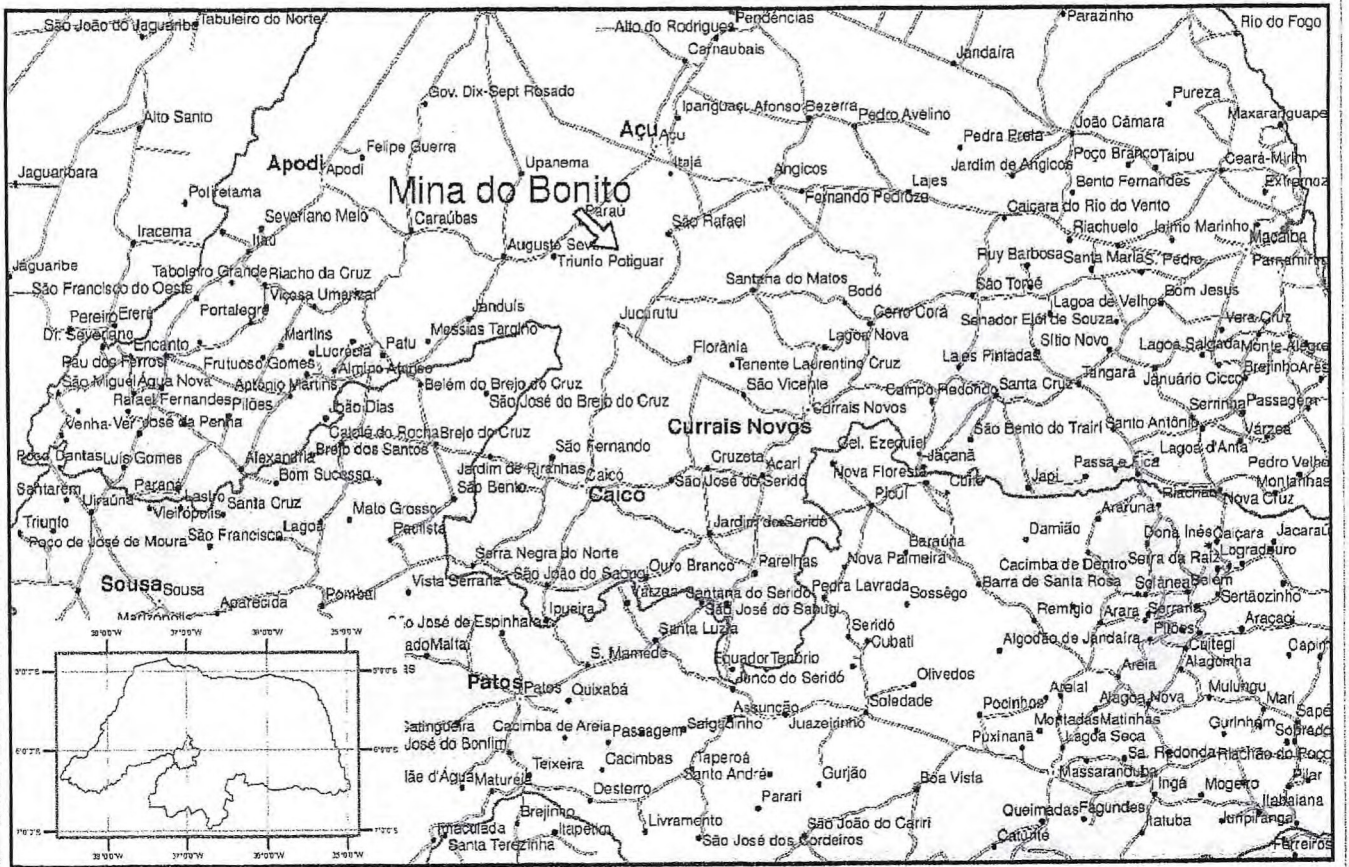


1:5.000

DATUM  
SAD 1969 UTM Zona 24S  
Projection Transverse Mercator



## Localização



## Legenda

Área de Estudo

Área de Detalhe do Mapa Geológico e Mapa Estrutural

Área de Detalhe do Mapa Geotécnico

Área de Servidão e Beneficiamento

Curvas de Nível (Equidistância 20m)

