

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PECULIARIDADES DOS ARENITOS NA CONSTRUÇÃO DE  
BARRAGENS

Adinan Jarouche

Orientador: Prof. Dr. Georg Robert Sadowski (GMG)

Co-orientador: Geól. Ivan José Delatim (Intertechne Consultores)

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF – 2011 / 01)

SÃO PAULO  
2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PECULIARIDADES DOS ARENITOS NA CONSTRUÇÃO DE  
BARRAGENS

Adinan Jarouche



Orientador: Prof. Dr. Georg Robert Sadowski  
Co-orientador: Geól. Ivan José Delatim

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF – 2011 / 01)

DEDALUS - Acervo - IGC



30900030281

SÃO PAULO  
2011



TF  
237  
A.P.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PECULIARIDADES DOS ARENITOS NA CONSTRUÇÃO DE  
BARRAGENS



Adinan Jancuch

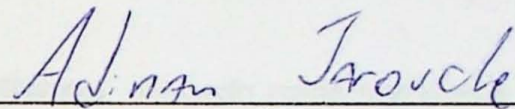
Orientador: Prof. Dr. Georg Robert Sadowski  
Co-orientador: Geol. Ivan José Delfino

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF - 2011/01)

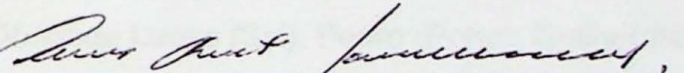
SÃO PAULO  
2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

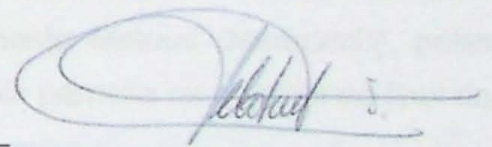
Em referência a Monografia do Trabalho de Formatura 2011 (TF – 2011 / 01)  
“Peculiaridades dos arenitos na construção de barragens”, estão de acordo:



**Aluno:** Adinan Jarouche  
Instituto de Geociências



**Orientador:** Prof. Dr. Georg R. Sadowski  
Instituto de Geociências



**Co-orientador:** Ivan J. Delatim  
Inetrtechne Consultores S.A.

SÃO PAULO  
2011



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me guiar sempre.

Agradeço a toda minha família, principalmente aos irmãos, Omar e Tárík e aos meus pais, Mohamede e Amélia, por caminhar junto comigo em todos esses anos, à vocês, minha eterna admiração e gratidão.

Ao orientador prof. Dr. Georg Sadowski, pelos ensinamentos e ajuda em decidir sobre meu futuro.

Ao co-orientador Ivan Delatim, pela excelente companhia no trabalho e enorme ajuda nos primeiros passos da carreira. Obrigado também à Intertechne e aos companheiros do trabalho.

Ao amigo e “co-co-orientador” Vinícius (Rebita), obrigado pelas revisões e parabéns pela disposição em transmitir o que sabe. E obrigado pelas inúmeras caronas<sup>1</sup>!

Agradeço aos professores do IGc, aqueles que realmente se importam com o ensino, por nos prepararem para o que vem pela frente.

A Geo Júnior, por me proporcionar inúmeros momentos divertidos e de muito aprendizado, e pela oportunidade de conhecer pessoas que, mesmo “não sendo do meu ano”, me ajudaram muito ao longo do curso. Obrigado Lucas (Sal), Pedro (Poha), Guilherme (Sol), Lucas (Marmota), Danilo (Gonzo), Victor (Pré), Giovanna (Fura), Diego (Pesca) e Katherine! Agradeço também aos mais novos, Lina (Pin), Lucas (Toskana) e Mayko (LCD). Desejo toda sorte nas suas carreiras!

Agradeço ao amigo Tiago Davi, também fruto da Geo Júnior, pela companhia sempre animada, principalmente no Morumbi, até nas noites gélidas e nos dias de temporal!

Aos amigos de república: Samuel, Diego, Finamor, Pedra Bela e Fernando, obrigado pela companhia! E aos amigos da turma 50, especialmente Mateus (Merendah), pelas intermináveis discussões futebolísticas, e Marcel (Sloty) pela parceria na correria do final do curso!

Obrigado ao grande amigo Glauco Fiaschi pela companhia desde o primário! Conte comigo para o que vier pela frente.

Lya, agradeço por estar comigo em todos os momentos desse curso, sempre disposta a me ajudar. Obrigado por tudo!

SÃO PAULO  
2011

<sup>1</sup>Carona: Condução ou transporte gratuito em qualquer veículo. (Michaelis, 2009) Viu, eram caronas sim!



## SUMÁRIO

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| RESUMO.....                                                              | 1  |
| ABSTRACT .....                                                           | 2  |
| 1. Introdução.....                                                       | 3  |
| 2. Objetivos.....                                                        | 3  |
| 3. Fundamentação Bibliográfica.....                                      | 3  |
| 3.1. Características gerais dos arenitos.....                            | 4  |
| 3.2. Características gerais das barragens.....                           | 6  |
| 3.2.1. Tipos de barragens.....                                           | 6  |
| 3.3. Problemas mais comuns dos arenitos na construção de barragens. .... | 7  |
| 3.3.1. Ruptura hidráulica .....                                          | 7  |
| 3.3.2. Erosão Superficial .....                                          | 8  |
| 3.3.3. <i>Piping</i> .....                                               | 9  |
| 3.3.4. Solubilidade .....                                                | 10 |
| 3.4. Soluções conhecidas.....                                            | 10 |
| 3.4.1. <i>Cut-off</i> .....                                              | 10 |
| 3.4.2. Filtros .....                                                     | 12 |
| 3.4.3. Mantas impermeabilizantes .....                                   | 14 |
| 3.4.4. Poços de alívio .....                                             | 15 |
| 3.5. Empreendimento estudado.....                                        | 16 |
| 3.5.1. Geologia e Geomorfologia Regional .....                           | 16 |
| 4. Materiais e métodos .....                                             | 20 |
| 4.1. Classificação dos testemunhos.....                                  | 20 |
| 4.2. Ensaio de perda d'água sob pressão.....                             | 21 |
| 4.3. Ensaio de resistência à compressão pontual.....                     | 23 |
| 4.4. Descrição Petrográfica .....                                        | 26 |
| 4.5. Perfil geológico e hidrogeológico .....                             | 26 |
| 4.6. Classificação geomecânica do maciço .....                           | 28 |
| 5. Desenvolvimento do trabalho.....                                      | 30 |
| 6. Resultados obtidos .....                                              | 32 |
| 6.1. Classificação dos testemunhos.....                                  | 32 |
| 6.2. Ensaio de perda d'água sob pressão.....                             | 33 |
| 6.3. Ensaio de resistência à compressão pontual.....                     | 36 |
| 6.4. Descrição petrográfica.....                                         | 38 |



|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| 6.5. Perfil geológico e hidrogeológico .....   | 40 |
| 6.6. Classificação geomecânica do maciço ..... | 40 |
| 7. Interpretação dos resultados.....           | 44 |
| 8. Conclusões.....                             | 48 |
| 9. Referências bibliográficas.....             | 49 |

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2: Tabela de classificação de PI (ASTM 1990).....                     | 20 |
| Tabela 3: Tabela de alteração e weathering (ASTM).....                       | 20 |
| Tabela 4: Tabela de permeabilidade e condutividade hidráulica (ASTM).....    | 21 |
| Tabela 5: Tabela de índice de compactação (ASTM).....                        | 21 |
| Tabela 6: Parâmetros utilizados na modelagem (ASTM).....                     | 21 |
| Tabela 7: Efeito da alteração das propriedades físicas (ASTM).....           | 21 |
| Tabela 8: Classificação das alterações físicas.....                          | 21 |
| Tabela 9: Classificação mecânica na região de armazenamento.....             | 21 |
| Tabela 10: Resposta dos materiais de teste água.....                         | 21 |
| Tabela 11: Resultados das análises de resistência à compressão por água..... | 21 |
| Tabela 12: Dados estatísticos dos resultados de teste água.....              | 21 |
| Tabela 13: Classificação geomecânica de barragem 200 - 100.....              | 41 |
| Tabela 14: Classificação geomecânica de barragem 200 - 100.....              | 42 |
| Tabela 15: Classificação geomecânica de barragem 200 - 100.....              | 43 |



## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Estratigrafia simplificada da bacia do rio Jubinha (Adaptado de Mapa geológico do Estado do Mato Grosso – CPRM, 2006)..... | 18 |
| Tabela 2: Grau de fraturamento e R.Q.D (ABGE).....                                                                                   | 20 |
| Tabela 3: Grau de alteração e coerência (ABGE).....                                                                                  | 20 |
| Tabela 4: Limites de permeabilidade e condutividade hidráulica (ABGE).....                                                           | 21 |
| Tabela 5: Classes de maciço (Bieniawski, 1989).....                                                                                  | 28 |
| Tabela 6: Parâmetros utilizados na classificação RMR (Bieniawski, 1989).....                                                         | 29 |
| Tabela 7: Efeito da orientação das descontinuidades (Bieniawski, 1989).....                                                          | 30 |
| Tabela 8: Cronograma das atividades desenvolvidas.....                                                                               | 31 |
| Tabela 9: Sondagens realizadas na região do empreendimento.....                                                                      | 32 |
| Tabela 10: Resultado dos ensaios de perda d'água.....                                                                                | 35 |
| Tabela 11: Resultados dos ensaios de resistência à compressão pontual.....                                                           | 36 |
| Tabela 12: Dados estatísticos das resistências calculadas.....                                                                       | 38 |
| Tabela 13: Classificação geomecânica da sondagem SM – 101.....                                                                       | 41 |
| Tabela 14: Classificação geomecânica da sondagem SM – 103.....                                                                       | 42 |
| Tabela 15: Classificação geomecânica da sondagem SM – 104.....                                                                       | 43 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Diagrama de classificação de rochas sedimentares (Pettijohn, 1987).....                             | 4  |
| Figura 2: Ruptura por levantamento (Vargas, 1977).....                                                        | 8  |
| Figura 3: Fluxo d'água resultante da aplicação do cut-off (Massad, 2003).....                                 | 11 |
| Figura 4: Esquema de barragem de terra com filtros.....                                                       | 13 |
| Figura 5: Esquema de barragem com manta impermeabilizante à montante (Massad, 2003).....                      | 14 |
| Figura 6: Ampliação do Mapa Geológico do Estado do Mato Grosso (Extraído de GeoBank – CPRM).....              | 17 |
| Figura 7: Comportamento das fissuras nos trechos ensaiados.....                                               | 22 |
| Figura 8: Gráfico F versus De (Extraído de ASTM, D – 5731, 2002).....                                         | 25 |
| Figura 9: Modelo de Log de sondagem utilizado.....                                                            | 22 |
| Figura 10: Gráfico de dispersão das resistências obtidas.....                                                 | 44 |
| Figura 11: Dispersão das amostras de acordo com sua coerência.....                                            | 45 |
| Figura 12: Resistência das amostras C3 com destaque para o intervalo esperado pela escala da ABGE (1983)..... | 46 |



## ÍNDICE DE FOTOS

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Foto 1: Escavação para instalação do cut-off.....                                | 11 |
| Foto 2: Aplicação dos filtros em barragem de solo compactado.....                | 14 |
| Foto 3: Poços de alívio instalados.....                                          | 15 |
| Foto 4: Testemunhos ensaiados.....                                               | 23 |
| Foto 5: Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão pontual..... | 24 |
| Foto 6: Aspecto geral dos testemunhos na região do empreendimento.....           | 33 |
| Foto 7: Testemunho de arenito fino C2, F2 e permeabilidade H2.....               | 34 |
| Foto 8: Testemunho de arenito fino C4, F4 e permeabilidade H5.....               | 34 |
| Foto 9: Amostras ensaiadas.....                                                  | 37 |
| Foto 10: Aspecto geral da lâmina SM-104-B (nicóis paralelos).....                | 39 |
| Foto 11: Aspecto geral da lâmina SM-104-B (nicóis cruzados).....                 | 39 |



## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo 1: Imagem aérea com esquema do arranjo geral da barragem.

Anexo 2: Fotos dos testemunhos da SM – 101.

Anexo 3: Fotos dos testemunhos da SM – 103.

Anexo 4: Fotos dos testemunhos da SM – 104.

Anexo 5: Mapa topográfico com arranjo geral da barragem, localização das sondagens e perfis.

Anexo 6 :Gráficos de carga efetiva (ordenadas) versus vazão específica (abscissas).

Anexo 7: Perfil geológico do eixo da barragem.

Anexo 8: Perfil hidrogeológico do eixo da barragem.



## RESUMO

Algumas peculiaridades geológicas dos arenitos tendem a aumentar o nível de risco geológico quando da instalação de centrais hidrelétricas e barragens em seus terrenos.

A falta da devida compreensão das características do maciço pode acarretar na necessidade de se fazer tratamentos complexos, que podem inviabilizar a obra, fazendo com que estes terrenos sejam evitados. Isto pode induzir a um "desperdício" de áreas com potencial hídrico razoável, que não seriam aproveitadas pela insegurança em se trabalhar neste tipo de rocha.

Este trabalho foi desenvolvido no sentido de colaborar com a caracterização geológico-geotécnica de tais formações, de modo a reunir informações sobre os problemas mormente encontrados durante a construção de obras civis locadas sobre este tipo de rocha (com especial atenção em barragens). Utilizaram-se aqui, como exemplo de aplicação prática, os trabalhos realizados no desenvolvimento do projeto básico de construção de uma Pequena Central Hidrelétrica (P.C.H.) no Estado do Mato Grosso.

São ilustradas as características gerais do arenito da área do empreendimento através de descrições macro e microscópicas, e de ensaios realizados *in situ* e em laboratório.

Pelo que tem indicado a análise das características de permeabilidade e de resistência do maciço, o arenito estudado apresenta características razoáveis para a instalação da barragem, desde que tomadas as precauções relativas à potencial ocorrência de *piping* e demais problemas decorrentes da tendência a desagregabilidade do arenito.



## ABSTRACT

Some peculiarities of the geological sandstones tend to increase the level of geological risk as the installation of hydroelectric plants and dams on their terrain.

The lack of proper understanding of the characteristics of the mass may lead to the need to do complex treatments, which can make impracticable the construction, making these terrain avoided. This can lead to a "waste" of areas with reasonable hidric potential, which would not be used due to insecurity of working in this type of rock.

This monography was developed to contribute with the geological and geotechnical characterization of such formations in order to gather information on problems encountered especially during the construction of civil works in this type of rock (with special attention to dams). It was used here as an example of practical application, the work done in developing the basic design of building a small hydroelectric plant (SHP) in the State of Mato Grosso.

Are illustrated the general characteristics of the sandstone of the project area through macro-and microscopic descriptions, and in situ tests and laboratory.

From what has indicated the analysis of the characteristics of permeability and resistance of the massive, the sandstone has features reasonable for the installation of the dam as long as precautions are taken regarding potential occurrence of piping and other problems arising from the tendency to disaggregate of the sandstone.



## **1. Introdução**

Há exemplos conhecidos em que a construção sobre arenitos tem causado aumento de custos de tratamentos de fundações de grandes proporções além de acidentes. Aumentos de custos tem sido notórios em barragens em arenitos no Brasil e na América do Sul como um todo. Acidentes como o rompimento da P.C.H. (pequena central hidrelétrica) Apertadinho, situada em Rondônia ou em vertedouro de barragem sobre arenitos paleozóicos no Rio Grande do Sul são exemplos mais recentes dos problemas associados a estes empreendimentos. Com o aumento de construções de barragens em terrenos areníticos no Norte do país (barragens de Rondon II, Colider, Estreito, diques em Belo Monte etc.), torna-se praticamente obrigatório sistematizar o conhecimento geológico prático destas formações.

No Brasil não são muitos os trabalhos que exploram essas peculiaridades e suas conseqüências na aplicação deste tipo de maciço em obras civis de grande porte.

Com o crescimento e desenvolvimento do país, tem aumentado cada vez mais a demanda por energia, fazendo com que não seja mais possível evitar a construção de barragens nestes terrenos; principalmente em se tratando de um país com quase cinquenta por cento do território coberto por bacias sedimentares preenchidas pelas chamadas "rochas brandas" e que possuem rios com enormes potências hidrelétricas.

## **2. Objetivos**

Este trabalho visa reunir alguns dos problemas mais comuns que são encontrados em barragens construídas sobre arenitos. Suas conseqüências e causas também são abordadas. Além disso, o trabalho toma como exemplo uma Pequena Central Hidroelétrica (P.C.H.) em fase inicial de construção, com o objetivo de apresentar, em termos práticos, as características do arenito da área do empreendimento.

## **3. Fundamentação Bibliográfica**

A nível nacional são raros os trabalhos publicados que mencionam a construção de barragens especificamente sobre arenitos. Isto se deve, em parte, ao fato de que nestes empreendimentos estas rochas têm sido costumeiramente agrupadas de acordo com suas propriedades geotécnicas em permeio às "rochas brandas" (ABGE, 1983).



É bastante complicado, entretanto, agrupar os arenitos quanto às suas características geotécnicas, visto que os arenitos podem ser extremamente heterogêneos, com origem e cimentação muito variadas entre si; tais fatores influenciam diretamente nas características de resistência da rocha (Sadowski, 2004).

### 3.1. Características gerais dos arenitos

A figura 1, abaixo, extraída de Pettijohn (1987), mostra que arenitos são rochas sedimentares com até 15% de matriz e geralmente classificadas de acordo com suas porcentagens de quartzo, feldspato e fragmentos líticos.

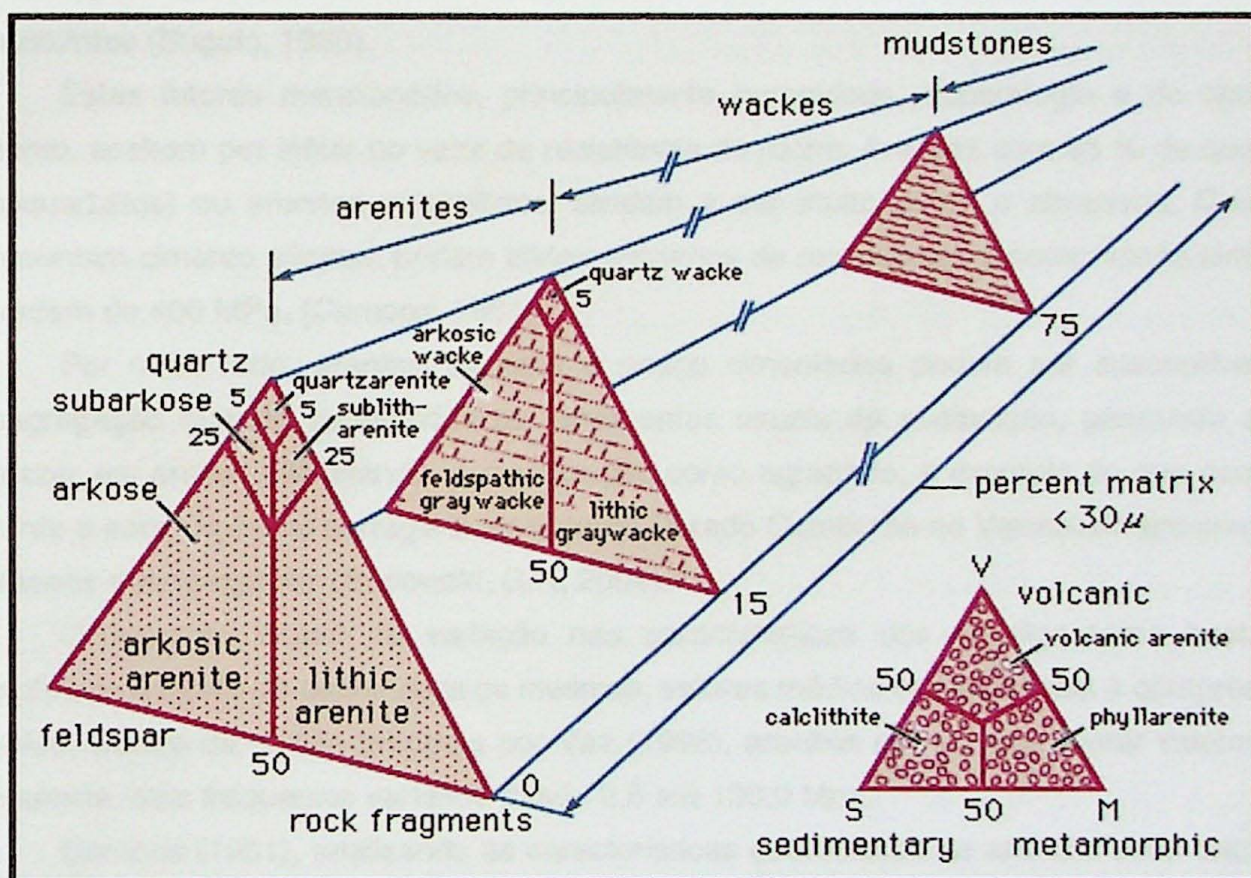


Figura 1 - Diagrama de classificação de rochas sedimentares (Pettijohn, 1987)

Entretanto, os arenitos podem apresentar propriedades muito distintas também controladas por seus aspectos texturais como granulometria, esfericidade e arredondamento dos grãos, imbricamento de grãos e tipo de cimentação, além da mineralogia. O nível de diagênese é fundamental para determinar as propriedades dos maciços.

Na natureza o grau de imbricamento, esfericidade e arredondamento dos grãos e a granulometria do conjunto controlam a quantidade e volume dos vazios entre os mesmos, traduzido pela sua porosidade que corresponderia ao volume de vazios perante o volume total do meio. Tais vazios podem ser preenchidos por fluidos ou, então, por agente



cimentício. Para uma dada granulometria, a disposição de grãos esféricos entre si pode, por si só, determinar a porosidade. De um empacotamento cúbico para um octaédrico os movimentos intergranulares associados à compactação podem influir diretamente na porosidade, que pode variar, para grãos de mesmo diâmetro, de 47,65% para 25,95% (Sadowski, G.R, 2004).

Uma das propriedades geotécnicas importantes vinculada à porosidade é a permeabilidade da rocha. Esta característica depende não somente da quantidade e do tamanho dos poros, mas também da conexão entre eles. Seria, em termos genéricos, a característica definida como a propriedade da rocha em permitir a passagem de fluidos sem se deformar estruturalmente ou ocasionar o deslocamento relativo de suas partes constituintes (Suguio, 1980).

Estes fatores mencionados, principalmente porosidade, mineralogia e do tipo de cimento, acabam por influir no valor de resistência da rocha. Arenitos com 95 % de quartzo (ortoquartzitos) ou arenitos quartzíticos, tendem a ser muito duros e abrasivos. Quando apresentam cimento silicoso, podem atingir extremos de resistências à compressão simples da ordem de 400 MPa. (Campos, 1981)

Por outro lado, arenitos porosos e pouco cimentados podem ser susceptíveis à desagregação quando submetidos às ferramentas usuais de escavação, passando a se desfazer em areias, dificultando sua utilização como agregado, a exemplo do que ocorreu durante a construção de barragens do sistema Dorado Camburito na Venezuela em arenitos cretáceos desagregáveis (Sadowski, G.R, 2004).

O espectro amplo de variação nas características dos arenitos torna bastante complicada a tarefa de definir para os mesmos, valores médios de resistência à compressão simples. Dentro da escala proposta por Vaz (1996), arenitos podem apresentar valores de resistência mais frequentes variando desde 0,5 até 130,0 Mpa.

Campos (1981), analisando as características geotécnicas de arenitos ditos brandos como o arenito Caiuá, determinou valores de resistência entre 5,4 e 24,0 Mpa, portanto classificáveis como rochas muito brandas a bandas dentro do espectro apresentado por Vaz (1996) e pela International Society of Rock Mechanics (ISRM) (Hawkins, 1998).

No caso das formações de rochas areníticas como um todo, ou de maciços sedimentares contendo associações de epiclásticas com arenitos como turbiditos, diamictitos, lamitos e aglomerados de tilito, ou de formações ciclômicas (com alterações mais ou menos cíclicas de estratos) como flisch e molassas, a classificação geomecânica de maciços pelo Geological Strength Index (GSI), já apresenta abordagens bem específicas, (Marinos e Hoek, 2001).



### **3.2. Características gerais das barragens**

As barragens são construções necessárias à humanidade há muito tempo. Em seu livro "Obras de terra", Faïçal Massad cita uma barragem de 12 m de altura, localizada no Egito, como um dos registros mais antigos deste tipo de construção, datando de aproximadamente 6.800 anos atrás.

Por definição, barragem é uma estrutura natural ou artificial que retém ou barra a água de vales. Quando construída pelo homem, tem o objetivo de formar reservatórios que acumulem água temporariamente. Este acúmulo de água pode ter diversas finalidades, tais como: abastecimento de água, geração de energia, retenção de rejeitos, entre outras.

São diversas as estruturas que compõem uma barragem, mas, em geral, as etapas de sua construção costumam envolver alguns passos básicos. Para poder construir no local do leito do rio geralmente cabe desviá-lo através de ensecadeiras. A de montante para permitir o desvio e barramento temporário do rio e a de jusante para permitir o seu refluxo após o desvio. Com a construção do corpo da barragem com os seus anexos segue-se o enchimento do reservatório. Estruturas conexas, como sistema adutor, circuito de geração em hidroelétricas, vertedouro (que tem função de dar vazão às águas excedentes do reservatório) e diversas outras, também fazem parte do conjunto.

Nesta monografia, são descritas algumas características de uma barragem em fase inicial de construção. Trata-se aqui de uma barragem que visa o aproveitamento da água represada para a geração de energia elétrica e se enquadra na definição de Pequena Central Hidrelétrica (P.C.H.). São consideradas P.C.H.'s, de acordo com resolução de 1998 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), aqueles empreendimentos hidrelétricos com potência de geração superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, cuja área total de reservatório seja igual ou inferior a 3,0 km<sup>2</sup>.

