



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES**

**CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE ARENITOS DO  
GRUPO ITARARÉ E FORMAÇÃO FURNAS (BACIA DO PARANÁ)  
UTILIZADOS COMO FUNDAÇÃO DE PCH**

**FLAVIA DE ALENCAR ANDRADE**

Belo Horizonte, 23 de Novembro de 2013

Flavia de Alencar Andrade

**CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE ARENITOS DO  
GRUPO ITARARÉ E FORMAÇÃO FURNAS (BACIA DO PARANÁ)  
UTILIZADOS COMO FUNDAÇÃO DE PCH**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador(a): Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Maria Giovana Parizzi

Coorientador(a): Prof<sup>º</sup> Dr<sup>º</sup> Paulo Roberto Antunes  
Aranha

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

Ano 2013

A553c

Andrade, Flávia de Alencar.

Caracterização geomecânica de arenitos do grupo Itararé e formação Fumas (Bacia do Paraná) utilizados como fundação de PCH [manuscrito] / Flávia de Alencar Andrade. - 2013.

viii, 97 f., enc.: il.

Orientadora: Maria Giovana Parizzi.

Coorientador: Paulo Roberto Antunes Aranha.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 95-97.

Bibliografia: f. 94.

1. Mecânica do solo - Teses. 2. Arenito - Teses. I. Parizzi, Maria Giovana. II. Aranha, Paulo Roberto Antunes. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624.13(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE ARENITOS DO GRUPO  
ITARARÉ E FORMAÇÃO FURNAS (BACIA DO PARANÁ)  
UTILIZADOS COMO FUNDAÇÃO DE PCH**

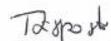
**FLÁVIA DE ALENCAR ANDRADE**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração GEOTECNIA.

Aprovada em 23 de setembro de 2013, pela banca constituída pelos membros:

  
Prof(a). Maria Giovana Parizzi - Orientador  
Universidade Federal de Minas Gerais

  
Prof(a). Paulo Roberto Antunes Aranha  
Universidade Federal de Minas Gerais

  
Prof(a). Terezinha de Jesus Espósito  
Universidade federal de Minas Gerais

  
Prof(a). Frederico Garcia Sobreira  
Universidade Federal de Ouro Preto

Belo Horizonte, 23 de setembro de 2013.

## RESUMO

Em qualquer barragem a projetar, independente de seu tipo, porte, objetivo, sua condição topográfica e natureza geológica, a fundação deverá ser caracterizada e classificada em função de suas propriedades geomecânicas e capacidade de reter o fluxo de água. A mecânica de rochas se desenvolveu com base em maciços de rochas competentes, duras, com diaclasamento marcado, que possibilitou estabelecer conceitos como “material rocha” e “maciço rochoso”, com comportamento geomecânicos acentuadamente distintos. Grande parte das rochas sedimentares não pode ser enquadrada já que se comportam como materiais de transição entre solos e rochas, sendo suas propriedades físicas e mecânicas comandadas por outros parâmetros, como a cimentação, além das descontinuidades. O objetivo da dissertação foi elaborar modelo geomecânico do maciço rochoso de arenito (rocha branda) das formações Itararé e Furnas (Bacia do Paraná) onde serão instaladas as fundações das estruturas de Barramento e Geração de PCH a ser implantada no rio Iguaçu, no estado do Paraná. Neste estudo foram descritos os parâmetros geotécnicos e geológicos em relação ao maciço rochoso de arenito normalmente analisados em estudos de fundação de obras de barragens hidrelétricas. Os métodos compreenderam revisão bibliográfica sobre o tema, mapeamento geológico-geotécnico da área estudada, investigações diretas através da realização de sondagens mecânicas, investigações indiretas através de método geofísico, além da realização de ensaios de laboratório e descrição de lâminas delgadas do arenito. Dessa forma, pôde-se compartimentar e classificar o maciço em três estratos de características distintas. O nível mais superficial é formado por um capeamento de solo, que ocorre ao longo de todo o trecho estudado, e apresenta espessuras bastante variadas. O perfil de intemperismo grada de um solo de alteração com estruturas originais da rocha preservadas para um arenito muito branda, que, por sua vez, varia para um maciço resistente, são e pouco a medianamente fraturado. As propriedades de resistência, alteração e fraturamento de cada compartimento foram analisadas e assim discutiu-se sobre a qualidade do maciço estudado como fundação de PCH.

## **ABSTRACT**

Foundations in dam projects should be identified and classified in function of their Geomechanical and ability to retain water flow, regardless of the type of dam, size, purpose, its topographic and geologic nature condition. Mechanics of Rocks was developed on the basis of competent rock massifs with marked fractures, which allowed the establish concepts such as "rolling rock" and "rock mass", with distinct mechanics behavior. Most sedimentary rocks cannot be considered in rock mechanics because of their transition behaviour between soils and rocks. Their physical and mechanical properties depend of parameters, such as cementation and discontinuities. The aim of the dissertation is to elaborate the geomechanical model for the rock mass of sandstone (soft rock) of the Itararé formations and Furnas (Paraná basin) where will be installed structures of foundations and generation of PCH to be deployed on the Iguaçu River, in the State of Paraná. In this study were described the geotechnical and geological parameters in relation to the rock mass of sandstone usually analyzed in Foundation studies of works of hydroelectric dams. The methods included literature review, geological mapping-studied area, geotechnical investigations through direct mechanical soundings, indirect investigations through geophysical method, in addition to laboratory tests and thin section description of the sandstone. In this way, classify the Massif was compartmentalized in three strata of distinct characteristics. The most superficial level is formed by a soil capping with varied thicknesses. The weathering profile changes gradually to a soil with original rock structures preserved for a too soft sandstone, which varies to a massive resistant and little to medium fractured. The properties of resistance to fracturing, alteration of each compartment were analyzed and the quality of the Massif studied as Foundation of PCH was discussed.

## SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivos Específicos .....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Critérios e Parâmetros usados para a descrição geomecânica de maciços rochosos.....	4
2.1.1 litologia, composição mineralógica e estruturas (COSTA, 2012).....	5
2.1.2 Alteração.....	5
2.1.3 Grau de Resistência ou Consistência/Coerência (ISRM, 1983) .....	7
2.1.4 Descontinuidade .....	9
2.1.5 Fraturamento.....	10
2.1.6 “Rock Quality Designation” (RQD) - Designação de Qualidade da Rocha.....	11
2.2 Aspectos a serem avaliados a partir da caracterização de maciços rochosos com relação à fundação de barragens .....	11
2.2.1 Deformabilidade .....	12
2.2.2 Estabilidade.....	12
2.2.3 Estanqueidade .....	13
2.2.4 Modelo de Classificação (COSTA, 2012).....	14
2.3 Rochas Sedimentares: Arenito.....	18
2.4 Caracterização da área de estudo .....	20
2.4.1 Localização .....	20
2.4.2 Aspectos Fisiográficos.....	20
2.4.3 Aspectos Geomorfológicos.....	23
2.4.4 Aspectos Geológicos .....	26
2.4.5 Estratigrafia.....	28

2.4.6	Estruturas .....	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	34
3.1	Estudos de escritório .....	34
3.2	Levantamentos de Campo.....	34
3.2.1	Mapeamento Geológico-Geotécnico .....	35
3.2.2	Sondagens Mecânicas .....	35
3.2.3	Investigações Geofísicas.....	40
3.3	Investigações de Laboratório .....	44
3.3.1	Ensaio de Caracterização e Tecnológicos .....	44
3.3.2	Análise Petrográfica e Mineralógica.....	45
3.4	Correlação dos dados e construção do modelo geomecânico.....	46
4	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS .....	48
4.1	Disposição das estruturas da PCH .....	48
4.2	Caracterização da área de estudo .....	48
4.2.1	Aspectos Geomorfológicos.....	48
4.2.2	Solos .....	49
4.2.3	Litologia.....	49
4.2.4	Grupo Itararé.....	54
4.2.5	Estruturas .....	56
4.3	Descrição de Sondagens .....	61
4.3.1	Grau de Alteração .....	63
4.3.2	Grau de fraturamento .....	63
4.3.3	Resistência .....	63
4.3.4	Rock Quality Designation.....	64
4.4	Petrografia.....	65
4.5	Geofísica .....	69
4.6	Permeabilidade do Maciço Rochoso .....	75

4.7	Ensaio de laboratório.....	77
4.8	Qualificação do maciço como material de fundação.....	79
5	CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS E MODELO GEOMECÂNICO .....	82
6	CONCLUSÃO.....	92
7	-SUGESTÃO DE FUTUROS TRABALHOS E PESQUISAS COMPLEMENTARES .....	93
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	94

## ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 2-1 - Graus de Resistência.....	8
QUADRO 2-2 Graus de Fraturamento (IPT, 1984 apud SERRA JUNIOR E OJIMA, 1998).....	10
QUADRO 2-3 - Graus de RQD.....	11
QUADRO 2-4 - Classificação geral dos maciços rochosos .....	14
QUADRO 2-5 - Decomposição das rochas .....	15
QUADRO 2-6 - Sistemas de descontinuidades .....	15
QUADRO 2-7 - Condições das descontinuidades.....	16
QUADRO 2-8 - Influência entre as direções das descontinuidades e do eixo barrável com relação à estabilidade e à estanqueidade das fundações .....	17
QUADRO 2-9 - Condutividade Hidráulica .....	17
QUADRO 2-10 - Aplicação da Classificação para cada Aspecto Envolvido .....	18
QUADRO 2-11 - Banco de dados de rochas sedimentares <b>Erro! Indicador não definido.</b>	
QUADRO 4-1- Atitudes dos planos de fratura obtidos no mapeamento. ....	59
QUADRO 4-2 - Atitudes dos planos de acamamento obtidos no mapeamento.....	61
QUADRO 4-3 -Resumo dos aspectos geológicos e geotécnicos avaliados nos testemunhos de sondagens.....	62
QUADRO 4-4 - Resultados dos ensaios de Perda d'Água realizados no maciço rochoso. ....	76
QUADRO 4-5 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial realizados em amostras obtidas à partir dos testemunhos de sondagens .....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1 - Figura de Localização .....	20
FIGURA 2-2 - Classificação Climática do Estado do Paraná.....	22
Figura 2-3 - Cobertura vegetal do estado do Paraná. Fonte: IPARDES.....	23
FIGURA 2-4 - Compartimentação Geomorfológica do Paraná. FONTE: MINEROPAR .....	25
FIGURA 2-5 - Compartimentação Geomorfológica ao longo do rio Iguazu. FONTE: MINEROPAR.....	25
FIGURA 3-1 - Mapa da Localização das sondagens executadas .....	39
FIGURA 3-2 - Arranjo de eletrodos utilizado.....	43
FIGURA 4-1- Esquema do projeto da PCH .....	48
FIGURA 4-2 - Fotos da Litologia presente na área mapeada .....	53
FIGURA 4-3 -Estereograma de Schmidt (Igual área, hemisfério inferior) com as áreas de concentração dos pontos polares referentes às atitudes das fraturas levantadas.....	57
FIGURA 4-4 - Diagrama de rosetas apontando as principais direções de fraturamento do trecho mapeado.....	57
FIGURA 4-5 - Estereograma de Schmidt (Igual área, hemisfério inferior) com os polos dos planos de acamamento levantados na área mapeada. ....	60
FIGURA 4-6 - Estereograma de Schmidt (Igual área, hemisfério inferior) com as áreas de concentração dos pontos polares referentes às atitudes dos planos de acamamento levantados. ....	60
FIGURA 4-7 - Seção Geofísica - L1 .....	71
FIGURA 4-8 - Seção Geofísica - L2 .....	71
FIGURA 4-9 - Seção Geofísica - L3 .....	72
FIGURA 4-10 - Seção Geofísica L4 .....	72
FIGURA 4-11 - Seção Geofísica L5 .....	74
FIGURA 4-12 - Seção Geofísica - L6 .....	75

# 1 INTRODUÇÃO

A construção de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) exhibe notável expansão, especialmente a partir da década de 90, pela crescente demanda de energia elétrica vivida no País e pela abertura do setor energético, em meados da década de 90. Em comparação às UHEs, de maior porte, apresentam menor custo do investimento e mão de obra necessárias, além do que há maior facilidade de se obter licenças ambientais e de instalação frente aos órgãos reguladores e fiscalizadores devido ao menor porte do empreendimento e portanto, menores impactos.

Atualmente a hidroeletricidade é a principal responsável pelo suprimento da energia no país e ainda possui grande potencial de crescimento, pelo expressivo potencial hídrico do Brasil. Dentre suas vantagens destaca-se o potencial renovável e a detenção da tecnologia para a implantação, o que significa desenvolvimento em diversos setores do país.

Segundo (TOLMASQUIM, 2012), entre 2016-2020, deverão ser viabilizados cerca de 19 GW em projetos hidrelétricos, sendo 15,5 GW (82%) situados na Região Norte do país.

As PCHs são obras de grande porte que envolvem um estudo multidisciplinar minucioso. Os estudos geológico-geotécnicos para estes projetos devem ser direcionados e específicos para cada tipo de empreendimento, considerando suas particularidades no que diz respeito aos aspectos geológicos, geomorfológicos, geomecânicos, hidrogeológicos e geotecnológicos, além de se levar em conta os tipos de estrutura para cada arranjo proposto.

Diante do cenário de crescimento a tendência é o esgotamento dos “melhores lugares” para implantação destas construções, assim, observa-se a demanda por outros locais com terrenos ainda pouco estudados do ponto de vista de seu comportamento geotécnico.

Segundo Campos (1988) as décadas de 50 e 60 assistiram ao desenvolvimento de uma importante fase na engenharia brasileira, relacionada a implantação de grandes projetos hidrelétricos. Em função destes acontecimentos, a tecnologia nacional passou a buscar soluções para as questões formuladas pela necessidade de se conhecer comportamentos de materiais de construção e de fundações daquelas grandes obras.

Ainda de acordo com o autor, é possível constatar que os grandes empreendimentos em questão foram implantados em regiões na quais predominam rochas pré-cambrianas (granitos, gnaisses, migmatitos e tipos associados) e efusivas básicas (basaltos, diabásios). Assim sendo, as rochas citadas foram alvo e extensivos estudos, que pudessem proporcionar parâmetros de projeto e construção adequados.

Por outro lado, pouco ou quase nada se realizou, com os mesmos propósitos relativamente às rochas sedimentares, no Brasil, na época em questão (CAMPOS, 1988).

A mecânica de rochas se desenvolveu com base em maciços de rochas competentes, duras, com diaclasamento marcado, que possibilitou estabelecer conceitos como “material rocha” e “maciço rochoso”, com comportamento geomecânicos acentuadamente distintos.

Neste contexto, grande parte das rochas sedimentares não pode ser enquadrada já que se comportam como materiais de transição entre solos e rochas, sendo suas propriedades físicas e mecânicas comandadas por outros parâmetros, como a cimentação, além das descontinuidades. Dessa forma, o estudo geotécnico de rochas sedimentares deve-se desenvolver tomando-se em conta questões como cimentação da massa rochosa, do conhecimento dos processos genéticos e da influência do interrelacionameto entre grãos e teor de argila, dentre outros.

A partir de 1981 é que se iniciou um processo de divulgação sobre estudos e pesquisas envolvendo os materiais em questão. Estes estudos desenvolveram-se fundamentalmente sobre rochas clásticas e dentre estas, em particular sobre os arenitos; subsidiariamente foram estudados argilitos, siltitos e folhelhos (CAMPOS, 1988).

A PCH estudada será instalada no rio Iguaçu, no estado do Paraná, sobre rochas sedimentares das formações Furnas e Itararé, tendo como maciço de fundação o arenito.

O arenito ocorre em áreas restritas no território brasileiro como, por exemplo, na região da Bacia do Paraná. Estudos que buscam correlacionar as características geotécnicas dos arenitos principalmente para o uso de fundações são escassos.

Sobre o rio estudado, é importante salientar que todas as grandes usinas do rio Iguaçu foram implantadas em geologia de rochas basálticas da bacia do Paraná, ou em maciço de rochas cristalinas da Serra do Mar. Todos estes aproveitamentos apresentam como ponto comum o fato de terem sido implantados em geologias constituídas por rochas

ígneas densas, de alta resistência mecânica e, portanto, mais favoráveis em termos geotécnicos (DUARTE *et al.*,2012 ).

Já as rochas sedimentares, predominantes no sítio da usina de Mauá (rio Tibaji), onde também ocorrem disseminadas no maciço intrusões de rochas ígneas básicas, diques e soleiras de diabásio, requerem cuidados especiais por parte do Projetista em função de sua menor resistência mecânica, maior porosidade, portanto menor densidade e maior suscetibilidade a processos de degradação quando expostas ao intemperismo ou à ação hidráulica. (DUARTE *et al.*,2012).

Salienta-se que não faz parte do escopo do trabalho detalhamento ou apresentação de dados técnicos no que diz respeito ao projeto da Usina, considerando relevante ao mesmo apenas os aspectos relacionados às fundações, sob o ponto de vista da geologia de engenharia.

## **1.1 Objetivos**

Elaborar um modelo geomecânico do maciço rochoso de arenito (rocha branda) das formações Itararé e Furnas (Bacia do Paraná) onde serão instaladas as fundações das estruturas de Barramento e Geração de PCH a ser implantada no rio Iguaçu, no estado do Paraná.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

- - Caracterizar parâmetros geológicos, geotécnicos e a resistência mecânica dos arenitos que servirão de fundação para da PCH estudada.
- - Compartimentar o maciço rochoso em unidades geológicas e geotécnicas e estabelecer o modelo geomecânico.
- - Avaliar a eficiência das técnicas de caracterização e classificação utilizadas neste estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este item foi dividido em 3 partes. A primeira descreve critérios utilizados para a classificação geomecânica das fundações de uma barragem. Conforme Costa (2012), em qualquer barragem a projetar, independente de seu tipo, porte, objetivo, sua condição topográfica e natureza geológica, a fundação deverá ser caracterizada e classificada em função de suas propriedades geomecânicas e capacidade de reter o fluxo de água. Assim descrevem-se os parâmetros geotécnicos e geológicos em relação ao maciço rochoso que devem ser analisados, em estudos de fundação de obras de barragens hidrelétricas.

A segunda parte consiste na revisão sobre as características físicas da região de interesse na bacia do rio Iguaçu. São abordados aspectos climáticos, vegetação, geomorfológicos, estratigráficos, litológicos e estruturais, com atenção especial às formações Furnas e Itararé que compõem o subsolo da região de implantação do empreendimento.

Na terceira parte faz-se revisão de dados geotécnicos disponíveis na literatura sobre rochas sedimentares brandas, especialmente os arenitos, no que diz respeito as suas propriedades mecânicas e geológico-geotécnicas, que são condicionantes à instalação do futuro empreendimento.

### **2.1 Critérios e Parâmetros usados para a descrição geomecânica de maciços rochosos**

De acordo com Serra Junior & Ojima (1998), um maciço rochoso é um conjunto de blocos de rochas justapostos e articulados. O material que forma os blocos constitui a matriz do maciço rochoso, também denominada rocha intacta, e as superfícies que os imitam, as discontinuidades. Os maciços rochosos são essencialmente heterogêneos, anisotrópicos e descontínuos.

Neste item são descritos os condicionantes em relação ao maciço rochoso, que tradicionalmente são descritos e analisados, sob o ponto de vista geotécnico, para a fundação de obras de barragens hidrelétricas.

### 2.1.1 litologia, composição mineralógica e estruturas (COSTA, 2012)

Estes parâmetros devem ser obtidos através de testemunhos de sondagens, afloramentos rochosos ou ainda, descrição de lâminas delgadas.

### 2.1.2 Alteração

Segundo Serra Junior e Ojima (1998) o parâmetro destina-se a avaliar a alteração mineralógica e o decréscimo da resistência mecânica devida ao intemperismo ou efeitos hidrotermais. Os graus são definidos por comparação com o espécime são.

Ojima (1982) define, sob o ponto de vista geotécnico, alteração como sendo o conjunto de modificações que conduzem a uma degradação das características mecânicas da rocha.

Foram estabelecidos (ISRM, 1983) cinco graus deste parâmetro, a saber:

#### A1 - Rocha Sã

Não apresenta vestígios de ter sofrido alterações físicas e químicas dos minerais principais. Só pode ser escavada a fogo.

#### A2 - Rocha Pouco Alterada

Apresenta sinais de alteração incipiente dos minerais primários; em geral é ligeiramente descolorida. Apresenta praticamente as mesmas propriedades físicas e mecânicas da rocha sã. Só pode ser escavada a fogo.

#### A3 - Rocha Moderadamente Alterada

Apresenta-se com os minerais medianamente alterados; mostra-se bastante descolorida e suas propriedades físicas e mecânicas são inferiores as da rocha pouco alterada. É, entretanto, uma rocha bastante resistente, quebrando-se com relativa dificuldade sob ação do martelo. Quando pouco fraturada, só pode ser escavada a fogo.

#### A4 – Rocha Muito Alterada

Apresenta-se com os minerais muito alterados, às vezes pulverulentos e friáveis. Suas propriedades físicas e mecânicas são acentuadamente inferiores as da rocha medianamente alterada. Quebra-se facilmente com as mãos e é escavável a picareta.

#### A5 – Rocha Extremamente Alterada ou Solo de Alteração (Saprolito)

Rocha decomposta ou Solo de Alteração (Saprolito) proveniente da alteração “in situ”, no qual as estruturas da rocha original estão preservadas. Os minerais resistentes encontram-se fragmentados ou com decomposição nítida. Os demais se apresentam totalmente transformados em argilo-minerais. Pode ser escavado por qualquer meio manual ou mecânico convencional.

As evidências macroscópicas de alteração são fornecidas pela observação dos seguintes aspectos:

- Alteração da cor original dos minerais e da rocha (descoloração ou oxidação);
- Presença de minerais secundários (argila, óxidos, carbonatos, sílica amorfa etc.);
- Perda de coesão ou do imbricamento dos grãos;
- Lixiviação do cimento original;
- Aumento da porosidade e microfissuramento;
- Diminuição do brilho e dureza dos minerais.

Neste ponto, salienta-se que em regiões arenosas há grande dificuldade de se reconhecer o estado de alteração, uma vez que o fenômeno nem sempre se manifesta por modificações cromáticas da rocha, ou no brilho dos minerais. Nestes casos, recorre-se ao parâmetro coerência, mencionado no item seguinte (SERRA JUNIOR & OJIMA, 1998).

Os diversos itens que descrevem este parâmetro são baseados na avaliação tátil-visual qualitativa do maciço rochoso. Segundo Ojima (1982) a caracterização quantitativa do estado de alteração assume importância fundamental em termos de Geologia de Engenharia, pois a possibilidade de se atribuir um valor a determinada característica diminui a subjetividade que a caracterização qualitativa não pode eliminar.

Como exemplos de caracterização quantitativa do estado de alteração podem citar-se (OJIMA, 1982):

- a) Caracterização física (deformabilidade e rotura, velocidade de propagação de ondas elásticas, porosidade e permeabilidade, expansibilidade, e desgaste em meio úmido);
- b) A caracterização micropetrográfica;
- c) A caracterização dos índices de alteração geoquímica.

### 2.1.3 Grau de Resistência ou Consistência/Coerência (ISRM, 1983)

Este parâmetro avalia a resistência da rocha à desagregação com os dedos (friabilidade), ao impacto do martelo de geólogo (tenacidade) e ao risco (dureza) (COSTA, 2012), sendo que os graus de resistência expostos no QUADRO 2-1 devem ser definidos de acordo com a observação da reação da rocha aos métodos citados.

