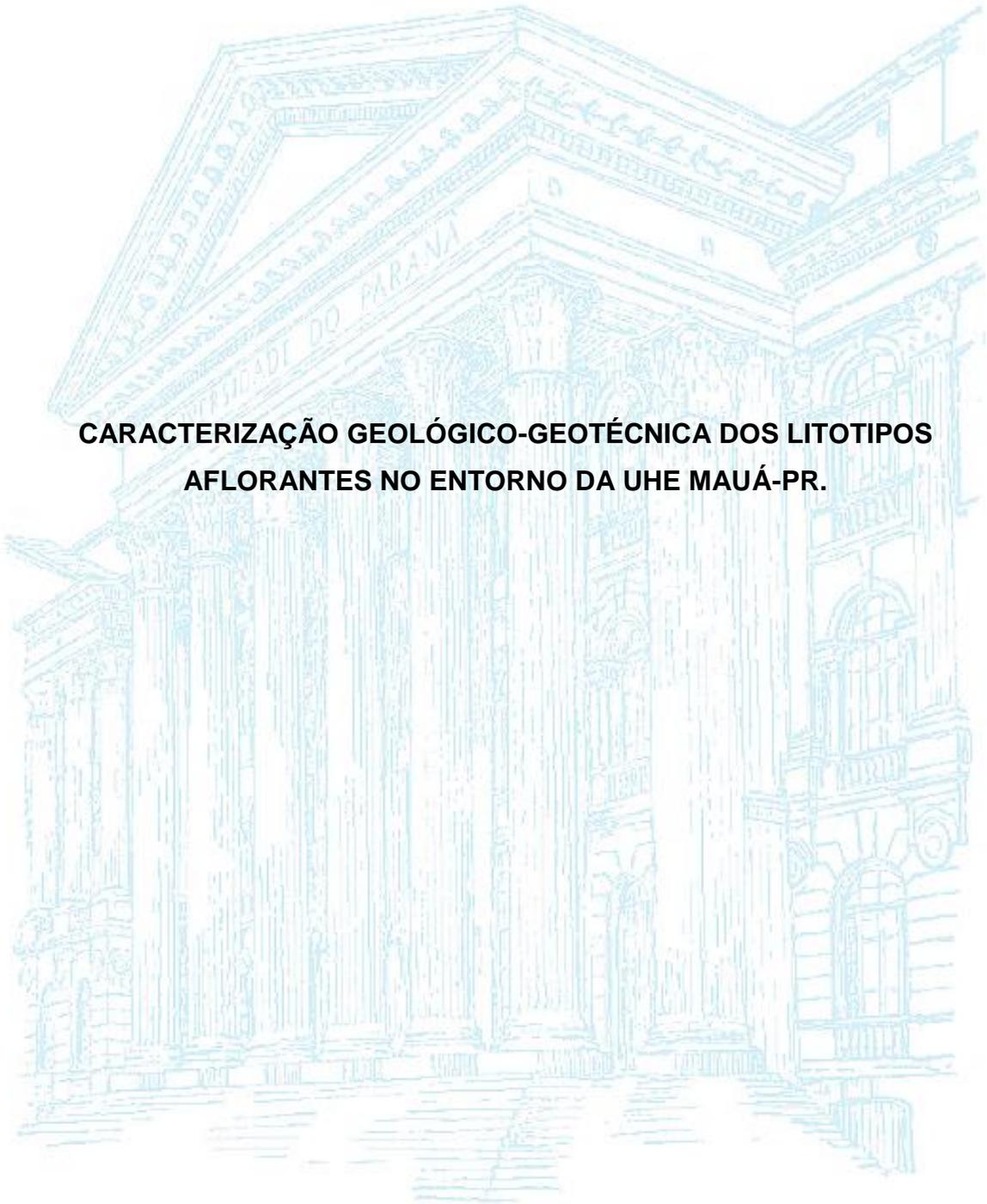


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RAMON SADE ZAPATA RIVAS

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DOS LITOTIPOS
AFLOREScentes NO ENTORNO DA UHE MAUÁ-PR.**



CURITIBA

2015

RAMON SADE ZAPATA RIVAS

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DOS LITOTIPOS
AFLORANTES NO ENTORNO DA UHE MAUÁ-PR.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, Área de Concentração em Geologia Ambiental, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Salamuni
Co-orientador: Prof. Dr. Alberto Pio Fiori

CURITIBA

2015

R618c Rivas, Ramon Sade Zapata
Caracterização geológico-geotécnica dos litotipos aflorantes no entorno da
UHE Mauá-PR/ Ramon Sade Zapata Rivas. – Curitiba, 2015.
127 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da
Terra, Programa de Pós-graduação em Geologia, 2015.

Orientador: Eduardo Salamuni – Co-orientador: Alberto Pio Fiori.
Bibliografia: p. 123-129.

1. Mecânica do solo. 2. Mecânica de rochas. 3. Barragens e açudes -
Fundações. I. Universidade Federal do Paraná. II. Salamuni, Eduardo. III.
Fiori, Alberto Pio. IV. Título.

CDD: 627.81

TERMO DE APROVAÇÃO

RAMON SADE ZAPATA RIVAS

*“Caracterização geológico-geotécnica dos litotipos
aflorantes no entorno da UHE Mauá-PR.”*

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná. Comissão formada por:


Prof. Dr. Marcos Egydio da Silva - USP


Prof.ª. Dr.ª. Barbara Trzaskos - UFPR


Prof. Dr. Eduardo Salamuni - UFPR
Presidente

Curitiba, 31 de agosto de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Paraná, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Departamento de Geologia e Institutos LACTEC pela oportunidade, infraestrutura e financiamento.

Ao Laboratório de Materiais e Estruturas Civas (LAME), pela possibilidade de convívio com pesquisadores e corpo técnico, que deram os mais diversos tipos de suportes no projeto.

A Companhia Paranaense de energia (Copel) por ceder o espaço de entorno e infraestrutura da UHE Mauá e informações relevantes ao projeto de pesquisa.

A Geóloga Dr. Isabella Françoso Rebutini Figueira pelo apoio e coordenação do Projeto “Levantamento Geológico-estrutural da Região e Entorno da Barragem da UHE Mauá, uma abordagem inovadora para o monitoramento geodésico nos pontos de risco”, além dos debates científicos levantados ao longo desses dois anos de trabalho que possibilitaram a conclusão da dissertação.

A Engenheira Civil Msc. Amanda Jakek por todo apoio e incentivo à carreira profissional.

Ao meu orientador Dr. Eduardo Salamuni, pelo suporte, discussões, correções e incentivos que colaboraram para o desenvolvimento deste estudo.

Aos meus pais Ciro Zapata Rivas e Elis Rosane Sade primeiramente pelo amor, incentivo e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

Aos queridos amigos que nas horas exaustivas proporcionaram momentos de alegria e descontração, essenciais para a continuidade da pesquisa.

Em especial a Margot Marie Martin por toda paciência, compreensão, “conhecimento geológico”, companhia, risadas e amor integro dedicados à minha pessoa.

“Pensamentos sem conteúdos são vazios: intuições sem conceitos são cegas”
Immanuel Kant (1724-1804)

RESUMO

As barragens são obras de grande potencial de risco, haja vista que um eventual *colapso tem consequências catastróficas ao meio ambiente. Tais ocorrências* reforçam a necessidade e especial importância nos investimentos em levantamentos preliminares e monitoramento destas estruturas com intuito de melhorar a segurança da barragem. Em estudos prévios à construção de uma barragem, a investigação geológico-geotécnica realizada é extremamente importante para a caracterização e compartimentação geomecânica do maciço. O trabalho proposto objetivou identificar feições geológicas que enriqueçam o conhecimento acerca da fundação da barragem e aumentem a segurança da estrutura, por meio da integração entre o levantamento geológico-estrutural, correlação de atributos geotécnicos, instrumentação e monitoramento geodésico. A pesquisa tomou como base a Usina Hidrelétrica de Mauá e seu entorno, localizada sob o rio Tibagi, a noroeste do município de Telêmaco Borba divisa com Ortigueira no Estado do Paraná. O local em que foi construída a UHE Mauá está inserido sobre soleiras de diabásio da Formação Serra Geral e rochas sedimentares paleozoicas da Bacia do Paraná, de alto controle estrutural em função da intersecção de estruturas regionais como o Arco de Ponta Grossa, Zona de Falha São Jerônimo Curiúva com a Zona de Falha Jacutinga. A análise estrutural possibilitou o reconhecimento de feições estruturais, com predomínio de direções N50-60E de maior penetratividade em mesoescala e N40-50W, mais pervasivas na escala regional. As descontinuidades mapeadas são caracterizadas, principalmente por juntas, falhas e zonas de cisalhamento cataclásticas associadas a eventos tectônicos transcorrentes, por vezes, de regime transtrativo com estruturas em flor negativa e falhas oblíquas, identificadas nos sedimentos paleozoicos e rochas básicas da Formação Serra Geral. Em conjunto ao levantamento estrutural, foi confeccionada a modelagem geomecânica da fundação da barragem, com o *software* Voxler 3, que interpola, por meio da geoestatística, graus de consistência, fraturamento, alteração e RQD dos dados obtidos das sondagens realizadas na época dos estudos prévios à construção da barragem. Para a modelagem foram utilizados 22 furos, com um total de 512 m, distribuídos na região da fundação da barragem, em que foram desconsiderados os segmentos escavados para construção desta estrutura. O resultado apresentou concentrações locais em segmentos com alto grau de fraturamento e alteração da rocha, identificados principalmente na margem direita da barragem, que coincidem com descontinuidades mapeadas em campo e alinhamentos interpretados no relevo. A caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso permitiu identificar áreas suscetíveis de riscos à obra, que por meio do monitoramento geodésico apresentaram recalques pouco expressivos à segurança do empreendimento.

Palavras-chaves: Modelagem Geomecânica, Barragens, Fundação.

ABSTRACT

The dams are civil works of great potential risks, given that a possible collapse would have catastrophic consequences for the environment. Such events reinforce the need and particular importance in the investment in preliminary surveys and monitoring of these structures aiming to improve dam safety. In previous studies the construction of a dam, the geological and geotechnical investigation is extremely important for the characterization and geomechanical compartmentation of the rock mass. The proposed work aimed to identify geological features that enrich the knowledge of the dam's foundation and increase the safety of the structure, through the integration of geological and structural survey, correlation with geotechnical attributes, instrumentation and geodetic monitoring. The research was based on the Mauá Hydroelectric Power Plant and its surroundings, located under the Tibagi River, northwest of the town of Telêmaco Borba on the border of Ortigueira in Paraná. The place where it was built the Mauá Hydroelectric Power Plant is part of diabase sills of the Serra Geral Formation and Paleozoic sedimentary rocks of the Paraná Basin, high structural control due to the intersection of regional structures such as the Ponta Grossa Arch, Saint Jerônimo Curiúva Fault Zone with Jacutinga Fault Zone. Structural analysis allowed the recognition of structural features, with a predominance of N50-60E direction of greater penetrative mesoscale and N40-50W, more pervasive in regional scale. Mapped discontinuities are characterized mainly by joints, faults and shear zones associated with cataclastic tectonic strike-slip events, sometimes of transtensive shear regime with negative flower structures and oblique faults identified in Paleozoic sediments and basic rocks of the Serra Geral Formation. At the same time as leading a structural survey, the geomechanical modeling of the dam's foundation was done with the Voxler 3 software, which interpolates through geostatistics, degrees of consistency, fracturing, alteration and RQD data obtained from surveys carried out at the time of studies previous to the dam's construction. For the modeling, 22 holes were used with a total of 512 m, distributed in the region of the dam's foundation, they were disregarded segments excavated for building this structure. The result showed local concentration in segments with high degree of fracturing and alteration of the rock, identified mainly on the right bank of the dam, which coincides with discontinuities mapped in the field and alignments interpreted in relief. The geological and geotechnical characterization of the rock mass identified areas of potential risk to work, which geodetic monitoring showed that settlements have little expressive safety issues for the project.

Keywords: Geomechanical Modeling, Dams, Foundation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Localização da área de estudo em ortofotos sobrepostas.	22
Figura 02: Mapa de localização dos afloramentos descritos no entorno da Barragem sobreposto em imagem do Google Earth 2014 e ortofotos 2011.	24
Figura 03: Imagem de satélite Landsat 7 ETM+, cena 221/077 e 222/077, combinação falsa cor RGB (8,5,4) e em vermelho localização da área de estudo.	27
Figura 04: Mosaico das fotografias aéreas, escala 1: 25.000. Fonte: MINEROPAR, 2006.	28
Figura 05: Modelo Riedel das fraturas teóricas sob cisalhamento simples.	30
Figura 06: Visão em planta da barragem com a alocação dos furos de sondagem. O norte é indicado pela seta verde.	31
Figura 07: Vista lateral do Modelo Digital de Elevação com sobreposição dos furos de sondagens com a indicação dos parâmetros de alteração.	32
Figura 08: localização da Bacia do Paraná no continente Sul-Americano. Fonte: Zalán <i>et al.</i> (1990).	35
Figura 09: Arcabouço Estrutural do Paraná com os principais lineamentos que afetam a bacia e localização da área de estudo. Modificado de Zalan <i>et al.</i> , (1990).	37
Figura 10: Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná com a delimitação dos grupos geológicos que abrangem a área de estudo. Modificado de Milani <i>et al.</i> (2007).	39
Figura 11: Tipos de barragens: a) barragem de concreto em arco; b) barragem de CCR; c) barragem de terra (aterro); d) barragem de alvenaria; e) barragem de enrocamento; f) barragem de terra zonada. Fonte: Pinto (2012).	47
Figura 12: Vista a jusante da Barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá.	48
Figura 13: (A) Distribuição de cargas em uma barragem e zona de cisalhamento linear conforme formula de Mohr-Coulomb. (B) Variação no ângulo de mergulho de descontinuidades na estabilidade da obra. (C) Relação de influencia a estabilidade entre plano de ruptura e descontinuidade. (D) Bloco diagrama exemplificando a relação entre os dois parâmetros. Fonte: Costa (2012).	50
Figura 14: Modelo da compartimentação de um maciço e influência das descontinuidades na obra. Fonte: Assis (2013).	51
Figura 15: Padrões de rugosidades das descontinuidades (ABGE, 1983).	52

Figura 16: Modelo esquemático da classificação da persistência dos planos de fraturas, (COSTA, 2012).....	53
Figura 17: Mapa geológico regional (Escala 1:250.000) e local (Escala 1:25.000) do entorno da UHE Mauá. Fonte: Mineropar, 2006 e VLB Engenharia, 2007.....	56
Figura 18: Mosaico de afloramento da Formação Palermo e abaixo estratificação cruzada em contato com estruturas plano-paralelas no horizonte médio.....	58
Figura 19: A) Concreções carbonáticas dispersas no arenito da Formação Palermo, nas proximidades da Câmara de Carga; B) Bioturbação em sedimentos da Formação Palermo, próximo à Câmara de Carga; C) Estrutura do tipo wavy no ponto 03, próximo a câmara de carga; D) Estrutura do tipo flaser no ponto 12, próximo ao túnel de desvio.	59
Figura 20: A) Vista superior do afloramento de siltito do ponto 12 próximo ao túnel de desvio; B) Visão superior do afloramento em estrada não pavimentada de siltito da Formação Irati no ponto 23; C) Vista de encosta de folhelhos próxima a canal de desvio, ponto 12 e D) Concreções carbonáticas dispersas no arenito da Formação Palermo, no ponto 12 na proximidade da tomada d'água.....	60
Figura 21: Vista do talude da estrada com camada decimétrica de calcário nas proximidades do acesso à casa de força.	61
Figura 22: A) Corte de estrada com siltitos alterados e empastilhados da Formação Serra alta no ponto 02 e B) Afloramento de siltito no acesso à casa de força (ponto 13) da Formação Serra Alta.....	62
Figura 23: Vista geral da pedreira.....	63
Figura 24: Vista da pedreira de diabásio com descontinuidades de direção NW e juntas horizontais.....	64
Figura 25: Soleira de diabásio com início de alteração esferoidal localizada próximo ao desvio para câmara de carga.....	64
Figura 26: Dique alterado cortando os siltitos da formação Irati em talude próximo a desvio da câmara de carga.....	64
Figura 27: A) Talude de soleira de diabásio mapeado na pedreira de material de empréstimo (ponto 01); B) Veio de carbonato alterado; C) Afloramento de diabásio próximo a face jusante da barragem, ponto 05 e D) Dique alterado cortando os siltitos da Formação Irati.	65

Figura 28: Relevo de morros e colinas dissecadas com vertentes convexas a retilíneas e topos alongados.	67
Figura 29: Relevo de morros ondulados e íngremes com vertentes convexas retilíneas e topos em crista e alongados.	67
Figura 30: Hipsometria da área de interesse e articulação das cartas topográficas. .	68
Figura 31: Modelo Digital de Elevação (MDE) com visualização geral do relevo e feições alinhadas no terreno, dadas por eventuais fraturas ou diques de diabásio. .	69
Figura 32: Classes de declividade em graus de inclinação da vertente.	70
Figura 33: Lineamentos positivos e negativos traçados em imagem de satélite Landsat 7 ETM+, cena 221/077 e 222/077, combinação falsa cor RGB (8,5,4) e em vermelho localização da área de estudo.	72
Figura 34: Diagrama de rosetas sinóptico do comprimento dos lineamentos de 1º ordem.	73
Figura 35: Lineamentos traçados em fotos aéreas em escala 1:25.000.	74
Figura 36: Diagrama de rosetas com o comprimento dos lineamentos traçados em fotos aéreas.	75
Figura 37: Diagrama de rosetas de todas as fraturas identificadas na área (512 medidas).	77
Figura 38: Mergulho de todas as discontinuidades medidas em campo.	77
Figura 39: Diagrama de roseta e de contorno das fraturas de cada unidade estratigráfica.	78
Figura 40: Exemplos de discontinuidades de direção NE-SW (A) Zona de cisalhamento mapeada na pedreira de diabásio, no ponto 01. (B) Planos de discontinuidade de direção NE-SW no ponto 01. (C) Zona de cisalhamento de sentido dextral no ponto 04. (D) Planos de fraturas identificados a jusante da barragem no ponto 05.	81
Figura 41: (A) fraturas escalonadas identificadas no ponto 04. (B) penetrabilidade das discontinuidades das fraturas NE-SW no ponto 03.	82
Figura 42: Zona de cisalhamento de sentido transcorrente dextral localizada na margem esquerda a jusante da barragem, no ponto 08. (B) preenchimento de óxido de manganês nas fraturas abertas do mesmo ponto.	82

Figura 43: Plano de falha transcorrente com estrutura em flor de direção NW-SE mapeada na pedreira de diabásio no ponto 01.	84
Figura 44: (A) estrutura em flor associada à falha transcorrente no ponto 01. (b) zona de cisalhamento de direção NW-SE. (C) Z. C com óxido de manganês percolando as fraturas.	85
Figura 45: (A) Falha conjugada de movimento inverso identificada em afloramento da margem direita a jusante da barragem no ponto 05. (B) Zona de cisalhamento de movimento sinistral mapeada nos sedimentos da Formação Serra Alta no ponto 07.	86
Figura 46: (A) Plano de falha normal com intercrescimento de pirita. (B) Fraturas sub-horizontais de direção NW cortadas por estrutura verticais de direção NE.	87
Figura 47: Descontinuidade transcorrente sinistral com estrutural em flor nos sedimentos da Formação Palermo próximo à câmara de carga no ponto 03.	88
Figura 48: Plano de junta cortado por fratura E-W a montante do reservatório, no ponto 04.	88
Figura 49: (A) Plano de fratura de direção E-W próximo à margem direita da barragem no ponto 15. (B) plano de falha com estria indicando movimento sinistral no diabásio do ponto 15.	89
Figura 50: (A) Plano de fratura E-W com grande persistência no afloramento do ponto 4. (B) fratura associada ao modelo Riedel com estruturas Y, R e P indicando cinemática dextral.	90
Figura 51: (A) e (B) Plano de falha com estrias e <i>steps</i> de cinemática sinistral na pedreira de Diabásio (Ponto 01). (C) Plano de falha com <i>steps</i> indicando movimento sinistral no túnel da câmara de carga (ponto 10). (D) Plano de falha com intercrescimento de pirita identificado na pedreira de diabásio (ponto 01).	91
Figura 52: Fraturas preenchidas por calcita euédrica (A) Veio de calcita em formato sigmoide. (B) Fratura preenchida por calcita com estrias de falha no plano exposto do veio.	92
Figura 53: Diagrama de roseta (A) e contorno (B) com disposição dos principais direções de fraturas preenchidas na região de estudo.	92
Figura 54: Diagramas de contorno para os tensores σ_1 , σ_2 e σ_3 dos pontos mapeados na área de estudo.	93

Figura 55: Diagramas estruturais de paleotensores para as rochas básicas (A) e sedimentares (B), obtidos de planos de falhas mapeados em campo (<i>software Sigmas</i>). Diagramas estruturais de paleotensores para as rochas básicas (C) e sedimentares (D), obtidos de planos de falhas mapeados em campo (<i>software WinTensor</i>).	95
Figura 56: Diagramas estruturais de paleotensores para as falhas relacionadas ao evento D1(A) Diagramas de contorno para os paleotensores σ_1 , σ_2 e σ_3 (B), Falhas transcorrentes formadas conforme variação do tensor σ_1 próximo aos polos no evento D1.....	96
Figura 57: Diagramas estruturais de paleotensores para as falhas relacionadas ao evento D2(A) Diagramas de contorno para os paleotensores σ_1 , σ_2 e σ_3 . (B) Falhas transcorrentes formadas conforme variação do tensor σ_1 no evento D2.	99
Figura 58: Vista superior do produto da interpolação dos parâmetros geotécnicos de alteração. O norte é indicado pela seta verde.	102
Figura 59: Vista superior com a interpolação do parâmetro geotécnico fraturamento. O norte é indicado pela seta verde.	102
Figura 60: Vista lateral de detalhe dos furos de sondagem, na ombreira direita, do parâmetro alteração. O norte é indicado pela seta verde.	103
Figura 61: Vista lateral com a modelagem feita a partir do atributo fraturamento. O norte é indicado pela seta verde.	103
Figura 62: Vista tridimensional representativa do parâmetro geotécnico consistência. O norte é indicado pela seta verde.	104
Figura 63: Vista em planta do resultado da interpolação dos valores de consistência o qual é possível identificar que o maciço rochoso mapeado pelos furos SR-09 e SR – 23, na ombreira direita, apresentam uma classificação de pouco consistente em níveis restritos. O norte é indicado pela seta verde.	104
Figura 64: Vista tridimensional representativa da interpolação do parâmetro geotécnico RQD, o qual é possível identificar que o maciço rochoso mapeado pelos furos SR-12, SR-09 e SR – 23, na ombreira direita, apresentam uma classificação de pobre a regular em níveis restritos. O norte é indicado pela seta verde.	105
Figura 65: Vista superior com a interpolação do parâmetro geotécnico RQD. O norte é indicado pela seta verde.	106

Figura 66: Mapa da barragem com as principais medidas estruturais sobrepostas ao parâmetro geotécnico de fraturamento.	107
Figura 67: Visão geral da ombreira direita da Barragem na época de construção. .	108
Figura 68 – Posição dos pontos mapeados e as principais direções de descontinuidades encontradas.....	111
Figura 69: Modelo esquemático do substrato da barragem de Mauá.	113
Figura 70: mapa da barragem com as principais medidas estruturais sobrepostas ao parâmetro geotécnico de alteração e medidas de recalques ao longo do eixo da barragem.....	116
Figura 71: mapa da barragem com as principais medidas estruturais sobrepostas ao parâmetro geotécnico de fraturamento e medidas de recalques ao longo do eixo da barragem.....	117
Figura 72: mapa da barragem com as principais medidas estruturais sobrepostas ao parâmetro geotécnico de consistência e medidas de recalques ao longo do eixo da barragem.....	118
Figura 73: mapa da barragem com as principais medidas estruturais sobrepostas ao parâmetro geotécnico de RQD e medidas de recalques ao longo do eixo da barragem.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Organização dos dados estruturais com referência do nº do ponto, coordenada UTM, azimute e mergulho da fratura, tipo do dado medido, unidade estratigráfica pertencente, o tipo da rocha e dados cinemáticos.....	25
Tabela 2: Características da classificação do grau de decomposição da rocha. Fonte: ABGE 1983.....	33
Tabela 3: Quadro resumo das características e valores do grau de fraturamento. Fonte: ABGE 1983.	33
Tabela 4: Resumo das características e valores do grau de consistência.	34
Tabela 5: Quadro resumo das características e valores da qualidade da rocha.	34
Tabela 07: Localização dos pontos de campo.....	56
Tabela 8: Influência entre as direções das descontinuidades e do eixo da barragem com relação á estabilidade e à estanqueidade das fundações. Retirado de Costa (2012).	114

SUMÁRIO

RESUMO	<i>vii</i>
ABSTRACT	<i>viii</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>ix</i>
LISTA DE TABELAS	<i>xv</i>
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	18
1.2 OBJETIVOS	20
1.3 JUSTIFICATIVA	20
1.4 ÁREA DE ESTUDO	21
2 MATERIAIS E MÉTODOS	23
2.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	23
2.2 LEVANTAMENTOS DE CAMPO	23
2.3 TRATAMENTO DE DADOS DE CAMPO	24
2.4 GEOPROCESSAMENTO	26
2.4.1 Análise de lineamentos em imagens de satélite e fotos aéreas	26
2.4.2 Modelo Digital de Imagens	29
2.4.3 Declividade	29
2.5 ANÁLISE ESTRUTURAL	29
2.6 MODELAGEM GEOMECÂNICA	30
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO-REGIONAL – BACIA DO PARANÁ	35
3.2 ARCABOUÇO ESTRUTURAL DA BACIA DO PARANÁ	36
3.3 ESTRATIGRAFIA REGIONAL DA ÁREA DE ESTUDO	38
3.3.1 Grupo Guatá	40
3.3.2 Grupo Passa Dois	41
3.3.3 Supersequência Gondwana III – Formação Serra Geral	43
3.4 BARRAGENS	45
3.4.1 Tipos de barragens	45
3.4.2 UHE Mauá	47
3.5 ESFORÇOS ATUANTES EM UMA BARRAGEM E MONITORAMENTO	48

3.6	GEOLOGIA DE ENGENHARIA	50
4	GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO	55
4.1	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS DA ÁREA DE ESTUDO	55
4.1.1	Formação Palermo	56
4.1.2	Formação Irati	59
4.1.3	Formação Serra Alta	61
4.1.4	Formação Serra Geral	62
5	MORFOESTRUTURAS DA ÁREA DE ESTUDO	66
6	ANÁLISE ESTRUTURAL	71
6.1	FOTOLINEAMENTOS DE IMAGENS DE SATÉLITE E FOTOS AÉREAS	71
6.2	ANÁLISE ESTRUTURAL DOS DADOS DE CAMPO	76
6.2.1	Família NE-SW	80
6.2.2	Família NW-SE	83
6.2.3	Família N-S	87
6.2.4	Família E-W	89
6.2.5	Estruturas Lineares	90
6.3	ANÁLISE DINÂMICA	93
6.3.1	Evento D1	96
6.3.2	Evento D2	97
7	MODELAGEM GEOMECÂNICA	101
8	DISCUSSÃO	109
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	121
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

1 INTRODUÇÃO

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Obras de engenharia apresentam como principal finalidade proporcionar e garantir a qualidade de vida dos cidadãos, podendo influenciar diretamente ou indiretamente em uma sociedade.

Dentre os diversos tipos de obras, as barragens expressam importante fator de desenvolvimento socioeconômico, pois possibilitam a resolução de problemas globais como a demanda por maiores quantidades de recursos hídricos em consequência do crescimento demográfico, escassez de água devido a mudanças climáticas e necessidade de obtenção de energia elétrica.

Em contrapartida, a construção de uma barragem, independente de tipo, classificação e tamanho, envolve grande potencial de risco, haja vista que um eventual colapso traz consequências catastróficas ao meio ambiente, à sociedade e, conseqüentemente, grande impacto na economia regional ou local.

O conhecimento das características e condicionantes geológicas do substrato é fundamental para obras de engenharia de grande porte, como barragens, que são consideradas de alto risco. Os eventos de ruptura são extremamente raros, porém devastadores, com causas diversas como galgamento, *pipping*, condicionantes geotécnicas da fundação, instabilidade de taludes próximo ao reservatório, erosão interna do maciço.

Os problemas relacionados aos aspectos geológicos do substrato são recorrentes em praticamente todas as barragens, com maior incidência em barragens de concreto, com cerca de 20% dos casos, segundo estatísticas divulgadas pelo ICOLD (1995). Os casos principais envolvem erosão interna e resistência ao cisalhamento insuficiente da fundação em consequência do peso exercido pela estrutura.

O período crítico na vida de uma barragem abrange os seus 10 primeiros anos, em que ocorre a maior incidência de ruptura. Além da exposição aos agentes externos e predisponentes do meio, a estrutura sofre influências de patologias no concreto, juntas formadas por variação do gradiente térmico do concreto, negligências nas investigações geológicas e erros de projeto que se mostram decisivos em seu estágio inicial.

Para diminuir o risco de ruína é essencial a prática de um programa preventivo de segurança de barragens e a regularização de planos de ações emergenciais em sentido global, envolvendo aspectos de natureza geológico-geotécnica, estrutural (maciço de concreto), hidráulica, operacional e ambiental, com previsão de maior incidência após a Lei de Segurança de Barragens (Brasil, 2010).

Como dispositivo de segurança da obra são realizados continuamente procedimentos de monitoramento e auscultação no empreendimento civil, com resultados quantitativos diversos como recalque, diferencial escorregamento da fundação, subsidência do terreno, aumento de poropressão, excesso de vazão de água, entre outros. Tais produtos, em geral, não expressam correlação qualitativa com a disposição e forma das estruturas geológicas presentes na fundação e entorno da barragem, que, é frequentemente negligenciada nas fases de projeto básico e construtivo, ou despendem onerosas modificações posteriores.

Portanto, faz-se necessário caracterizar as principais estruturas geológicas que condicionam e compartimentam geometricamente um maciço rochoso. Como, por exemplo, gerar a análise conjunta dos dados produzidos pelo monitoramento e auscultação da barragem e as estruturas geológicas presentes no local. A partir desta analogia pode-se determinar e/ou corroborar o potencial de risco associado às feições geológicas presentes na fundação.

Para tal projeto, foi realizado um estudo de caso na recém-inaugurada barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá (2012). A análise teve como abordagem temas concernentes à estratigrafia, morfologia, modelagem geomecânica por meio de classificação geotécnica de sondagens e caracterização geológico-estrutural.

O propósito desta dissertação foi identificar as principais feições geológicas locais e regionais e sua inter-relação com o maciço de fundação e possível correlação com deslocamentos medidos pelo monitoramento geodésico. Este método permitiu enriquecer o conhecimento acerca da situação da fundação da barragem, com vista à estabilidade e segurança da obra.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é determinar e estudar áreas suscetíveis a riscos geológico-geotécnicos por meio da integração multidisciplinar entre levantamento geológico-estrutural, correlação com atributos geotécnicos e monitoramento geodésico das tensões atuantes na área em que está instalada a barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá-PR.

Para que o objetivo acima seja alcançado é necessária à conclusão das seguintes metas intermediárias:

- Caracterizar as feições morfoestruturais da região por meio de análise de relevo em escalas regionais, como em imagens de satélite, fotográficas aéreas e sua correspondência com estruturas geológicas identificadas em campo.
- Levantamento de dados a partir do mapeamento geológico-estrutural na escala de 1:25.000 da região em que está instalada a UHE de Mauá, compreendendo a individualização das unidades geológicas e a caracterização dos planos e direções das descontinuidades existentes.
- Análise cinemática e dinâmica dos paleoesforços por meio de modelos geomecânicos de fraturamento segundo critérios de Mohr-Coulomb (Holtz e Kovacs, 1981), modelo de Anderson (1951), Riedel (1929).
- Caracterização geomecânica dos horizontes estratigráficos que compõem a fundação da barragem por meio da análise dos dados de boletim de sondagem disponibilizados pela concessionária, com finalidade de gerar mapa e modelos tridimensionais com os setores de maior risco geológico.
- Comparação entre os resultados da análise estrutural do maciço rochoso com os resultados do monitoramento geodésico das deformações impostas pelo completo preenchimento da barragem.

1.3 JUSTIFICATIVA

O local em que foi construída a UHE Mauá apresenta certas singularidades geológicas, por exemplo, a fundação está inserida sobre diques e soleiras de diabásio da Formação Serra Geral e sobre rochas sedimentares de idade Paleozoica da Bacia do Paraná. Esta composição apresenta diferentes

valores de resistência ao cisalhamento, além de ser propícia a gerar recalques diferenciais levando-se em conta a deformabilidade dos maciços, e isso a caracteriza como uma obra com situações sem precedentes no Estado do Paraná.

Outro fator importante refere-se quanto à localização da UHE Mauá, em função da região encontrar-se entre o domínio do eixo do Arco de Ponta Grossa e da Zona de Falha São Jerônimo – Curiúva, que são alinhamentos estruturais-magnéticos com direção NW-SE (Ferreira 1982). Esses alinhamentos são extensas zonas de falhas geológicas, relatadas em bibliografia e são produtos da reativação de planos de fraqueza do embasamento, onde foram intrudidas as rochas básicas da Formação Serra Geral (diabásio). Essas zonas de falhas são de fácil visualização, tanto em imagens orbitais, quanto em fotografias aéreas, por se apresentarem sob forma de cristas alongadas ou vales alinhados que no geral são preenchidos por diabásio que cortam a seção Paleozoica.

Cabe ressaltar a importância da caracterização geológico-geotécnica associada ao monitoramento geodésico proposto, uma vez que a região encontra-se em domínios de zonas de fraqueza da crosta e houve registros de tremores, porém de baixa magnitude, inferiores a 4.0 graus na escala Richter, tais como o que ocorreu em 2006, percebido em Telêmaco Borba, Ortigueira e cidades próximas (Mineropar, 2006).

1.4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange o entorno da Usina Hidrelétrica de Mauá, com área de 28 Km², situada no trecho médio do rio Tibagi, entre a divisa dos municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira, Paraná. A delimitação do polígono de estudo foi realizada com base na área de influência da barragem e do reservatório. A UHE está entre as coordenadas UTM 529.799 E/ 7.338.786 N.

A UHE-Mauá dista de Curitiba aproximadamente 285 km, sendo o principal acesso, via Telêmaco Borba, feito pelas rodovias BR-376 e PR-340. A partir de Telêmaco Borba o acesso à usina é realizado pela Rodovia do Papel (PR-160) até a localidade de Lagoa, onde o acesso é feito pela estrada vicinal com sentido oeste em direção à barragem, que dista 50 km da PR-160. A localização da área pode ser visualizada na Figura 01.

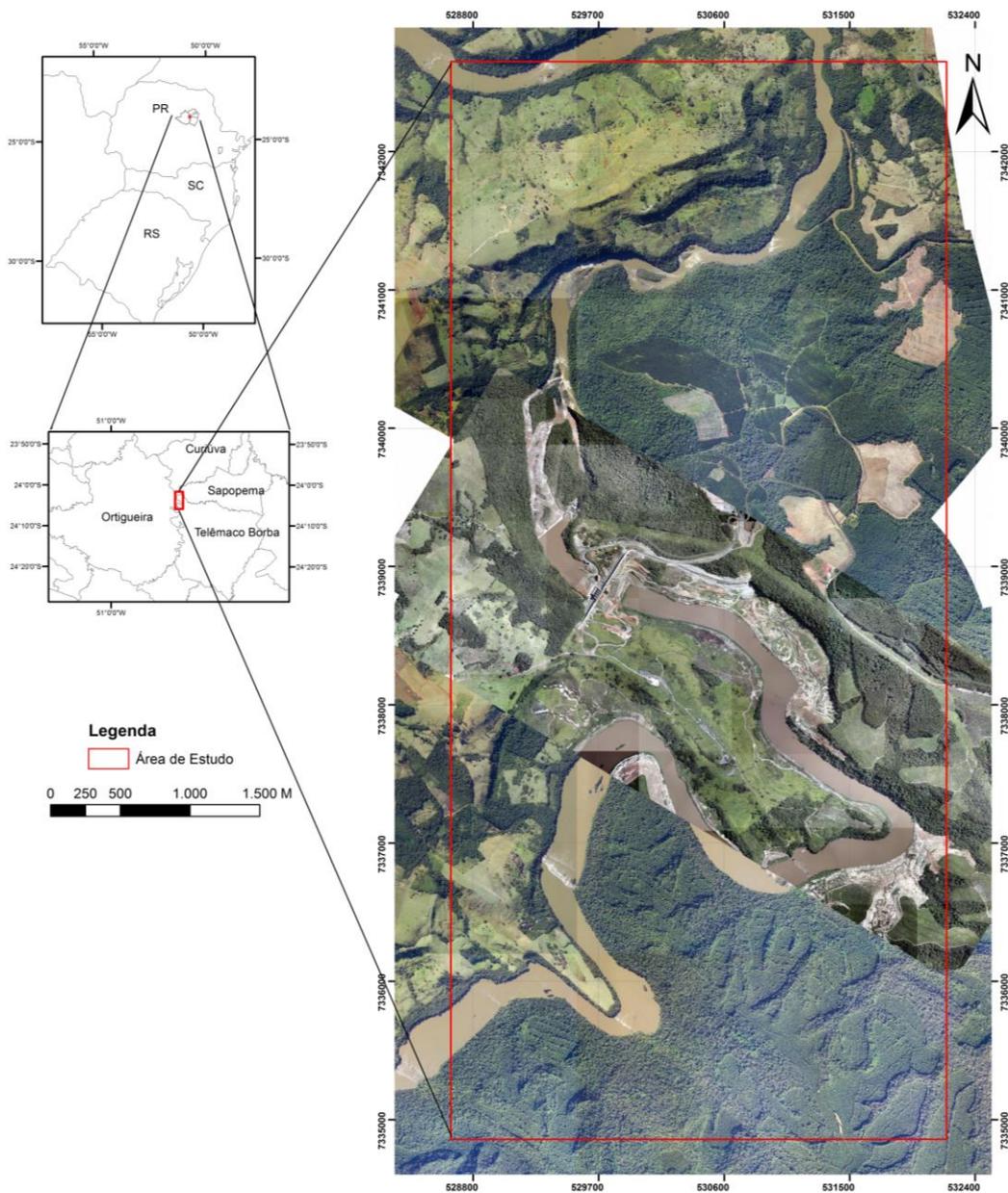


Figura 01: Localização da área de estudo em ortofotos sobrepostas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

No presente trabalho, desde a fase inicial da pesquisa até seu término, foram realizadas consultas aos acervos bibliográficos de diversos temas correlatos a geologia e geotecnia, que possibilitaram o embasamento técnico científico para elaboração da dissertação.

No levantamento bibliográfico foram consultados livros, artigos e periódicos específicos da área de geologia acerca da Bacia do Paraná e formações geológicas que abrangem o local de estudo além de tópicos relacionados à geologia de engenharia, mecanismos de deformação rúptil e os diversos tipos de barragens e critérios de construção, quando disponíveis nos periódicos, da capes e acervo técnico da biblioteca da UFPR.

2.2 LEVANTAMENTOS DE CAMPO

Em campo foram levantadas informações acerca do litotipo e unidade estratigráfica a qual pertence, direção e mergulho do acamamento dos estratos. Os levantamentos estruturais consistiram em obter dados estruturais da geometria das fraturas (descontinuidades), seu espaçamento, medidas de juntas e falhas (planos/estrias) e identificação de indicadores cinemáticos.

Este procedimento foi realizado em 4 etapas de campo com um total de 15 dias de mapeamento e cerca de 21 afloramentos descritos na região de entorno da UHE-Mauá (Figura 02). O objetivo foi o de identificar os litotipos aflorantes no local e unidades estratigráficas da região e, principalmente, obter medidas estruturais das feições geológicas rúpteis. Em campo essas feições são representadas por falhas, juntas, plano de acamamento sedimentar, além do reconhecimento da geometria e natureza cinemática das descontinuidades mapeadas. Nestes levantamentos de campo foram adquiridas 512 medidas de falhas/fraturas.

Foram também caracterizados, quando possível, o espaçamento das descontinuidades, persistência, rugosidade e materiais de preenchimento em

fraturas, como calcita, quartzo, argila e material cominuído em zonas de intenso cataclasmamento.