#### **3.2.1. Tipos de barragens**

Existem, basicamente, quatro tipos fundamentais de barragem: barragem de gravidade, barragens de gravidade aliviada, barragem em arco e barragens de terra e de enrocamento. (De Mello e Teixeira, 1960).

Quanto ao material utilizado na sua construção, há quatro tipos principais: barragens de terra; barragens de enrocamento, barragens de concreto e barragens de terra e enrocamento.

Com estruturas relativamente rígidas, as barragens de concreto requerem fundações em rocha, por exigirem do terreno muito mais capacidade de suporte. As barragens de concreto podem ser de gravidade, sendo estas as mais utilizadas, onde sua estrutura é suportada pelo seu próprio peso. Podem ser também de contrafortes, ou em arco.



Já as barragens de terra toleram fundações mais deformáveis. Segundo Vallejo, L. *et. al.* (2002), seu método de construção consiste basicamente na compactação de materiais soltos, sendo que são aceitáveis diversos materiais, exceto os que se alteram com facilidade, dissolvem ou apresentam grandes modificações nas suas características quando expostas (argilas expansivas, por exemplo).

A escolha do tipo de barragem ideal para determinada situação é produto da ponderação de diversos fatores e, entre eles, tem destacada importância a característica da rocha que receberá suas fundações.

### **3.3. Problemas mais comuns dos arenitos na construção de barragens.**

Além das características mecânicas da rocha, outro fator que merece atenção em projetos de engenharia, especialmente em barragens, é a interação entre a rocha e a água. É partir desta interação que surgem os problemas mais comumente enfrentados em barragens, que serão descritos a seguir.

Quando tratamos de barragens fundadas sobre arenitos, a possibilidade de ocorrência destes problemas passa a ser muito maior. Diferentemente de rochas ígneas, por exemplo, os arenitos possuem características muito particulares, vinculadas a sua cimentação, granulometria, porosidade e imbricamento dos grãos. Tais características influenciam diretamente em sua porosidade, permeabilidade, desagregabilidade, entre outras características citadas no item 2.1.

#### **3.3.1. Ruptura hidráulica**

O conceito de ruptura hidráulica geralmente envolve a perda de resistência e estabilidade do solo por efeito das pressões de percolação d'água. Isto reforça também a importância da classificação dos arenitos segundo seu grau de coerência, visto que os arenitos de baixa coerência podem ter um comportamento semelhante ao do solo quando interagem com a água.

Segundo Mello e Teixeira (1960), Vargas (1977) entre outros, pode-se discutir a ocorrência deste fenômeno analisando o conceito de gradiente crítico para produzir liquefação de areias ou areias movediças. Este gradiente hidráulico crítico se estabelece no momento em que os solos granulares são sujeitos a grandezas de fluxo com gradientes correspondentes ao seu peso específico submerso ou então, mais genericamente, superiores a 1. Além de ruptura hidráulica das escavações podem ocorrer fenômenos de *piping* ou entubamento com carreamento de finos ao longo de canais de fluxo localizados. Na maioria das barragens, são instaladas estruturas que permitam diminuir tais gradientes



com o objetivo de aumentar o percurso d'água nas fundações diminuindo seus gradientes de saída (que tendem a ser altos devido à diferença de carga hidráulica que a barragem causa). Outras soluções contemplam a instalação de filtros que evitem o carreamento das partículas mais finas por entre os poros das partículas mais grosseiras (Mello e Teixeira, 1960). No caso de instalação de septos ou pranchadas o caminho de percolação é estendido como sugerido na figura 2. Como se observa, o fluxo resultante à jusante da barragem é praticamente vertical, e para cima. Esta subpressão próxima ao pé do talude de jusante causa um tipo de ruptura hidráulica, denominada "ruptura por levantamento" ou "levitação".

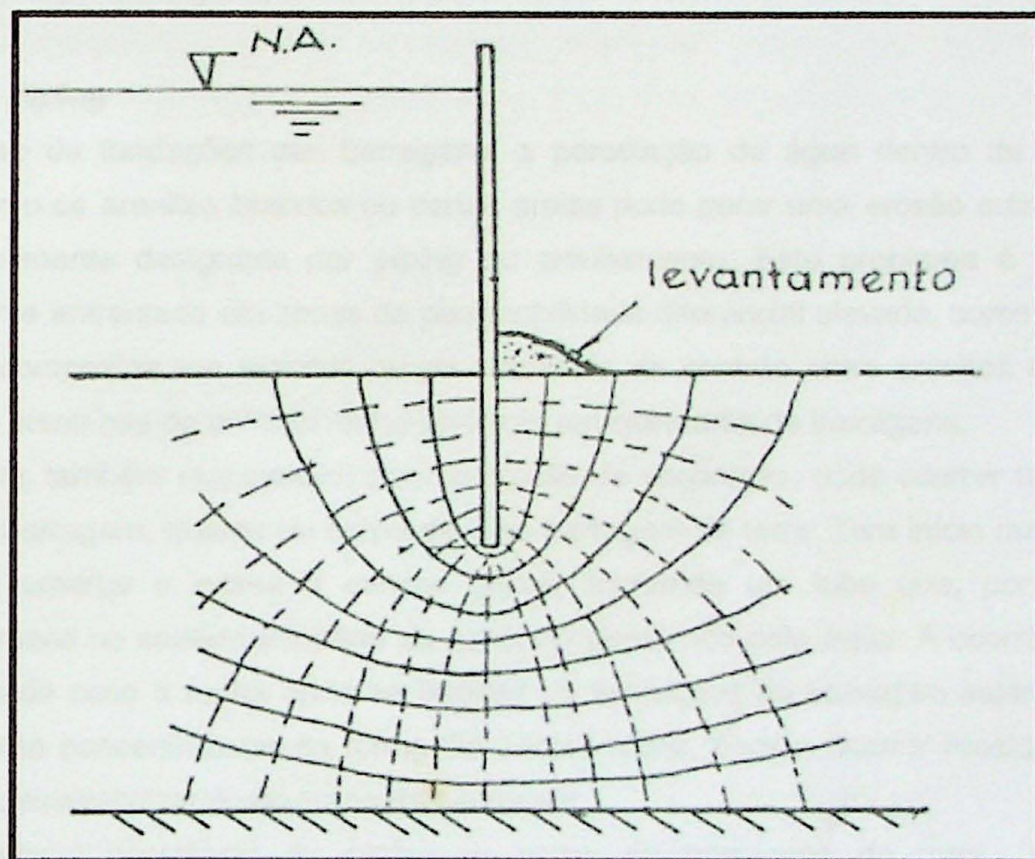


Figura 2 - Ruptura por levantamento (Vargas, 1977)

A ruptura por levantamento ocorre quando o fluxo de água ascendente anula a força peso atuante no material, diminuindo a tensão entre os grãos e sua resistência interna, o que resulta num levantamento do terreno, ou formação de areia movediça (Sousa Pinto, 2000)

### 3.3.2. Erosão Superficial

A erosão superficial é resultado do arranque e arrasto de grãos de solo pela pressão trativa ou de percolação de uma lâmina d'água (Vargas, 1977). Nas barragens, tanto os taludes naturais das ombreiras, quanto os taludes de jusante e montante, são protegidos



para evitar este carreamento. Dentre outros fatores, pode-se destacar medidas de proteção contra a erosão por plantio de gramas ou a compactação do solo no caso do corpo da barragem para a prevenção da ocorrência deste fenômeno. A condição de compactação influi diretamente na resistência ao arrasto viscoso ou à erosão, isto é, a resistência acima da qual se inicia a erosão quando o solo é submetido a um esforço de cisalhamento superficial trativo pela água que escoar em sua superfície.

Este esforço pode ser causado pela água da chuva nos taludes de montante e jusante, e pelas ondas que são geradas pela ação do vento nos reservatórios e quebram-se no talude de montante. A implantação de uma camada de enrocamento (normalmente denominada *rip rap*) é, em geral, suficiente para impedir a erosão do talude.

### 3.3.3. *Piping*

No caso de fundações das barragens, a percolação de água dentro de litotipos granulares como os arenitos brandos ou certas areias pode gerar uma erosão subterrânea seletiva normalmente designada por *piping* ou entubamento. Este problema é também corriqueiramente enfrentado em zonas de permeabilidade diferencial elevada, como fraturas com faces decompostas em arenitos ou na superfície de contato entre arenitos e outras camadas bem como nas de contato rocha-concreto em estruturas de barragens.

O *piping*, também responsável pela formação de voçorocas, pode ocorrer tanto nas fundações da barragem, quanto no corpo de uma barragem de terra. Tem início num ponto onde a água emerge e passa a carrear grãos, formando um tubo que, por erosão remontante, cresce no sentido contrário ao caminho percorrido pela água. A ocorrência de *piping* é facilitada caso a rocha onde se apóiam as fundações da barragem sejam pouco coerentes. Como consequências da formação destes tubos, podem ocorrer recalques nas fundações ou desestabilização do corpo da barragem.

A potencial ocorrência de *piping* no corpo de barragens de terra ou solo compactado é uma preocupação muito antiga como se observa na maioria dos livros de mecânica de solos que tratam de percolação.. Mesmo nas situações em que se alcança o grau ótimo de compactação dos taludes de montante da barragem, instala-se uma rede de fluxo no interior do barramento e nas suas ombreiras. No corpo dos barramentos costuma-se controlá-la através da adição de filtros e drenos (discutida no item 3.4.2). A situação torna-se crítica a partir do momento em que, pela ausência ou colmatação dos filtros ou mau funcionamento dos drenos, a percolação ocorre descontroladamente no interior da barragem chegando a emergir de forma significativa no talude de jusante ou pé do barramento, o que dá início ao processo de *piping*. No caso de as ombreiras serem em arenito brando ou solos arenosos tal preocupação se estende para as mesmas e mesmo para sua fundação.



### **3.3.4. Solubilidade**

A solubilidade do cimento da rocha é também um problema muito comum, decorrente interação da rocha com a água. Entende-se por cimento da rocha algum aglomerante que pode ser uma substância química diferenciada e pó vezes solúvel que une seus grãos.

A situação crítica ocorre quando a percolação da água no interior do maciço começa a dissolver o cimento, fazendo com que a rocha se desagregue em grãos de areia soltos,. O resultado disso é a perda da coerência do maciço e, conseqüentemente, da sua resistência e estanqueidade. Um dos casos mais críticos talvez seja o do carbonato de cálcio que apresenta grande solubilidade em meio ácido.

Fato semelhante pode ocorrer com a matriz da rocha. Em muitos casos, principalmente em rochas de matriz fina, a água pode atuar de modo a carrear os grãos finos da matriz, desagregando a rocha.

### **3.4. Soluções conhecidas**

Quando se trabalha com arenitos, especialmente na construção de barragens, o tratamento das fundações consiste, em geral, no controle da percolação d'água. Características como capacidade de suporte e compressibilidade da rocha dificilmente são alteradas (Massad, 2003) a não ser em arenitos muito porosos e friáveis, onde pode inclusive ocorrer colapso.

Sendo assim, para reduzir as infiltrações pelas fundações e suas conseqüências, pode-se partir de dois princípios básicos: Reduzir a permeabilidade das fundações ou aumentar o caminho da percolação. Os problemas abordados referem-se principalmente a casos em que a permeabilidade do solo compactado da barragem é bem menor que o da fundação (situação muito comum na construção sobre arenitos).

#### **3.4.1. *Cut-off***

O *Cutt-off* é uma trincheira escavada no solo da fundação e preenchida com solo compactado, prolongando o núcleo da barragem para baixo, com o objetivo de aumentar o caminho de percolação da água. Esta trincheira deve ser escavada até a profundidade da rocha sã, para que tenha uma eficiência significativa. A figura 3 mostra um esquema de uma barragem com *cut-off* instalado e o fluxo d'água resultante. A foto 1 mostra a escavação em solo para a instalação de um *cut-off*.



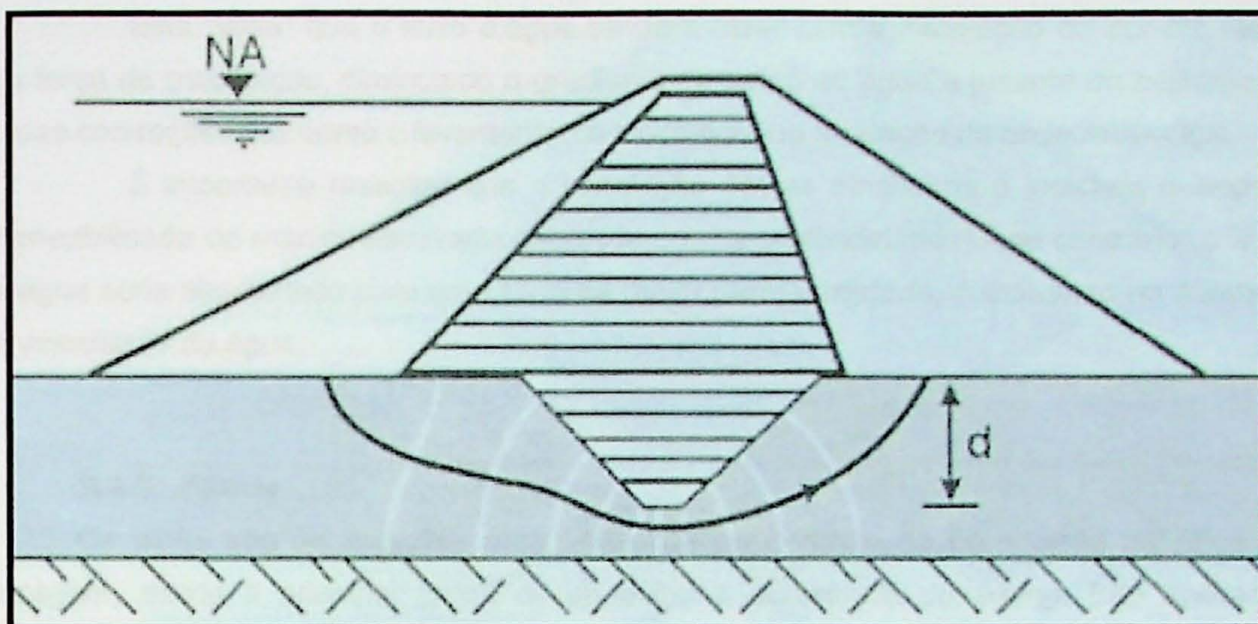


Figura 3 - Fluxo d'água resultante da aplicação do *cut-off* (Massad, 2003)



Foto 1 - Escavação para instalação do *cut-off*



Esta "volta" que o fluxo d'água tende a fazer com a instalação do *cut-off*, reduz sua força de percolação, diminuindo o gradiente de saída da água a jusante do barramento e suas consequências como o levantamento hidráulico, ou formação de areia movediça.

É importante ressaltar que a instalação destas trincheiras é indicada quando a permeabilidade do maciço escavado decresce com a profundidade; Caso contrário, o fluxo da água seria direcionado para uma zona de maior permeabilidade, culminando no aumento da velocidade da água.

### 3.4.2. Filtros

Os filtros são as soluções mais utilizadas no controle da percolação da água na barragem, sendo a principal forma de se evitar a ocorrência do *piping*. São aplicados sempre que houver transição entre camadas de solo muito diferentes e percolação de água (Pinto, 2006).

Analisando as causas que levam ao *piping*, pode-se dizer que, para evitá-lo, deve-se cuidar para que não haja carreamento de partículas de solo na passagem do fluxo d'água de um meio (solo a ser protegido) para outro (filtro) (Massad, 2003).

Assim, é necessário que os solos erodíveis sejam impedidos de ter superfícies de saída de água expostas ao ar, ou em contato com sólido poroso ou com aberturas que permitam a passagem dos seus grãos. Portanto, qualquer superfície com essas características deverá ser recoberta com uma camada filtrante (geralmente areia) que sirva a essa finalidade, deixando passar a água, mas impedindo a passagem dos grãos de solo. (Mello e Teixeira, 1960).

É neste princípio que se baseia o Critério de filtros de Terzaghi, que estabelece duas condições a que os filtros devem satisfazer. Sendo elas:

$$1. D_{15} (\text{Filtro}) > 5 \cdot D_{15} (\text{Fundação})$$

Esta expressão corresponde a dizer que os menores poros do filtro devem ser, pelo menos, cinco vezes maiores que os menores poros do solo. Esta condição indica que o filtro deve ser mais permeável que o solo, para garantir a passagem da água através dele (filtro).

$$2. D_{15} (\text{Filtro}) > 5 \cdot D_{85} (\text{Fundação})$$

O que significa dizer que os diâmetros dos menores poros do filtro (que se admite correspondentes aos diâmetros máximos de 15% dos grãos do filtro) não devem ser maiores que cinco vezes os diâmetros máximos de 85% dos grãos do solo.

Além dessas condições, os filtros também devem ser pesados o suficiente para não serem eles próprios carreados pelas forças de percolação, e darem início ao processo de *piping*, para isso, normalmente se coloca uma camada de enrocamento sobre a areia



principalmente com a função de manter a estabilidade, mas para isso também se deve respeitar os critérios de filtro descritos. É então colocada uma camada de transição (com granulometria intermediária) entre as areias e o enrocamento (tal como uma camada de brita).

Em barragens, os filtros podem ser aplicados na horizontal ou na vertical, quando são usados como interceptadores do fluxo e fazem parte do sistema de drenagem interna da barragem. A figura 4 mostra o perfil de uma barragem com filtro vertical e horizontal.

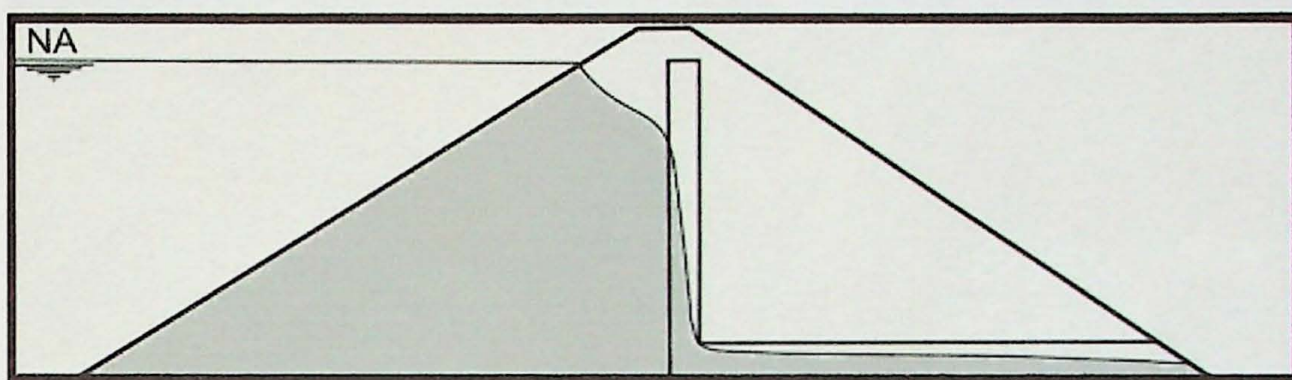


Figura 4 - Esquema de barragem de terra com filtros

A foto 2, tirada durante a construção de uma barragem, mostra uma das ombreiras pronta, já com o filtro arenoso instalado (canto direito superior da foto 2). Também é possível observar, no centro da foto 2, a instalação do filtro horizontal na base da ombreira, do tipo "sanduíche", onde há intercalação de areia e brita ou pedregulho.





Foto 2 - Aplicação dos filtros em barragem de solo compactado

### 3.4.3. Mantas impermeabilizantes

As mantas, ou tapetes, são um prolongamento da barragem para montante, conforme figura abaixo (figura 5). Também tem objetivo de aumentar o caminho da percolação e são de material impermeável geralmente são de materiais plásticos e vem sendo cada vez mais aperfeiçoadas. O principal inconveniente é a possibilidade de ruptura por punção.

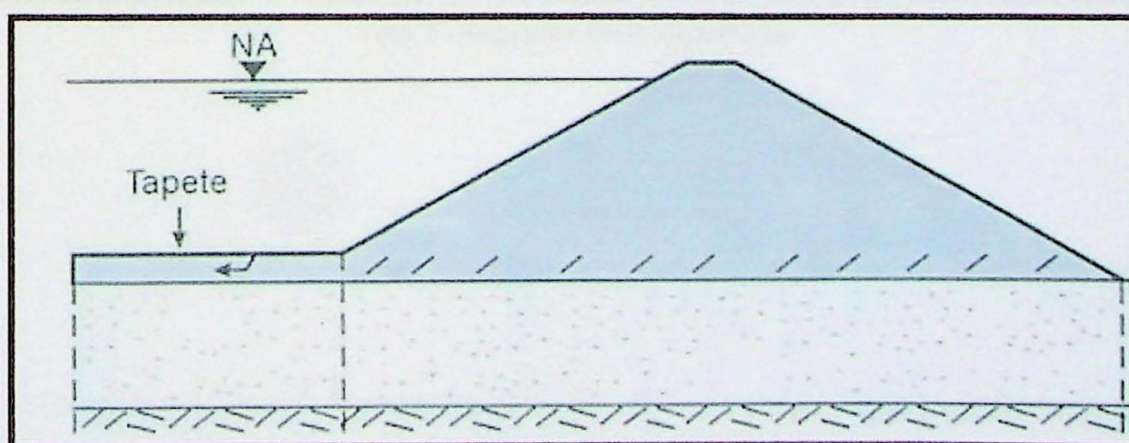


Figura 5 - Esquema de barragem com manta impermeabilizante à montante (Massad, 2003)



#### **3.4.4. Poços de alívio**

Esta é uma solução também bastante utilizada no controle da saída d'água a jusante da barragem. Como descrito, o fluxo de água ascendente pode causar levantamentos hidráulicos ou formar areias movediças no pé do talude de jusante da barragem.

Consiste na implantação de poços que são abertos e preenchidos com material granular mais permeável que o solo de fundação. Assim como os filtros, este trecho mais permeável intercepta o fluxo d'água, que segue pelos poços, através dos quais a água é retirada de maneira controlada. A foto 3 mostra os poços instalados, próximos ao talude de jusante da barragem.



**Foto 3 - Poços de alívio instalados**



### **3.5. Empreendimento estudado**

O arranjo concebido para o Projeto Básico Consolidado do empreendimento é constituído por uma barragem homogênea de terra. O comprimento total da crista é de aproximadamente 1400,00 m e altura máxima de aproximadamente 14,00 m, sendo classificada como uma barragem de pequeno porte (Anexo 1).

O barramento consiste em uma barragem homogênea de terra em ambas as margens do rio Jubinha. A barragem da margem direita avança sobre o leito do rio, ligando-se com as estruturas de concreto (desvio do rio, Vertedouro e Tomada de água).

O desvio do rio será realizado em duas fases: na primeira, serão construídas as obras em ambas as ombreiras, a barragem da margem esquerda, o circuito de geração, o vertedouro com vão rebaixado para desvio do rio e parte da barragem da margem direita. A proteção das estruturas da margem esquerda se dará através de uma ensecadeira de primeira fase. Na segunda fase, após o desvio do rio, quando o fluxo estiver passando pela soleira rebaixada localizada na direita hidráulica do Vertedouro, serão construídas duas ensecadeiras de 2ª fase para proteger a construção da barragem no leito do rio.

O anexo 1 é uma imagem retirada do *Google Earth®*, sobre a qual está inserido o esquema do arranjo geral da barragem.

#### **3.5.1. Geologia e Geomorfologia Regional**

O empreendimento localiza-se no estado do Mato Grosso, no rio Jubinha, afluente do Rio Juba.

O mapa a seguir (figura 6) é uma ampliação do mapa geológico do Estado do Mato Grosso, em escala 1:1.000.000 (CPRM, 2006) centralizado nos arredores do local do empreendimento. Devido a forças contratuais foram retiradas as referências geográficas, pois não poderão ser incluídos neste trabalho maiores detalhes da disposição do empreendimento.



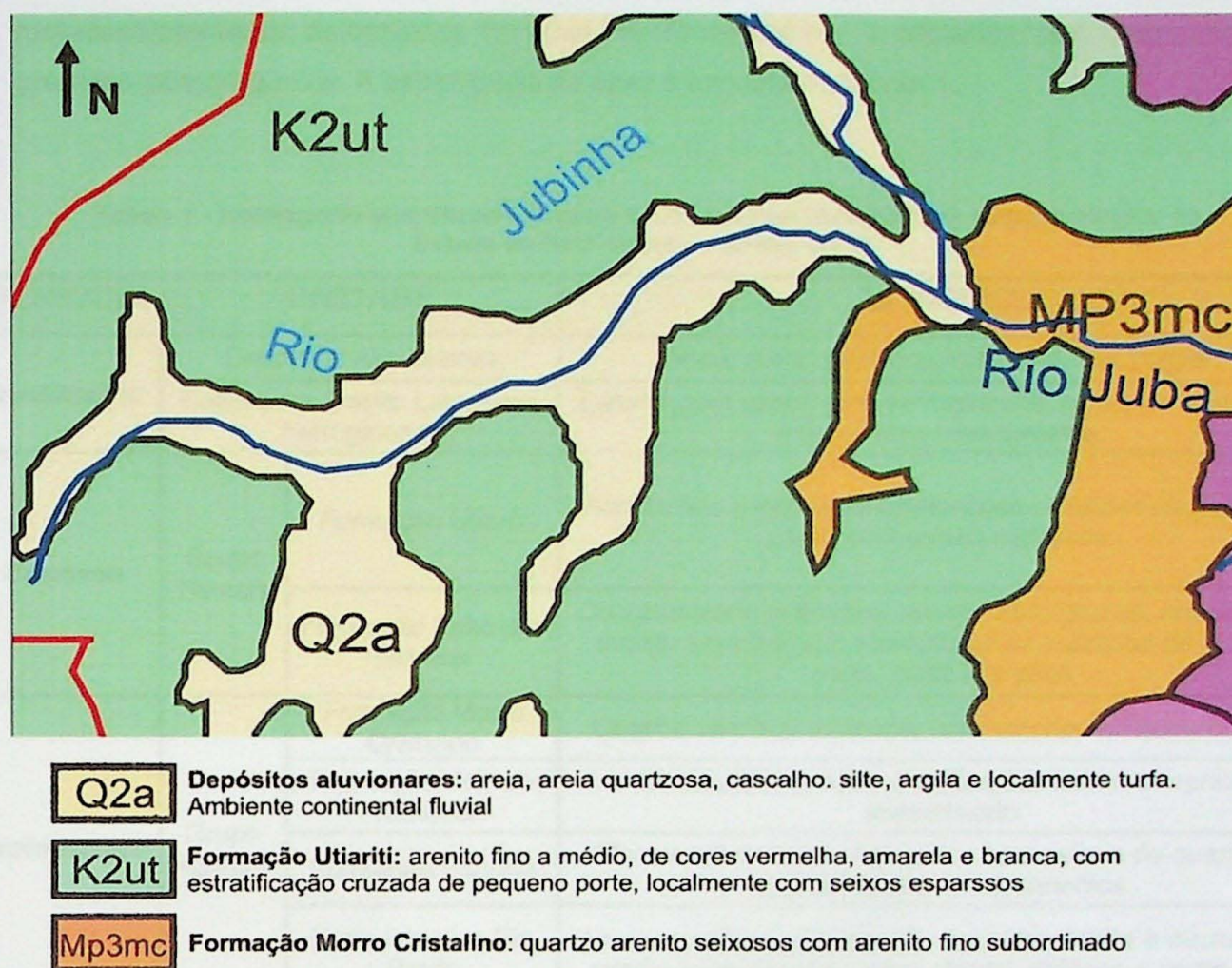


Figura 6 – Ampliação do Mapa Geológico do Estado do Mato Grosso (Extraído de GeoBank – CPRM)

De acordo com o projeto RADAMBRASIL, Volume 26, Folha SD.21 Cuiabá (1982a e 1982b), a bacia hidrográfica rio Jubinha está completamente inserida na unidade geomorfológica denominada Planalto ou Chapada dos Parecis.

