

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

ESTUDO BASEADO NA INTERPOLAÇÃO 3D DOS VALORES DE RQD:  
BARRAGEM DE ITAIPU  
v.2

VIVIAN ATHAYDES CANELLO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós Graduação em Geotecnia.

ORIENTADOR: LÁZARO VALENTIN ZUQUETTE

SÃO CARLOS  
2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A447m Canello, Vivian Athaydes  
v.2-2 Estudo baseado na interpolação 3D dos valores de RQD :  
Barragem de Itaipu / Vivian Athaydes Canello ; orientador  
Lázaro Valentin Zuquette. -- São Carlos, 2011.

Dissertação (Mestrado Programa de Pós-Graduação em  
Geotecnia) -- Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo, 2011.

1. Modelagem tridimensional. 2. RQD. 3.  
Interpolação 3D. 4. GRASS. 5. Spline regularizadas com  
tensão (RST). 6. Itaipu, Brasil. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Geólogo **VIVIAN ATHAYDES CANELLO**

Título da dissertação: "Estudo baseado na interpolação 3D dos valores de RQD: Barragem de Itaipu (PR), Brasil".

Data da defesa: 13/01/2012

### Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Lázaro Valentin Zuquette (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Dr<sup>a</sup>. **Josiele Patias**  
(Itaipu Binacional)

Prof. Associado **Reinaldo Loranti**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:  
Prof. Titular **Osni José Pejon**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

### Resultado:

APROVADA

APROVADA

Aprovada



## ***Dedicatória***

*A minha querida mãe Rosa Maria Athaydes Canello*

## **Agradecimentos**

*Agradeço em primeiro lugar a Deus, que é a força para todos os momentos de nossas vidas. Agradeço ao meu orientador Lázaro Valentin Zuquette pela orientação e compartilhamento de seu vasto conhecimento.*

*Agradeço ao marido Rodrigo Luiz Gallo Fernandes pelo amor, compreensão e apoio dedicado neste tempo.*

*Agradeço aos meus pais Rosa Maria e Julio Cesar, pela vida e todo o amor que dedicaram a minha educação. Agradeço aos meus irmãos Vinicius e Julinho pelos momentos de sucesso, alegria e tristeza, que compartilhamos com muita união. Agradeço a minha querida avozinha Lourdes, pelo seu amor incondicional a mim. Enfim, agradeço a todos meus familiares pelo apoio e respeito às decisões que tomo em minha vida profissional.*

*Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo incentivo a pesquisa.*

*Agradeço a Itaipu Binacional pela disponibilização do seu acervo técnico para a realização deste trabalho.*

*Agradeço aos amigos de mestrado Cláudia Rotta, Gianfranco Nappa, Mariana Fernandes, Pablo Cesar, Patrícia Casarotto e Vinicius Peixoto, pela companhia nesta importante etapa profissional de minha vida.*

*Agradeço a todos os professores do Departamento de Geotecnia pelo aprendizado, e a todos os funcionários deste departamento, principalmente a Neiva, Maristela, Álvaro e Herivelton.*

*Agradeço aos funcionários da Itaipu Binacional e do Ceasb-PTI, especialmente a Doutora Josiele Patias e a geóloga Débora Fernandes, pelo auxílio na pesquisa.*

## **Resumo**

**Canello, V.A.** Estudo baseado na interpolação 3D dos valores de RQD: Barragem de Itaipu. Dissertação de Mestrado- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

Este trabalho foi baseado na realização de simulações computacionais 3D de parâmetros de RQD obtidos de classificação geomecânica de sondagens rotativas realizadas nas fases de investigação geológico-geotécnica e construção da barragem de Itaipu (PR), Brasil. Tais simulações foram desenvolvidas em duas áreas dispostas no entorno da barragem principal da usina, utilizando como ferramenta o programa GRASS, que executa interpolações tridimensionais pelo método numérico Spline Regularizado com Tensão (RST).

Os resultados obtidos foram comparados com dados previamente interpretados e obtidos por outros métodos como os geoestatísticos e apresentaram resultados razoáveis devido as dimensões dos voxels adotados, diferenças dos métodos e distribuição espacial dos dados.

**Palavras-chave:** RQD, Interpolação 3D, GRASS, Spline Regularizadas com Tensão (RST), Itaipu, Brasil.

## **Abstract**

**Canello, V.A.** Study based on 3D interpolation of the RQD values: Itaipu Dam (PR), Brazil. Dissertação de Mestrado- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

This work was based on three-dimensional computer simulations of the parameters RQD of the boreholes on geological and geotechnical research phases and construction of the Itaipu dam (PR), Brazil. These simulations were carried out in two areas arranged around the plant the main dam, using as tool the GRASS program, which performs three-dimensional interpolation by mathematical method Regularized Spline with Tension (RST) .