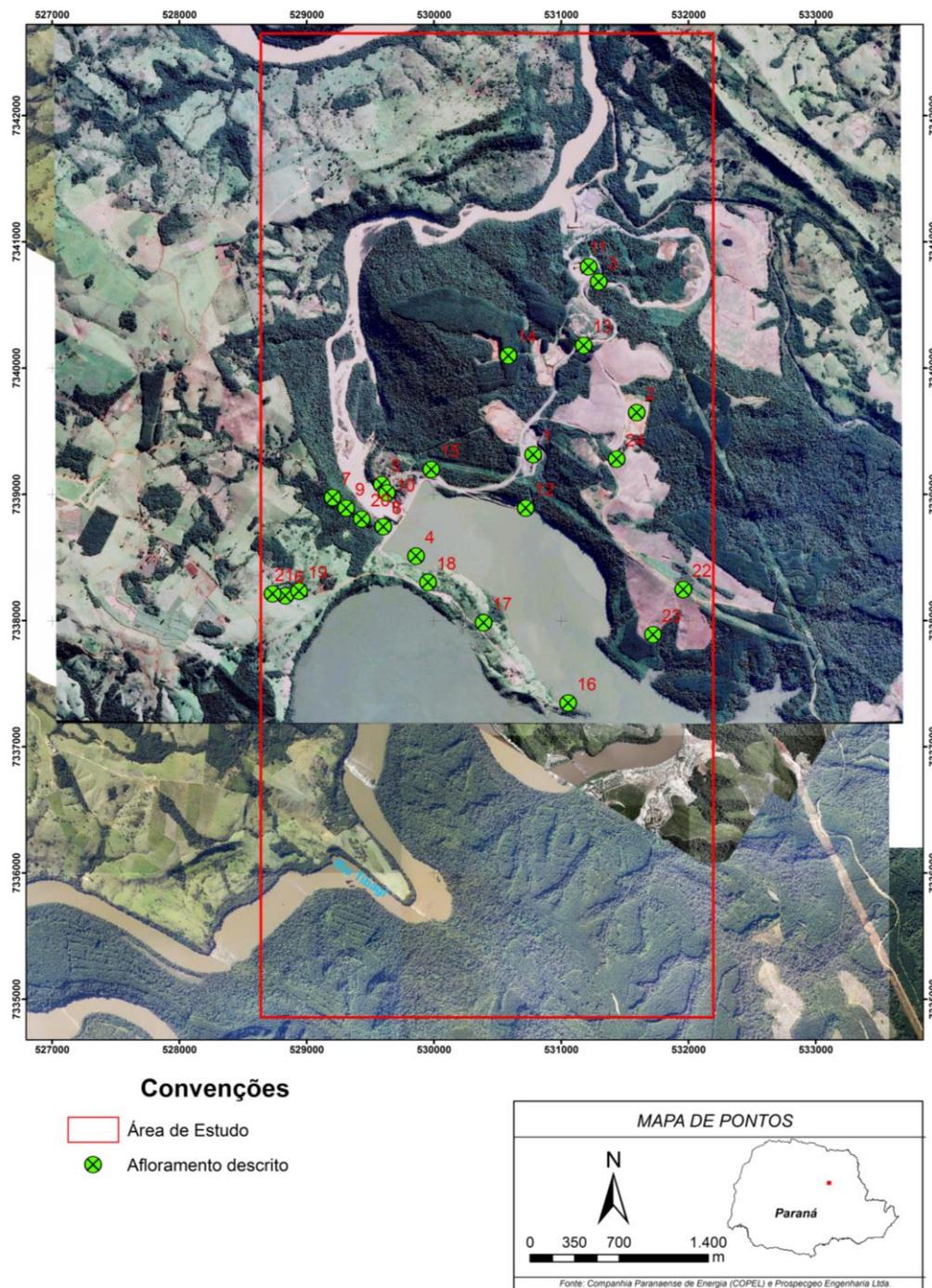


Figura 02: Mapa de localização dos afloramentos descritos no entorno da Barragem sobreposto em imagem do Google Earth 2014 e ortofotos 2011.

2.3 TRATAMENTO DE DADOS DE CAMPO

As informações adquiridas em campo foram organizadas e armazenadas em planilhas eletrônicas (Tabela 01), em campos específicos como número do

2.4 GEOPROCESSAMENTO

2.4.1 Análise de lineamentos em imagens de satélite e fotos aéreas

O traçado de lineamentos morfoestruturais foi executado por meio de imagens de satélite e fotos aéreas com a finalidade de identificar e delimitar feições rúpteis que compartimentam o substrato rochoso e podem influenciar no comportamento geomecânico da fundação.

Para o reconhecimento do sistema de fraturas no relevo, foi realizada a interpretação geológico-estrutural por meio de imagens de satélite Landsat 7 ETM+ de resolução de 30 metros em escala regional (1:100.000). Na região de Telêmaco Borba e área de entorno utilizou-se a cena 221/077 e 222/07, com combinação RGB 854 que propiciou o realce das estruturas de relevo, perante a vegetação local (Figura 03). As imagens foram obtidas no sítio eletrônico do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e foram tratadas e interpretadas no software ArcGis Map 10.1.

A análise destas imagens permitiu identificar as grandes estruturas regionais presentes na área e possíveis relações espaciais e temporais entre as descontinuidades que segmentam o relevo.

Para as interpretações dos lineamentos de relevo, foram traçados os lineamentos positivos e negativos, que correspondem respectivamente aos alinhamentos das cristas e vales.

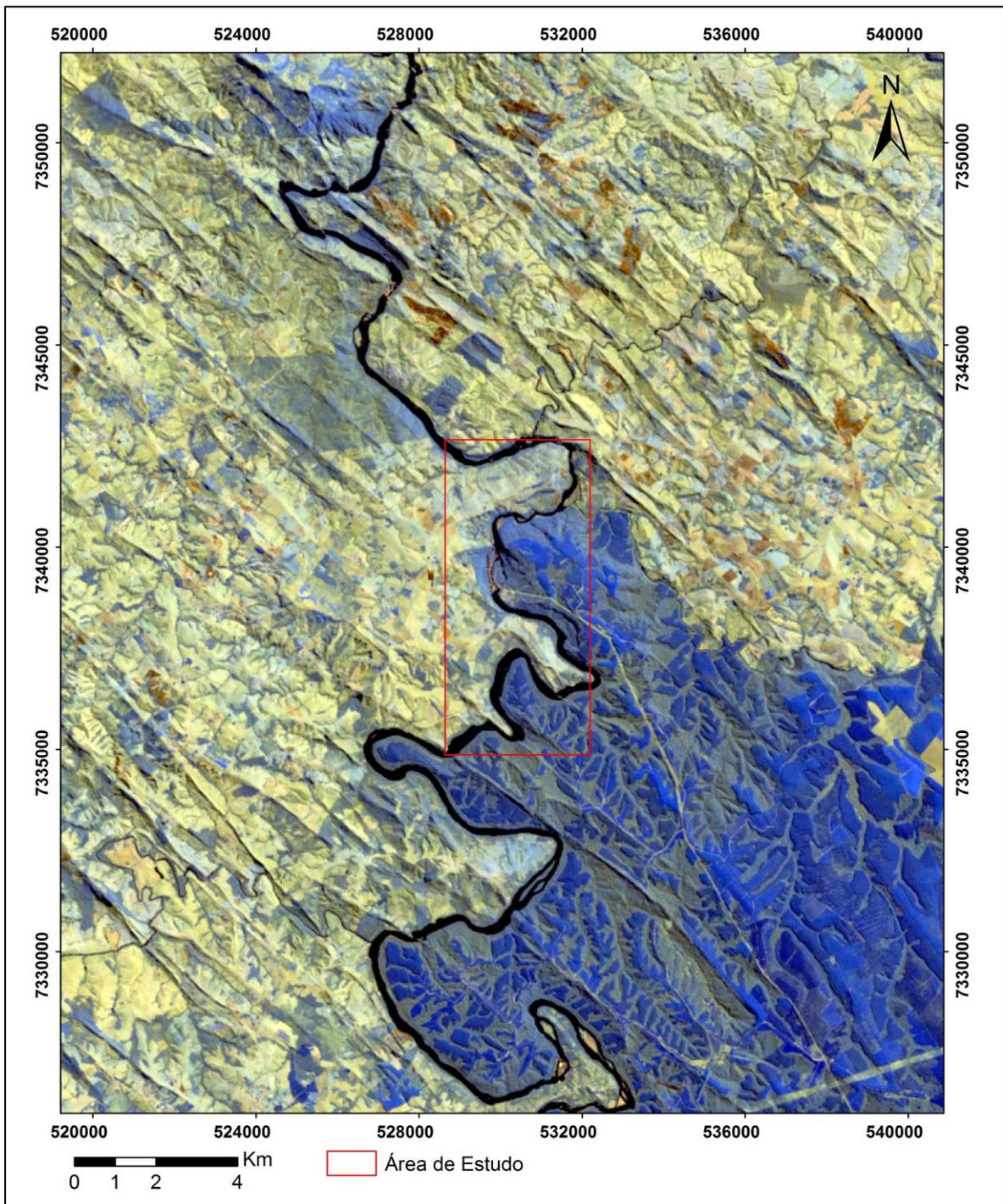


Figura 03: Imagem de satélite Landsat 7 ETM+, cena 221/077 e 222/077, combinação falsa cor RGB (8,5,4) e em vermelho localização da área de estudo.

Na interpretação fotogeológica foram utilizadas fotos aéreas na escala 1:25.000, ano de obtenção de 1980, do acervo da MINEROPAR. O método de fotointerpretação permitiu a visualização e distinção de elementos texturais do relevo em escala de maior detalhe. Nesta interpretação foram delineadas drenagens, lineações e alinhamentos no relevo que se referem a cristas e vales

alinhados em uma mesma direção, além de quebras no relevo (positivas e negativas) das morfoestruturas, que podem ter um significado geológico, indicando a existência de descontinuidades em subsuperfície. O mosaico de composição das fotos aéreas na área é indicado na Figura 04.

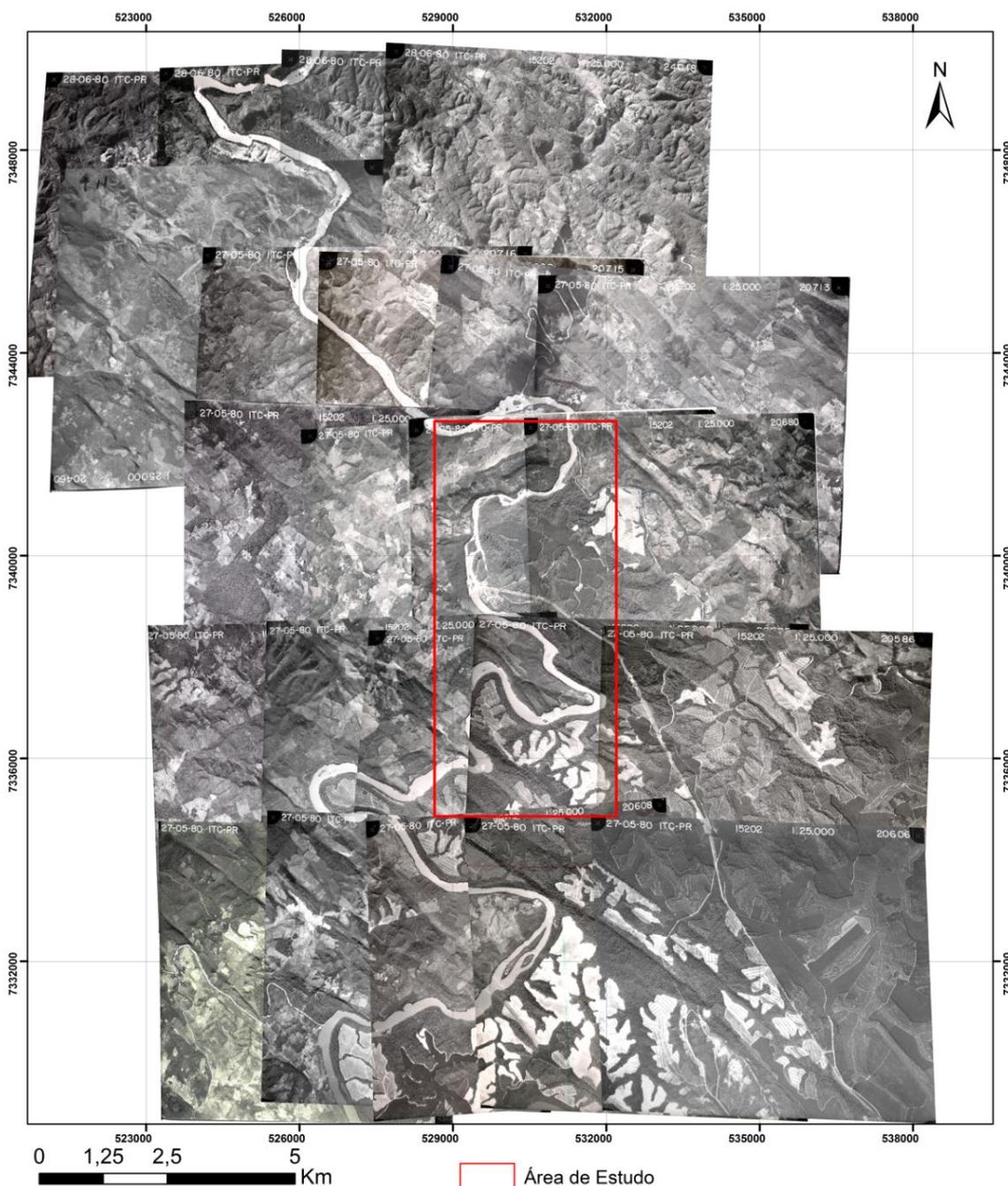


Figura 04: Mosaico das fotografias aéreas, escala 1: 25.000. Fonte: MINEROPAR, 2006.

Para a determinação das principais direções das lineações de relevo, tanto nas imagens de satélite quanto nas fotos aéreas, utilizou-se a ferramenta

AzimuthFinder (QUEIROZ et al., 2012) que permitiu a identificação das principais direções das lineações. A partir destes dados, foi gerado o diagrama de rosetas, no programa Stereo 32.

2.4.2 Modelo Digital de Imagens

Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma representação tridimensional da topografia baseada em conjuntos de coordenadas X, Y e Z, onde as coordenadas Z representam valores da altitude.

Para elaboração do MDE foram obtidas cartas topográficas no Instituto de Terras, Cartografia e Geociências (ITCG), cartas de Ortigueira (Folha SG.22-X-A-I-1, articulação MI-2806/1) e Lagoa (Folha SG.22-X-A-I-2, articulação MI-2806/2), ambas na escala 1: 50.000.

A partir das cartas topográficas as curvas de nível foram digitalizadas, com espaçamento de 5m o que permitiu que, com ferramentas de geoprocessamento no software ArcGis Map 10.1 (Copyright © 2012, ESRI), tenha sido gerado o MDE. Em complemento a esse procedimento, no *software* Surfer 9.0 (Copyright © 1993-2002, Golden Software, Inc.) foi elaborado um modelo digital para visualização geral do relevo em 3D.

2.4.3 Declividade

A geração do mapa de declividade, medida em porcentagem, para a área de estudo foi realizada com o uso da ferramenta *spatial analyst* em ambiente SIG no software ArcGis Map 10.1 (Copyright © 2012, ESRI), com os mesmos dados utilizados para a geração do Modelo Digital de Elevação.

2.5 ANÁLISE ESTRUTURAL

A caracterização geológico-estrutural da área de estudo foi realizada seguindo os conceitos e princípios básicos da geologia estrutural por meio da análise geométrica, cinemática e dinâmica das feições estruturais observadas em campo e correlação com as feições morfoestruturais delimitadas em imagens de

satélites e fotos aéreas.

A análise geométrica se detém na descrição da forma, orientação geográfica, tamanho e relações geométricas entre as estruturas e suas associações em diferentes escalas. A caracterização cinemática em conjunto com a descrição geométrica possibilita a determinação de movimento e deformação ocasionados nas rochas. A análise dinâmica auxilia no estudo da paleotensão que causaram o movimento das estruturas geológicas (FOSSÉN, 2012).

A relação entre o conjunto citado faz-se importante para o presente estudo, pois contribui com a interpretação e caracterização das propriedades do maciço rochoso e auxilia na comparação com modelos e critérios de fraturamento como o de Mohr-Coulomb para identificação dos valores máximos e mínimos dos tensores necessários para a ruptura de um material, assim como sua indicação no espaço, associado ao clássico modelo de falhas de Anderson (1951) e o critério de Riedel (1929) por meio de fraturas subsidiárias conforme seu arranjo geométrico e as superfícies de fraturas geradas como as R, R' P T e Y exemplificado na Figura 05.

A identificação de planos de fraqueza e superfícies abertas (tracionais) no maciço rochoso auxilia na determinação da estabilidade e estanqueidade da fundação, a qual está submetida a novos esforços provenientes da implantação da barragem e reservatório.

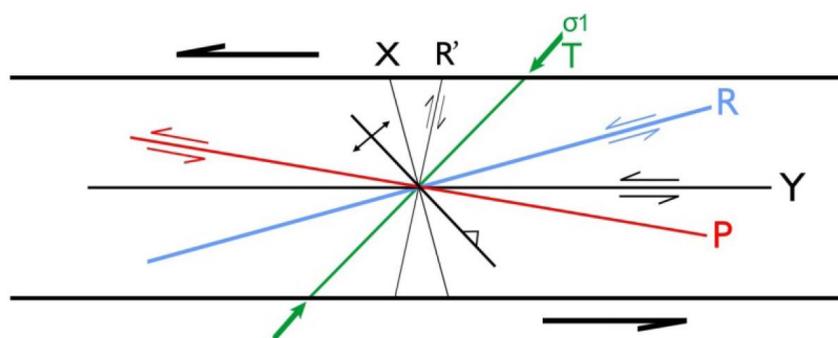


Figura 05: Modelo Riedel das fraturas teóricas sob cisalhamento simples.

2.6 MODELAGEM GEOMECÂNICA

A modelagem geomecânica do maciço rochoso tem finalidade de auxiliar na identificação de condicionantes geológico-geotécnicos que possam interferir de alguma forma na estabilidade da estrutura civil. Além da possibilidade de ressaltar

regiões suscetíveis a recalques diferenciais ou riscos geológicos na fundação.

A modelagem foi realizada no *software* Voxler 3 que permite a visualização tridimensional e renderização de volumes de dados geológicos de superfície e subsuperfície. O programa permite introduzir informações qualitativas pontuais de sondagens e obter valores intermediários para locais não amostrados por meio de interpolação matemática.

Para auxiliar na interpretação dos dados foi necessário criar o MDE do local de barramento a partir dos dados altimétricos cedidos pela concessionária (COPEL), cujas curvas de nível, em formato *dwg*, foram transformadas em pontos XYZ no *software* Dxf2xyz 2.0 e posteriormente interpolados no *software* Surfer 9.0 pelo método geostatístico de krigagem e salvo como arquivo *grid*.

Em paralelo à etapa de campo foi realizado o processamento dos parâmetros geotécnicos de alteração, fraturamento, consistência e RQD no *software* de modelagem Voxler 3.0. Inicialmente foram plotados os furos de sondagens com tais parâmetros geomecânicos das rochas sobreposto a um modelo digital de elevação (MDE), conforme Figura 06 e Figura 07.

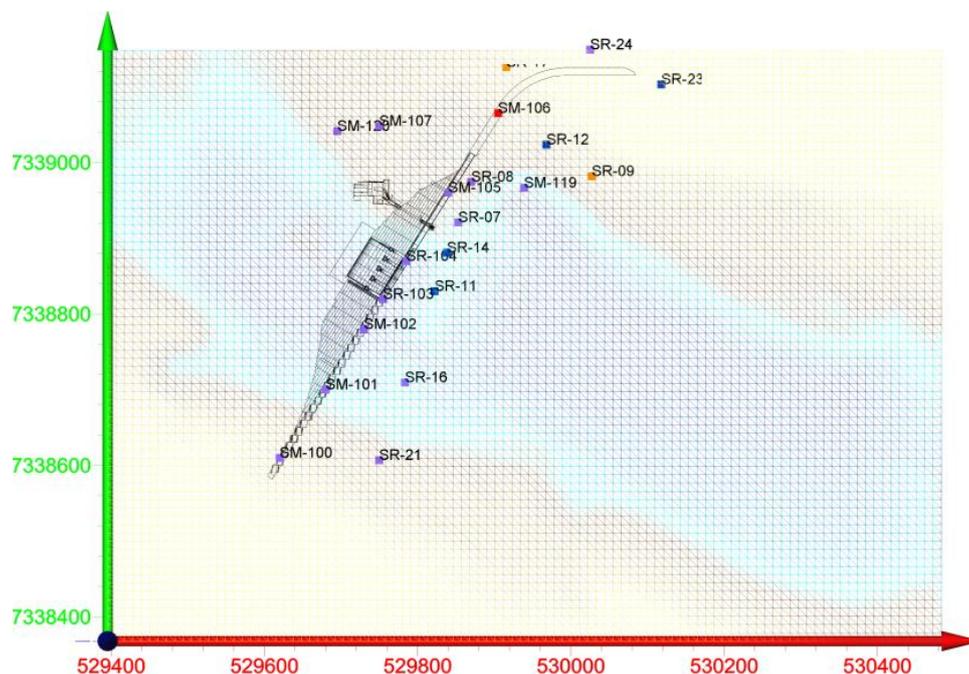


Figura 06: Visão em planta da barragem com a alocação dos furos de sondagem. O norte é indicado pela seta verde.

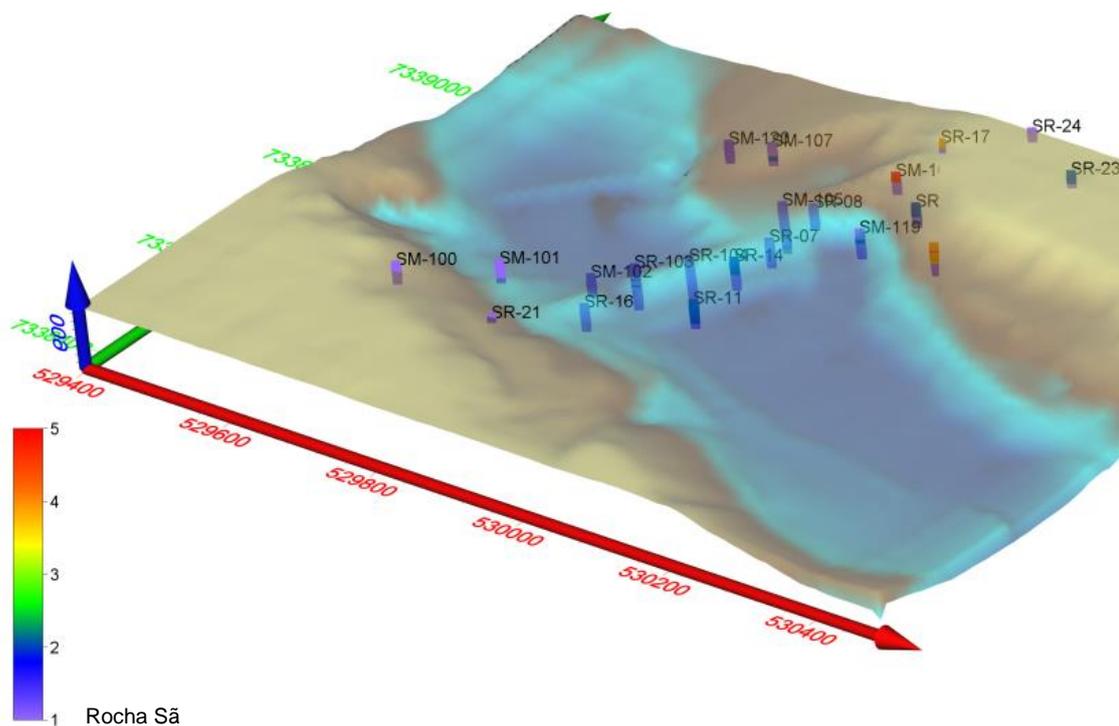


Figura 07: Vista lateral do Modelo Digital de Elevação com sobreposição dos furos de sondagens com a indicação dos parâmetros de alteração.

Os parâmetros geotécnicos de alteração, fraturamento, consistência e RQD (Tabela 2 a Tabela 5 respectivamente) foram compilados dos boletins de sondagens, que seguem a classificação de maciços rochosos da ABGE (1983). As informações foram armazenadas em um banco de dados em planilha Excel. Para cada boletim de sondagem, foi estimada a cota que atualmente representa o contato entre o Concreto Compactado a Rolo (CCR) e a rocha, tendo sido esse valor subtraído da classificação. Para esta análise, foram selecionados 22 furos de sondagem, dos quais 07 encontram-se em locais em que foi preciso estimar este contato em função do posicionamento da barragem em planta.

As classes variam de 1 a 5, sendo os menores valores (1) para rocha sã, pouco alterada, muito consistente e RQD muito ruim e os valores máximos (5) correspondem a parâmetros geotécnicos de alto fraturamento, rocha muito alterada, sem consistência e RQD (*Rock Quality Designation*) excelente.

A escala de classificação de RQD é inversa das demais, pois é feita em porcentagem de recuperação de testemunho, de rocha sã, pouco alterada ou alterada dura, com fragmentos maiores ou iguais a 10 cm, dividido pelo comprimento total do trecho de manobra da sondagem, onde 1 corresponde a

24% e 5 a 100 % de recuperação de testemunho de sondagem.

Tabela 2: Características da classificação do grau de decomposição da rocha. Fonte: ABGE 1983.

Grau	Denominação	Características
D1	Rocha sã	A rocha apresenta seus minerais constituintes sem decomposição. Eventualmente apresenta juntas oxidadas.
D2	Rocha pouco decomposta	A rocha apresenta decomposição incipiente em sua matriz e ao longo dos planos de fraturas.
D3	Rocha medianamente decomposta	A rocha apresenta cerca de 1/3 de sua matriz decomposta. A decomposição ao longo das fraturas é acentuada.
D4	Rocha muito decomposta	A rocha apresenta cerca de 2/3 de sua matriz ou de seus minerais totalmente decompostos. Todas as fraturas estão decompostas.
D5	Rocha extremamente decomposta	A rocha apresenta todo o seu corpo totalmente decomposto.

Tabela 3: Quadro resumo das características e valores do grau de fraturamento. Fonte: ABGE 1983.

Grau de fraturamento	Classificação	Nº de fraturas/m	Espaçamento (m)
F1	Ocasionalmente Fraturada	0,3 a 1,0	3,00 a 1,00
F2	Pouco fraturada	< 1,0	>1,0
F3	Medianamente fraturada	6 a 10	0,16 a 0,10
F4	Muito fraturada	11 a 20	0,09 a 0,05
F5	extremamente fraturada	>20	< 0,05

Tabela 4: Resumo das características e valores do grau de consistência.

Grau de decomposição	Classificação	Características
C1	Muito consistente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo: os fragmentos possuem bordas cortantes que resistem o corte por lâmina de aço, superfície dificilmente riscada por lâmina de aço.
C2	Consistente	Quebra com relativa dificuldade ao golpe de martelo: Os fragmentos possuem bordas cortantes que podem ser cortadas por lâminas de aço; superfície riscável por lâmina de aço.
C3	Medianamente consistente	Quebra com facilidade ao golpe de martelo: as bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos; a lâmina de aço provoca sulco acentuado na superfície do fragmento.
C4	pouco consistente	Esfarela ao golpe do martelo: desagrega sob pressão dos dedos
C5	inconsistente ou friável	Esfarela facilmente sob pressão dos dedos e dissolve completamente quando agitado na água .

Tabela 5: Quadro resumo das características e valores da qualidade da rocha.

Qualidade da rocha		
Grau	Classificação excelente	RQD (%)
5	Excelente	90-100
4	Boa	75-89
3	Regular	50-74
2	Pobre	25-49
1	Muito pobre	0-24

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, pretende-se inicialmente expor o contexto geológico/geotectônico regional, baseado, sobretudo, em informações bibliográficas disponíveis.

3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO-REGIONAL – BACIA DO PARANÁ

A Bacia do Paraná é uma ampla bacia intracratônica e apresenta registro sedimentar-magmático com idades entre o Ordoviciano Superior e o Cretáceo Superior. A bacia apresenta área de aproximadamente 1,5 milhão de km², com forma ovalada de eixo maior N-S e configuração atual definida por limites erosivos relacionados a eventos geotectônicos meso-cenozoicos. Compreende a porção meridional do território brasileiro, se estendendo ao nordeste da Argentina, oriente do Paraguai e norte do Uruguai (MILANI *et al.* 2007) como apresenta a Figura 08.

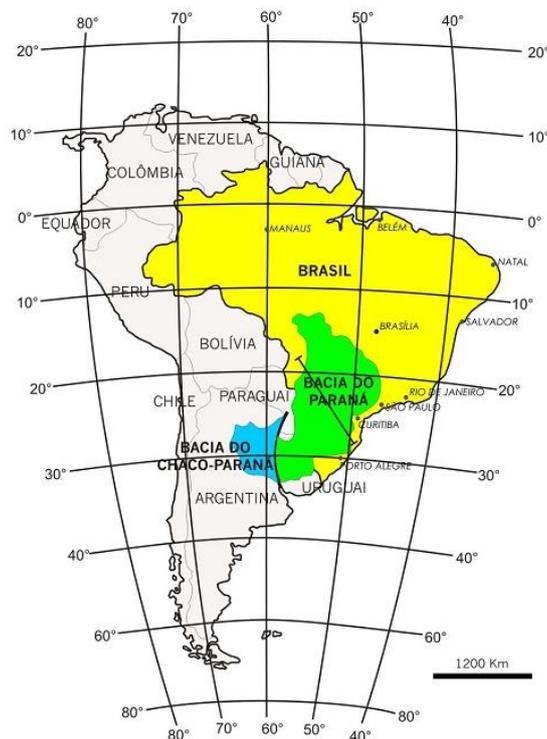


Figura 08: localização da Bacia do Paraná no continente Sul-Americano. Fonte: Zalán *et al.* (1990).

A Bacia do Paraná apresenta de até 7.000 m de espessura de sedimentos acumulados durante a história geológica ao longo do Fanerozoico. Até o final do Paleozoico, a sedimentação teve influência marinha, representada

por ciclos transgressivo-regressivos ligados à oscilação do nível relativo do mar no Paleozoico, já a partir do Mesozoico seu registro é composto por unidades continentais e rochas ígneas associadas.

O arcabouço estratigráfico na Bacia do Paraná foi dividido por Milani (1997) em seis Supersequências: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurrásico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo), que segundo a classificação de Vail *et al.* (1977) correspondem a unidades de ampla escala limitadas por discordâncias inter-regionais.

A Bacia do Paraná se desenvolveu na porção sul do paleocontinente Gondwana sob um substrato composto por vários núcleos cratônicos bordejados por diversas faixas móveis. Segundo Zalán *et al.* (1990) a subsidência inicial foi resultante da contração térmica gerada pelos fenômenos tectono-magmáticos finais do Ciclo Brasileiro, que teriam auxiliado na implantação da bacia. Já para Fulfaro *et al.* (1982) um conjunto de calhas aulacógenas orientadas segundo a direção NW-SE teriam sido precursores da sedimentação. Por fim, Milani (1997), relaciona os ciclos de subsidência e criação de espaço na bacia com os eventos orogênicos atuantes no sul do Gondwana, em que a implantação da bacia se deu segundo *trend* preferencial NE-SW do substrato pré-cambriano.

3.2 ARCABOUÇO ESTRUTURAL DA BACIA DO PARANÁ

O arcabouço estrutural da Bacia do Paraná é influenciado por elementos tectônicos lineares, com 3 direções principais NE-SW, NW-SE e E-W. As principais estruturas têm orientação NE-SW e NW-SE, que podem constituir simples falhas ou extensas zonas de falhas com centenas de quilômetros de comprimento e poucas dezenas de quilômetros de largura.

Segundo Zalán *et al.*, 1990, a maior parte da evolução estratigráfica estrutural da Bacia do Paraná se deu por influência de *trends* herdados do embasamento. Os lineamentos NE-SW presentes na bacia tem origem nos eventos do ciclo brasileiro. As feições NW-SE são associadas a eventos mais antigos ou correlatos aos lineamentos NE, com intensa reativação no Mesozoico. Por fim, as estruturas E-W tiveram seu desenvolvimento a partir do Triássico,

Piquiri e Guapiara. Os lineamentos São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo delimitam a charneira do arco a nordeste e a sudoeste, respectivamente. O lineamento Guapiara constitui o limite norte do arco, já o lineamento Piquiri delimita a porção sul do arco.

O Arco de Ponta Grossa, segundo Zalán *et al.* (1987), foi gerado a partir de descontinuidades alinhadas segundo NW-SE no embasamento, com indícios de transcorrência de direção NW-SE na Bacia do Paraná, com algumas delas de cinemática dextral, concomitantes aos diques de diabásio (STRUGALE, 2003, 2007).

Outra feição importante que influencia a estruturação das rochas aflorantes no local de estudo é a Zona de Falha de Jacutinga, que segundo Soares (1991), corresponde a uma falha do embasamento pré-cambriano/eopaleozoico na Bacia do Paraná. É a mais importante estrutura de direção NE da bacia, que se estende desde a região de Misiones, na Argentina, até o sul de Minas Gerais, passando pelo município de Anhembí (SP) (Soares, 1996). Tal estrutura separa terrenos do Maciço de Guaxupé e a Faixa Brasília, a norte, das rochas proterozoicas das faixas Ribeira (Apiaí/São Roque) e Dom Feliciano, a sul (CORDANI *et al.*, 1984).

Rostirolla *et al.* (2000), registraram 2 eventos deformacionais em rochas com reativações da zona de Falha Jacutinga. O primeiro evento foi transpressivo com cinemática NE-SW sinistral, interpretado como resultado da orogenia La Ventana, na passagem Permiano-Triássico. O segundo evento de deformação, transcorrente, distensivo dextral ao longo das falhas NE-SW, ocorreu durante e/ou após o magmatismo Serra Geral no Mesozoico.

3.3 ESTRATIGRAFIA REGIONAL DA ÁREA DE ESTUDO

Em relação à estratigrafia da área em estudo, esta é representada pela Supersequência Gondwana I e compreende as rochas paleozoicas da Formação Palermo do Grupo Guatá; Formação Irati e Serra Alta do Grupo Passa Dois, além da Supersequência Gondwana III, representada pelas rochas intrusivas básicas mesozoicas (Província Magmática ou Formação Serra Geral), Figura 10.

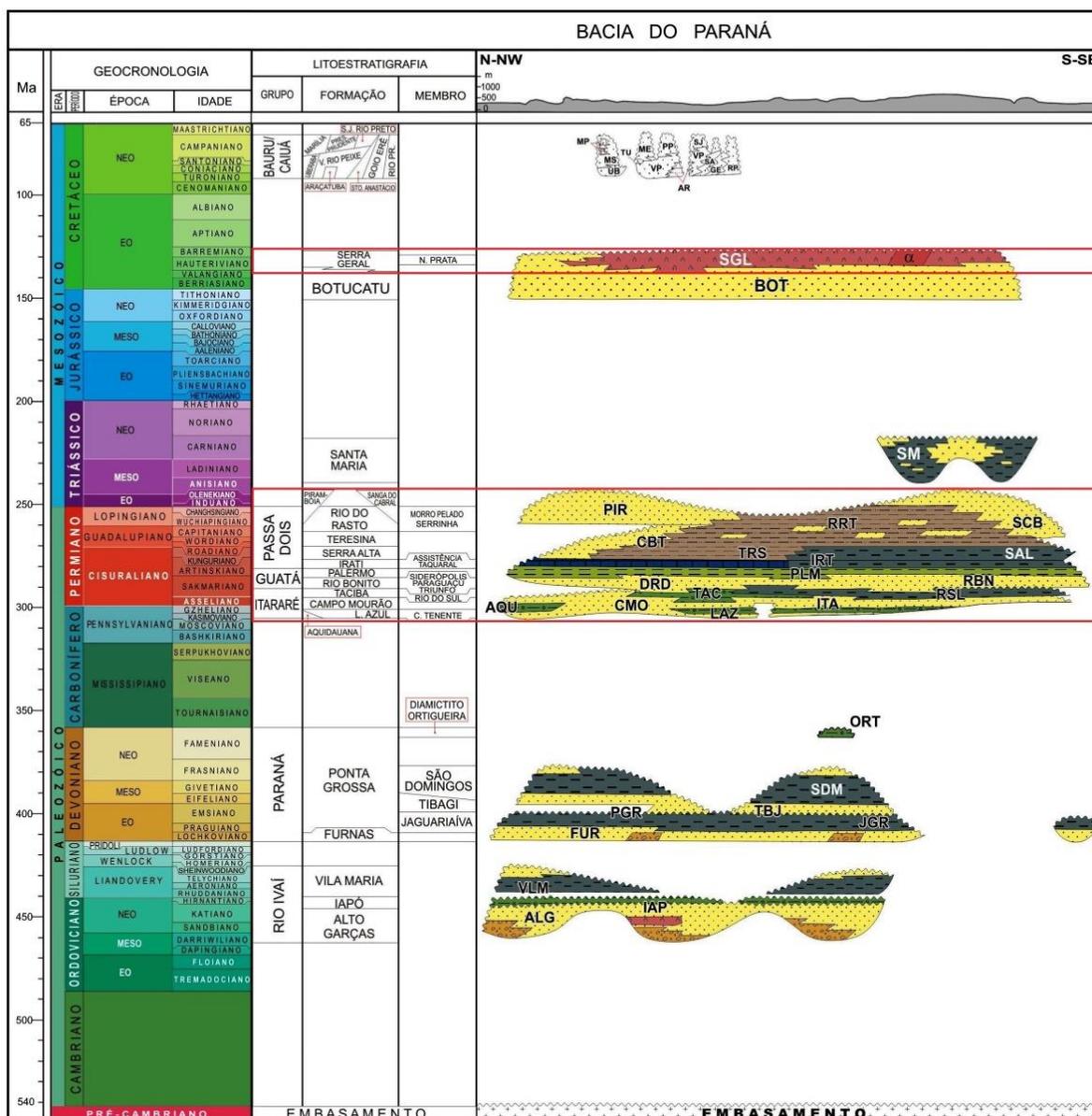


Figura 10: Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná com a delimitação dos grupos geológicos que abrangem a área de estudo. Modificado de Milani *et al.* (2007).

A Supersequência Gondwana I corresponde à sedimentação que sucedeu ao ápice das condições glaciais registradas na bacia e compõem um grande ciclo transgressivo-regressivo. Tal sequência foi influenciada por eventos tectono-sedimentares associados ao ciclo Gondwânico representado por duas orogenias, Chanica e San Rafaélica (RAMOS *et al.*, 1986).

A sedimentação regional no período Itararé apresenta uma distribuição em onlap de norte para sul. No Eopermiano com o rearranjo da geometria da bacia, o sentido de sedimentação se inverte, com distribuição em *onlap* de sul para norte.

O Permo-Carbonífero da Bacia do Paraná é marcado pela transição entre depósitos fortemente influenciados pela glaciação Gondwânica do Grupo Itararé e os sedimentos pós-glaciais que se sobrepõem a essa unidade, reunidos no Grupo Guatá, subdivido nas Formações Rio Bonito e Palermo (Perinotto e Fulfaro 2001)

3.3.1 Grupo Guatá

O Grupo Guatá foi formalizado pela primeira vez por Gordon Jr. (1947), engloba as Formações Rio Bonito e Palermo. Trata-se da segunda unidade estratigráfica da Supersequência Gondwana I, que representa uma “transgressão Permiana” segundo Lavina e Lopes (1987), com deposição de sedimentos pós glaciogênicos em ambiente costeiro deltaico e plataformar na Bacia do Paraná, (MILANI *et al.* 2007).

3.3.1.1 Formação Palermo

A Formação Palermo foi designada pela primeira vez por White (1908) no município de Lauro Mueller em Santa Catarina. O pacote rochoso desta formação abrange praticamente toda a bacia, se estendendo da cidade de Goiás, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. No estado de São Paulo a Formação Palermo corresponde às rochas aflorantes denominadas por Washburne (1930) de Formação Tatuí.

Segundo Schneider *et al.* (1974), a Formação Palermo representa um ambiente marinho transgressivo de águas rasas, constituída por siltitos e siltitos arenosos de cores cinza esverdeado ou amarelo, quando alterado. No estado do Paraná desenvolvem-se arenitos finos e arenitos conglomeráticos no estado de São Paulo. Os sedimentos da Formação Palermo apresentam-se em geral, bioturbados, com laminações cruzadas de pequeno porte, com aporte sedimentar médio de 90 metros.

Aborange e Lopes (1986) descrevem na borda leste do Paraná a unidade basal da Formação Palermo composta predominantemente por uma interlaminação de silte e areia fina a muito fina, com laminação ondulada, *wavy*, *linsen*, e localmente *flaser*, formando, assim um conjunto de intercalações de

leitos e lentes de arenito fino a médio, ortoquartzítico, com marcas onduladas. No pacote sedimentar ocorrem estratificações do tipo *hummocky*, incipientes estruturas plano-paralelas, e pequenas lentes de conglomerados de grânulos com abundante cimento carbonático. A porção basal grada tanto lateralmente como verticalmente para siltitos arenosos, com raras lentes e leitos arenosos.

Perinotto e Gama Junior (1992) por meio de análise de testemunhos e afloramentos definiram para a Formação Palermo uma parasequência retrogradacional composta por níveis lamíticos bioturbados ou não, sobrepostos à fácies progradantes (pelitos e barras arenosas). Há também fácies caracterizadas como inframaré (*sand waves*) sobreposto a jazidas de carvão e/ou lamitos carbonosos (contato Formação Rio Bonito/ Palermo).

O conteúdo fossilífero da Formação Palermo segundo Schneider et al. (1974) é composto por troncos silicificados de *Dadoxylon sp* e *palinomorfos*.

A porção superior da Formação Palermo mais o membro Taquaral da Formação Irati representam a culminação da ingressão marinha na Bacia do Paraná ao final do Permiano

3.3.2 Grupo Passa Dois

O Grupo Passa Dois compreende as Formações Irati, Serra Alta, Teresina, Rio do Rasto. O Grupo Passa Dois representa a última conexão marinha da bacia do Paraná, representando o fechamento da Bacia composta por sedimentos pelíticos marinhos na base e psamíticos continentais no topo da sequência sedimentar. O contato com o Grupo Guatá é concordante através das Formações Irati/Palermo (Aborrage e Lopes 1986).

3.3.2.1 Formação Irati

A Formação Irati, segundo Schneider et al. (1974), ocorre em toda a bacia do Paraná, sendo dividida em dois membros: Taquaral (base) Assistência (topo). Os litotipos representantes desta formação são folhelhos e argilitos cinza escuro, folhelhos pirobetuminosos e calcários bastante silicificados. Nos folhelhos são encontrados exemplares bem preservados da paleofauna da época como os

fósseis de répteis marinhos de *Mesosaurus* e *Stereosternum*.

A sedimentação Irati apresenta significado singular na evolução Bacia do Paraná, em que ocorre uma restrição à circulação de águas entre a sinéclise e o oceano Panthalasa, ocasionando, assim, um contexto de ambiente hipersalino no interior da bacia (Milani et al., 2007). Tal ambiente propiciou a deposição de evaporitos, folhelhos, folhelhos betuminosos e carbonatos.

O Membro Taquaral, segundo Schneider et al. (1974), representa a porção basal da Formação Irati. É composto por argilitos, folhelhos cinza escuro a cinza claro e siltitos cinza. O ambiente de deposição é admitido como marinho de águas rasas, abaixo do nível de ação das ondas. Os fósseis mais frequentemente encontrados são restos de peixes, crustáceos, do gênero *Clarkecaris* e da flora *Dadoxylon*.