**QUADRO 2-1 - Graus de Resistência**

<b>RESISTÊNCIA</b>	<b>CONSISTÊNCIA</b>	<b>DENOMINAÇÃO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
0	5	Extremamente Branda	-Penetrada pela ponta do dedo polegar; -Moldada pelas mãos; -Facilmente penetrada pelo canivete e martelo de geólogo; -Risca com a unha; -Escavada por equipamento manual.
1		Muito Branda	-Esmigalha-se facilmente sob o impacto de martelo de geólogo; -Indentada facilmente pela ponta fina do martelo de geólogo; -Riscada e raspada facilmente pelo canivete; -Desplacamentos ao longo da foliação sob pressão dos dedos; -Bordas dos fragmentos facilmente quebradas pela pressão dos dedos; -Pequenos fragmentos (2cm x 2cm x 2cm) não quebram sob a pressão dos dedos; -Escavação por equipamentos mecanizados.
2	4	Rocha Branda	-Quebra-se sob único impacto do martelo de geólogo; -Indentação rasa sob impacto firme da ponta do martelo de geólogo; -As bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos; -A lâmina do canivete provoca sulco acentuado na superfície do fragmento; -Podem ser raspadas pelo canivete; -Escavação por equipamentos mecanizados, exigindo em alguns casos, fogo de afrouxamento do maciço.
3	3	Medianamente Resistente	-Espécimes de mão podem ser quebradas sob poucos golpes firmes do martelo de geólogo; -Bordas finas dos fragmentos podem ser quebradas pelas mãos com certa dificuldade; -Superfície pouco riscável por lâmina de aço; -Não pode ser raspada pelo canivete; -Escavada por desmonte a fogo.
4	2	Resistente	-Espécimes de mão requerem alguns golpes do martelo de geólogo para serem quebradas; -Bordas dos fragmentos dificilmente quebradas pelas mãos; -Superfície dificilmente riscada pelo canivete; -Escavada por desmonte a fogo.
5	1	Muito Resistente	-Espécimes de mão requerem golpes do martelo de geólogo para serem quebrados; -Fragmentos possuem bordas cortantes que resistem ao corte por lâmina de aço; -Superfície praticamente não riscada pelo canivete; -Escavada por desmonte a fogo.
6		Extremamente Resistente	-Espécimes somente lascadas com uso de martelo de geólogo.

#### 2.1.4 Descontinuidade

Conforme ISRM (1983) trata-se de um termo geral para qualquer descontinuidade mecânica do maciço rochoso e que tenha nenhuma ou baixa resistência a tração. É termo coletivo para a maioria dos tipos de juntas, planos de acamamento mais fracos, planos de xistosidade mais fracos, zonas de fraqueza e falhas.

ISRM (1983) define dez parâmetros para descrever as descontinuidades, descritas abaixo:

- a) Orientação> Atitude da descontinuidade no espaço. Descrita pela direção do mergulho e mergulho da linha de maior inclinação sobre o plano da descontinuidade.
- b) Espaçamento: É a distância perpendicular entre descontinuidades adjacentes. Refere-se normalmente ao espaçamento médio ou modal de uma família de juntas.
- c) Persistência: É a extensão do traço de uma descontinuidade conforme observado em um afloramento. Pode ser uma medida aproximada de sua extensão em área ou comprimento de penetração da descontinuidade. Se a descontinuidade acaba em rocha sã ou outra descontinuidade a persistência diminui.
- d) Rugosidade: É a rugosidade da superfície e ondulação relativas ao plano médio de uma descontinuidade. A rugosidade e ondulação contribuem para a resistência ao cisalhamento.
- e) Resistência das paredes: É a resistência a compressão das paredes adjacentes de uma descontinuidade. Deve ser menor que a da rocha intacta devido ao intemperismo ou alteração das paredes. Se as paredes estão em contato, teremos uma importante componente da resistência ao cisalhamento.
- f) Abertura: é A distância perpendicular entre as paredes adjacentes de uma descontinuidade, cujo espaço intermediário é preenchido por ar ou água.
- g) Preenchimento: É o material que separa as paredes adjacentes de uma descontinuidade e que usualmente é mais fraco que a rocha que lhe deu origem. Os materiais típicos de preenchimento são areia, silte, argila,

brecha e milonito. Também inclui filames de minerais secundários e descontinuidades seladas, por exemplo: veios de quartzo e calcita.

- h) Percolação: Fluxo de água e umidade livre, visíveis em descontinuidades individuais ou no maciço rochoso como um todo.
- i) Número de famílias: é o número de famílias que compõem um sistema de juntas. O maciço rochoso pode conter também descontinuidades individuais.
- j) Tamanho dos blocos: São as dimensões dos blocos de rocha que resultam da orientação das famílias de juntas que se intersectam e do espaçamento das famílias individuais. Descontinuidades individuais podem também influenciar o tamanho e a forma dos blocos.

#### 2.1.5 Fraturamento

Conforme Serra Junior & Ojima (1998), o fraturamento é expresso pela quantidade de descontinuidades que intercepta o testemunho, definido em trechos com espaçamento homogêneo, expresso em número de fraturas por metro.

O fraturamento pode ser expresso por graus de intensidade, ao adotar-se intervalos de frequência de fraturas, conforme ilustrado no QUADRO 2.2 (Serra Junior & Ojima, 1998)

QUADRO 2-2 Graus de Fraturamento (IPT, 1984 apud SERRA JUNIOR E OJIMA, 1998)

<b>SIGLA</b>	<b>DENOMINAÇÕES DO MACIÇO</b>	<b>Nº DE FRATURAS POR METRO LINEAR</b>
F1	Ocasionalmente fraturado	< 1
F2	Pouco fraturado	1 a 5
F3	Medianamente fraturado	6 a 10
F4	Muito fraturado	11 a 20
F5	Extremamente fraturado	> 20

### 2.1.6 “Rock Quality Designation” (RQD) - Designação de Qualidade da Rocha

O índice RQD foi definido por Deere (1967) com a finalidade de estimar quantitativamente a qualidade do maciço rochoso a partir dos testemunhos de sondagem rotativa. Representa, em percentagem, a relação entre o somatório do comprimento dos testemunhos maiores que 10cm e o comprimento total do trecho. Para que a aplicação do RQD seja válida, os testemunhos devem ser no mínimo do diâmetro NW (75,64mm) e amostrados com barriletes duplos.

Palmström (1982) sugeriu que, na ausência dos testemunhos de sondagens, o RQD pode ser avaliado pela estimativa do número de descontinuidades por unidade de volume a partir do mapeamento de afloramentos naturais ou de escavação, onde:

$$RQD = 115 - 3,3J_v$$

Na relação acima,  $J_v$  é a soma do número de descontinuidades de todas as famílias presentes no trecho mapeado, por unidade de comprimento nos 3 eixos X, Y e Z, ou seja, é o número de feições presentes em 1 m<sup>3</sup> de maciço rochoso. O QUADRO 2-3 apresenta os pesos a serem associados para cada intervalo de RQD.

QUADRO 2-3 - Graus de RQD

PORCENTAGEM (%)	QUALIDADE DA ROCHA
91 – 100	Excelente
76 – 90	Boa
51 – 75	Regular
26 – 50	Pobre
0 – 25	Muito Pobre

## 2.2 Aspectos a serem avaliados a partir da caracterização de maciços rochosos com relação à fundação de barragens

Os principais aspectos envolvidos na caracterização de um maciço rochoso que funciona como fundação de barragem são a DEFORMABILIDADE, e a ESTABILIDADE

entre as propriedades geomecânicas, e a ESTANQUEIDADE na área da hidrogeotecnia. (COSTA, 2012)

### 2.2.1 Deformabilidade

A deformabilidade de um maciço rochoso aborda as características de deformação que uma fundação de barragem poderá sofrer ao receber uma carga imposta pela obra. Essa deformação poderá levar ou não à ruptura do maciço rochoso. Essa deformação poderá implicar recalques da obra (geralmente diferenciais) que levem à sua ruptura, o que não significa que as fundações também sofreram ruptura.

Segundo Costa (2012), a deformabilidade é uma propriedade intrínseca da rocha e mesmo quando atinge a ruptura, não seriam considerados os efeitos dos planos de descontinuidade, já que tais influências serão abordadas na análise de estabilidade do maciço.

Os principais parâmetros que influem na deformabilidade são: módulo de deformabilidade, resistência à compressão e estado de alteração da rocha.

O módulo de deformabilidade é definido pela relação entre a carga aplicada pela obra e a deformação sofrida pela rocha no mesmo sentido de aplicação da carga. Este módulo varia proporcionalmente à participação volumétrica de cada mineral e à sua variada resistência a decomposição

### 2.2.2 Estabilidade

A estabilidade de uma fundação de barragem corresponde à resistência imposta pelo maciço rochoso que integra tal fundação aos fatores que induzem à ruptura.

De acordo com o autor essa resistência depende dos parâmetros  $c$  (coesão) e  $\phi$  (ângulo de atrito interno) do maciço rochoso. Esses parâmetros são muito reduzidos ao longo dos planos de descontinuidades desse maciço, por isso é muito importante uma perfeita caracterização dessas descontinuidades no estudo de estabilidade de uma fundação de barragem.

À medida que a rocha vai se alterando também caem muito o valor desses parâmetros, razão pela qual constitui importante parâmetro para a avaliação da

estabilidade das fundações de uma barragem a caracterização do estado de alteração do maciço rochoso, principalmente ao longo dos planos de descontinuidade. Nesses planos é mais acentuada a alteração da rocha, por causa da percolação de água ao longo deles, pois possuem menor resistência ao cisalhamento, independente de estar alterada a rocha em seu entorno.

A resistência à compressão da rocha também influi na ruptura e conseqüentemente, na estabilidade das fundações de uma barragem, pelo que também deve ser considerada nessa análise.

### 2.2.3 Estanqueidade

A propriedade de estanqueidade de uma fundação de barragem relaciona-se com o seu impedimento da percolação da água através dela. Evidentemente, não se pode esperar que uma fundação seja totalmente estanque, pois os custos para tornar um maciço impermeável seriam incompatíveis com os efeitos esperados para tal estanqueidade. Assim, com a estanqueidade parcial de um maciço rochoso, busca-se reduzir a percolação a níveis aceitáveis em função da segurança da obra e do objetivo para o qual a obra foi projetada.

Uma vez que a permeabilidade intersticial na maioria das rochas que constituem as fundações de uma barragem (rochas ígneas e metamórficas) é praticamente nula (da ordem de  $10^{-10}$  cm/s), pode-se concluir que os planos de descontinuidade constituem-se no principal veículo de percolação d'água nos maciços rochosos. Denominando genericamente de fraturas a maioria dos planos por onde percolam as água subterraneamente, pode-se definir como parâmetro mais importante para a propriedade hidrogeotécnica a perfeita caracterização estrutural do maciço rochoso.

A condutividade Hidráulica, que reflete a quantidade de água na unidade de tempo que passa em um metro linear desses planos de descontinuidade por unidade de pressão hidráulica, é o parâmetro que mede a permeabilidade do maciço rochoso fraturado. Trata-se de um importante critério caracterizador da estanqueidade e, portanto, imprescindível à classificação de um maciço rochoso que atua como fundação de uma barragem. É, contudo, imprescindível analisar as perdas d'água juntamente com a caracterização estrutural.

## 2.2.4 Modelo de Classificação (COSTA, 2012)

Definidos os critérios mais importantes na caracterização dos principais aspectos envolvidos na fundação de uma barragem, restaria graduar os diferentes parâmetros selecionados, de sorte a zonear graus de aplicação de cada um deles.

O QUADRO 2.4 mostra a classificação geral dos maciços rochosos em função dos critérios adotados.

A classificação geral apresentada resulta do somatório de todos os índices atribuídos aos diversos parâmetros para cada uma das cinco classes em que foi dividido o maciço rochoso.

QUADRO 2-4 - Classificação geral dos maciços rochosos

Aspecto Envolvido	Parâmetro	Variação dos Índices				
		>200	100-200	50-100	10-50	<10
Deformabilidade	Módulo E (Gpa)	>200	100-200	50-100	10-50	<10
		10	8	6	4	2
	Resist. à compr. Uniaxial (Mpa)	>100	50-100	20-50	5-20	<5
		10	8	6	4	2
Estabilidade	Alteração da rocha (quadro XX)	D1	D2	D3	D4	D5
		16	12	8	4	2
	Sistemas de descont. (Quadro XX)	A	B	C	D	E
		8	6	4	2	0
	Relação de direções (Tab XX)	a	b	c	d	e
		8	6	4	2	0
	Condição da Descont. (Quadro XX)	a'	b'	c'	d'	e'
		8	6	4	2	0
Estanqueidade	Espaçam. Entre descont. (m)	>3,0	1,0-3,0	0,3-1,0	0,05-0,3	<0,05
		10	8	6	4	2
	Condutividade Hidráulica (Tab XX)	H1	H2	H3	H4	H5
		15	10	7	4	0
	Relação de direções (Tab XX)	a	b	c	d	e
		15	10	7	4	0
Somatório dos índices		81-100	61-80	41-60	21-40	<20
Classe do maciço rochoso		I	II	III	IV	V
Descrição do maciço rochoso		M. Bom	Bom	Reg.	Ruim	M. Ruim

Os graus de alteração da rocha (D1 a D5) devem ser definidos em função das características apresentadas por cada um desses estágios de alteração, conforme discriminado no QUADRO 2.5.

QUADRO 2-5 - Decomposição das rochas

Grau	Denominação	Características
D1	Rocha sã	A rocha apresenta seus minerais constituintes em 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.

A presença de um ou mais sistemas de descontinuidades é fundamental na análise de estabilidade. Porém mais importante que isso é a intensidade e o sentido da inclinação desses planos de descontinuidade, o que pode ser evidenciado no QUADRO 2.6.

QUADRO 2-6 - Sistemas de descontinuidades

Classe	Características	Denominação
A	Um sistema dos tipos: V ou MF	Muito favorável
B	Um sistema dos tipos: JF ou Mf	Favorável
	Dois sistemas dos tipos: H/MF, H/Mf, V/JF, MF/JF	
C	Dois sistemas dos tipos: H/JF, H/V, JF/Jf, V/MF, MF/Mf	Regular
	Três sistemas dos tipos: H/JF/Jf, H/V/JF, V/JF/Jf	
D	Um sistema dos tipos: H ou Jf	Desfavorável
	Dois sistemas dos tipos: H/Jf ou V/Mf	
	Três sistemas dos tipos H/V/Jf, H/V/MF, H/MF/Mf, V/MF/JF	
E	Dois sistemas dos tipos: Jf/MF ou Mf/Jf	Muito desfavorável
	Três sistemas dos tipos não incluídos nas classes C e D	
	Mais de três sistemas	

**Simbologia:**

H - horizontal

V - vertical

JF - Mergulhando para jusante com forte ângulo (>50°)

Jf - Mergulhando para jusante com fraco ângulo (<30°)

MF - mergulhando para montante com forte ângulo

Mf - mergulhando para montante com fraco ângulo

O atrito e o embricamento provocado pelas irregularidades ao longo do plano dos planos de descontinuidade, principalmente de fraturas, influem decisivamente na resistência. O QUADRO 2.7 Mostra esse relacionamento e comprova a necessidade de uma acurada descrição de todas as descontinuidades existentes em um maciço rochoso.

QUADRO 2-7 - Condições das descontinuidades

<b>Classe</b>	<b>Descrição da superfície do plano de descontinuidade</b>
a'	Superfície rugosa, descontínua, paredes resistentes
b'	Superfície levemente rugosa, separação <1mm, paredes resistentes
c'	Superfície levemente rugosa, separação <1mm, paredes fracas
d'	Superfícies contínuas, estriadas ou com preenchimento < 5mm ou com abertura de 1 a 5 mm
e'	Superfícies contínuas com preenchimento mole < 5mm ou com abertura > 5mm

A influência do posicionamento das descontinuidades analisadas em cada sistema sobre a estabilidade da obra só pode ser bem compreendida quando considerada a relação ente as direções desses planos e a direção do eixo barrável. O QUADRO 2.8 mostra a influencia dessa relação não apenas sobre a estanqueidade, e pode-se observar que essa influencia é totalmente oposta para essas duas propriedades do maciço rochoso. Enquanto um plano de descontinuidade torna-se perigoso para a estabilidade quando se aproxima da mesma direção da barragem, esse mesmo plano dificulta a percolação da água, mesmo se estiver aberto, tornando-se um fator favorável à estanqueidade.

QUADRO 2-8 - Influência entre as direções das descontinuidades e do eixo barrável com relação à estabilidade e à estanqueidade das fundações

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	17-90

Quanto menor for o espaçamento entre os planos de descontinuidade, maior a intercomunicabilidade entre eles, configurando blocos isolados que reduzem a sua resistência ao cisalhamento.

Em termos de estanqueidade, a maior intercomunicabilidade entre os planos abertos, quando é reduzido o seu espaçamento, contribui decisivamente para aumentar a permeabilidade do maciço rochoso, chegando a conferir ao maciço rochoso, nos casos mais extremos, a condição de aquífero granular.

A condutividade hidráulica é definida pelos ensaios de perda d'água realizados nos furos de sondagens. A classificação geral em relação a esses parâmetro é apresentada no QUADRO 2-9.

QUADRO 2-9 - Condutividade Hidráulica

Classe	Denominação	Permeabilidade cm/s	Condut. Hidráulica l/min.m.kg/cm <sup>2</sup>
H1	Muito baixa	$k < 10^{-5}$	$C.H < 0,1$
H2	Baixa	$10^{-5} < k < 5.10^{-5}$	$0,1 < C.H < 0,5$
H3	Média	$5.10^{-5} < k < 5.10^{-4}$	$5,0 < C.H < 5,0$
H4	Alta	$5.10^{-4} < k < 2,5.10^{-3}$	$5,0 < C.H < 25,0$
H5	Muito alta	$k > 2,5.10^{-3}$	$C.H > 25,0$

Para avaliar separadamente a influência dos parâmetros escolhidos nos três aspectos enfocados, o somatório deve incluir apenas os parâmetros considerados para cada aspecto envolvido, conforme apresentado no QUADRO 2-10.

QUADRO 2-10 - Aplicação da Classificação para cada Aspecto Envolvido

Aplicação da classificação quanto à deformabilidade			
Somatório de índices	26-36	16-24	<16
Classificação do maciço	Bom	Regular	Ruim
Tipos de barragens recomendados	Concreto	Enrocamento	Terra
	Enrocamento		
Aplicação da classificação quanto à estabilidade			
Somatório de índices	42-60	26-40	<26
Classificação do maciço	Bom	Regular	Ruim
Tipos de barragens recomendados	Concreto	Enrocamento	Terra
	Enrocamento		
Aplicação da classificação quanto à estanqueidade			
Condutividade hidráulica	H1	H2-H3	H4-H5
Somatório de índices	>40	20-40	<20
Classificação do maciço	Bom	Regular a ruim	Ruim a péssimo
Providências recomendadas	Nenhuma	Injeção ao longo de duas ou três linhas	Injeção ao longo de três ou mais linhas

### 2.3 Rochas Sedimentares: Arenito

O termo arenito corresponde a areia litificada. O uso mais comum do termo é para designar sedimentos clásticos com os componentes granulares com tamanho médio de areia, sem qualquer conotação mineralógica e/ou genética. Conforme esta definição, todas as rochas sedimentares compostas de fragmentos minerais de areia são arenitos. Em geral a composição mineralógica mais comum dos grãos de área e arenitos é quartzosa (SUGUIO, 2003).

Os arenitos resultam da mistura de grãos minerais e fragmentos líticos, provenientes da erosão de vários tipos de rochas matrizes. Como a mineralogia de um arenito representa a herança da área fonte, modificada por processos intempéricos, erosivos, deposicionais, etc., o seu estudo constitui um instrumento imprescindível na reconstrução da proveniência, do transporte e das condições físico-químicas reinantes nos paleoambientes deposicional e diagenético. (SUGUIO, 2003)

Em relação às propriedades geotécnicas dos arenitos, é importante observar itens como porosidade e permeabilidade, coloração, tipo de cimentação, além das propriedades de resistência do maciço. (REYNOLDS, 1961)

A resistência dos arenitos varia entre 5.000 e 21.000lb/sq. In, embora arenitos silicificados possam apresentar valores muito maiores. Já os módulos de ruptura variam de 400 a 2.500lb.

Em geral, os arenitos são rochas porosas e variam entre 2 e 15% de porosidade.

Em relação a durabilidade, os arenitos resistentes são duráveis e tem boa resistência ao fogo. Em arenitos com cimento argiloso ou com finas camadas de argila, a argila se degrada mais facilmente, diminuindo a durabilidade da rocha. Quando o cimento é carbonático, a rocha pode sofrer dissolução em contato com fluidos ácidos.

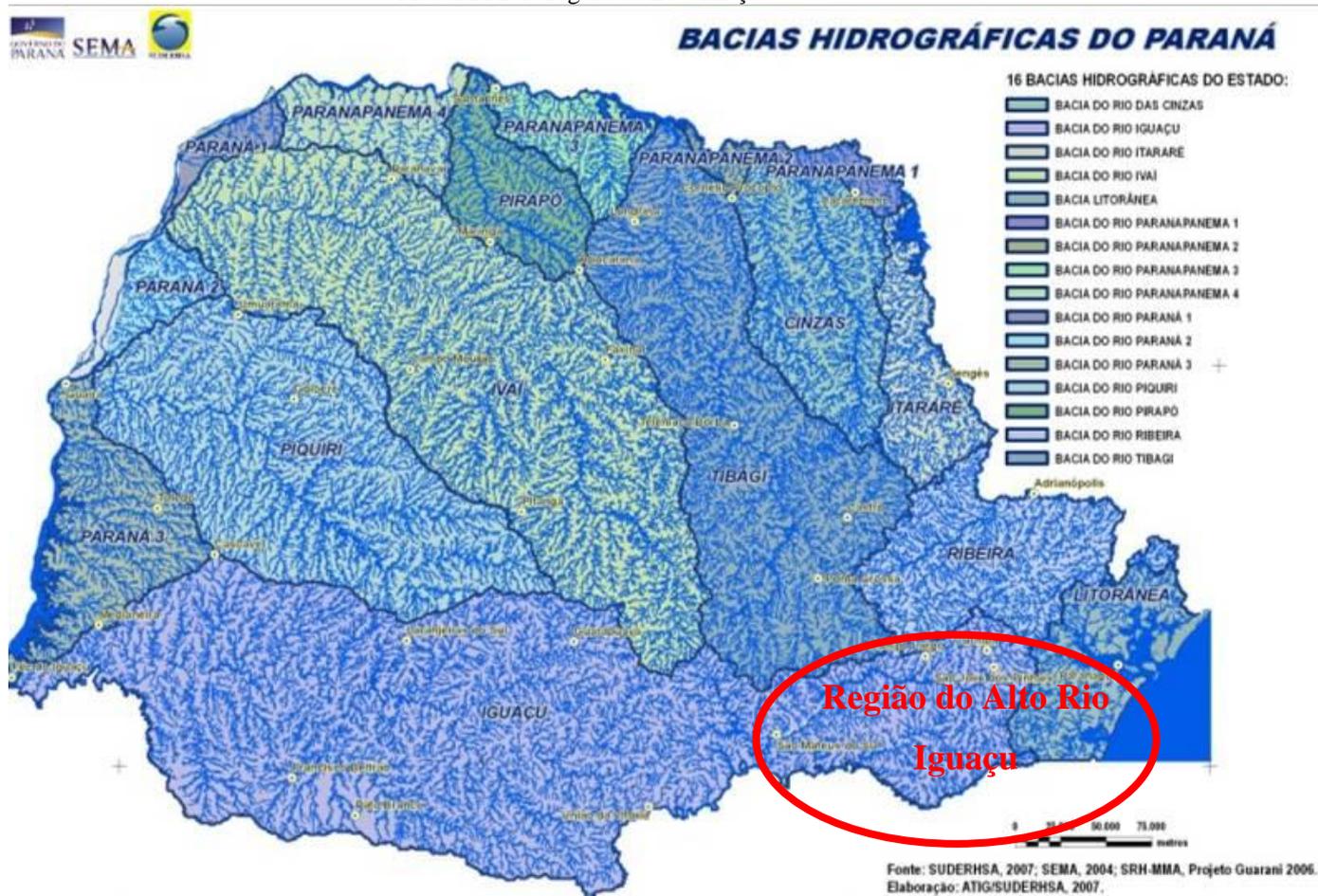
No intuito contribuir com banco de dados sobre as propriedades geotécnicas e geomecânicas relativas ao comportamento de arenitos e outras rochas sedimentares, foi elaborado o QUADRO 2.11 (Anexos) com valores de propriedades desses materiais, extraído de diversos autores.