Este planalto apresenta um topo de relevo suave ondulado a plano geralmente desprovido de afloramentos rochosos, constituído por areias, provenientes da decomposição de rochas subjacentes.

Os rios apresentam controle estrutural, estando encaixados em alinhamentos tectônicos. No leito dos rios é comum a ocorrência de lajeados aflorantes, formando corredeiras e quedas, ou entalhes em pequenos *canyons*. Nas porções onde o relevo é mais plano, principalmente em planícies aluviais, o rio apresenta-se meandrante, com meandros abandonados.

A Bacia Sedimentar dos Parecis recobre as formações da Província Tocantins - Faixa Alto Paraguai e do Cráton Amazonas. A Faixa Alto Paraguai é constituída por rochas



metassedimentares deformadas no final do Proterozóico, e afetadas por magmatismo granítico pós-orogênico. A estratigrafia da área é exposta na tabela 1.

**Tabela 1 - Estratigrafia simplificada da bacia do rio Jubinha (Adaptado de Mapa geológico do Estado do Mato Grosso – CPRM, 2006).**

| PERÍODO             | UNIDADE                                     |                            | LITOTIPO                                                                                                                                      |
|---------------------|---------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Quaternário</b>  | Depósitos Aluvionares                       |                            | Areia, areia quartzosa, cascalho, silte, argila.                                                                                              |
|                     | Coberturas Detrito Lateríticas Ferruginosas |                            | Laterita com concreções ferruginosas, níveis de cascalhos e horizontes mosqueados.                                                            |
| <b>Cretáceo</b>     | Grupo Parecis                               | Formação Utariti           | Arenito fino a médio, estratificações cruzadas de pequeno porte, com seixos esparsos.                                                         |
|                     |                                             | Formação Salto das Nuvens  | Conglomerado polimítico, arenito lítico grosso, arenito fino, arenito bimodal com estratificações cruzadas de grande porte, pelito e argilito |
| <b>Proterozóico</b> | Grupo Aguapeí                               | Formação Morro Cristalino  | Quartzo arenitos seixosos, com arenito fino subordinado                                                                                       |
|                     |                                             | Formação Vale da Promissão | Metassiltito, ardósia e metargilito com metarenito subordinado                                                                                |
|                     |                                             | Formação Fortuna           | Metaconglomerado oligomítico com seixos de quartzo e quartzitos em matriz sericítica                                                          |
|                     |                                             | Suíte Intrusiva Rio Pardo  | Monzogranito e sienogranito, quartzo-sienito e microclínio sienito subordinados, raros diques aplíticos e pegmatitos                          |

Na área da bacia ocorrem poucas unidades estratigráficas em superfície. A mais antiga, de idade proterozóica é a Formação Morro Cristalino, pertencente ao Grupo Aguapeí. Tem como principais litotipos metarenitos de cores rósea, branca e cinza claro, granulação média a grosseira e fina a média, com níveis conglomeráticos e freqüentes intercalações de metaconglomerados e finos leitos de siltitos avermelhados

Em contato discordante com a Formação Morro Cristalino, a Formação Utariti de idade cretácea, é a unidade de topo do Grupo Parecis. Sendo esta a unidade predominante na bacia do rio Jubinha. O pacote sedimentar é quase todo constituído por sedimentos arenosos, de cores variegadas - branca, amarela, roxa e avermelhada, depositados em bancos maciços e espessos. Localmente apresentam estratificações cruzadas de pequeno porte de composição essencialmente quartzosa e feldspática. Devido à falta de matriz ou cimento o poder de desagregação destas rochas é muito grande, razão pela qual formam espessos solos arenosos e voçorocas profundas, o que muito caracteriza os chapadões do Planalto Parecis. Outras vezes, os arenitos apresentam-se bastante endurecidos e compactados, por silicificação em zonas de falhas, assumindo aspecto de quartzitos.



O contato superior das rochas da Formação Utiriti é transicional para os horizontes superiores compostos por coberturas lateríticas.

Os depósitos aluvionares encontram-se ainda em fase de deposição ao longo das calhas e beiras dos grandes rios e seus tributários. As planícies de inundação tendem a ser estreitas e largas devido ao controle estrutural dado às drenagens. Os aluviões são compostos de areias, siltes, argilas e cascalhos, nos quais são reconhecidos depósitos de canal, barras em pontal e transbordamento. Possuem pequena espessura, não atingindo 10 m.

| Formação Utiriti |                 |
|------------------|-----------------|
| 1. Arenito       | 2. Argila       |
| 3. Silte         | 4. Cascalho     |
| 5. Areia         | 6. Lodo         |
| 7. Siltão        | 8. Argilão      |
| 9. Arenoso       | 10. Argiloso    |
| 11. Silteoso     | 12. Cascalhoso  |
| 13. Areia        | 14. Lodo        |
| 15. Siltão       | 16. Argilão     |
| 17. Arenoso      | 18. Argiloso    |
| 19. Silteoso     | 20. Cascalhoso  |
| 21. Areia        | 22. Lodo        |
| 23. Siltão       | 24. Argilão     |
| 25. Arenoso      | 26. Argiloso    |
| 27. Silteoso     | 28. Cascalhoso  |
| 29. Areia        | 30. Lodo        |
| 31. Siltão       | 32. Argilão     |
| 33. Arenoso      | 34. Argiloso    |
| 35. Silteoso     | 36. Cascalhoso  |
| 37. Areia        | 38. Lodo        |
| 39. Siltão       | 40. Argilão     |
| 41. Arenoso      | 42. Argiloso    |
| 43. Silteoso     | 44. Cascalhoso  |
| 45. Areia        | 46. Lodo        |
| 47. Siltão       | 48. Argilão     |
| 49. Arenoso      | 50. Argiloso    |
| 51. Silteoso     | 52. Cascalhoso  |
| 53. Areia        | 54. Lodo        |
| 55. Siltão       | 56. Argilão     |
| 57. Arenoso      | 58. Argiloso    |
| 59. Silteoso     | 60. Cascalhoso  |
| 61. Areia        | 62. Lodo        |
| 63. Siltão       | 64. Argilão     |
| 65. Arenoso      | 66. Argiloso    |
| 67. Silteoso     | 68. Cascalhoso  |
| 69. Areia        | 70. Lodo        |
| 71. Siltão       | 72. Argilão     |
| 73. Arenoso      | 74. Argiloso    |
| 75. Silteoso     | 76. Cascalhoso  |
| 77. Areia        | 78. Lodo        |
| 79. Siltão       | 80. Argilão     |
| 81. Arenoso      | 82. Argiloso    |
| 83. Silteoso     | 84. Cascalhoso  |
| 85. Areia        | 86. Lodo        |
| 87. Siltão       | 88. Argilão     |
| 89. Arenoso      | 90. Argiloso    |
| 91. Silteoso     | 92. Cascalhoso  |
| 93. Areia        | 94. Lodo        |
| 95. Siltão       | 96. Argilão     |
| 97. Arenoso      | 98. Argiloso    |
| 99. Silteoso     | 100. Cascalhoso |
| 101. Areia       | 102. Lodo       |
| 103. Siltão      | 104. Argilão    |
| 105. Arenoso     | 106. Argiloso   |
| 107. Silteoso    | 108. Cascalhoso |
| 109. Areia       | 110. Lodo       |
| 111. Siltão      | 112. Argilão    |
| 113. Arenoso     | 114. Argiloso   |
| 115. Silteoso    | 116. Cascalhoso |
| 117. Areia       | 118. Lodo       |
| 119. Siltão      | 120. Argilão    |
| 121. Arenoso     | 122. Argiloso   |
| 123. Silteoso    | 124. Cascalhoso |
| 125. Areia       | 126. Lodo       |
| 127. Siltão      | 128. Argilão    |
| 129. Arenoso     | 130. Argiloso   |
| 131. Silteoso    | 132. Cascalhoso |
| 133. Areia       | 134. Lodo       |
| 135. Siltão      | 136. Argilão    |
| 137. Arenoso     | 138. Argiloso   |
| 139. Silteoso    | 140. Cascalhoso |
| 141. Areia       | 142. Lodo       |
| 143. Siltão      | 144. Argilão    |
| 145. Arenoso     | 146. Argiloso   |
| 147. Silteoso    | 148. Cascalhoso |
| 149. Areia       | 150. Lodo       |
| 151. Siltão      | 152. Argilão    |
| 153. Arenoso     | 154. Argiloso   |
| 155. Silteoso    | 156. Cascalhoso |
| 157. Areia       | 158. Lodo       |
| 159. Siltão      | 160. Argilão    |
| 161. Arenoso     | 162. Argiloso   |
| 163. Silteoso    | 164. Cascalhoso |
| 165. Areia       | 166. Lodo       |
| 167. Siltão      | 168. Argilão    |
| 169. Arenoso     | 170. Argiloso   |
| 171. Silteoso    | 172. Cascalhoso |
| 173. Areia       | 174. Lodo       |
| 175. Siltão      | 176. Argilão    |
| 177. Arenoso     | 178. Argiloso   |
| 179. Silteoso    | 180. Cascalhoso |
| 181. Areia       | 182. Lodo       |
| 183. Siltão      | 184. Argilão    |
| 185. Arenoso     | 186. Argiloso   |
| 187. Silteoso    | 188. Cascalhoso |
| 189. Areia       | 190. Lodo       |
| 191. Siltão      | 192. Argilão    |
| 193. Arenoso     | 194. Argiloso   |
| 195. Silteoso    | 196. Cascalhoso |
| 197. Areia       | 198. Lodo       |
| 199. Siltão      | 200. Argilão    |
| 201. Arenoso     | 202. Argiloso   |
| 203. Silteoso    | 204. Cascalhoso |
| 205. Areia       | 206. Lodo       |
| 207. Siltão      | 208. Argilão    |
| 209. Arenoso     | 210. Argiloso   |
| 211. Silteoso    | 212. Cascalhoso |
| 213. Areia       | 214. Lodo       |
| 215. Siltão      | 216. Argilão    |
| 217. Arenoso     | 218. Argiloso   |
| 219. Silteoso    | 220. Cascalhoso |
| 221. Areia       | 222. Lodo       |
| 223. Siltão      | 224. Argilão    |
| 225. Arenoso     | 226. Argiloso   |
| 227. Silteoso    | 228. Cascalhoso |
| 229. Areia       | 230. Lodo       |
| 231. Siltão      | 232. Argilão    |
| 233. Arenoso     | 234. Argiloso   |
| 235. Silteoso    | 236. Cascalhoso |
| 237. Areia       | 238. Lodo       |
| 239. Siltão      | 240. Argilão    |
| 241. Arenoso     | 242. Argiloso   |
| 243. Silteoso    | 244. Cascalhoso |
| 245. Areia       | 246. Lodo       |
| 247. Siltão      | 248. Argilão    |
| 249. Arenoso     | 250. Argiloso   |
| 251. Silteoso    | 252. Cascalhoso |
| 253. Areia       | 254. Lodo       |
| 255. Siltão      | 256. Argilão    |
| 257. Arenoso     | 258. Argiloso   |
| 259. Silteoso    | 260. Cascalhoso |
| 261. Areia       | 262. Lodo       |
| 263. Siltão      | 264. Argilão    |
| 265. Arenoso     | 266. Argiloso   |
| 267. Silteoso    | 268. Cascalhoso |
| 269. Areia       | 270. Lodo       |
| 271. Siltão      | 272. Argilão    |
| 273. Arenoso     | 274. Argiloso   |
| 275. Silteoso    | 276. Cascalhoso |
| 277. Areia       | 278. Lodo       |
| 279. Siltão      | 280. Argilão    |
| 281. Arenoso     | 282. Argiloso   |
| 283. Silteoso    | 284. Cascalhoso |
| 285. Areia       | 286. Lodo       |
| 287. Siltão      | 288. Argilão    |
| 289. Arenoso     | 290. Argiloso   |
| 291. Silteoso    | 292. Cascalhoso |
| 293. Areia       | 294. Lodo       |
| 295. Siltão      | 296. Argilão    |
| 297. Arenoso     | 298. Argiloso   |
| 299. Silteoso    | 300. Cascalhoso |
| 301. Areia       | 302. Lodo       |
| 303. Siltão      | 304. Argilão    |
| 305. Arenoso     | 306. Argiloso   |
| 307. Silteoso    | 308. Cascalhoso |
| 309. Areia       | 310. Lodo       |
| 311. Siltão      | 312. Argilão    |
| 313. Arenoso     | 314. Argiloso   |
| 315. Silteoso    | 316. Cascalhoso |
| 317. Areia       | 318. Lodo       |
| 319. Siltão      | 320. Argilão    |
| 321. Arenoso     | 322. Argiloso   |
| 323. Silteoso    | 324. Cascalhoso |
| 325. Areia       | 326. Lodo       |
| 327. Siltão      | 328. Argilão    |
| 329. Arenoso     | 330. Argiloso   |
| 331. Silteoso    | 332. Cascalhoso |
| 333. Areia       | 334. Lodo       |
| 335. Siltão      | 336. Argilão    |
| 337. Arenoso     | 338. Argiloso   |
| 339. Silteoso    | 340. Cascalhoso |
| 341. Areia       | 342. Lodo       |
| 343. Siltão      | 344. Argilão    |
| 345. Arenoso     | 346. Argiloso   |
| 347. Silteoso    | 348. Cascalhoso |
| 349. Areia       | 350. Lodo       |
| 351. Siltão      | 352. Argilão    |
| 353. Arenoso     | 354. Argiloso   |
| 355. Silteoso    | 356. Cascalhoso |
| 357. Areia       | 358. Lodo       |
| 359. Siltão      | 360. Argilão    |
| 361. Arenoso     | 362. Argiloso   |
| 363. Silteoso    | 364. Cascalhoso |
| 365. Areia       | 366. Lodo       |
| 367. Siltão      | 368. Argilão    |
| 369. Arenoso     | 370. Argiloso   |
| 371. Silteoso    | 372. Cascalhoso |
| 373. Areia       | 374. Lodo       |
| 375. Siltão      | 376. Argilão    |
| 377. Arenoso     | 378. Argiloso   |
| 379. Silteoso    | 380. Cascalhoso |
| 381. Areia       | 382. Lodo       |
| 383. Siltão      | 384. Argilão    |
| 385. Arenoso     | 386. Argiloso   |
| 387. Silteoso    | 388. Cascalhoso |
| 389. Areia       | 390. Lodo       |
| 391. Siltão      | 392. Argilão    |
| 393. Arenoso     | 394. Argiloso   |
| 395. Silteoso    | 396. Cascalhoso |
| 397. Areia       | 398. Lodo       |
| 399. Siltão      | 400. Argilão    |
| 401. Arenoso     | 402. Argiloso   |
| 403. Silteoso    | 404. Cascalhoso |
| 405. Areia       | 406. Lodo       |
| 407. Siltão      | 408. Argilão    |
| 409. Arenoso     | 410. Argiloso   |
| 411. Silteoso    | 412. Cascalhoso |
| 413. Areia       | 414. Lodo       |
| 415. Siltão      | 416. Argilão    |
| 417. Arenoso     | 418. Argiloso   |
| 419. Silteoso    | 420. Cascalhoso |
| 421. Areia       | 422. Lodo       |
| 423. Siltão      | 424. Argilão    |
| 425. Arenoso     | 426. Argiloso   |
| 427. Silteoso    | 428. Cascalhoso |
| 429. Areia       | 430. Lodo       |
| 431. Siltão      | 432. Argilão    |
| 433. Arenoso     | 434. Argiloso   |
| 435. Silteoso    | 436. Cascalhoso |
| 437. Areia       | 438. Lodo       |
| 439. Siltão      | 440. Argilão    |
| 441. Arenoso     | 442. Argiloso   |
| 443. Silteoso    | 444. Cascalhoso |
| 445. Areia       | 446. Lodo       |
| 447. Siltão      | 448. Argilão    |
| 449. Arenoso     | 450. Argiloso   |
| 451. Silteoso    | 452. Cascalhoso |
| 453. Areia       | 454. Lodo       |
| 455. Siltão      | 456. Argilão    |
| 457. Arenoso     | 458. Argiloso   |
| 459. Silteoso    | 460. Cascalhoso |
| 461. Areia       | 462. Lodo       |
| 463. Siltão      | 464. Argilão    |
| 465. Arenoso     | 466. Argiloso   |
| 467. Silteoso    | 468. Cascalhoso |
| 469. Areia       | 470. Lodo       |
| 471. Siltão      | 472. Argilão    |
| 473. Arenoso     | 474. Argiloso   |
| 475. Silteoso    | 476. Cascalhoso |
| 477. Areia       | 478. Lodo       |
| 479. Siltão      | 480. Argilão    |
| 481. Arenoso     | 482. Argiloso   |
| 483. Silteoso    | 484. Cascalhoso |
| 485. Areia       | 486. Lodo       |
| 487. Siltão      | 488. Argilão    |
| 489. Arenoso     | 490. Argiloso   |
| 491. Silteoso    | 492. Cascalhoso |
| 493. Areia       | 494. Lodo       |
| 495. Siltão      | 496. Argilão    |
| 497. Arenoso     | 498. Argiloso   |
| 499. Silteoso    | 500. Cascalhoso |
| 501. Areia       | 502. Lodo       |
| 503. Siltão      | 504. Argilão    |
| 505. Arenoso     | 506. Argiloso   |
| 507. Silteoso    | 508. Cascalhoso |
| 509. Areia       | 510. Lodo       |
| 511. Siltão      | 512. Argilão    |
| 513. Arenoso     | 514. Argiloso   |
| 515. Silteoso    | 516. Cascalhoso |
| 517. Areia       | 518. Lodo       |
| 519. Siltão      | 520. Argilão    |
| 521. Arenoso     | 522. Argiloso   |
| 523. Silteoso    | 524. Cascalhoso |
| 525. Areia       | 526. Lodo       |
| 527. Siltão      | 528. Argilão    |
| 529. Arenoso     | 530. Argiloso   |
| 531. Silteoso    | 532. Cascalhoso |
| 533. Areia       | 534. Lodo       |
| 535. Siltão      | 536. Argilão    |
| 537. Arenoso     | 538. Argiloso   |
| 539. Silteoso    | 540. Cascalhoso |
| 541. Areia       | 542. Lodo       |
| 543. Siltão      | 544. Argilão    |
| 545. Arenoso     | 546. Argiloso   |
| 547. Silteoso    | 548. Cascalhoso |
| 549. Areia       | 550. Lodo       |
| 551. Siltão      | 552. Argilão    |
| 553. Arenoso     | 554. Argiloso   |
| 555. Silteoso    | 556. Cascalhoso |
| 557. Areia       | 558. Lodo       |
| 559. Siltão      | 560. Argilão    |
| 561. Arenoso     | 562. Argiloso   |
| 563. Silteoso    | 564. Cascalhoso |
| 565. Areia       | 566. Lodo       |
| 567. Siltão      | 568. Argilão    |
| 569. Arenoso     | 570. Argiloso   |
| 571. Silteoso    | 572. Cascalhoso |
| 573. Areia       | 574. Lodo       |
| 575. Siltão      | 576. Argilão    |
| 577. Arenoso     | 578. Argiloso   |
| 579. Silteoso    | 580. Cascalhoso |
| 581. Areia       | 582. Lodo       |
| 583. Siltão      | 584. Argilão    |
| 585. Arenoso     | 586. Argiloso   |
| 587. Silteoso    | 588. Cascalhoso |
| 589. Areia       | 590. Lodo       |
| 591. Siltão      | 592. Argilão    |
| 593. Arenoso     | 594. Argiloso   |
| 595. Silteoso    | 596. Cascalhoso |
| 597. Areia       | 598. Lodo       |
| 599. Siltão      | 600. Argilão    |
| 601. Arenoso     | 602. Argiloso   |
| 603. Silteoso    | 604. Cascalhoso |
| 605. Areia       | 606. Lodo       |
| 607. Siltão      | 608. Argilão    |
| 609. Arenoso     | 610. Argiloso   |
| 611. Silteoso    | 612. Cascalhoso |
| 613. Areia       | 614. Lodo       |
| 615. Siltão      | 616. Argilão    |
| 617. Arenoso     | 618. Argiloso   |
| 619. Silteoso    | 620. Cascalhoso |
| 621. Areia       | 622. Lodo       |
| 623. Siltão      | 624. Argilão    |
| 625. Arenoso     | 626. Argiloso   |
| 627. Silteoso    | 628. Cascalhoso |
| 629. Areia       | 630. Lodo       |
| 631. Siltão      | 632. Argilão    |
| 633. Arenoso     | 634. Argiloso   |
| 635. Silteoso    | 636. Cascalhoso |
| 637. Areia       | 638. Lodo       |
| 639. Siltão      | 640. Argilão    |
| 641. Arenoso     | 642. Argiloso   |
| 643. Silteoso    | 644. Cascalhoso |
| 645. Areia       | 646. Lodo       |
| 647. Siltão      | 648. Argilão    |
| 649. Arenoso     | 650. Argiloso   |
| 651. Silteoso    | 652. Cascalhoso |
| 653. Areia       | 654. Lodo       |
| 655. Siltão      | 656. Argilão    |
| 657. Arenoso     | 658. Argiloso   |
| 659. Silteoso    | 660. Cascalhoso |
| 661. Areia       | 662. Lodo       |
| 663. Siltão      | 664. Argilão    |
| 665. Arenoso     | 666. Argiloso   |
| 667. Silteoso    | 668. Cascalhoso |
| 669. Areia       | 670. Lodo       |
| 671. Siltão      | 672. Argilão    |
| 673. Arenoso     | 674. Argiloso   |
| 675. Silteoso    | 676. Cascalhoso |
| 677. Areia       | 678. Lodo       |
| 679. Siltão      | 680. Argilão    |
| 681. Arenoso     | 682. Argiloso   |
| 683. Silteoso    | 684. Cascalhoso |
| 685. Areia       | 686. Lodo       |
| 687. Siltão      | 688. Argilão    |
| 689. Arenoso     | 690. Argiloso   |
| 691. Silteoso    | 692. Cascalhoso |
| 693. Areia       | 694. Lodo       |
| 695. Siltão      | 696. Argilão    |
| 697. Arenoso     | 698. Argiloso   |
| 699. Silteoso    | 700. Cascalhoso |
| 701. Areia       | 702. Lodo       |
| 703. Siltão      | 704. Argilão    |
| 705. Arenoso     | 706. Argiloso   |
| 707. Silteoso    | 708. Cascalhoso |
| 709. Areia       | 710. Lodo       |
| 711. Siltão      | 712. Argilão    |
| 713. Arenoso     | 714. Argiloso   |
| 715. Silteoso    | 716. Cascalhoso |
| 717. Areia       | 718. Lodo       |
| 719. Siltão      | 720. Argilão    |
| 721. Arenoso     | 722. Argiloso   |
| 723. Silteoso    | 724. Cascalhoso |
| 725. Areia       | 726. Lodo       |
| 727. Siltão      | 728. Argilão    |
| 729. Arenoso     | 730. Argiloso   |
| 731. Silteoso    | 732. Cascalhoso |
| 733. Areia       | 734. Lodo       |
| 735. Siltão      | 736. Argilão    |
| 737. Arenoso     | 738. Argiloso   |
| 739. Silteoso    | 740. Cascalhoso |
| 741. Areia       | 742. Lodo       |
| 743. Siltão      | 744. Argilão    |
| 745. Arenoso     | 746. Argiloso   |
| 747. Silteoso    | 748. Cascalhoso |
| 749. Areia       | 750. Lodo       |
| 751. Siltão      | 752. Argilão    |
| 753. Arenoso     | 754. Argiloso   |
| 755. Silteoso    | 756. Cascalhoso |
| 757. Areia       | 758. Lodo       |
| 759. Siltão      | 760. Argilão    |
| 761. Arenoso     | 762. Argiloso   |
| 763. Silteoso    | 764. Cascalhoso |
| 765. Areia       | 766. Lodo       |
| 767. Siltão      | 768. Argilão    |
| 769. Arenoso     | 770. Argiloso   |
| 771. Silteoso    | 772. Cascalhoso |
| 773. Areia       | 774. Lodo       |
| 775. Siltão      | 776. Argilão    |
| 777. Arenoso     | 778. Argiloso   |
| 779. Silteoso    | 780. Cascalhoso |
| 781. Areia       | 782. Lodo       |
| 783. Siltão      | 784. Argilão    |
| 785. Arenoso     | 786. Argiloso   |
| 787. Silteoso    | 788. Cascalhoso |
| 789. Areia       | 790. Lodo       |
| 791. Siltão      | 792. Argilão    |
| 793. Arenoso     | 794. Argiloso   |
| 795. Silteoso    | 796. Cascalhoso |
| 797. Areia       | 798. Lodo       |
| 799. Siltão      | 800. Argilão    |
| 801. Arenoso     | 802. Argiloso   |
| 803. Silteoso    | 804. Cascalhoso |
| 805. Areia       | 806. Lodo       |
| 807. Siltão      | 808. Argilão    |
| 809. Arenoso     | 810. Argiloso   |
| 811. Silteoso    | 812. Cascalhoso |
| 813. Areia       | 814. Lodo       |
| 815. Siltão      | 816. Argilão    |
| 817. Arenoso     | 818. Argiloso   |
| 819. Silteoso    | 820. Cascalhoso |
| 821. Areia       | 822. Lodo       |
| 823. Siltão      | 824. Argilão    |
| 825. Arenoso     |                 |



#### 4. Materiais e métodos

##### 4.1. Classificação dos testemunhos.

Para a classificação dos testemunhos foram utilizados parâmetros indicados pela ABGE. Estes parâmetros estão dispostos abaixo (tabelas 2 e 3).