The results were compared with data previously obtained and interpreted by other methods such as geostatistical and had reasonable results because the dimensions of the voxels adopted, differences in methods and spatial distribution of the data.

**Key-words:** RQD, 3D Interpolation, GRASS, Regularized Spline with Tension (RST), Itaipu.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Esquema de execução de sondagem rotativa, FONTE: ABGE (1999). .....	30
Figura 2- Esquema de caixa de testemunhos de sondagem rotativa, Fonte: ABGE, 1999.....	32
Figura 3- Exemplo de maciço rochoso com estrutura de descontinuidades paralelas e verticais. Fonte: Hudson & Harison (1997).....	36
Figura 4- Esquema para quantificação do espaçamento de descontinuidade a partir de uma linha de referência que intercepta estas fraturas. Fonte: Hudson & Harison (1997). ....	38
Figura 5- Distribuição exponencial negativa de valores de espaçamento de descontinuidades. Fonte: Hudson & Harison (1997). ....	39
Figura 6- Esquema de ensaio de cisalhamento <i>in situ</i> , onde $\beta$ é o ângulo de atrito. Fonte: modificado de ISRM (1978). ....	43
Figura 7- Esquema de testemunho de sondagem rotativa de uma manobra de 150 cm, representando os pedaços maiores que 10 cm ao longo do furo. Fonte: modificado de Deere (1988).....	51
Figura 8-Variação de RQD <i>versus</i> o espaçamento médio das descontinuidades e t. Fonte: Priest & Hudson (1976).....	53
Figura 9- Porcentagem de RQD <i>versus</i> tamanho total da manobra de perfuração, com destaque para manobras com efeito de <i>Red Flag</i> . Fonte: dados de sondagem rotativa de Itaipu baseado na distribuição proposta por Priest & Hudson (1976). ....	55
Figura 10- (A) Representação adimensional, pontos de localização de amostragem; (B) 1D, Perfil estratigráfico construído a partir de investigação geotécnica, Fonte: BAOJUN et. al (2009);(C) 2D, Mapa Geológico da Formação Jequitaiá, Fonte: modificado de CPRM, 2004; (D) 2.5D, Modelo Digital de Terreno de diferentes materiais Geológico-Geotécnicos, Fonte: RENGERS et. al (2002);(E) 3D, Disposição de materiais geológicos, Fonte: KESSLER et.al. (2009).....	60
Figura 11- Disposição espacial de superfícies de interpolação. Fonte: KRÖGER & HINSBY (2009).....	63
Figura 12- Modelo 3D a partir da intercalação de camadas interpoladas entre superfícies. Fonte: KRÖGER & HINSBY (2009). ....	64
Figura 13- Representação de modelo 3D contendo materiais geológicos- geotécnicos interceptado por zona de falhas (cor vermelha), FONTE: SCHUBERT (2005).....	64
Figura 14- Malha de interpolação a partir de TINs. Fonte: XIONG & YUAN (2008).....	66