## 2.4 Caracterização da área de estudo

### 2.4.1 Localização

A área estudada está localizada na porção oeste do estado do Paraná, na Bacia do Alto Rio Iguaçu (FIG 2.1).

FIGURA 2-1- Figura de Localização



### 2.4.2 Aspectos Fisiográficos

#### 2.4.2.1 Clima e vegetação

O sistema de classificação climática de Köppen, baseado na vegetação, temperatura e pluviosidade, apresenta um código de letras que designam grandes grupos e subgrupos climáticos, além de subdivisões para distinguir características

estacionais de temperatura e pluviosidade (TREWARTHA & HORN, 1980 *apud* IAPAR, 2013).

De acordo com IAPAR, foram identificados dois tipos climáticos no estado do Paraná: Cfa e Cfb, que são descritos a seguir:

Cfa - Clima subtropical; temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida.

Cfb - Clima temperado propriamente dito; temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C (mesotérmico), com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22°C e sem estação seca definida.

A FIG 2.X apresenta o mapa de distribuição dos tipos climáticos descritos, observa-se que o estado situa-se em uma zona de transição do clima subtropical para o clima temperado, predominando o último na bacia do rio Iguaçu.

## Classificação Climática - Segundo Köppen



FIGURA 2-2 - Classificação Climática do Estado do Paraná..

Fonte: IAPAR, disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=597>

Em relação aos aspectos relativos à vegetação do estado do Paraná é observada na FIG 2.3 que na Bacia do rio Iguaçu, ocupando as porções planálticas do Estado (em média entre 800 e 1200m de altitude), situa-se a região da Floresta de Araucárias e em menor proporção os Campos Naturais.

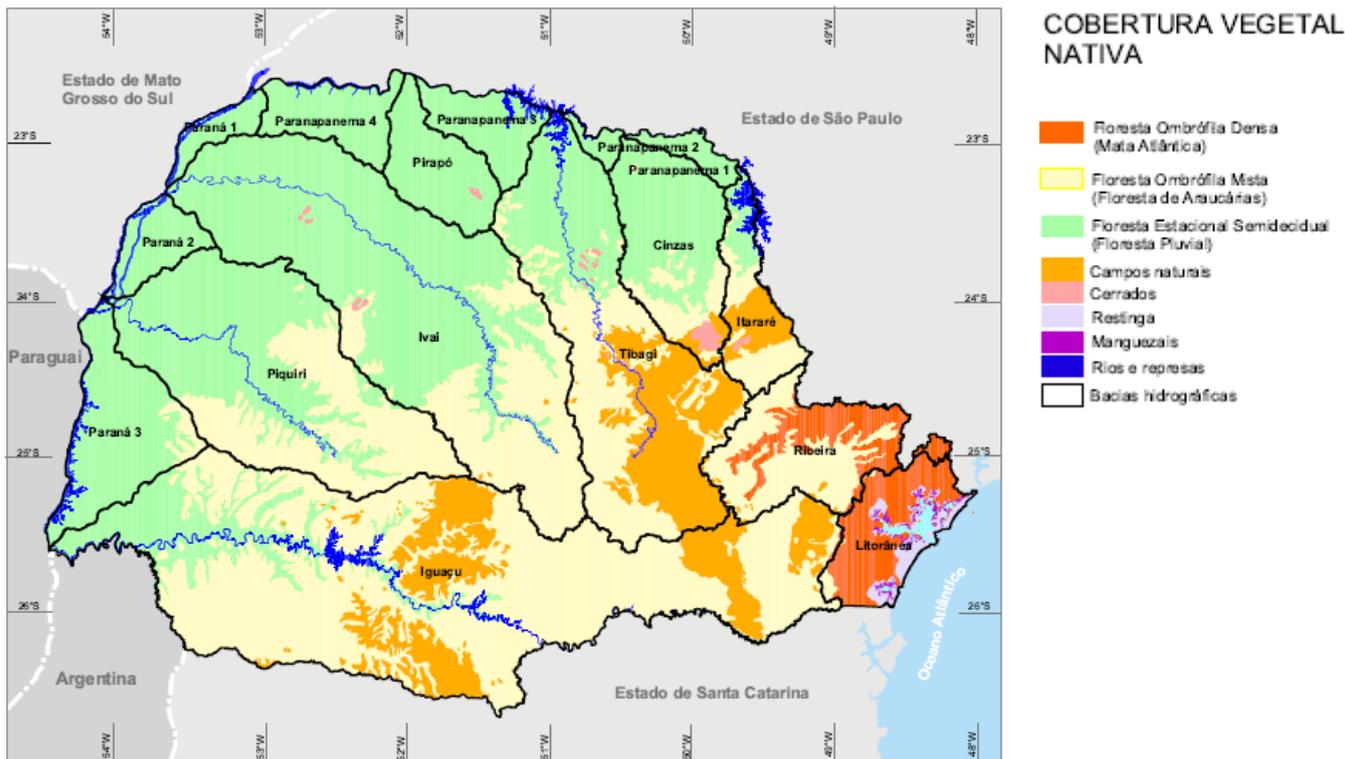


FIGURA 2-3 - Cobertura vegetal do estado do Paraná. Fonte: IPARDES

### 2.4.3 Aspectos Geomorfológicos

De acordo com MINEROPAR (2006), a compartimentação geomorfológica do estado do Paraná, partindo-se de leste para oeste, está distribuída da seguinte maneira: Planície Litorânea, Serra do Mar, Primeiro, Segundo e Terceiro Planalto.

Estas unidades são descritas conforme Santos *et al*, (2006):

Na porção leste do estado, a Planície Litorânea é composta de rochas sedimentares recentes e o relevo essencialmente plano.

A Serra do Mar e Morros Isolados configuram-se como uma cadeia de montanhas marginal do Primeiro Planalto Paranaense, separando-o da Planície Litorânea, com cimos elevados de até 1.800 metros de altitude, sustentada por litologias diversas, quase sempre metamórficas de alto grau, como migmatitos, gnaisses e xistos e mais raramente quartzitos, frequentemente associados com rochas intrusivas relacionadas a ciclos metamórficos mais jovens. Rochas resistentes sustentam diversas unidades morfoestruturais dentro desta unidade morfológica, enquanto falhas, zonas de cisalhamento, fraturas e grandes domínios de rochas supracrustais condicionam lineamentos maiores e segmentos locais da rede de drenagem.

A origem da Serra do Mar é atribuída a processos tectônicos de movimentação vertical, iniciados no Cenozóico. Dessa forma, é vista como um grande fronte dissecado de falhas em que termina o Planalto Atlântico.

O Primeiro Planalto Paranaense estende-se desde a região de Jaguariaíva, Tibagi e Purunã, nos sopés da escarpa da Serra do Purunã, constituída de estratos horizontais devonianos, até a vertente leste da Serra do Mar. Ao norte comparecem as rochas do Grupo Açungui, onde a drenagem da bacia do rio Ribeira produziu uma intensa dissecação, modelando um relevo montanhoso, com altitudes variando entre 400 e 1200 metros, sustentado por rochas metamórficas de baixo grau do Grupo Açungui, metavulcânicas do Grupo Castro, intrusões graníticas e diques de diabásio.

Ao sul é relativamente uniforme, esculpido em rochas cristalinas, tais como migmatitos, xistos metamórficos e gnaisses, cortados por diques de pegmatitos e diques de diabásio, com altitudes médias entre 850-950 metros, formando uma paisagem suavemente ondulada com planícies e várzeas intercaladas, constituídas por sedimentos colúvio-aluvionares recentes e paludais ao longo dos principais cursos de água. Os sedimentos da Formação Guabirotuba preenchem a bacia de Curitiba, depositados durante o Pleistoceno e constituindo uma área de relevo de colinas que se articulam às planícies fluviais mediante suaves rampas.

O Segundo Planalto Paranaense encontra-se esculpido na faixa de rochas Paleozóicas e apresenta-se, no Paraná, como um planalto modelado em estruturas monoclinais, sub-horizontais, mergulhando para o oeste. Tem seus limites entre a escarpa Devoniana a leste, onde as altitudes médias de cimeira estão entre 1100 a 1200m e, a oeste, com a escarpa arenito-basáltica ou Triássico-Jurássico onde, em suas proximidades, as altitudes variam entre 350 e 1200 metros.

O Terceiro Planalto Paranaense (ou Planalto Arenito-Basáltico) corresponde ao grande derrame mesozóico de rochas eruptivas básicas associados, na porção NO, às rochas areníticas do Grupo Bauru Abrange cerca de 2/3 do território paranaense e desenvolve-se como um conjunto de relevos planálticos, com inclinação geral para oeste-noroeste e subdivididos pelos principais afluentes do rio Paraná, atingindo altitudes médias de cimeira de 1100 a 1250m, na Serra da Esperança, declinando para altitudes entre 220 e 300 metros na calha do rio Paraná.

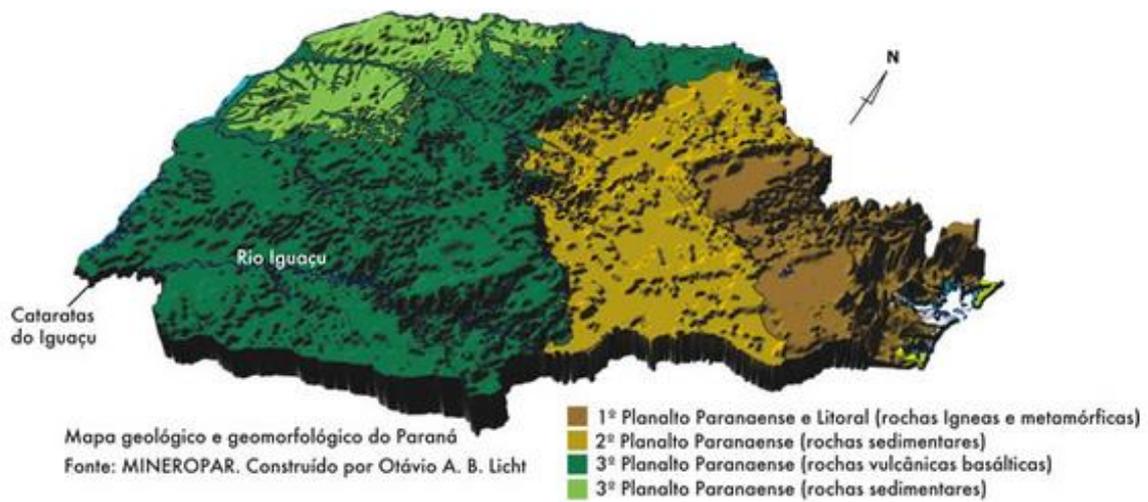


FIGURA 2-4 - Compartimentação Geomorfológica do Paraná. FONTE: MINEROPAR

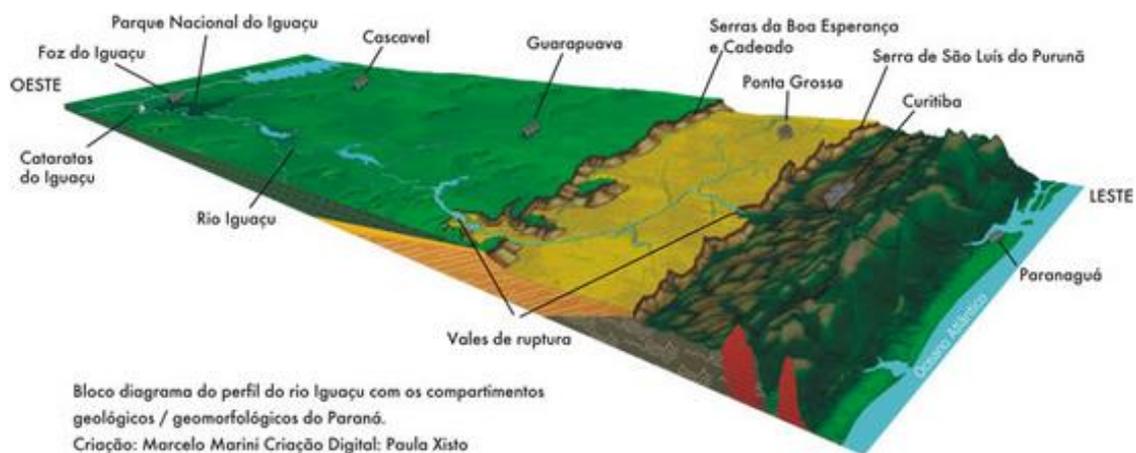


FIGURA 2-4- Compartimentação Geomorfológica ao longo do rio Iguaçu. FONTE: MINEROPAR

O rio Iguaçu representa a maior bacia hidrográfica do Estado do Paraná, com 70.800 km<sup>2</sup>. Nasce na frente ocidental da Serra do Mar, a leste de Curitiba, e percorre 910km até sua foz, no rio Paraná. É um rio geologicamente antigo, que cruza duas escarpas (São Luís do Purunã e Serra da Boa Esperança) em vales de ruptura (MINEROPAR, 2013).

#### 2.4.4 Aspectos Geológicos

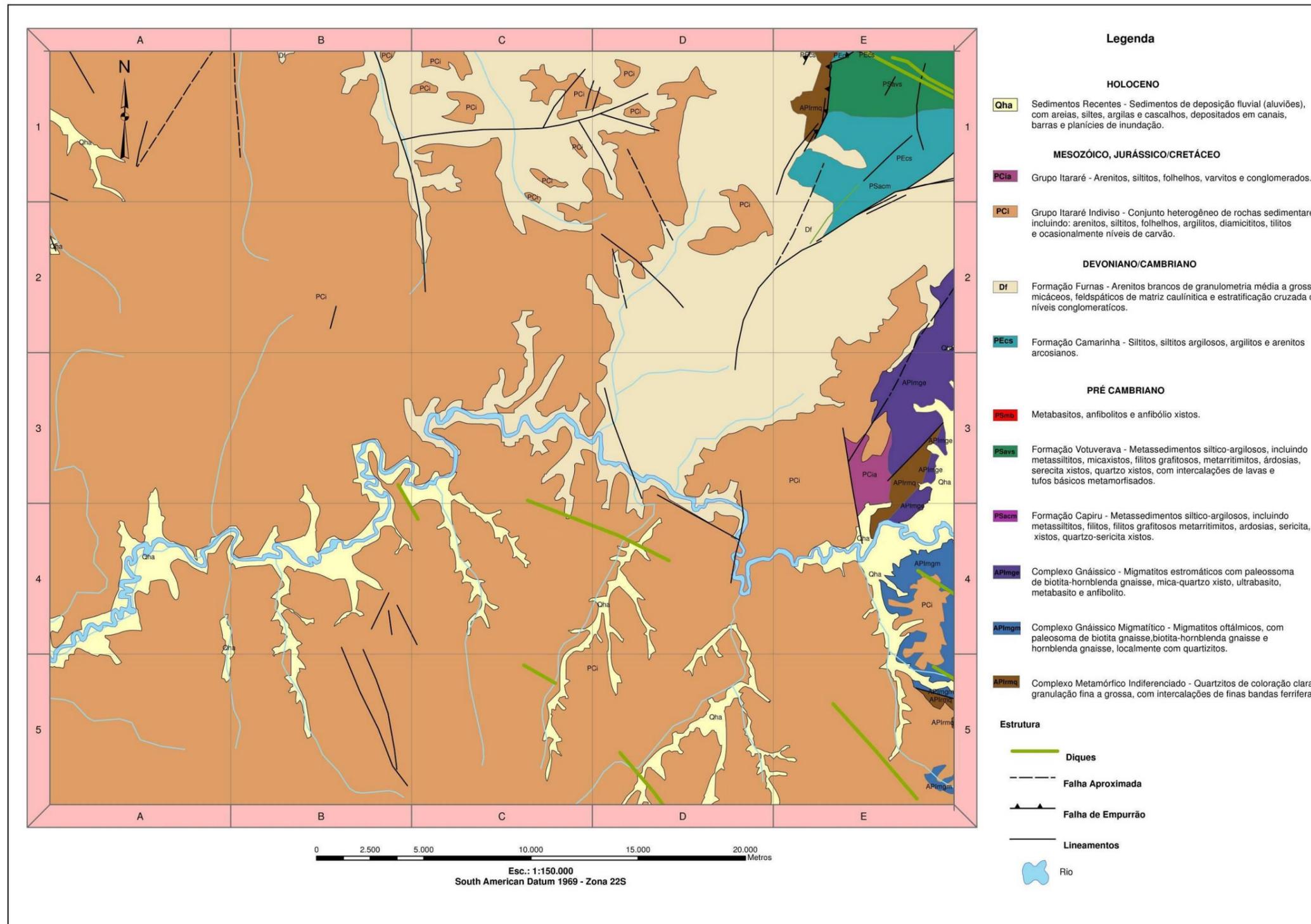
A região de interesse a este estudo está inserida sobre rochas sedimentares constituintes da Bacia do Paraná, a qual abrange uma área de cerca de 1.500.000 km<sup>2</sup>, sendo a maior parte em porções territoriais do Brasil Meridional, além do Paraguai, Argentina e Uruguai (MILANI, 2004).

A Bacia do Paraná é uma grande bacia intracratônica, inteiramente contida na placa sulamericana, constituída por uma sucessão sedimentar-magmática com idades entre o Neo-Ordoviciano e o Neocretácio (MILANI, 2004). Este conjunto de rochas representa a superposição de pacotes depositados em pelo menos três ambientes tectônicos, decorrentes da dinâmica de placas que conduziu a evolução do Gondwana. Por isso, seus limites foram muito variáveis no tempo, sendo que a configuração atual não retrata com nitidez aquilo que já foi um grande mar, diretamente conectado com o Oceano Pacífico paleozoico, e cobrindo uma extensa área do continente gondwânico (ZALAN ET AL, 1990).

De acordo com o Mapa Geológico do Paraná (MINEROPAR, 2006), FIG.2-5) as rochas da região pertencem aos grupos Paraná e Itararé, ocorrendo ainda diques básicos mesozóicos e depósitos recentes inconsolidados sob a forma de depósitos aluvionares e coluvionares.

Na seqüência é apresentado o mapa geológico (FIG. 2-6) regional (MINEROPAR, 2006), originalmente em escala 1:650000.

FIGURA 2-5 – MAPA GEOLÓGICO DO PARANÁ



## Figura 2-6 – Mapa Geológico Regional

### 2.4.5 Estratigrafia

A coluna estratigráfica regional

(QUADRO2-11 - Coluna Estratigráfica Simplificada (adaptado de MILANI, 2004))

Coluna Estratigráfica					
Era	Período	Grupo	Formação	Rochas	
Paleozóico 230 a 570 ma	Cretáceo	São Bento	Serra Geral	Basalto, Diabásio, Intrusão Gábricas com diferenciados alcalinos.	
			Botucatu	Arenitos finos a médios de coloração branca e rosada, com estratificações cruzadas acanalada de média a grande porte.	
	Permiano 230 a 280 ma	Superior	Passa Dois	Rio do Rastro	Siltitos e Arenito Verde ou Vermelho e Calcarenitos
				Terezina	Siltito e Calcários
				Serra Alta	Lamitos e Folhelhos
				Irati	Lamitos e Folhelhos, Folhelhos Pirobitominosos
		Médio	Guatá	Palermo	Siltitos Cinzentos
				Rio Bonito	Arenito, Siltitos, Folhelhos, Calcários e Camadas de Carvão
		Inferior	Itararé	Rio do Sul	Folhelhos, Siltitos e Arenitos Finos
				Mafra	Arenitos Finos e Grosseiros, Siltitos e Ritmitos
	Campo do Tenente			Arenito Grosseiro, Siltitos, Ritimitos e Diamictitos.	
	Devoniano	Paraná	Ponta Grossa	Folhelhos e Siltitos cinzentos, escuros e localmente Betuminosos	
Furnas			Arenitos médios a grosseiros e subordinadamente Conglomeráticos		



A seguir buscou-se descrever as principais características das unidades ocorrentes, focando em suas características físicas e texturais, além dos aspectos relevantes a abordagem dos estudos sob o ponto de vista da geologia de engenharia.

### Grupo Paraná

O Grupo Paraná caracteriza-se por depósitos marinhos que constituem as formações Furnas e Ponta Grossa.

#### *Formação Furnas*

A Formação Furnas (depósitos regressivos) consiste em arenitos esbranquiçados, localmente arroxeados, médios a grosseiros, mal selecionados, com grãos angulares e subangulares, quartzosos e com matriz caulínica (SCHNEIDER *et al.*, 1974), contendo poucas intercalações decimétricas de caulinita pura (ZALÁN *et al.*, 1987a). Secundariamente, ocorrem intervalos de pequena espessura de arenitos conglomeráticos, arenitos finos e siltitos argilosos (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

Os arenitos apresentam-se sempre com estratificação cruzada, predominando o tipo festonada e pacotes de estratificação cruzada sigmoidal (ZALÁN *et al.*, 1987a).

#### *Formação Ponta Grossa*

A Formação Ponta Grossa inicia-se por arenitos transgressivos basais, passando gradacionalmente a folhelhos marinhos com enriquecimento ao topo de matéria orgânica, sendo estes folhelhos sílticos e siltitos cinza escuro a pretos, localmente carbonosos, fossilíferos, micáceos e com intercalação de arenitos cinza claro, finos a muito finos, formando bancos de até 5 m de espessura.

Em subsuperfície, distingue-se de maneira geral uma fácies inferior síltico-argilosa, uma intermediária essencialmente argilosa e uma superior, síltico-arenosa que predomina tanto em superfície como em subsuperfície.

A estrutura sedimentar mais marcante é a laminação plano-paralela.

Em certos locais observa-se estratificação cruzada de pequeno porte, localmente acanalada, laminação cruzada, laminação flaser, marcas onduladas, bioturbações e estruturas de escorregamento (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

### Grupo Itararé

O Grupo Itararé inicia-se com um ciclo transgressivo com depósitos continentais na base, passando rapidamente a marinhos caracterizados principalmente por diamictitos, refletindo influências glaciais em seus diferentes ambientes deposicionais (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

Possui três formações: Campo do Tenente, Mafra e Rio do Sul.

#### *Formação Campo do Tenente*

A Formação Campo do Tenente estende-se desde a cidade de São Bento até o Arco de Ponta Grossa, apresentando na seção tipo uma espessura da ordem de 200 m (SCHNEIDER *et al.*, 1974), sendo composta por argilitos castanho-avermelhados, possuindo laminação plano-paralela.

Subordinadamente ocorrem ritmitos e diamictitos intercalados ao argilito.

Em locais restritos ocorrem arenitos finos, com estratificação plano-paralela e acanalada (SANTOS *et al.*, 1984).

Foi observada influência glacial direta nos depósitos desta formação, devido às associações de diamictitos, partículas e pavimentos estriados.

Aos argilitos atribui-se origem lacustre altamente oxidante (TOMMASI E RONCARATI, 1970 apud SCHNEIDER *et al.*, 1974).

#### *Formação Mafra*

A Formação Mafra constitui-se de arenitos esbranquiçados, amarelados e vermelhos, com granulometria bem variada. Ocorre desde arenito fino, bem selecionado, laminação ondulada e estratificação plano-paralela em bancos espessos, até arenitos médios e grosseiros com estratificação cruzada acanalada e estruturas de corte e preenchimento.