O Membro Assistência, parte superior da Formação Irati, compreende em seu pacote sedimentar, segundo Schneider et al. (1974), folhelhos cinza escuros, folhelhos pretos pirobetuminosos associados a calcários assentados concordantemente com o membro inferior. As estruturas predominantes na Formação Irati consistem em laminação plano-paralela e intercalação rítmica em seções que intercalam folhelhos com calcários. Nos leitos carbonáticos as estruturas mais comuns são marcas de ondas, cruzada, convoluta, oólitos, brechas intraformacionais e laminação algálica.

Rohn et al. (2003) por meio de análise de testemunho de sondagem obtidos pelo Projeto Borda Leste da CPRM (Aborage e Lopes, 1986) definiram 4 litofácies siliciclásticas e 5 litofácies carbonáticas para a Formação Irati. As litofácies siliciclásticas com maior predominância ao longo do furo são constituídas por folhelhos siltosos e folhelhos argilosos, rochas heterolíticas com acamamento wavy, arenitos muito finos e brechas com restos de peixes. As litofácies carbonáticas são separadas em micritos dolomíticos quase puros, micritos dolomíticos e margas intercaladas, micritos dolomíticos brechados, ritmitos de micritos dolomíticos com folhelhos carbonosos e coquinas de bivalves.

3.3.2.2 Formação Serra Alta

A Formação Serra Alta é a unidade sedimentar depositada concordantemente sobre a Formação Irati, constitui-se por uma sequência de argilitos, folhelhos e siltitos cinza escuro a preto com laminação plano-paralela, fraturamento conchoidal e intercalações de lentes e concreções calcíferas. Segundo Schneider *et al.* (1974) a deposição do Grupo Passa Dois ocorreu em ambiente marinho. Os depósitos desta formação abrangem os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e São Paulo, com espessura média de 80-90 m nos estados de Santa Catarina e Paraná.

O ambiente deposicional é marinho de águas rasas. O conteúdo fossilífero abrange restos de peixes, pelecípodes, conchostráceos e palinórfos.

3.3.3 Supersequência Gondwana III – Formação Serra Geral

A Supersequência Gondwana III de Milani (1997) é composta por depósitos de arenitos estritamente continentais da Formação Botucatu e sobreposto a esses sedimentos, as efusivas básicas da Formação Serra Geral que correspondem a um dos maiores registros de vulcanismo fissural do mundo (Milani e Ramos 1998).

Na Bacia do Paraná o evento magmático gerou espessa cobertura de lavas sobre os sedimentos, com imensa quantidade de diques cortando os sedimentos e diversos níveis de soleiras intrudidas segundo planos de estratificação.

A sequência vulcânica que constitui a Formação Serra Geral foi designada pela primeira vez por White (1908) em rochas expostas na Serra Geral, no estado de Santa Catarina. O magmatismo Serra Geral ocupa aproximadamente 1.200.000 km² se estendendo praticamente por toda a Bacia do Paraná. Segundo Peate *et al.* (1992) os litotipos da Formação Serra Geral são constituídas essencialmente por basaltos toleíticos e andesíticos com riolitos e riodacitos subordinados. O pacote magmático, de acordo com Schneider *et al.* (1974), consiste em lavas basálticas, toleíticas, de textura afanítica, coloração cinza a negra, amigdaloidal no topo dos derrames e com grande desenvolvimento

de juntas verticais e horizontais.

As principais estruturas presentes nos derrames são contatos interderrames, zonas de basalto vesicular amigdaloidal, característico de topo de derrame com preenchimento de calcita, quartzo e zeólitas, há também tratos de basalto compacto diaclasado, característico de zonas de exclusão, e níveis de base de derrame vesiculares, ou não, com fraturas paralelas ao contato (Bongiolo *et al.* 2011).

A Província Magmática do Paraná é dividida conforme composição química e mineralógica em três subgrupos de acordo com Picirillo e Melfi (1988), Subprovíncia Sul, Subprovíncia Central e Subprovíncia Norte. A Subprovíncia sul é localizada abaixo do lineamento do Rio Uruguai, a subprovíncia central localiza-se entre os lineamentos Rio Uruguai e Rio Piquiri, por fim a terceira subprovíncia a norte do lineamento Rio Piquiri. No setor Paraná Meridional predominam basaltos toleíticos, andesitos toleíticos, riocacitos e riolitos. No setor Paraná Central ocorre os termos que petrológicos do setor meridional e também basaltos toleíticos, riocacitos e riolitos com teores de TiO_2 maiores que 21%. O setor Paraná Setentrional é caracterizado pelos termos litológicos com elevados teores de TiO_2 superior a 2%. Os autores ainda determinaram os seguintes teores médios em óxidos: CaO; 8,88%, Fe_2O_3+FeO ; 16,4%, MnO; 0,20% e TiO_2 2; 2,55%; P_2O_5 ; 0,45%.

A zona de atividade magmática que deu origem à Formação Serra Geral e as intrusivas associadas teve íntima relação com a posição do hot spot Tristão da Cunha no início do Cretáceo. Segundo O'Connor e Duncan (1990) esta pluma mantélica situava-se aproximadamente no leste do estado do Paraná ou sul de São Paulo, propiciando a formação de um domo térmico e a extrusão dos magmatitos da Formação Serra Geral na América do Sul e da Província Etendeka na África. Concomitantemente, formaram-se três feixes de diques relacionados a uma junção tríplice, definida pelos feixes Arco de Ponta Grossa (NW-SE, abortado), Florianópolis (N-S) e litoral SP/RJ (NE-SW), onde estes últimos evoluíram para oceano. Milani (2007) afirma que uma série de episódios magmáticos vinculados aos campos tensoriais e fenômenos endógenos levou a desagregação do Pangea e cobertura dos depósitos sedimentares da Bacia do Paraná.

3.4 BARRAGENS

Segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (CDBD), a definição de barragem corresponde a um obstáculo artificial com capacidade de reter água ou a passagem de qualquer tipo de fluido líquido ou sólido. As finalidades de uso são variadas, e podem ser sintetizadas em: barragem de abastecimento, hidrelétrica, navegação, turismo, piscicultura, controle de enchentes e contenção de resíduos de mineração. Dentre os diversos objetivos da obra, ressaltam-se os destinados à geração de energia elétrica.

O mecanismo de funcionamento de barragens com finalidade de produção energética é relativamente simples. Há uma elevação do nível freático e converte-se a energia potencial hidráulica em energia elétrica, através da queda d'água por um conduto forçado que passa na turbina do gerador.

3.4.1 Tipos de barragens

As barragens variam conforme o material empregado na construção e seu layout. Os principais tipos descritos nessa dissertação são baseados em Costa (2012).

Barragens de terra: constituídas por material argiloso compactado e é dividida em homogênea e zonada. A primeira é constituída predominantemente de um único material, enquanto que a segunda apresenta zoneamento de materiais terrosos em função das características dos materiais e variação da permeabilidade.

Barragens de enrocamento: composta por material rochoso. Subdividida em barragens de enrocamento com núcleo impermeável no qual a vedação de água é realizada por um núcleo argiloso; e barragem de enrocamento com face impermeável em que a vedação é feita pela impermeabilização da face de montante da barragem com camada de asfalto, concreto ou chapa de aço.

Barragens de concreto: construída essencialmente com materiais granulares adicionados com cimento e aditivos. É subdividida em gravidade, gravidade aliviada, em contraforte e de concreto compactado a rolo (CCR).

Barragem de concreto-gravidade: maciças de concreto, com pouca

armação e sua estrutura trabalha apenas à compressão, podendo ser seu traçado retilíneo ou em arco.

Barragem gravidade aliviada: representada por uma estrutura mais leve, onde a barragem de gravidade é “vazada”, com objetivo de imprimir menor pressão às fundações, ou realizar a economia de concreto. Os esforços atuantes nesse tipo de obra são trativos e exigem um maior uso de armação em sua construção.

Barragens de concreto em contraforte: semelhante à gravidade aliviada, com característica de ser ainda mais leve. Devido à concentração de esforços resultantes da pressão hidrostática, ocorrem maiores tensões de contato, exigindo uma maior quantidade de armação.

Barragem de concreto rolado ou compactado (CCR): trata-se de uma barragem de concreto-gravidade em que o concreto é espalhado com trator de esteira e depois compactado. O concreto não é vibrado e sua estanqueidade é realizada por uma camada de concreto convencional construída no paramento de montante.

Barragens em Arco: barragens de concreto construídas em abóbodas ou em arco, em que a curvatura ocorre na horizontal e na vertical. Nesse tipo de obra as tensões hidrostáticas atuantes são transmitidas às ombreiras pelo efeito de arco.

A seleção do tipo de barragens segundo Cruz (2004), é influenciada por fatores como características topográficas e geológico-geotécnicas do local, clima da região, hidrologia local, disponibilidade de material natural para a construção, custo de mão-de-obra, legislação local referente a leis sociais e à segurança da obra, as condições econômicas, os fatores de preservação ambiental, os prazos e processos construtivos a ser utilizado. Os tipos de barragens mais comuns podem ser observados na Figura 11.

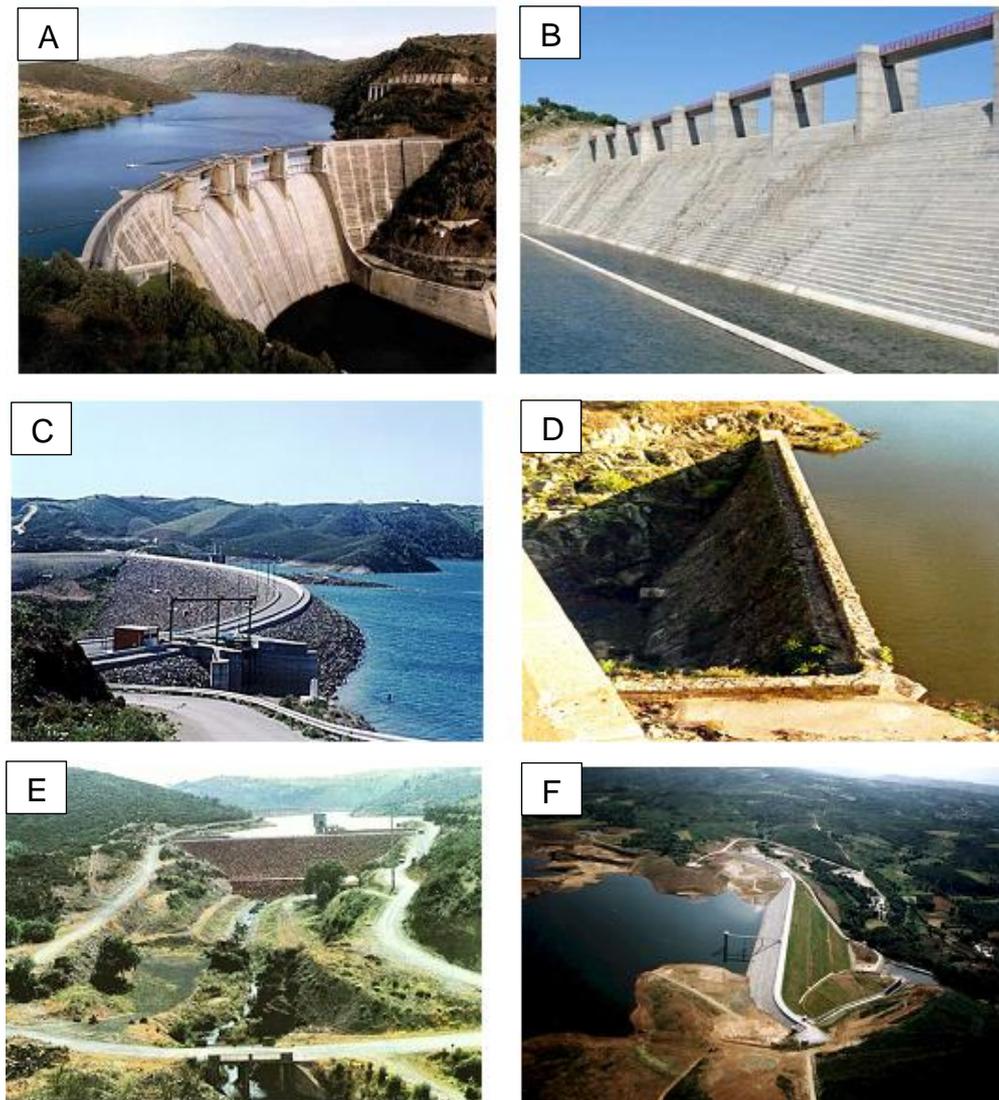


Figura 11: Tipos de barragens: a) barragem de concreto em arco; b) barragem de CCR; c) barragem de terra (aterro); d) barragem de alvenaria; e) barragem de enrocamento; f) barragem de terra zonada. Fonte: Pinto (2012).

3.4.2 UHE Mauá

No local de estudo o tipo de barramento corresponde em uma barragem de concreto compactado a rolo (CCR) com vertedouro sobre a barragem de comprimento de crista de 775 metros, altura de aproximadamente 75 metros e volume de cerca de 635000 m³ (Figura 12).



Figura 12: Vista a jusante da Barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá.

3.5 ESFORÇOS ATUANTES EM UMA BARRAGEM E MONITORAMENTO

As barragens de concreto segundo Costa (2012) e Oliveira e Brito (1998) apresentam-se mais resistentes e seguras comparadas aos demais tipos de barragens, porém requerem uma boa resposta a resistência do maciço rochoso, pois apresentam esforços compressivos em função do próprio peso da barragem distribuído ao longo de toda a fundação no sentido vertical que, conseqüentemente, deve assegurar a estabilidade da obra. Com o enchimento do reservatório surgem pressões hidrostáticas de sentido horizontal no paramento de montante da barragem e subpressões com vetor de esforço direcionado de baixo para cima em função da pressão da água que percola em fissuras e poros da rocha de fundação (Figura 13 A).

Tais esforços tendem a gerar dois mecanismos de ruptura da barragem, o tombamento e deslizamento. O primeiro ocorre como consequência do desenvolvimento de esforços de tração e aumento da subpressão a montante da barragem e compressão a jusante, caracterizado como uma tensão de torque que

gera o tombamento da estrutura. O segundo modo de ruptura, mais comum é o deslizamento, ocasionado pelos vetores horizontais dirigidos para jusante em conjunto com o aumento da subpressão na fundação resultante de maior fluxo de água no substrato, que tendem a diminuir a resistência ao cisalhamento no contato concreto/rocha ou dos planos de descontinuidades do substrato, e assim, ocasionam o deslizamento do bloco.

Segundo Costa (2012), a aplicação de cargas relacionadas ao peso da barragem e pressão hidrostática do reservatório gera um vetor resultante, que atua a partir do centro da barragem no sentido do pé a jusante e podem mobilizar tensões cisalhantes no maciço rochoso, segundo critérios de ruptura de Mohr-Coulomb em que o plano de ruptura (θ) é dado pela expressão $\theta=45^\circ - \phi/2$, e ϕ correspondem ao ângulo de atrito interno do material de fundação (Figura 13 A).

Logo as condições ideias de ruptura correspondem aquelas que os ângulos de mergulho das descontinuidades são próximos ou coincidem com a direção das tensões cisalhantes. Esta relação é apresentada na Figura 13 C, em que há influência na ruptura até 45° entre as direções de descontinuidades e a aplicação de esforços, com influencia reduzida para ângulos abaixo de 45° e nula para ângulos de 60° . Como consequência desse parâmetro, as fraturas que apresentam ângulos de mergulho entre 0 e 60° apresentam influencia na instabilidade da obra (Figura 13 B).

Oliveira e Britto (1998) afirma que descontinuidades com baixa resistência ao cisalhamento, sub-horizontais localizadas abaixo do contato concreto-rocha, podem influir na estabilidade global da barragem, pois a subpressão pode atuar nessas superfícies e não apenas na base da barragem, aumentando, assim, as pressões de água no paramento de montante e a subpressão, não limitando as pressões apenas ao corpo da barragem.

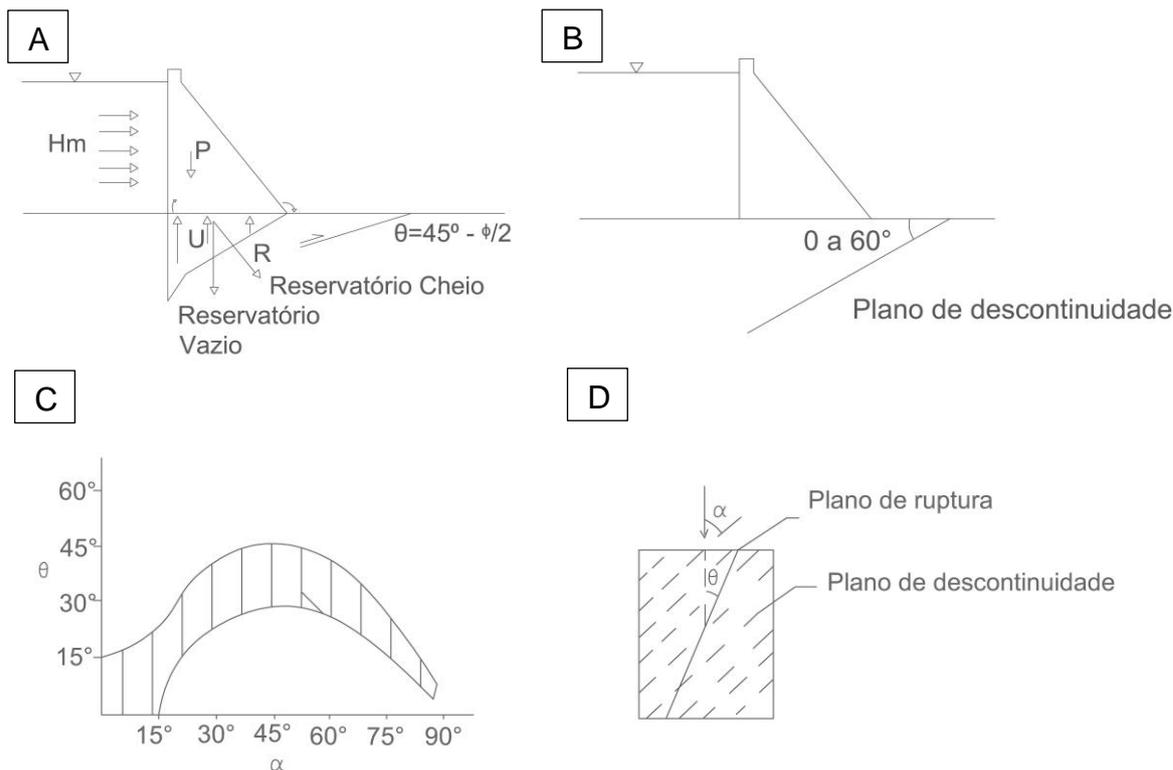


Figura 13: (A) Distribuição de cargas em uma barragem e zona de cisalhamento linear conforme formula de Mohr-Coulomb. (B) Variação no ângulo de mergulho de descontinuidades na estabilidade da obra. (C) Relação de influencia a estabilidade entre plano de ruptura e descontinuidade. (D) Bloco diagrama exemplificando a relação entre os dois parâmetros. Fonte: Costa (2012).

Para assegurar a estabilidade da obra são construídos cortinas de injeção de cimento na fundação para aumentar o caminho de percolação da água e linhas de drenos para diminuir os valores de subpressão na base da barragem. Além dos métodos convencionais de instrumentação e monitoramento como piezometria, medidores de vazão e recalques, tem-se utilizado com mais frequência métodos geodésicos por meio da instalação de marcos de superfície na crista da barragem, prismas na face jusante entre outros instrumentos para determinação de deslocamentos absolutos nos eixos X, Y e Z.

3.6 GEOLOGIA DE ENGENHARIA

Em qualquer investigação prática para um empreendimento de engenharia, o primeiro estágio consiste em uma investigação geológica e geofísica detalhada para estabelecer os litotipos e as fronteiras dos tipos de rocha envolvidos. O segundo estágio consiste em estabelecer um perfil detalhado do fraturamento e em determinar as propriedades mecânicas e petrológicas das

rochas, a partir de amostras obtidas por meio de sondagens e de escavações de exploração. O terceiro estágio aplicado, em alguns casos, consiste em medir as tensões pré-existentes na rocha não escavada. Com essas informações, deverá ser possível prever a resposta do maciço rochoso com relação à escavação ou carregamento (JAEGER e COOK, 1979).

O desenvolvimento das atividades realizadas no ramo da mecânica de rochas procede de conceitos e práticas específicas de conhecimentos geológico-estruturais associados á engenharia civil. Os principais termos e definições envolvidos nesta ciência são descritos a seguir e tem como base as definições retiradas de Fiori e Carmignani (2009) e Assis (2013).

Rocha intacta: definida como uma massa de rocha sem interrupção em sua estrutura ou presença de plano de fraqueza. Segundo Hudson e Harrison (1997), rocha intacta é o litotipo com descontinuidades não significativas como pequenas fraturas, fissuras ou vazios em escala microscópica.

Maciço rochoso: é uma massa de rocha que se apresenta compartimentada por descontinuidades, tipicamente heterogêneo e anisotrópico.

Descontinuidade: definida como feições que apresentam interferências no padrão normal de um determinado material, consideradas como planos de fraqueza que controlam o comportamento do maciço rochoso (Figura 14). Descontinuidade é um termo genérico para qualquer tipo de fraqueza que pode ocorrer na rocha tais como: juntas, falhas, acamamento, xistosidade. A presença de descontinuidades no maciço rochoso é responsável pelo controle da sua resistência ao cisalhamento e deformabilidade. Em obras civis são considerados problemas cotidianos que devem ser analisados de acordo com o tipo de obra que será realizada na região.

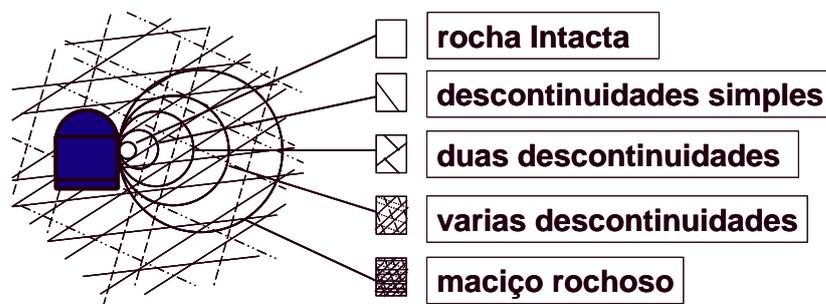


Figura 14: Modelo da compartimentação de um maciço e influência das descontinuidades na obra. Fonte: Assis (2013).

As descontinuidades são responsáveis pelo controle cinemático do maciço e é de extrema importância a caracterização dos planos preferenciais de fraqueza. Os principais parâmetros analisados para a caracterização das descontinuidades são a orientação, o espaçamento, a persistência, a rugosidade, a abertura, o preenchimento, a percolação e a resistência das paredes (COSTA, 2012). Segue as definições desses parâmetros:

- Orientação: atitude do plano de fraqueza representado pela direção do plano e mergulho.
- Rugosidade: corresponde à superfície da descontinuidade que pode apresentar diversas formas, desde lisa a muito irregular. Um exemplo pode ser observado na Figura 15. O detalhamento do tipo de rugosidade é essencial para classificar a resistência ao cisalhamento ao longo do plano e do maciço como um todo.

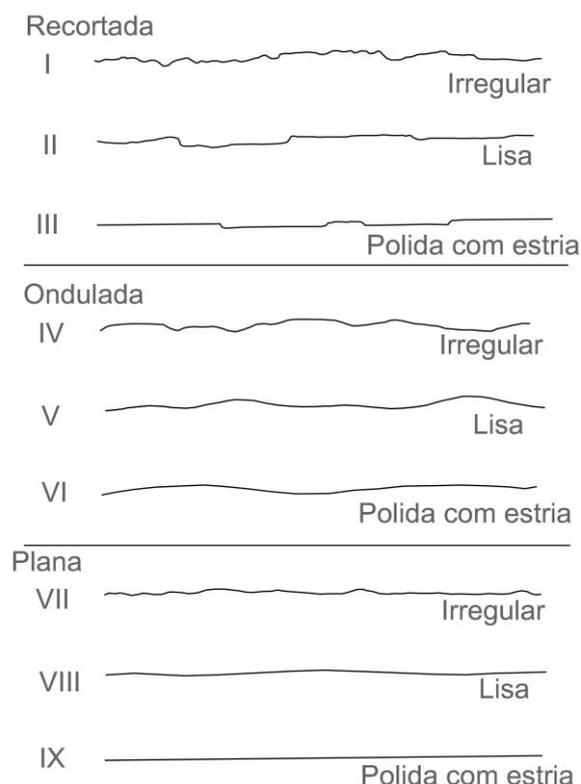


Figura 15: Padrões de rugosidades das descontinuidades (ABGE, 1983).

- Espaçamento: equivale à distância entre os planos de descontinuidades paralelos entre si. Em fraturas o conjunto de planos é denominado família, e o conjunto de família são denominados de sistema. O comportamento

geomecânico do maciço é influenciado pelo espaçamento das descontinuidades, em casos de espaçamento pequeno o maciço se comporta como um material granular.

- Persistência: refere-se à extensão da continuidade de um plano, tanto na horizontal como na vertical. A persistência de duas famílias de fraturas pode ser fundamental na determinação do grau de embricamento entre os blocos formados (Figura 16).

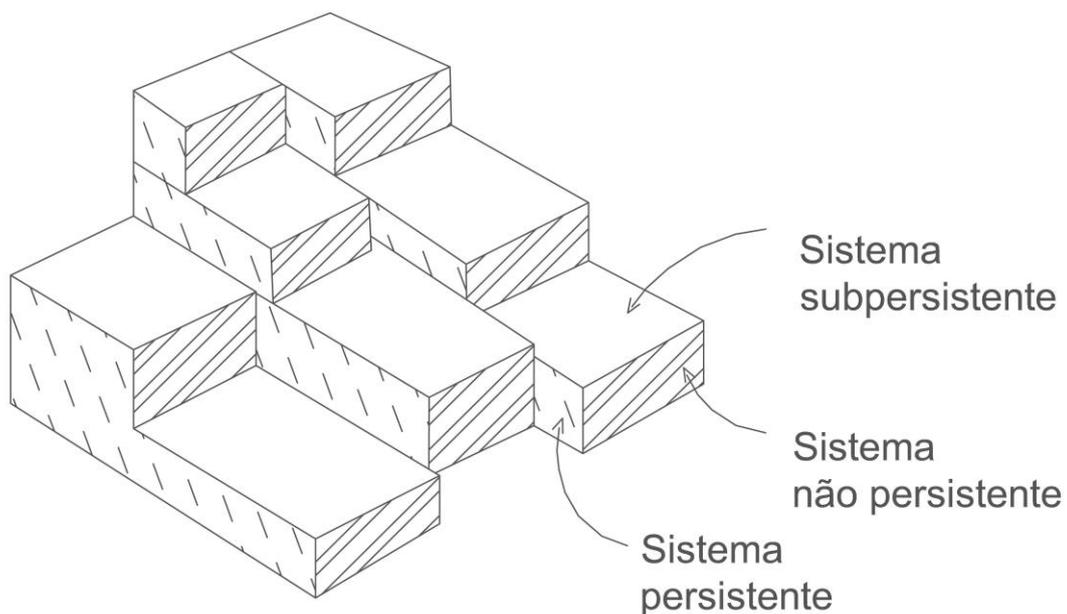


Figura 16: Modelo esquemático da classificação da persistência dos planos de fraturas, (COSTA, 2012).

- Abertura: corresponde à distância entre as paredes de uma descontinuidade, sendo considerado aberto quando o mesmo não for preenchido por nenhum material. A influência da abertura está correlacionada a estanqueidade da obra.
- Preenchimento: capacidade de uma descontinuidade aberta ser preenchida por material sedimentar ou precipitado quimicamente. O comportamento da descontinuidade poderá ser em relação à deformabilidade, estanqueidade e estabilidade.
- Percolação: refere-se à entrada de água no sistema de descontinuidades que pode variar conforme estação chuvosa ou encontro no nível freático.

A água influencia diretamente na resistência do material rochoso, diminuindo a resistência ao atrito.

- Resistência das paredes: relacionada à alteração do plano de descontinuidade causado por intemperismo, que afeta diretamente a resistência à compressão da rocha (Ver Tabela 2).

4 GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

O levantamento geológico na região da Usina hidrelétrica permitiu identificar litologias pertencentes à Formação Palermo do Grupo Guatá, Formação Irati e Serra Alta do Grupo Passa Dois e intrusivas básicas da Formação Serra Geral.

4.1 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS DA ÁREA DE ESTUDO

O arranjo das unidades geológicas na região retrata certo controle estrutural influenciada por feições lineares como zonas de falhas e diques de diabásio com direção aproximada de N40W. A diferença litotípica das unidades mapeadas confere ao relevo diferentes texturas, que podem ser observados em fotografias aéreas, sendo de maior expressão as intrusões básicas em forma de dique e soleiras

A carta estratigráfica utilizada para correlacionar os dados de campo com a bibliografia foi a de Milani *et al.* (2007). A descrição dos afloramentos e as respectivas coordenadas, em SAD 1969, estão resumidas na Tabela 06.

Tabela 06: Localização dos pontos de campo

Número do Ponto de Afl.	Coordenadas UTM X/Y		Descrição
Ponto 01 (a-h)	530.780	7.339.315	Pedreira - Diabásio
Ponto 02	531.594	7.339.648	Refeitório - Siltito/Arenito
Ponto 03 (a-c)	531.295	7.340.684	Talude de estrada - Arenito fino
Ponto 04	529.859	7.338.512	Talude a montante da barragem - Siltito
Ponto 05 (a-c)	529.590	7.339.078	Margem direita da barragem - Diabásio
Ponto 06 (PC-01)	528.832	7.338.197	Afloramento do lado esquerda da barragem a jusante - solo Diabásio
Ponto 07	529.203	7.338.976	Afloramento a jusante da Barragem lado esquerdo - Siltito
Ponto 08 (a-b)	529.601	7.338.745	Margem esquerda da barragem - Diabásio
Ponto 09 (PC-02)	529.310	7.338.891	Contato - Siltito/ Diabásio
Ponto 10 (a-b)	529.630	7.339.012	Túnel margem direita da barragem - Diabásio
Ponto 11 (a-c)	531.216	7.340.804	Túnel e exterior Câmara de carga - Arenito fino/Siltito
Ponto 12 (a-c)	530.721	7.338.891	Margem direita próximo a túnel de baixa pressão Diabásio e Siltito/folhelho
Ponto 13	531.177	7.340.180	Ponto estrada sentido casa de força Siltito/folhelho
Ponto 14 (PC-03)	530.584	7.340.100	Talude de estrada e Diabásio
Ponto 15	529.978	7.339.197	Ponto próximo a barragem, margem direita - Diabásio
Ponto 16 (PC-04)	531.054	7.337.348	Região a montante da barragem -solo de alteração de Diabásio com blocos
Ponto 17 (PC-05)	530.390	7.337.984	Talude a montante da barragem -alteração de rocha e fragmentos de Arenito fino
Ponto 18 (PC-06)	529.952	7.338.304	Talude a montante da barragem -alteração de rocha e fragmentos de Diabásio
Ponto 19	528.940	7.338.234	Talude a montante da barragem -alteração de rocha e fragmentos de Arenito fino
Ponto 20	529.432	7.338.805	Cachoeira próximo a jusante da barragem lado esquerdo - Diabásio
Ponto 21	528.732	7.338.213	Talude de estrada - dique de Diabásio intemperizado cortando o siltito
Ponto 22 (PC-07)	531.959	7.338.247	Solo de alteração de Diabásio
Ponto 23	531.721	7.337.890	afloramento no chão da estrada Siltito
Ponto 24	531.436	7.339.280	Talude de estrada - siltito alterado

A Figura 17, apresenta a geologia regional com as unidades geológicas da base para o topo e lineamentos interpretados.

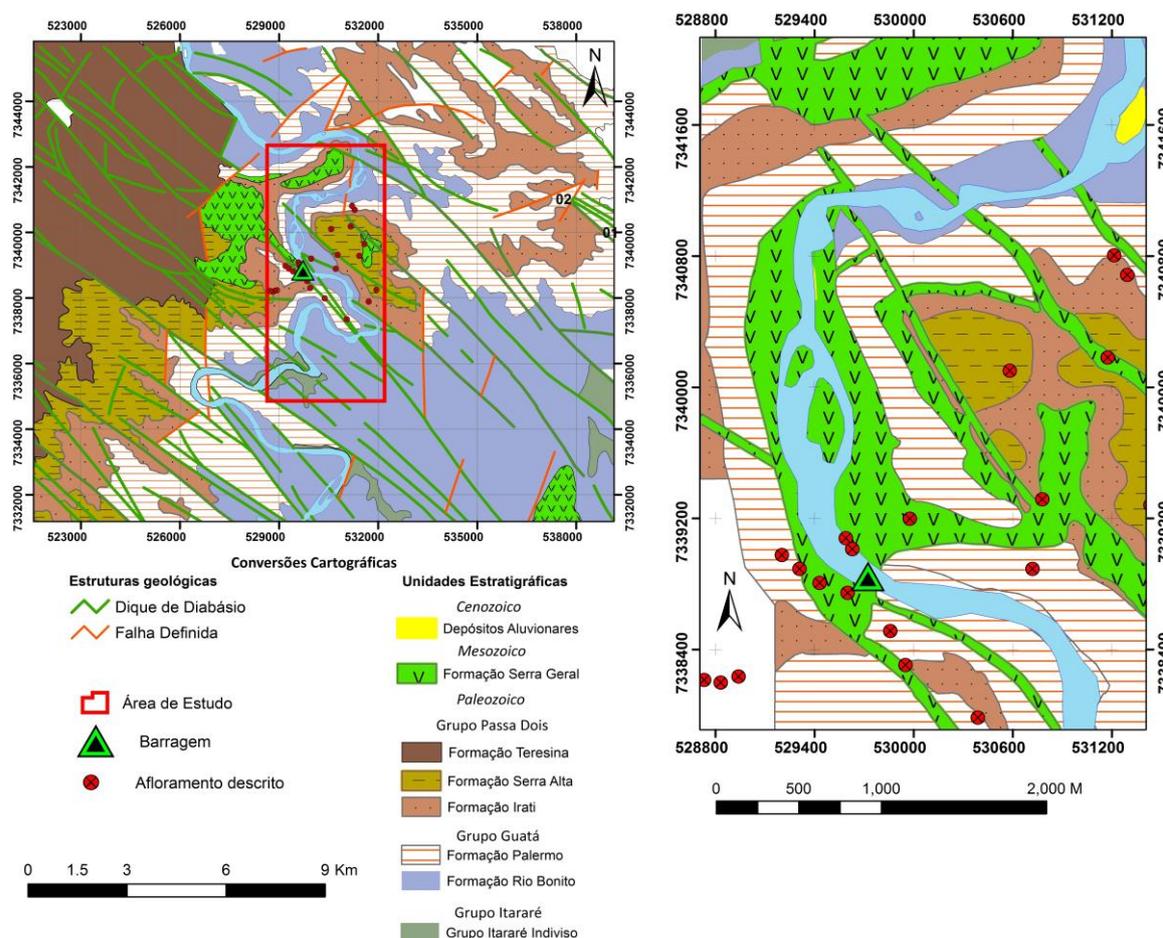


Figura 17: Mapa geológico regional (Escala 1:250.000) e local (Escala 1:25.000) do entorno da UHE Mauá. Fonte: Mineropar, 2006 e VLB Engenharia, 2007.

4.1.1 Formação Palermo

A Formação Palermo é constituída predominantemente por sedimentos siliciclásticos de granulação areia fina de cor cinza amarelado, intercalado, por vezes, com lâminas de espessura milimétricas a centimétricas de silte. As camadas de arenitos apresentam alta consistência e desenvolvem afloramentos rochosos pouco alterados com espessuras médias em torno de 40 m (Figura 18).

O arenito apresenta como arcabouço grãos de areia sub-arredondados, bem selecionados, alta esfericidade de matriz composta por silte e cimento silicoso/carbonático. O depósito sedimentar está disposto em estratos tabulares com laminações planoparalelas e em sua extensão ocorrem concreções carbonáticas (Figura 19A) de tamanho decimétrico. No afloramento nas proximidades da Câmara de Carga, em sua porção basal, predominam laminações plano-paralelas, no intervalo acima ocorrem estratificações cruzadas de médio porte intercalado com laminação tabular (Figura 18) e estrutura maciça na sequencia superior culminando nos siltitos da Formação Irati.

No intervalo médio-superior da camada de arenito é comum feições de bioturbação (Figura 19B) e acamamento ondular do tipo flaser e wavy com intercalação de areia fina e argila nos leitos próximo a câmara de carga da usina hidrelétrica e no túnel de desvio da usina hidrelétrica (Figura 19C e Figura 19D).

A Formação Palermo aflora na faixa centro-norte e na porção nordeste da área de estudo. O contato entre a Formação Palermo e Irati foi inferido em grande parte de sua extensão por meio de foto aérea pela mudança textural e delimitadas pelas quebras de relevo. Na região próxima à câmara de carga (ponto 03) e do túnel de desvio (ponto 12) o contato entre as duas unidades geológicas foi definido em campo, em que ocorre uma transição entre os arenitos finos do Palermo com os siltitos do Irati.

Os arenitos da Formação Palermo apresentam-se fraturados e cisalhados com estruturas transcorrentes do tipo flor positiva. Tais descontinuidades ocorrem, relativamente, bem espaçadas, como consequência da reologia e competência da rocha.

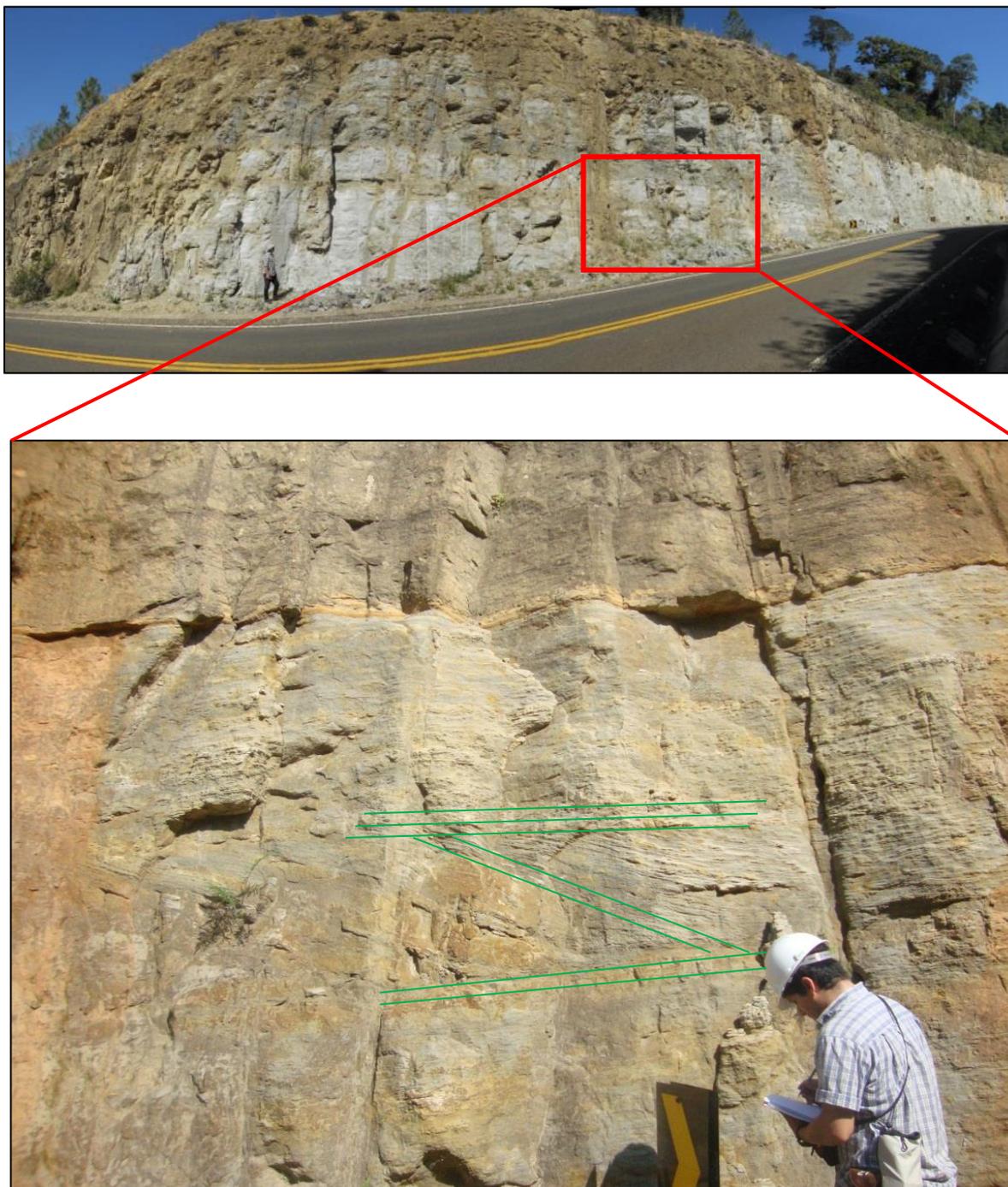


Figura 18: Mosaico de afloramento da Formação Palermo e abaixo estratificação cruzada em contato com estruturas plano-paralelas no horizonte médio.