Figura 15- Exemplo de resultados originados pelo programa GSI3D, a partir de mapa geológico, perfil de sondagem e seção transversal. Fonte: KESLLER et. al 2009. ....	66
Figura 16- Visualização da análise de uma encosta e seus níveis de deslocamento de modelo 3D gerado pelo programa Ansys. Fonte: Neto et.al. (2007).....	69
Figura 17- Dados geométricos e de atributos. Fonte: Grohmann (2008).....	72
Figura 18- (A) Tabela de atributos – Em formato ASCII; (B) Pontos importados pelo programa como vetores; (C) Imagem raster gerada a partir de interpolações de valores dos pontos vetoriais. Fonte: Simulação de dados de sondagens rotativas de Itaipu. ....	72
Figura 19- Modelo digital de terreno (MDT) gerado por interpolação pelo método do Inverso da Potência da Distância (IDW). Fonte: MITAS & MITASSOVA (1999). ....	78
Figura 20- Curvatura de interpolação pelo método Spline Regularizado por Tensão (RST). Fonte: modificado de Nettleter & Mitasova (2004). ....	80
Figura 21- Exemplo de imagem de superfície a partir de dados de furos de sondagem usando o Nviz do GRASS. Fonte: MATSUMOTO et.al., 2006. ....	83
Figura 22- Vista aérea da área Barragem de Itaipu. (A) Barragem principal; (B) Barragem de ligação direita; (C) Barragem de ligação esquerda; (D) Barragem de enrocamento; (E) Barragem lateral direita; (F) Vertedouro, (G) Canal de desvio do Rio Paraná; (H) Reservatório de Itaipu. Fonte: modificado de GOOGLE EARTH (visualização março/2011). ....	85
Figura 23- Seção litológica típica de um derrame de basáltico da área de Itaipu e suas zonas interderrames, Fonte: modificado de ITAIPU BINACIONAL, 1972. ....	89
Figura 24- Fluxograma das atividades para a geração do modelo tridimensional do maciço da área da barragem principal de Itaipu a partir dos parâmetros de RQD. ....	98
Figura 25-Página inicial do Grass, para definição de novas <i>locations</i> . ....	101
Figura 26-Etapa de configuração espacial de uma nova <i>location</i> . ....	102
Figura 27-Definição dos limites geográficos e resoluções 2D e 3D da região a ser interpolada ( <i>REGION</i> ). ....	103
Figura 28- (A) Geração de um novo mapset; (B) Iniciando o programa. ....	103
Figura 29-Importação de dados pontuais em formato ASCII. ....	104
Figura 30- (A) Página de configuração para importação de vetores a partir de dados ASCII; (B) definição de números de colunas que serão executadas. ....	105
Figura 31-Página de <i>output</i> , saída escrita das ações do programa durante a atividade configurada do usuário. ....	106
Figura 32- Página do MAP DISPLAY- pontos vetoriais com informações de coordenadas geográficas e altitude. ....	107
Figura 33-Página com as informações sobre um ponto, obtidas a partir da ferramenta QUERY do MAP DISPLAY ....	107

Figura 34- Informações sobre os pontos que serão interpolados para a geração de superfícies ou volumes.....	109
Figura 35- Página de visualização no MAP DISPLAY de imagem raster gerada por interpolação de dados vetoriais por método Spline Regularizada por Tensão.....	110
Figura 36- Página de visualização no NVIZ da imagem raster de superfície (topo das sondagens).....	111
Figura 37- Página de visualização no NVIZ das imagens raster da topografia de topo e base do pacote rochoso investigado.....	112
Figura 38- Página do OUTPUT com informações sobre os pontos que serão interpolados para geração de volume.....	114
Figura 39- Página da tela de configuração dos parâmetros de interpolação RST ( <i>Regularized Spline Tension</i> )- (A) Subpágina OPTIONS; (B) Subpágina SETTINGS.....	115
Figura 40- Página do <i>OUTPUT</i> com informações sobre o andamento da interpolação.....	115
Figura 41- Página de configuração para exportação de modelo 3D- (A) Tela para OPTIONS; (B) Tela para SURFACE OPTIONS.....	117
Figura 42- Tela do PARAVIEW- Modelo tridimensional da propriedade RQD da Área 1, a partir de uma visualização da porção superficial ortogonal a altitude do modelo.....	118
Figura 43- Página de palhetas de cores (COLOR SCALE EDITOR).....	119
Figura 44- (A) modelo com todos os valores de RQD; (B) modelo com valores de RQD no intervalo de 50 a 75%.....	120
Figura 45- Página de configuração das direções do perfil vertical no modelo	121
Figura 46- Perfil vertical elaborado após a seleção da direção de corte no modelo 3D.....	121
Figura 47- Histograma da distribuição de valores de distância vertical entre trechos de manobra das sondagem rotativa da área de trabalho.....	127
Figura 48- Histogramas dos dados de entrada de RQD na área.....	128
Figura 49- Representação dos volumes dos intervalos de RQD do modelo RQD 1- Área 1 e os pontos de dados de entrada para cada intervalo de RQD-(A) 0-25%;(B) 25-50%;(C) 50-75%;(D) 75-90%;(E) 90-100%.....	131
Figura 50- Representação dos volumes dos intervalos de RQD do modelo RQD 2- Área 1 e os pontos de dados de entrada para cada intervalo de RQD-(A) 0-25%;(B) 25-50%;(C) 50-75%;(D) 75-90%;(E) 90-100%.....	135
Figura 51- (A) distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD simulados com <i>smooth</i> igual 0,1; (B) distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD simulados com <i>smooth</i> igual 0,01.....	138
Figura 52- (A) distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD simulados com tensão igual 20; (B) distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD simulados com tensão igual 40.....	139