Secundariamente, ocorrem diamictitos, conglomerados, ritmitos, argilitos e varvitos (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

Ao que parece, o contato inferior da Formação Mafra com a Formação Campo do Tenente é discordante e o contato superior com a Formação Rio do Sul é concordante (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

### *Formação Rio do Sul*

A Formação Rio do Sul compreende sedimentos essencialmente argilosos que ocorrem no topo do Grupo Itararé.

Na sua base encontram-se folhelhos e argilitos cinza escuro, localmente semelhante à varvitos e na sua parte superior argilitos, varvitos, ritmitos, arenitos finos e diamictitos.

Laminação plano-paralela, rítmica e estrutura cone-in-cone são as estruturas sedimentares presentes nos sedimentos argilosos enquanto que marcas de base, acamamento gradacional, laminação convoluta, plano-paralela e cruzada, marcas ondulares e estruturas de escorregamento são mais comuns nas camadas siltico - argilosas e os intervalos arenosos apresentam laminação cruzada, estruturas de escorregamento e estratificação irregular.

Nos diamictitos ocorre estratificação irregular, estruturas convolutas e escorregamento sendo também abundantes marcas onduladas e laminação flaser no topo da formação (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

### *Formação Serra Geral*

Na região ocorrem poucos diques de diabásio que cortam a área em direção geral NW-SE.

### *Depósitos Inconsolidados*

Constituem sedimentos aluvionares transportados pelos rios, formando terraços fluviais e várzeas com sedimentos arenosos e argilo-arenosos.

#### 2.4.6 Estruturas

As deformações estruturais existentes na região em estudo podem ser relacionadas aos seguintes eventos tectônicos regionais:

- Movimentos descendentes e ascendentes de grande amplitude vertical;
- Falhas de gravidade de pequeno rejeito associadas ao eixo dos grandes arqueamentos regionais;

- Reativações de antigas linhas de fraqueza do embasamento.

Dos eventos acima são relevantes ao estudo o arqueamento regional relacionado ao Arco de Ponta Grossa, cujo desenvolvimento principal ocorreu no Permiano e afeta principalmente os sedimentos da Formação Itararé.

Soerguimento da crosta terrestre na borda leste da Bacia do Paraná, ativo principalmente no Mesozóico (paroxismo a 130 milhões de anos), quando os continentes sul-americano e africano estavam em separação. O soerguimento apresentou forma alongada, com eixo na direção NW-SE com caimento no sentido NW, passando próximo à cidade de Ponta Grossa, da qual emprestou sua denominação. Além do levantamento da crosta, o arqueamento das rochas originou feixes subparalelos de fraturas profundas, que deram passagem a magma basáltico, o qual consolidado formou os enxames de diques de direção NW-SE, constituídos de diabásio. Estas fraturas profundas foram as alimentadoras dos extensos derrames de basalto da Bacia do Paraná, que hoje aparecem no Terceiro Planalto Paranaense, e de soleiras de diabásio comuns nos Campos Gerais. O Arco de Ponta Grossa é uma estrutura geológica que marcou profundamente a geologia e geomorfologia do Estado do Paraná, com reflexos no povoamento e na economia. Além de originar os enxames de diques, soleiras e derrames, influenciou no escalonamento do relevo nos três planaltos em escadaria (Primeiro, Segundo e Terceiro Planalto Paranaense) e na concavidade do limite da Bacia do Paraná, que apresenta uma expressiva reentrância coincidente com o eixo mais elevado do Arco, onde a erosão removeu as rochas mais soerguidas e expôs as rochas mais antigas do substrato. (MELO & ASSUNÇÃO, 2013).

As fraturas e falhas geradas pelo Arco de Ponta Grossa possuem direção principal NW-SW e secundária N-NE/S-SW que se constituem no caminho preferencial das intrusões básicas sob a forma de diques, ocorridas no Cretáceo Inferior.

Os alinhamentos estruturais também condicionam a rede de drenagem que está encaixada no sistema principal de fraturas e falhas cujas direções principais são subparalelas ao eixo do Arco de Ponta Grossa, variando de N80°W a N65°W.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia para a elaboração deste trabalho pode ser dividida em 3 etapas principais:

- Estudo de Escritório
- Investigações de campo
- Ensaios laboratoriais
- Avaliação dos dados levantados e interpretação das características do maciço rochoso.

#### **3.1 Estudos de escritório**

A etapa de estudos de escritório iniciou-se com pesquisa que envolveu a revisão bibliográfica que consistiu na coleta de material disponível na literatura, envolvendo a construção de barragens, aspectos de geologia regional da região, classificação geomecânica de maciços rochosos, além dos demais aspectos relevantes do ponto de vista geológico-geotécnico.

Dessa forma, foram identificadas nesta etapa as unidades geológicas presentes na região de estudo e que foram alvo de pesquisa mais detalhada, quando foram estudados desde os aspectos que envolvem deposição e estratigrafia destas unidades até seus aspectos relacionados a geologia de engenharia e também pesquisas temáticas como sobre o comportamento sob aplicação de métodos geofísicos.

Essa etapa também contou com a interpretação de imagens de satélite disponíveis no aplicativo Google Earth, a fim de identificar as principais feições geológicas, estruturais e geomorfológicas do entorno da área estudada.

#### **3.2 Levantamentos de Campo**

Esta etapa compreende o mapeamento geológico-geotécnico da área estudada, investigações diretas através da realização de sondagens mecânicas, investigações indiretas através de método geofísico, além da realização de ensaios de laboratório e de lâminas delgadas.

### 3.2.1 Mapeamento Geológico-Geotécnico

O enfoque inicial do mapeamento foi o reconhecimento geral da área estudada, quando toda a área foi percorrida com o intuito de observar as principais características geológicas, geotécnicas e morfológicas do local.

Em um segundo momento a área foi mapeada através da descrição detalhada dos afloramentos rochosos da região. Foram observados e descritos aspectos mineralógicos, texturais, estruturais, de cimentação, cor e relações estratigráficas, além das condições de resistência e alteração do maciço rochoso e das discontinuidades, de acordo com as tabelas apresentadas no Capítulo 2.

Também nesta etapa foram identificados os locais para a execução das campanhas de investigações diretas e indiretas, descritas nos itens 3.2.2. e 3.2.1.

### 3.2.2 Sondagens Mecânicas

Foram executadas dezenove (19) sondagens mistas, duas (2) sondagens rotativas, sete (7) sondagens a percussão, além de 26 poços de inspeção. Nestas sondagens também foram executados ensaios SPT (*Standard Penetration Test*), de infiltração em solo e de Perda d'Água em rocha. As sondagens foram executadas conforme a norma ABNT NBR 6481:2001 e o Manual de Sondagens (ABGE, 1999)

TABELA 3-1 - Resumo dos quantitativos executados para as sondagens mistas e rotativas

Sondagem	Coordenada* Local (N)	Coordenada* Local (E)	Elevação (m)	Solo (m)	Rocha (m)	Profundidade Total (m)
SM-101	478,49	392,73	818,12	2,00	18,09	20,09
SM-104	466,00	133,96	811,89	1,81	18,24	20,05
SM-105	466,73	49,86	827,08	8,44	12,28	20,72
SM-106	699,91	13,15	828,20	6,60	8,50	15,10
SM-107	478,49	950,00	828,04	6,84	9,06	15,90
SM-108	842,67	699,96	827,09	2,00	13,00	15,00
SM-109D	796,00	447,23	815,00	0,00	15,00	15,00
SM-110	813,80	224,02	827,50	2,70	17,98	20,68
SM-111D	788,02	356,62	815,00	4,78	10,22	15,00
SM-112	946,06	116,00	800,57	6,00	9,00	15,00
SM-113	975,16	92,99	795,12	1,00	19,64	20,64
SM-114	962,88	77,30	797,22	8,15	12,49	20,64
SM-201	483,00	477,00	824,50	1,50	33,50	35,00
SR-202	476,00	289,00	805,00	3,22	26,78	30,00
SR-203	476,00	198,00	798,00	1,50	28,50	30,00
SM-204	467,00	95,00	819,00	4,15	29,05	33,20
SM-205	539,00	32,00	827,00	6,76	26,24	33,00
SM-206	888,00	840,00	828,00	1,00	22,00	23,00
SM-207	850,00	604,00	827,00	1,00	19,10	20,10
SM-209	725,00	373,00	826,00	0,20	16,80	17,00
SM-212	986,00	71,00	793,00	0,80	31,20	32,00
<b>TOTAL</b>				70,45	396,67	467,12

\*coordenadas UTM omitindo os primeiros dígitos em função de sigilo do projeto.

TABELA 3-2 - Resumo dos quantitativos executados para as sondagens percussivas

<b>Sondagem</b>	<b>Coordenada Local (N)</b>	<b>Coordenada Local (E)</b>	<b>Elevação (m)</b>	<b>Profundidade Total (m)</b>
SP-214	522,00	312,00	810,50	1,35
SP-215	437,00	311,00	807,50	1,30
SP-217	613,00	23,00	828,00	5,05
SP-219	787,00	988,00	828,00	6,03
SP-221	867,00	771,00	828,00	0,70
SP-227	748,00	478,00	828,00	IMP
SP-228	788,00	245,00	832,00	IMP
SP-229	866,00	179,00	815,00	0,70
SP-230	947,00	26,00	801,50	0,30
<b>TOTAL</b>				15,43

\*coordenadas UTM omitindo os primeiros dígitos em função de sigilo do projeto.

TABELA 3-3 -Resumo dos quantitativos executados para os poços de inspeção

Sondagem	Coordenada Local (N)	Coordenada Local (E)	Elevação (m)	Profundidade Total (m)
PI-51	481,14	449,96	822	1,55
PI-52	477,26	366,69	816	1,40
PI-53	475,49	329,01	811	3,65
PI-54	466,01	110,00	817	3,00
PI-55	466,01	80,00	822	2,60
PI-56	572,49	20,64	828	1,50
PI-57	662,05	17,63	828	2,80
PI-58	749,32	996,86	827	2,25
PI-59	836,63	976,15	828	3,10
PI-60	889,42	908,71	828	3,00
PI-61	884,21	818,90	828	0,90
PI-62	845,45	738,26	828	1,50
PI-63	853,58	651,06	828	1,50
PI-64	829,42	566,02	828	0,80
PI-65	787,07	283,63	828	0,54
PI-66	849,08	195,10	819	2,60
PI-67	896,51	157,05	810	2,44
PI-68	933,99	126,33	803	2,20
PI-69	1000,96	72,10	790	IMP
PI-70	988,89	56,34	794	IMP
PI-71	976,34	40,58	797	IMP
PI-72	964,02	24,82	799	IMP
PI-222	476,00	309,00	808	1,50
PI-223	639,00	20,00	828	3,20
PI-224	888,00	875,00	828	1,62
PI-225	478,00	341,00	818	0,75
<b>TOTAL</b>				44,40

\*coordenadas UTM omitindo os primeiros dígitos em função de sigilo do projeto.

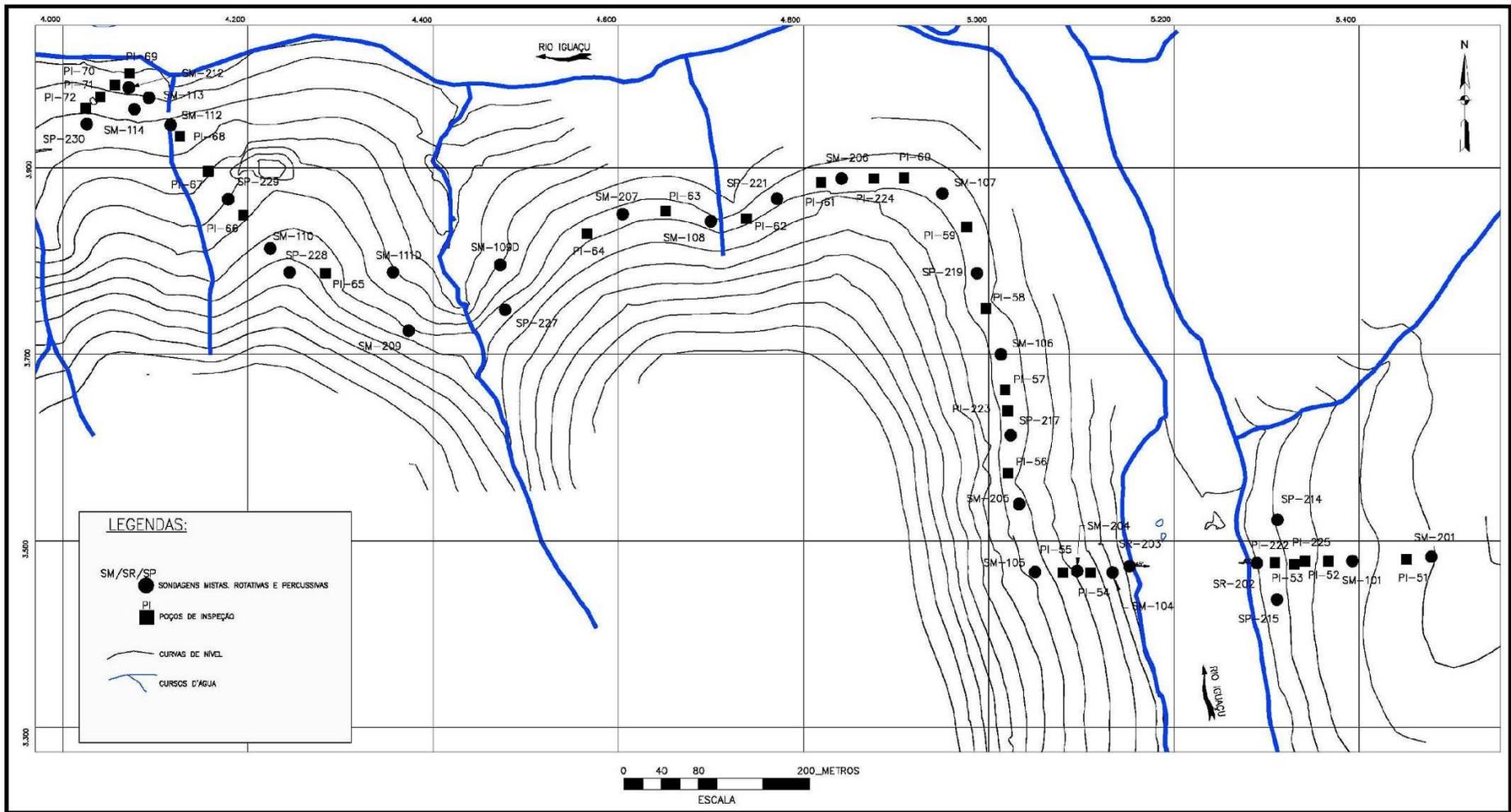


FIGURA 3-1 - Mapa da Localização das sondagens executadas

Ainda durante a etapa de execução das sondagens, procedeu-se a descrição dos testemunhos de sondagens, quando foram avaliados os parâmetros relativos a alteração, resistência, fraturamento, RQD, além dos demais parâmetros de condição das juntas para a classificação do maciço, conforme indicado no capítulo 2.

### 3.2.3 Investigações Geofísicas

O objetivo da realização de uma campanha de investigação geofísica foi complementar a informação geológico-geotécnica existente na área, buscando determinar a superfície do topo rochoso e identificando estruturas geológicas como falhas/fraturas e contatos.

As sondagens geofísicas foram feitas com a técnica de caminhamento elétrico ao longo de seis linhas numeradas de L1 a L6. Estas linhas foram dispostas de acordo com a direção das principais estruturas que compõem o arranjo proposto para a PCH, sendo L1 a L4 na região do barramento e L5 e L6 no circuito de geração (FIG 3.5).

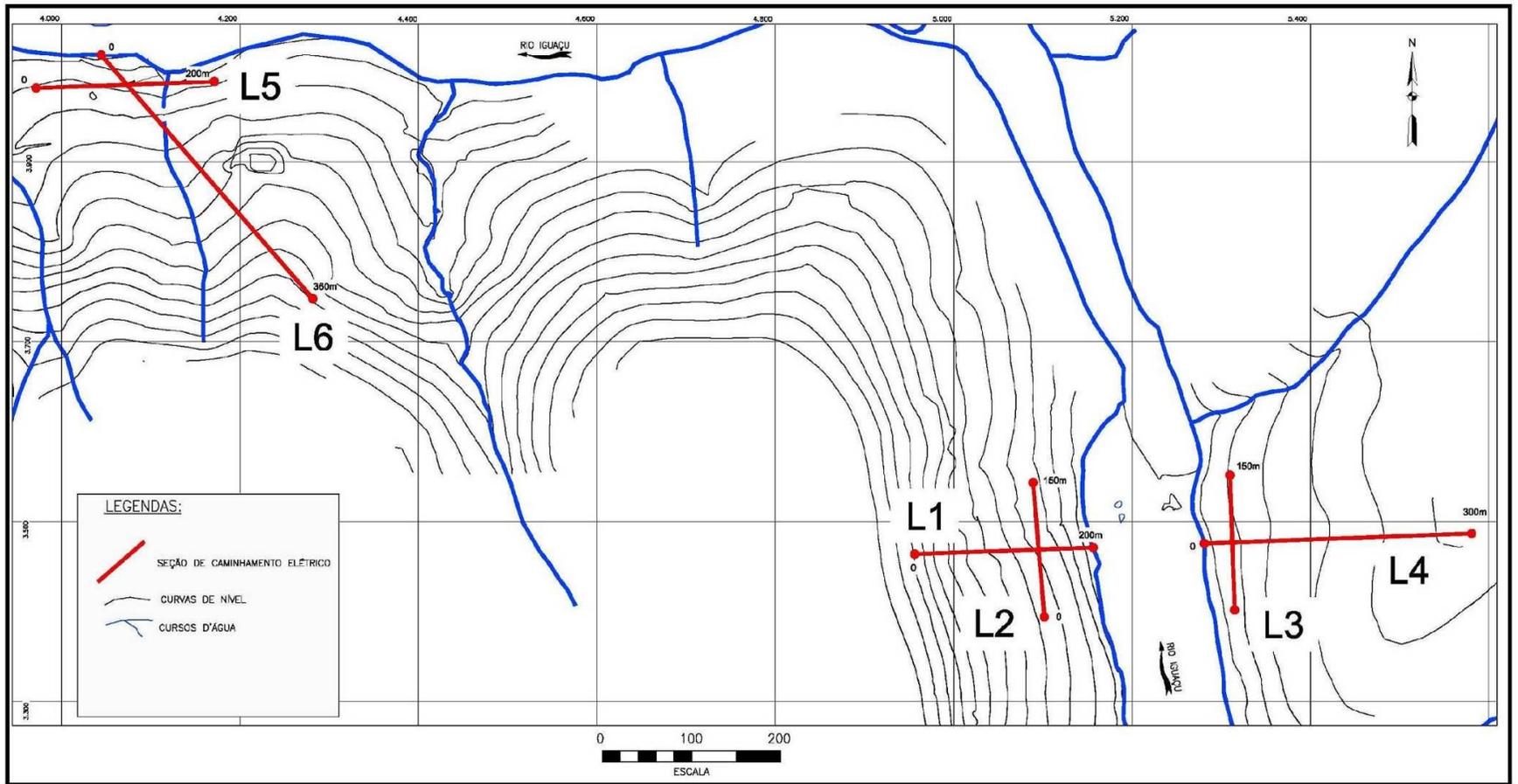


FIGURA3.5 - Localização das linhas geofísicas L1 a L6.

As seções geofísicas foram realizadas em locais onde prevê-se a instalação de estruturas de concreto. Nestes locais a determinação de um horizonte com características adequadas a fundação destas estruturas é fundamental.

O método geométrico busca mapear a forma como a corrente se propaga no subsolo. A condução elétrica em sedimentos e rochas próximas à superfície é basicamente eletrolítica, ao longo de poros interconectados. Os íons que conduzem a corrente resultam da dissociação de sais na água. A salinidade das águas de percolação é fator importante na determinação da condutividade elétrica de uma rocha ou sedimento.

Dessa forma, nas seções onde se aplica as técnicas de caminhamento elétrico, mede-se uma impedância elétrica, cuja interpretação permite avaliar a distribuição da resistividade elétrica no subsolo e, via interpretação, a geologia de subsuperfície. Uma corrente é injetada no solo entre dois eletrodos e a voltagem é medida entre dois outros eletrodos. A razão entre a voltagem medida e a corrente transmitida constitui a impedância da porção da terra através da qual a corrente se propaga.

Para aquisição dos dados são necessários dois eletrodos para transmitir a corrente para a terra; por um deles a corrente entra e pelo outro sai da terra, fechando o circuito. A distribuição destes eletrodos depende do objetivo da investigação.

O arranjo de eletrodos utilizado foi o dipolo-dipolo com espaçamento ( $x$  na FIG 3.X) entre eletrodos A-B e M-N de 10 e de 20 m. Diferente do dipolo-dipolo convencional, o passo de mudança do arranjo foi de 10 m mesmo com o espaçamento de 20 m. Neste espaçamento, além dos níveis  $n_1... n_6$  convencionais, mediram-se também os intermediários  $n_{0,5}; n_{1,5}... n_{5,5}$  resultando em 13 níveis de investigação.

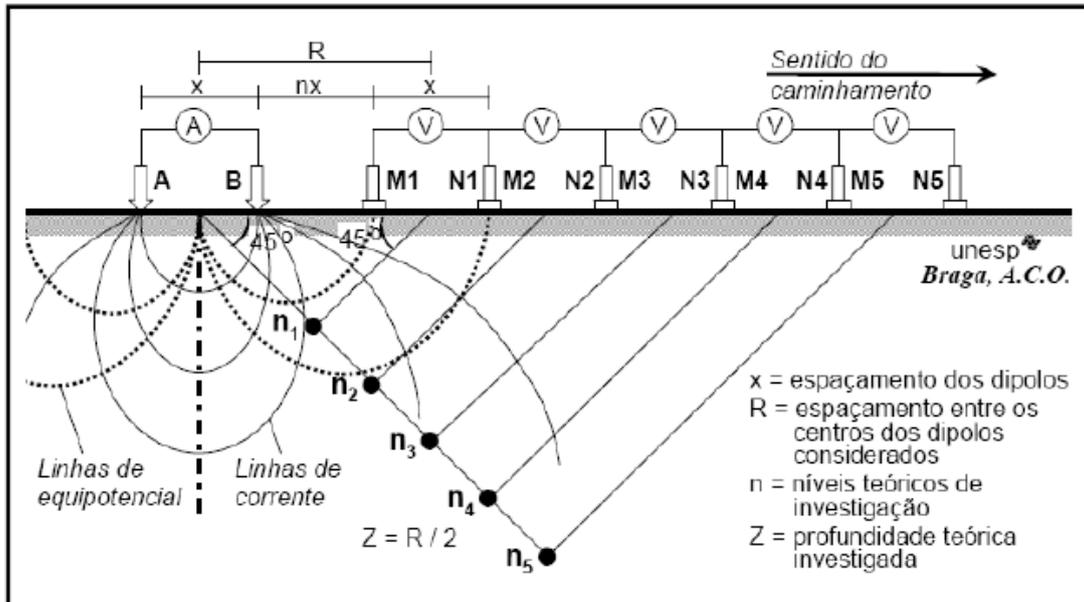


FIGURA 3-2 - Arranjo de eletrodos utilizado

Os dados obtidos no campo do caminhamento elétrico foram tratados por meio do método de inversão 2D, transformando as seções de pseudo profundidade de resistividade em seções modelo de resistividade ou seções “reais” de resistividade, que serviram para a elaboração de modelos geo-elétricos da subsuperfície, e os quais estes serviram de apoio para a interpretação dos dados geológico-geotécnicos do local.