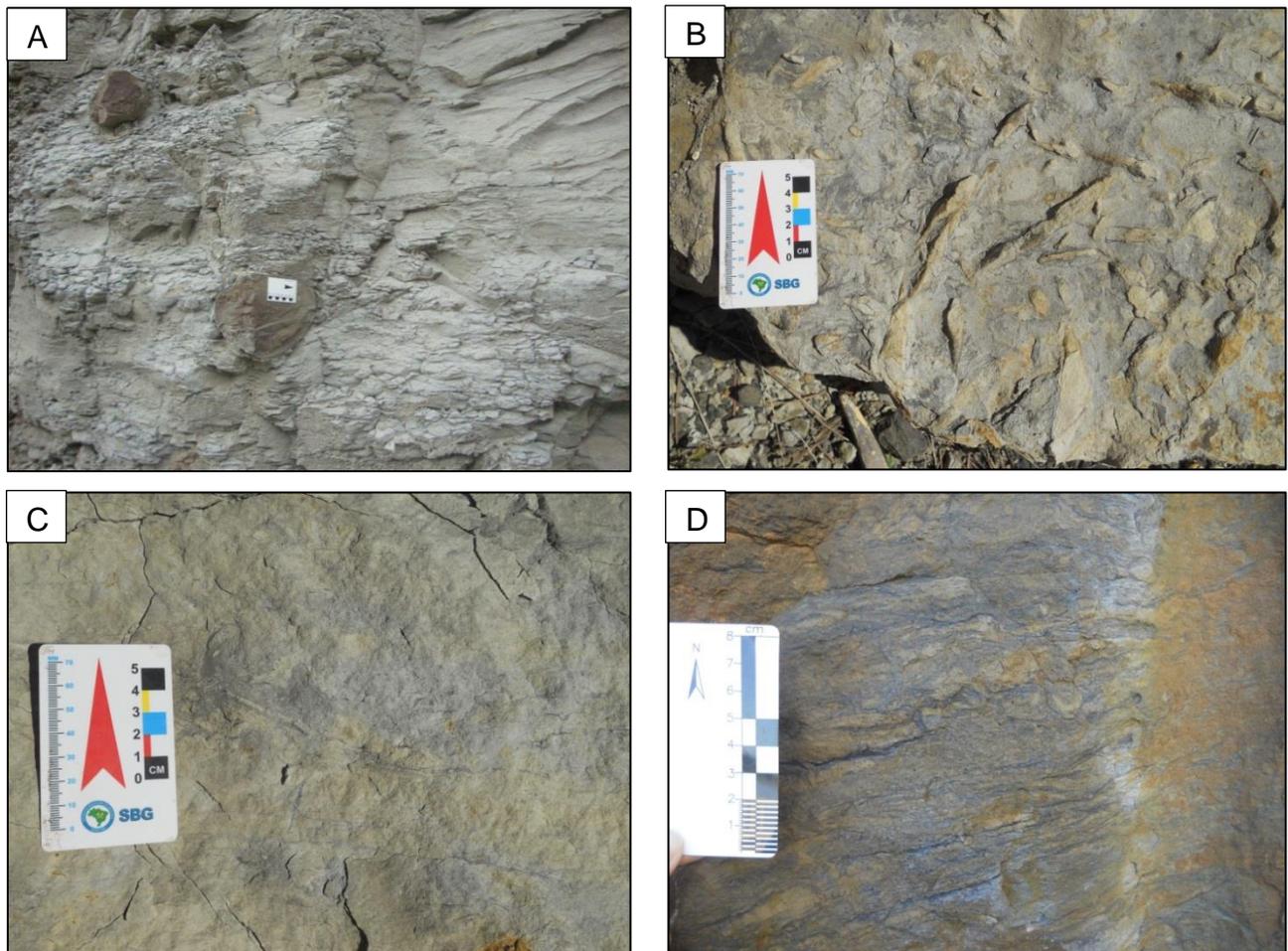


Figura 19: A) Concreções carbonáticas dispersas no arenito da Formação Palermo, nas proximidades da Câmara de Carga; B) Bioturbação em sedimentos da Formação Palermo, próximo à Câmara de Carga; C) Estrutura do tipo *wavy* no ponto 03, próximo a câmara de carga; D) Estrutura do tipo *flaser* no ponto 12, próximo ao túnel de desvio.

4.1.2 Formação Irati

Os litotipos aflorantes pertencem a unidade basal da Formação Irati e estão expostos em taludes na regiões centro-sul e nordeste da área de estudo com espessuras aproximadas de 20 a 30 metros. O depósito sedimentar é constituído por camadas de siltito e folhelhos (lamitos) de cor cinza esverdeado a esbranquiçado, quando não estão alterados e coloração cinza amarelado (Figura 20A, Figura 20B e Figura 20 C), quando alterado. A estrutura sedimentar predominante é a laminação plano-paralela e na região próxima a câmara de carga (ponto 13) os sedimentos estão intercalados com níveis centimétricos de calcários (Figura 21).

No afloramento 12, próximo à tomada d'água no reservatório há

concreções carbonáticas com alteração do tipo borra de café (Figura 20D), de formato elipsoide com aproximadamente 50 cm de comprimento e 25 cm de largura.

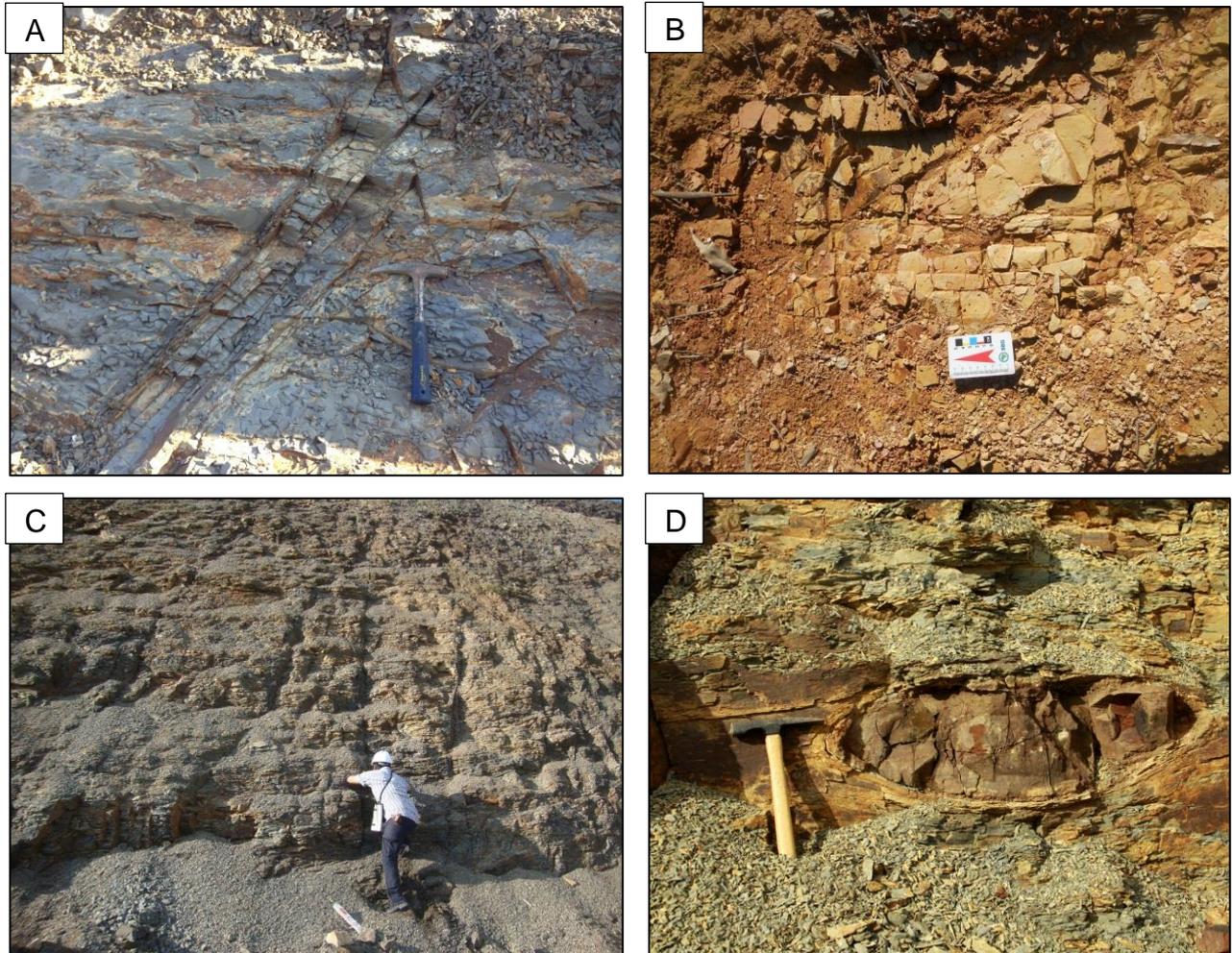


Figura 20: A) Vista superior do afloramento de siltito do ponto 12 próximo ao túnel de desvio; B) Visão superior do afloramento em estrada não pavimentada de siltito da Formação Irati no ponto 23; C) Vista de encosta de folhelhos próxima a canal de desvio, ponto 12 e D) Concreções carbonáticas dispersas no arenito da Formação Palermo, no ponto 12 na proximidade da tomada d'água.

As melhores exposições desta unidade são observadas nas regiões próximas a ombreira direita da barragem e em taludes próxima a câmara de carga. O contato da Formação Irati com o Serra Alta é inferido e com a Formação Serra Geral é por discordância litotípica ou intrusiva de soleiras com os estratos sedimentares e diques sob os sedimentos do Grupo Guatá.



Figura 21: Vista do talude da estrada com camada decimétrica de calcário nas proximidades do acesso à casa de força.

Os litotipos da Formação Irati apresentam-se intensamente fraturados por diversas famílias de fraturas e zonas de cisalhamento que, em conjunto a baixa competência da rocha, possibilita uma maior compartimentação da unidade. Como consequência da baixa reologia da rocha e o empilhamento vertical das Formações geológicas adjacentes da bacia sedimentar sob a unidade Irati, a formação rochosa, quando exposta a intempéries do ambiente, apresenta fácil desagregação mecânica devido ao empastilhamento da litologia.

4.1.3 Formação Serra Alta

As rochas dessa formação apresentam-se amarelo acinzentadas quando alteradas, granulação fina a muito fina e laminação plano paralela com espaçamento milimétrico a centimétricos entre os planos. Os afloramentos desse litotipo estão na porção noroeste e centro norte da área de estudo. Em campo não foi observado evidência de contato entre as formações do Grupo Passa Dois, sendo considerado como transicional e inferido por fotointerpretação com a Formação Irati. Na região central da área de estudo o contato as intrusivas do Serra Geral é tectônico. A Figura 22A e B expõe uma visão geral do afloramento dos pontos 02 e 13 correspondente à Formação Serra Alta.

O paleoambiente deposicional é considerado, segundo características observadas em campo e bibliografia como marinho de águas calmas.

A Formação Serra Alta, assim como a unidade subjacente, apresenta-se compartimentada por horizonte friável e com aspecto empastilhado.

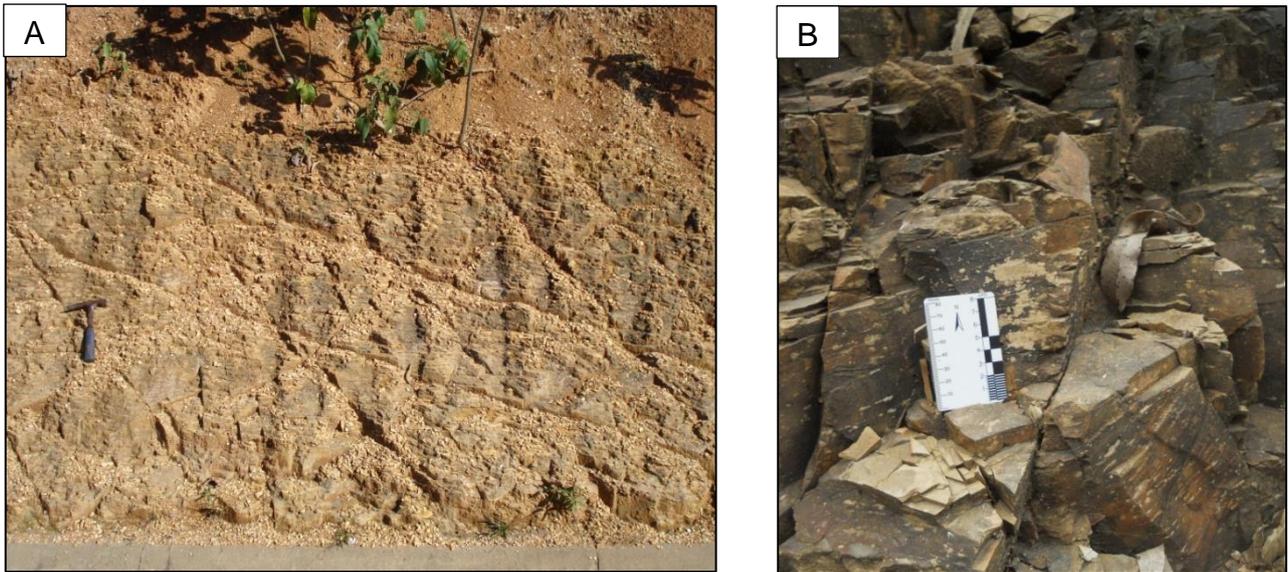


Figura 22: A) Corte de estrada com siltitos alterados e empastilhados da Formação Serra alta no ponto 02 e B) Afloramento de siltito no acesso à casa de força (ponto 13) da Formação Serra Alta.

4.1.4 Formação Serra Geral

As intrusivas básicas da Formação Serra Geral são representadas por diabásios na forma de diques de sentido NW-SE e soleiras (sills) em contato discordante com as encaixantes sedimentares e servem de fundação a Barragem de Mauá.

A melhor exposição do diabásio Serra Geral sucede na pedreira que foi utilizada para extração de agregados graúdos e miúdos à época de construção da barragem (Figura 23). Os demais afloramentos constituem regiões próximas à barragem e no túnel de desvio do rio e em alguns casos intensamente alterados. O diabásio mapeado na área de estudo ocorre na forma de soleiras de espessuras médias em torno de 20 metros. Nos pontos 12 e 18 o diabásio ocorre na forma de diques, porém intensamente alterados (Figura 25 e Figura 26), cortando as unidades sedimentares.



Figura 23: Vista geral da pedreira.

Macroscopicamente, a rocha sã apresenta-se cinza escuro esverdeado (Figura 27A) constituído por minerais holocristalinos de textura fanerítica equigranular fina e estrutura maciça. A assembleia mineral é composta predominantemente por cristais melanocráticos como piroxênios e opacos e em menor proporção por cristais félsicos de plagioclásio. Em determinadas superfícies de fratura e/ou falha ocorrem veios de carbonato, quartzo, e por vezes, zeólitas e cristais de pirita euédrica (Figura 27B).

Os litotipos quando alterados apresentam formato arredondado e alongado em blocos com característica alteração esferoidal e horizontes preferenciais de alteração devido à intersecção de descontinuidades horizontais e subverticais, conforme Figura 27C. Em campo o intemperismo químico gera horizontes de solos de cor avermelhadas com espessuras variando em poucas dezenas de metros nas regiões mais elevadas da área de estudo a oeste da barragem. Por vezes diques alterados cortam os sedimentos de outras unidades sedimentares, como visto na Figura 27D.

Na região da UHE as rochas da Formação Serra Geral apresentam diversos conjuntos de famílias de fraturas (Figura 24), influenciadas por falhas de rejeito direcional e fraturas atectônicas derivada de alívio tensão, que compartimentam o maciço rochoso.



Figura 24: Vista da pedreira de diabásio com descontinuidades de direção NW e juntas horizontais.



Figura 25: Soleira de diabásio com início de alteração esférica localizada próximo ao desvio para câmara de carga.



Figura 26: Dique alterado cortando os siltitos da formação Irati em talude próximo a desvio da câmara de carga.

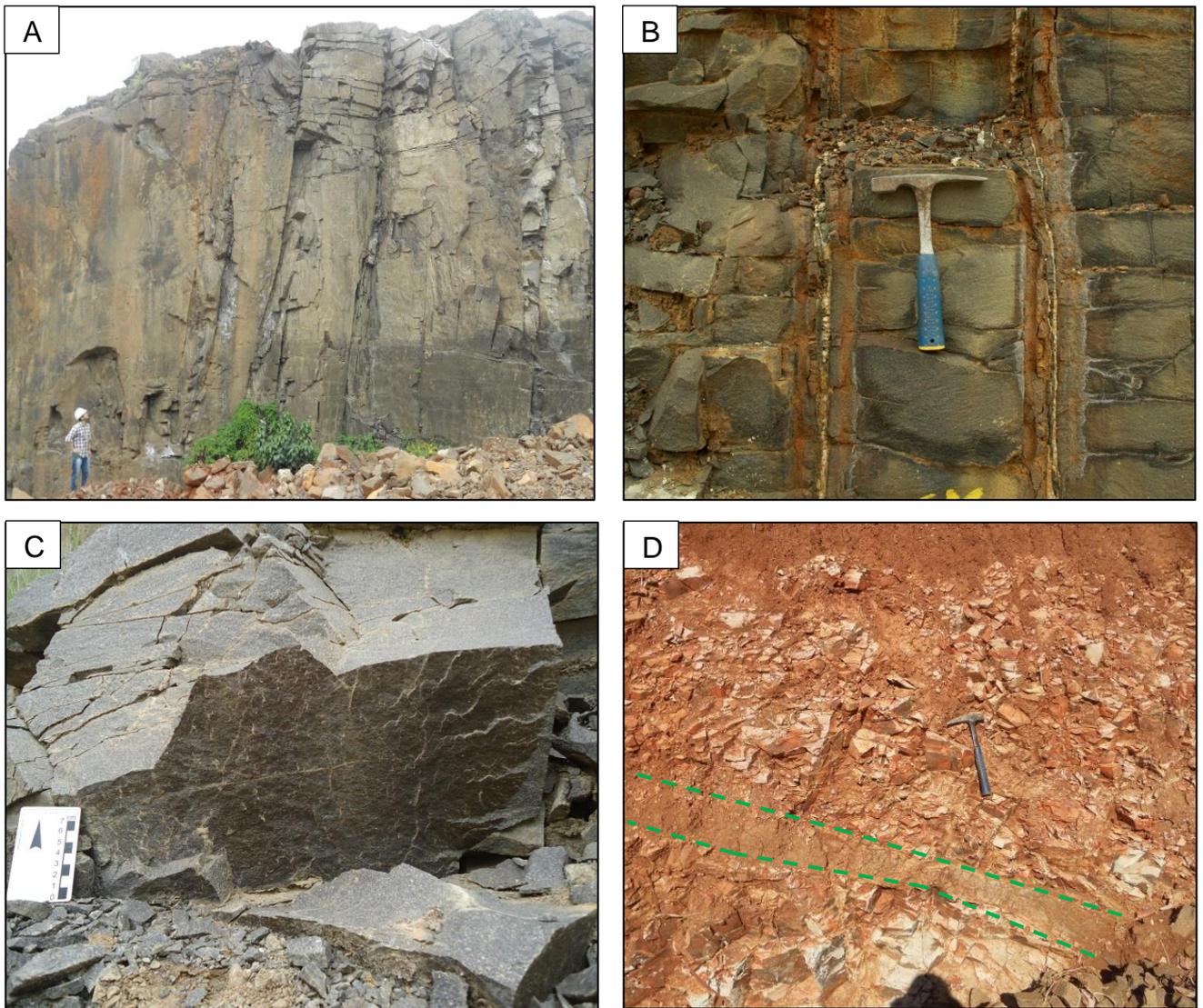


Figura 27: A) Talude de soleira de diabásio mapeado na pedreira de material de empréstimo (ponto 01); B) Veio de carbonato alterado; C) Afloramento de diabásio próximo a face jusante da barragem, ponto 05 e D) Dique alterado cortando os siltitos da Formação Irati.

5 MORFOESTRUTURAS DA ÁREA DE ESTUDO

O relevo da área de estudo pertence à Unidade Morfoestrutural Bacia Sedimentar do Paraná, na unidade Morfoescultural Segundo Planalto Paranaense, que é limitada a leste pelo Primeiro Planalto Paranaense e a oeste pelas efusivas do Terceiro Planalto Paranaense. (MINEROPAR, 2006).

A usina hidrelétrica de Mauá está localizada, mais precisamente, na subunidade morfoescultural denominada de Planalto de Ortigueira. Apresenta padrões geomorfológicos de morros e colinas com dissecação alta, topos alongados e em crista, com vertentes retilíneas, vales em V e ocupa uma área de aproximadamente 3.615 km². As classes de declividades predominantes são entre 10 e 18%.

O termo morfoestrutura é empregado em feições geomorfológicas resultante da erosão e denudação do arcabouço geológico associadas a eventos tectônicos em escala regional. As estruturas geológicas geralmente controlam as formas do relevo de uma região, com influência no curso dos rios, litotipos e na textura do relevo.

A área está inserida no Segundo Planalto do estado do Paraná (Maack, 1968), e encontra-se dissecada em função do predomínio geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Tibagi. Tal dissecação se faz preferencialmente segundo alinhamentos estruturais que, no presente caso, representam linhas de fraqueza no terreno. Dessa forma, após a implantação da rede da drenagem, cujo início provavelmente coincidiu com o início do Quaternário, o terreno passou por uma drástica mudança de paisagem com a erosão e a esculturação do terreno, configurando importantes morfoestruturas locais e regionais.

A análise de cartas planialtimétricas associada ao levantamento de campo possibilitou delimitar as feições morfológicas da região em que está inserida a UHE Mauá, na qual percebe-se um predomínio de relevo do tipo morros e colinas dissecadas com vertentes convexas e retilíneas, de topos alongados e em crista com direção preferencial NW-SE condicionadas por diques de diabásio sobressalentes no relevo. A presença de rochas com diferentes reologias influenciam na evolução e comportamento do relevo, como exemplo, as feições salientes do tipo crista simétrica ou muralha geradas pela erosão

diferencial entre as intrusivas básicas e as rochas sedimentares do seu entorno. Na Figura 28 e Figura 29 é possível observar exemplos de relevo próximo à barragem.



Figura 28: Relevo de morros e colinas dissecadas com vertentes convexas a retilíneas e topos alongados.



Figura 29: Relevo de morros ondulados e íngremes com vertentes convexas retilíneas e topos em crista e alongados.

O local de estudo apresenta gradiente altimétricos considerável, com elevações entre 505 e 925 (Figura 30), com predomínio de superfície aplainada, de relevo tabuliforme dissecado do tipo meseta com menores altitudes a leste do curso do rio Tibagi sob rochas sedimentares e maiores elevações a oeste caracterizadas por soleiras de diabásio que configuram extensas formas tabuliformes.

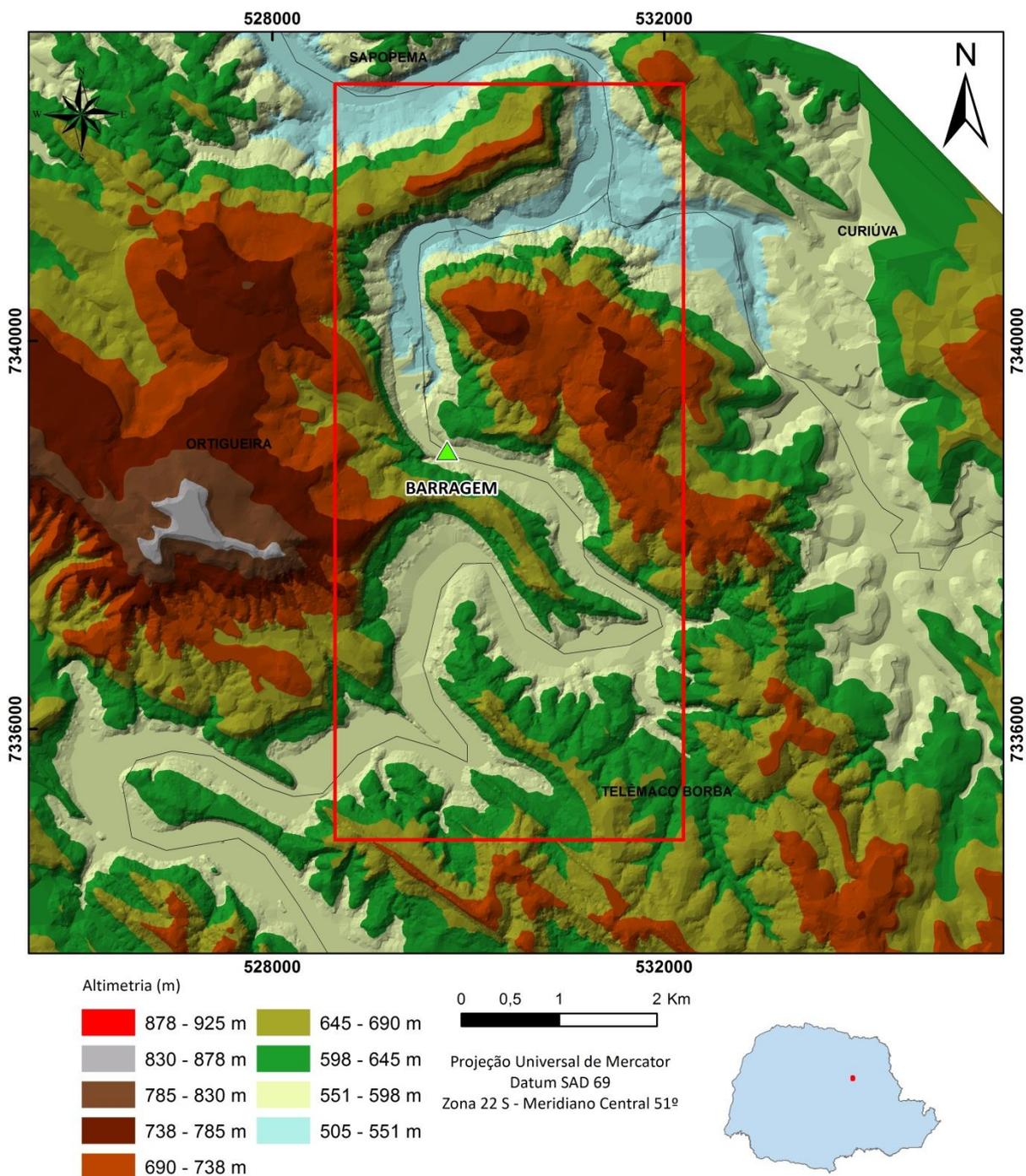


Figura 30: Hipsometria da área de interesse e articulação das cartas topográficas.

Através do MDE foi possível visualizar a topografia em 3D (Figura 31), onde se observa uma região bastante estruturada, com drenagens densas e sinuosas, caracterizadas por padrões dendrítico e retangular. Estes atributos estão associados a áreas com grau de dissecação médio a alto e terrenos bastante fraturados.

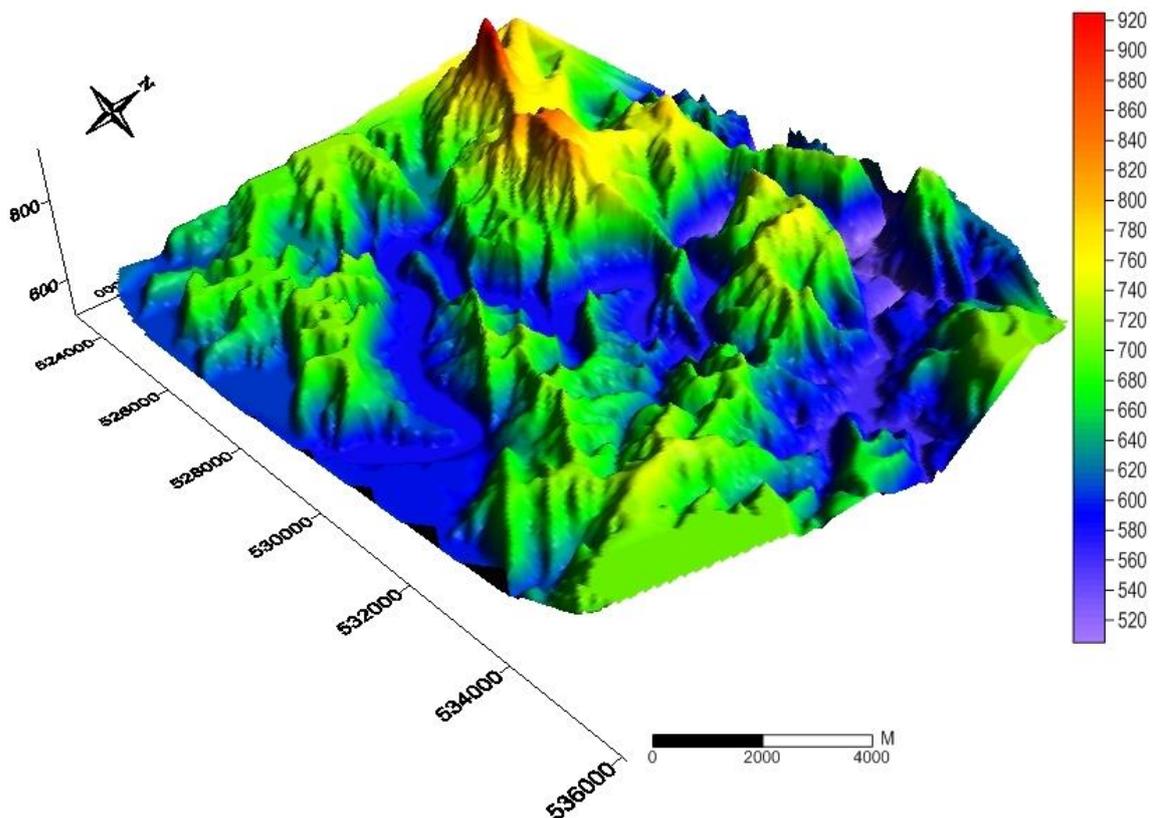


Figura 31: Modelo Digital de Elevação (MDE) com visualização geral do relevo e feições alinhadas no terreno, dadas por eventuais fraturas ou diques de diabásio.

Na Figura 32 são mostradas as 5 classes principais de declividade em graus. As maiores declividades caracterizadas no mapa por tons mais quentes, foram associadas a cristas simétricas e assimétricas derivadas em sua maioria por diques e soleiras de diabásio no terreno e na margem do curso do rio Tibagi. A noroeste da área em tons de verde e amarelo destaca-se um relevo mais aplanado, diferentemente a sudeste da barragem onde há maior contraste entre os níveis de declividade.

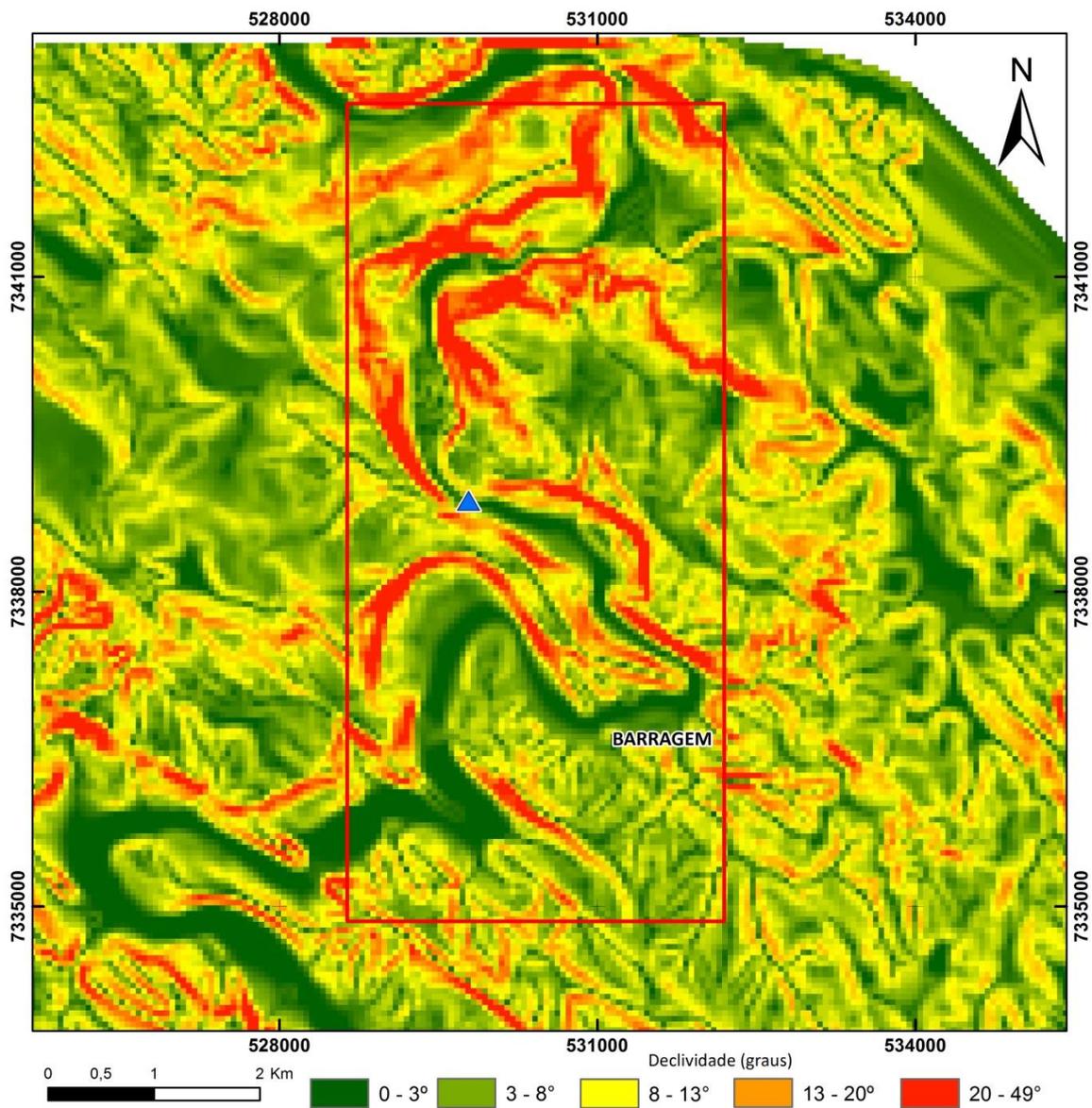


Figura 32: Classes de declividade em graus de inclinação da vertente.

6 ANÁLISE ESTRUTURAL

O presente item aborda os dados obtidos em campo e demais interpretações estruturais e morfoestruturais por fotointerpretação (foto aérea) e imagens Landsat.

Em campo, o principal intuito da análise estrutural foi a coleta dos dados geométricos das estruturas, além de diferenciar os sistemas de fraturas, definir indicadores cinemáticos e os tipos de materiais que preenchem as fraturas observadas.

6.1 FOTOLINEAMENTOS DE IMAGENS DE SATÉLITE E FOTOS AÉREAS

Os lineamentos de relevo foram traçados em imagens de satélite (Landsat) na escala 1:100.000 e em fotografias aéreas na escala 1:25.000, pelo método de reconhecimento de elementos texturais, essencialmente, de feições positivas, que correspondem a cristas de morros alongados e negativas, como redes de drenagem em fundo de vales e depressões marcadas na superfície do terreno.

Para a identificação de feições estruturais, foram utilizados os critérios de continuidade e persistência de elementos lineares do relevo. Por meio da fotoanálise, foi possível identificar feições regionais de 1º ordem (em escala 1:100.000) com propriedades de maior comprimento e continuidade lateral do traçado e estruturas locais de 2º ordem (em escala 1:25.000) com aspecto determinado pelo menor comprimento e continuidade, porém de caráter mais pervasivo. A análise em diferentes escalas auxiliou no entendimento da dinâmica geológica pretérita do substrato, representados por morfoestruturas na superfície do relevo geradas por agentes erosivos.

As informações obtidas a partir da interpretação de lineamentos de 1º e 2º ordem embasaram a análise estatística de orientação dos traçados por intermédio da confecção de diagramas de rosetas sinópticos de comprimento e frequência acumulada dos dados.

O traçado de lineamentos regionais pode ser observado na Figura 33, com destaque aos lineamentos positivos (verde), os quais exibem maior persistência e continuidade, com prolongamentos superiores a 15 km e extensão

além da área de estudo, no sentido Noroeste. Os lineamentos negativos ocorrem, por vezes, conjugados paralelamente as grandes feições positivas e frequentemente seccionam ou compartimentam tais morfoestruturas.

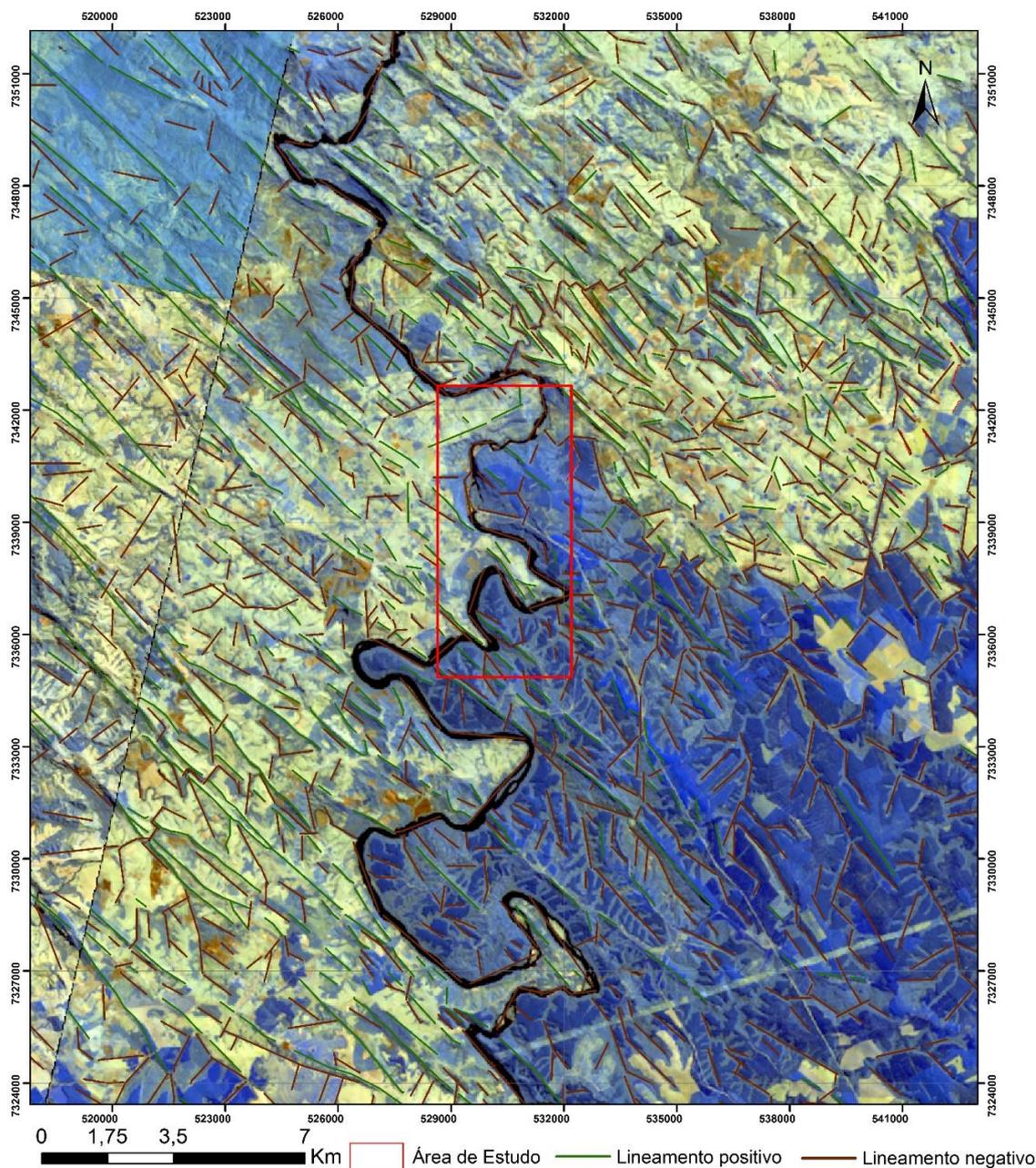


Figura 33: Lineamentos positivos e negativos traçados em imagem de satélite Landsat 7 ETM+, cena 221/077 e 222/077, combinação falsa cor RGB (8,5,4) e em vermelho localização da área de estudo.

Para os fotolineamentos de 1º ordem foram gerados 1952 traços e os diagramas sinópticos apontam *trends* estruturais orientados a uma direção N35-55W, N 20-30 E, N-S e E-W, com maior acúmulo estatístico os de direção N35-55W e 20-30E (Figura 34).

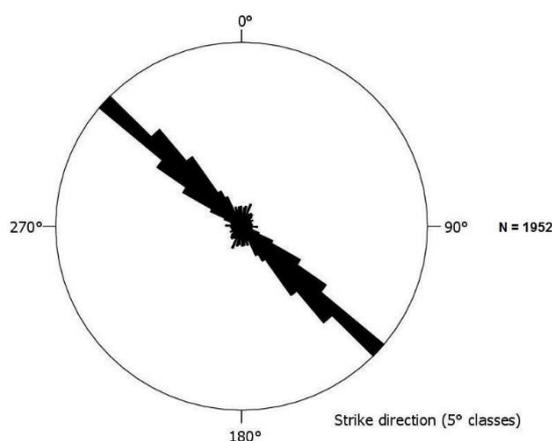


Figura 34: Diagrama de rosetas sinóptico do comprimento dos lineamentos de 1º ordem.

As estruturas com direção preferencial para NW-SE são recorrentes em praticamente toda extensão da área de estudo e exibem traçado contínuo de alta persistência, bem espaçadas e correspondem, em sua maioria, a falhas abertas, preenchidas por diabásio. Tais estruturas são bem demarcadas nas rochas sedimentares da Bacia do Paraná e estão diretamente relacionadas ao Arco de Ponta Grossa, condicionadas pelas zonas de falha São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo. Na região de estudo, em toda porção oeste, os feixes de diques de diabásio representam zonas de cisalhamento de menor expressão regional, como a Zona de Falha Tamarana, Incrão e Mauá da Serra com expressões geométricas retilíneas a anastomosadas, definidas por Strugale, (2002).

Já os lineamentos de direção NE-SW consistem em traços de baixa persistência e maior segmentação em escala regional e afetam tanto os sedimentos quanto as soleiras de diabásio. As linhas de fraqueza apresentam de um modo geral, aspecto retilíneo nesta direção, controlada regionalmente pela zona de falha Jacutinga, com maior realce Morfoestrutural na porção centro-leste da área.