Tabela 2 – Grau de fraturamento e R.Q.D.

| GRAU FRATURAMENTO |                                                | R.Q.D. (%)                 |                      |
|-------------------|------------------------------------------------|----------------------------|----------------------|
|                   |                                                | Trecho Fraturam. Homogêneo |                      |
| F1                | < 1 FRATURAS / m<br>(POUCO FRATURADA)          | R1                         | 90 - 100 (EXCELENTE) |
| F2                | 1 - 5 FRATURAS / m<br>(FRATURADA)              | R2                         | 75 - 89 (BOA)        |
| F3                | 5-10 FRATURAS / m<br>(MUITO FRATURADA)         | R3                         | 50 - 74 (REGULAR)    |
| F4                | 10-20 FRATURAS / m<br>(EXTREMAMENTE FRATURADA) | R4                         | 25 - 49 (POBRE)      |
| F5                | >20 FRATURAS / m<br>(FRAGMENTADA)              | R5                         | 0 - 24 (MUITO POBRE) |

Tabela 3 – Grau de alteração e coerência

| GRAU DE DE ALTERAÇÃO |                                         |                                                                                                                                            | GRAU DE COERÊNCIA |                                   |                                                                                                                                                                  |
|----------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GRAU                 | DENOMINAÇÃO                             | CARACTERIZAÇÃO                                                                                                                             | GRAU              | DENOMINAÇÃO                       | CARACTERIZAÇÃO                                                                                                                                                   |
| A1                   | ROCHA Sã                                | Sem vestígios de alterações físicas e químicas dos minerais principais.                                                                    | C1                | ROCHA MUITO COERENTE              | Rocha com som metálico, quebra com dificuldade ao golpe do martelo. Sua superfície dificilmente é riscada pelo aço.                                              |
| A2                   | ROCHA POUCO ALTERADA                    | Sinais de alteração incipientes dos minerais primários; ligeiramente descolorida. Mesmas propriedades físicas e mecânicas da rocha sã.     | C2                | ROCHA COERENTE                    | Rocha com som fraco, quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo. Ao ser riscada pelo aço, deixa sulcos superficiais.                                     |
| A3                   | ROCHA MEDIANAMENTE ALTERADA             | Minerais medianamente alterados; bastante descolorida. Propriedades mecânicas inferiores à "A2", porém ainda resistente.                   | C3                | ROCHA MEDIANAMENTE COERENTE       | Rocha com som oco, quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo e com fragmentos dificilmente quebradiços à pressão dos dedos. Sulco leve ao risco do aço. |
| A4                   | ROCHA MUITO ALTERADA                    | Minerais muito alterados, às vezes pulverulentos. Propriedades físicas e mecânicas muito inferiores à "A3".                                | C4                | ROCHA POUCO COERENTE (QUEBRADIÇA) | Rocha quebra com facilidade ao golpe com martelo, bordas dos fragmentos quebram com relativa facilidade manualmente. Sulcos profundos ao risco do aço.           |
| A5                   | ROCHA EXTREMAMENTE ALTERADA (SAFROLITO) | Minerais constituintes totalmente decompostos, porém preservando suas estruturas originais. Trechos não recuperados são considerados solo. | C5                | ROCHA INCOERENTE (FRIÁVEL)        | Rocha esfarela-se ao golpe do martelo, desagregando-se com a pressão dos dedos. Pode ser cortada com o aço, sendo riscada com a unha.                            |



## 4.2. Ensaio de perda d'água sob pressão

Este ensaio é um dos mais realizados em sondagens para investigação de fundações de barragem. O ensaio consiste na injeção de água sob pressão em um trecho do furo e na medida da quantidade de água que se infiltra no maciço durante determinado tempo (ABGE, 1999).

Geralmente realizado em trechos de 3 metros de rocha, o ensaio é dividido em 5 estágios, aplicando-se água em pressões diferentes, da seguinte forma:

- 1° estágio: Pressão mínima.
- 2° estágio: Pressão intermediária.
- 3° estágio: Pressão máxima.
- 4° estágio: Pressão intermediária.
- 5° estágio: Pressão mínima.

Onde cada estágio dura dez minutos ou, idealmente, o tempo necessário para o estabelecimento de um regime de percolação constante. Para cada estágio, obtém-se um valor de permeabilidade "K", dada em centímetros por segundo. Ao final do ensaio, admite-se como permeabilidade do trecho ensaiado, aquela relativa ao 3° estágio (de pressão máxima).

O coeficiente K permite classificar o trecho de acordo com sua permeabilidade, variando de H1 (permeabilidade muito baixa) a H5 (permeabilidade muito alta). Os limites utilizados estão ilustrados na tabela 4.

**Tabela 4 – Limites de permeabilidade e condutividade hidráulica**

| CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA<br>( l / min / m / kg / cm <sup>2</sup> ) |                      | PERMEABILIDADE ( K )<br>cm/s              |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------|
| H1                                                                 | < 0,10 (MUITO BAIXA) | < 10 <sup>-5</sup>                        |
| H2                                                                 | 0,10 - 1,00 (BAIXA)  | 10 <sup>-5</sup> ≤ K < 10 <sup>-4</sup>   |
| H3                                                                 | 1,00 - 5,00 (MÉDIA)  | 10 <sup>-4</sup> ≤ K < 5x10 <sup>-4</sup> |
| H4                                                                 | 5,00 - 10,00 (ALTA)  | 5x10 <sup>-4</sup> ≤ K < 10 <sup>-3</sup> |
| H5                                                                 | > 10,00 (MUITO ALTA) | K ≥ 10 <sup>-3</sup>                      |



A apresentação dos resultados pode ser feita através de uma tabela com a permeabilidade de cada trecho, ou na forma de um gráfico de carga efetiva *versus* vazão. Este gráfico permite avaliar o comportamento das fissuras do maciço frente às pressões aplicadas, possibilitando, inclusive, avaliar se a pressão exercida na rocha causou abertura ou fechamento das fissuras, conforme figura 7.

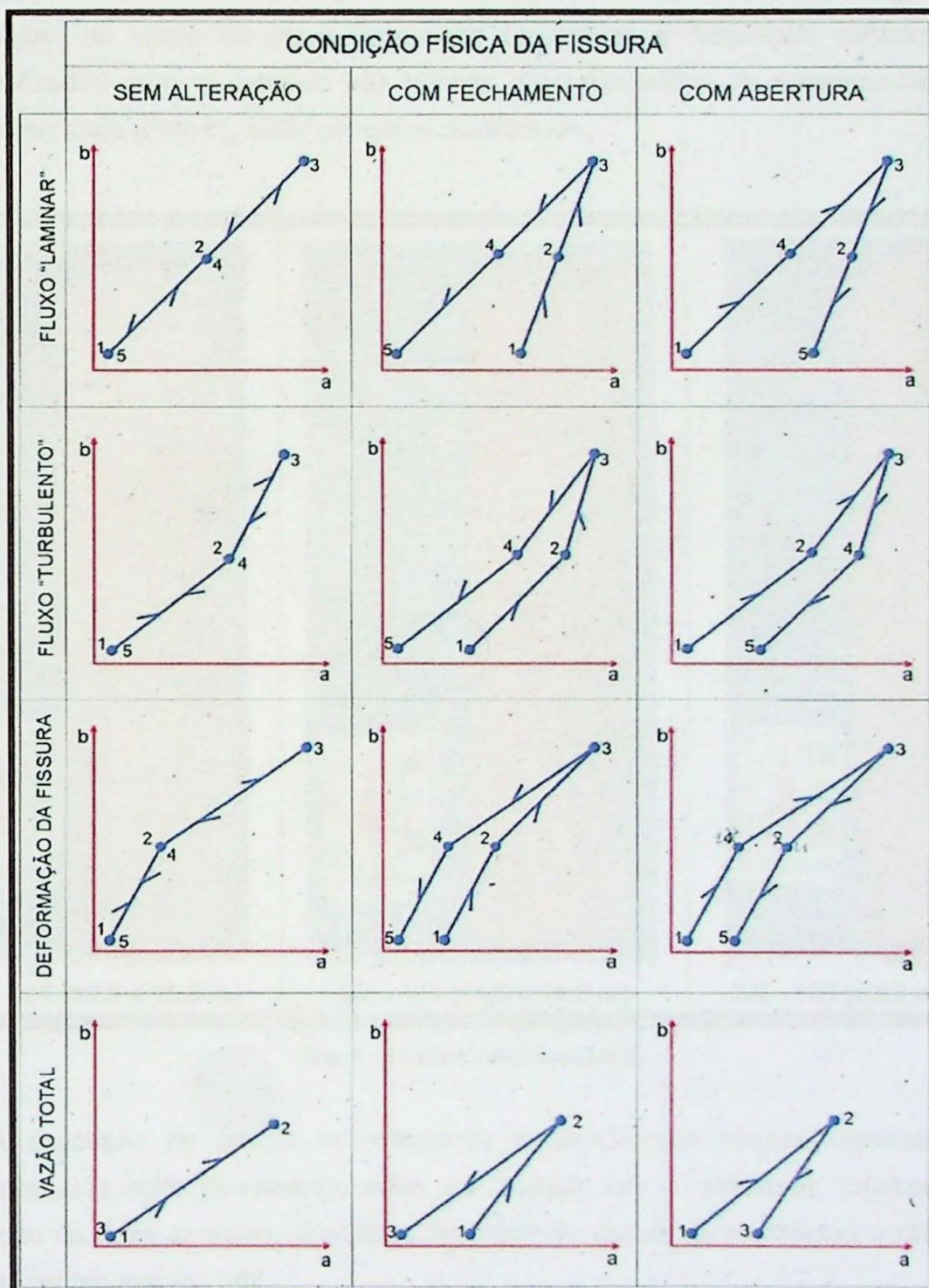


Figura 7 – Comportamento das fissuras nos trechos ensaiados



#### 4.3. Ensaio de resistência à compressão pontual

O ensaio de resistência à compressão pontual é uma alternativa ao ensaio de resistência à compressão simples, proposto inicialmente no projeto.

Conhecido como "*Point Load Test*", este ensaio possui uma execução mais simples e rápida do que os demais, e tem como resultado o "índice *point load*" ( $I_s$ ), que é uma relação entre o diâmetro equivalente da amostra ( $D_e$ ) e a força  $P$  aplicada até seu rompimento.

Além de ser um ensaio de fácil execução, este também não exige grandes preparações do corpo de prova, que pode ter formas e tamanhos variados. Foram disponibilizados para os ensaios três trechos de testemunhos de aproximadamente 30 centímetros cada (Foto 4), e 99 milímetros de diâmetro.

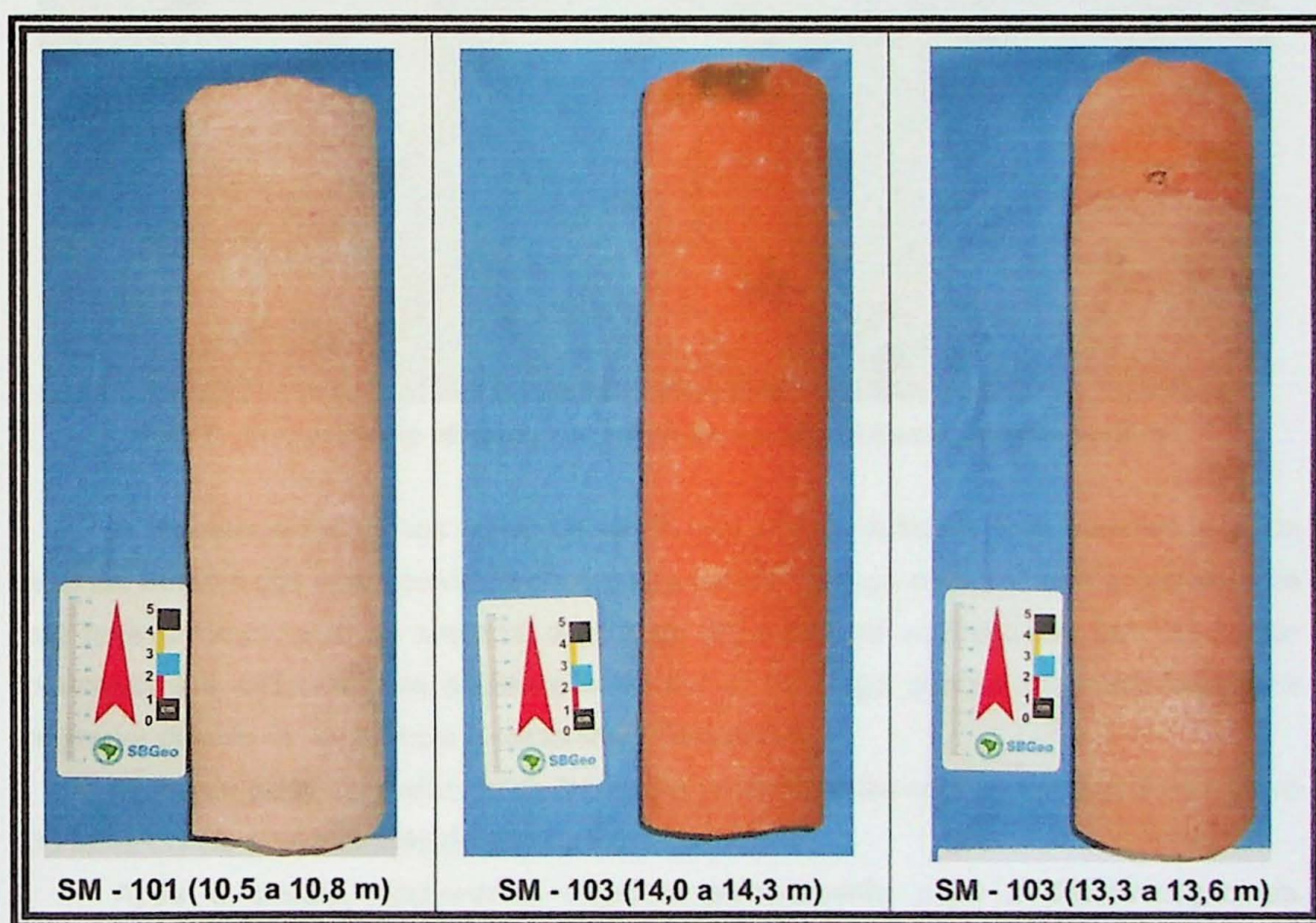


Foto 4 - Testemunhos ensaiados

A execução do ensaio de resistência à compressão pontual mostrou-se mais adequada pois cada testemunho pôde ser dividido em 4 amostras, totalizando uma população de doze amostras ensaiadas. No caso do ensaio de resistência à compressão simples, seriam apenas três.

O equipamento em que é realizado o *point load test* consiste em dois cones de aço acoplados a um macaco, através do qual se aplica a força (foto 5).



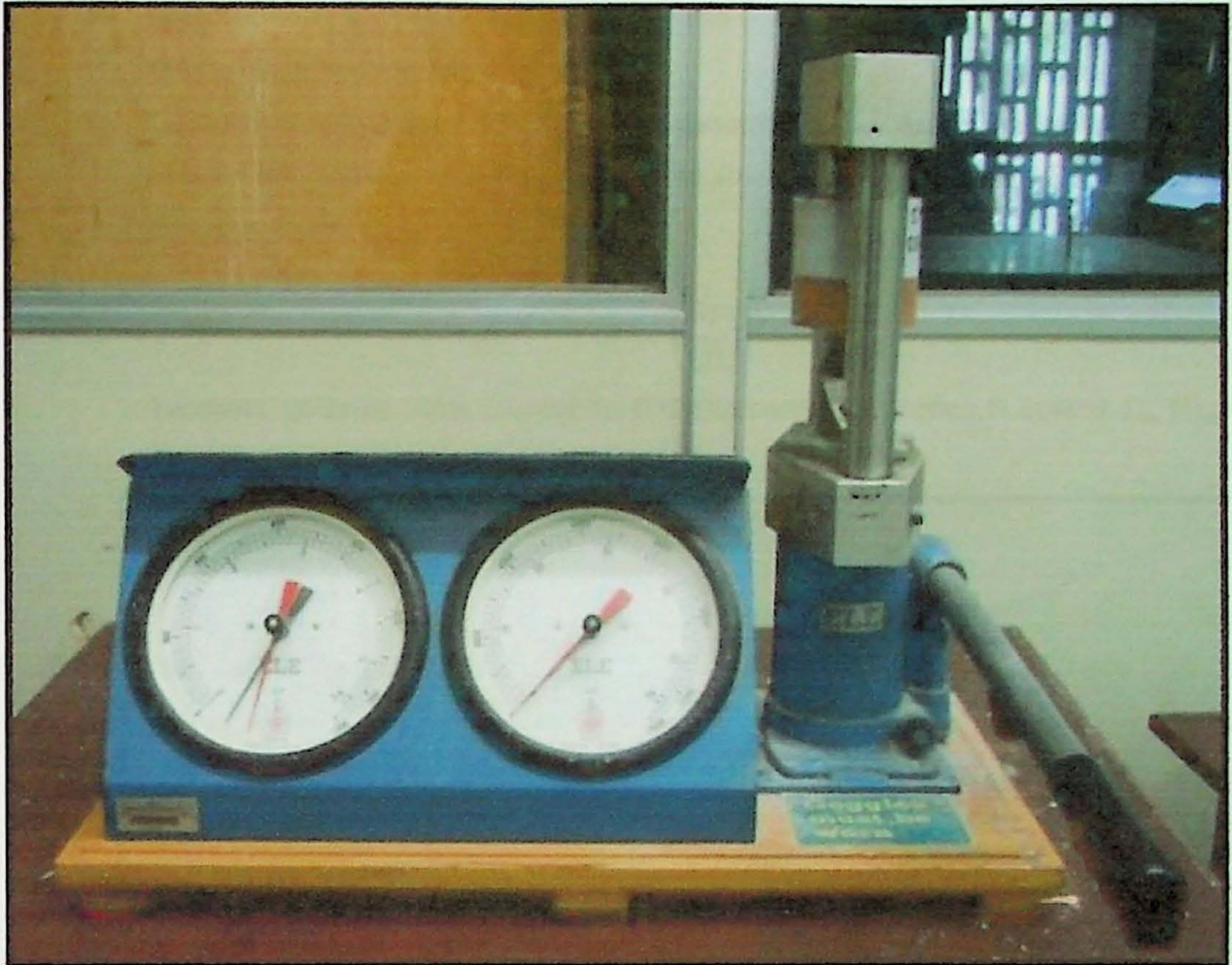


Foto 5 - Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão pontual

A amostra é fixada nos cones de modo que a força aplicada seja transferida a ela apenas através dos dois pontos do cone que a tocam. A força é aumentada gradualmente até haja o rompimento da amostra, esta força ( $P$ ) é lida no equipamento em KN (quilonewtons) e é utilizada para a obtenção do índice de carga pontual ou *point load* para posterior cálculo da resistência à compressão uniaxial.

O ensaio pode ser realizado de modo que a compressão seja no sentido do diâmetro do testemunho ou no sentido do eixo do testemunho.

Após o ensaio, segue-se o seguinte procedimento para a determinação da resistência à compressão uniaxial: (ASTM – D 5731, 2002)

- No caso dos ensaios realizados no sentido do eixo do testemunho, é necessária a determinação do diâmetro equivalente ( $D_e$ ), em milímetros, através da relação:

$$D_e = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}, \text{ onde } A = \text{área da superfície resultante da ruptura}$$



Para os ensaios realizados no sentido diametral,  $D_e$  equivale ao próprio diâmetro do testemunho.

- Como o ensaio é normalizado para diâmetros de aproximadamente 50 mm, é necessário calcular um "fator de correção para o tamanho" (F), quando  $D_e$  diferente de 50 mm:

$$F = \left( \frac{D_e}{50} \right)^{0,45}$$

Também pode-se obter o valor de F diretamente do gráfico F *versus*  $D_e$  (figura 8), apresentado na norma do ensaio.

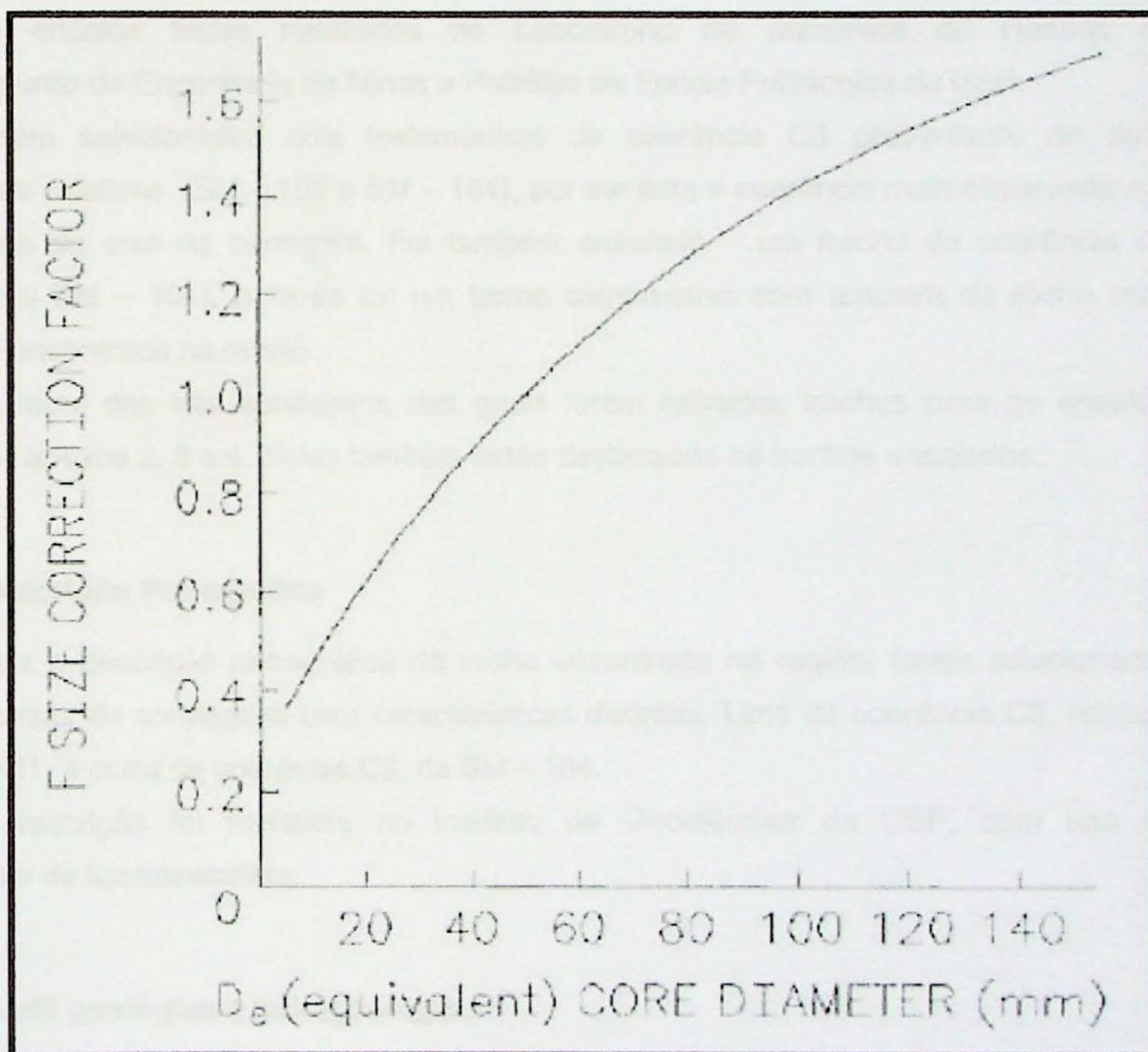


Figura 8 - Gráfico F *versus*  $D_e$  (Extraído de ASTM, D – 5731, 2002)

- Assim, é possível calcular o índice *Point Load Test* corrigido ( $I_{s(50)}$ ) para o tamanho do diâmetro através da relação:

$$I_{s(50)} = \left( \frac{P}{D_e^2} \right) \cdot F$$



sendo  $P$  em Newtons e  $D_e$  em  $\text{mm}^2$ , para um resultado final em Megapascal ( $\text{MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$ )

- Com isso, é possível obter a resistência à compressão uniaxial da amostra através do fator de correlação ( $K$ ), que varia de 20 a 25, de acordo com o diâmetro da amostra ensaiada.

Em posse dos resultados, é então feito o cálculo da resistência média das amostras ensaiadas e de mesmas características onde, geralmente, são desconsiderados os dois maiores e os dois menores valores. Neste caso, entretanto, isto não foi feito devido ao baixo número de amostras.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da USP.