### 3.2.3.1 Considerações Sobre o Método

Como descrito no item 3.2.3, a condução elétrica em sedimentos no subsolo se dá através de íons resultantes da dissociação de sais na água. A salinidade das águas de percolação é fator importante na determinação da condutividade elétrica de uma rocha ou sedimento.

Assim sendo, as coberturas sedimentares podem comportar-se como condutoras (baixa resistividade) quando saturadas ou podem apresentar alta resistividade quando o nível d’água é profundo, resultando em coberturas secas. Quanto maior a porosidade, maior a quantidade de água que pode percolar o meio e, assim, maior a quantidade de íons livres para se movimentar na água que preenche os poros. Contudo, se existem poros, mas não existe conectividade entre eles (baixa

permeabilidade), o fluxo de íons é bloqueado e a condutividade pode ser baixa mesmo na presença de considerável porosidade.

A textura da rocha ou sedimentos é também um forte condicionante da resistividade elétrica do meio. Um arenito bem selecionado (grãos de igual tamanho) apresenta maior volume de espaços vazios para percolação pelo eletrólito de formação e, conseqüentemente, menor resistividade. Um arenito mal selecionado apresenta menor porosidade e conseqüentemente maior resistividade em relação ao bem selecionado.

Um fator importante para a prospecção geoeletrica é o efeito dos minerais de argila sobre a resistividade. As partículas de argila constituem um caminho adicional de condução de corrente elétrica, além do caminho pelo eletrólito. A resistência deste caminho adicional é muito baixa. A razão para esta alta condutividade está na dupla camada de cátions dos minerais de argila.

Anomalias de condutividade (estruturas condutoras) também podem ocorrer devido a zonas de maior fraturamento ou alteração e estruturas geológicas por onde a percolação se torna possível.

### **3.3 Investigações de Laboratório**

Uma das etapas da pesquisa consistiu na realização de ensaios e análises de laboratório, com a finalidade de determinar e investigar os parâmetros do maciço rochoso no que diz respeito aos aspectos físicos, mecânicos e tecnológicos. Assim como investigar as características geológico-geotécnicas não observáveis macroscopicamente tais como mineralogia, textura, estruturas sedimentares, tipo de cimentação, aspectos microscópicos relacionados ao grau de intemperismo e resistências das amostras, fissuração.

#### **3.3.1 Ensaio de Caracterização e Tecnológicos**

Após as etapas de investigação de campo, foram selecionadas amostras dos diversos furos de sondagens e ensaiadas aquelas representativas de cada tipo rochoso presente no local. Os ensaios foram realizados de acordo com as principais normas técnicas em vigência no Brasil, como indicado em seguida.

A seguir são listados os ensaios realizados, com as respectivas normas.

- 49 ensaios de Resistência à Compressão Uniaxial (NBR 12767)
- 4 ensaios de Abrasão Los Angeles (NBR 6465)

- 4 ensaios de Ciclagem Água- Estufa (ABNT/NBR 12696)
- 4 Ensaios de Caracterização (Índices Físicos) -(ABNT 12766)

Os ensaios para determinação de índices físicos consistem em avaliar os seguintes parâmetros: (massa específica aparente seca e saturada, porosidade e absorção de água aparente). Tais parâmetros são indicativos para padrões de porosidade e fissuração, que por sua vez podem ser condicionantes no que diz respeito à resistência da rocha no seu estado inicial.

No ensaio de compressão Uniaxial são utilizados corpos de prova não confinados para determinar a resistência à compressão simples da rocha. É aplicada uma força axial ao corpo de prova até que ocorra sua ruptura. O máximo valor da força que o corpo de prova suporta dividido pela área sobre a qual é aplicada a força é a sua resistência à compressão simples.

No ensaio de Abrasão “Los Angeles” é avaliado o desgaste do material (comumente do agregado) através do impacto entre o material e esferas de aço padronizadas que giram num tambor, com velocidade controlada de 30 a 33 rpm, num número de revoluções especificadas. O desgaste é expresso pela porcentagem, em peso, do material que passa, após o ensaio, pela peneira de malhas quadradas de 1,7 mm (ABNT nº 12).

Nos Ensaios de Ciclagem Artificial Água e Estufa é avaliada a alterabilidade do material mediante ciclos consecutivos de imersão em água ( $14 \pm 1$ ) horas, em temperatura controlada ( $23 \pm 2$ )°C e secagem em estufa ( $8 \pm 1$ ) horas a ( $100 \pm 5$ ) °C. São avaliados padrões de fissuração e desintegração, além da determinação da perda de massa em relação à amostra inicial.

### 3.3.2 Análise Petrográfica e Mineralógica

Lâminas delgadas e análises petrográficas foram realizadas no Laboratório de Petrografia, do Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Cruz no IGC – UFMG.

Foram preparadas 9 lâminas delgadas, representativas dos variados tipos litológicos encontrados no local pesquisado. Foram selecionadas amostras tanto de furos

de sondagens como de afloramentos, com diferentes graus de intemperismo, mineralogia e estruturação sedimentar.

Como referência para a análise foi utilizada as recomendações contidas na norma (ABNT/NBR 12678/1992a) e utilizado microscópio óptico de luz transmitida.

Nesta etapa busca-se avaliar os minerais presentes e suas inter-relações, o grau de alteração, o estado microfissural dos cristais, sua granulometria e textura, além de outras características que possam influenciar na durabilidade da rocha, como cimentação, grau de alteração, microfissuração.

### **3.4 Correlação dos dados e construção do modelo geomecânico**

Esta etapa consiste em análise sistemática dos dados caracterizados nas etapas de levantamento e coleta de dados. Foram integrados os dados de mapeamento, de sondagens, de geofísica, ensaios de laboratório, além dos dados bibliográficos e de interpretação de imagens.

Conforme Costa (2012) em um modelo geomecânico pode-se indicar as relações qualitativas entre os diferentes componentes geológicos. Nesta etapa, procura-se estabelecer protótipos para as condicionantes geológicas e geotécnicas, com base em todas as fases anteriores de identificação mostrando o relacionamento entre tais condicionantes e as necessidades do projeto. Faz-se a compartimentação do maciço que corresponde a um zoneamento a partir da interpolação ou extrapolação de dados pontuais. Para tanto, utilizam-se os dados da caracterização ou da classificação e são estabelecidas as unidades geológicas-geotécnicas de forma bi-dimensional.

O primeiro passo foi a elaboração de perfis geológicos ao longo das áreas que receberão as estruturas da PCH, com base no levantamento topográfico disponível em escala 1:1000 e nos resultados das sondagens mecânicas e geofísicas. Adicionando-se os parâmetros geomecânicos e geotécnicos levantados elaboraram-se perfis geológico-geotécnicos

Classificação das zonas do maciço de acordo com o modelo descrito no item (revisão bibliográfica).

As seções geofísicas de eletroresistividade foram interpretadas buscando-se correlacionar as variações de resistividade com os materiais observados nos furos e

também zonestar o maciço de acordo com as porções mais resistentes, menos resistentes e intermediárias.

Para a representação espacial de todos os dados geotécnicos, foi elaborado um perfil de correlação entre os dados para cada parâmetro do maciço relevante à análise, dessa apresenta-se os seguintes perfis: grau de fraturamento do maciço, de resistência do maciço, cimentação do maciço, condutividade hidráulica do maciço, condutividade elétrica do maciço, resistência à compressão uniaxial e classe de maciço.

As medidas estruturas obtidas em campo foram tratadas no programa Dips, no qual foram construídos diagramas elaborados a partir dos dados levantados. Os diagramas obtidos são correspondentes às principais descontinuidades do maciço encontradas nos afloramentos, a saber: acamamento e fraturas. A análise destes dados visou a identificação de padrões estruturais comuns à área em estudo.

A integração destes dados originou o modelo geomecânico baseado nos dados litológicos, nas condições das descontinuidades e dos parâmetros do maciço. A partir do modelo, avalia-se e discute-se o comportamento do maciço rochoso do local frente às demandas impostas pela obra, tais como condição das escavações, condições de estabilidade e erodibilidade dos taludes e resistência das fundações.

## 4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Disposição das estruturas da PCH

Como já explicitado, não serão incluídos neste trabalho detalhes técnicos do arranjo estudado para a PCH alvo deste estudo de caso. Ainda assim, faz-se necessário uma visualização espacial dos dados, o que será possível através de eixos traçados de forma esquemática e que representam os locais previstos para receber as futuras estruturas.

Para esta definição simplificada, foi definida a linha de eixo do Barramento e a linha de eixo do Circuito de Adução/Geração – composto de Tomada d'Água, Canal de Adução, Câmara de Carga, Conduitos Forçados e Casa de Força – separado em trecho 1 e trecho 2.

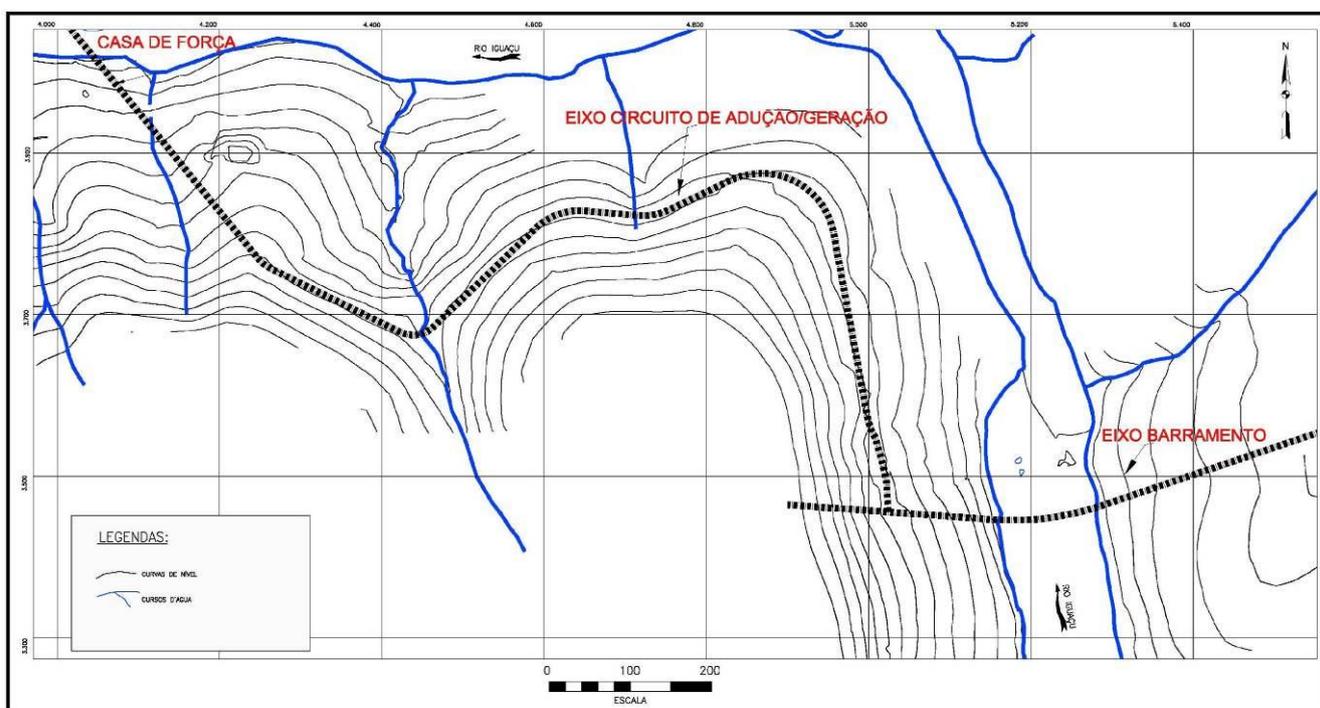


FIGURA 4-1 Esquema do projeto da PCH

### 4.2 Caracterização da área de estudo

#### 4.2.1 Aspectos Geomorfológicos

A geomorfologia do local é marcada por relevo com características de planalto, com formas essencialmente planas. Constituem paisagens típicas de mesetas estruturais, dando origem a uma topografia de aspecto tabuliforme levemente ondulado, com chapadas e colinas de encostas suavizadas.

Os padrões de drenagem, em especial o rio Iguaçu, exibe padrão alternado entre meandrante e retangular, quando corre condicionado às estruturas geológicas do local. No trecho de implantação da usina, o rio Iguaçu segue aproximadamente retilíneo segundo a direção norte-sul, sofrendo uma inflexão para oeste, correndo aproximadamente paralelo a essa direção.

Ao longo de todo trecho mapeado, a calha é rochosa, exibindo diversos afloramentos de arenito no leito e margens do rio, além de pequenas cachoeiras e corredeiras. Nos trechos de menor energia, ocorrem depósitos arenosos, junto às margens.

#### 4.2.2 Solos

Na área mapeada os horizontes de solo mais superficiais são constituídos predominantemente por areia fina pouco siltosa, de coloração bege a rósea, com presença localizada de pedregulhos e cascalhos de quartzo. Estes depósitos são inconsolidados a pouco consolidados e fofos.

O seu caráter essencialmente arenoso dificulta a identificação de sua origem, contudo parece tratar-se de um solo residual de arenito, com possível contribuição coluvionar, bastante semelhantes em solos com tal nível de maturidade. Sob a camada superficial ocorre um horizonte de solo residual jovem/saprolito de arenito. Trata-se de um solo arenoso (areia fina a média), pouco siltoso e que preserva as características, especialmente o acamamento, da rocha de origem.

Na porção a oeste do trecho estudado, as coberturas ficam menos espessas, sendo possível observar diversos afloramentos ao longo da encosta.

Os depósitos aluvionares são representados por sedimentos inconsolidados, constituídos por areias finas, argilas cinzas e cascalhos, localizados nos terraços e nas planícies de inundação ao longo das margens do rio, especialmente na margem direita, já que a margem esquerda é predominantemente escarpada no trecho mapeado.

Em geral, as ocorrências de aluviões são restritas a pequenos depósitos no leito do rio e a terraços aluvionares.

#### 4.2.3 Litologia

Neste item serão descritas as litologias observadas em mapeamento de campo a através da descrição das sondagens realizadas.

De acordo com o Mapa Geológico Regional apresentado na FIG (2-6) a área em estudo encontra-se inserida sobre os pacotes sedimentares do Grupo Itararé e da Formação Furnas. Esses pacotes, segundo a bibliografia consultada, incluem arenitos, siltitos, argilitos, folhelhos, varvitos, diamictitos, tilitos e conglomerados.

Dessa forma, considerava-se de antemão a ocorrência de rochas das unidades citadas. Porém tomando-se como referencia somente os afloramentos e observações de campo não foi possível identificar ou distinguir com clareza tais unidades, sendo que as considerações a seguir também se baseiam no contato geológico e descrições das unidades indicados no mapeamento regional.

#### 4.2.3.1 Formação Furnas

A Formação Furnas é constituída principalmente por arenitos brancos a cinza-claros, porém na maior parte das ocorrências aparecem com colorações amareladas e alaranjadas quando impregnados por óxido de ferro. A granulometria é de média a grossa, com níveis conglomeráticos, com grãos angulares e subangulares, em matriz arenosa com cimento caulínítico ou ferroso. Apresenta estratificações cruzadas acanalada e planares de médio a grande porte.

Ao longo de todo o trecho percorrido pode-se observar extensos afloramentos de arenito litificado, apresentando estratificações cruzadas acanaladas, com níveis conglomeráticos e horizontes silto argilosos de cor cinza e atitudes subhorizontais.

Como característica notável desta formação, em especial na região do barramento, cita-se a sua distribuição topográfica restrita aos fundos de vales, bem como nas margens do curso do rio Iguaçu. Os processos erosivos, que atuaram sob a Formação Furnas nesta extensão do rio e entre as cotas 828 a 800, evidenciam o mergulho regional das formações da bacia sedimentar do Paraná em uma camada de rocha competente.

De acordo com o levantamento bibliográfico, as características observadas nos arenitos correspondem a ambientes fluviais de canais entrelaçados de planícies aluviais costeiras de frentes deltaicas sob a ação de ondas.

Não são raros níveis centimétricos de material mais fino (siltoso a areno-siltoso). Conforme visto nos furos de sondagens, exibem tanto contatos gradacionais

como bruscos. Estão presentes também camadas de arenito conglomerático/conglomerado, onde ocorrem seixos de quartzo arredondados.

O contato entre o arenito Furnas e os diamictitos do Itararé apresenta-se por discordância erosiva, evidenciada nas sondagens rotativas.



(A)



(B)



(C)



(D)



(E)



(F)



(G)



(H)

- (A) Afloramento de arenito Furnas médio a grosso, na margem esquerda do rio Iguaçu.
- (B) Vista do rio Iguaçu no local de implantação do Barramento. Afloram arenitos silicificados da Formação Furnas, que conformam corredeiras e pequenas quedas, como pode ser observado quando o nível de água do rio está baixo.
- (C) Afloramento tipo escarpa na margem direita do rio Iguaçu. Notar os estratos das camadas formadas por arenitos com direções aproximadas N20°E; 10°NW. Entre estes estratos, forma-se um nível de fraqueza que podem apresentar fuga de água.
- (D) Detalhe do arenito Furnas que apresenta cor branca a acinzentada e granulometria fina.
- (E) Afloramento do arenito Furnas, na região onde será implantada a Casa de Força. Trata-se de arenito de cor branca a cinza, granulometria predominantemente média e média a grossa. Nota-se neste afloramento o padrão do acamamento plano paralelo de atitude subhorizontal.
- (F) Detalhe do arenito Furnas que apresenta coloração amarelada e granulometria fina.
- (G) Detalhe de uma lavra de arenito (Furnas) destinada a fabricação de cerâmica refratária. A rocha apresenta-se litificada.
- (H) Detalhe do arenito da lavra, notar cor branca e planos de mica.

FIGURA 4-2 - Fotos da Litologia presente na área mapeada

#### 4.2.4 Grupo Itararé

Este Grupo é constituído por uma sequencia sedimentar de depósitos continentais glaciais e periglaciais, constituídos basicamente por arenitos, arenitos sílticos conglomeráticos e folhelhos argilosos e sílticos argilosos, denominados de varvitos e tilitos.

No trecho estudado, os sedimentos da Formação Itararé apresentam-se, em uma visão geral, de duas formas distintas, caracterizados pelos depósitos de silito argiloso e/ou, denominados de na bibliografia de Tilitos e por arenitos.

Não ocorrem boas exposições dos folhelhos na área percorrida. Quando afloram já alterados exibem colorações verde amareladas, localmente impregnadas de óxido de ferro, e granulometria silto arenosa fina.

O maior número de afloramentos é constituído de um arenito de coloração variada, predominando tons avermelhados, amarelados e róseos. A granulometria é predominantemente fina a média, exibindo localmente porções com granulometria grossa a conglomerática.

Ao longo do trecho percorrido na margem esquerda, observou-se uma característica bem marcante do Grupo Itararé são testemunhos de arenito, que conformam um relevo ruiforme típico. Em geral, tratam-se de arenitos avermelhados e amarelados de granulação fina e mal selecionados com padrões de erosão diferencial idênticas aos arenitos tipo Vila Velha, característicos da Formação Campo do Tenente. Tais afloramentos configuram um cinturão de afloramento ao longo da meia encosta da margem esquerda do rio Iguaçu.

Foi observada em campo e nas sondagens uma extensa variação dos tipos de arenito, principalmente em função de cor, granulometria e tipo de cimento.

Devido à diversidade de arranjos litológicos e variação lateral de fácies, não foi possível separar em formações, sendo utilizado neste estudo como Grupo Itararé.



(A)



(B)



(C)



(D)



(E)



(F)



(G)



(H)

- (A) Afloramento de arenito Itararé tipo Vila Velha.
- (B) Afloramento de arenito Itararé tipo Vila Velha.
- (C) Arenito Itararé. Notar a estratificação plano-paralela.
- (D) Afloramento do Arenito Itararé no leito de estrada. Neste local apresenta-se litificado.
- (E) Detalhe 1 do arenito Itararé. Notar cor amarelo claro com nível ferrugionoso e granulometria fina. Detalhe 2 do arenito Itararé. Notar coloração rósea e granulometria fina.
- (F) Detalhe 3 do arenito Itararé. Notar coloração rósea a vermelha e granulometria média.
- (G) Detalhe 4 do arenito Itararé. Notar variação da coloração branca e amarela além da granulometria média a grossa.

#### 4.2.5 Estruturas

As estruturas marcantes desta porção do estado do Paraná são relacionadas ao soerguimento do Arco de Ponta Grossa, que possui um eixo NW-SE com caimento para NW. Em geral, as estruturas tectônicas e o modelado do relevo assume esta direção.

No trecho mapeado o principal elemento estrutural identificado são fraturas, cujas atitudes foram levantadas ao longo dos afloramentos descritos.

Para a análise das atitudes principais das famílias de fraturas encontradas,. As medidas obtidas foram integradas em estereograma e roseta, apresentados a seguir.

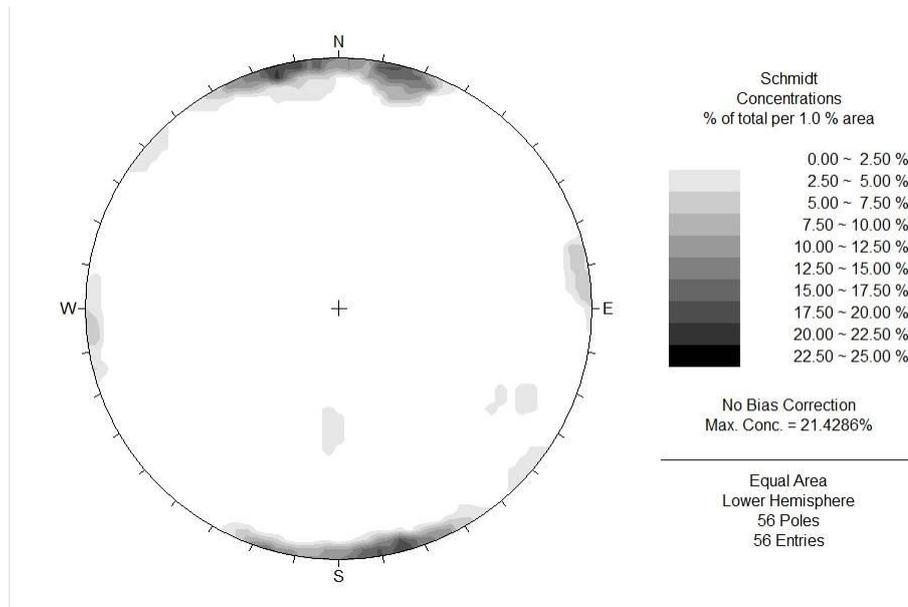


FIGURA 4-3-Estereograma de Schmidt (Igual área, hemisfério inferior) com as áreas de concentração dos pontos polares referentes às atitudes das fraturas levantadas.

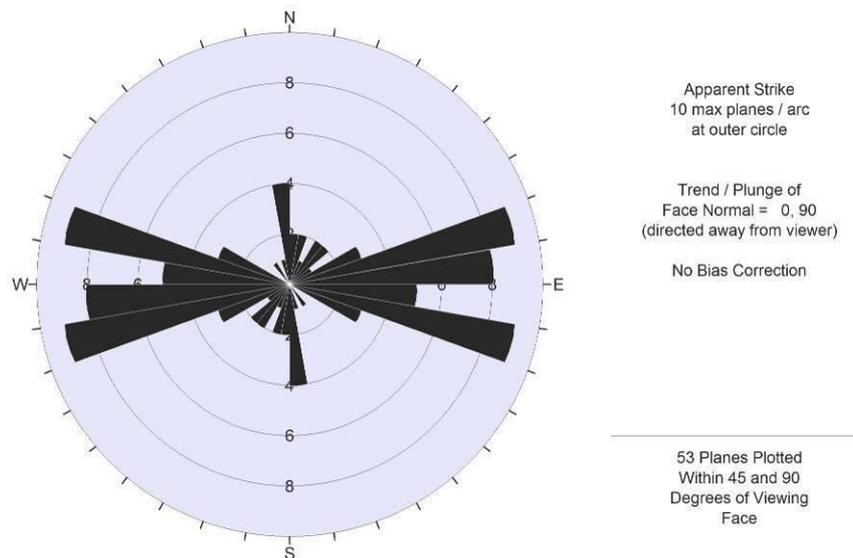


FIGURA 4-4 - Diagrama de rosetas apontando as principais direções de fraturamento do trecho mapeado.