Para a análise em fotografias aéreas em escala 1:25.000 (Figura 35) foram utilizados os mesmos princípios de fotointerpretação empregados em imagens de satélite, que permitiu o traçado de 807 lineamentos, preferencialmente negativos, com tendências estruturais para o quadrante NW de direção principal N40-50W e secundariamente para o quadrante NE com direção N30-40E, plotados em diagramas de roseta (Figura 36).

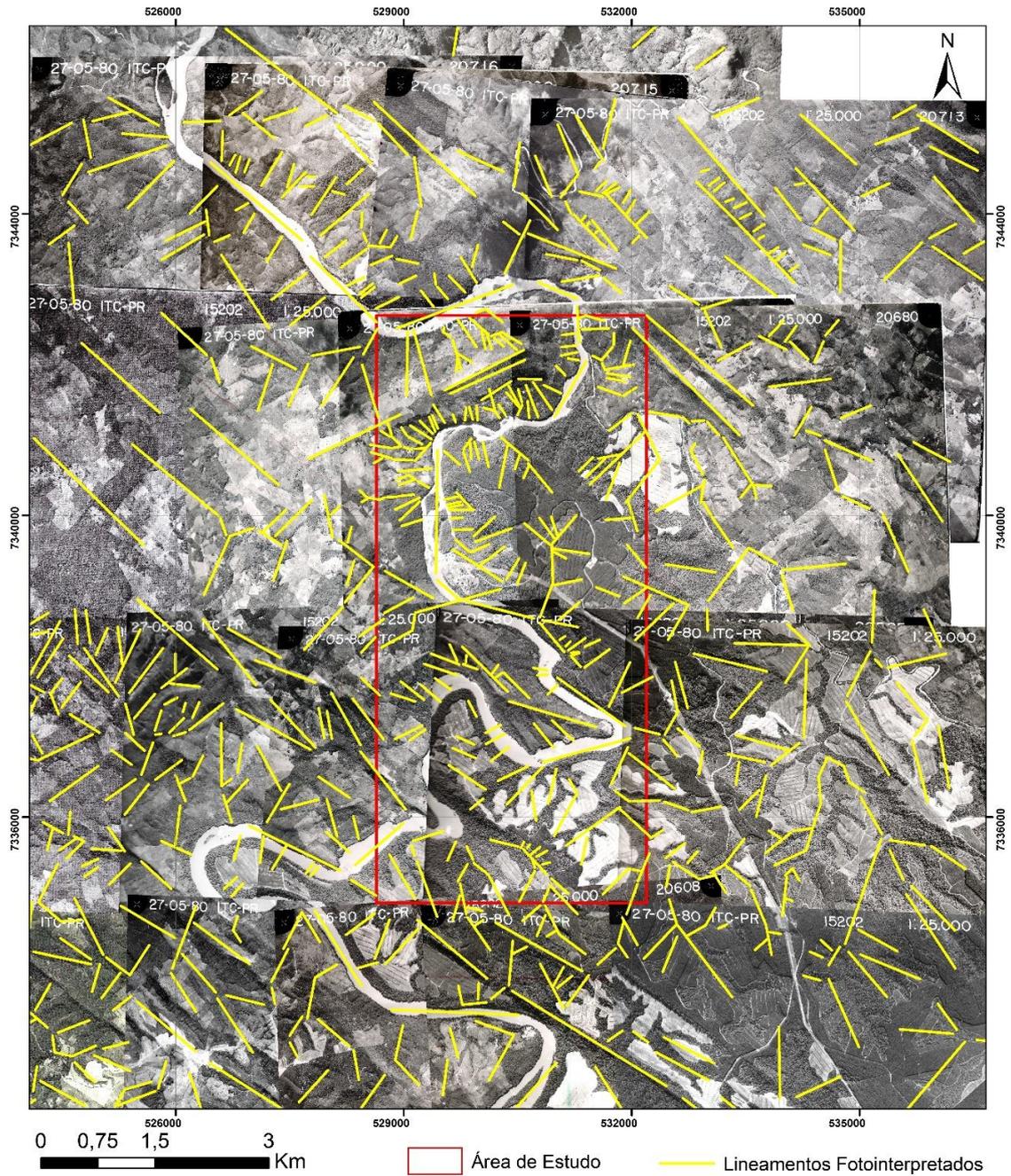


Figura 35: Lineamentos traçados em fotos aéreas em escala 1:25.000.

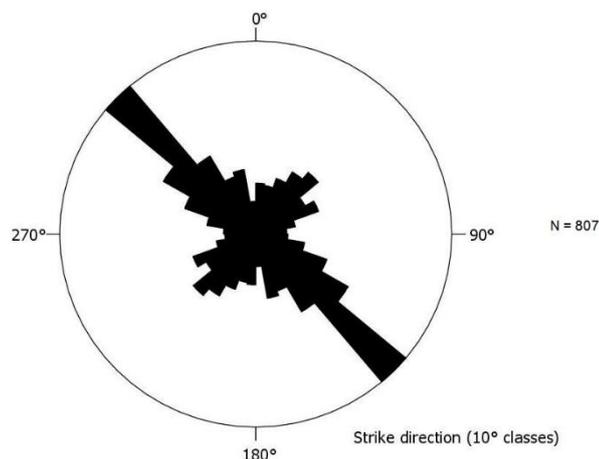


Figura 36: Diagrama de rosetas com o comprimento dos lineamentos traçados em fotos aéreas.

Com a separação de lineamentos foi possível verificar pequenas diferenças entre os as feições de 1° e 2° ordem, constatada, principalmente em lineamentos de direção NE-SW que exibem maior penetratividade em escala local. A imagem de satélite apresentou baixa resolução de lineamentos de direção NE-SW, N-S e E-W, tanto positivos como negativos, ao contrário do traçado realizado em fotografias aéreas, que expõe maiores padrões NE-SW e pouca expressão, N-S e E-W. Tal resultado não descarta a importância e o caráter penetrativo destas descontinuidades, as quais possibilitaram a integração com os dados de campo e identificação de falhas e zonas de cisalhamento em geral de caráter transcorrente, que compartmentam o maciço de fundação e influenciam, diretamente, na estabilidade e estanqueidade da estrutura de concreto.

Preliminarmente à construção da barragem da UHE Mauá, a análise é fundamental, pois o eixo de uma barragem, a princípio, deveria ser aproximadamente perpendicular às direções principais de lineamentos estruturais, para manter a função de estabilidade a movimentos da fundação. Caso contrário, as tensões exercidas pela barragem e reservatório, poderiam facilitar a abertura submilimétricas de descontinuidades naturais, o que aumentaria a subpressão com o aumento da passagem de água pela fundação da barragem e o rearranjo/acomodação das estruturas geologias do substrato, possibilitando a ocorrência de recalques ou deslizamento nos planos de fraqueza da fundação.

Esta análise regional serviu como base para comparar os lineamentos interpretados com os observados em superfície.

6.2 ANÁLISE ESTRUTURAL DOS DADOS DE CAMPO

A análise estrutural realizada a partir de dados de campo tem como objetivo descrever as estruturas tectônicas presentes no substrato, tal como seu significado geológico e influência à estabilidade da obra geotécnica.

O levantamento geológico-estrutural permitiu a descrição de 21 afloramentos e coleta de 512 medidas de fraturas (falhas e juntas) no entorno da UHE Mauá. As estruturas geológicas foram descritas com base em sua geometria, orientação, espaçamento, abertura, rugosidade, e indicadores cinemáticos. As feições indicativas de movimento são expressas por planos de falhas, estrias (*slickenside*), degraus (*steps*), crescimento de minerais em plano de falha e boudins (sigmóides).

As descontinuidades mais expressivas mapeadas na região de estudo correspondem a sistemas de juntas, com superfícies geralmente planas, seguidas de fissuras abertas com ou sem preenchimento mineral. Os tipos de falhas identificadas em campo correspondem a falhas de rejeito direcional, falhas extensionais e inversas. Em alguns afloramentos, as feições estruturais foram interpretadas, conforme suas características e relações geométricas, como pertencentes ao modelo de Riedel de fraturamento, tal como fraturas Y, R e fragmentos escalonados.

Para os dados de campo foi confeccionado um diagrama de rosetas de todas as estruturas identificadas (Figura 37). Neste quadro, é possível identificar o predomínio de duas direções principais N50-60E e N40-50E. Secundariamente, há tendências de direções para N60-70E e N50-40W.

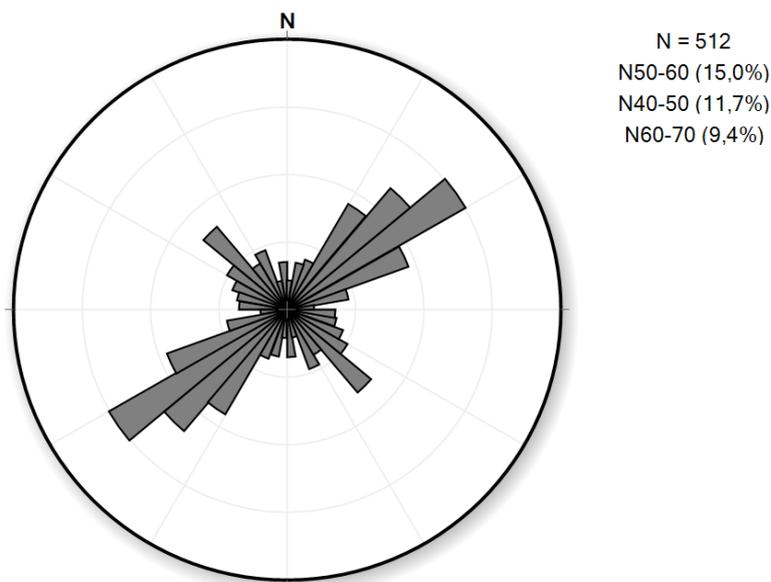


Figura 37: Diagrama de rosetas de todas as fraturas identificadas na área (512 medidas).

As discontinuidades medidas em campo exibem um predomínio de planos verticalizados, com mergulho médio entre 80° e 90° (Figura 38), como consequência dos eventos tectônicos comumente associados a regimes transcorrentes verificados em praticamente toda área de estudo. As famílias de juntas verticalizadas a subverticalizadas mapeadas estão geneticamente associadas aos planos de falhas transcorrentes, de alto ângulo de mergulho, expostas normalmente paralelas a subparalelas aos eixos de cisalhamentos.

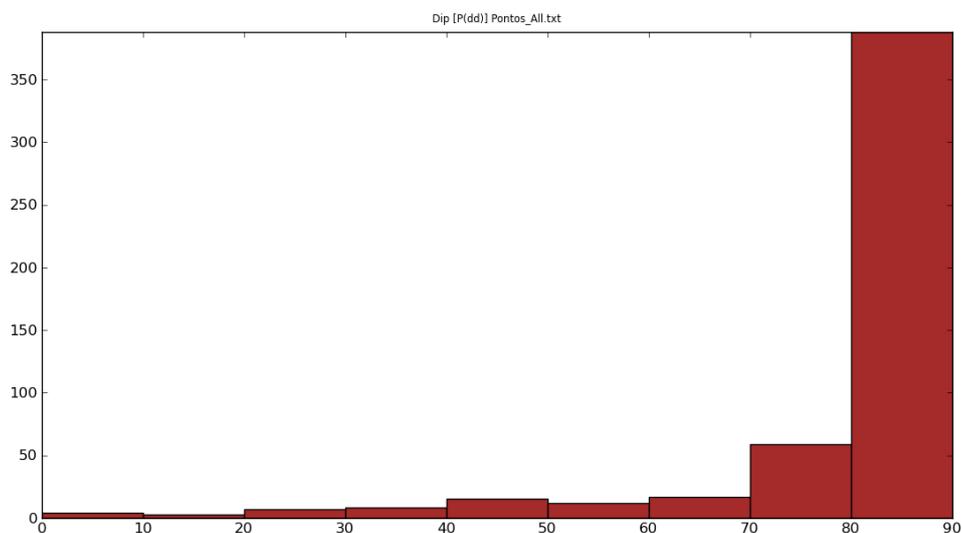


Figura 38: Mergulho de todas as discontinuidades medidas em campo.

Para uma melhor compreensão das feições rúpteis que afetam o maciço rochoso e sua configuração geométrica, foram confeccionados diagramas estruturais para cada unidade estratigráfica da base para o topo em ordem cronológica (Figura 39). Tal finalidade decorre da necessidade de identificar as principais direções estruturais de ruptura presentes em cada camada e sua importância para a segurança do empreendimento.

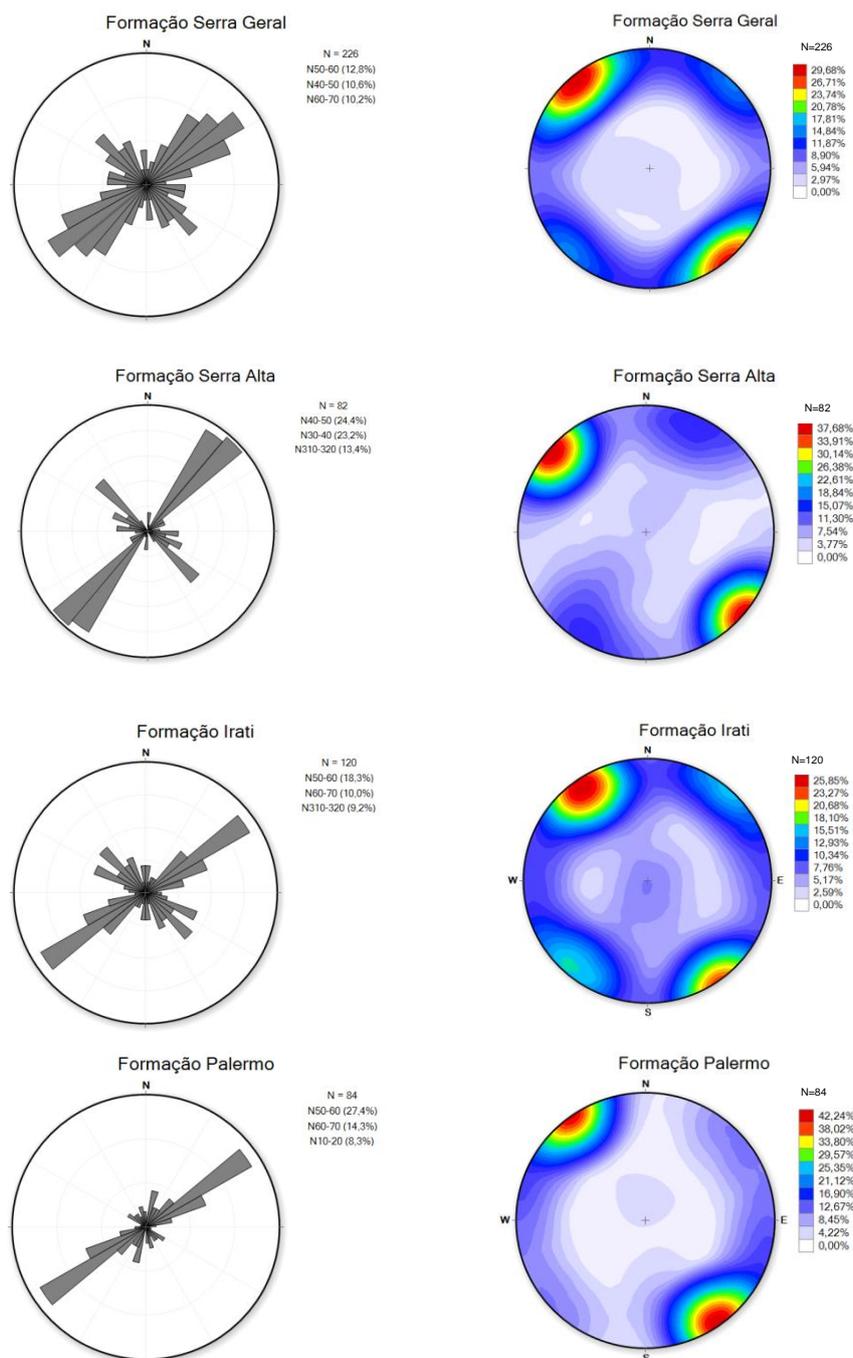


Figura 39: Diagrama de roseta e de contorno das fraturas de cada unidade estratigráfica.

Os diagramas sinóticos das fraturas exibem direções estruturais semelhantes para as quatro unidades geológicas mapeadas, principalmente para estruturas geológicas do quadrante NE, com moda de N50-60E, seguido de estruturas N60-70E e N40-50E. Os diagramas de contorno evidenciam o predomínio de fraturas verticais com mergulho para NW/SE.

Para a Formação Palermo, as fraturas mapeadas exibem direções entre N50-60E, N60-70E e N 10-20E. Os afloramentos desta formação são localizados próximo ao túnel de desvio e câmara de carga. A Formação Irati apresenta um predomínio de direção N50-60E e N50-60W, já para a Formação Serra Alta as direções principais são para N40-50E e N30-40E. Devido ao caráter reológico destas formações, é pouco frequente a constatação em campo de indicadores de movimento de blocos rochosos, com maior número de fraturas do tipo junta.

A distribuição de fraturas da Formação Serra Geral apresenta um padrão difuso, com feições rúpteis dispersas para NE/SW e NW/SE. Nesta unidade foi obtido o maior número de medidas estruturais (n=226) como consequência de sua maior exposição na área de estudo, em forma de soleira (*sill*) e pela relação direta com o maciço de concreto, pois serve de embasamento para a barragem. Para tais estruturas, foi necessário determinar analogamente, em afloramentos adjacentes à barragem, as feições rúpteis presentes na rocha e inferir (interpretar) os planos que compartimentam e afetam a fundação.

A integração dentre os diagramas possibilitou deduzir que os eventos tectônicos do sistema NE-SW e NW-SE são de idade máxima (ou mínima) do Cretáceo, pois afetam todo o empilhamento estratigráfico da região. Estas estruturas geológicas podem ser relacionadas a reativações de sistemas de falhas que interceptam a região como a Zona de Falha Jacutinga, de direção NE e o Arco de Ponta Grossa, para NW. Já as estruturas N-S e E-W são dispersas e pouco frequentes.

Para uma melhor compreensão das relações estruturais, os dados foram separados em famílias de fraturas com a caracterização dos diferentes planos que entalham o substrato rochoso, expostos a seguir.

6.2.1 Família NE-SW

As descontinuidades associadas a esse sistema são recorrentes em todos os afloramentos descritos, se manifestam com formas planares e, por vezes, anastomosadas. As fraturas sucedem de forma sistemática em campo, configurando feições pervasivas e persistentes que influenciam na segmentação do maciço rochoso e suas unidades geológicas. As superfícies das juntas apresentam rugosidade, em geral, plana irregular e recortada lisa. Já para os planos de falhas, o aspecto é recortado e ondulado, onde são identificados indicadores cinemáticos como estrias e sentido do movimento. O espaçamento entre as descontinuidades é centimétrico a métrico, com planos fechados. As fraturas, quando abertas, são preenchidas por carbonato de cálcio e óxido de manganês e em menor proporção quartzo e zeólitas.

Os planos de falhas ocorrem com menor frequência em campo do que as juntas, porém configuram planos com maior expressão regional e são representadas por estruturas transcorrentes de cinemática dextral, com pares conjugados sinistrais e fraturas escalonadas. Tais feições geológicas foram observadas principalmente nos diabásio da Formação Serra Geral, Formação Palermo e Serra Alta.

Na pedreira de diabásio (ponto 01) foram observadas diversas feições de direção NE-SW (Figura 40), com destaque a zonas de cisalhamento e planos de falhas preenchidos por cristais de pirita e carbonato. Ainda neste local, foi observado um veio de calcita boudinado com cinemática dextral (ver item estruturas lineares Figura 52).

Em rochas sedimentares de menor competência foram identificadas juntas escalonadas e pares conjugados com fraturas planares de movimento dextral (Figura 41). As fissuras preenchidas e zonas de falhas com óxido de manganês evidenciam um ambiente tectônico transtrativo (aberto e livre).

A jusante da barragem (ponto 08), em sua margem esquerda, foram mapeadas descontinuidades do tipo junta e uma zona de cisalhamento de possível movimento dextral, com microaberturas e percolação de água, que configuram caminhos preferenciais de água e conseqüentemente, facilitam a alteração local da rocha. Este conjunto de abertura da descontinuidade e fluxo de

água resulta em um material argiloso de alteração preenchendo suas paredes, como mostra a Figura 42. Esta feição identificada próxima à barragem é de grande importância à segurança do empreendimento, pois configura uma estrutura aberta como potencial caminho de percolação de água na fundação da barragem.

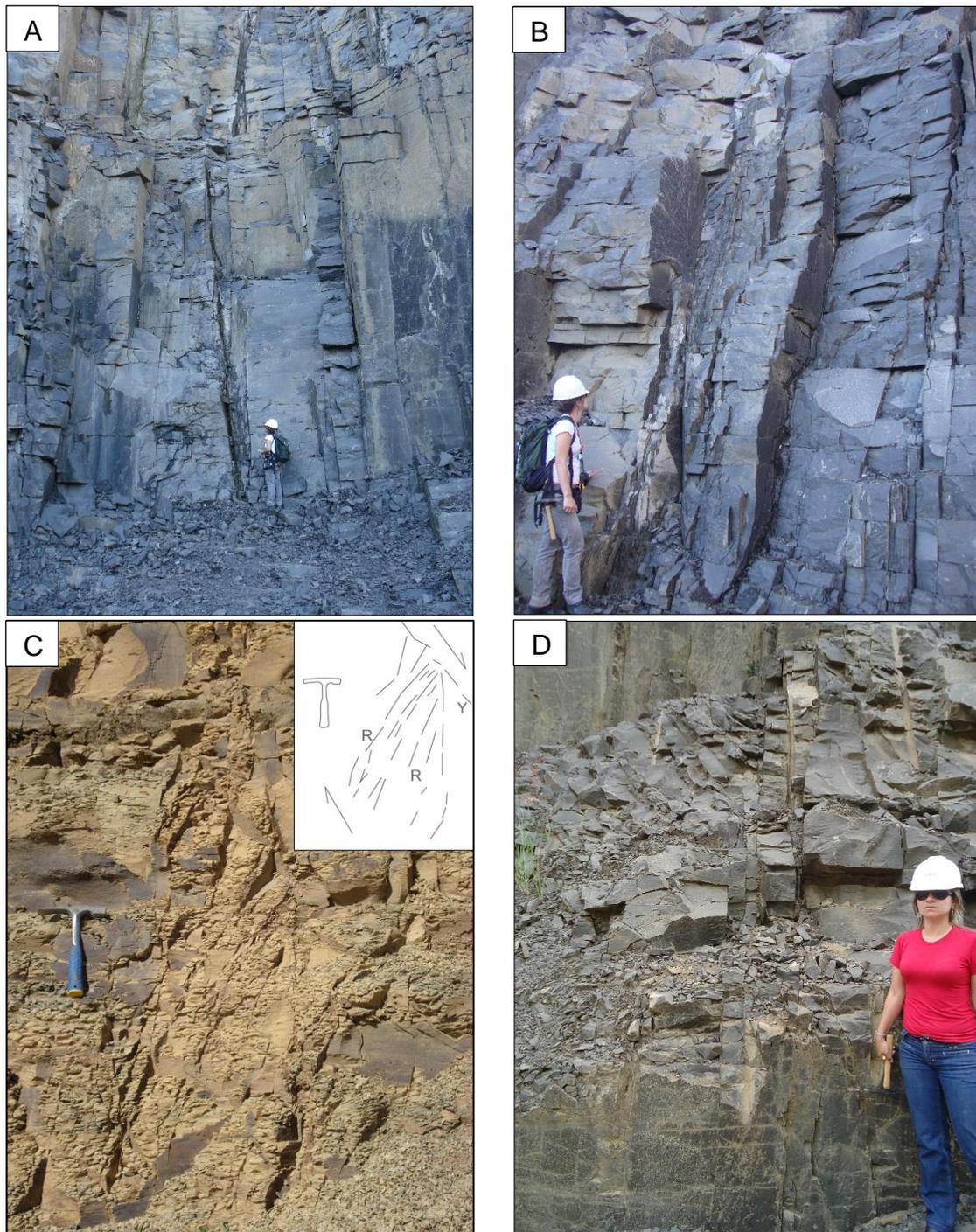


Figura 40: Exemplos de descontinuidades de direção NE-SW (A) Zona de cisalhamento mapeada na pedreira de diabásio, no ponto 01. (B) Planos de descontinuidade de direção NE-SW no ponto 01. (C) Zona de cisalhamento de sentido dextral no ponto 04. (D) Planos de fraturas identificados a jusante da barragem no ponto 05.

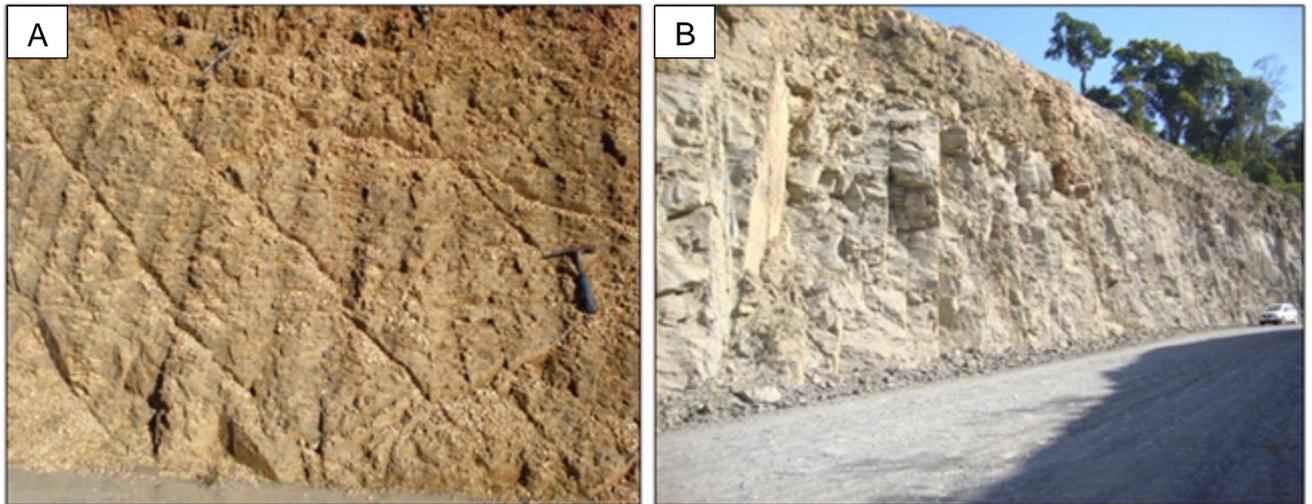


Figura 41: (A) fraturas escalonadas identificadas no ponto 04. (B) penetratividade das descontinuidades das fraturas NE-SW no ponto 03.

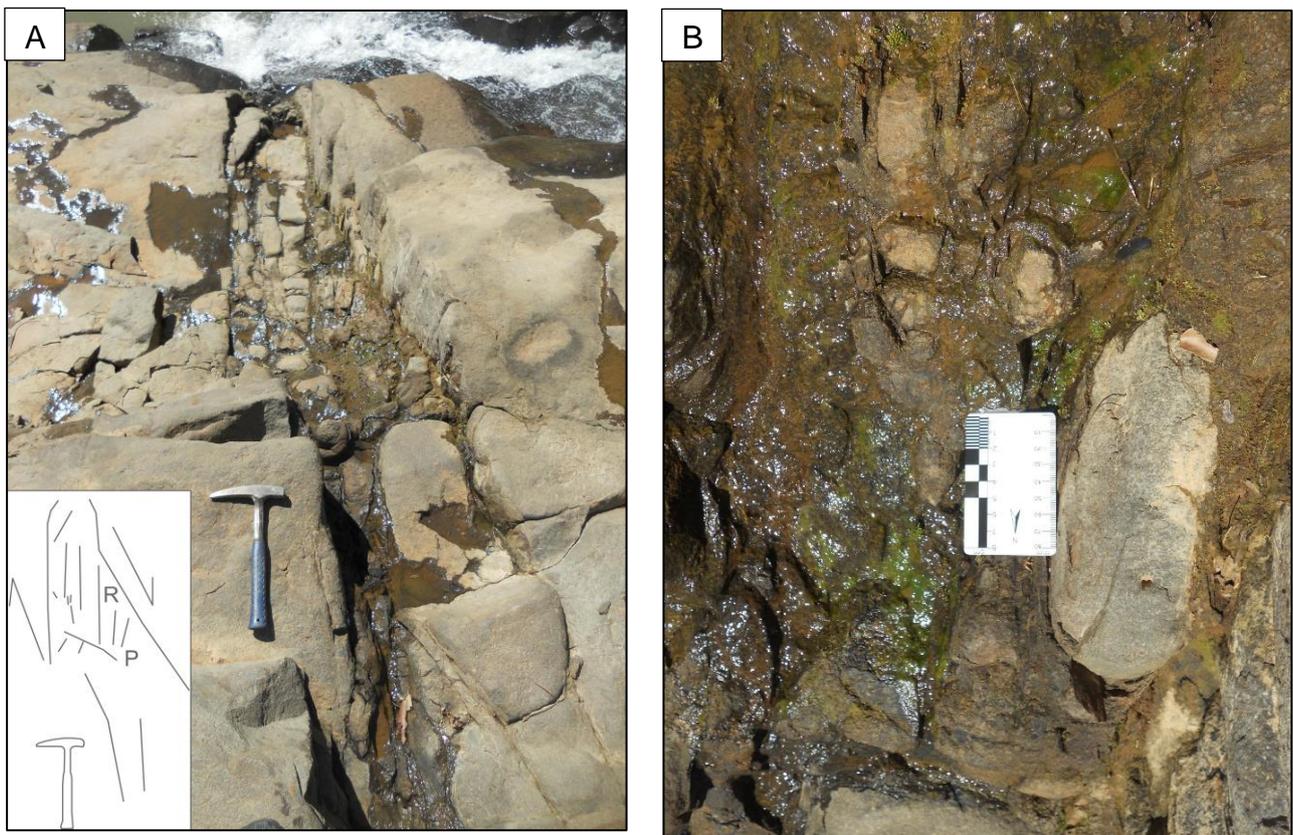


Figura 42: Zona de cisalhamento de sentido transcorrente dextral localizada na margem esquerda a jusante da barragem, no ponto 08. (B) preenchimento de óxido de manganês nas fraturas abertas do mesmo ponto.

6.2.2 Família NW-SE

As estruturas NW-SE são comuns em praticamente todos os afloramentos mapeados e ocorrem com geometria planar a ondulada. Estas famílias de fraturas manifestam-se de forma mais espaçadas apresentam menor grau de penetratividade, comparado à família de fraturas NE-SW. As linhas de fraqueza que configuram juntas são classificadas como subpersistentes e persistentes quando se trata de superfícies de cisalhamento rúptil. A rugosidade das paredes das descontinuidades mapeadas é do tipo plana irregular a recortada lisa e polida com estria em planos de falhas. Apresentam espaçamento métrico a decamétrico, com sistema de fraturas pouco aberto a fechado. As fraturas, quando abertas, são preenchidas por óxido de manganês e carbonato de cálcio.

As falhas que configuram essa série exibem um predomínio de regime cinemático anti-horário (sinistral), secundariamente dextral com fraturas conjugadas para NE-SW. Os melhores exemplos de indicadores de movimento transcorrente de direção NW-SE, foram localizados na pedreira de diabásio (ponto 01) e no túnel de desvio do rio (ponto 10), em que se verificam veios de calcita rompidos em zona de falha, com exposição de estruturas de falha em flor, como pode ser visualizado na Figura 43 e Figura 44 A. Frequentes zonas de cisalhamento, como mostra a Figura 44 B, caracterizadas por um intenso cataclasamento e presença material moído (gouge) nas paredes das descontinuidades (Figura 44 C), também foram identificadas em famílias nesta direção.

No afloramento a jusante da barragem na margem direita (ponto 05), foram identificados possíveis planos de falha de movimento inverso (Figura 45), conjugados ao regime transcorrente. Já no túnel de desvio (ponto 10) foram observadas evidências de falhas normais de regime extensional (Figura 46). Tais estruturas são pouco sistemáticas e frequentes em campo e sua gênese está intimamente ligada ao contexto tectônico transcorrente que gera com estruturas de alívio ou compressão em um mesmo regime de falha.

Nas rochas sedimentares as feições de direção NW-SE ocorrem predominantemente como juntas. No siltito da Formação Serra Alta foi identificado um sistema de fratura microaberto, que caracteriza uma pequena zona de

cisalhamento, apresentado na Figura 45 A.

Estruturas geológicas sub-horizontais de direção NW-SE (Figura 45 B) foram identificadas nas intrusivas básicas da Formação Serra Geral, porém não são correlacionadas a eventos tectônicos regionais e sim ao alívio de tensões ocasionado pelo resfriamento do magma e/ou a retirada da coluna listostática de sedimentos. Tais estruturas são denominadas de juntas de alívio e apresentam espaçamento centimétrico e fechada.



Figura 43: Plano de falha transcorrente com estrutura em flor de direção NW-SE mapeada na pedreira de diabásio no ponto 01.

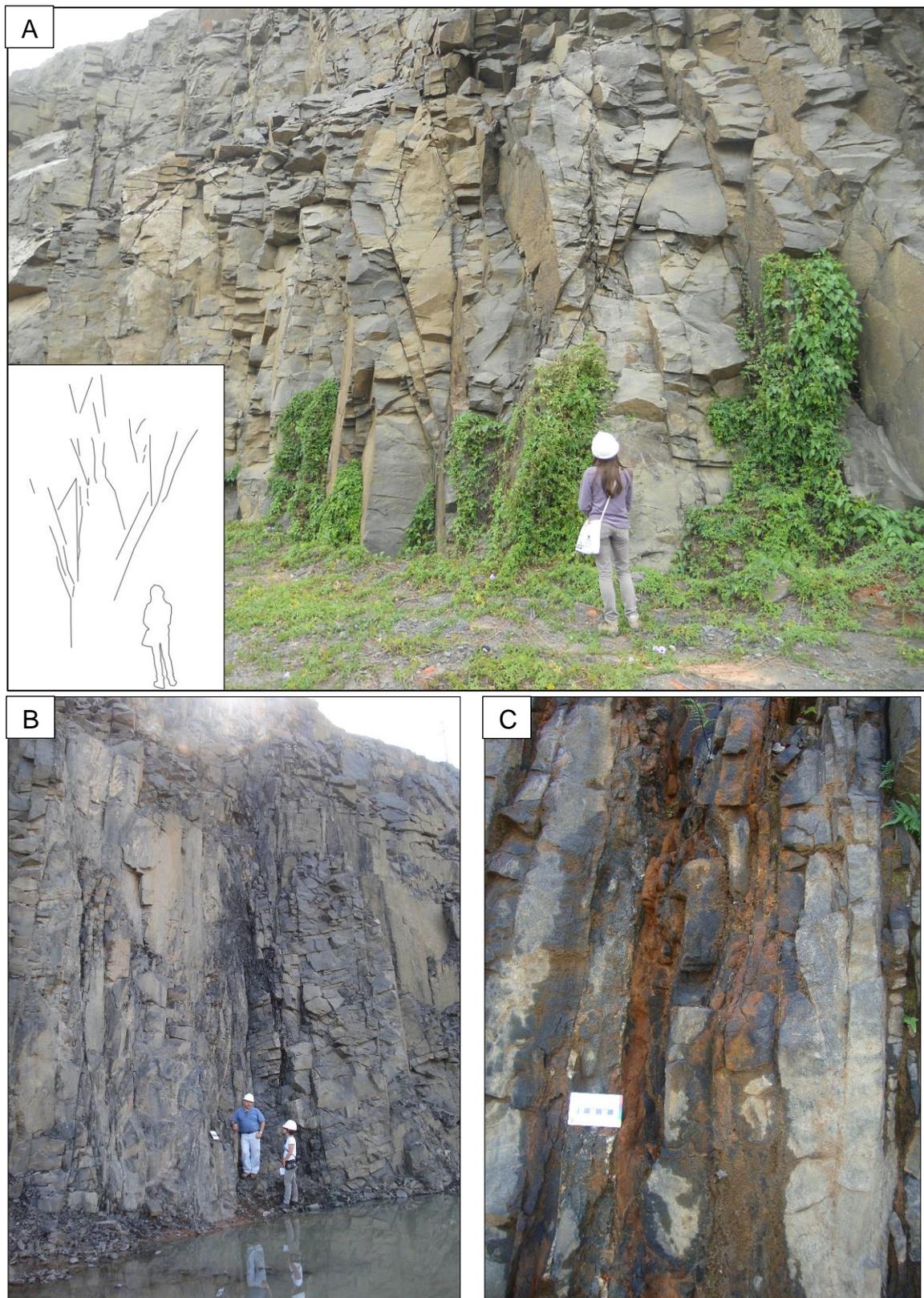


Figura 44: (A) estrutura em flor associada à falha transcorrente no ponto 01. (b) zona de cisalhamento de direção NW-SE. (C) Z. C com óxido de manganês percolando as fraturas.



Figura 45: (A) Falha conjugada de movimento inverso identificada em afloramento da margem direita a jusante da barragem no ponto 05. (B) Zona de cisalhamento de movimento sinistral mapeada nos sedimentos da Formação Serra Alta no ponto 07.

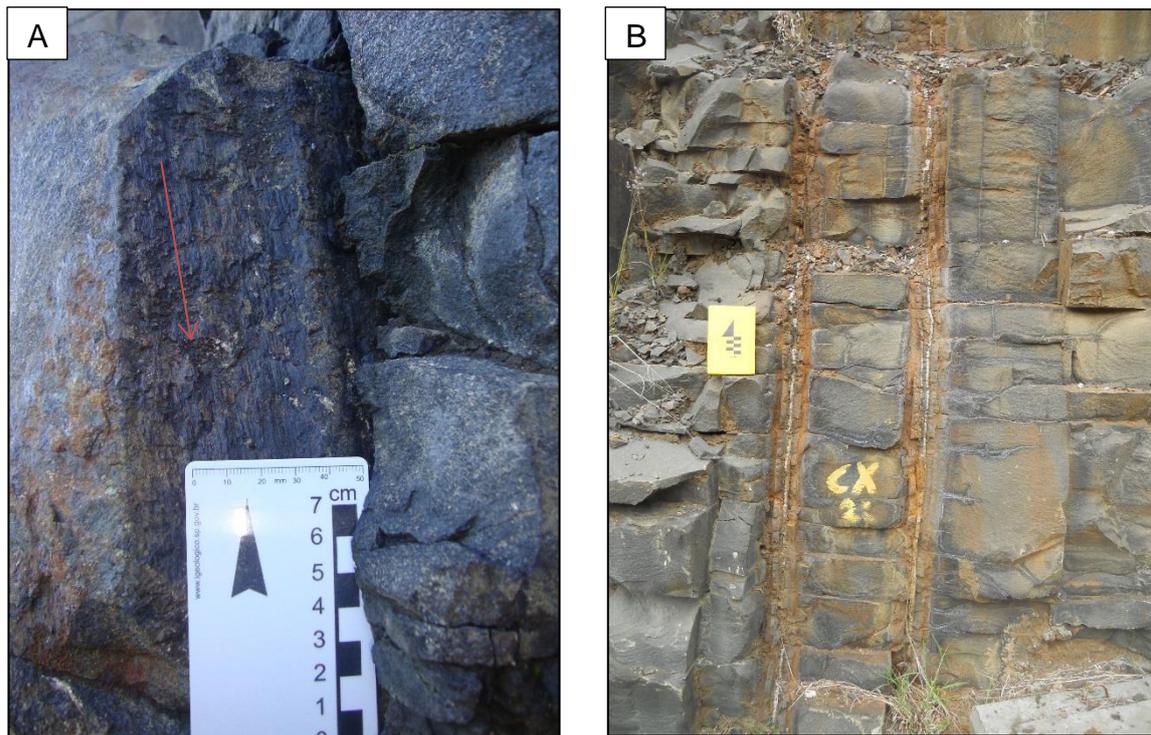


Figura 46: (A) Plano de falha normal com intercrescimento de pirita. (B) Fraturas sub-horizontais de direção NW cortadas por estrutura verticais de direção NE.

6.2.3 Família N-S

A presença de fraturas na direção N-S foi observada em toda a região percorrida, porém de forma menos frequente e pouco penetrativa comparadas às demais famílias. As estruturas associadas a essa família apresenta-se bem espaçadas, com distância métrica, geralmente decamétrica entre cada plano de fraqueza. As fraturas desse sistema ocorrem predominantemente como juntas planares, levemente curvilíneas e de caráter não persistente. As superfícies de fraquezas apresentam rugosidade do tipo plana lisa a irregular.

No afloramento da Formação Palermo, próximo à câmara de carga (ponto 03) e na pedreira de diabásio (ponto 01), foram mapeadas discontinuidades com catáclase e estruturas em flor negativa (Figura 47), configurando movimentos direcionais transcorrentes de sentido anti-horário. Os planos de falhas, assim como, as juntas pertencentes a essas famílias ocorrem de forma pouco penetrativa, por vezes, como pares conjugados de sistema de falha NE-SW. Na região do antigo refeitório, em sedimentos da Formação Serra Alta, foi possível estabelecer uma relação espacial entre as demais famílias de fraturas, na qual se

observa o plano de fratura N-S cortado pelas demais estruturas (Figura 48).