Foram selecionados dois testemunhos de coerência C3 proveniente de duas sondagens rotativas (SM – 103 e SM – 104), por ser esta a coerência mais observada nas sondagens do eixo da barragem. Foi também ensaiado um trecho de coerência C2 (sondagem SM – 101), para se ter um termo comparativo com amostra da rocha mais coerente encontrada na região.

As fotos das três sondagens das quais foram retirados trechos para os ensaios, estão nos anexos 2, 3 e 4. Neles também estão destacados os trechos ensaiados.

#### **4.4. Descrição Petrográfica**

Para a descrição petrográfica da rocha encontrada na região, foram selecionadas duas amostras de sondagens com características distintas. Uma de coerência C2, retirada da SM – 101, e outra de coerência C3, da SM – 104.

A descrição foi realizada no Instituto de Geociências da USP, com uso de microscópio de luz transmitida.

#### **4.5. Perfil geológico e hidrogeológico**

São apresentados neste trabalho um perfil geológico e um perfil hidrogeológico, ambos levantados ao longo do eixo da barragem (ver localização no anexo 5).

Os perfis foram elaborados a partir da descrição dos testemunhos das sondagens mais próximas ao eixo da barragem, sendo que para cada sondagem foi determinado um topo de rocha alterada (TRA) e um topo de rocha sã (TRS), além das camadas de aluvião e de solo residual.



Os perfis foram confeccionados no *software* AutoCAD®, assim como os perfis (Log's) de cada sondagem, conforme o modelo da figura 9. Cada perfil contém as informações referentes a porcentagem de recuperação, R.Q.D., coerência, alteração, fraturamento, e condutividade hidráulica de cada trecho, além dos valores de S.P.T. das camadas de solo e demais dados da sondagem (profundidade, identificação, cota, cota do nível d'água e sua projeção em relação ao perfil).

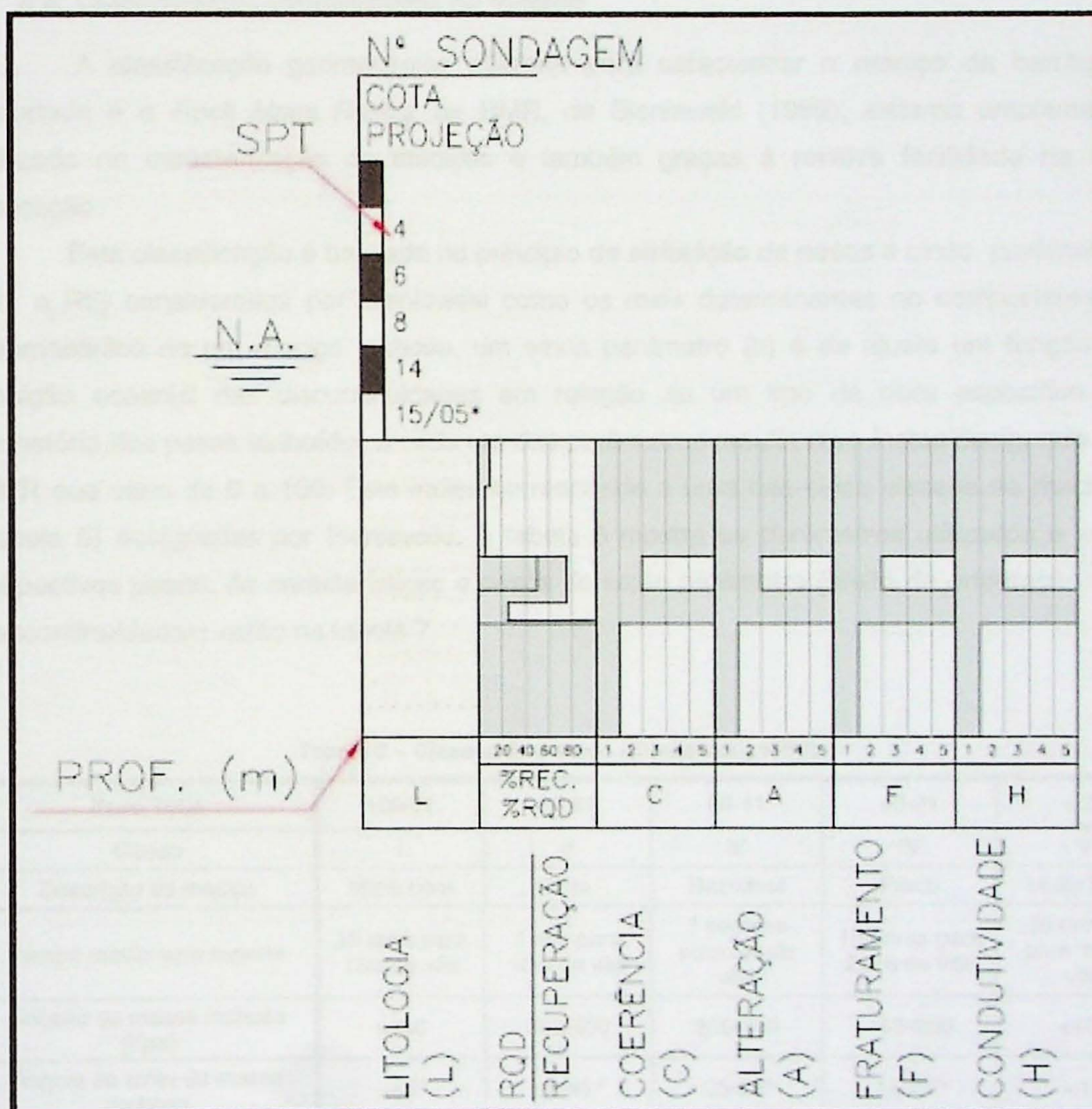


Figura 9 - Modelo de perfil (Log) de sondagem utilizado.

No perfil geológico, as camadas da rocha encontrada foram diferenciadas de acordo com seu grau de coerência, pois havia apenas um litotipo na região. Já no perfil hidrogeológico, as camadas serão demarcadas de acordo com a condutividade hidráulica



medida nos ensaios de perda d'água sob pressão, que é realizado apenas nos trechos de rocha.

Para se obter informações a respeito da permeabilidade das camadas de solo, foram realizados ensaios de permeabilidade, cujos resultados estão dispostos em tabelas inseridas no perfil hidrogeológico.

#### 4.6. Classificação geomecânica do maciço

A classificação geomecânica utilizada para caracterizar o maciço da barragem estudada é o *Rock Mass Rating*, ou RMR, de Bieniawski (1989), sistema amplamente utilizado na caracterização de maciços e também graças à relativa facilidade na sua aplicação.

Esta classificação é baseada no princípio de atribuição de pesos a cinco parâmetros (R1 a R5) considerados por Bieniawski como os mais determinantes no comportamento geomecânico de um maciço rochoso, um sexto parâmetro (b) é de ajuste em função da posição espacial das discontinuidades em relação a um tipo de obra específico.. A somatória dos pesos atribuídos a cada um dos parâmetros resulta num índice designado por RMR que varia de 0 a 100. Este índice corresponde a uma das cinco classes de maciços (tabela 5) designadas por Bieniawski. A tabela 6 mostra os parâmetros utilizados e seus respectivos pesos. As características e pesos do sexto parâmetro (efeito da orientação das descontinuidades) estão na tabela 7.

Tabela 5 – Classes de maciço (Bieniawski, 1989)

| Peso Total                        | 100-81                  | 80-61                 | 60-41                   | 40-21                     | < 21                      |
|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Classe                            | I                       | II                    | III                     | IV                        | V                         |
| Descrição do maciço               | Muito bom               | Bom                   | Razoável                | Fraco                     | Muito fraco               |
| Tempo médio sem suporte           | 20 anos para 15m de vão | 1 ano para 10m de vão | 1 semana para 5m de vão | 10 horas para 2,5m de vão | 30 minutos para 1m de vão |
| Coesão da massa rochosa (Kpa)     | >400                    | 300-400               | 200-300                 | 100-200                   | <100                      |
| Ângulo de atrito da massa rochosa | >45°                    | 35-45°                | 25-35°                  | 15-25°                    | <15                       |



**Tabela 6 – Parâmetros utilizados na classificação RMR (Bieniawski, 1989)**

| Parâmetros |                                  |                                                   | Coeficientes                                                                           |                                                                                  |                                                                           |                                                                                                   |                                                                              |       |     |
|------------|----------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------|-----|
| 1          | Resistência da rocha intacta     | Carga Puntiforme (MPa)                            | > 10                                                                                   | 4 a 10                                                                           | 2 a 4                                                                     | 1 a 2                                                                                             | Ver compressão uniaxial                                                      |       |     |
|            |                                  | Compressão uniaxial (MPa)                         | > 250                                                                                  | 100 a 250                                                                        | 50 a 100                                                                  | 25 a 50                                                                                           | 5 a 25                                                                       | 1 a 5 | < 1 |
|            | Pesos                            |                                                   | 15                                                                                     | 12                                                                               | 7                                                                         | 4                                                                                                 | 2                                                                            | 1     | 0   |
| 2          | RQD (%)                          |                                                   | 90-100                                                                                 | 75-90                                                                            | 50-75                                                                     | 25-50                                                                                             | < 25                                                                         |       |     |
|            | Pesos                            |                                                   | 20                                                                                     | 15                                                                               | 13                                                                        | 8                                                                                                 | 3                                                                            |       |     |
| 3          | Espaçamento das descontinuidades |                                                   | > 2m                                                                                   | 0,6-2m                                                                           | 200-600mm                                                                 | 60-20mm                                                                                           | < 60mm                                                                       |       |     |
|            | Pesos                            |                                                   | 20                                                                                     | 15                                                                               | 10                                                                        | 8                                                                                                 | 5                                                                            |       |     |
| 4          | Condição das descontinuidades    |                                                   | Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alterada | Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes ligeiramente alteradas | Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes muito alteradas | Superfícies polidas ou preenchimento com espessura <5mm ou juntas contínuas com separação 1 - 5mm | Preenchimento mole com espessura >5mm ou juntas contínuas com separação >5mm |       |     |
|            | Pesos                            |                                                   | 30                                                                                     | 25                                                                               | 20                                                                        | 10                                                                                                | 0                                                                            |       |     |
| 5          | Presença de água                 | Caudal por 10m de comprimento de túnel            | Nenhum                                                                                 | < 10 l/min                                                                       | 10-25 l/min                                                               | 25-125 l/min                                                                                      | > 125 l/min                                                                  |       |     |
|            |                                  | Relação pressão de água x tensão principal máxima | 0                                                                                      | < 0,1                                                                            | 0,1 - 0,2                                                                 | 0,2 - 0,5                                                                                         | > 0,5                                                                        |       |     |
|            |                                  | Condições gerais                                  | Completamente seco                                                                     | Água intersticial                                                                | Úmido                                                                     | Gotejamento                                                                                       | Fluxo abundante                                                              |       |     |
|            | Pesos                            |                                                   | 15                                                                                     | 10                                                                               | 7                                                                         | 4                                                                                                 | 0                                                                            |       |     |



**Tabela 7 – Efeito da orientação das descontinuidades (Bieniawski, 1989)**

| Direção perpendicular ao eixo do túnel     |                      |                                                    |                      | Direção paralela ao eixo do túnel |                      | inclinação<br>0-20° |
|--------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------|
| Abertura do túnel no sentido da inclinação |                      | Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação |                      | inclinação<br>45-90°              | inclinação<br>20-45° |                     |
| inclinação<br>45-90°                       | inclinação<br>20-45° | inclinação<br>45-90°                               | inclinação<br>20-45° |                                   |                      |                     |
| Muito favorável                            | Favorável            | Razoável                                           | Desfavorável         | Muito desfavorável                | Razoável             | Razoável            |
| Orientação das descontinuidades            |                      | Muito favorável                                    | Favorável            | Razoável                          | Desfavorável         | Muito desfavorável  |
| Pesos                                      | Túneis e minas       | 0                                                  | -2                   | -5                                | -10                  | -12                 |
|                                            | Fundações            | 0                                                  | -2                   | -7                                | -15                  | -25                 |
|                                            | Taludes              | 0                                                  | -5                   | -25                               | -50                  | -60                 |

A classificação geomecânica foi aplicada às três sondagens em que se realizou o ensaio de resistência à compressão pontual (SM – 101, SM – 103 e SM – 104). Os parâmetros incluídos na atribuição de pesos foram obtidos a partir da descrição dos testemunhos dessas três sondagens, sendo aplicada a resistência média dos ensaios de cada sondagem para o cálculo do índice RMR. As fotos dos testemunhos destas sondagens são apresentadas nos anexos 2, 3 e 4.

## 5. Desenvolvimento do trabalho

Conforme descrito no cronograma das atividades realizadas (tabela 7) foi possível cumprir todas as tarefas previstas no Projeto Inicial, exceção feita à realização do trabalho de campo.

Esta não era uma tarefa incluída no cronograma do Projeto Inicial (PI), mas sua realização era esperada e programada para o mês de julho, sendo inicialmente adiada devido a uma modificação no projeto do empreendimento, fazendo com que os trabalhos fossem atrasados. Como o trabalho de campo depende do início das escavações, este também foi adiado. Previu-se um atraso de 60 dias para o trabalho de campo, entretanto não houve tempo hábil para sua realização até a conclusão da monografia.

Deve-se a isso o fato do trabalho não conter um capítulo de geologia local de detalhe, como seria de se esperar. As atividades relacionadas, como descrição de testemunhos, foram realizadas normalmente.

Também foram encontradas dificuldades para a realização dos ensaios de resistência a compressão simples, previstos no PI. Inicialmente os ensaios seriam



realizados no I.P.T., porém o laboratório não possuía tempo hábil para a realização dos ensaios. Sendo assim, foi consultado o Laboratório de Mecânica de Rochas, da Faculdade de Engenharia de Minas e Petróleo, da POLI, que concordou em fazer os ensaios.

Entretanto, os testemunhos disponíveis tinham diâmetro fora da norma para a realização do ensaio programado exigindo correção do resultado. Destarte este ensaio foi substituído pelo ensaio de resistência à compressão pontual.

O período de realização de todas as atividades que envolvem esta monografia está descrito no cronograma a seguir (tabela 8).

**Tabela 8 – Cronograma das atividades desenvolvidas**

|                                                 | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV |
|-------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Revisão Bibliográfica                           |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Redação do Relatório de progresso               |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Entrega do Relatório de progresso               |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Descrição de testemunhos de sondagem            |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Confecção de perfis de sondagem                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Confecção do perfil geológico                   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Confecção do perfil hidrogeológico              |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Confecção e descrição de lâminas                |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Realização do ensaio de resistência pontual     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Aplicação do método de classificação de maciços |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Redação da Monografia                           |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Entrega da Monografia                           |     |     |     |     |     |     |     |     |     |



## 6. Resultados obtidos

### 6.1. Classificação dos testemunhos

Para a descrição geológico-geotécnica da área de implantação da P.C.H. estudada foram programadas e executadas duas campanhas de Investigações geológico-geotécnicas, compostas por sondagens e ensaios de permeabilidade e perda d'água sob pressão.

A tabela 9 mostra um resumo das sondagens realizadas para o projeto, assim como suas respectivas cotas, profundidade final, e ensaios realizados (suas coordenadas foram omitidas a pedido da empresa projetista). Ao todo foram realizadas aproximadamente 25 sondagens, porém, este trabalho citará apenas aquelas locadas próximas ao eixo da barragem e que serão utilizadas na confecção dos perfis geológico e hidrogeológico.

**Tabela 9 – Sondagens realizadas na região do empreendimento**

| SONDAGEM | COTA (m) | PROF. (m) | ENSAIOS DE PERDA D'ÁGUA |
|----------|----------|-----------|-------------------------|
| SM - 101 | 456,30   | 11,00     | 2                       |
| SM - 103 | 454,20   | 20,00     | 6                       |
| SM - 104 | 455,35   | 20,10     | 4                       |
| SM - 107 | 458,00   | 15,00     | 4                       |
| SM - 111 | 456,51   | 10,00     | 3                       |
| SM - 112 | 458,94   | 22,00     | 1                       |
| SM - 113 | 458,17   | 20,00     | 5                       |
| SP - 101 | 464,05   | 11,00     | -                       |
| SP - 102 | 459,69   | 6,20      | -                       |
| SP - 111 | 453,56   | 0,37      | -                       |
| SP - 112 | 462,28   | 7,29      | -                       |
| SP - 113 | 456,54   | 3,17      | -                       |
| SP - 114 | 458,45   | 4,16      | -                       |

A localização de todas as sondagens realizadas (apenas em relação às estruturas da barragem, pois as referências foram retiradas da imagem) encontra-se no anexo 5. Trata-se de um mapa topográfico da área do empreendimento no qual também está representado em planta o arranjo geral da barragem com destaque para as estruturas principais.

Em geral, os testemunhos descritos apresentaram características bastante semelhantes. O arenito Utiriti apresenta-se com granulação predominantemente fina a média, coloração marrom avermelhado, com tons arroxeados e marrom claro esbranquiçados; com coerência variando entre C2 (resistente) e C4/C5 (muito a extremamente branda), com modesta passagem por uma lente de arenito silicificado, este



sim com alta coerência e resistência. Os trechos que apresentam menor grau de coerência, também mostram grau de fraturamento ligeiramente superior aos demais.

A foto 6 mostra um aspecto geral dos testemunhos da região mostrando, inclusive, a variação no grau de fraturamento. É importante ressaltar que a porção mais fraturada (primeira canaleta da caixa) é ainda classificada como F2, ou seja, muitas das descontinuidades observadas são quebras mecânicas, e não fraturas naturais do maciço.

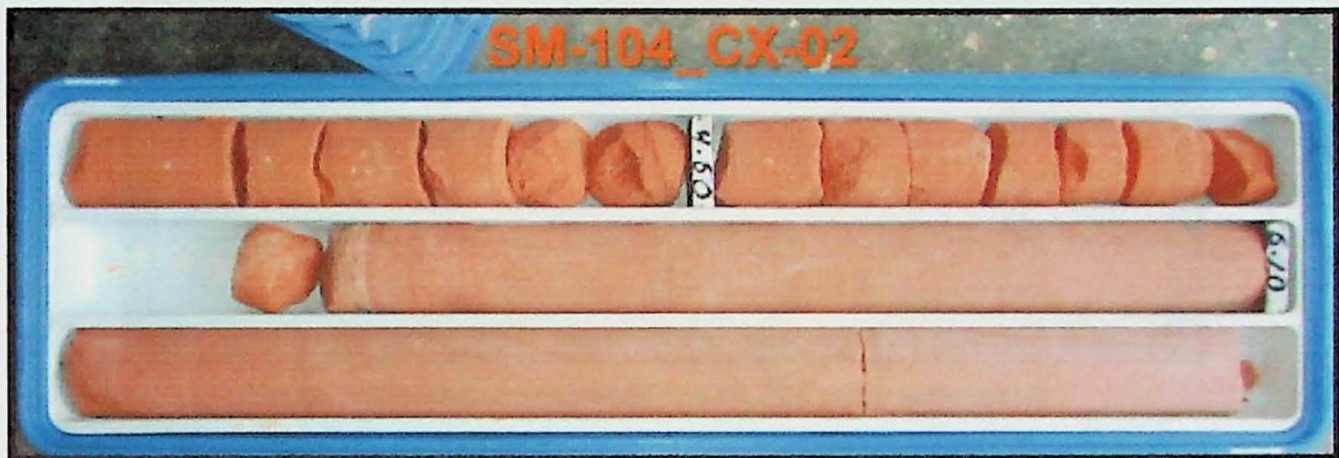


Foto 6 - Aspecto geral dos testemunhos na região do empreendimento

Além dos trechos de rocha, foi realizada a descrição tátil-visual dos trechos de solo das sondagens, através da qual foi possível diferenciar duas camadas distintas de solo: aluvião e solo residual.

A camada de aluvião é composta por areia fina e fina a média siltosa, fofa a muito compacta, marrom escura e esbranquiçada e areia fina pouco argilosa e/ou argilosa, fofa a pouco compacta, cinza escura e marrom.

O solo residual da rocha encontrada é classificada como areia fina, fofa a muito compacta, amarela e esbranquiçada e areia fina a média, medianamente e muito compacta, variegada.

## 6.2. Ensaio de perda d'água sob pressão

Como descrito na tabela 8 foram realizados ensaios de perda d'água sob pressão (E.P.A.) em sete furos de sonda.

Abaixo estão destacados dois trechos da sondagem SM-103 com características bastante distintas de permeabilidade. O trecho destacado na foto 7 (de 5,0 a 8,0 metros) apresentou permeabilidade H2, e na foto 8 (17,0 a 20,0 metros) a permeabilidade foi H5.





Foto 7 - Testemunho de arenito fino C2, F2 e permeabilidade H2



Foto 8 - Testemunho de arenito fino C4, F4 e permeabilidade H5.

Sabendo que ambos os trechos são descritos como arenitos de granulação fina, pouco friáveis e de textura maciça, é possível, então, atribuir essa diferença de permeabilidade ao grau de coerência e fraturamento observado em cada trecho.



A tabela 10 mostra o resultado dos ensaios realizados nas sondagens próximas ao eixo da barragem. Também estão apresentados os trechos ensaiados em cada sondagem.

**Tabela 10 – Resultado dos ensaios de perda d'água**

| Sondagem | Ensaio | Trecho ensaiado (m) | Condutividade Hidráulica |
|----------|--------|---------------------|--------------------------|
| SM - 101 | 1      | 5 a 8               | H2                       |
|          | 2      | 8 a 11              | H2                       |
| SM - 103 | 1      | 2 a 5               | H2                       |
|          | 2      | 5 a 8               | H2                       |
|          | 3      | 8 a 11              | H2                       |
|          | 4      | 11 a 14             | H2                       |
|          | 5      | 14 a 17             | H2                       |
|          | 6      | 17 a 20             | H5 (vazão total)         |
| SM - 104 | 1      | 6,1 a 9,1           | H2                       |
|          | 2      | 9,1 a 12,1          | H2                       |
|          | 3      | 12,1 a 15,1         | H2                       |
|          | 4      | 15,1 a 18,1         | H2                       |
| SM - 107 | 1      | 3 a 6               | H2                       |
|          | 2      | 6 a 9               | H2                       |
|          | 3      | 9 a 12              | H5 (vazão total)         |
|          | 4      | 12 a 15             | H2                       |
| SM - 111 | 1      | 2,5 a 5,5           | H1                       |
|          | 2      | 5,5 a 8,5           | H2                       |
|          | 3      | 8,5 a 10            | H1                       |
| SM - 112 | 1      | 18 a 21             | H5 (vazão total)         |
| SM - 113 | 1      | 5 a 8               | H1 (vazão zero)          |
|          | 2      | 8 a 11              | H1 (vazão zero)          |
|          | 3      | 11 a 14             | H1 (vazão zero)          |
|          | 4      | 14 a 17             | H1 (vazão zero)          |
|          | 5      | 17 a 20             | H1 (vazão zero)          |

O anexo 6 mostra a apresentação do resultado dos ensaios na forma de gráficos de carga efetiva *versus* vazão, exceto para aqueles trechos que apresentaram vazão total ou nula.



### 6.3. Ensaio de resistência à compressão pontual

Na tabela 11 estão dispostos os resultados dos ensaios de resistência à compressão pontual. Como descrito, cada testemunho foi dividido em quatro amostras (A, B, C e D) de aproximadamente 7,5 cm de altura cada. Os ensaios foram realizados em sentidos diferentes, sendo cinco no sentido diametral e sete no sentido do eixo do testemunho. Na tabela 10 constam a carga de ruptura medida durante o ensaio, o índice *point load* calculado segundo os passos descritos no item 4.3 e a resistência à compressão simples, também calculada.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão pontual

| Amostra  |   | Sentido do ensaio | Carga de Ruptura (Newtons) | Índice Point load (Mpa) | Cálculo de Resistência à compressão Uniaxial (Mpa) | Resistência à compressão uniaxial média |
|----------|---|-------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| SM - 101 | A | Diametral         | 5000                       | 1,041                   | 20,82                                              | 19,28                                   |
|          | B | Diametral         | 4000                       | 0,833                   | 16,65                                              |                                         |
|          | C | Eixo              | 6000                       | 1,108                   | 22,17                                              |                                         |
|          | D | Eixo              | 5000                       | 0,874                   | 17,48                                              |                                         |
| SM - 103 | A | Eixo              | 11000                      | 2,006                   | 40,12                                              | 40,70                                   |
|          | B | Diametral         | 8000                       | 1,665                   | 33,31                                              |                                         |
|          | C | Eixo              | 12000                      | 2,097                   | 41,95                                              |                                         |
|          | D | Eixo              | 13000                      | 2,371                   | 47,41                                              |                                         |
| SM - 104 | A | Diametral         | 5000                       | 1,041                   | 20,82                                              | 29,82                                   |
|          | B | Diametral         | 8000                       | 1,665                   | 33,31                                              |                                         |
|          | C | Eixo              | 10000                      | 1,766                   | 35,32                                              |                                         |
|          | D | Eixo              | 5000                       | 0,736                   | 14,73                                              | Descartado                              |



A foto 9 mostra as amostras referentes a cada testemunho após a realização do ensaio. É possível observar que a amostra 104 – D apresentou uma ruptura irregular, e que não poderá ser considerada sendo, por isso, descartada.