A análise de ambos os diagramas aponta o máximo de medidas correspondente a planos de fraturas com direção aproximadamente E-W/vertical, com variação de 15° para cada hemisfério.

Os diagramas também apontam concentração de medidas correspondentes a padrão de fraturamento N-S/vertical.

Refinando-se a análise dos alinhamentos de fratura segundo a direção E-W, pode-se distinguir alinhamentos conforme a direção N75°W e N75°E.

A análise dos dados não foi conclusiva no que diz respeito a sua relação com estruturas relacionadas ao soerguimento do Arco de Ponta Grossa, já que não foram obtidas distribuições de planos coincidentes com o Arco.

As direções identificadas e já citadas correspondem ao alinhamento (E-W) do rio Iguaçu no trecho estudado, o que levanta a possibilidade do sistema de fraturamento estar relacionado ao evento de formação do vale do rio. Ao qual também podem se relacionar as fraturas de atitude N-S.

Dessa forma, os principais alinhamentos tectônicos na região estão representados pela rede de drenagens que está condicionada ao sistema principal de fraturas e possivelmente falhamentos associados a tectônica do tipo rúptil.

No QUADRO 4-1 são apresentadas as atitudes dos planos de fraturas medidos no levantamento.

QUADRO 4-1- Atitudes dos planos de fratura obtidos no mapeamento.

Dip Direction	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction	Dip
160	88	260	90	25	90
164	89	340	90	170	80
292	72	330	90	179	90
261	81	150	90	162	79
196	88	310	90	195	82
176	89	310	90	350	85
90	84	15	90	190	87
102	75	322	75	260	62
349	89	3	89	232	70
195	72	360	54	262	89
285	90	20	58	345	88
345	90	200	89	334	89
350	90	10	40	300	55
350	90	187	89	300	68
0	90	160	40	355	88
5	90	355	38	198	89
340	90	175	78	195	82
90	90	165	90	195	82
250	90			195	82

O acamamento sedimentar corresponde à segunda estrutura observada nos afloramentos. As medidas foram levantadas nos arenitos que exibem estratificação plano-paralela e estratificação cruzada. As medidas tomadas nos diversos afloramentos exibem uma direção principal N-S com mergulho para oeste. Os ângulos de mergulho variam entre 5° e 30°.

Constituem as principais unidades estruturais observadas e são definidas por contatos entre as unidades rochosas e demais estratificações sin-sedimentares (estratificação plano-paralela e estratificação cruzada), as quais definem uma superfície de acamamento S0.

Em geral estas estruturas estão relacionadas a descontinuidades limitadas por diferenciação granulométrica ou níveis pelíticos e com minerais micáceos.

A análise estatística das atitudes também foi realizada através de estereogramas de pontos polares e de contorno, apresentados na FIG XX.

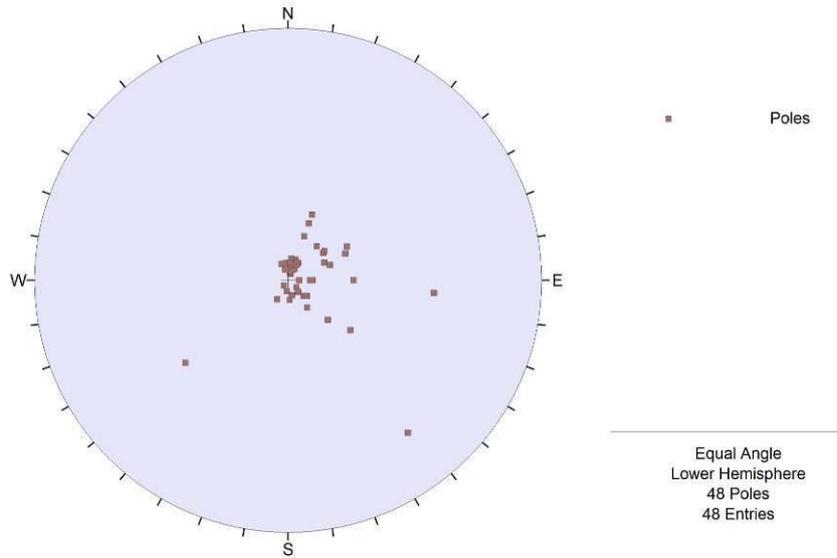


FIGURA 4-5 - Estereograma de Schmidt (Igual área, hemisfério inferior) com os polos dos planos de acamamento levantados na área mapeada.

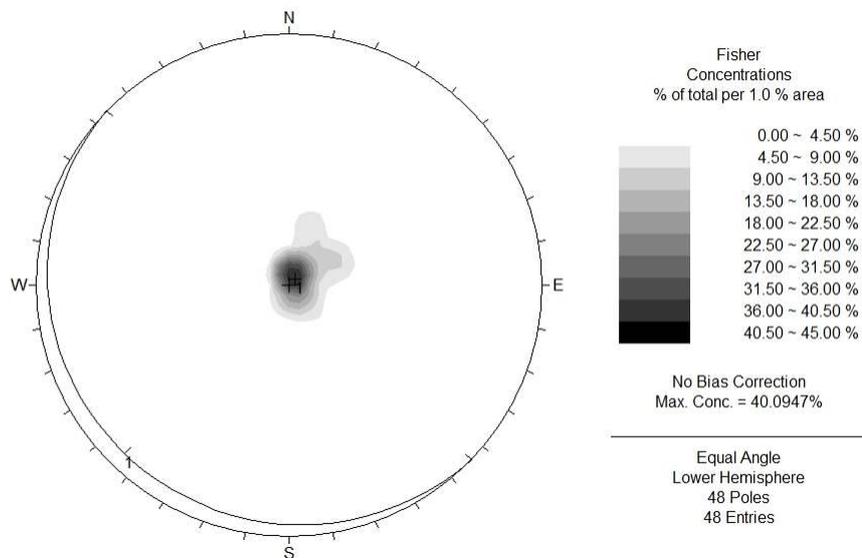


FIGURA 4-6 - Estereograma de Schmidt (Igual área, hemisfério inferior) com as áreas de concentração dos pontos polares referentes às atitudes dos planos de acamamento levantados.

Os estereogramas apontam um máximo de medidas correspondente a um plano de acamamento médio com atitude N45W/05SW. Atitude que corresponde a direção geral de acamamento da Bacia do Paraná, indicando o seu centro deposicional a oeste.

O quadro a seguir indica todas as medidas levantadas para estas estruturas.

QUADRO 4-2 - Atitudes dos planos de acamamento obtidos no mapeamento.

Dip Direction	Dip	Dip Direction	Dip
309	35	345	7
232	20	210	8
244	18	205	5
245	28	310	11
270	29	187	89
51	55	160	40
275	60	355	38
30	10	175	78
5	5	165	90
325	15	355	9
170	5	200	9
270	5	188	7
200	10	159	8
240	30	231	21
250	20	200	27
220	20	200	21
310	5	270	11
190	5	270	10
322	75	205	5
315	25	189	10
320	7	189	5
315	10	172	8
200	31	186	8
210	6	190	4
210	9	165	5
38	3	200	27
200	3		

### 4.3 Descrição de Sondagens

Os aspectos geológicos e geotécnicos apresentados na seqüência objetivam sintetizar as condições observadas através das sondagens executadas, assim como possíveis complementações possibilitadas pelo mapeamento geológico

Na tabela xxx são apresentadas as classes de grau de resistência, grau de alteração, grau de fraturamento e RQD avaliados nas sondagens executadas. As características destes parâmetros podem ser consultadas no capítulo 2 – item 2.2.

QUADRO 4-3 -Resumo dos aspectos geológicos e geotécnicos avaliados nos testemunhos de sondagens

Sondagem	Litologia	Grau de Resistência	Grau de Alteração	Grau de Fraturamento	RQD
101	Arenito Itararé	C2-C5	A1-A4	F1-F3	0-70
	Arenito Furnas	C3	A2	F2	0-90
104	Arenito Furnas	C5-C4	A4-A3	F1-F3	50-93
105	Siltito Itararé	C5	A3	F2	0-70
	Arenito Furnas	C5-C4	A2-A3	F2	50-85
106	Siltito Itararé	C5-C4	A3-A4	F3	8-55
	Arenito Furnas	C4	A3-A2	F3	17-72
107	Siltito Itararé	C5	A3	F1	13-70
	Arenito Furnas	C5-C4	A3-A2	F2	58-86
108	Arenito Itararé	C4	A3	F4	12-88
	Siltito Itararé	C5	A4	F2	64
109D	Arenito Itararé	C5	A3	F2	0-100
110	Arenito Itararé	C5	A3	F2-F3	32-73
	Siltito Itararé	C5	A3	F2	20-93
111D	Arenito Itararé	C4-C3	A3-A2	F2	0-85
112	Arenito Furnas	C4-C3	A3-A2	F2	60-90
113	Arenito Furnas	C3-C5	A3-A2	F2	0-96

114	Arenito Furnas	C5-C3	A4-A3	F2-F3	0-85
-----	-------------------	-------	-------	-------	------

#### 4.3.1 Grau de Alteração

A análise dos dados acima mostra que as rochas ocorrentes são pouco a medianamente alteradas, eventualmente muito alteradas. A alteração pode ser avaliada especialmente pela alteração de cor imposta pela alteração mineral, especialmente nos grãos de feldspato.

No caso do arenitos é imprescindível avaliar este parâmetro em conjunto com a resistência já que pequenas alterações conduzem a perdas significativas de resistência da rocha.

#### 4.3.2 Grau de fraturamento

A avaliação dos furos aponta um maciço pouco a medianamente fraturado, em média. Contudo a avaliação do grau de fraturamento deve ser criteriosa e levar em conta os aspectos inerentes ao litotipo investigado. Estes aspectos são abordados no item 4.3.4.

#### 4.3.3 Resistência

No caso do arenítico, foi observado que o grau de resistência da rocha está diretamente relacionado ao do tipo de cimento que une os grãos. Cimentos argilosos geralmente apresentam baixa resistência, conferindo à rocha, na maioria das vezes, características de baixa resistência mecânica. Cimentos silicosos conferem a rocha aspecto muito mais resistente, com grau de resistência alta. Os arenitos com cimentação argilosa também apresentam porosidades altas, permitindo a infiltração de água na rocha.

Um aspecto relevante observado nas avaliações e que é aspecto inerente ao tipo de geologia do local é que os índices geomecânicos podem variar consideravelmente em uma mesma formação ou pacote de rochas, o que geralmente está ligado às variações de composição tanto vertical quanto lateral.

Em geral, o maciço rochoso exibe um horizonte superficial mais intemperizado e friável, com grau de resistência variando entre R0 (extremamente

branda), R1 (muito branda) e R2 (Rocha Branda). Estima-se que este material atinja até 30 metros de espessura.

Sotoposto a este horizonte de rocha friável ocorre um arenito mais resistente, como observado nos furos de sondagens e afloramentos ao longo do leito do rio, um maciço com grau de resistência maior que R3 (medianamente resistente a muito resistente). Em geral, onde foi observado este maciço, ocorre cimentação da rocha por sílica ou, ainda, recristalização da matriz.

Em geral as camadas de siltito intercaladas no arenito apresentam-se com baixas resistências (R1-R2), especialmente quando úmido.

#### 4.3.4 Rock Quality Designation

O RQD (*Rock Quality Designation*) apresenta valores extremamente variáveis, o que está relacionado não só ao número de fraturas, mas principalmente a qualidade da rocha perfurada.

Os maciços gerados por estas rochas, influenciados diretamente pelas características descritas anteriormente e pela estrutura típica das rochas sedimentares, são classificáveis pelo RQD desde muito pobre até de boa qualidade.

As principais observações que merecem ser cuidadosamente observadas quando se avalia o RQD dizem respeito ao comportamento das rochas sedimentares encontradas, principalmente quanto a:

Alternância de níveis com diferentes graus de alteração e coerência;

Presença de níveis superficiais com diferentes estágios de friabilidade que possibilitaram ou não a recuperação de testemunhos.

Presença de níveis friáveis delgados intercalados com segmentos coerentes mais expressivos;

Alternância de níveis arenosos e siltosos, estes últimos, apresentando-se em geral, delgados.

Cabe registrar ainda a ocorrência de planos de fraqueza relacionados à estratificação e descontinuidades litológicas, resultando em muitos casos em RQD baixo, embora a recuperação seja elevada.

Estes planos de fraqueza, embora na condição natural não sejam necessariamente abertos como se observa nos testemunhos, aliados às condições de friabilidade descritas anteriormente, torna recomendável a consideração de tratamento das fundações e proteção contra a possibilidade de erosão interna e superficial nos materiais arenosos locais.

#### **4.4 Petrografia**

Para a avaliação da petrografia das rochas sedimentares encontradas na área, foram confeccionadas lâminas petrográficas características dos principais litotípos presentes no local.

A avaliação geral das lâminas indicou as características que serão expostas em seguida.

Os arenitos da Formação Furnas avaliados macroscopicamente apresentam colorações amareladas e cinzas, níveis porosos. Em geral, as amostras apresentam certo estágio de modificação intempérica que confere manchas, crostas e alvéolos às amostras. A constituição mais comum é dada por quartzo de granulação fina (areia fina e silte), homogênea e inequigranular. Argilominerais também ocorrem e podem conferir aspecto untuoso ao tato. Observam-se também planos de fraturas preenchidos por hidróxido de ferro.

Quando descritos microscopicamente, os arenitos exibem composição de cerca de 80-90% de quartzo. Os cristais de quartzo possuem granulometria milimétrica a submilimétrica, em geral, muito finos, dispersos na rocha e/ou formando níveis milimétricos. Encontram-se associados a cristais de caulinita.

Feldspatos parcialmente alterados representam de 5 a 10% da matriz dos arenitos. Possuem granulometria fina (silte). Ocorrem processos de alteração mineral do tipo sericitização e saussuritização.

Também estão presentes na matriz dos arenitos argilominerais, provavelmente caulinita, conforme apontam as descrições regionais da Formação Furnas. Perfazem de 5-10 das amostras avaliadas.

Em relação à cimentação do arenito observa-se na maior parte das amostras sua constituição essencialmente por argilominerais, cuja identificação não foi possível. Observa-se que a cimentação não preenche todos os poros. Observa-se também,

localmente cimentação composta por cristais de quartzo submilimétricos e ainda por cristais de micáceos.

Estão presentes nas amostras traços de hidróxidos de ferro que conferem coloração amarelada à rocha.

Em relação à estrutura das amostras, em geral, o contato entre os grãos é baixo. E os grãos são angulosos.

Os arenitos da Formação Itararé avaliados macroscopicamente apresentam colorações amareladas, avermelhas e cinzas. As amostras também apresentam certo estágio de modificação intempérica que confere manchas, crostas e alvéolos às amostras. A constituição mais comum é dada por quartzo de granulação fina (areia fina e silte), e inequigranular. Argilominerais também ocorrem e podem conferir aspecto untuoso ao tato.

No caso do Grupo Itararé também foi descrito siltitos, cuja descrição macroscópica é coloração cinza, granulometria siltosa com presença de areia fina e foliação incipiente.

Quando descritos microscopicamente, os arenitos exibem características semelhantes aos da Formação Furnas. A composição é de cerca de 80-85% de quartzo, com granulometria milimétrica a submilimétrica, dispersos na rocha e/ou formando níveis milimétricos.

Os Feldspatos perfazem menos que 5% das amostras e também encontram-se parcialmente alterados. Possuem granulometria muito fina.

No caso dos arenitos Itararé, os argilominerais constituem até 20% da matriz, porém não foi possível identificá-los.

A cimentação do arenito é argilosa e/ou silicosa, mas não preenche todos os poros da rocha.

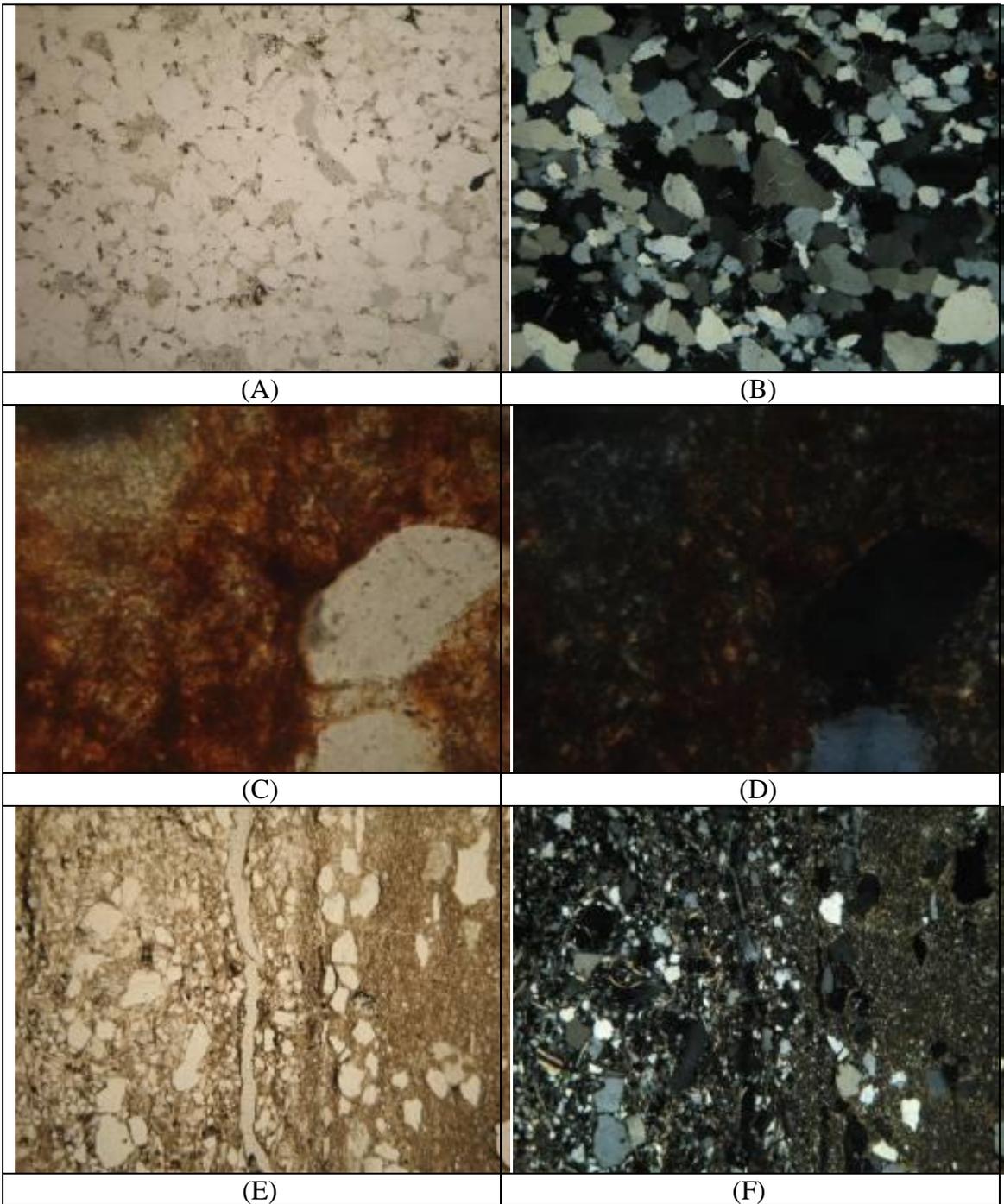
Estão presentes nas amostras traços de hidróxidos de ferro que conferem coloração amarelada à rocha.

Assim como no arenito Furnas, o contato entre os grãos é baixo. E os grãos são angulosos e inequigranulares.

Uma característica marcante nas amostras do Grupo Itararé é a presença de traços de óxidos e hidróxidos de ferro. Os óxidos conferem às amostras coloração avermelhada enquanto os hidróxidos de ferro conferem coloração amarelada.

Em relação aos siltitos descritos microscópicamente observa-se que a composição é semelhante a dos arenitos, porém neste caso os grãos de quartzo são ainda menores. É característico neste litotipo camadas milimétricas a centimétricas com composição micácea e orientação, além de camadas também milimétricas a centimétricas onde observa-se variação granulométrica. Os contatos entre as camadas são gradacionais ou bruscos.

A seguir apresentam-se as diversas fotos obtidas para as lâminas petrográficas.





- (A) Aspecto geral dos arenitos, observar composição quartzosa e aspecto inequigranular e anguloso dos grãos.
- (B) Idem anterior, nicóis cruzados.
- (C) Siltito com aspecto oxidado, apresentando grão de quartzo.
- (D) Idem anterior, nicóis cruzados.
- (E) Arenito muito fino com camadas siltosas, além de veio de quartzo, acompanhando a direção do acamamento. A granulometria é bastante variada e os grãos irregulares.
- (F) Idem anterior, nicóis cruzados.
- (G) Siltito onde se observa foliação incipiente, grãos de quartzo milimétricos a submilimétricos e um plano de micas extremamente finas orientadas segundo a foliação.
- (H) Idem anterior, nicóis cruzados.

#### 4.5 Geofísica

A interpretação das seções realizadas teve como foco identificar as zonas condutoras que possam requerer atenção especial, uma vez que podem indicar zonas de maior porosidade/permeabilidade, como arenito mais poroso e/ou zonas de fraturas, além da cobertura (manto de intemperismo) que, dependendo da posição do Nível D'Água (NA) também pode responder como meio condutor.

As seções representadas pelas linhas L1 e L2 compõem o estudo feito para o Barramento na margem esquerda. As duas seções, mostradas nas FIG 4-7 e 4-8 são perpendiculares entre si e se interceptam próximo à sondagem SM-204.

Em relação às seções, estas se apresentam, tais como as linhas L3 e L4, com valores de resistividade tais que podem-se separar em duas zonas condutoras: uma superior, relacionada à sedimentos mais finos e menos competentes, e outra camada subjacente, à qual infere-se ser o arenito seco de granulação maior. O que difere das outras duas seções, é o valor de contorno de resistividade, aqui apresentada em torno de 250  $\Omega\text{m}$ .

A seção L1, apresenta duas zonas distintas, com limite quase que vertical. A porção mais a leste, também interceptada pela sondagem SM-105, é delimitada por uma zona de valores de resistividade relativamente inferiores (<250  $\Omega\text{m}$ ), onde ocorre provavelmente maior grau de saturação, bem como maior possibilidade de apresentar sedimentos mais finos, com fraturamento subhorizontal. A saturação pode ser mostrada pelo furo SM-105, uma vez que este atinge o nível d'água logo no primeiro metro de sondagem. Percebe-se que, entre as estacas 40 e 80, ocorre uma anomalia com um valor alto de resistividade (>1000  $\Omega\text{m}$ ), podendo ser um corpo de arenito mais grosso, ou uma com menor grau de saturação.

Os furos SM-204, SM-104 e SR-203, apresentam-se dentro de uma zona de maior resistividade, diferente da porção onde se encontra o furo SM-105. Percebe-se que os valores de condutividade são menores, indicando um provável arenito seco. Os valores de resistividade são maiores que 2500  $\Omega\text{m}$ , nesta provável porção rochosa. Entretanto, observa-se que, na porção central da seção, entre as estacas 90 e 140, ocorre um nível subvertical com valores de resistividade entre 1000 e 2500  $\Omega\text{m}$ . É possível que esta zona represente planos de fraturamento, uma vez que coincide com uma fratura aberta subhorizontal descrita pelo furo SM-204, aos 30,24m.