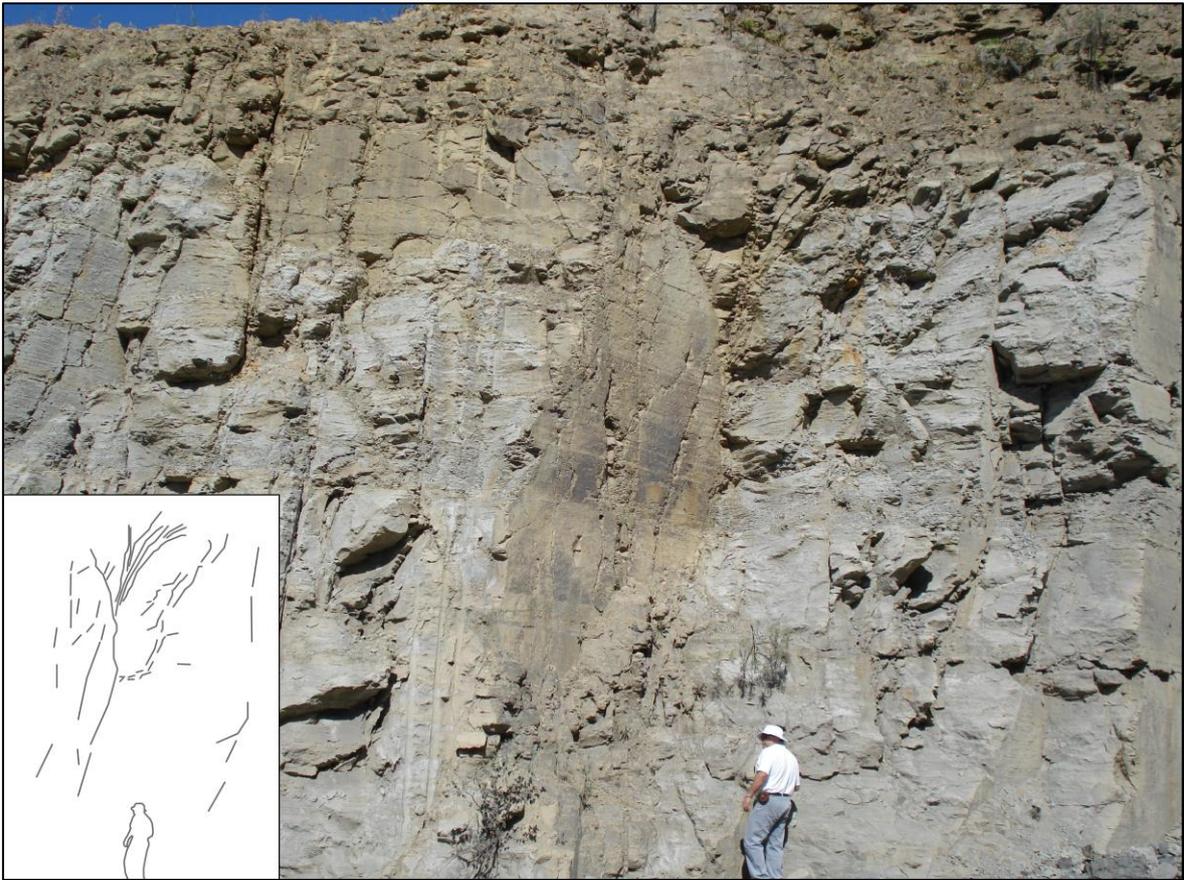


Figura 47: Descontinuidade transcorrente sinistral com estrutural em flor nos sedimentos da Formação Palermo próximo à câmara de carga no ponto 03.



Figura 48: Plano de junta cortado por fratura E-W a montante do reservatório, no ponto 04.

6.2.4 Família E-W

Essa família de fratura é marcada por feições planares a anastomosadas, o que resulta em pequena variação de atitude entre as direções de N80W e N80E. São de caráter sistêmico, com penetratividade regular e subpersistentes. Normalmente apresentam rugosidade plana lisa a irregular. Configuram em sua maioria, juntas fechadas. Os planos de falhas, identificados na pedreira de diabásio (ponto 01) e na margem esquerda da barragem (ponto 15) configuram feições longas e retilíneas de regime transcorrente e cinemática sinistral (Figura 49).

No ponto 04 (Figura 50), ao lado do antigo refeitório, foram mapeadas juntas planares penetrativas com espaçamento métrico, em uma zona de falha com planos de fratura conjugados (Y, R e X), de movimento dextral (Figura 50). No túnel de desvio do rio, nestas direções, foram identificadas feições cinemáticas de falhas normais.

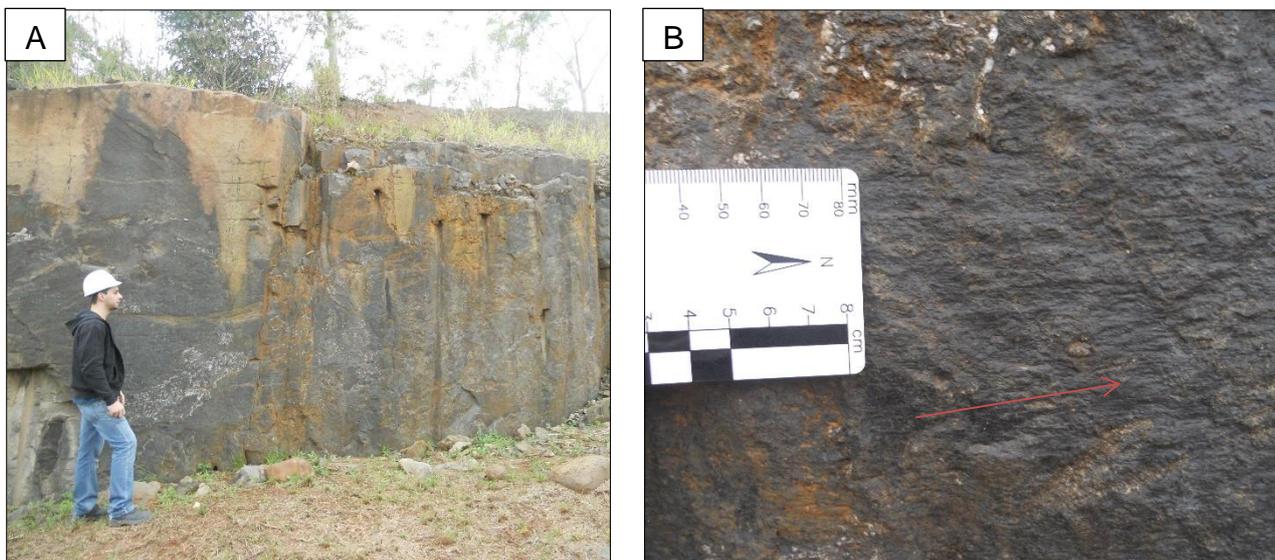


Figura 49: (A) Plano de fratura de direção E-W próximo à margem direita da barragem no ponto 15. (B) plano de falha com estria indicando movimento sinistral no diabásio do ponto 15.

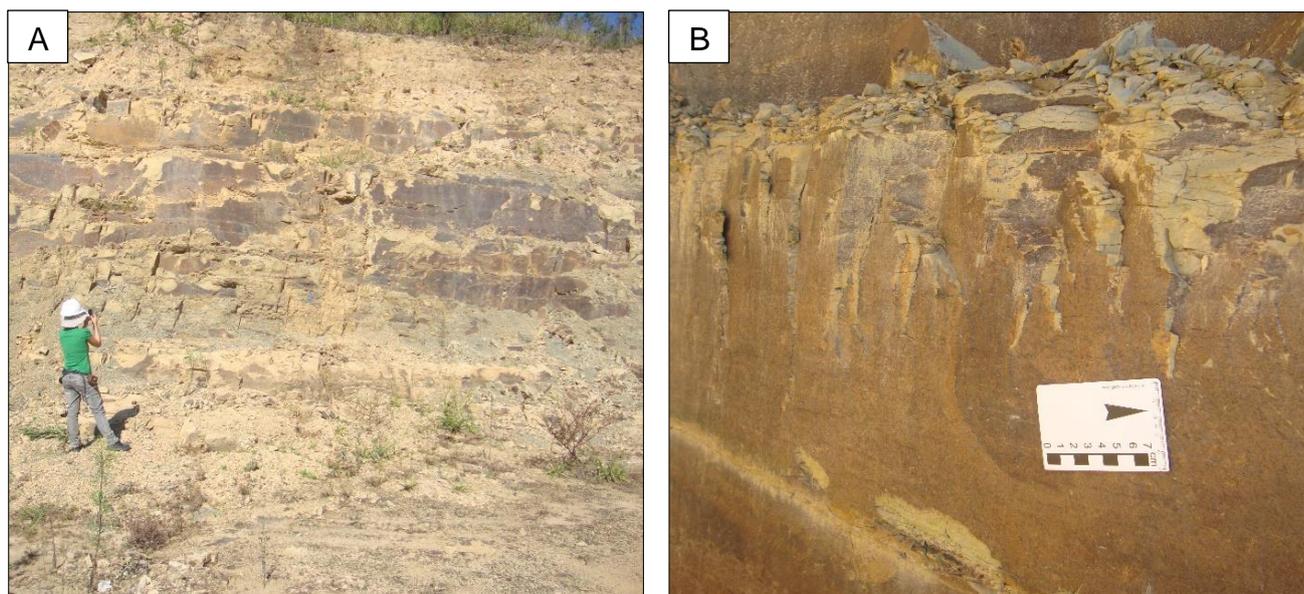


Figura 50: (A) Plano de fratura E-W com grande persistência no afloramento do ponto 4. (B) fratura associada ao modelo Riedel com estruturas Y, R e P indicando cinemática dextral.

6.2.5 Estruturas Lineares

As estrias de atrito (*slickensides*), associadas ao conjunto de degraus (*steps*) em planos de descontinuidade configuram espelhos de falhas, definidos por superfícies polidas de aspecto irregular a lisa. Tais estruturas representam linhas ou lineações em superfície de rocha que se estendem em uma direção principal, geralmente paralelos ao sentido de deslocamento.

As lineações identificadas em campo são produtos de eventos tectônicos rúpteis e ocorrem em superfícies de fraturas de cisalhamento (Figura 51), que foram utilizadas como indicador cinemático dos blocos rochosos da região. Tais estruturas são recorrentes, principalmente, em soleiras e diques de diabásio da Formação Serra Geral.

A partir da abertura do sistema de falhas ocorre a percolação de fluidos, resultantes do alívio da pressão litostática gerada em decorrência do soterramento promovido pela deposição das rochas da Formação Serra Geral, com consequente cristalização de minerais de pirita, calcita (carbonato de cálcio apresentado na Figura 52) e filmes de óxido de manganês na superfície da descontinuidade. O preenchimento de fraturas abertas indica a disponibilidade de cátions e íons para a cristalização, provenientes de soluções hidrotermais circulantes nas fraturas.

As fraturas preenchidas, principalmente por calcita apresentaram duas direções principais N60-70E e N60W (Figura 53) e foram associadas a regimes de abertura de sistema que afetam os litotipos da região. Exposições destas estruturas são localizadas, principalmente, na pedreira de diabásio (ponto 01), no túnel de desvio (Ponto 10) e na margem direita a jusante da barragem (ponto 05).

No geral as fraturas mapeadas da região da UHE Mauá apresentam direções preferenciais à NE/SW, seguidas das NW/SE e subordinadamente para N-S e E-W.

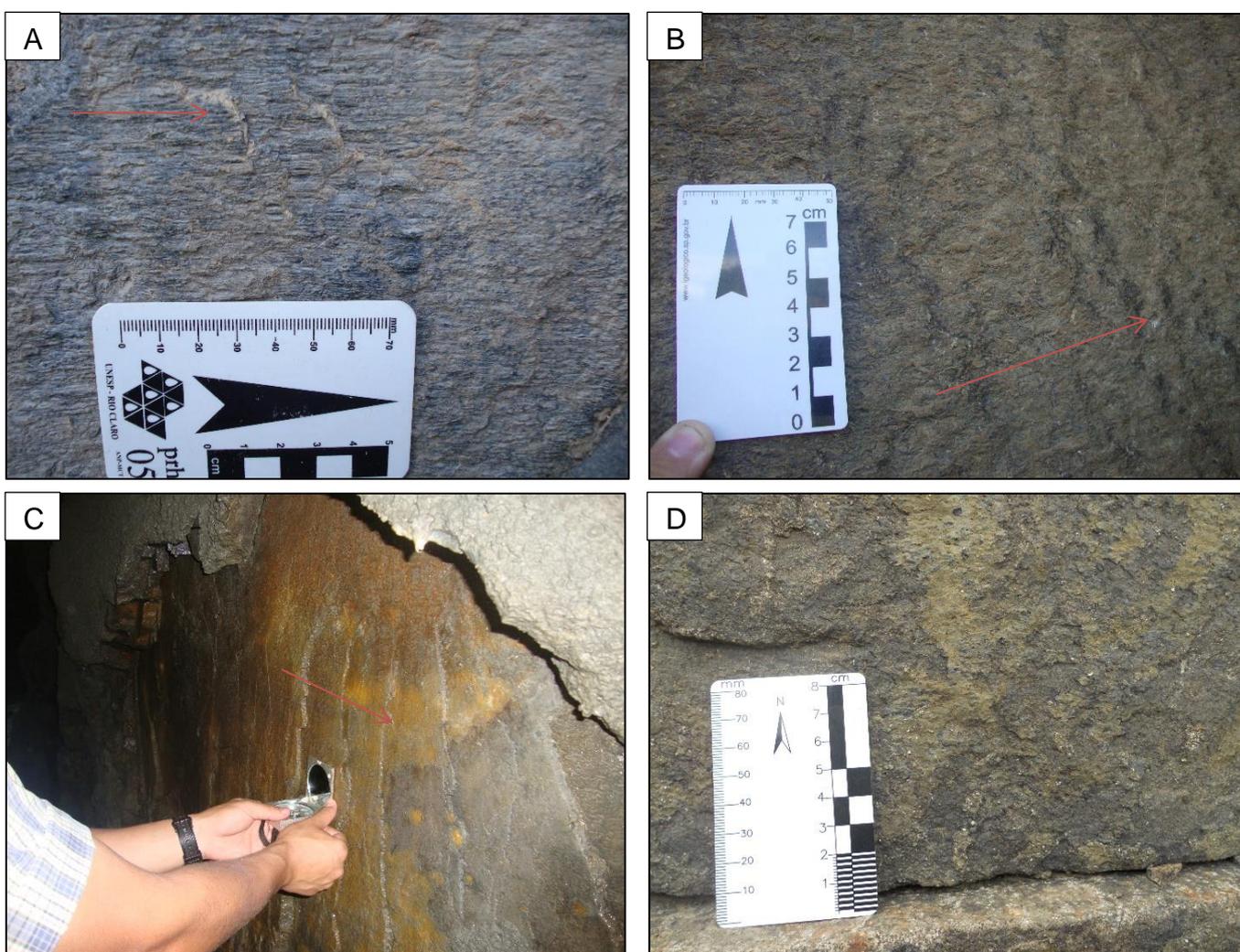


Figura 51: (A) e (B) Plano de falha com estrias e *steps* de cinemática sinistral na pedreira de Diabásio (Ponto 01). (C) Plano de falha com *steps* indicando movimento sinistral no túnel da câmara de carga (ponto 10). (D) Plano de falha com intercrescimento de pirita identificado na pedreira de diabásio (ponto 01).

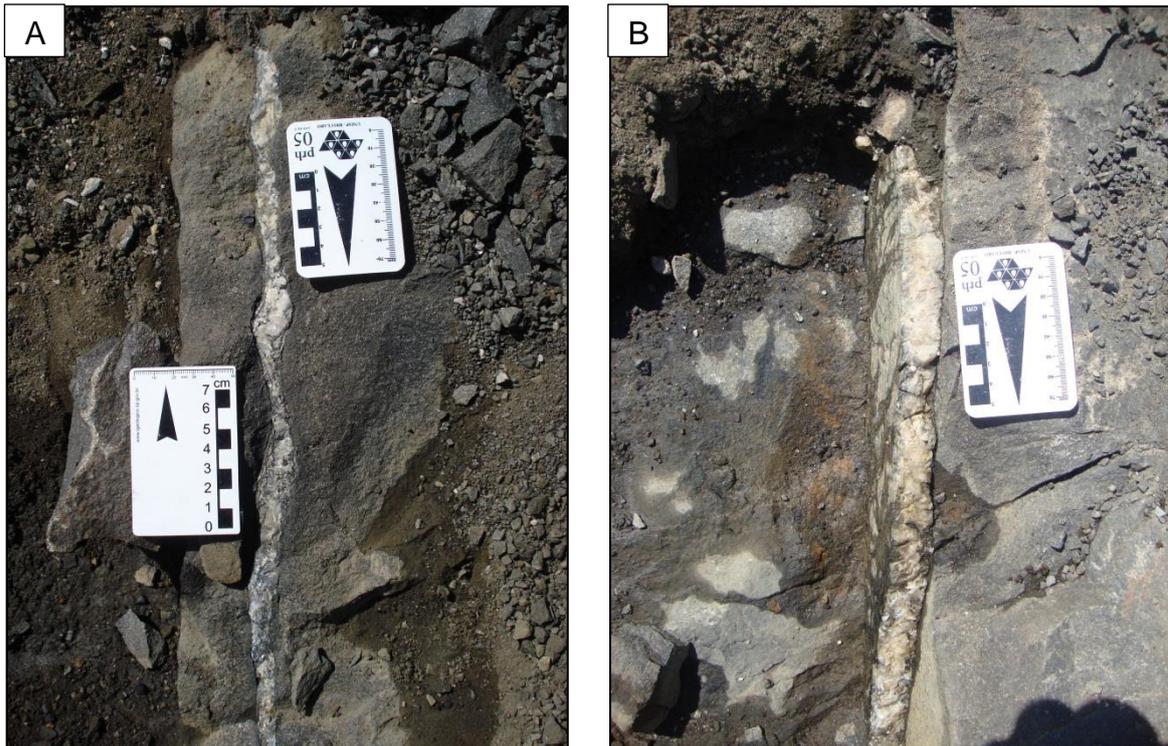


Figura 52: Fraturas preenchidas por calcita euédrica (A) Veio de calcita em formato sigmoide. (B) Fratura preenchida por calcita com estrias de falha no plano exposto do veio.

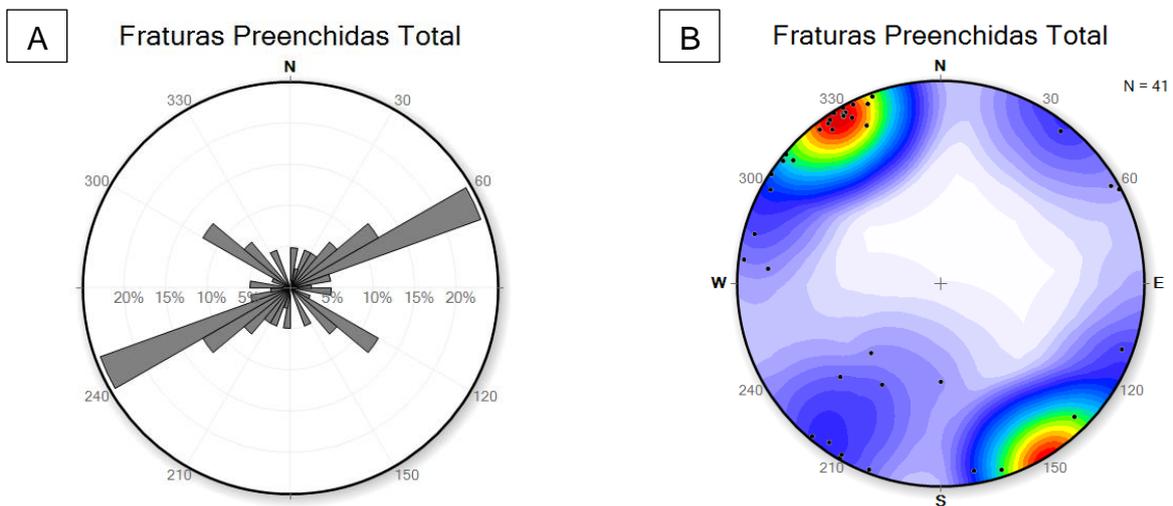


Figura 53: Diagrama de roseta (A) e contorno (B) com disposição dos principais direções de fraturas preenchidas na região de estudo.

6.3 ANÁLISE DINÂMICA

A partir dos dados espaciais obtidos em falhas mapeadas em campo, referentes aos aspectos geométricos e respectivos indicadores cinemáticos, tais como estrias e *steps* no plano da falha, foi possível definir os regimes tectônicos que deformaram o maciço rochoso na região da UHE Mauá. Com o intuito de identificar os esforços causadores da deformação e, conseqüentemente, das estruturas rúpteis predisponentes e/ou suscetíveis a reativações ou acomodação do maciço sob a barragem, foi executada a análise e interpretação das paleotensões responsáveis pelo antigo movimento rochoso na região de estudo.

Para tal análise foi utilizado um total de 86 atitudes estruturais que abrangem todas as unidades geológicas mapeadas no entorno da UHE Mauá. Os dados dos planos de falha e indicadores cinemáticos foram inicialmente analisados no *software* Sigmas, que possibilitou o cálculo da posição espacial dos paleotensores σ_1 , σ_2 e σ_3 . Posteriormente, no *software* Stereonet foram confeccionados diagramas de contorno para cada eixo de tensão, conforme a Figura 54, com o objetivo de distinguir possíveis campos preferenciais de esforços. Para obter uma melhor correlação entre os dados também foi utilizado o *software* WinTensor para confecção de diagramas estruturais.

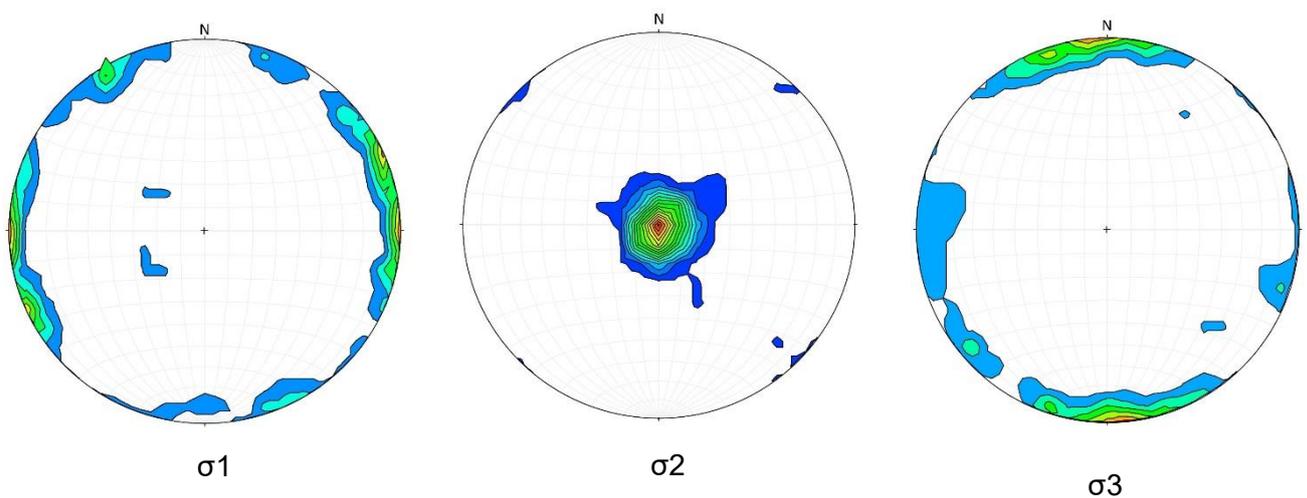


Figura 54: Diagramas de contorno para os tensores σ_1 , σ_2 e σ_3 dos pontos mapeados na área de estudo.

A análise de todos os dados, mostrado na Figura 54, é característico de regimes transcorrentes, posto que a paleotensão σ_1 está posicionada nas extremidades do estereograma de contorno, a paleotensão σ_2 posicionada na região central e a paleotensão σ_3 nas extremidades perpendiculares ao σ_1 . Tal exame revelou uma maior frequência e acúmulo estatístico de esforços, representados por cores vermelhas, amarelas e verdes no horizonte E-W, variando poucos graus para ENE e WNW. Ainda nestes diagramas há uma dispersão nos eixos de paleotensão entre as direções N30-40W, que estabelecem para as fraturas presentes na área de estudo dois sistemas preferenciais de deformação rúptil.

Com intuito de identificar/separar as fases deformacionais e sua cronologia foram confeccionados diagramas de paleotensão tanto para as rochas intrusivas do mesozoico, quanto para as rochas sedimentares paleozoicas, conforme ilustra a Figura 55. Porém, como consequência da diferença de competência entre rochas sedimentares e ígneas, nas soleiras de diabásio os indicadores cinemáticos estão melhores impressos em suas descontinuidades. Assim contabiliza-se um total de 75 atitudes de falhas e apenas 11 medidas estruturais em rochas sedimentares.

Para as descontinuidades que configuram superfícies de cisalhamento e afetam as rochas intrusivas da Formação Serra Geral foi evidenciada uma concentração de paleotensão σ_1 na direção E-W, com sutil dispersão para NW-SE (Figura 55). Tal conclusão, conforme mencionado anteriormente corresponde à quase totalidade de dados da região e se mantém idêntico ao conjunto de resultados obtidos para todos os planos de falhas.

A Figura 55 apresenta as conclusões obtidas a partir do processamento de dados. Nas falhas mapeadas nas rochas intrusivas (Figura 55C), pelo *software* Tensor, verificou-se um acúmulo de paleotensões na direção ESE-WNW, com azimute de N108°/02°, que representa a média de medidas do tensor σ_1 . No mesmo quadro, é possível observar o gráfico dos diedros retos, que simbolizam em amarelo as faixas compressivas e em azul as regiões distensivas. Já nos sedimentos analisados foi obtido um quadro com maior acúmulo estatístico de paleotensões para a direção N20-30E, e predomínio de movimento sinistral (Figura 55 D). Tal feição é observada no quadro geral dos paleotensores, porém

com pouco significado estatístico, pois representam apenas 5,81% do quantitativo de 86 medidas.

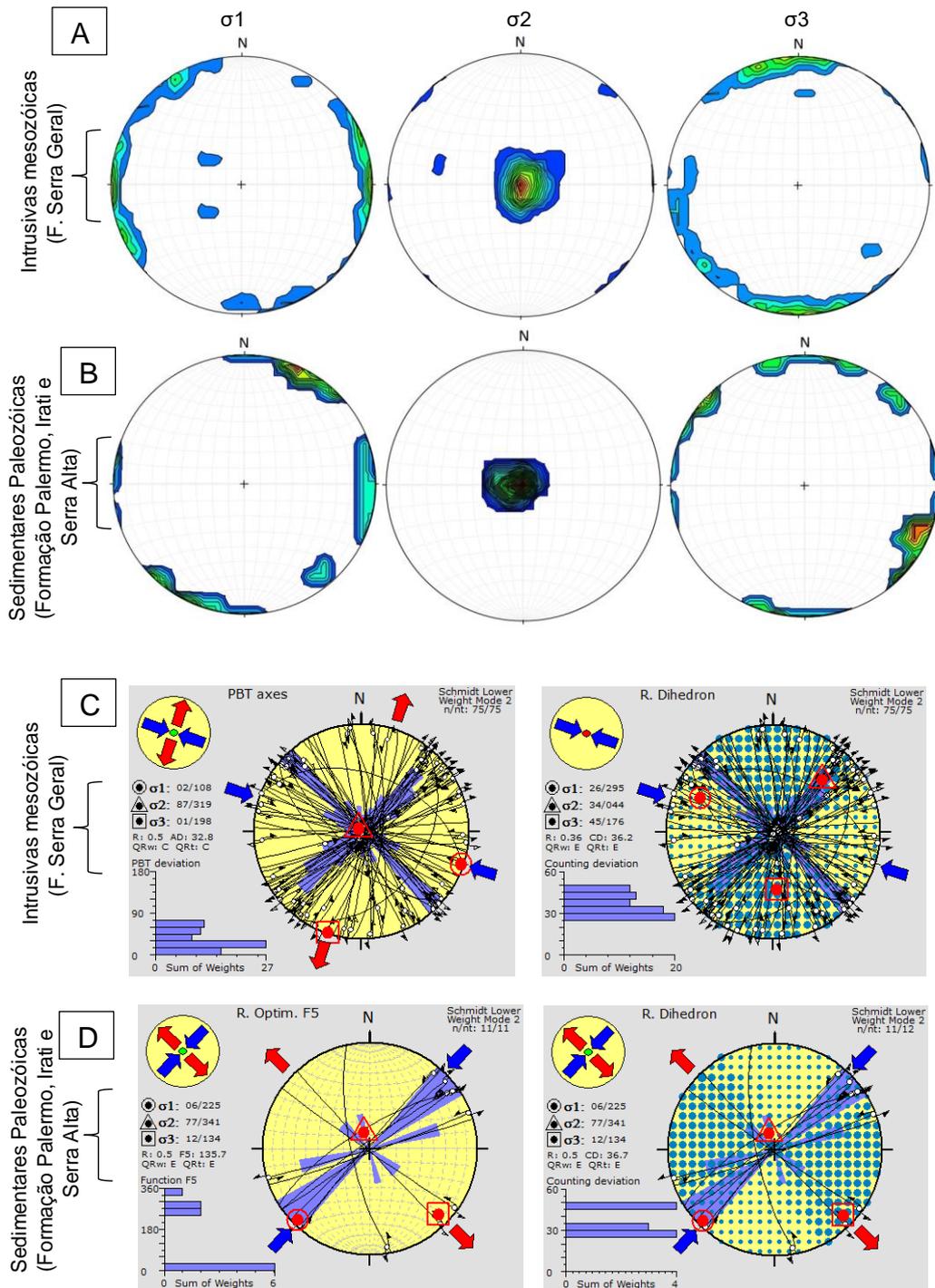


Figura 55: Diagramas estruturais de paleotensores para as rochas básicas (A) e sedimentares (B), obtidos de planos de falhas mapeados em campo (*software Sigmas*). Diagramas estruturais de paleotensores para as rochas básicas (C) e sedimentares (D), obtidos de planos de falhas mapeados em campo (*software WinTensor*).

A partir da análise dos paleotensores e correlação bibliográfica, dentre elas, Strugale (2002), que realizou estudos próximos à área em questão, foi

possível estabelecer dois eventos de deformação distintos, denominados, neste trabalho, de D1 e D2. A separação destes regimes de esforços foi realizada por meio da diferença de características geométricas e cinemáticas entre as descontinuidades e principalmente devido a relação espacial das concentrações de campos máximos de esforços σ_1 , σ_2 , σ_3 .

6.3.1 Evento D1

As estruturas rúpteis associadas ao este evento são resultado de uma tectônica transcorrente com componente transtrativo. As falhas são dextrais de direção N40-50W, antitéticas à N10-20W e conjugadas sinistras de sentido N40-50E (Figura 56). Tais descontinuidades apresentam expressão local, restrita a pequenas extensões de alguns afloramentos mapeados com um total de 29 medidas. O produto dessa deformação é observado tanto em soleiras de diabásio quanto em rochas sedimentares da Formação Palermo.

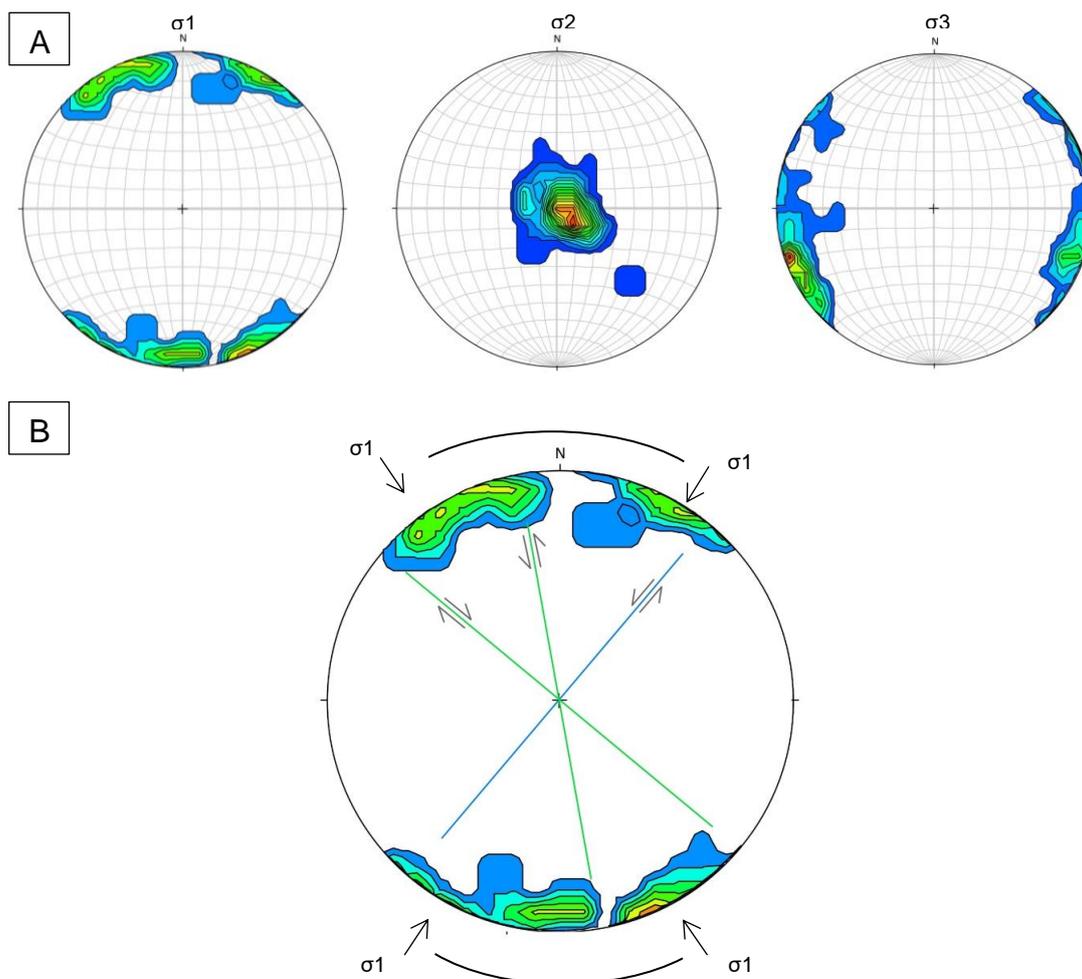


Figura 56: Diagramas estruturais de paleotensores para as falhas relacionadas ao evento D1(A) Diagramas de contorno para os paleotensores σ_1 , σ_2 e σ_3 (B), Falhas transcorrentes formadas conforme variação do tensor σ_1 próximo aos polos no evento D1.

Ainda no evento D1, nas rochas intrusivas da Formação Serra Geral a deformação é representada principalmente por zonas de cisalhamento e falhas de direção NW-SE com movimento dextral, além de falhas secundárias com cinemática sinistral para NNW-SSE, NNE-SSW e N40-60E. A pedreira de diabásio (ponto 01) é o local com maior acúmulo de feições mapeadas pertencentes a esse evento tectônico e apresenta estruturas em forma de flor negativa com zonas de cisalhamento em falhas de direção NW-SE, que evidencia um regime transtrativos para os paleotensores atuantes. No túnel de desvio (ponto 10) as descontinuidades de direção NW-SE exibem cinemática dextral com regime de reativação normal.

O registro da deformação resultante do evento D1, nas rochas sedimentares, principalmente nos arenitos da Formação Palermo, resulta em fraturas escalonadas sintéticas do tipo R de Riedel, com direção NE-SW e planos de falhas N50E, ambos de cinemática sinistral. Associado a esse evento, no ponto 03 próximo a câmara de carga, foi observada uma estrutura em flor negativa (Figura 47 família N-S) de direção N12W com caráter pouco penetrativo e cinemática sinistral.

Nas demais unidades sedimentares da região não foi possível adquirir dados estruturais referentes à cinemática e, conseqüentemente, identificar uma possível cronologia entre as descontinuidades (juntas) que afetaram o substrato.

Nas intrusivas da Formação Serra Geral o campo de esforço máximo σ_1 localiza-se na direção NW-SE, já nos sedimentos da Formação Palermo (Figura 55) o mesmo está locado na direção NE-SW, o que demonstra uma possível rotação dos eixos de deformação rúptil associados ao evento D1.

6.3.2 Evento D2

O evento tectônico D2 expõe a maior quantidade de estruturas geológicas de regime rúptil impresso nas rochas ígneas básicas da Formação Serra Geral e sedimentares paleozoicas, com indicadores cinemáticos. No diabásio, em função da reologia da rocha, os indicadores de movimentos são melhor desenvolvidos e é comum a presença de *steps* e estrias. A geometria das estruturas rúpteis resultantes deste evento de deformação retrata um

quadro complexo de cisalhamento rúptil direcional com sistemas regionais análogos de falhas com constantes zonas de cisalhamento e brechas de falhas.

As informações obtidas em campo, associadas à interpretação das paleotensores indica um campo de esforço máximo com grande amplitude do paleotensor σ_1 no eixo E-W, variando 20° para ENE-WSW e WNW-ESE, com fraturas de direções diversas compatíveis com tal dispersão. Para este evento foi caracterizado um total de 57 medidas de planos de falhas, que apresentaram de um modo geral, para esta fase de deformação, um regime transcorrente com direção entre N40-60E de cinemática dextral e pares conjugados sinistrais à N40W (Figura 57).

Além destas feições estruturais, como consequência da rotação dos campos de tensão máxima, há a formação de descontinuidades com rejeitos direcionais de cinemática dextral e sentido E-W que secciona as demais famílias de fraturas, identificadas em campo (Figura 48). As superfícies de descontinuidades E-W configuram falhas longas e planares com concentração de cisalhamento, porém com baixa expressão regional.

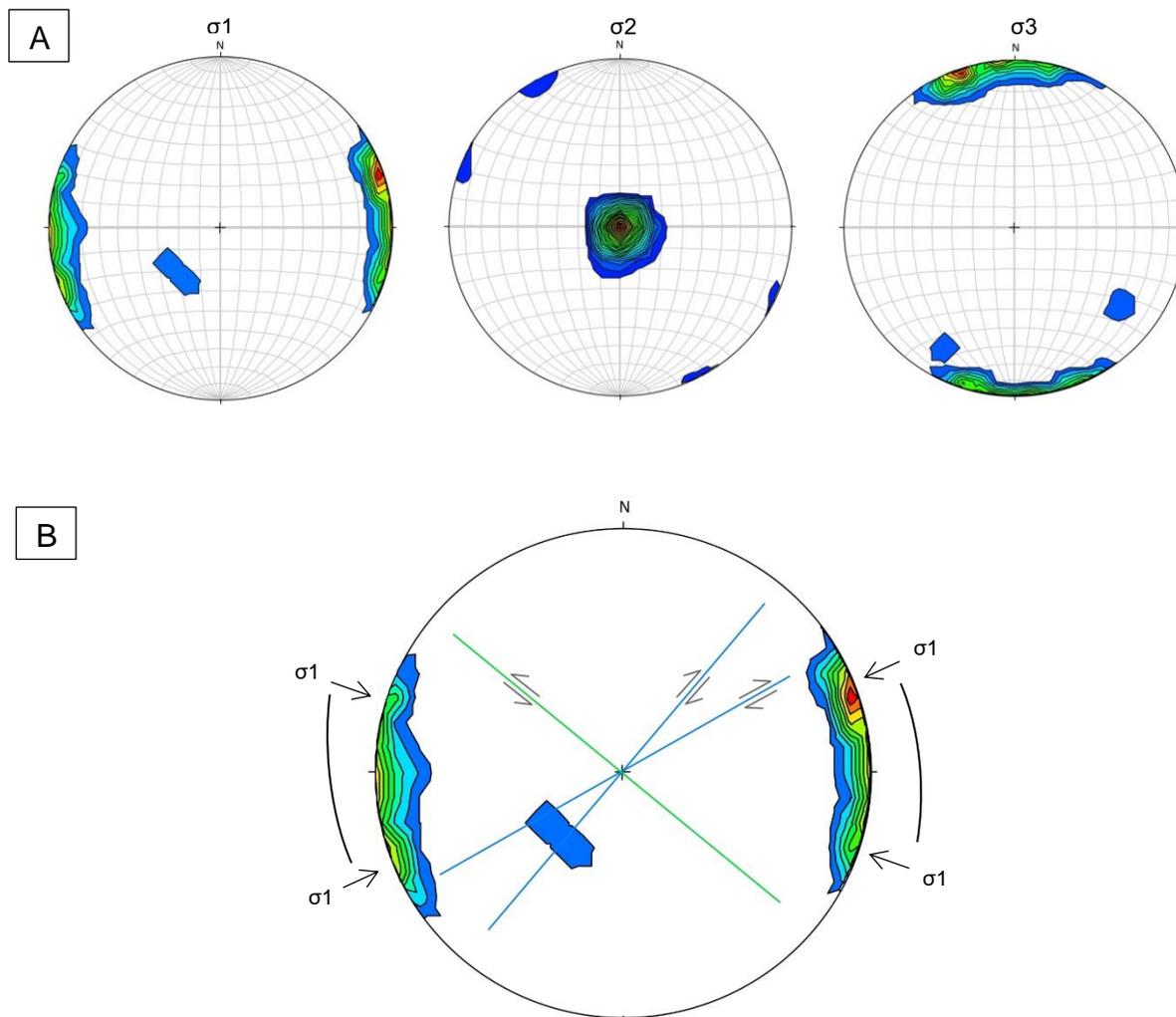


Figura 57: Diagramas estruturais de paleotensores para as falhas relacionadas ao evento D2(A) Diagramas de contorno para os paleotensores σ_1 , σ_2 e σ_3 . (B) Falhas transcorrentes formadas conforme variação do tensor σ_1 no evento D2.

Nas unidades sedimentares este evento é significativo, porém com feições de falhas pouco expressivas, com exceção para os siltitos da Formação Serra Alta (Figura 50). Nesta unidade, no afloramento situado na margem esquerda da barragem, local este inundado pelo reservatório (ponto 04), ocorre à conjugação de fraturas de direção E-W com truncamento entre planos, o que remete ao modelo de Riedel de fraturamento, caracterizando as fraturas do tipo Y (plano N85E/85SE), X (plano N64E/84NW) e R (plano N80W/85SE) e cinemática dextral.

Já nas soleiras de diabásio os eventos transcorrentes definem zonas de falhas com indícios de abertura, com componente normal e feições geológicas em forma de flor negativa, que indicam alívios de tensões.