Figura 53-Distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD (%) para os modelos 3D simulados com <i>tbres</i> iguais a 2,5, 3, 5, 10m e <i>npmin</i> igual a 50.....	140
Figura 54-Distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD (%) para os modelos 3D simulados com <i>tbres</i> iguais a 2,5, 3, 5, 10m e <i>npmin</i> igual a 100.....	141
Figura 55-Distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD (%) para os modelos 3D simulados com <i>tbres</i> iguais a 2,5, 3, 5, 10m e <i>npmin</i> igual a 200.....	141
Figura 56-Distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD (%) para os modelos 3D simulados com <i>res3</i> variando de 25 e 50m e <i>npmin</i> de 50. .	142
Figura 57-Distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD (%) para os modelos 3D simulados com <i>res3</i> variando de 25 e 50m e <i>npmin</i> de 100.	143
Figura 58-Distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD (%) para os modelos 3D simulados com <i>res3</i> variando de 25 e 50m e <i>npmin</i> de 200.	143
Figura 59-Vista em planta (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição dos pontos nas cotas mais altas das sondagens rotativas, separados por intervalos de RQD (%)......	147
Figura 60-Vista frontal (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição dos pontos de entrada da área da jusante para montante, separados por intervalos de RQD (%)......	149
Figura 61-Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição dos pontos de entrada, separados por intervalos de RQD (%). .....	151
Figura 62-Vista em 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição percentual dos diferentes valores de RQD para a área da barragem principal de Itaipu. ....	155
Figura 63-Vista em 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) da distribuição dos volumes de RQD para o intervalo de 0-25%. ....	159
Figura 64- Vista em 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) da distribuição dos voxels de RQD para o intervalo de 25-50%. ....	163
Figura 65-Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) da distribuição dos volumes de RQD para o intervalo de 50-75%.....	167
Figura 66-Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) da distribuição dos volumes de RQD para o intervalo de 75-90%.....	171
Figura 67-Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) da distribuição dos volumes de RQD para o intervalo de 90-100%.....	175

Figura 68-Plano horizontal na cota 20m (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área.....	179
Figura 69-Parte do plano horizontal da cota 20m com a delimitação da área de interpolação 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área, Fonte: Patias (2010). ....	181
Figura 70-Plano horizontal de cota 40m (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área.....	185
Figura 71- Parte do plano horizontal da cota 40m com a delimitação da área de interpolação 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área, Fonte: Patias (2010). ....	187
Figura 72-Plano horizontal da cota 125m (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área.....	191
Figura 73-Parte do plano horizontal da cota 128m com a delimitação da área de interpolação 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área, Fonte: Patias (2010). ....	193
Figura 74-Orientação do Perfil vertical 1 segundo a direção A-A', representado pela linha amarela, Fonte: modificado de Patias (2010).....	196
Figura 75-Perfil vertical 1 (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior), obtido a partir de corte vertical no modelo 3D de RQD da área estudo de Caso Geral-Barragem Principal segundo a orientação apresentada.....	199
Figura 76-Orientação do Perfil vertical 1 segundo a direção B-B', representado pela linha amarela, Fonte: modificado de Patias (2010).....	201
Figura 77-Perfil vertical 2 (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior), obtido a partir de corte vertical no modelo 3D de RQD da área estudo de Caso Geral-Barragem Principal segundo a orientação apresentada.....	205
Figura 78- A) Vista em planta; B) Vista frontal da área da jusante para montante;C) Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição dos pontos das sondagens rotativas, separados por intervalos de RQD (%)......	209
Figura 79-Vista do modelo com voxel de dimensão 25mx25mx3m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD.....	213
Figura 80- Vista do modelo com voxel de dimensão 25mx25mx3m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes	

de RQD com intervalo de 0-25%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	216
Figura 81- Vista do modelo com voxel de dimensão 25mx25mx3m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 25-50% - A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	218
Figura 82- Vista do modelo com voxel de dimensão 25mx25mx3m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 50-75%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	220
Figura 83- Vista do modelo com voxel de dimensão 25mx25mx3m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 75-90%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	222
Figura 84- Vista do modelo com voxel de dimensão 25mx25mx3m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 90-100%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	224
Figura 85- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD.....	227
Figura 86- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 0-25%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	230
Figura 87- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 25-50%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	232
Figura 88- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 50-75% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	234
Figura 89- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes	