A seção L2 é representada ainda por duas zonas de intervalos de resistividade, tal como a seção anterior, sendo uma com valores inferiores a 1500  $\Omega\text{m}$ , onde provavelmente ocorrem sedimentos finos saturados, e uma outra zona maior com valores menos condutores (>2500  $\Omega\text{m}$ ), onde apresenta o arenito seco. Tal como a seção a qual intercepta, a linha L2 também tem uma porção provavelmente fraturada, demonstrada por valores intermediários entre 1500 e 2500  $\Omega\text{m}$ , sendo bem relacionada com a seção L1.

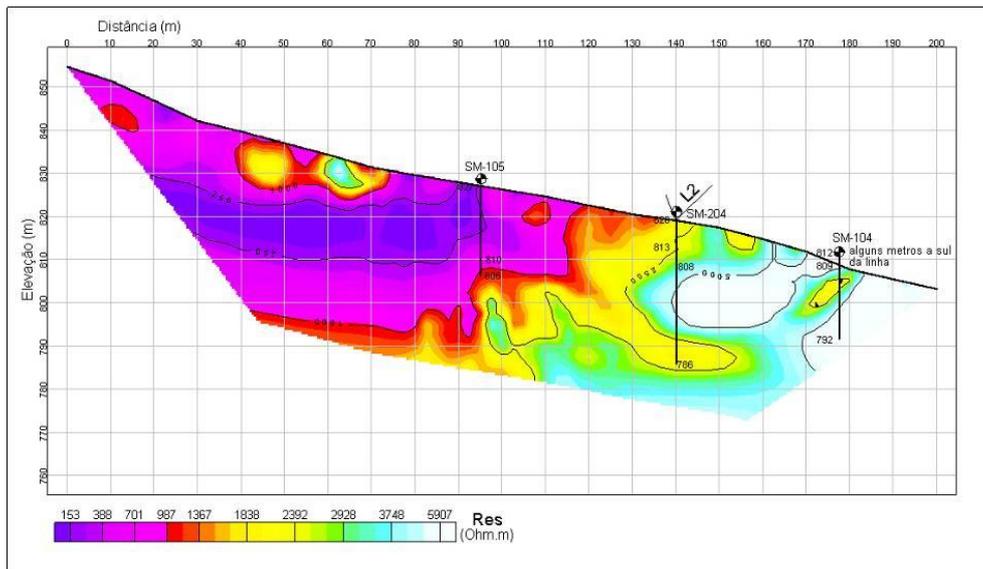


FIGURA 4-7 - Seção Geofísica - L1

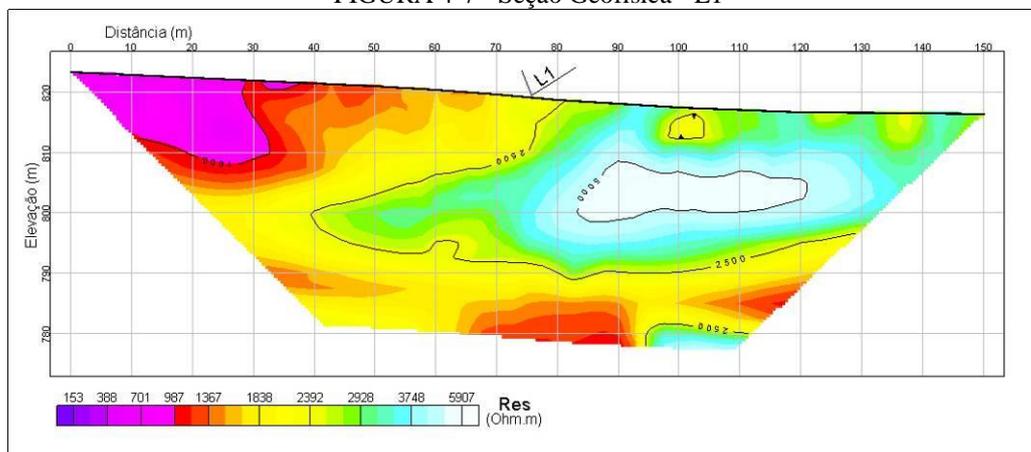


FIGURA 4-8 - Seção Geofísica - L2

As FIGs 4-9 e 4-10 representam as seções da margem direita, sendo as linhas L3 e L4. Observa-se pelos desenhos que a geologia desta porção da barragem mantém-se como à margem esquerda. Os contornos de resistividade adotados mantêm-se nas mesmas escalas de grandezas, se comparados às seções anteriores.

Ocorrem mudanças quanto à condutividade. As seções L3 e L4 apresentam zonas relativamente mais condutoras, delimitando um possível nível superficial fraturado, mesmo com solo pouco expressivo. Coincidentemente, estes valores mais condutores, acompanham os níveis d'água dos furos SR-202, SM-101 e SM-201, significando que, para profundidades mais rasas, pode ocorrer valores menos resistivos devido a presença de água, na seção L4.

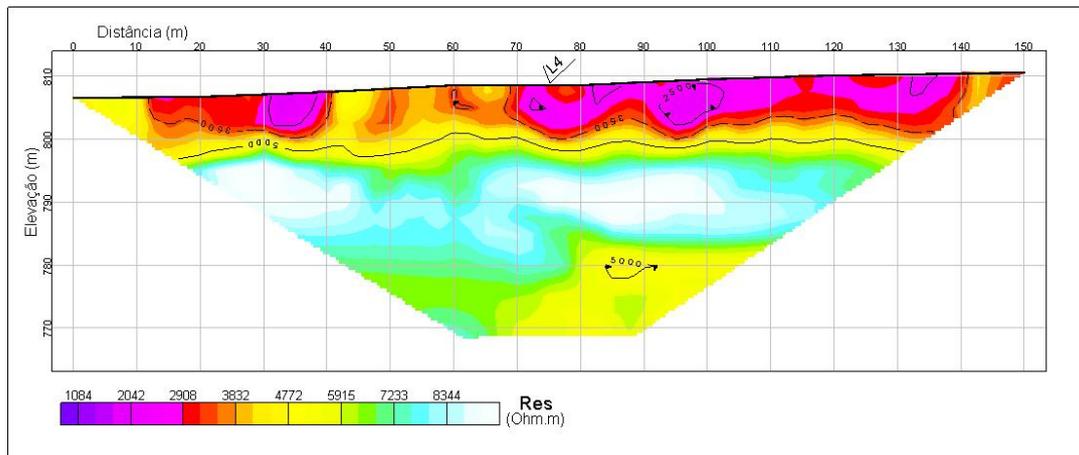


FIGURA 4-9 - Seção Geofísica - L3

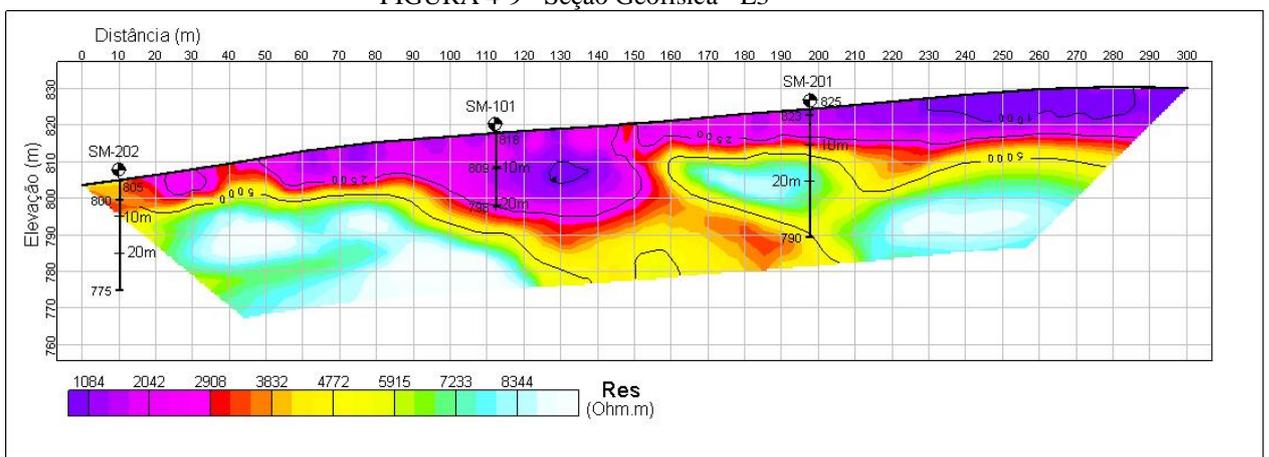


FIGURA 4-10- Seção Geofísica L4

Ainda na seção L4, observa-se que ocorre um afundamento no contorno superficial da resistividade, entre as estacas 80 a 140. Induzem-se, a este fato, planos de fraturas inclinados, podendo ou não ter alguma variação litológica, entretanto significando um aumento na porosidade devido ao fraturamento do maciço. Este mesmo padrão de contorno, porém bem menos acentuado, pode ser observado entre as estacas 230 a 290, na mesma seção. O afundamento é bem mais sutil, mesmo com um horizonte de solo pouco expressivo. Todavia, infere-se que nesta região ocorram planos de fraturas que provavelmente interceptam a outra fratura (entre as estacas 80 a 140), uma vez que a inclinação dos planos inferidos têm sentidos opostos.

O furo de sondagem SM-101, apresenta-se na região onde ocorre um provável fraturamento com caimento para leste. Nesta, a resistividade intermediária se encontra entre 1000 e 2500  $\Omega$ m. No furo SM-201, ocorre uma mudança litológica entre argila (saprolito) para o arenito grosso, a aproximadamente 11m, correspondendo à

passagem de resistividade intermediária para alta a extremamente alta na seção, mesmo que a granulometria não explique o comportamento geoeletrico. Há uma possibilidade do maior conteúdo de argila no nível superior e/ou cimento silicoso no nível inferior seja responsável pela alta resistividade no nível abaixo dos 11 ou 12m no local do furo SM-201.

As sondagens executadas na seção L3 demonstraram que o solo tem parâmetros de consistência elevado (muito rijo), composto por argila arenosa. Entretanto, a sondagem SP-214 tem ocorrência de fragmentos de arenito, enquanto o furo SP-215 compõe-se por uma argila plástica. Mesmo com estas diferenças, os valores de resistividade encontrados permitem dizer que o restante da seção, não amostrado por sondagens, possui uma camada superficial pouco resistente, com baixo grau de umidade, uma vez que os valores mais baixos ainda assim são mais resistivos, chegando a 3500  $\Omega$ .m. Abaixo dos 10m, observa-se a linha delimitadora de 5000  $\Omega$ .m, indicando uma rocha altamente resistente, provavelmente arenitos cimentados/silicificados.

Não se observa resistividade de meio saturado em nenhuma das linhas desta margem direita da barragem. Na faixa vermelho/violeta têm-se apenas resistividades entre 1000 e 2500  $\Omega$ m que indicam apenas certo grau de umidade. E isto ocorre apesar das fraturas, muitas das quais podem não estar sendo detectadas por falta de contraste com o meio encaixante. Pode-se ter uma situação de forte cimentação que reduz a porosidade e permeabilidade do meio sedimentar ou a situação mais localizada de fraturas muito abertas e arenitos friáveis que não armazenam água alguma. Só que nesta última situação, ao se atingir o N.A, a resistividade deveria cair para níveis de uma ou duas centenas de Ohm.m, senão inferiores. Mais provavelmente então as altas resistividades das camadas sedimentares são justificadas por forte cimentação/silicificação.

Ao comparar as seções L3 e L4, pode-se verificar que há uma continuidade em relação aos valores de resistividade das camadas sobrejacentes, estabelecendo uma mudança nos valores a partir dos 10m de profundidade, quando tornam-se menos condutores. O substrato com maiores valores de resistência foi atribuído ao arenito seco, enquanto que os níveis superiores são interpretados como sedimentos mais finos (argila/diamictito). Não se exclui a possibilidade de fraturas secas e/ou preenchidas e que, por isto, não apresentem contraste.

A seção L6 mostra que o limite inferior da zona extremamente resistente (resistividade  $\geq 5000\Omega m$ ), na cota 788m, coincide com o NA detectado no furo SM-212. Não se pode dizer que existe uma mudança na resistividade que indique o NA nesta posição, apesar de se verificar uma morfologia na mudança de cor na seção que poderia sugerir isto. Por outro lado, aos 18-19m o furo descreve fraturas com fragmentação que coincidem com as fraturas subhorizontais interpretadas na seção de resistividade.

Em relação à linha L5, próximo ao furo SM-212, os comentários feitos para a linha L6 também são válidos. Esta seção mostra ainda dois domínios resistivos distintos. O domínio mais a SE é uma zona relativamente condutora à intermediária (resistividade  $\leq 2500\Omega m$ ), que pode indicar sedimentos mais porosos e/ou arenitos mais finos e menos cimentados que, se comparados aos furos de sondagem ao longo da seção, pode ser relacionados com os arenitos da Formação Itararé. O domínio mais resistente (resistividade  $\geq 2500\Omega m$ ), próximo à margem do rio, indica arenitos muito secos, provavelmente cimentados. Esse contraste de comportamento foi interpretado como um possível contato entre as duas unidades de arenitos descritas na região como mostra a Figura 4.11.

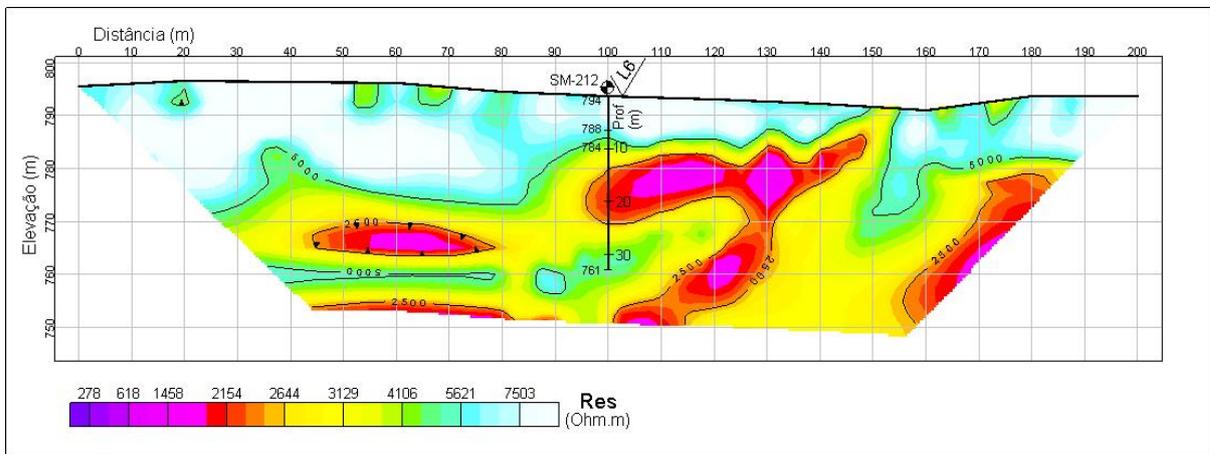


FIGURA 4-11 - Seção Geofísica L5

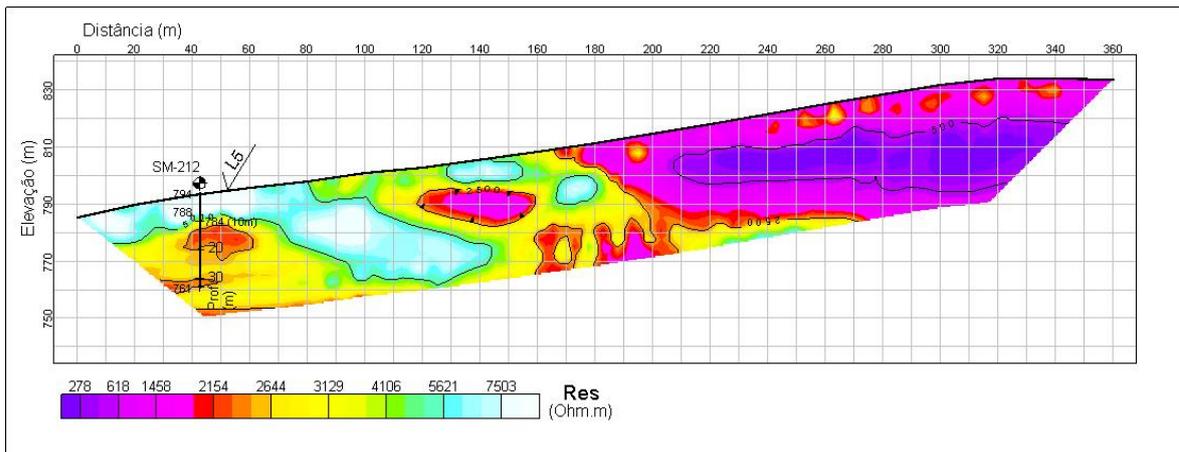


FIGURA 4-12 - Seção Geofísica - L6

#### 4.6 Permeabilidade do Maciço Rochoso

Os ensaios de Perda d'água do maciço foram realizados simultaneamente com o avanço da perfuração em diversas profundidades, totalizando 54 ensaios de perda d'água. Foi seguida a metodologia de *Lugeon*, preconizada no boletim 02 da ABGE (1975), que prevê cinco estágios com pressões diferentes.

Onde foi possível vedar o furo, foram ensaiados trechos delimitados pelo fundo do furo e obturador de neoprene, em segmentos com aproximadamente 3 m de extensão.

As pressões de cada ciclo, definidas pela profundidade do obturador e do nível d'água, foram mantidas constantes durante 10 minutos em cada estágio e medido, em hidrômetro, o volume absorvido pelo trecho ensaiado a cada 2 minutos.

Os resultados obtidos foram processados, sendo apresentados a seguir os índices obtidos para cada ensaio.

QUADRO 4-4 - Resultados dos ensaios de Perda d'água realizados no maciço rochoso.

Sondagem	Estrutura	Trechos Ensaiaados		Resultados
		Nº	Profundidade (m)	
SM-101	Barragem	1	8,90-11,90	
		2	11,90-14,60	
		3	14,60-17,10	
		4	17,10-20,09	
SM-104	Barragem	5	1,80-4,80	
		6	4,80-7,80	
		7	7,70-10,80	
		8	10,70-13,95	
		9	14,10-17,05	
		10	16,80-20,05	
SM-105	Barragem	11	10,60-13,72	
		12	13,60-16,72	
		13	16,60-20,72	
SM-106	Canal de adução	14	6,60-9,60	
		15	9,60-12,60	
		16	12,60-15,10	
SM-107	Canal de adução	17	7,60-10,40	
		18	10,60-13,00	
		19	12,60-15,90	
SM-108	Canal de adução	20	2,00-5,00	
		21	5,00-8,00	
		22	7,80-11,60	
		23	11,60-15,00	
SM-109D	Dique	24	2,60-5,10	
		25	5,10-8,10	
		26	8,40-11,10	

		27	11,40-15,00	
SM-110	Tomada de água	28	4,70-7,78	
		29	7,60-10,78	
		30	10,60-13,78	
		31	13,60-16,78	
		32	17,60-20,68	
SM-111D	Dique	33	7,40-10,40	
		34	10,40-12,50	
		35	12,40-15,00	
SM-112	Conduto forçado	-		
SM-113	Casa de força	-		
SM-114	Casa de força	-		

Os ensaios de perda d'água executados apontaram trechos com permeabilidades médias e localmente altas

#### **4.7 Ensaios de laboratório**

A avaliação da resistência à compressão uniaxial foi efetuada através de 46 ensaios nas condições natural e/ou saturada por imersão durante 24 horas em corpos de prova provenientes de testemunhos das sondagens mistas.

Os ensaios foram executados pelo Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), com CP's de diversas litologias e profundidades correspondentes as estruturas projetadas.

Os resultados obtidos estão resumidos no QUADRO 4-5.

QUADRO 4-5 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial realizados em amostras obtidas à partir dos testemunhos de sondagens

Amostra	Prof. (m)	Rocha	RCS (MPa)	
			Natural	Saturada
SM-101	2,52-2,68	Arenito (Itararé)	1,4	-
			-	(1)
	6,41-6,56	Arenito (Itararé)	2	-
			-	(1)
	7,83-8,00	Arenito (Itararé)	1,7	-
			-	(1)
	13,98-14,59	Arenito (Furnas)	49,4	-
			78,3	-
			53,2	-
			-	66,6
-			63,8	
-			54,2	
SM-104	7,91-8,10	Arenito (Furnas)	71,2	-
			83,0	-
			67,3	-
	8,10-8,48	Arenito (Furnas)	-	49,8
			-	42,5
			-	45,2
SM-105	11,44-11,64	Siltito (Itararé)	24,7	-
			23,4	-
			15,9	-
	11,64-11,81	Siltito (Itararé)	-	14,9
			-	12,6
			-	19,1
	19,64-20,05	Arenito (Furnas)	87,3	-
			88,4	-
			99,9	-
			-	112
-			90,7	
-			117,9	
SM-106	9,78-10,23	Siltito (Itararé)	15,5	-
			20,1	-
			32,5	-
			-	24,0
			-	19,6
			-	25,3
SM-108	8,16-8,31	Arenito (Itararé)	15,2	-
			-	4,8
	8,31-8,47	Arenito (Itararé)	11,9	-
			-	10,5
	8,54-8,71	Arenito (Itararé)	8,4	-
			-	11,0
SM-113	18,35-18,53	Arenito (Furnas)	58,4	-
			96,2	-
			51,2	-
SM-201	11,20-16,00	Arenito (Furnas)	-	85,05
SR-202	11,70-16,70	Arenito (Furnas)	-	69,07
SR-203	3,20-8,00	Arenito (Furnas)	-	82,26
SM-204	8,10-13,90	Arenito (Furnas)	-	74,66

Os resultados obtidos evidenciam principalmente as diferenças de resistência e cimentação entre os arenitos das Formações Furnas e Itararé, conforme pode ser avaliados a partir dos valores indicados no QUADRO 4-5, onde são apresentados os resultados médios do conjunto de ensaios realizados.

De acordo com a classificação de resistência das rochas propostas por ISRM (1989), as litologias do Grupo Itararé são enquadráveis como rochas brandas a moderadamente existentes.

O Arenito Furnas é a rocha de melhor qualidade em termos de resistência à compressão simples sendo classificável como rocha resistente (R4). Caracteriza-se ainda por apresentar baixa perda de resistência após saturação por 24 horas.

#### **4.8 Qualificação do maciço como material de fundação**

Com base em todos os dados levantados são expostas a seguir os principais condicionantes relativos a implantação das estruturas previstas neste estudo de caso.

As investigações realizadas, em relação às características geomecânicas, identificaram condições de fundações geológicas bastante similares, em todos os eixos estudados. Constituído essencialmente de arenitos com estratos cruzados com níveis conglomeráticos, dispostos sub-horizontalmente, consistente e facilmente escarificável, imprime uma característica geotécnica importante, por criar níveis menos resistentes na base dos estratos, que são facilmente erodíveis e de alta permeabilidade.

No eixo da barragem, entre as cota 815 e 825 e na casa de força entre a cota 800 e 810 o contato erosivo entre as formações do arenitos Furnas e os Diamictitos da Formação Itararé, apresenta um nível de alta fragilidade à erosão e à permeabilidade.

As condições de fundação no eixo do Barramento, tanto na margem direita como na margem esquerda, apresentam uma camada de solo, de alteração de rocha sotopostas ao maciço rochoso.

Na margem direita as sondagens mostram uma camada média de dois a cinco metros de solo, sobre um arenito fino argiloso resultante da alteração da rocha. Esta camada apresenta-se com uma distribuição homogênea em toda sua extensão, com uma espessura média de quatro metros, abaixo desta camada encontra-se o arenito Furnas que apresenta elevada resistência.

Na margem esquerda as sondagens constataram três tipos litológicos distintos, representados primeiramente por uma camada de seis metros de material inconsistente, e abaixo desta uma camada com espessura média de cinco metros de siltito cinza.