Especificamente na pedraira (ponto 01) foi identificado o maior número de

registros de falhas deste evento, com direção NE-SW e variados aspectos geométricos associados, a falhas transcorrentes, com intensa fragmentação das superfícies de falhas e estruturas geométricas em forma de flor, fraturas abertas e fechadas. Nesse local foram identificadas falhas normais de direção NW-SE com cristais euédricos de pirita. No entanto, cabe destacar que no diabásio do ponto 05, a jusante da barragem em sua margem direita, foi descrita uma superfície com *steps* que indicam possível movimento inverso pertencente a esse evento de deformação.

No túnel de desvio (ponto 10), também localizado a jusante da barragem verifica-se a presença de zonas de falhas cataclásadas com calcita e falhas extensionais de movimento normal. As zonas de cisalhamento configuram descontinuidades abertas com material cominuído (*gouge*) em suas paredes.

As fraturas abertas, paralelas aos eixos de paleotensão máximo de cisalhamento (σ_1), conjugado ao plano de falha T (tensional de Riedel), encontram-se geralmente, preenchidas por carbonato de cálcio euédrico, com intercrescimento de pirita em planos de falhas, além de óxido de manganês em zonas de cisalhamento. Tais rupturas são relacionadas ao regime transtrativo do evento de deformação D2, com *trend* principal na direção N60-70E com par de falhas conjugadas a N40-50W, corroborado pela maior quantidade de fraturas preenchidas de direção NE-SW (ver item estruturas lineares).

Em campo foram descritas fraturas preenchidas com *trend* estrutural próximo aos polos N-S correlacionadas às fraturas tensionais influenciadas pela concentração de tensão na direção do evento D1, porém pouco evidentes nas descontinuidades mapeadas na área de estudo.

7 MODELAGEM GEOMECÂNICA

Para a caracterização dos parâmetros geológico-geotécnicos da fundação, obtidos por meio de boletins de sondagem (logs), os dados foram inseridos no software Voxler que simulou geoespacialmente os dados pontuais de alteração, fraturamento, consistência e RQD, em cilindros de diâmetros preestabelecidos de 50m e altura de 10 metros.

Na modelagem realizada, para cada parâmetro analisado, foram observadas zonas com maiores valores de alteração, fraturamento e consistência e baixos valores de RQD, principalmente na região da ombreira direita, segundo a classificação de maciços rochosos da ABGE, descritos nas Tabela 2 a Tabela 5, respectivamente.

Em relação ao parâmetro de alteração, a análise indica que a rocha de fundação, em sua maior extensão apresenta-se pouco alterada a medianamente decomposta e muito alterada na porção direita do rio em seus metros iniciais de sondagem, com poucos minerais reliquias na matriz. Já o parâmetro geotécnico fraturamento apresenta uma variação de valores em toda a extensão da barragem, indicando que o substrato tende a apresentar-se medianamente fraturado a extremamente fraturados ou compartimentando e valores altos (entre 4 e 5) na ombreira que pode estar associado a uma intensa fragmentação da fundação devido a intersecção de diferentes famílias de fraturas, principalmente pelas descontinuidades de sentido NE-SW.

Em consequência desses resultados são apresentadas as modelagens individuais para cada um dos parâmetros. Com a confecção do modelo de alteração e fraturamento foi possível observar, de acordo com a Figura 58 e com a Figura 59, que a área próxima à ombreira direita da barragem apresenta valores críticos para ambos os critérios analisados.

Tanto na Figura 60 quanto na Figura 61, há uma visão tridimensional do terreno e as correlações do parâmetro alteração na região direita da barragem. A escala de cores indicada em cada modelo representa a escala de valores da classificação de parâmetros geotécnicos de 1 a 5 e a interpolação no programa foi realizada por metro de sondagem.

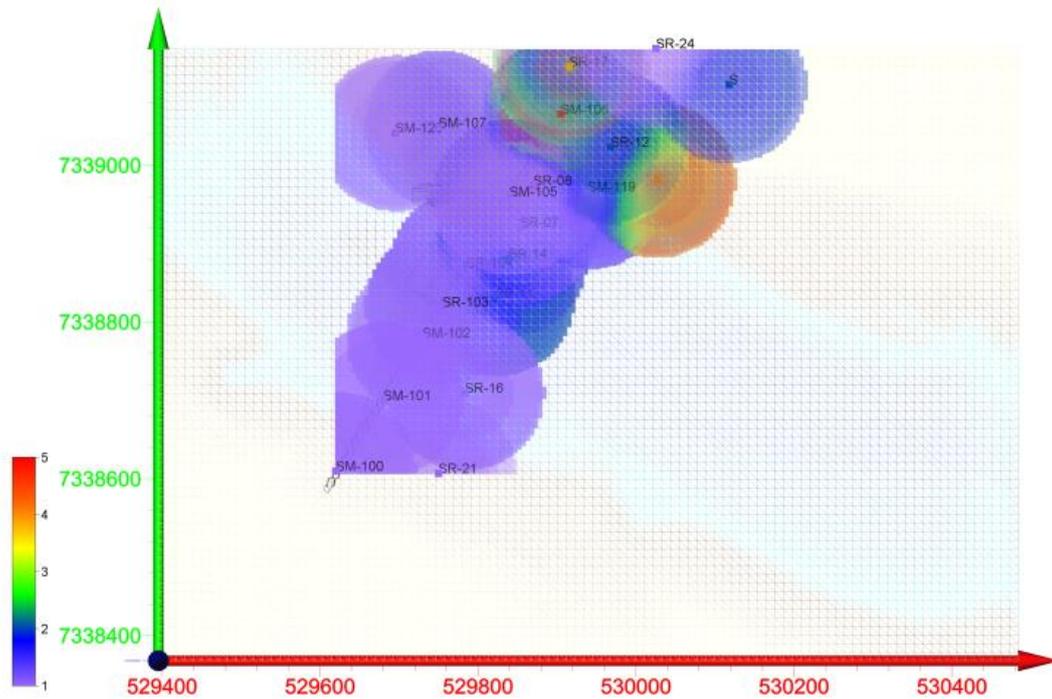


Figura 58: Vista superior do produto da interpolação dos parâmetros geotécnicos de alteração. O norte é indicado pela seta verde.

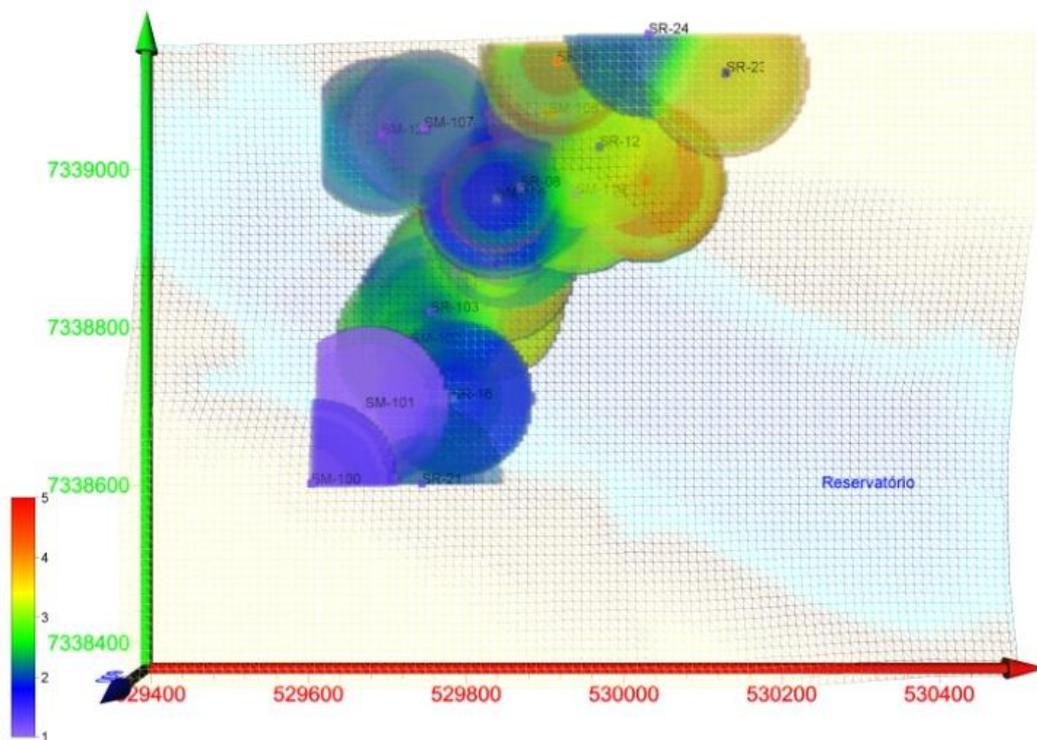


Figura 59: Vista superior com a interpolação do parâmetro geotécnico fraturamento. O norte é indicado pela seta verde.

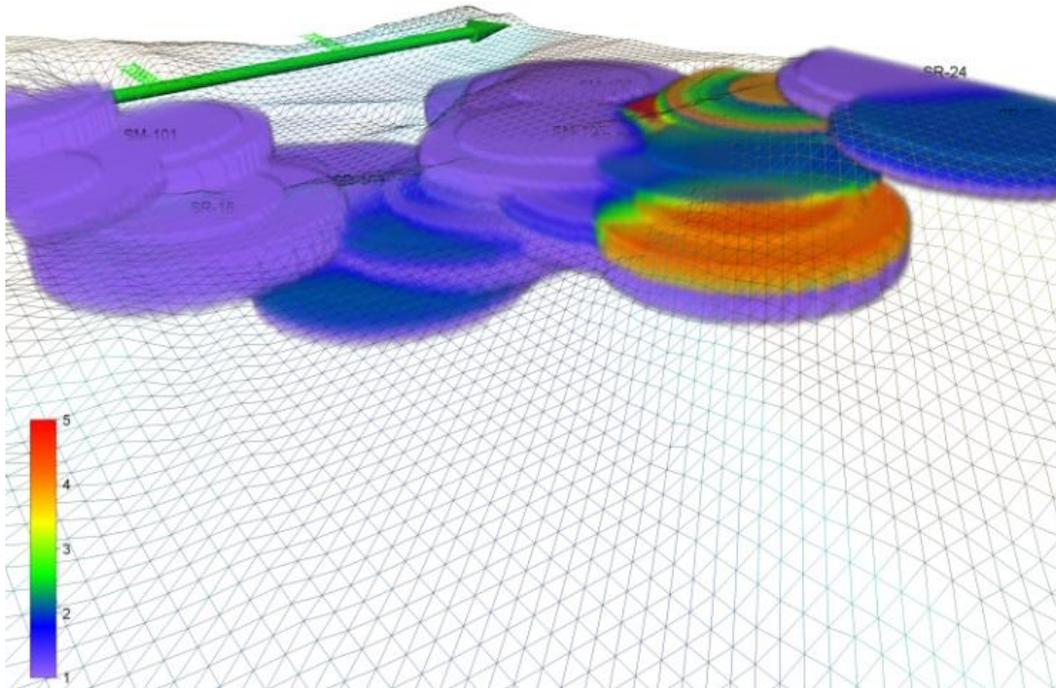


Figura 60: Vista lateral de detalhe dos furos de sondagem, na ombreira direita, do parâmetro alteração. O norte é indicado pela seta verde.

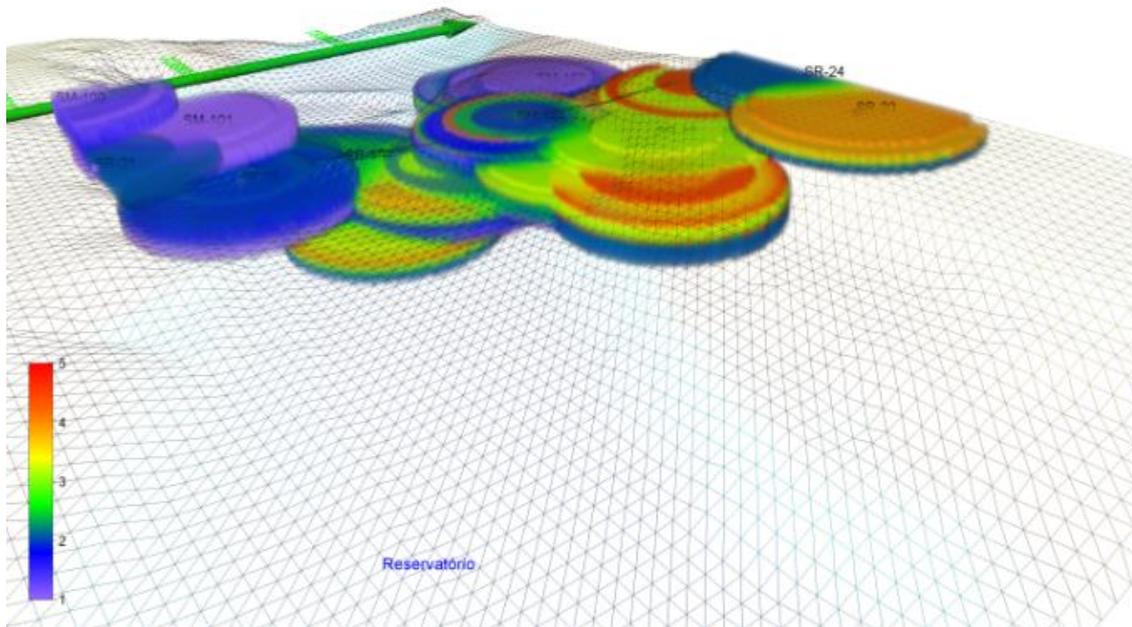


Figura 61: Vista lateral com a modelagem feita a partir do atributo fraturamento. O norte é indicado pela seta verde.

O parâmetro de consistência corresponde a uma forma de avaliação da resistência da rocha através da dureza e é classificado a partir do grau mais consistente para o menos consistente e suas características estão representadas na Tabela 4. Valores de consistência medianas a inconsistentes são encontrados

nesta região da obreira direita como apresenta a Figura 62 e Figura 63, que também estão associados a baixos valores de RQD.

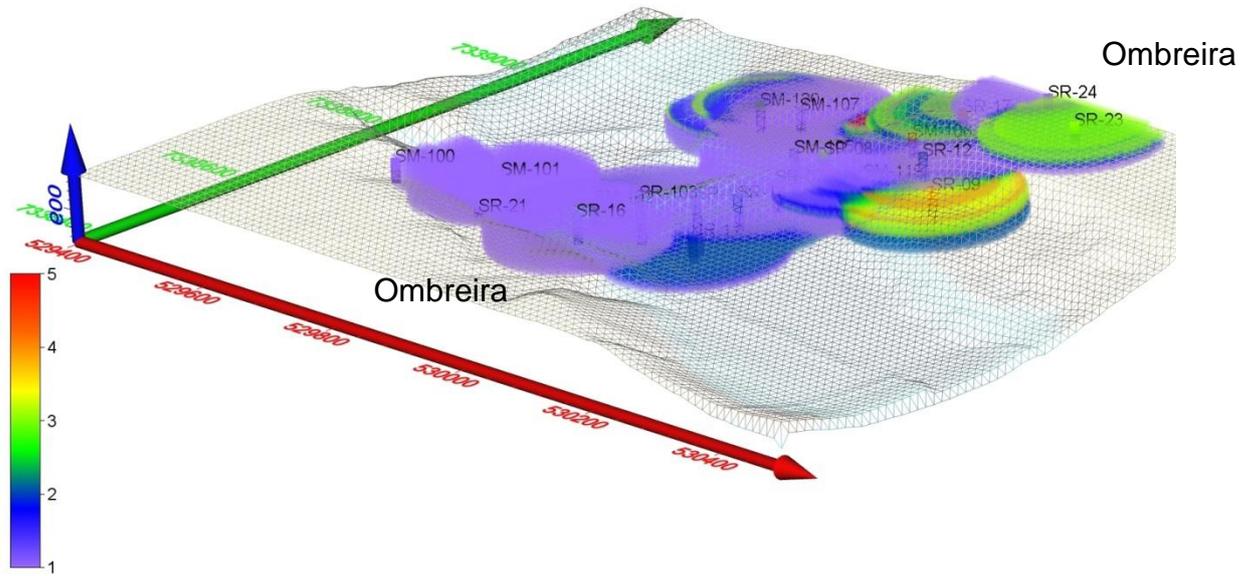


Figura 62: Vista tridimensional representativa do parâmetro geotécnico consistência. O norte é indicado pela seta verde.

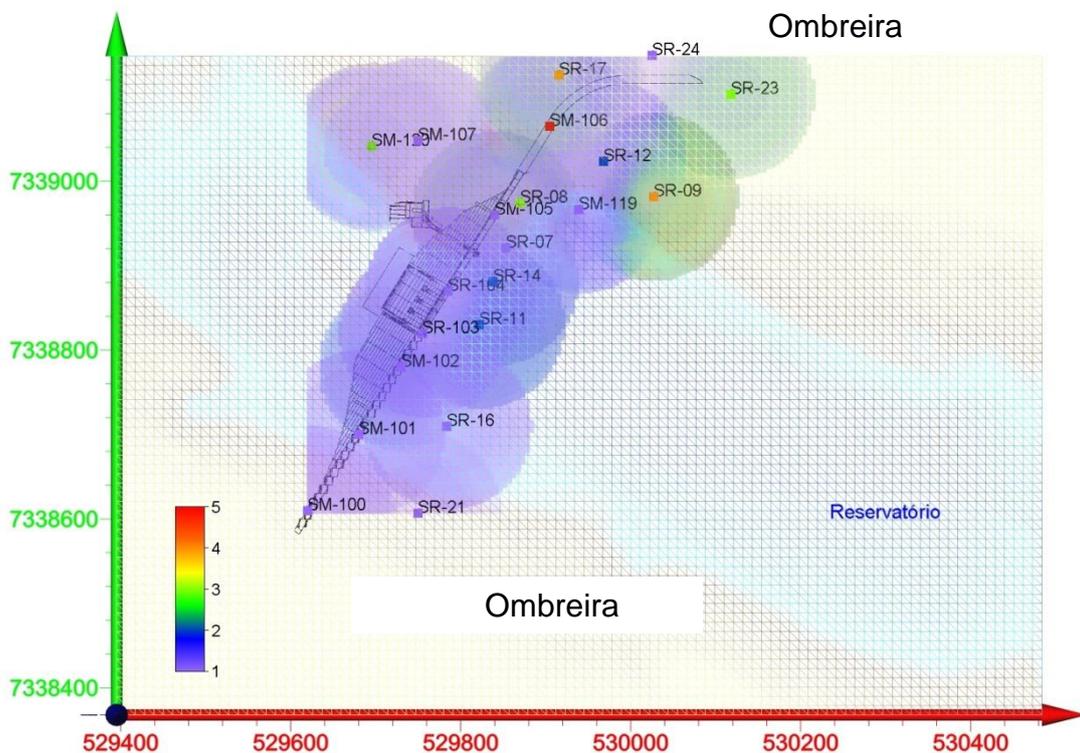


Figura 63: Vista em planta do resultado da interpolação dos valores de consistência o qual é possível identificar que o maciço rochoso mapeado pelos furos SR-09 e SR – 23, na ombreira direita, apresentam uma classificação de pouco consistente em níveis restritos. O norte é indicado pela seta verde.

O parâmetro de RQD representa a relação entre a soma dos trechos de testemunho que tenham individualmente comprimento igual ou maior que 10 cm, excluindo aqueles que foram partidos para acomodação do testemunho na caixa e a extensão da manobra.

O parâmetro RQD apresenta uma escala de valores contrária aos parâmetros geotécnicos analisados anteriormente, uma vez que os valores com classificação excelente, apresenta um valor de 5 representado pelo intervalo entre 90 a 100%, e classificação de muito pobre, valor 1, representado pelo intervalo entre 0 a 24%. A classificação da qualidade da rocha está apresentada na Tabela 5.

A análise feita para o parâmetro RQD, apresentado na Figura 64 e Figura 65, permitiu identificar valores altos na maior parte do maciço, com níveis restritos classificados como regular a pobre, na ombreira direita.

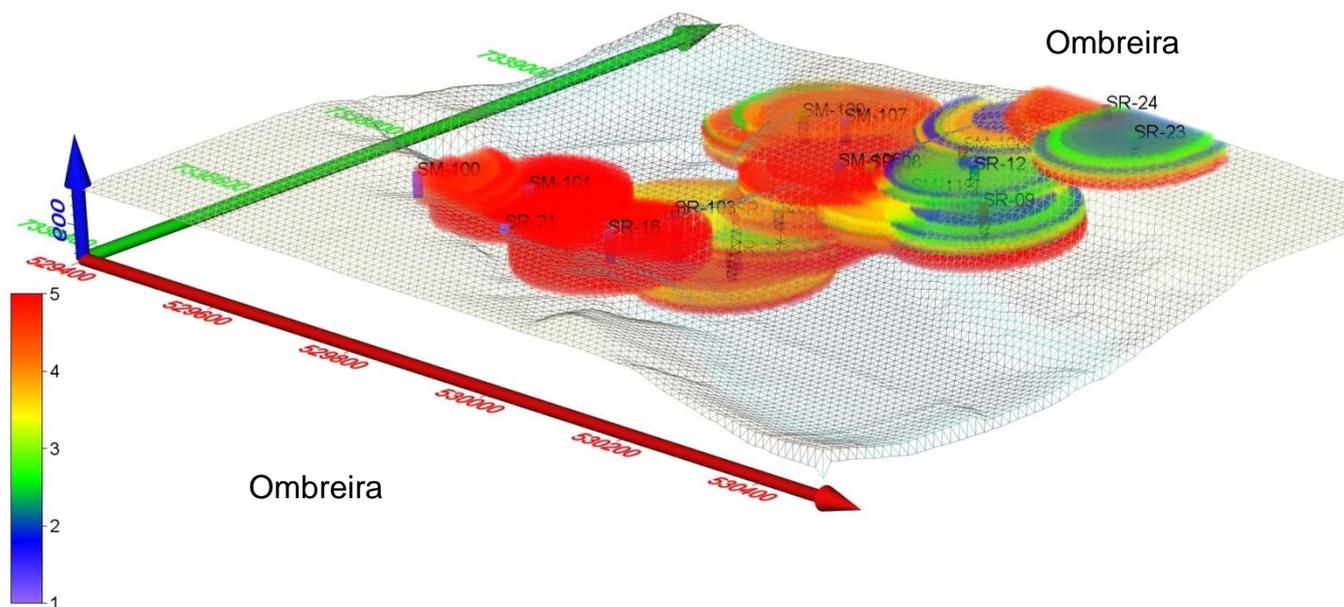


Figura 64: Vista tridimensional representativa da interpolação do parâmetro geotécnico RQD, o qual é possível identificar que o maciço rochoso mapeado pelos furos SR-12, SR-09 e SR – 23, na ombreira direita, apresentam uma classificação de pobre a regular em níveis restritos. O norte é indicado pela seta verde.

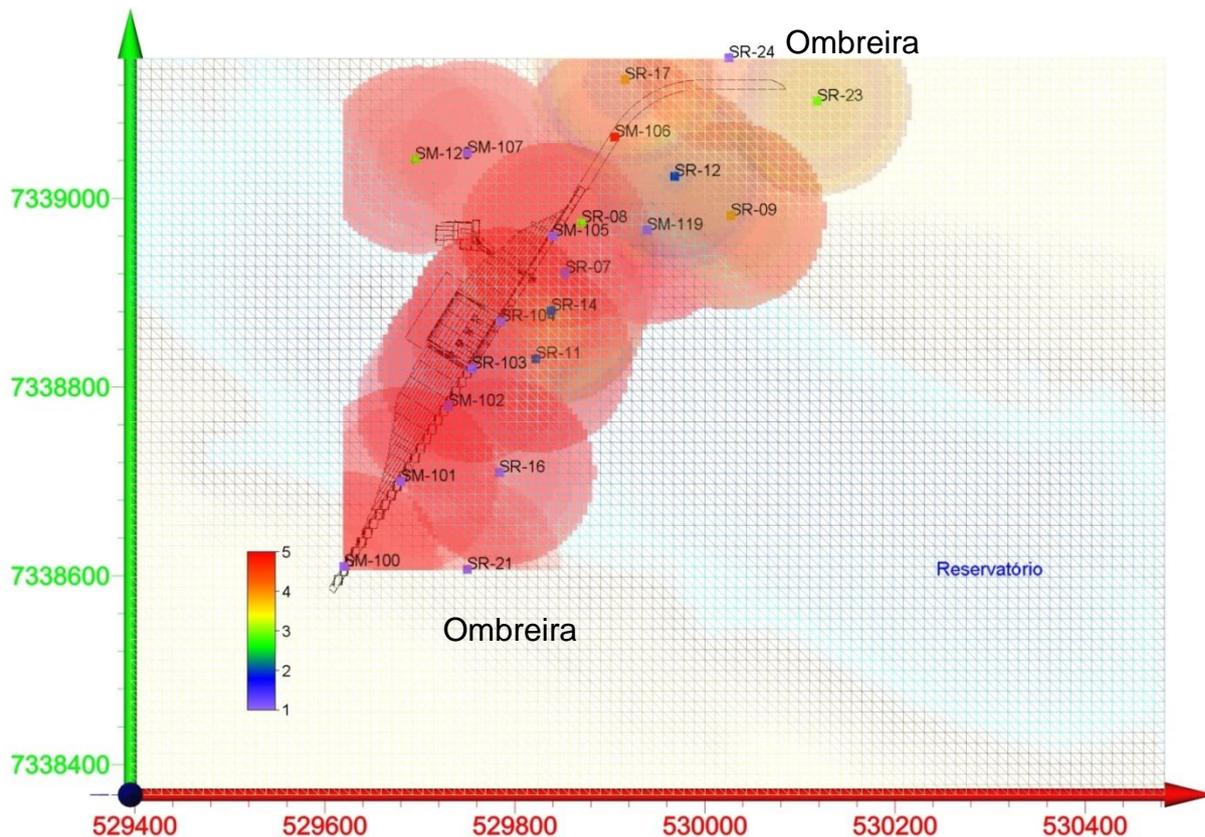


Figura 65: Vista superior com a interpolação do parâmetro geotécnico RQD. O norte é indicado pela seta verde.

Os diferentes dados geotécnicos apresentam correlação entre si. Fato comprovado pelo aumento de valores de alteração, fraturamento e diminuição dos valores de consistência e RQD em praticamente toda extensão da fundação e encostas. Tal modelagem indicou zonas com maior fragilidade do maciço, influenciadas, principalmente pela sua compartimentação estrutural.

Para obter uma correlação e confirmação da modelagem com a análise estrutural do local foi elaborado o mapa da barragem de Mauá em ambiente SIG com os lineamentos interpretados em imagens de satélite, fotos-aéreas e os dados geológico-estruturais coletados em campo com sobreposição do parâmetro geotécnico fraturamento, conforme Figura 66.

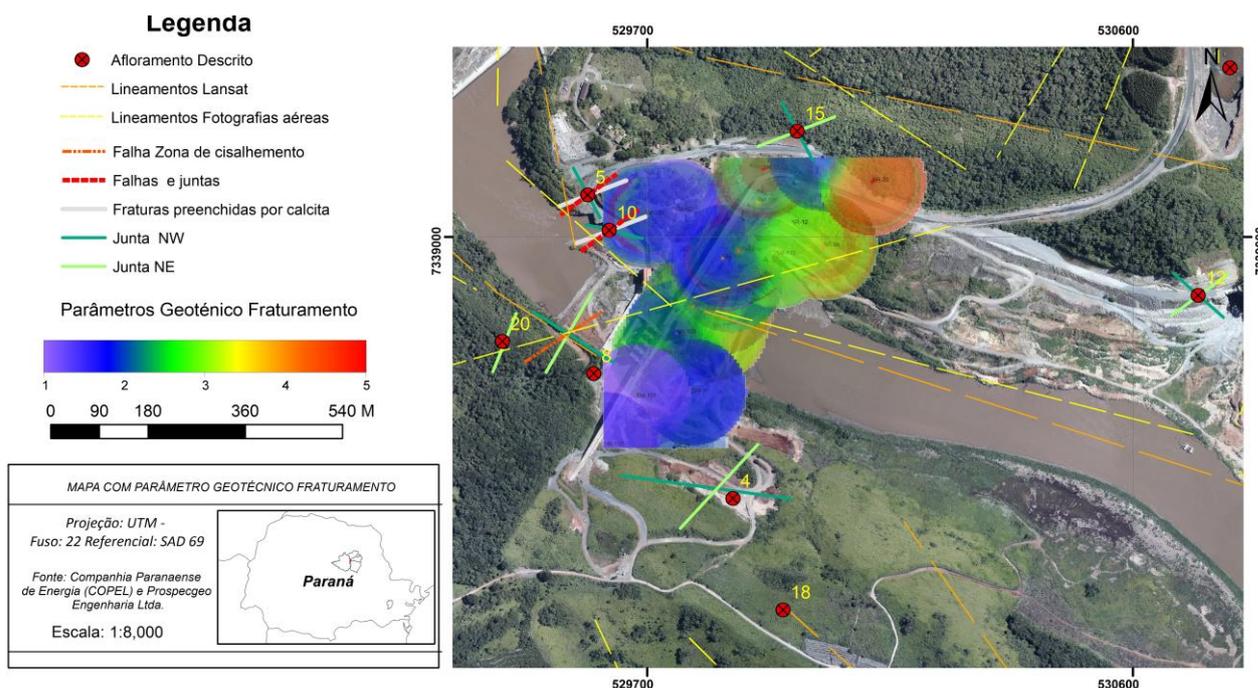


Figura 66: Mapa da barragem com as principais medidas estruturais sobrepostas ao parâmetro geotécnico de fraturamento.

No mapa foram plotados os principais *trends* estruturais dos pontos 04, 05, 07, 08, 10 e 12. Nos pontos citados anteriormente, os dados estruturais representam falhas geológicas do tipo transcorrentes, zonas de cisalhamento, fraturas abertas e preenchidas. Devido à representação espacial em 2D do produto final, os planos de fraquezas foram marcados como linhas no mapa e cores distintas. Conforme representação das medidas estruturais na Figura 66, observa-se que há correlação dos lineamentos fotointerpretados e os *trends* estruturais obtidos em campo, tal aspecto indica que o maciço está compartimentado em duas direções principais, NE-SW e NW-SE, porém as famílias NE-SW, mais penetrativas ocorrem pouco espaçadas e, pode-se afirmar que a variação de azimute de mesma direção e intersecção com outras descontinuidades ocasionam um maior fraturamento do maciço rochoso.

Nos locais apontados como alterados, de baixa consistência, altos valores de fraturamento e baixo RQD, não foi possível fazer o mapeamento devido à dificuldade de acesso, por questões de segurança. Esta região é composta por diabásio alterados e siltitos intensamente fraturados da Formação Irati (Figura 67).

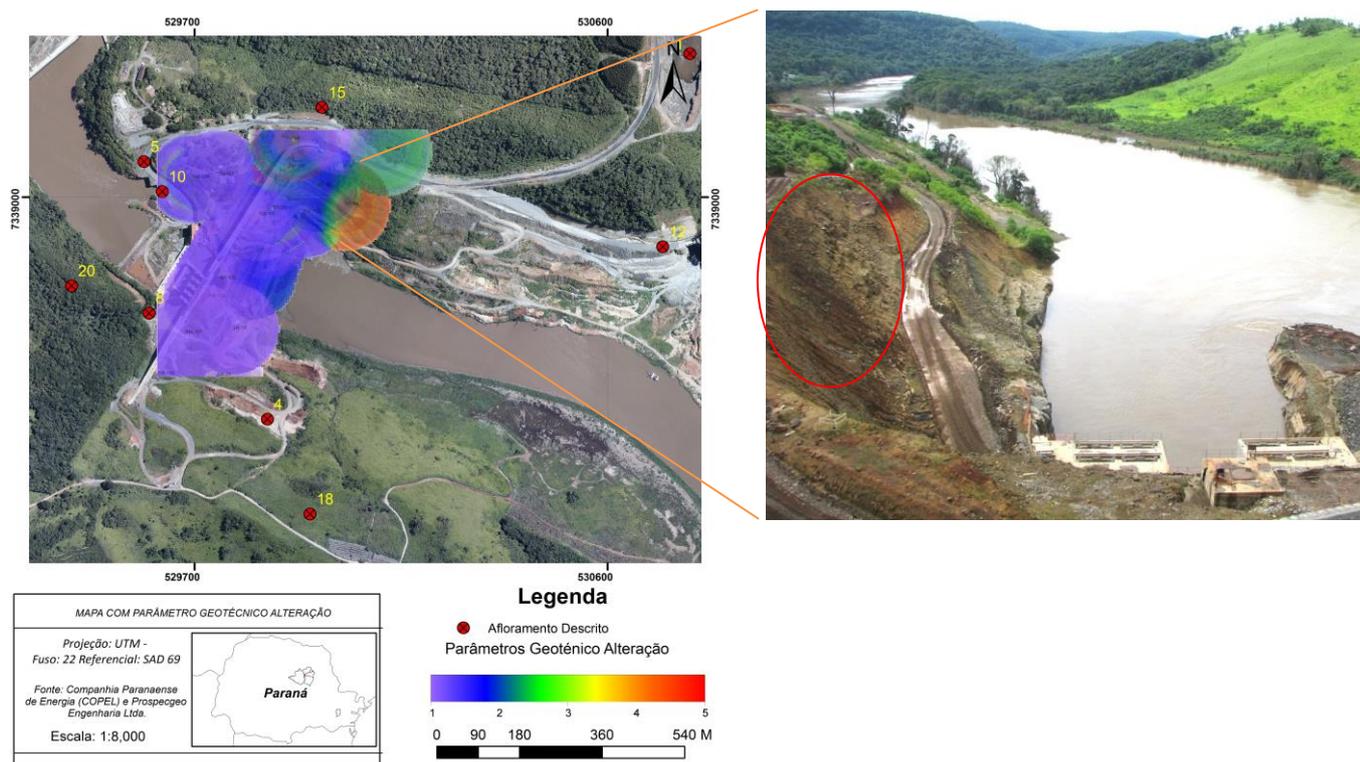


Figura 67: Visão geral da ombreira direita da Barragem na época de construção.

8 DISCUSSÃO

A análise dos diversos dados apresentados neste projeto resultou na caracterização geológico-estrutural do maciço de fundação da UHE Mauá, por meio da interpretação de feições lineares em imagens de satélite, fotos aéreas, parâmetros geotécnicos obtidos em boletins de sondagens e correlação das informações geológicas levantadas em campo.

O presente trabalho identificou possíveis locais/zonas de maior fragilidade geológica do substrato em virtude do controle estrutural imposto por grandes alinhamentos estruturais, tal como o Arco de Ponta Grossa e zonas de falhas de direção NW-SE, nitidamente definidas em imagens de satélite e compartimentadas por falhas de direção NE-SW, relacionadas à Zona de Falha Jacutinga.

As unidades e estruturas geológicas relacionadas ao soerguimento do Arco de Ponta Grossa são pervasivas em toda a área de estudo e conferem ao relevo feições morfoestruturais peculiares à região, principalmente sob a forma de diques e soleiras, que compõem o maciço sob a UHE Mauá. Strugale (2002) definiu próxima a área de estudo zonas de falhas (ZF) denominadas de ZF Tamarana, ZF Mauá da Serra, ZF Rio Pereira, as quais são caracterizadas por uma maior presença de diques de diabásios definidos em imagens como fotolineamentos que configuram altos estruturais e topográficos. A ZF Tamarana compõe alinhamentos retilíneos e anastomosados de direção NW-SE que são mais visíveis a norte e noroeste da área de estudo e a Z.F Mauá da Serra ao sul e sudoeste (Figura 33). Tais alinhamentos são pouco evidentes em imagem de satélite e fotografias aéreas na região estudada, devido à existência de maior quantidade de soleiras de diabásio que conferem maior grau de resistência ao intemperismo.

Os fotolineamentos de direção NE identificados tanto em imagens de satélite, quanto em fotografias aéreas, apresentam traços mais segmentados pouco contínuos e espaçados, correlacionados a ZF Jacutinga, que segundo Rostirolla *et al.*, (2000), ocorrem como feições alternadas de altos e baixos alinhados a N50-60E na forma de falhas em feixes ou “*en echelon*”.

O aspecto geomorfológico atual do relevo é resultado de um longo processo erosivo associado à estruturação tectônica do substrato e a reologia de cada unidade geológica. As rochas pelíticas da Formação Irati e Serra Alta apresentam maior facilidade de erosão do que os arenitos da Formação Palermo e as rochas ígneas da Formação Serra Geral. Tal característica confere ao relevo, principalmente na região oeste do rio Tibagi, morfologia do tipo crista alongada ou muralha ocasionada por diques de diabásio nas unidades sedimentares, em função da diferenciação intempérica entre unidades geológicas que destacam lineamentos positivos (diques de diabásio) nos sedimentos paleozoicos. Já na porção leste tais feições são pouco evidentes, em virtude da maior competência dos arenitos da Formação Palermo e do diabásio, presente na forma de soleiras que configuram ao relevo, aspectos tabulares.

As características geológicas observadas em campo indicam deformações de regime rúptil, identificadas por rupturas (ou fraturas) antigas com rejeito direcional em níveis crustais superiores, resultando em sistemas de falhas transcorrentes e juntas associadas. Em afloramentos tais descontinuidades foram separadas conforme *trends* preferencias em NE-SW, NW-SE, N-S e E-W. As fraturas mais pervasivas na área de estudo pertencem à família NE-SW seguidos de fraturas de direção NW-SE que, conforme mencionado anteriormente, foram correlacionadas, respectivamente à ZF Jacutinga (NE-SW) e ao Arco de Ponta Grossa (NW-SE).

Nos levantamentos de campo, em geral, constatou-se um predomínio de falhas e juntas de direção NE-SW, conforme diagrama de rosetas de cada ponto mapeado no entorno da barragem (Figura 68). Tal resultado é pouco coincidente ao produto obtido por meio da fotointerpretação de imagens de satélite e fotografias aéreas que, por sua vez, evidenciaram *trends* preferenciais para NW-SE. Tal produto está relacionado à diferença de escala de observação entre macroescala e mesoescala que são influenciadas pelas características geométricas e cinemáticas de cada família de fratura que compartimentam o maciço rochoso. As fraturas identificadas em afloramentos, de direção NE-SW, exibem maior penetratividade e pouco espaçadas, fechadas a abertas (preenchidas por calcita e zeólitas), por vezes na forma de feixes estruturais. As descontinuidades nesta direção ocorrem associadas a zonas de falhas que

afetam todo substrato rochoso da região e representam maior acúmulo estatístico de falhas registradas em relação aos outros *trends* estruturais identificados. Já as fraturas de direção NW-SE são pouco sistêmicas na maioria dos afloramentos, porém caracterizadas por feições longas e contínuas com maior espaçamento entre si.

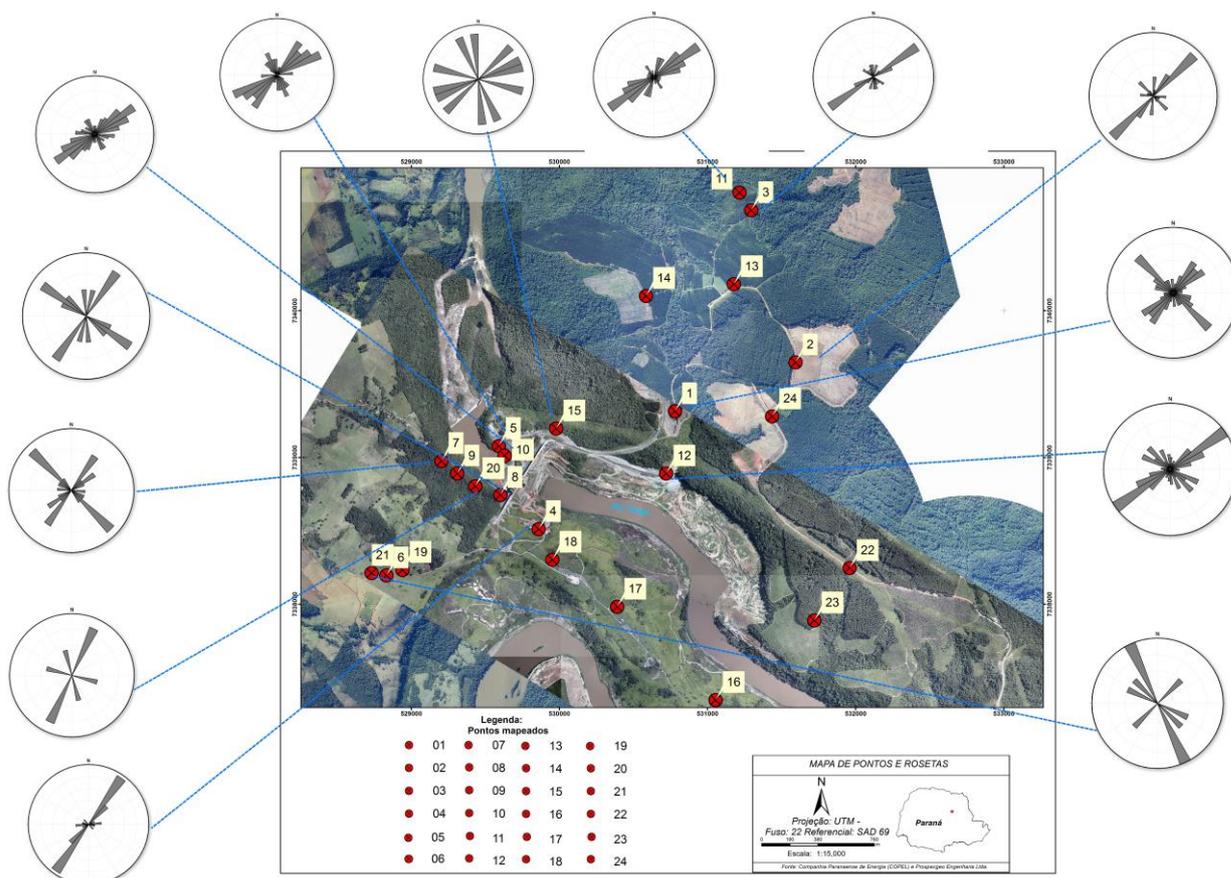


Figura 68 – Posição dos pontos mapeados e as principais direções de descontinuidades encontradas

A partir dos dados estruturais obtidos em campo correlacionados à fotointerpretação, foi possível distinguir dois antigos eventos tectônicos que afetaram a seção meso-paleozoica da área de estudo, denominados respectivamente de D1 o mais antigo e D2 o evento mais recente.