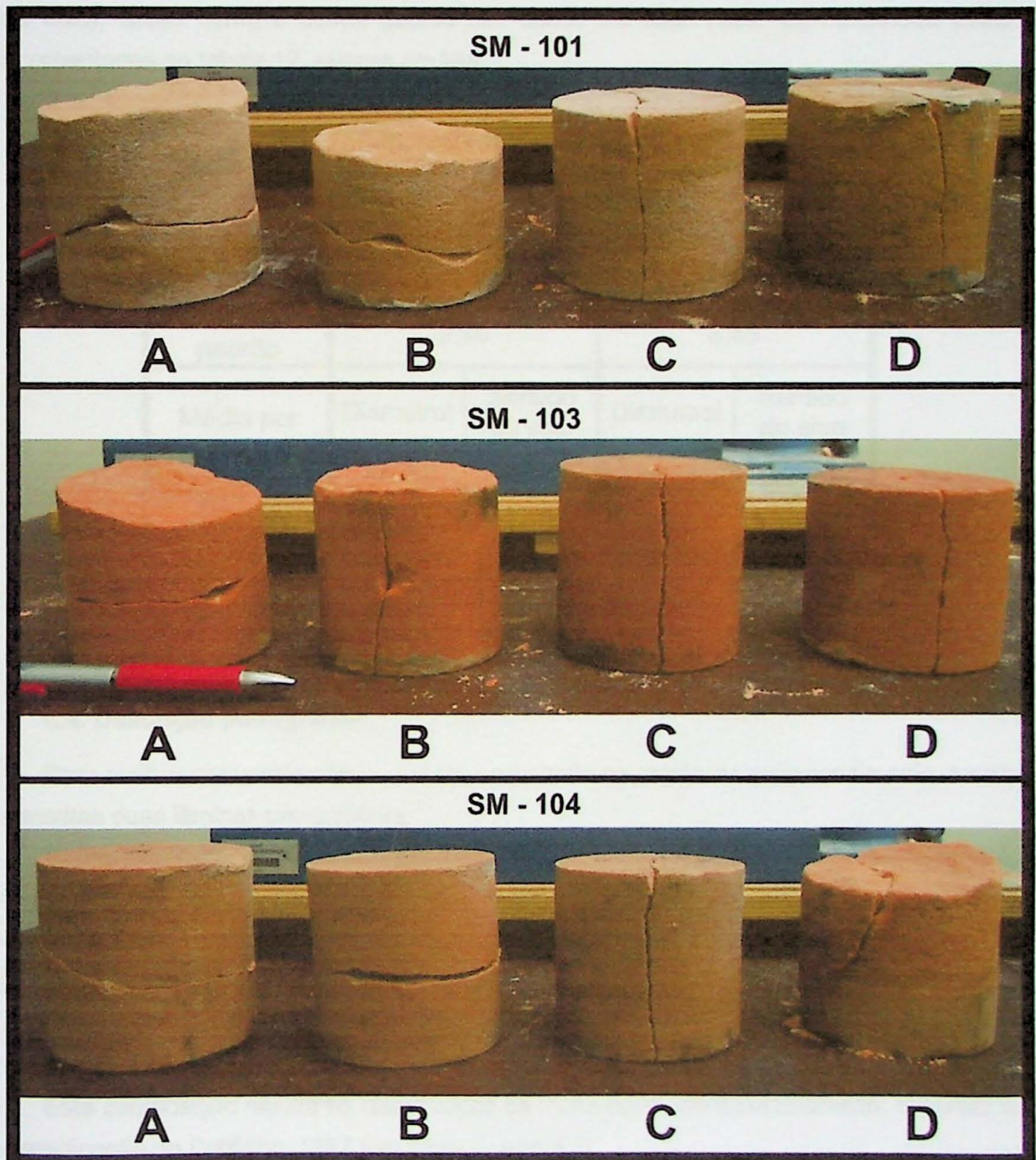


Foto 9 - Amostras ensaiadas



Para o cálculo da resistência média, devem ser consideradas as amostras de características semelhantes. Assim, foram calculadas as médias para as amostras 103 e 104, de coerência C3 e para a sondagem 101, de coerência C2. Também é interessante obter a média das resistências calculadas para cada tipo de ensaio (diametral ou no sentido do eixo), assim como o desvio padrão dos dados em cada caso. Os resultados estão apresentados na tabela 12, sempre em Mpa.

**Tabela 12 – Dados estatísticos das resistências calculadas**

|                          | Amostras C2 |                 | Amostras C3 |                 |
|--------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|
| Média geral              | 19,28       |                 | 36,03       |                 |
| Desvio padrão            | 2,64        |                 | 8,45        |                 |
| Média por tipo de ensaio | Diametral   | Sentido do eixo | Diametral   | Sentido do eixo |
|                          | 18,74       | 19,82           | 29,14       | 41,20           |
| Desvio padrão            | 2,94        | 3,32            | 7,21        | 5,00            |

#### 6.4. Descrição petrográfica

Para melhor caracterização do arenito encontrado na região do empreendimento, foram descritas duas lâminas petrográficas.

Como esperado, as duas lâminas apresentaram características bastante semelhantes, tanto em sua composição quanto textura. A amostra SM-101-A é composta por grãos de quartzo (90%), minerais opacos (cerca de 5%), e minerais acessórios. Os grãos de quartzo possuem tamanhos de, em média 0,5 mm, com clastos esparsos chegando a 2,0 mm. Ambos sub-arredondados. A rocha apresenta textura clástica e é sustentada pelo arcabouço da matriz fina e silicática.

Esta composição resulta na classificação da rocha como um quartzo-arenito, segundo a classificação de Pettijohn, 1987 (ver figura 1, item 3.1).

Em geral a amostra SM-104-B apresenta características bastante semelhantes, exceto pelo tamanho dos grãos que, em média, possuem 0,2 mm. Também com clastos esparsos de até 2,0 mm além de uma concentração de até 10% de opacos. As fotos 10 e 11 mostram a característica geral encontrada nas amostras ao microscópio.



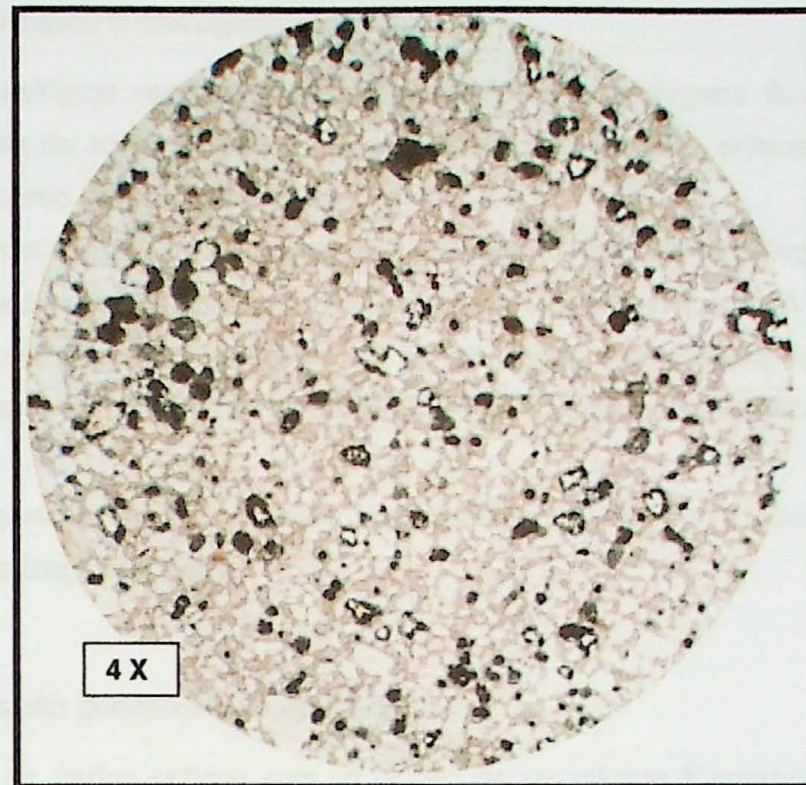


Foto 10 - Aspecto geral da lâmina SM-104-B (nicóis paralelos)

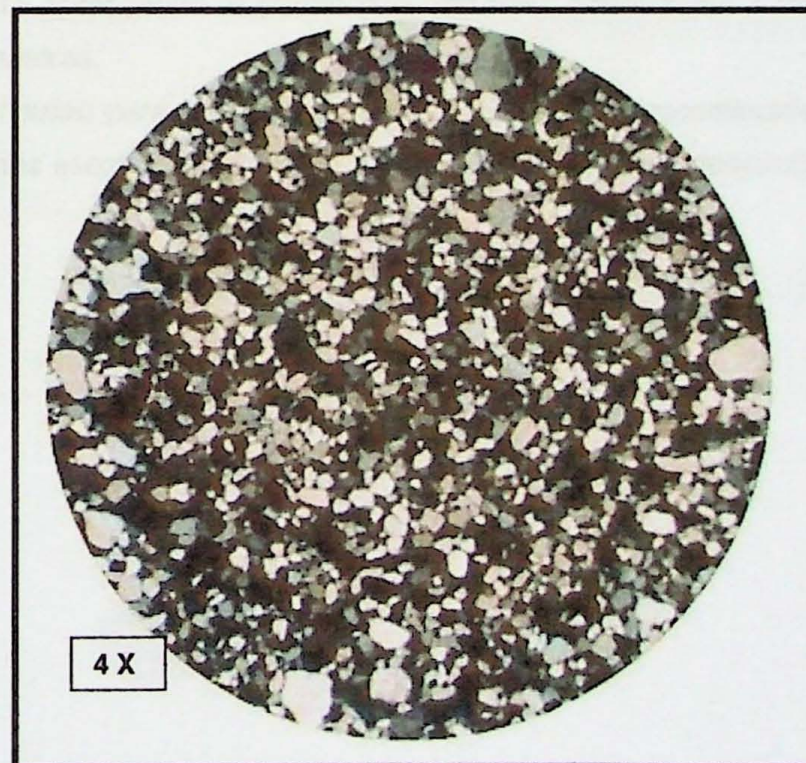


Foto 11 - Aspecto geral da lâmina SM-104-B (nicóis cruzados)



### **6.5. Perfil geológico e hidrogeológico**

O perfil geológico resultante da interpretação das sondagens é apresentado no anexo 7. A camada de solo foi dividida entre aluvião e solo residual, enquanto o arenito foi diferenciado de acordo com sua coerência.

A divisão nas camadas de solo aparece também no perfil hidrogeológico (anexo 8), e suas permeabilidades estão apresentadas na tabela inclusa no perfil. A partir de onde encontra-se a rocha sã, estão apresentados os resultados dos ensaios de perda d'água, sendo que foi feita a correlação lateral de camadas de mesma permeabilidade sempre que possível.

As sondagens estão indicadas no perfil através de seus log's. Suas localizações, assim como a localização do perfil.

### **6.6. Classificação geomecânica do maciço**

Utilizando os dados obtidos com o ensaio de resistência à compressão pontual é possível, ainda que com um número limitado de trechos, fazer a classificação do maciço quanto às suas características geomecânicas, utilizando o método RMR de Bieniawski. As tabelas 13, 14 e 15 apresentam os parâmetros utilizados, assim como a classe do maciço, separados por amostras.

O valor atribuído para o espaçamento e condição das descontinuidades foi sempre zero, pois os trechos escolhidos para os ensaios não apresentavam descontinuidades.



Tabela 13 – Classificação geomecânica da sondagem SM – 101

| SM - 101 |                                                 |                                        |             |           |           |            |
|----------|-------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------|-----------|-----------|------------|
| A        | Parâmetros                                      |                                        | Trechos (m) |           |           |            |
|          |                                                 |                                        | 4,0 - 5,0   | 5,0 - 6,5 | 6,5 - 9,5 | 9,5 - 11,0 |
| 1        | Resistência da rocha intacta                    | Resistência à Compressão Simples (MPa) | 19,28       | 19,28     | 19,28     | 19,28      |
|          | PESO                                            |                                        | 2           | 2         | 2         | 2          |
| 2        | RQD (%)                                         |                                        | 50          | 93        | 98        | 86         |
|          | PESO                                            |                                        | 13          | 20        | 20        | 17         |
| 3        | ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES (m)            |                                        | 0,12        | 0,30      | 1,00      | 0,20       |
|          | PESO                                            |                                        | 8           | 10        | 15        | 10         |
| 4        | CONDIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES                   |                                        |             |           |           |            |
|          | PESO                                            |                                        | 10          | 20        | 30        | 25         |
| 5        | ÁGUA SUBTERRÂNEA                                |                                        | seco        | seco      | seco      | seco       |
|          | PESO                                            |                                        | 15          | 15        | 15        | 15         |
| Σ        |                                                 |                                        | 48          | 67        | 82        | 69         |
| B        | AJUSTE DEVIDO A ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES |                                        | -2          | -2        | -2        | -2         |
| C        | SOMATÓRIA DOS PESOS                             |                                        | 46          | 65        | 80        | 67         |
| D        | CLASSE DO MACIÇO                                |                                        | III         | II        | II        | II         |



Tabela 14 – Classificação geomecânica da sondagem SM – 103

| SM - 103   |   |                                                 |             |             |             |             |             |             |             |  |  |
|------------|---|-------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|
| Parâmetros |   |                                                 | Trechos (m) |             |             |             |             |             |             |  |  |
|            |   |                                                 | 1,0 - 2,0   | 2,0 - 3,5   | 3,5 - 5,0   | 5,0 - 8,0   | 8,0 - 9,5   | 9,5 - 15,5  | 15,5 - 20,0 |  |  |
| A          | 1 | Resistência da rocha intacta                    | 40,70       | 40,70       | 40,70       | 40,70       | 40,70       | 40,70       | 40,70       |  |  |
|            |   | Resistência à Compressão Simples (MPa)          | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           |  |  |
|            |   | PESO                                            | 55          | 96          | 64          | 95          | 88          | 99          | 34          |  |  |
| 2          |   | RQD (%)                                         | 13          | 20          | 13          | 20          | 17          | 20          | 8           |  |  |
|            |   | PESO                                            | 0,20        | 0,75        | 0,15        | 0,43        | 0,20        | 0,30        | 0,11        |  |  |
|            |   | ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES (m)            | 10          | 15          | 8           | 10          | 10          | 10          | 8           |  |  |
| 4          |   | CONDIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES                   |             |             |             |             |             |             |             |  |  |
|            |   | PESO                                            | 25          | 25          | 25          | 25          | 25          | 25          | 20          |  |  |
|            |   | ÁGUA SUBTERRÂNEA                                | pouco úmido | pouco úmido | pouco úmido | pouco úmido | pouco úmido | pouco úmido | pouco úmido |  |  |
| 5          |   | PESO                                            | 10          | 10          | 10          | 10          | 10          | 10          | 10          |  |  |
|            |   |                                                 | 62          | 74          | 60          | 69          | 66          | 69          | 50          |  |  |
|            |   | Σ                                               |             |             |             |             |             |             |             |  |  |
| B          |   | AJUSTE DEVIDO A ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES | -2          | -2          | -2          | -2          | -2          | -2          | -2          |  |  |
|            |   |                                                 |             |             |             |             |             |             |             |  |  |
|            |   |                                                 |             |             |             |             |             |             |             |  |  |
| C          |   | SOMATÓRIA DOS PESOS                             | 60          | 72          | 58          | 67          | 64          | 67          | 48          |  |  |
|            |   |                                                 |             |             |             |             |             |             |             |  |  |
|            |   |                                                 |             |             |             |             |             |             |             |  |  |
| D          |   | CLASSE DO MACIÇO                                | II          | II          | III         | II          | II          | II          | III         |  |  |
|            |   |                                                 |             |             |             |             |             |             |             |  |  |
|            |   |                                                 |             |             |             |             |             |             |             |  |  |



Tabela 15 – Classificação geomecânica da sondagem SM – 104

| SM - 104 |                                                 |                                        |             |             |             |             |             |             |             |  |  |
|----------|-------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|
| A        | Parâmetros                                      |                                        | Trecho (m)  |             |             |             |             |             |             |  |  |
|          | Resistência da rocha intacta                    | Resistência à Compressão Simples (MPa) | 1,0 - 3,1   | 3,1 - 5,35  | 5,35 - 9,6  | 9,6 - 12,1  | 12,1 - 15,1 | 15,1 - 18,1 | 18,1 - 20,1 |  |  |
| 1        |                                                 | PESO                                   | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           |  |  |
| 2        |                                                 | RQD (%)                                | 70          | 34          | 100         | 80          | 97          | 53          | 30          |  |  |
|          |                                                 | PESO                                   | 13          | 8           | 20          | 17          | 20          | 13          | 8           |  |  |
| 3        |                                                 | ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES (m)   | 0,18        | 0,10        | 0,85        | 0,21        | 0,20        | 0,14        | 0,10        |  |  |
| 4        |                                                 | PESO                                   | 8           | 8           | 15          | 10          | 10          | 8           | 8           |  |  |
|          |                                                 | CONDIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES          | -           | -           | -           | -           | -           | -           | -           |  |  |
| 5        |                                                 | PESO                                   | 20          | 20          | 25          | 20          | 20          | 20          | 0           |  |  |
|          |                                                 | ÁGUA SUBTERRÂNEA                       | pouco úmido | pouco úmido | pouco úmido | pouco úmido | pouco úmido | pouco úmido | percolação  |  |  |
|          |                                                 | PESO                                   | 10          | 10          | 10          | 10          | 10          | 10          | 0           |  |  |
|          |                                                 | Σ                                      | 55          | 50          | 74          | 61          | 64          | 55          | 20          |  |  |
| B        | AJUSTE DEVIDO A ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES |                                        | -2          | -2          | -2          | -2          | -2          | -2          | -2          |  |  |
| C        | SOMATÓRIA DOS PESOS                             |                                        | 53          | 48          | 72          | 59          | 62          | 53          | 18          |  |  |
| D        | CLASSE DO MACIÇO                                |                                        | III         | III         | II          | III         | II          | III         | V           |  |  |



## 7. Interpretação dos resultados

Os resultados apresentados para os ensaios de resistência à compressão uniaxial mostram que houve grande variação nos valores de resistência obtidos. O valor do desvio padrão para cada grupo de amostras mostra que há uma grande dispersão dos dados, o que pode ser observado na figura 10. Trata-se de um gráfico de dispersão dos valores de resistência obtidos. No eixo das ordenadas foram colocados apenas o número de cada amostra, de modo a agrupá-las por testemunhos.

Uma possível explicação para o alto valor do desvio padrão é o número reduzido de amostras disponível para o ensaio, ainda assim, é possível observar que amostras de mesmo testemunho apresentam valores semelhantes entre si.

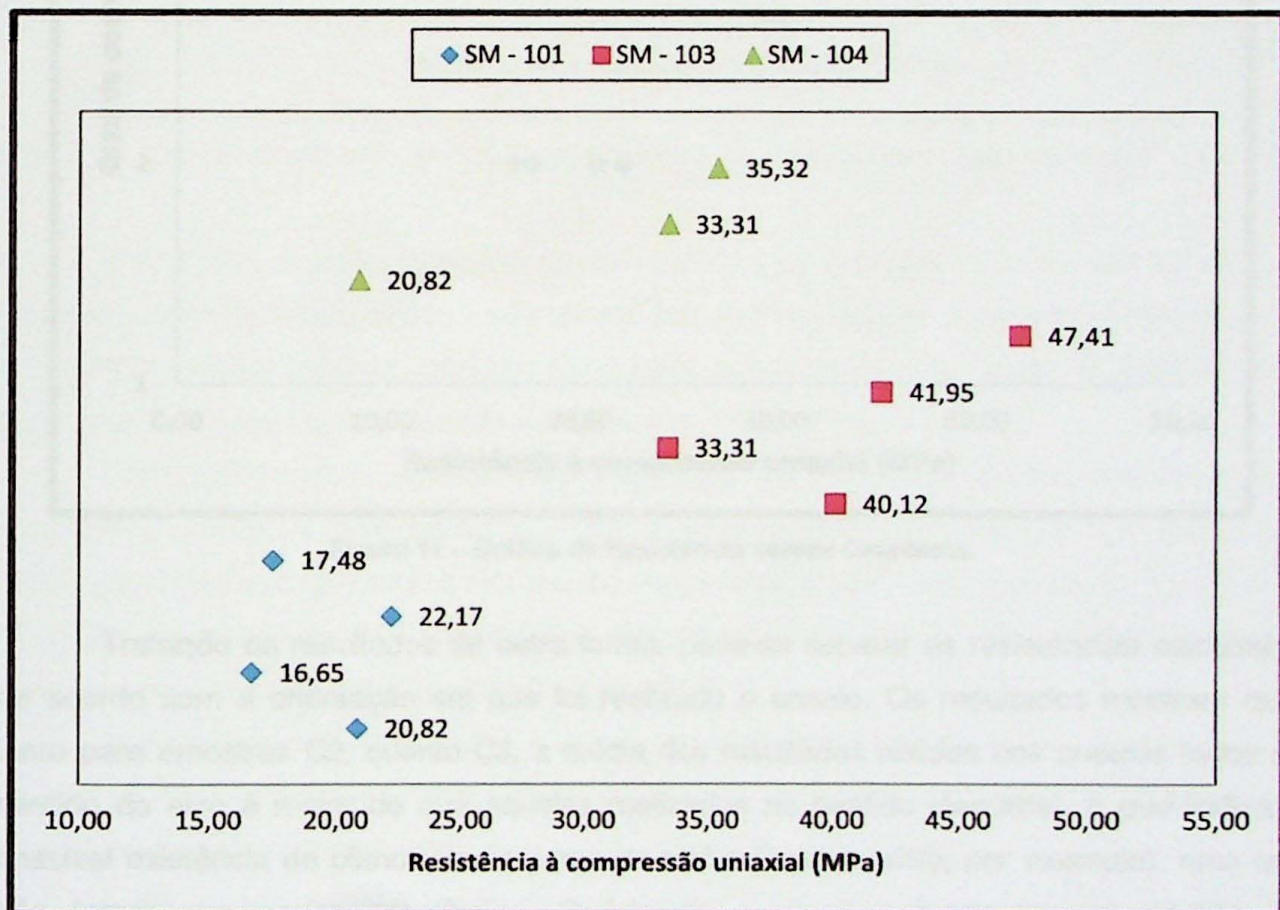


Figura 10 - Gráfico de dispersão das resistências obtidas.

Quando comparamos os resultados obtidos, em relação à coerência de cada amostra, é possível notar um agrupamento dos valores, para cada valor de coerência. (Figura 11).



Outra característica importante é o fato das amostras de coerência C2 apresentarem valores de resistência menores do que aquelas de coerência C3, o contrário do esperado. Isto indica que outra característica, como a umidade de cada testemunho, pode ter influenciado no resultado final.

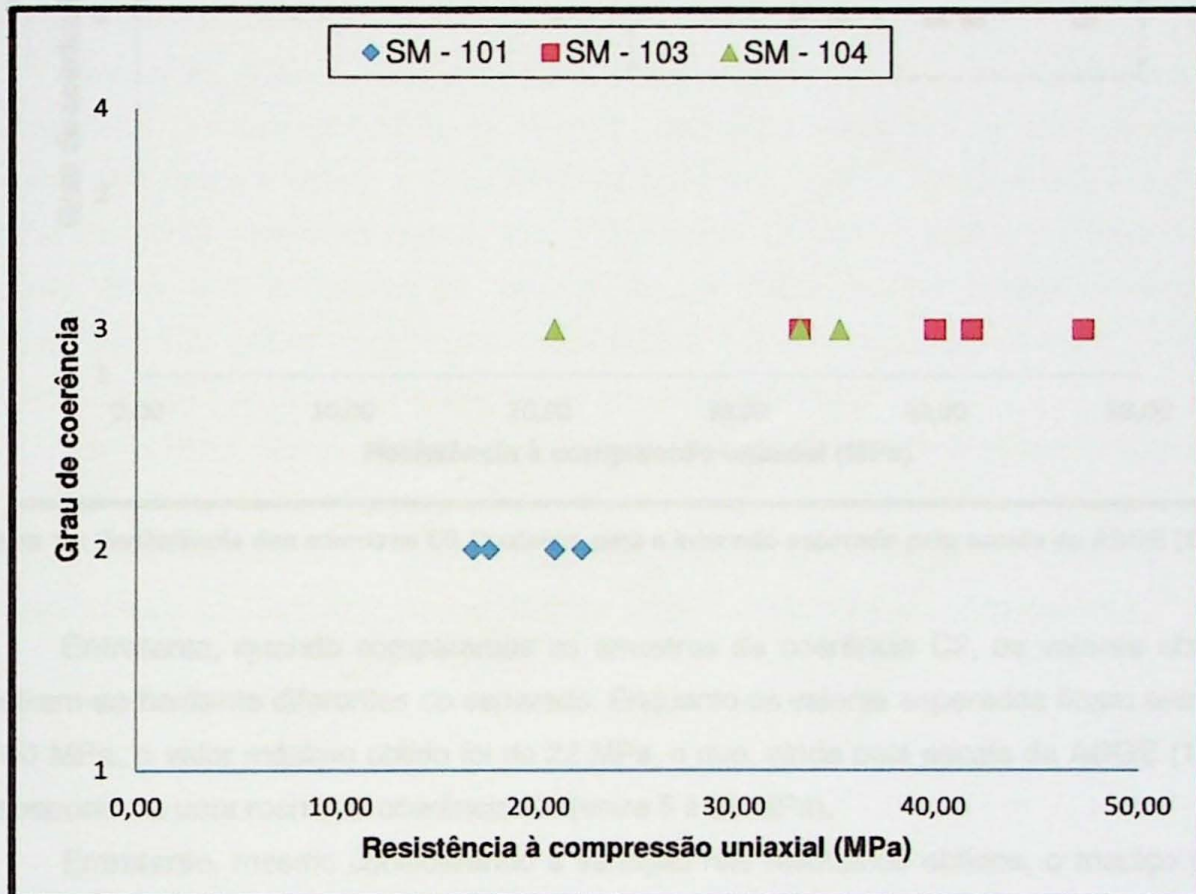


Figura 11 – Gráfico de Resistência *versus* Coerência.

Tratando os resultados de outra forma, pode-se separar as resistências calculadas de acordo com a orientação em que foi realizado o ensaio. Os resultados mostram que, tanto para amostras C2, quanto C3, a média dos resultados obtidos nos ensaios feitos no sentido do eixo é maior do que aqueles realizados no sentido diametral, o que indica a possível existência de planos de fraqueza na rocha (acamamento, por exemplo), mas que não foram observados em lâmina. O fato de o maciço apresentar um padrão de fraturamento sub-horizontal pode também ser um indicativo da existência de um acamamento nesta direção.