Abaixo dessas duas camadas, marcando um contato geológico, o substrato rochoso apresenta excelentes características para base do barramento, porém os níveis de contatos entre os estratos mostraram consideráveis perdas d'água devido a alta permeabilidade.

O substrato rochoso apresenta excelente característica para fundação das estruturas do barramento, com ressalvas a permeabilidade do maciço. O arenito Furnas caracteriza-se por uma rocha consistente e maciça porém quando friável, não resiste a tensões excessivas, devido ao fraco cimento aglomerante de origem caulínica, transformando-se em areia.

É importante ressaltar que a camada de siltitos/folhelhos possui características geotécnicas particulares e deve ser considerada isoladamente, quando for o caso. Estes níveis mais argilosos são mais facilmente erodíveis devido a sua baixa resistência.

Outro condicionante importante é marcado pelos níveis entre estratos e camadas, que mostraram-se menos resistentes e com alta permeabilidade. Tornando-se necessário realizar uma campanha de consolidação da rocha da fundação através de injeções entre a base e as estruturas do barramento.

No canal de adução, a espessura da cobertura de material inconsolidado diminui no sentido da barragem para a Câmara de Carga variando de 0 até cerca de 30m.

A camada superior é arenosa fina, de coloração preta a marrom, com matéria orgânica e restos vegetais. A camada de solos de alteração de arenito constituiu-se de fragmentos de arenito oxidado e limonitizado. Ocorrem também solos residuais de siltitos.

Neste trecho ocorre camada de siltito cinza com espessura de 2 a 4 m, relacionado ao Grupo Itararé, além do arenito Itararé sotoposto ao siltito cinza, não sendo mais encontrado, até a profundidade perfurada, o contato com o arenito Furnas. Em todo segmento os coeficientes de permeabilidade foram da ordem de H3-H2.

A casa de força está implantada sobre arenito Furnas que se mostra friável até aproximadamente 8,00 m de profundidade passando então a apresentar boa recuperação e bons índices geomecânicos.

## **5 CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS E MODELO GEOMECÂNICO**

A etapa final deste trabalho consiste em agrupar todas as informações obtidas e descritas no capítulo anterior, de forma a compartimentar o maciço de acordo com suas características geológicas e geotécnicas necessárias para a previsão do comportamento do maciço rochoso quando solicitado.

Dessa forma, pode-se compartimentar o sítio em três estratos de características distintas.

O primeiro passo para a definição do modelo geomecânico foi a consolidação de um modelo geológico do local, onde são definidos os tipos litológicos presentes no sítio, além das principais estruturas geológicas presentes, formadas pelos planos de acamamento sedimentar da rocha.

As seções com os modelos geomecânicos apresentados para cada parâmetro geomecânico levantado no local estudado, é a reprodução aproximada das condições previstas para a fundação das estruturas da PCH onde se abrange apenas um aspecto geomecânico para elaboração do modelo (Figura 5-1) e dos perfis (Figuras 5.2 e 5.3 – Anexos).

O nível mais superficial é formado por um capeamento de solo, que ocorre ao longo de todo o trecho estudado, e apresenta espessuras bastante variadas, compostos por solos coluvionares e solos de alteração.

Neste estrato, os maiores valores de cobertura são obtidos no topo da ombreira esquerda. Relaciona-se à porção onde a camada de siltito está mais próxima da superfície. Neste trecho o contato do solo de cobertura se dá diretamente com a camada de siltito, diferente dos demais trechos onde o contato do solo de alteração se dá com o arenito, originando solos menos espessos.

Os solos de alteração são compostos por um material predominantemente areno-siltoso a silto-arenoso com colorações amareladas e beges. Os valores de SPT variam desde 8 até o impenetrável, caracterizando desde solos fofos até muito compactos. Em geral os valores de SPT aumentam com a profundidade mas não é um comportamento padrão.

A transição solo/rocha não pôde ser bem caracterizada através das sondagens. Este fato se deve às baixas recuperações observadas tanto nos solos residuais como nos arenitos mais brandos. Contudo, as características observadas nos poços de inspeção e afloramentos indicam que os contatos são gradacionais. O perfil de intemperismo grada de um solo de alteração com estruturas originais da rocha preservadas para um arenito muito brando.

Este maciço muito brando varia para um maciço resistente, são e pouco a medianamente fraturado.

Litologicamente o maciço pode ser compartimentado em três grandes grupos de rochas: Os arenitos da formação Furnas na base, sobrepostos pelos siltitos da Formação Itararé e no topo encontram-se os arenitos da Formação Itararé. As características geológicas destas formações foram detalhadamente descritas no capítulo 5.

No entanto os parâmetros mais importantes para a fundação das estruturas da PCH são os graus de resistência avaliados para o maciço. Este foi o principal parâmetro tomado em conta para a definição da compartimentação final do maciço visto que a compartimentação final do maciço é bastante semelhante à indicada no modelo de resistividade de maciço .

Assim definido, serão abordadas em seguida as considerações e características para cada camada definida no modelo geomecânico.

A camada mais superficial, denominada Horizonte 1, possui espessura de poucos centímetros até espessuras da ordem de 30 metros. As maiores espessuras são observadas no alto da ombreira esquerda e as menores espessuras nas regiões próximas ao leito do rio.

Em termos de litologia, os arenitos da formação Itararé estão enquadrados nesta camada. Também faz parte do Horizonte 1, a camada mais superficial do arenito da Formação Furnas.

Quanto ao grau de resistência, os arenitos do Horizonte 1 possuem graus R0, R1 e R2, sendo classificados como extremamente brandos (R0), muito brandos (R1) e brandos (R2), conforme ISRM (1983) .

O grau de alteração do maciço rochoso nesta camada varia entre medianamente alterado (A3), quando a matriz apresenta-se descolorida com evidências de oxidação, caulinitização, sericitização, etc; e muito alterada (A4) quando a alteração mineralógica é muito acentuada, com cores já bastante modificadas e com presença de minerais já parcialmente decompostos em argilo-minerais.

Salienta-se que para definir o grau de alteração do arenito foi essencial a inspeção das laminais petrográficas confeccionadas já que as alterações presentes não são totalmente visíveis ao olho nu.

O maciço definido no Horizonte 1 possui grau de alteração extremamente variado, os graus variam desde F1 – muito pouco fraturado- até F5 – extremamente fraturado. Este parâmetro não foi definitivo na definição desta camada.

Assim como o grau de fraturamento, os valores de RQD também variaram consideravelmente, de muito pobre a bom e também não se mostrou definitivo na definição da compartimentação deste horizonte.

Tanto o grau de fraturamento como o RQD mostram padrão aleatório nos perfis de sondagem descritos, indicando que a quantidade de avaliações feitas para este parâmetro não foi suficiente para definir o compartimento deste parâmetros na Horizonte 1.

Os ensaios de resistência a compressão uniaxial executados indicaram valores entre 1,4 a 15,2 MPa para os litotipos ensaiados dentro deste horizonte, correspondem a litotipos areníticos da Formação Itararé, classificados como extremamente brandos a muito brandos.

A avaliação das seções de eletrorresistividade indica que estas porções do maciço estão relacionadas a zonas mais condutivas do maciço, que por sua vez refletem principalmente uma maior quantidade de água no maciço. O que reflete pior condição dos parâmetros de caracterização do maciço rochoso avaliado, dessa forma, estas zonas mais condutoras estão relacionadas a zonas mais permeáveis do maciço que deve se mostrar brando, fraturado, alterado.

O Horizonte 2, definido na compartimentação possui espessuras entre 1 e 8 metros, em que as maiores espessuras são observadas na ombreira esquerda, na região do circuito de geração.

Em termos de litologia, o horizonte 2 corresponde a camada de siltito da Formação Itararé. Este litotipo possui coloração cinza e é composta predominantemente por minerais micáceos na fração silte, com grãos de areia. Os minerais micáceos estão orientados aproximadamente segundo a posição horizontal, com mergulho suave para sudoeste.

Quanto a resistência, a avaliação das sondagens indicou rochas extremamente brandas (R0), muito brandas (R1) e brandas (R2), com predomínio das muito brandas. No caso dos siltitos é importante ressaltar que ocorre uma significativa variação de sua resistência em função da umidade da amostra, a resistência diminui quando a amostra está saturada. A avaliação deste parâmetro foi realizada ainda com amostras úmidas.

Em relação ao grau de alteração, as amostras observadas nos furos de sondagens apresentam-se pouco alteradas (A2) a moderadamente alteradas (A3). Observa-se a matriz com cores esmaecidas a descolorida, perda de brilho e oxidação da matriz.

O grau de fraturamento no horizonte 2, varia entre muito pouco fraturado (F1) e medianamente fraturado (F3). Ressalta-se que a ocorrência da camada de siltito é restrita, assim como sua espessura máxima em alguns furos de sondagem, o que prejudica a avaliação do grau de fraturamento.

O RQD deste horizonte é pobre a bom, e não exhibe padrão de ocorrência dos melhores ou piores parâmetros, que ocorrem de forma variada.

Os ensaios para determinação da resistência em laboratório indicaram valores entre 12,6 e 32,5 MPa, classificadas como Muito Brandas (R2) e Medianamente Resistente (R3).

A eletrorresistividade não foi útil na definição desta camada pois representa uma camada de transição entre dois horizontes de comportamento geofísico distinto, um horizonte menos resistivo definido pelo horizonte 1 e um horizonte mais resistivo definido pelo horizonte 3.

O Horizonte 3 foi definido abaixo dos horizontes 1 e 2. Neste trabalho não foi definido seu limite inferior pois considerou-se que este horizonte é adequado para receber as estruturas previstas na futura obra.

Este compartimento é constituído por arenitos da Formação Furnas. Trata-se de uma rocha com granulometria predominantemente fina a média e passagens centimétricas de arenitos conglomeráticos, arenitos finos e siltitos. A coloração varia entre branco, amarelo e cinza, predominando os tons amarelados.

De uma maneira geral, este horizonte inicia-se no topo do arenito medianamente resistente R3. Nos furos de sondagem SM-204 e SM-212 foram observados arenitos com grau de resistência R4 – Resistente, respectivamente localizados na região de implantação da barragem (ombreira esquerda) e no trecho final do circuito de geração (casa de força).

Em grande parte do trecho do circuito de adução não foi verificado nas sondagens executadas os arenitos medianamente resistentes, tratam-se dos furos SM-106, SM-107, SM-108, SM-207, SM-209 e SM-110. Dessa forma, o contato entre os horizontes sobrejacentes e o Horizonte 3 foi inferido neste trechos.

O arenito apresenta-se pouco alterado a são. Por vezes a matriz apresenta-se descolorida e com sinais de oxidação especialmente nos planos de descontinuidade

Geralmente o maciço rochoso apresenta-se pouco fraturado a medianamente fraturado, contudo ocorrem trechos muito fraturados e extremamente fraturados intercalados.

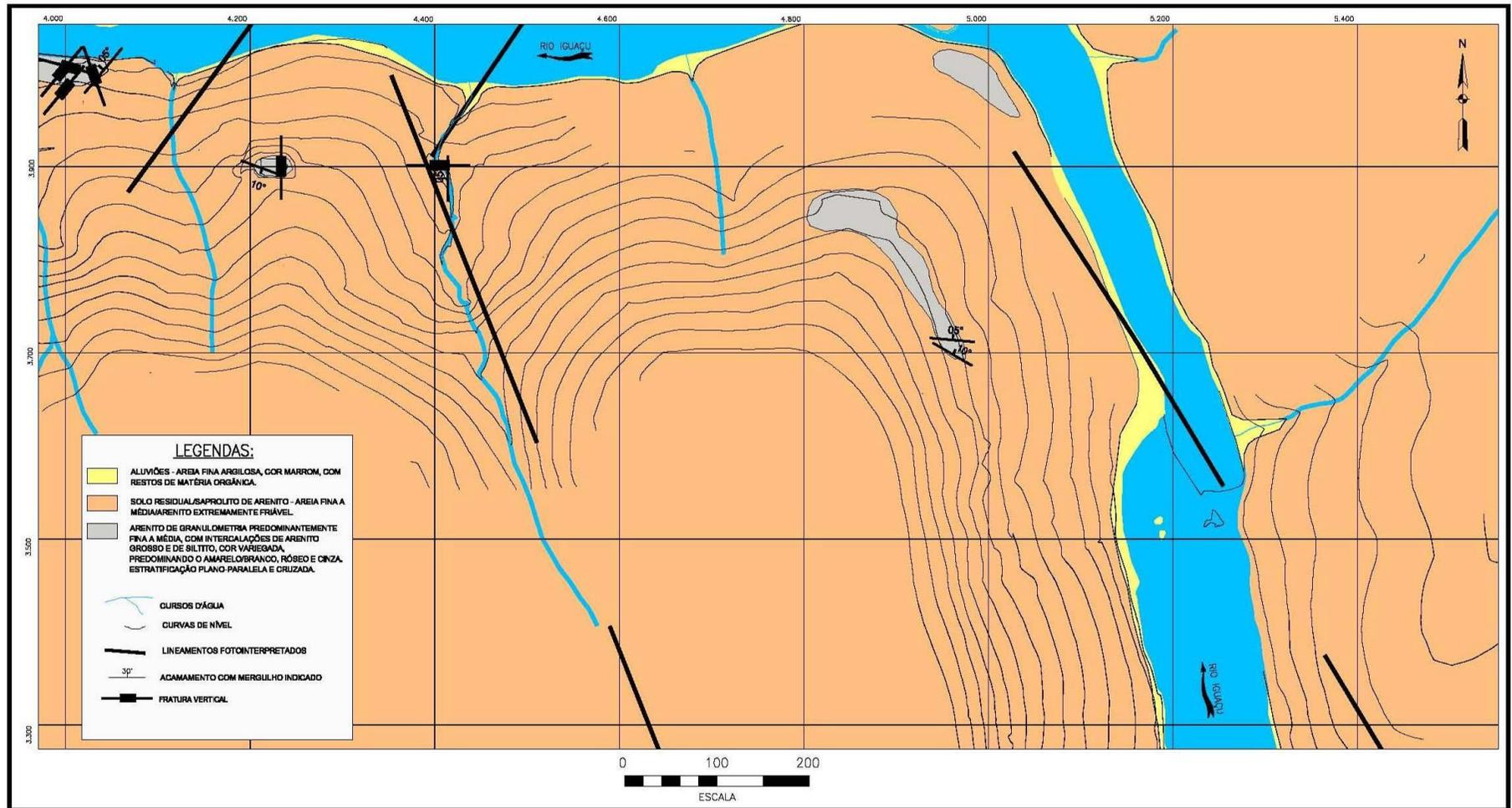
Assim como nos horizontes 1 e 2, o grau de RQD é bastante variado, desde excelente até muito pobre, e não exhibe padrão de ocorrência. Mesmo em trechos onde a recuperação foi completa, podem ocorrer maciços pobres e muito pobres devido ao número de descontinuidades.

A resistência à compressão avaliada em laboratório aponta arenitos medianamente resistentes (R3) a muito resistentes (R5). Os resultados indicaram que a resistência é diretamente proporcional a profundidade do furo, em outras palavras, quanto maior a profundidade maior a resistência.

A eletroresistividade indicou que nas porções definidas como Horizonte 3 ocorrem porções mais resistivas relacionadas a arenitos coerentes, resistentes e silicificados e/ou secos. Também neste horizonte ocorrem trechos menos resistivos relacionados a presença de água em zonas fraturadas e/ou regiões mais porosas do arenito.

Os contatos entre as litologias deverão merecer uma atenção especial durante a fase construtiva, sendo necessário o estabelecimento da resistência a cisalhamento destes contatos, já que necessariamente estruturas de concreto serão implantadas sobre elas o que pode comprometer a estabilidade.

Figura 5-1 - Mapa Geológico Geotécnico.



## 5.1 Classificação dos Compartimentos Geomecânicos

### 5.1.1 Classificação Horizonte 1

Aspecto Envolvido	Parâmetro	Variação dos Índices					Horizonte 1
		>200	100-200	50-100	10-50	<10	
Deformabilidade	Módulo E (GPa)	>200	100-200	50-100	10-50	<10	
		10	8	6	4	2	2
	Resist. à compr. Uniaxial (MPa)	>100	50-100	20-50	5-20	<5	
		10	8	6	4	2	2
Estabilidade	Alteração da rocha	D1	D2	D3	D4	D5	
		16	12	8	4	2	4
	Sistemas de descont.	A	B	C	D	E	
		8	6	4	2	0	2
	Relação de direções	a	b	c	d	e	
		8	6	4	2	0	8
	Condição da Descont.	a'	b'	c'	d'	e'	
		8	6	4	2	0	4
Estanqueidade	Espaçam. Entre descont. (m)	>3,0	1,0-3,0	0,3-1,0	0,05-0,3	<0,05	
		10	8	6	4	2	6
	Condutividade Hidráulica	H1	H2	H3	H4	H5	
		15	10	7	4	0	4
	Relação de direções	a	b	c	d	e	
		15	10	7	4	0	0
Somatório dos índices		81-100	61-80	41-60	21-40	<20	
Classe do maciço rochoso		I	II	III	IV	V	
Descrição do maciço rochoso		M. Bom	Bom	Reg.	Ruim	M. Ruim	
						Total	32

### 5.1.2 Classificação Horizonte 2

Aspecto Envolvido	Parâmetro	Variação dos Índices					Horizonte 2
		>200	100-200	50-100	10-50	<10	
Deformabilidade	Módulo E (GPa)	>200	100-200	50-100	10-50	<10	
		10	8	6	4	2	2
	Resist. à compr. Uniaxial (MPa)	>100	50-100	20-50	5-20	<5	
		10	8	6	4	2	2
Estabilidade	Alteração da rocha)	D1	D2	D3	D4	D5	
		16	12	8	4	2	4
	Sistemas de descont.	A	B	C	D	E	
		8	6	4	2	0	2
	Relação de direções	a	b	c	d	e	
		8	6	4	2	0	8
	Condição da Descont.	a'	b'	c'	d'	e'	
		8	6	4	2	0	0
Estanqueidade	Espaçam. Entre descont. (m)	>3,0	1,0-3,0	0,3-1,0	0,05-0,3	<0,05	
		10	8	6	4	2	6
	Condutividade Hidráulica	H1	H2	H3	H4	H5	
		15	10	7	4	0	4
	Relação de direções	a	b	c	d	e	
		15	10	7	4	0	0
Somatório dos índices		81-100	61-80	41-60	21-40	<20	
Classe do maciço rochoso		I	II	III	IV	V	
Descrição do maciço rochoso		M. Bom	Bom	Reg.	Ruim	M. Ruim	
						Total	28

### 5.1.3 Classificação Horizonte 3

Aspecto Envolvido	Parâmetro	Variação dos Índices					Horizonte 3
		>200	100-200	50-100	10-50	<10	
Deformabilidade	Módulo E (GPa)	>200	100-200	50-100	10-50	<10	
		10	8	6	4	2	2
	Resist. à compr. Uniaxial (MPa)	>100	50-100	20-50	5-20	<5	
		10	8	6	4	2	8
Estabilidade	Alteração da rocha	D1	D2	D3	D4	D5	
		16	12	8	4	2	12
	Sistemas de descont.	A	B	C	D	E	
		8	6	4	2	0	2
	Relação de direções	a	b	c	d	e	
		8	6	4	2	0	8
	Condição da Descont. (Quadro	a'	b'	c'	d'	e'	
		8	6	4	2	0	6
Estanqueidade	Espaçam. Entre descont. (m)	>3,0	1,0-3,0	0,3-1,0	0,05-0,3	<0,05	
		10	8	6	4	2	6
	Condutividade Hidráulica	H1	H2	H3	H4	H5	
		15	10	7	4	0	7
	Relação de direções	a	b	c	d	e	
		15	10	7	4	0	0
Somatório dos índices		81-100	61-80	41-60	21-40	<20	
Classe do maciço rochoso		I	II	III	IV	V	
Descrição do maciço rochoso		M. Bom	Bom	Reg.	Ruim	M. Ruim	
						Total	51

## 6 CONCLUSÃO

Os parâmetros fraturamento e RQD não se mostraram determinantes na determinação dos condicionantes relacionados às camadas mais brandas (Horizonte 1 e 2), assim como também para definir os contatos entre as camadas. Como foi discutido no capítulo 4, existem algumas ressalvas a serem consideradas durante a avaliação destes parâmetros em rochas brandas, o que pode estar refletido na falta de padrão dos parâmetros. Contudo ainda é provável que estas características estejam diretamente relacionadas a execução das sondagens, que prejudicou a recuperação dos testemunhos no horizonte mais decomposto.

Em relação aos graus de resistência avaliados através das sondagens, verificou-se que as classificações corresponderam aos valores de resistência obtidos em laboratório. O que confirma que o método de avaliação proposto no QUADRO 2-1 (ISRM, 1983) é totalmente adequado a avaliação dos arenitos.

Cabe considerar que durante o projeto executivo sejam realizadas novas investigações, com a utilização de televisamento para a realização da caracterização estruturais mais precisas nas regiões de contato, já que foi verificado que o método de sondagem mecânica utilizado prejudicou a integridade dos testemunhos e por conseguinte a sua avaliação.

## **7 -SUGESTÃO DE FUTUROS TRABALHOS E PESQUISAS COMPLEMENTARES**

Em uma dissertação de mestrado não é possível abordar todos os aspectos envolvidos na modelagem a caracterização dos critérios geológico-geotécnicos envolvidos no projeto de uma PCH.

Estudos futuros poderão detalhar a geologia do local já que tratam-se de grupos com litologias bastante diversificadas. Um detalhamento dos contatos entre cada formação do Grupo Itararé

Uma das sugestões é a caracterização dos arenitos quanto a permeabilidade relacionada a sua porosidade já que caracterizaram a permeabilidade do maciço refletem principalmente a condutividade hidráulica ao longo das fraturas do maciço.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ABGE (1983). Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos. São Paulo. (tradução n. 12).
- 2 IAPAR – Cartas Climáticas do Paraná – Disponível em < <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=863> >. Acesso em 14 de março de 2013.
- 3 ISRM (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock mechanics. International Journal of Rock Mechanics Science and Geomechanics. Abstract. v.15 p. 319-368.
- 4 MACHADO, F.B.; MOREIRA, C.A.; ZANARDO, A; ANDRE, A.C.;GODOY, A.M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A.J.R.; ARTUR, A.C.; OLIVEIRA, M.A.F.de. **Atlas de Rochas. [on-line]. ISBN: 85-89082-12-1.**Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.rc.unesp.br/museudpm>. Arquivo capturado em 14 de março de 2013.
- 5 MILANI E.J.; FRANÇA A.B.; SCHNEIDER R.L. (1994). Bacia do Paraná. Boletim de Geociências Petrobrás v. 8:1 p. 69-82.
- 6 OJIMA, L. M. (1982). Metodologia de classificação de maciços rochosos aplicável a túneis. São Paulo. ABGE. Síntese de tese. 100p.
- 7 SCHNEIDER R.L.; MUHLMANN 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, Porto Alegre. Anais. SBG. v. 1 p. 41-65.
- 8 SERRA JUNIOR, E.; OJIMA, L. M. (1998). Classificação de maciços rochosos OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S. N. A.. Geologia de Engenharia. São Paulo. ABGE. Oficina de Texto. p. 15-38.
- 9 SUGUIO, K.(1980) - Rochas Sedimentares. Editora da Universidade de São Paulo, São Paul, Brasil, 500pp.
- 10 ZALÁN P.V.; WOLF S.; ASTOLFI M.A.M.; VIERA .S.; CONCIEÇÃO J.C.J.; NETO E.V.S.; MARQUES A. (1987). Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná. SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3., Anais. v.1 p.441-473.





Figura 5.3 – Caracterização Geomecânica do Circuito Adução/Geração