As descontinuidades com indicadores cinemáticos relacionadas ao evento D1 são pouco frequentes em campo. Todavia estão registrados em unidades sedimentares na forma de falhas escalonadas de direção NE-SW e possuem cinemática sinistral. Já nas intrusivas é comum falhas de direção NW-SE, de movimento dextral, com estruturas em flor negativa e poucas fraturas preenchidas de mesma direção. Ainda como consequência desse evento há a família de

fraturas de direção próxima a N-S consideradas antitéticas conforme a localização das tensões máximas (σ_1) obtidas para este evento.

Strugale (2002) em trabalhos de mapeamentos semelhantes ao aqui apresentado identificou dois eventos de deformação similares aos encontrados na região da UHE Mauá. O autor definiu para o evento D1 uma deformação progressiva, com rotação dextrogira de NW para NE que controlaram a intrusão de diques de diabásio e afetaram as mesmas unidades. A análise dinâmica possibilitou determinar um paleotensor (σ_1) em direções próximas às definidas por Strugale (2002).

Para Rostirolla *et al.*, (2000) os eventos tectônicos que geraram reativações das descontinuidades de direção NE-SW (ZF Jacutinga), de caráter sinistral, é anterior ao magmatismo básico, com tensão máxima (σ_1) na direção aproximada de N-S. Essa deformação é comum nos sedimentos da Formação Palermo, porém tal cinemática é raramente constatada em rochas intrusivas da Formação Serra Geral.

O produto de regime rúptil do evento D2 é mais persistente e sistemático nas unidades meso-paleozoicas aflorantes na área de estudo e apresenta como característica um tensor máximo (σ_1) E-W variando 30° para NE-SW e 20 para NW-SE. As deformações obtidas são compatíveis, em termos cinemáticos e campos de tensão com as estruturas descritas por Strugale (2002) e Strugale *et al.*, (2007) na Serra do Cadeado. Outros autores como Riccomini (1995 a,b), Riccomini *et al.*, (2004) sugerem para um campo de tensão similar ao identificado na área de estudo idades entre o Cretáceo Superior e o Neógeno e Rostirolla *et al.*, (2000) associa as reativações da ZF Jacutinga de caráter dextral com o período durante e pós magmatismo Serra Geral.

As descontinuidades relacionadas a essa deformação ocorrem na forma de falhas transcorrentes, em geral, de regime transtrativo de direção principal entre N40-60E e cinemática dextral com intenso fraturamento resultando em grande quantidade de juntas associadas, além de zonas de cisalhamento e fraturas abertas preenchidas por carbonato de direção N60-70E relacionadas às fraturas T do modelo de Riedel. Conjugado ao *trend* principal de deformação ocorrem juntas e falhas à N40-50W com cinemática sinistral e, por fim, juntas e falhas E-W de superfície contínua e geometria plana bem espaçadas.

Para a região da barragem de Mauá, foi confeccionado um modelo esquemático do substrato e sua compartimentação (Figura 69), para melhor visualização espacial das principais estruturas geológicas, conforme suas características geométricas e cinemáticas observadas em campo, em que as fraturas NW-SE são mais espaçadas e as fraturas NE-SW apresentam-se mais sistemáticas pouco espaçadas, resultantes dos resultantes dos eventos deformacionais da região.

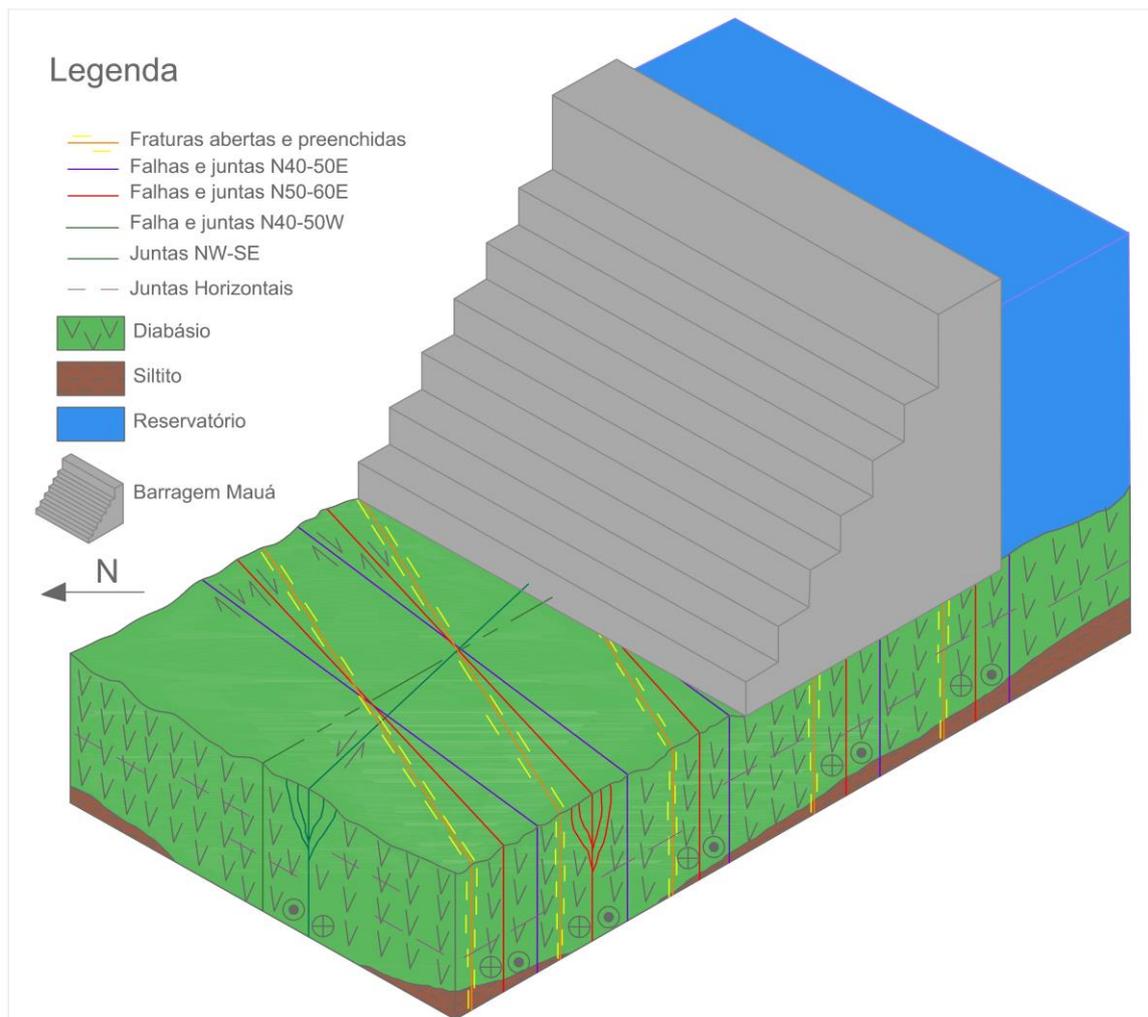


Figura 69: Modelo esquemático do substrato da barragem de Mauá.

As fraturas geradas pelo evento D2 conferem maior fragilidade e compartimentação ao substrato e poderiam influenciar na estabilidade e estanqueidade da barragem, com sistemas de discontinuidades de direção NE-SW abertas e cisalhadas (Figura 42 A) próximas à barragem que poderiam causar aumento de percolação de água na fundação do maciço rochoso.

No local de estudo as singularidades geológicas são geradas pelo cruzamento de descontinuidades regionais, principalmente entre sistemas de fraturas NE-SW e NW-SE. Conforme Tabela 7, para a estabilidade da barragem as descontinuidades de direção NE-SW apresentam grau de influência regular a elevada, pois apresentam relação angular entre as fraturas e o eixo da barragem menor que 50° (juntas e falhas) e menor que 30° para fraturas abertas. Em relação à estanqueidade é considerada respectivamente com influência regular a reduzida. Já para as descontinuidades de direção NW-SE a relação angular entre as fraturas e o eixo da barragem são maiores que 70° (predomínio de juntas), o que resulta em uma influência nula em relação à estabilidade (ver Tabela 7). Resultado contrário para a estanqueidade que apresenta influência muito elevada para esta direção, pois configuram caminhos preferenciais de percolação de água de mesmo sentido de fluxo hídrico do rio/reservatório.

Tabela 7: Influência entre as direções das descontinuidades e do eixo da barragem com relação à estabilidade e à estanqueidade das fundações. Retirado de Costa (2012).

Classe	Tipo de influência	Ângulo entre a descontinuidade e o eixo da barragem (°)	
		Com relação à estabilidade	Com relação à estanqueidade
a	Nula	71-90	0-10
b	Reduzida	51-70	11-30
c	Regular	31-50	31-50
d	Elevada	11-30	51-70
e	Muito Elevada	0-10	71-90

Segundo Costa (2012) as descontinuidades que influenciam na instabilidade de uma barragem compreendem ângulos de mergulhos entre 0° a 60° no sentido de montante da barragem para a fundação e as ombreiras. No caso da barragem de Mauá o predomínio de ângulo de mergulho das juntas e falhas mapeadas é vertical a sub-vertical truncadas por juntas atectônicas sub-horizontais. No maciço rochoso tal relação geométrica pode causar deslizamentos em cunha e/ou caminhos preferenciais de fluxo de água.

A intersecção de fraturas geradas nos eventos deformacionais e a exposição a agentes intempéricos conferem às unidades geológicas da região um conjunto de características geotécnicas singulares que controlam a qualidade do maciço rochoso. Os parâmetros de classificação como fraturamento, alteração, consistência e RQD obtidos em furos de sondagens foram utilizados para setorizar regiões com diferentes graus de fragilidade da fundação. Principalmente em zonas de maior fraturamento e alteração, verificados na margem direita da

barragem.

Essas características são relacionadas à presença de descontinuidades como falhas e fraturas abertas, identificadas nos pontos 05 e 10 (Figura 70). Como hipótese, a ocorrência de um maior fraturamento seria ocasionada pela descompressão por erosão da encosta da margem direita associada a tensões de tração paralelas ao talude, situação que influencia diretamente os demais parâmetros geotécnicos como alteração, consistência e RQD.

O conjunto de dados obtidos na classificação geomecânica da fundação foi correlacionado ao produto da análise estrutural e integrados em ambiente SIG com informações sobre os tipos de descontinuidades mapeadas próximas a barragem, fotolineamentos interpretados e as medidas de recalques obtidas por meio do monitoramento geodésico.

Os resultados estão representados nas Figura 70 para o parâmetro geotécnico de alteração, Figura 71 de fraturamento, Figura 72 de consistência e Figura 73 para o RQD. O resultado obtido pela geodésia para os marcos superficiais instalados na crista da barragem não geraram dados significativos para deslocamentos absolutos nos eixos X e Y, e variação milimétrica em torno de 8mm no eixo Z, com maior variação de recalque na região central da barragem, no local do vertedouro, que é a região de maior altura.

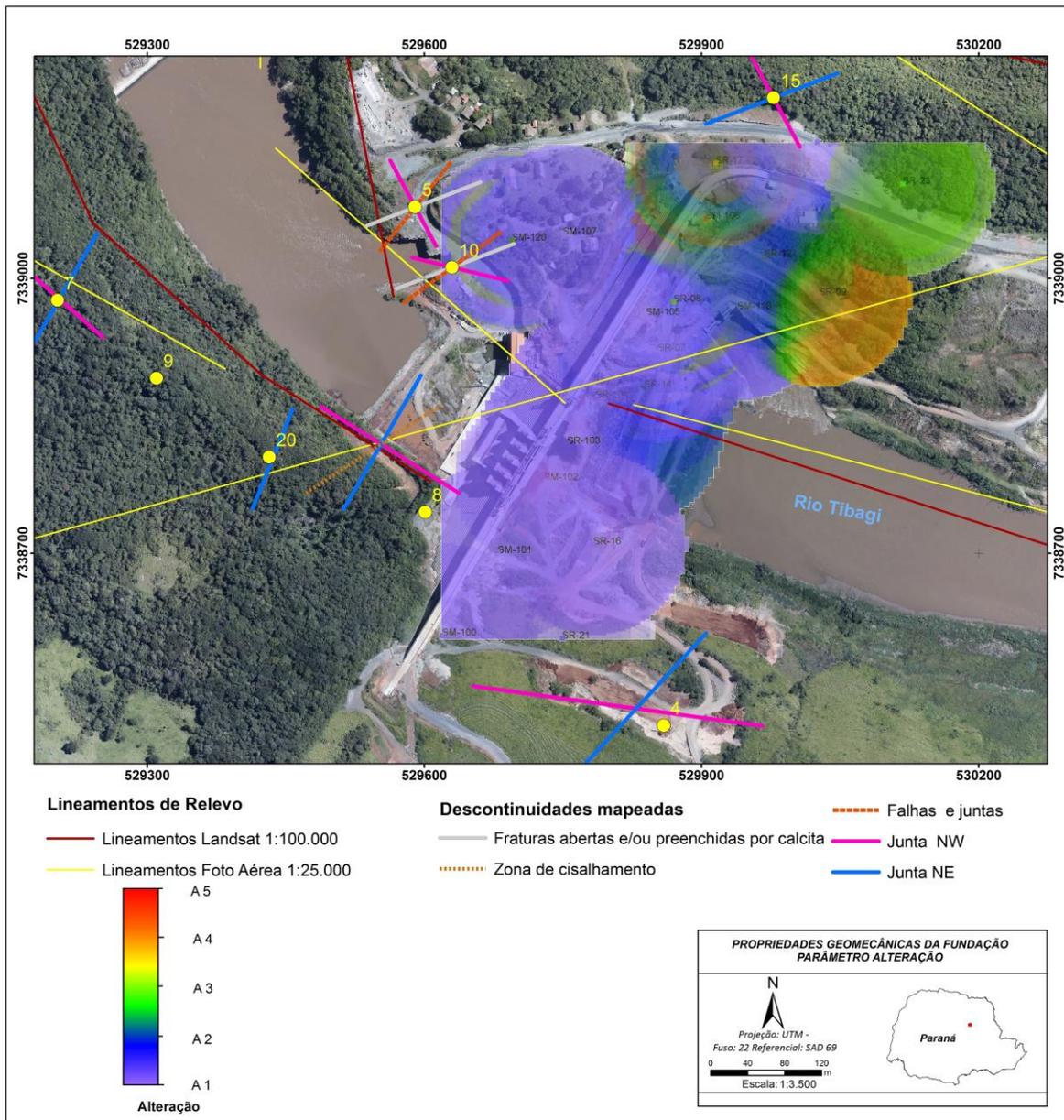


Figura 70: mapa da barragem com as principais medidas estruturais sobrepostas ao parâmetro geotécnico de alteração e medidas de recalques ao longo do eixo da barragem.

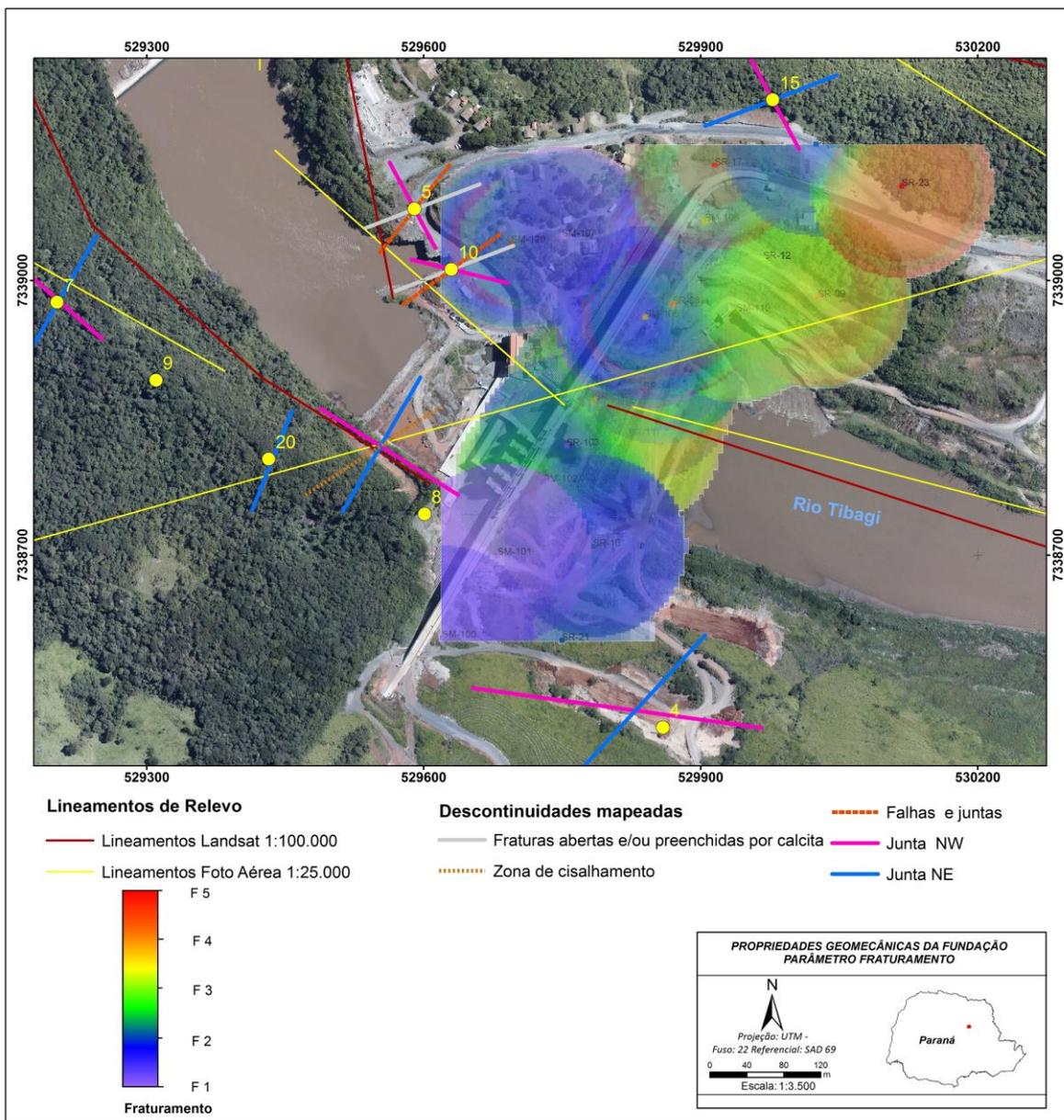


Figura 71: mapa da barragem com as principais medidas estruturais sobrepostas ao parâmetro geotécnico de fraturamento e medidas de recalques ao longo do eixo da barragem.

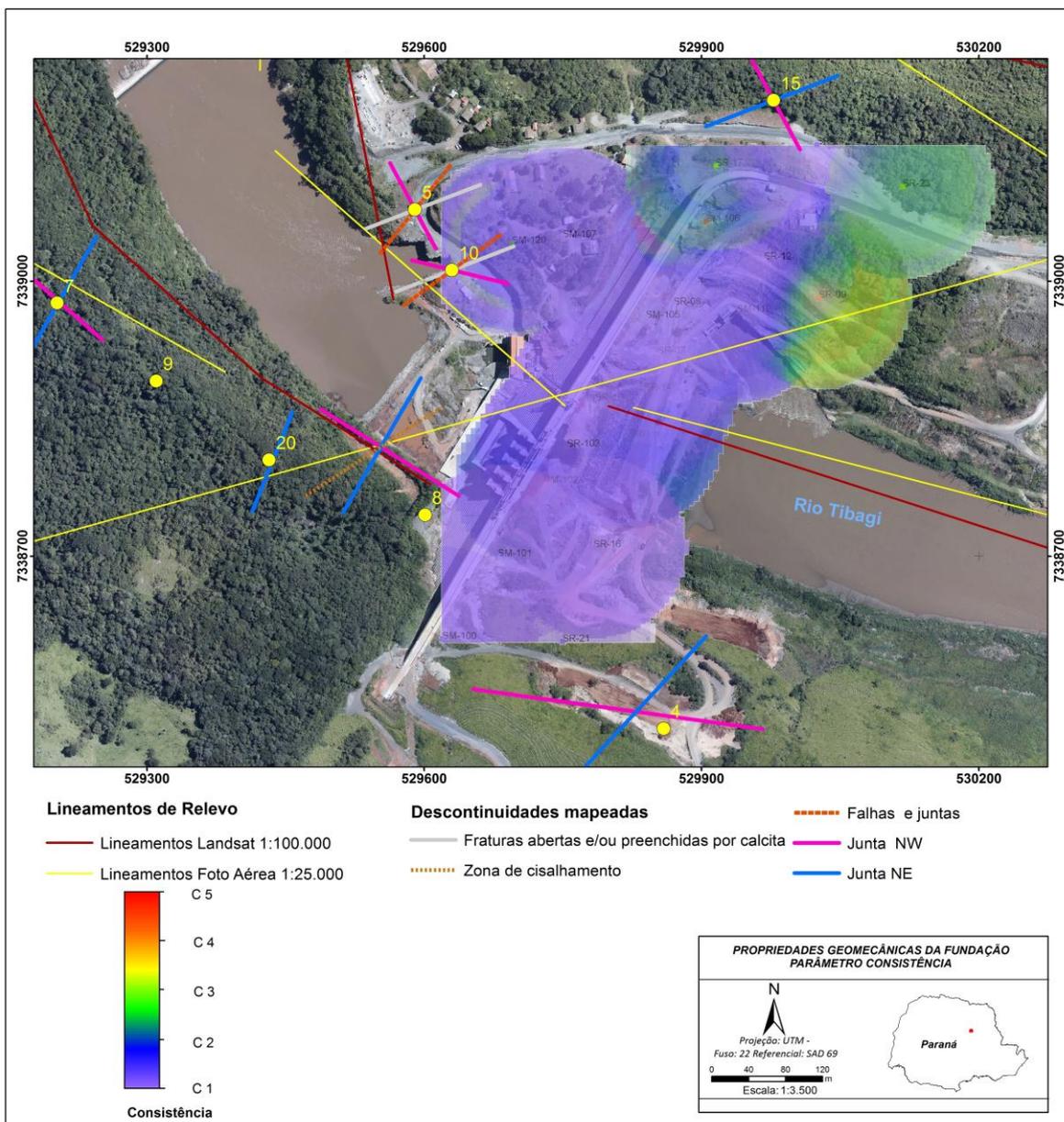


Figura 72: mapa da barragem com as principais medidas estruturais sobrepostas ao parâmetro geotécnico de consistência e medidas de recalques ao longo do eixo da barragem.

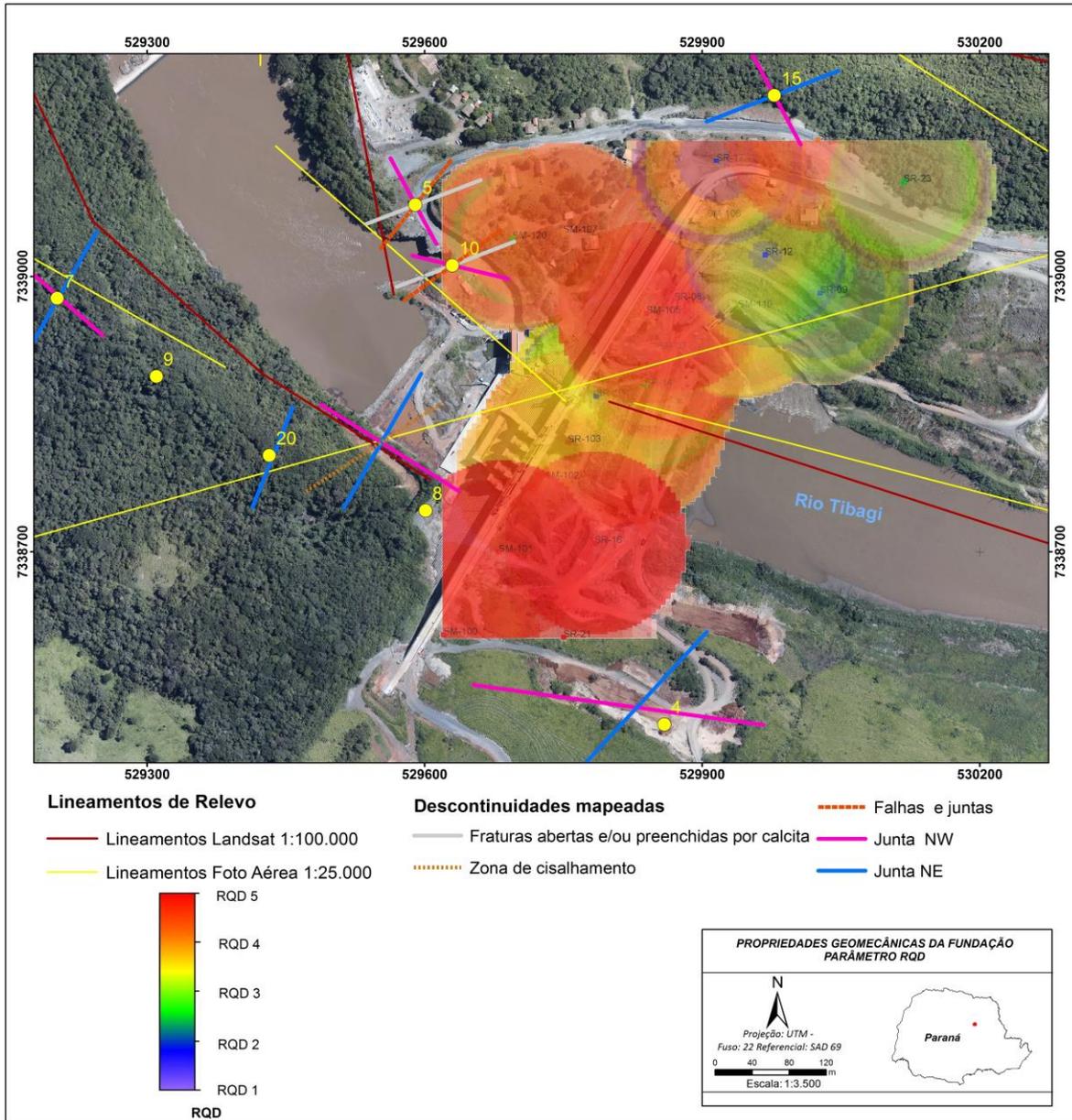


Figura 73: mapa da barragem com as principais medidas estruturais sobrepostas ao parâmetro geotécnico de RQD e medidas de recalques ao longo do eixo da barragem.

Como consequência das características estruturais do maciço de fundação estarem relacionadas a causas tectônicas que não mais atuam no maciço, as paleotensões obtidas por meio de dados de campo são de processos geológicos já estabilizados. Isso pode ser constatado por meio do detalhamento de estudo de campo local, bem como pela ausência de eventos sísmicos locais.

O que deve ser considerado, portanto, é a possibilidade do maciço de fundação fraturado, sofrer algum tipo de movimento, nesse caso de forma passiva, em função do sobrepeso aliado a percolação anormal de água em fraturas abertas.

Em função do mapeamento geológico-estrutural e modelagem geomecânica do maciço rochoso, era esperado da fundação como resposta, um acúmulo de deformações do substrato, principalmente, na região da ombreira direita da barragem, em função do cruzamento de estruturas geológicas e pelos atributos geotécnicos, porém o monitoramento geodésico realizado ao longo do projeto, negataram essa possibilidade, visto que o deslocamento foi milimétrico a submilimétrico ao longo da barragem, e o maior valor de recalque ocorreu na região do vertedouro, e é atribuída a maior altura do barramento em que há maiores tensões sob o maciço, e consequência do seu peso próprio.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso, executada por meio do mapeamento litoestratigráfico, análise morfoestrutural em escala regional em imagens de satélite e fotografias aéreas, e mesoescala por meio do mapeamento geológico permitiram a análise estrutural do maciço rochoso. Essas análises, juntamente com a modelagem geomecânica da fundação e integração dos dados advindos do monitoramento geodésico permitiram apontar as seguintes considerações:

- O arcabouço geológico-estrutural definido por meio do mapeamento em campo e análise de lineamentos no relevo evidencia que o maciço rochoso é compartimentado pelas famílias de fraturas, NE-SW, NW-SE, E-W e N-S, de maior a menor pervasividade e intensidade, respectivamente.

As estruturas mais penetrativas que podem ser suscetíveis à instabilidade da obra são as discontinuidades de direção NE-SW seguido do *trend* NW-SE, pois apresentam maior acúmulo de medidas de juntas e falhas em campo e correspondem ao cruzamento de extensas zonas de falhamentos como a Zona de Falha Jacutinga (NE-SW) e a Zona de Falha São Jerônimo-Curiúva e Arco de Ponta Grossa (Ambas de direção NW-SE).

- Os lineamentos de direção NW-SE representam morfoestruturas com maior realce em imagens de satélite e fotográficas aéreas em função destes representarem feições tectônicas associadas ao Arco de Ponta Grossa na forma de falhas preenchidas por diques de diabásio que se sobressaem no relevo de rochas sedimentares sob a forma de cristas alongadas.

A região foi afetada por dois eventos de deformação rúptil distintos ao longo do tempo geológico. A fase de deformação D1 apresenta poucos registros com indicadores cinemáticos nos litotipos mapeados, com representantes transcorrentes transtrativo e predomínio de direções estruturais NW-SE com planos retilíneos longos a anastomosados bem espaçadas que cortam as unidades rochosas da Formação Serra Geral e Formação Palermo, e são correlacionada a eventos deformacionais ocorridos no paleozoico e mesozoico, corroborados por trabalhos regionais.

- O evento de deformação D2 afeta com maior intensidade o pacote rochoso da região e corresponde a deformações meso-cenozoicas, caracterizado,

principalmente, por falhas transcorrentes com componentes distensionais e juntas de direção NE-SW com planos retilíneos a anastomosados pouco espaçados, além de fraturas abertas e preenchidas e ocasionalmente zonas de cisalhamento com catáclase e material cominuído (gouge).

- A análise dinâmica em conjunto com a cinemática e geométrica das descontinuidades foi essencial para a determinação do modo de fraturamento do maciço, por se tratar de uma região com domínio de eventos tectônicos transcorrentes, foi possível uma correlação com os modos de fratura pelo *software Sigmas* que se baseia no critério de fraturamento de Mohr-Coulomb para obter vetores de paleoesforços.

- Foram verificados os principais modos de falhas associados ao modelo de Riedel de fraturamento, e assim, definidas as direções preferenciais de falhamentos e de fraturas T (abertas) ou preenchidas, conforme modelo esquemático da barragem (Figura 69), que determinam caminhos preferencias de fluxo de água na fundação. Tais feições influenciam na estanqueidade e estabilidade do maciço, pois tendem a aumentar as subpressões na base da barragem.

- A modelagem geomecânica possibilitou identificar zonas de maior fragilidade do substrato, considerando, principalmente os atributos de fraturamento e alteração para a região da ombreira direita da barragem.

- A integração entre os dados estruturais de campo e a modelagem geomecânica permitiu identificar zonas de fraqueza do substrato condicionadas principalmente por descontinuidades de direção NE-SW na fundação e na margem direita do reservatório. As medidas de recalques obtidas pelo monitoramento geodésico destacam que não houve acomodações significativas das descontinuidades do substrato com o total enchimento do reservatório devido a menor deformação medida ao longo da barragem.

Por fim, recomenda-se, em nome da certificação do método e segurança do empreendimento civil a continuidade do monitoramento para os anos subsequentes com intuito de se obter o registro da série histórica dos dados de deformação na barragem, além da instrumentação convencional, como medição de vazão, poropressão, medidores de recalques e demais instrumentos.

Para determinar a resistência ao cisalhamento do maciço e das descontinuidades mais pervasivas de modo quantitativo, é indicada a realização

de ensaios laboratoriais e *in situ* de rochas para obtenção de parâmetros de coesão, ângulo de atrito interno e a própria resistência ao cisalhamento para que se tenha uma maior confiabilidade dos cálculos de segurança da obra.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. 1983. Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maços rochosos. São Paulo

ABOARRAGE, A. M. e LOPES, R. da C. 1986 Projeto A Borda Leste da Bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica. Porto Alegre: DNPM/CPRM, 1986. 18 v.

ANDERSON, E. M. 1951. The dynamics of faulting and dyke formation with application to Britain. 2 ed, Edinburgh and London: Oliver and Boyd. 206p.

ASSIS, A. P.; 2013. Mecânica das Rochas. Brasília, Apostila do curso de Mecânica de rochas do departamento de engenharia civil e ambiental/FT - Geotecnia-Universidade de Brasília UNB.

BONGIOLO, A. B. S.; SOARES, A. P.; BITTENCOURT, A. V. L.; FERREIRA, F. J. F., 2011, Compartimentação estrutural e conectividade hidráulica dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani: caracterização hidrogeoquímica na região central do estado do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, 41 (2): 319-333.

BRASIL. 2010. Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010. Publicado no Diário Oficial da União em 21 de setembro de 21/09/2010.

COSTA, W. D. 2012. Geologia de Barragens. São Paulo, Oficina de Textos. 352p

CRUZ, P.T. da, 2004, “100 Barragens Brasileiras. Casos Históricos, Materiais de Construção e Projetos”. Oficina de Textos, 2ª Edição, São Paulo.

CORDANI, U.G, Brito Neves B.B., Fuck R.A., Porto R., Thomaz Filho A., Cunha F.M.B 1984: Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. Boletim Ciência Técnica Petróleo, Seção Exploração de Petróleo.

DE FREITAS, R. C. 2005. Análise estrutural multimatemática do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito, Bacia do Paraná. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 113p.

DELVAUX, D. 1993. The TENSOR program for paleostress reconstruction:

exemples from the east African and the Baikal rift zones. EUG VII Strasbourg, France, 4-8 April 1993. Abstract supplement N°1 to Terra Nova, vol. 5, p. 216.

FERREIRA, F.J.F. 1982. Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa. Dissertação de mestrado. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 170p.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. 2009. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. Editora UFPR. 2° Ed, 602p.

FOSSÉN, H.; 2012. Geologia estrutural. Oficina de textos, São Paulo, 584p.

FULFARO, V. J.; SAAD, A. R.; SANTOS, M. V.; VIANNA, R.B, 1982. Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v 12, n. 4, p. 233-256.

GORDON Jr., M. 1947. Classificação das formações gondwânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Notas Preliminares e Estudos, DNPM/DGM, Rio de Janeiro n° 38, p1-20.

ICOLD (International Commission on Large Dams), 1995. Dam Failures-Statistical Analysis. Bulletin 99. Paris.

HUDSON, J. A.; HARRISON, J. P. 1997. Engineering Rock mechanics Vol 1 An introduction to the principles. Pergamon, United Kingdom, London, 458p.

JAEGER, J. C.; COOK, G. W., 1979, Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd Edition- Chapman and Hall-London.

LAVINA, E. L.; LOPES, R. C. 1987. A transgressão marinha do Permiano Inferior e a evolução paleogeográfica do Supergrupo Tubarão no Estado do Rio Grande do Sul.

MAACK, R. 1968. Geografia Física do Estado do Paraná. Curitiba: Universidade Federal do Paraná e Instituto de Biologia e Pesquisa Tecnológica.

MILANI, E. J, RAMOS, V. 1998. Orogenias Pós-Paleozóicas no Domínio Sul-Occidental do Gondwana e os ciclos de Subsidência da Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geologia, 28 (4): p. 473-484.

MILANI, E. J. 1997. Evolução Tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu

relacionamento com a geodinâmica fanerozoica do Gondwana sul-ocidental. Tese (Doutorado), v. 2. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. 2007. Bacia do Paraná. Boletim Geociências Petrobras. Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, maio/nov.

MINEROPAR 2006, Tremor de terra no Paraná interesse pela geologia. Disponível em:<http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=305>.

Acesso em: 08 de Setembro de 2013.

MINEROPAR S. A. 2006. Mapa geológico do Estado do Paraná. Folha Curitiba, Curitiba- PR. Escala 1: 250.000.

O'CONNOR, J. M. e DUNCAN, R. A.1990. Evolution of the Walvis Ridge and Rio Grande Rise hotspot system – implications for African and South America plate motions over plumes. Journal of. Geophysical Research, v.95, p.17475-17502.

OLIVEIRA, A.M.S ; BRITO, S.N.A. 1998. Geologia de Engenharia. São Paulo. ABGE.

PEATE, D. W.; HAWKESWORT, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. Bulletin of Volcanology, Berlin, v. 55, p. 119-139.

PERINOTTO, J. A. J.; GAMA JR, E. G. 1992. Uso de parassequências em análise estratigráfica: caso de estudo da Formação Palermo (P), Bacia do Paraná. In: Boletim do XXXVII Congresso Brasileiro de Geologia. p. 512-514.

PERINOTTO, J. A. J.; FULFARO, V. J. 2001. Depósitos de carvão permianos pós-glaciais da Bacia do Paraná no estado de São Paulo, Brasil. In. Geociências, São Paulo, VI (6) p 56-63.

PICCIRILLO E. M. e MELFI, A. J.1988. (Eds.). The Mesozoic Flood Volcanism of the Parana Basin: petrogenetic and geophysical aspects. São Paulo: USP. p. 1-14. 98.

PINTO, C. M. A.; 2012. Utilização de modelos numéricos no cálculo estrutural de barragens gravidade de betão. Dissertação. Pós-graduação em Engenharia civil. Instituto superior de engenharia de Lisboa. 99p

QUEIROZ, G.L.; SALAMUNI, E.; NASCIMENTO E.R. 2012. AzimuthFinder: Um software para a extração de dados e apoio a análise estrutural. Submetido à revista Geociências. UFPR, Brasil, submetido. 2012.

RAMOS, V. A.; JORDAN, T. E.; ALLMENDINGER, R. W.; MPODOZIS, C.; KAY, J. M.; CORTÉS, J. M.; PALMA, M. 1986. Paleozoic terranes of the central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics*, Washington, v. 5, n. 6, p.855-880.

RIEDEL, W. 1929. Zur mechanik geologischer brucherscheinungen. Einbeitrag zum problem der "fiederspalten". *Zentralbl. Minera, Geol.Paleont.*, 1929b: 354-368.

RICCOMINI, C. 1995a: Tectonismo Gerador e Deformador dos Depósitos Sedimentares Pós-Gondvânicos da Porção Centro-oriental do Estado de São Paulo e Áreas Vizinhas. Tese de Livre-Docência, Inst. De Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

RICCOMINI, C. 1995b: Padrão de fraturamentos do Maciço Alcalino de Cananéia, Estado de São Paulo; relações com a tectônica Mesozóica-cenozóica do sudeste do Brasil.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L.G. e FERRARI, A.L. 2004: Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Dal Ré Carneiro, C. e Brito Neves, B.B. (orgs.) *Geologia do Continente Sul-Americano – Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*.

ROHN R., LAGES L.C., PENATTI J.R.R. 2003. Litofácies da Formação Irati no Furo de sondagem FP-01-PR (Permiano, borda leste da Bacia do Paraná). In: Congresso Brasileiro de PeD em Petróleo e Gás, 2, 2003. Rio de Janeiro. Resumos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1:1-6.

ROSTIROLLA S.P. ASSINE M.L. FERNANDES L.A. ARTUR P.C. 2000. Reativação de Paleolineamentos durante a Evolução da Bacia do Paraná – O Exemplo do Alto Estrutural de Quatiguá. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(4): 639-648.

SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. 1974. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. Anais do... São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia. v. 1, p. 41-65.

- SOARES, P.C. 1991: Tectônica sinsedimentar cíclica na Bacia do Paraná: Controles. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Tese de professor titular. 148p.
- SOARES, P.C., Rostirolla S.P., Ferreira F.L.F., Stevanato R. 1996. O alto estrutural Pitanga-Quatiguá-Jacutinga na Bacia do Paraná: Uma estrutura Litosférica. In: Cong. Brás. Geol., 38 Salvador 1996.
- STRUGALE, M. 2002. Arcabouço e Evolução Estrutural do Arco de Ponta Grossa no Grupo São Bento (Mesozoico): Implicações na Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Guarani e na Migração de Hidrocarbonetos na Bacia do Paraná. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- STRUGALE, M.; ROSTIROLLA, S. P.; KULEVICZ, M. B.; MANCINI, F. 2003. Evolução estrutural do Arco de Ponta Grossa no Cretáceo a partir da análise de estruturas rúpteis no Grupo São Bento (Bacia do Paraná). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 9, 2003, Armação de Búzios – RJ. Boletim de Resumos... Armação de Búzios: SBG, p. 320-323.
- STRUGALE, M.; ROSTIROLLA, S. P.; MANCINI, F.; PORTELA FILHO, C. V.; FERREIRA, F. J. F.; FREITAS, R. C. 2007. Structural framework and Mesozoic–Cenozoic evolution of Ponta Grossa Arch, Paraná Basin, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, Oxford, v. 24, p. 203–227.
- VAIL, P. R.; MITCHUM, R. M.; THOMPSON, S., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: relative changes of sea level from coastal onlap. In: PAYTON, C. E. (Ed.). *Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, p. 63-81. (AAPG. Memoir, 26).
- VLB Engenharia. 2007. Mapa geológico geral da UHE Mauá 0706-MA-DE-310-12-002-R0. Curitiba.
- WASHBURN, C.W. 1930. *Petroleum geology of the State of São Paulo - Brasil*. Boletim n. 22, Comissão Geográfica e Geológica, São Paulo, 282 p.
- WHITE, I.C. Relatório final da Comissão das Minas de carvão de pedra do Brasil. Rio de Janeiro, 1908.
- ZALÁN, P. V., WOLF, S., CONCEIÇÃO, J. C. J., ASTOLFI, M. A. M., VIEIRA, I.

S., APPI, V. T., ZANOTTO, O. A. 1987. Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, III, Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, p. 441-473.

ZALÁN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T. 1990. Bacia do Paraná. In: Origem e evolução de Bacias Sedimentares. Petrobrás, Rio de Janeiro, p. 135-164.