Dentro da escala proposta pela ABGE (1983), rochas de coerência C3, apresentam valores de resistência à compressão uniaxial variando entre 25 e 50 MPa, valores condizentes com os obtidos no ensaio pontual. O quadro em destaque no gráfico representa a área dos valores de resistência esperados para rochas de coerência C3.



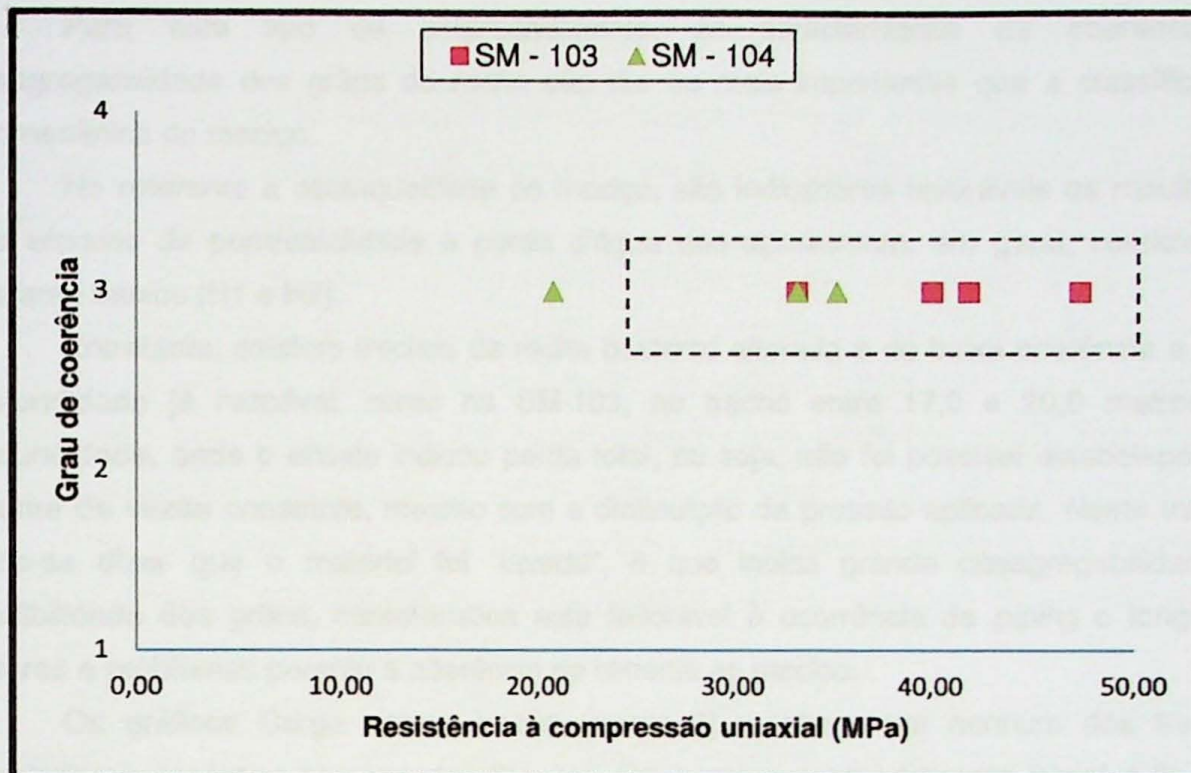


Figura 12: Resistência das amostras C3. Destaque para o intervalo esperado pela escala da ABGE (1983).

Entretanto, quando comparamos as amostras de coerência C2, os valores obtidos mostram-se bastante diferentes do esperado. Enquanto os valores esperados ficam entre 50 e 100 MPa, o valor máximo obtido foi de 22 MPa, o que, ainda pela escala da ABGE (1983) corresponde a uma rocha de coerência C4 (entre 5 e 25 MPa).

Entretanto, mesmo considerando a variação nos resultados obtidos, o maciço pode ser classificado como rocha branda, dentro da escala proposta por Vaz (1996) e a ISRM. A média geral dos valores obtidos está dentro do limite para as rochas brandas (entre 10 e 30 Mpa). Se tomarmos apenas a média dos valores da SM – 103, o valor obtido classifica o maciço como “rochas média” (entre 30 e 100 MPa).

Trabalhando os dados para a obtenção do índice RMR da rocha, fica claro que, apesar de tratar-se de uma rocha branda, o maciço apresenta a maioria de seus trechos classificados como bom ou regular (classes II e III, respectivamente).

É necessário se levar em conta, no entanto, o fato do sistema RMR ser um método de classificação geomecânico por vezes pouco adequado às rochas brandas, fazendo com que estas sejam classificadas em classes melhores do que realmente seriam se levados em conta outros parâmetros em função do tipo litológico (Muzzi, 2007). Entretanto, pode-se considerar os resultados obtidos como satisfatórios e condizentes com a realidade do maciço.



Para este tipo de empreendimento, as características de coerência e desagregabilidade dos grãos da rocha são tão ou mais importantes que a classificação geomecânica do maciço.

No referente à estanqueidade do maciço, são indicadores favoráveis os resultados dos ensaios de permeabilidade e perda d'água que apresentam, em geral, coeficientes bastante baixos (H1 e H2).

Entretanto, existem trechos de rocha bastante alterada e de baixa coerência a uma profundidade já razoável, como na SM-103, no trecho entre 17,0 e 20,0 metros de profundidade, onde o ensaio indicou perda total, ou seja, não foi possível estabelecer um volume de vazão constante, mesmo com a diminuição da pressão aplicada. Neste trecho, pode-se dizer que o material foi "lavado", o que indica grande desagregabilidade e erodibilidade dos grãos, característica esta favorável à ocorrência de *piping* o longo de fraturas e problemas perante a aderência de cimento ao maciço.

Os gráficos Carga *versus* Vazão (anexo 6) mostram que nenhum dos trechos ensaiados apresentou abertura das fissuras. Em geral, o comportamento inicial e final foi sempre o mesmo, sendo que os três estágios intermediários apresentaram comportamentos de fluxo turbulento e deformação das fissuras, ambos com fechamento das mesmas.



## 8. Conclusões

Considerando as características do maciço, pode-se considerar a área como apropriada para a construção da barragem desde que levados em conta alguns dos aspectos aqui levantados.

O ensaio de resistência à compressão pontual mostrou-se bastante adequado para ser utilizado neste tipo de empreendimento. Levando-se em consideração que, em muitas barragens de pequeno porte, a caracterização do maciço é feita com base apenas em tabelas, este ensaio é uma boa alternativa, inclusive pela rápida execução. Embora seja necessária uma população maior de amostras do que a apresentada nesta monografia.

Para este tipo de empreendimento, a rocha não apresenta, quanto a sua resistência mecânica, qualquer característica que torne obrigatória a implantação de tratamentos de alto custo, que poderiam inviabilizar a obra.

Em casos como este, as atenções devem estar mais voltadas para os problemas decorrentes da interação rocha - água, e também da interação do material do aterro da barragem com a água.

Neste sentido, levando-se em conta os resultados dos ensaios de perda d'água e permeabilidade, serão adotados no empreendimento algumas das medidas mencionadas nesta monografia, tais como:

- Construção do *cut-off*;
- Instalação de poços de alívio;
- Instalação de filtros;
- Implantação do *rip rap*.

O fato de existirem trechos de vazão total em profundidade, indica que houve grande abertura das fraturas, que pode ser consequência do carreamento de grãos. Nestes trechos, deve-se ressaltar a importância da potencial percolação com *piping* no maciço.

Importante notar também, a forma peculiar de alguns lagos na área do empreendimento. Sua formação deve ser avaliada cuidadosamente.

Pode-se concluir, então, que áreas com alto potencial hidrelétrico e situadas em arenitos, não precisam ser descartadas desde que o maciço seja bem caracterizado, trazendo segurança ao empreendimento e evitando, inclusive, tratamentos desnecessários.



## 9. Referências bibliográficas

ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. Ano desconhecido. Diretrizes para ensaios de perda d'água sob pressão. São Paulo, 16 p.

ABGE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. 1983. Métodos para a descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos. Tradução n° 12. 123 p.

ANEEL. Resolução n. 394, de 4 de dezembro de 1998, Diário Oficial, de 7 dez. 1998, seção 1, p. 45. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res1998394.pdf>. Acessado em 2 de julho de 2011

ASTM – American Society for Testing and Materials. 2002. Standard test method for determination of the point load strength index of rock. Designation: D 5731 – 02. Pensilvânia, 9 p.

BIENIAWSKI Z. T. 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering. John Wiley & Sons, Nova Iorque, 251 p.

CAMPOS J. O. 1981. Propriedades Geotécnicas e Comportamento Tecnológico de Arenitos da formação Caiuá. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da USP. 250 p.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 2006. Mapa geológico do estado do Mato Grosso, 1:1.000.000. Disponível em: <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>. Acessado em 13 de março de 2011.

HAWKINS, A.B. 1998. Aspects of rock strength, IAEG Bulletin, V. 57, nr. 1, p. 17-30.

MACIEL FILHO C. L. 1994. Introdução à geologia de engenharia. Editora da UFSM, Brasília, 284 p.

MARINOS P. & HOEK E. 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch, Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Vol. 60:85-92.

MASSAD F. 2003. Obras de terra: curso básico de geotecnia. Oficina de Textos, São Paulo, 170 p.

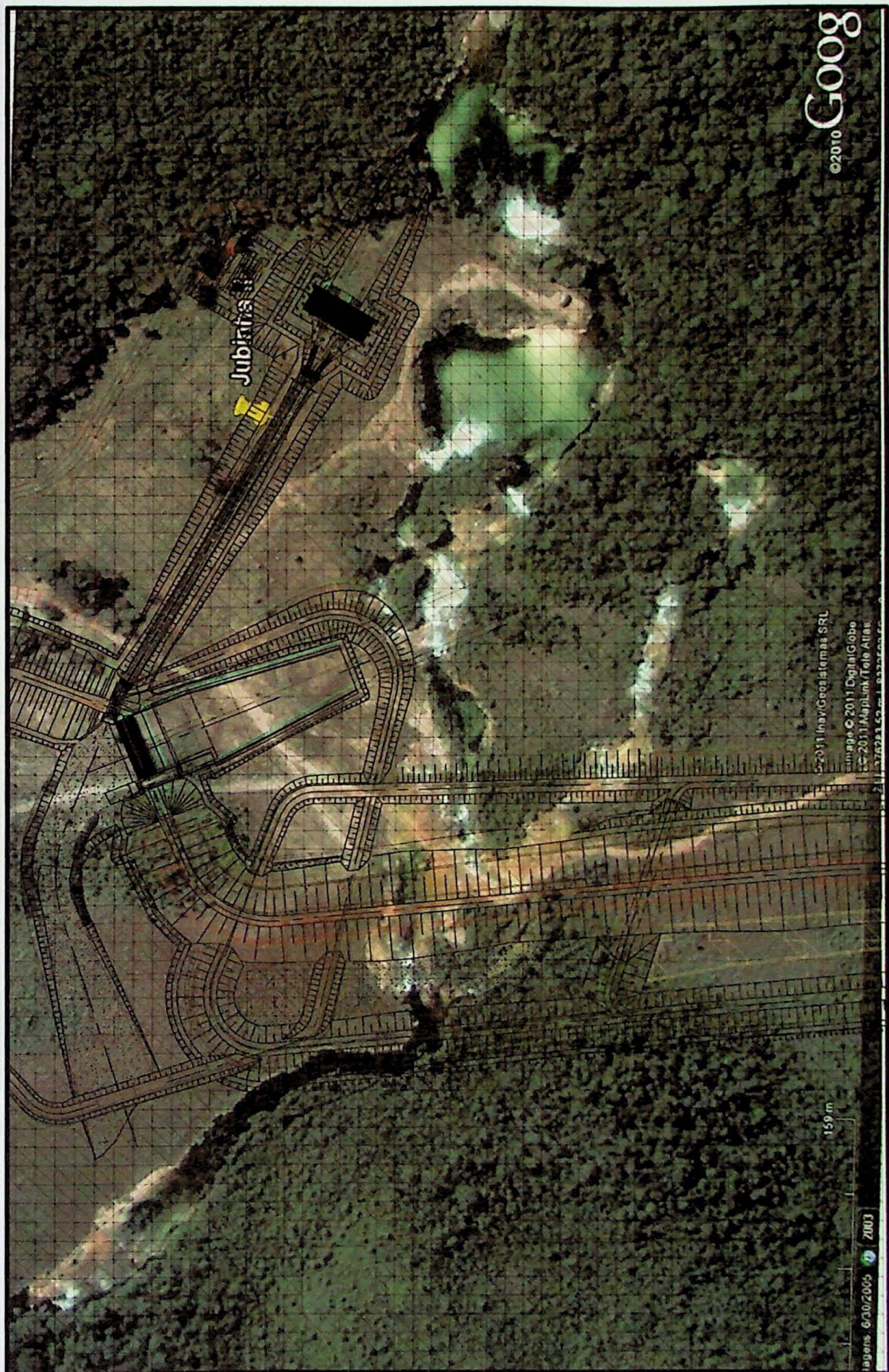


- MELLO V. F. B. & TEIXEIRA A. H. 1960. Mecânica de solos, Fundações e Obras de Terra. EESC Universidade de São Paulo, São Paulo. 205 p.
- MUZZI, T. O. 2007. Contribuição à classificação geomecânica de maciços rochosos utilizando o sistema RMR. Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências da USP. 67 p.
- OLIVEIRA, A. M. S. 1981, Estudo da percolação d'água em maciços rochosos para o projeto de grandes barragens. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da USP. 197 p.
- PETRI S & FÚLFARO V. J. 1983. Geologia do Brasil (Fanerozóico). EDUSP, São Paulo, 631 p.
- PETTIJOHN F.J., POTTER P.E., SIEVER R. 1987. Sand and Sandstone, Springer-Verlag, Berlin, 553 p.
- PINTO C. S. 2006. Curso Básico de Mecânica dos Solos. Oficina de Textos, São Paulo, 367 p.
- SADOWSKI. G.R. 2004 Elementos básicos de Geologia para engenharia civil-geotécnica, Capítulo 4 p. 209-300, in De Mello, V.F.B. Disponível em: <http://www.victorfbdemello.com.br/>, acessado em 7 mar 2011.
- SANTOS A. M. & BRITO S. N. A. 1998. Geologia de Engenharia. ABGE, São Paulo, 586 p.
- SOARES. L. 1991. Determinação do grau de coerência de rochas brandas. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da USP. 324 p.
- SUGUIO, K. 1980, Rochas sedimentares: propriedades, gênese, importância econômica. Edgard Blücher, São Paulo, 500 p.
- VALLEJO L. I. G., FERRER M. ORTUÑO L., OTEO C. 2002, Ingeniería Geológica. Editora Pearson Educación, Madrid, 744 p.
- VARGAS M. 1977. Introdução à Mecânica dos solos. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 509 p.
- VAZ, L. F. 1996. Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rochas em regiões tropicais. Solos e Rochas, v.19, n°2, p. 117-136.



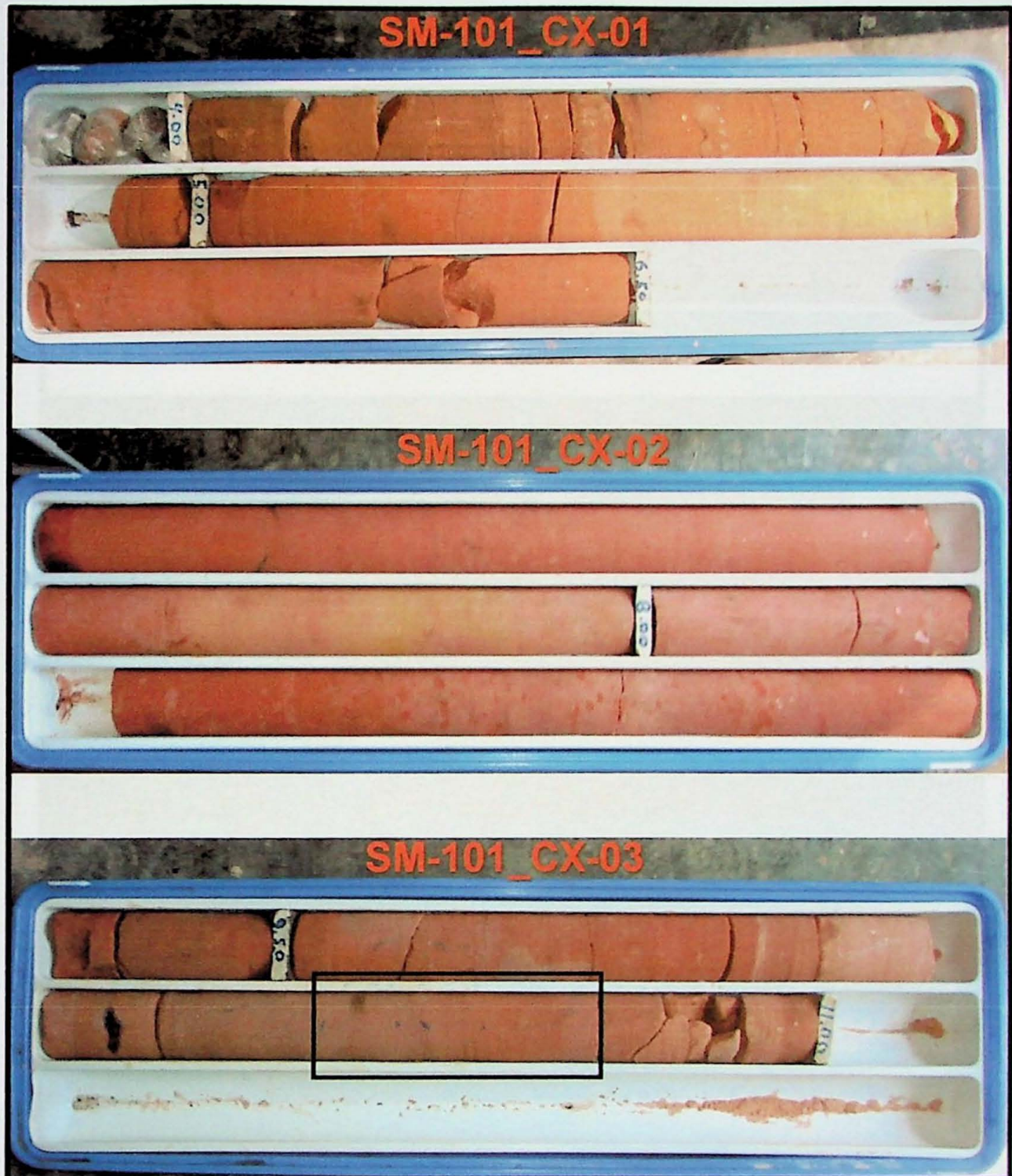
# ANEXOS





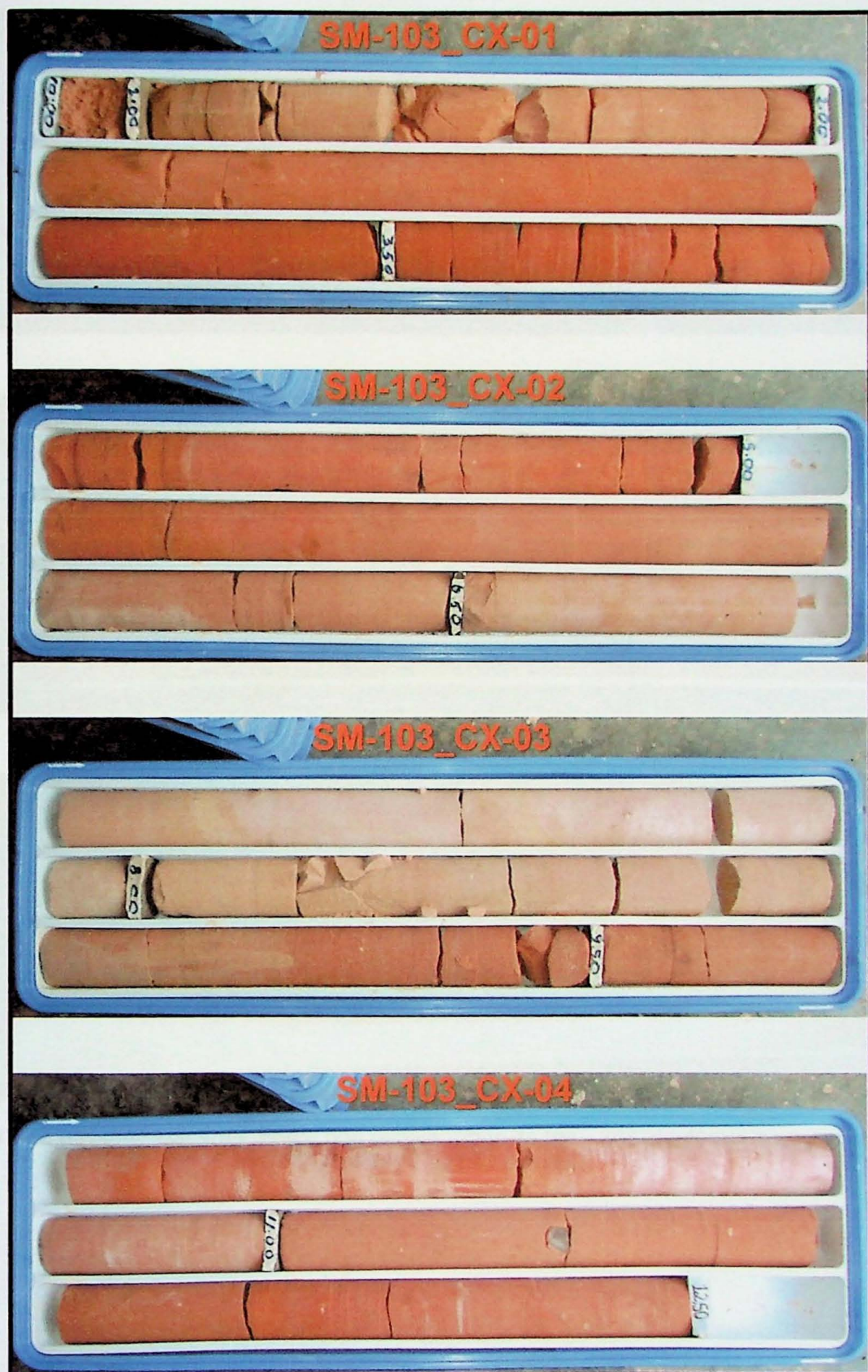
Anexo 1 - Imagem aérea com esquema do arranjo geral da barragem.





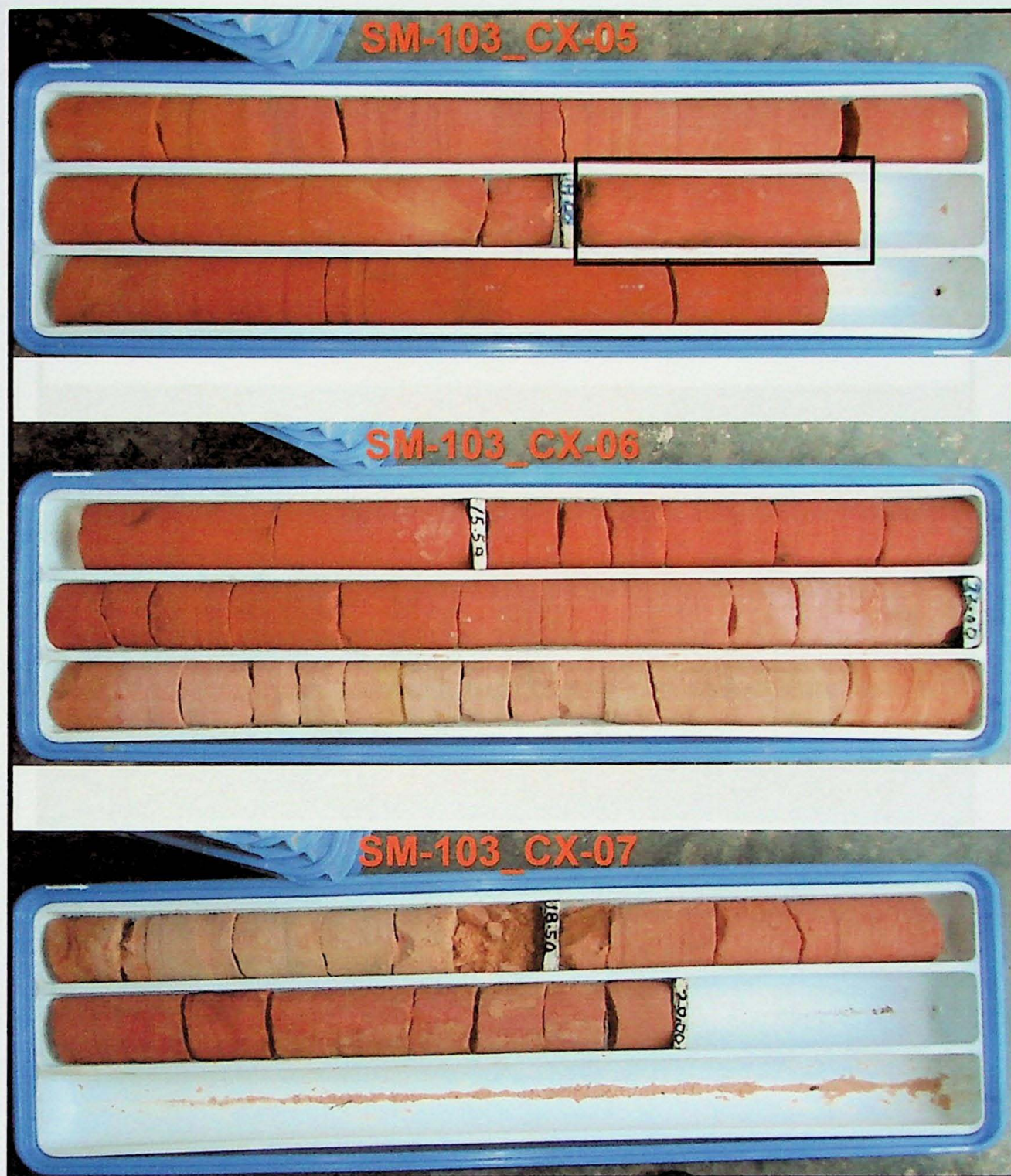
Anexo 2 - Fotos dos testemunhos da SM – 101 (destaque para o trecho utilizado no ensaio pontual).





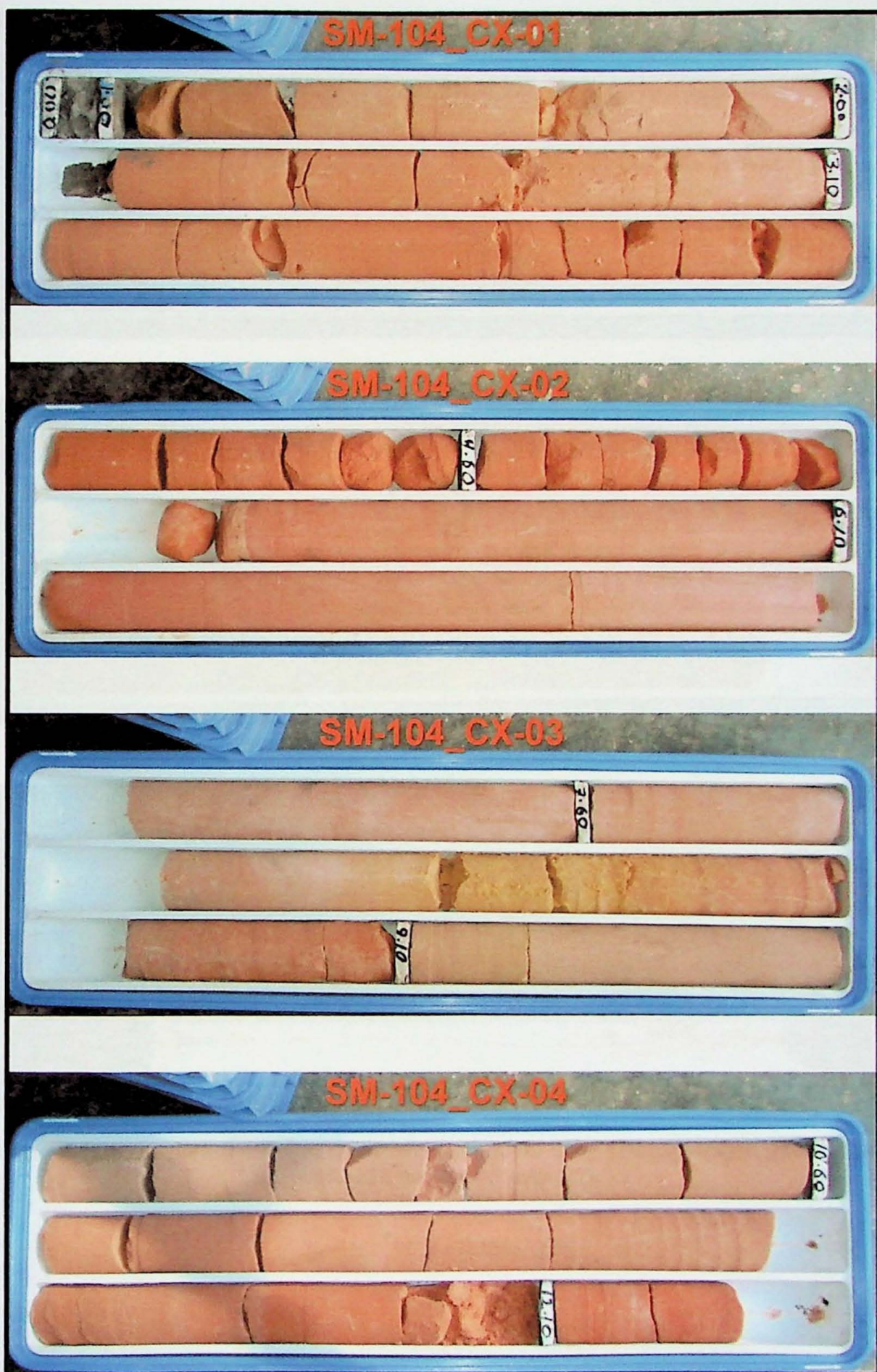
Anexo 3 - Fotos dos testemunhos da SM – 103.





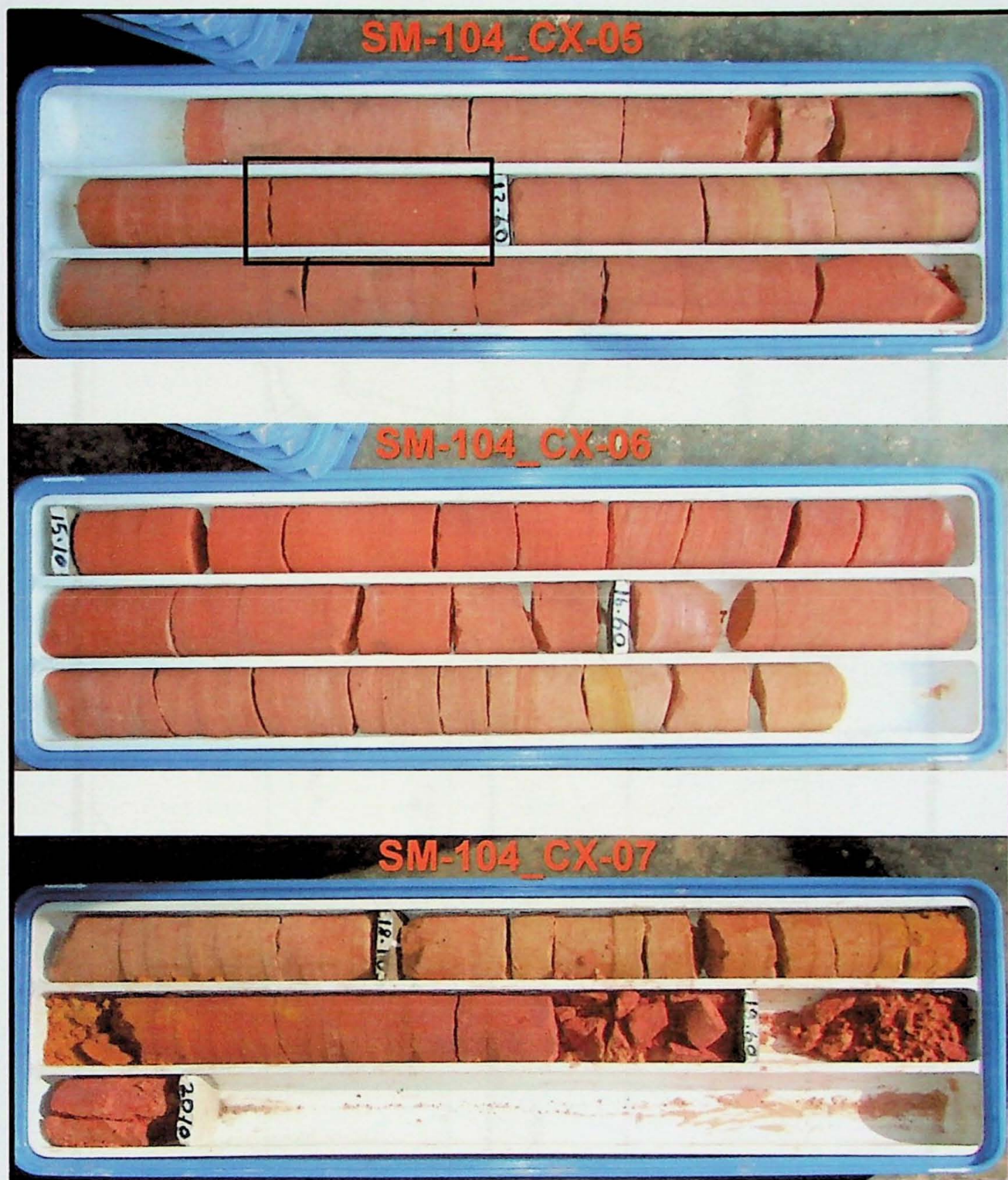
Anexo 3 (continuação) - Fotos dos testemunhos da SM – 103 (destaque para o trecho utilizado no ensaio pontual).





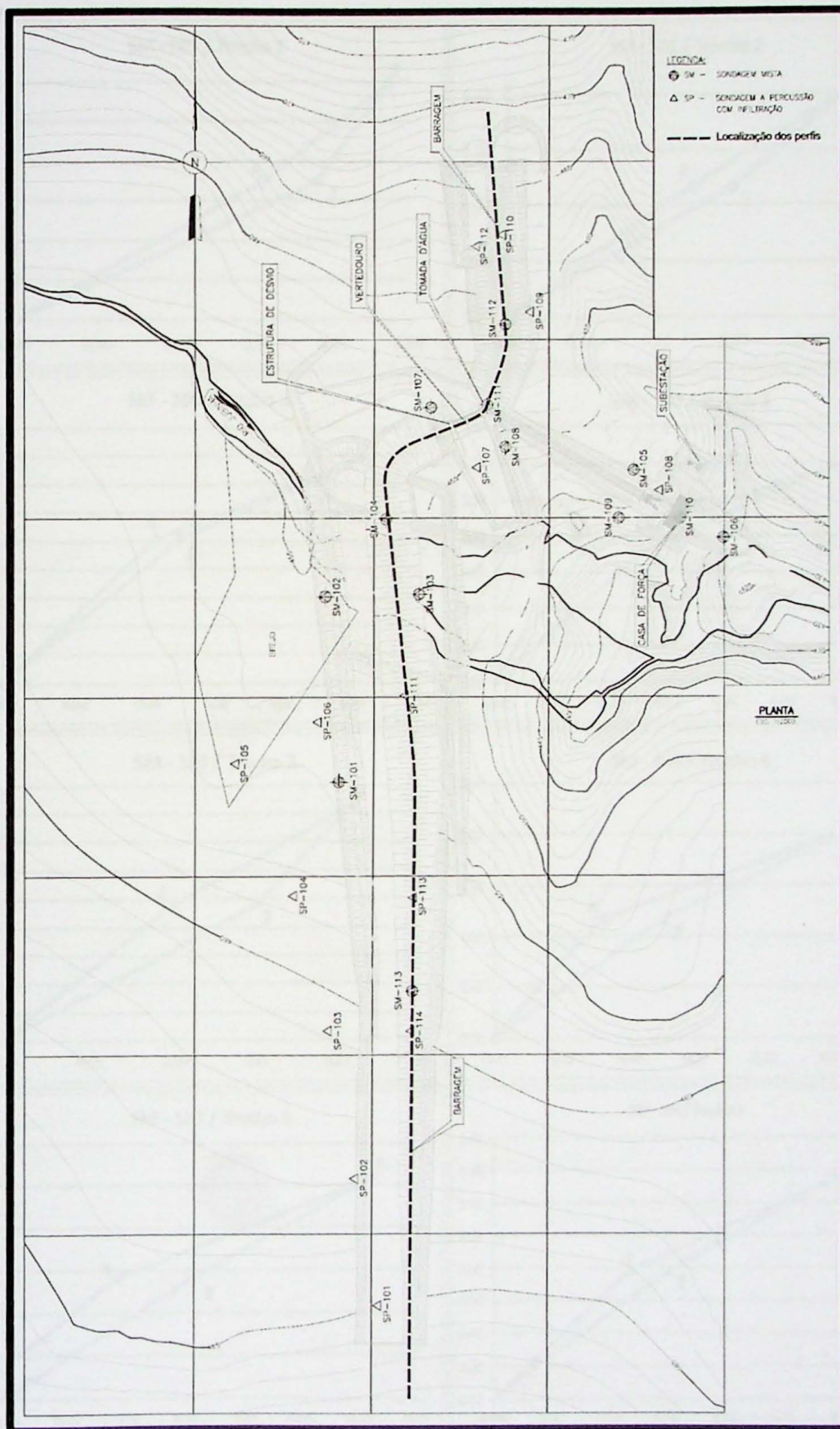
Anexo 4 - Fotos dos testemunhos da SM – 104.





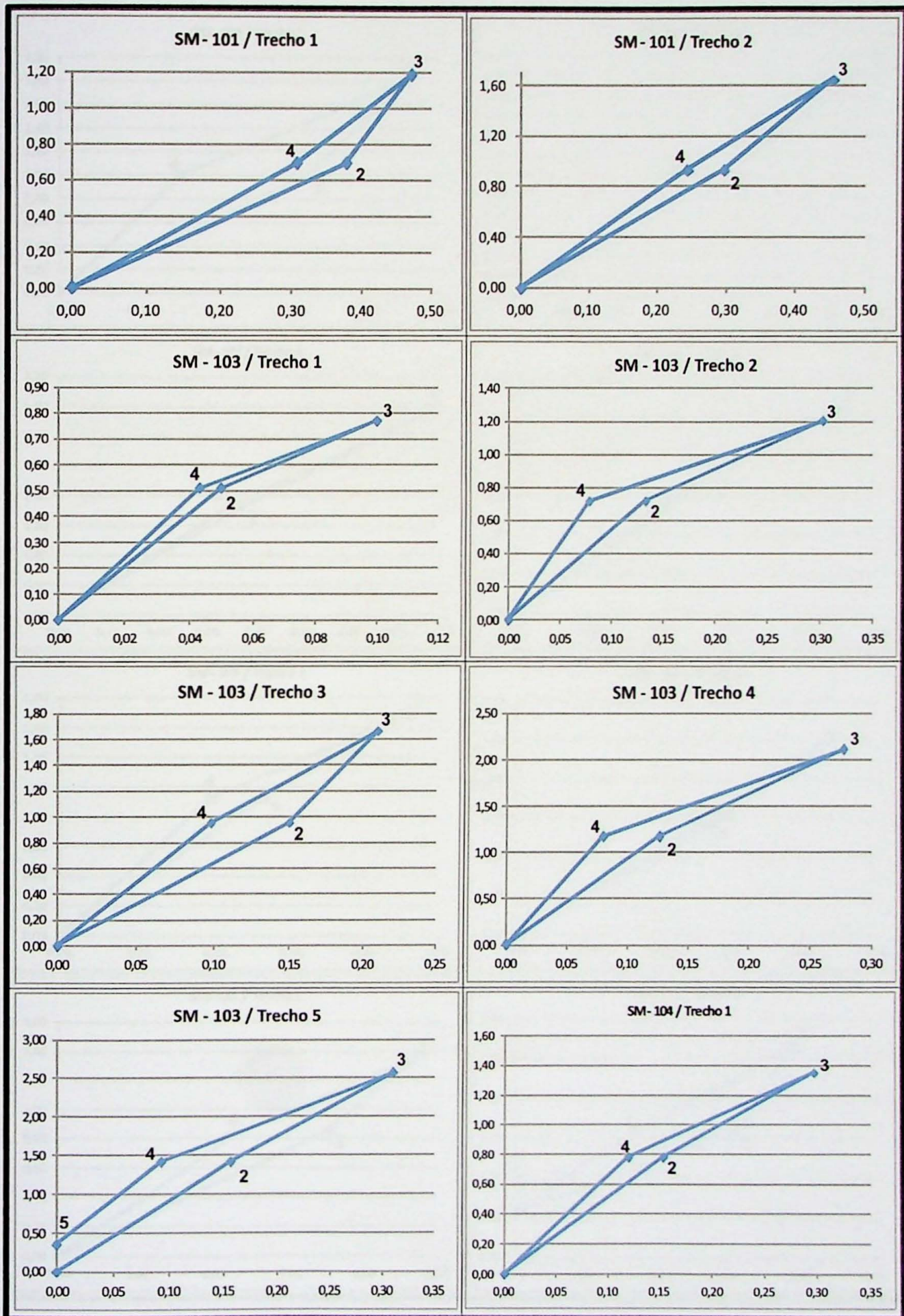
Anexo 4 (continuação) - Fotos dos testemunhos da SM – 104 (destaque para o trecho utilizado no ensaio pontual).





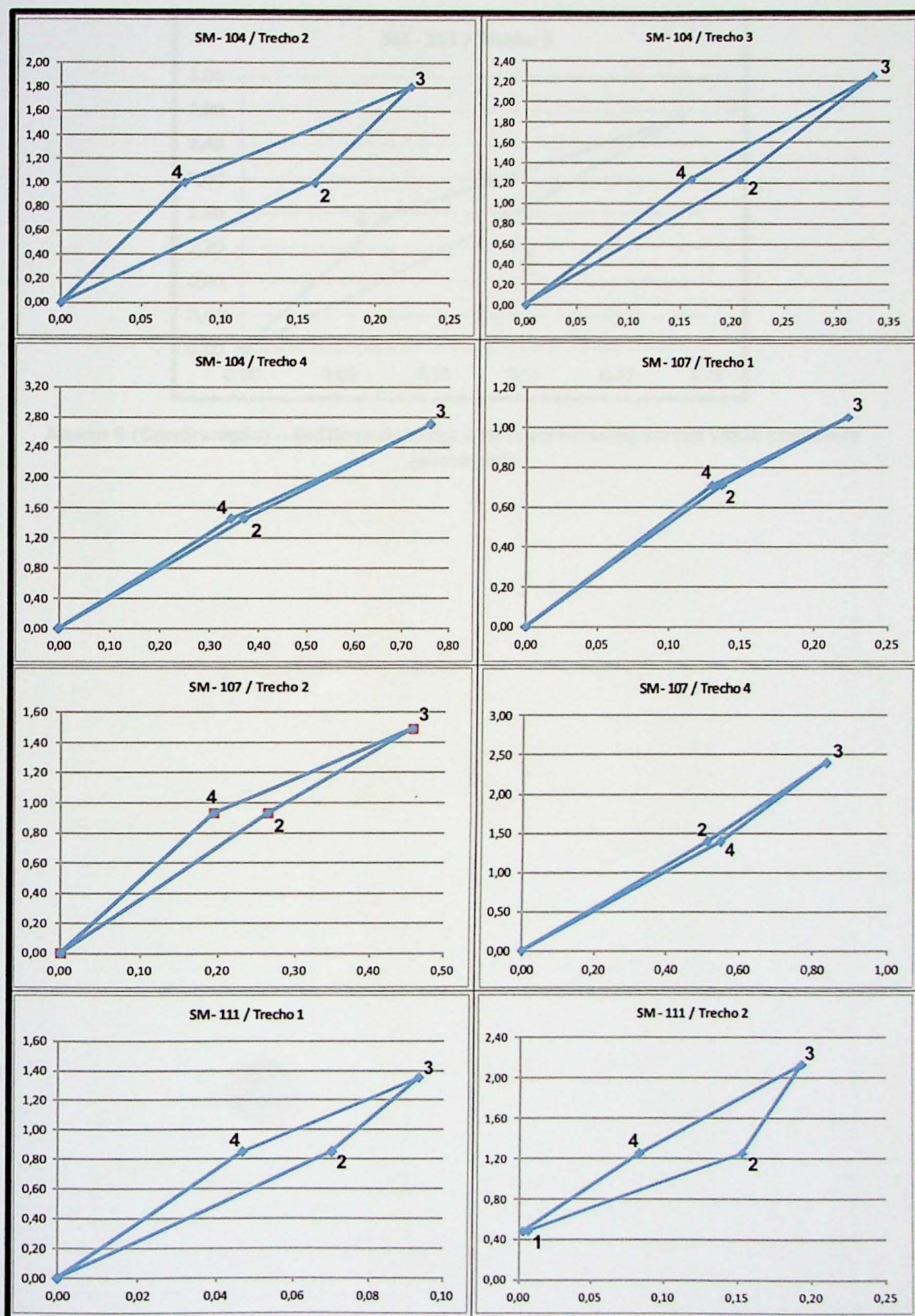
Anexo 5 - Mapa topográfico com arranjo geral da barragem, localização das sondagens e perfis





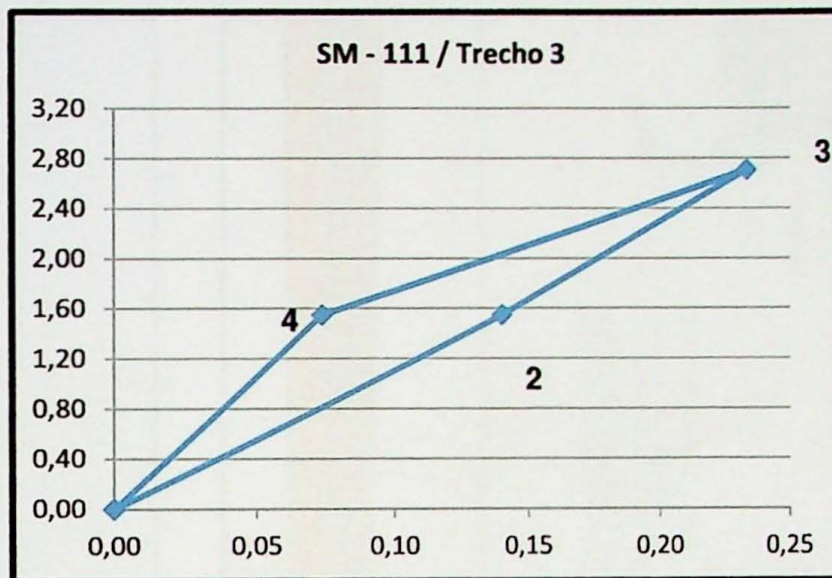
Anexo 6 – Gráficos de carga efetiva (ordenadas) versus vazão específica (abscissas)





Anexo 6 (Continuação) – Gráficos de carga efetiva (ordenadas) versus vazão específica (abscissas).





**Anexo 6 (Continuação) – Gráficos de carga efetiva (ordenadas) versus vazão específica (abscissas).**











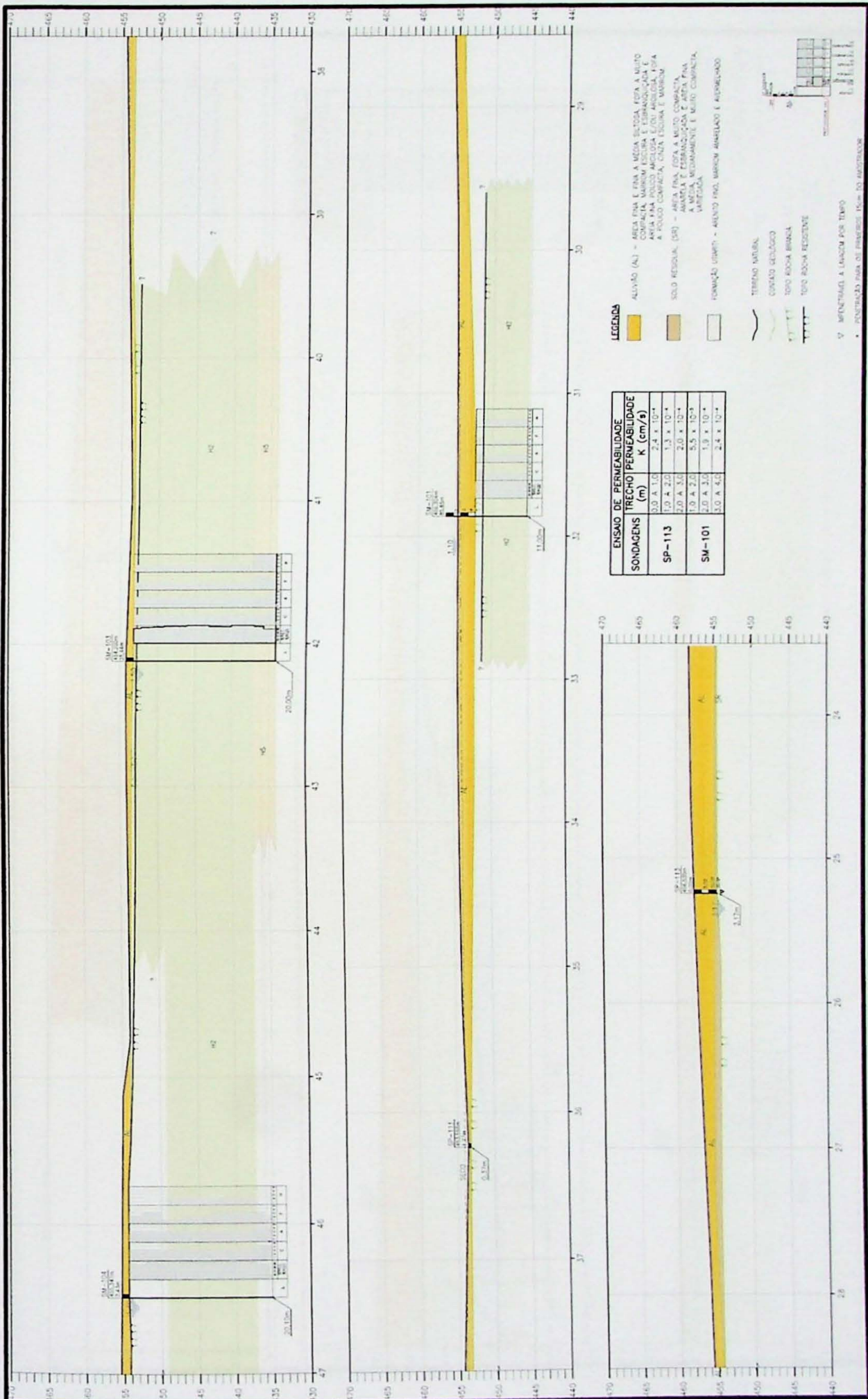








**“Peculiaridades dos arenitos na construção de barragens”**



**Anexo 8 (continuação) – Perfil hidrogeológico do eixo da barragem.**



**“Peculiaridades dos arenitos na construção de barragens”**



**Anexo 8 (continuação) – Perfil hidrogeológico do eixo da barragem.**



DOAÇÃO

IGC-USP

Date: 02.02.22