de RQD com intervalo de 75-90% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	236
Figura 90- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 90-100% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	238
Figura 91-A) Vista em planta; B) Vista frontal da área da jusante para montante;C) Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição dos pontos das sondagens rotativas reais e não reais, de cor preta e vermelha, respectivamente. ...	241
Figura 92-Vista do modelo com voxel de dimensão de 10mx10mx1m com sondagens não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD. ....	245
Figura 93- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com sondagens não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 0-25% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	247
Figura 94-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com sondagens não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 25-50% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	248
Figura 95-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com sondagens não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 50-75% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	250
Figura 96-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com sondagens não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 75-90% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	252
Figura 97- Vista do modelo com voxel de dimensões 10mx10mx1m com sondagens não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 90-100% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.....	254
Figura 98-A) Vista em planta;B) Vista frontal da área da jusante para montante;C) Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição dos pontos das sondagens	

rotativas reais e não reais retirados e mantidos para interpolação, de cor vermelha e preta, respectivamente. ....	257
Figura 99-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m e exclusão de 4 sondagens reais e uma não real do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD. ....	261
Figura 100-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m e exclusão de 4 sondagens reais e uma não real do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 0-25% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante. ....	264
Figura 101-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m e exclusão de 4 sondagens reais e uma não real do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 25-50% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante. ....	266
Figura 102-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m e exclusão de 4 sondagens reais e uma não real do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 50-75% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante. ....	267
Figura 103-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m e exclusão de 4 sondagens reais e uma não real do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 75-90% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante. ....	268
Figura 104-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m e exclusão de 4 sondagens reais e uma não real do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 90-100% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante. ....	269
Figura 105-A) Vista em planta;B) Vista frontal da área da jusante para montante;C) Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição dos pontos das sondagens rotativas finais para a validação do modelo 3D. ....	271
Figura 106-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m e exclusão de 4 sondagens reais e todas as não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD. ....	273



Figura 107- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com exclusão de 4 sondagens reais e de todas as não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD de 0-25%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante. ....	276
Figura 108- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com exclusão de 4 sondagens reais e de todas as não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD de 25-50%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante. ....	278
Figura 109- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com exclusão de 4 sondagens reais e de todas as não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD de 50-75%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante. ....	280
Figura 110- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com exclusão de 4 sondagens reais e de todas as não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD de 75-90%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante. ....	282
Figura 111- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com exclusão de 4 sondagens reais e de todas as não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD de 90-100%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante. ....	284
Figura 112- Plano horizontal de cota 20m (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área.....	287
Figura 113- Parte do plano horizontal de cota 20m com a delimitação da área de interpolação 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área, Fonte: Patias (2010). ....	289
Figura 114- Perfil horizontal da cota 40m (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área.....	293
Figura 115- Parte do perfil horizontal da cota 40m com a delimitação da área de interpolação 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área de Patias (2010). ....	295

Figura 116- Perfil horizontal da cota 128m (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área.....	299
Figura 117- Parte do perfil horizontal da cota 128m com a delimitação da área de interpolação 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área de Patias (2010). .....	301
Figura 118-Orientação do Perfil vertical 1 segundo a direção A-A', representado pela linha amarela, Fonte: modificado de Patias (2010).....	303
Figura 119-Perfil vertical 1 (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior), obtido a partir de corte vertical no modelo 3D de RQD da área estudo de Caso Específico. ....	307

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	25
2. OBJETIVOS .....	27
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
3.1 Sondagem rotativa.....	29
3.2 Características de maciços rochosos .....	34
3.2.1 Litologia.....	35
3.2.2 Descontinuidades.....	35
3.2.2.1 Espaçamento .....	36
3.2.2.2 Abertura .....	39
3.2.2.3 Persistência.....	40
3.2.2.4 Resistência das paredes.....	41
3.2.2.6 Rugosidade .....	42
3.2.3 Índices Geomecânicos .....	44
3.2.3.1 Grau de alteração .....	44
3.2.3.2 Grau de Consistência .....	47
3.2.3.3 Grau de fraturamento .....	48
3.2.3.4 Porcentagem de recuperação.....	50
3.3 Métodos de classificação geomecânica.....	55
3.3.1 Sistemas de classificação Q.....	56
3.3.2 Sistema RMR.....	57
3.4 Modelos 3D.....	58
3.4.1 Métodos de interpolação .....	62
3.4.2 Sistemas de simulação computacional 3D.....	64
3.5 GRASS-SIG.....	69
3.5.1 Dados geométricos .....	70
3.5.2 Dados de atributos .....	71
3.6 Simulação de dados no GRASS .....	73
3.6.1 Geração de superfícies .....	77

3.6.2	Geração de volumes.....	81
3.7	Visualização de modelos 3D e superfícies de interpolação.....	82
3.7.1	Visualizador Nviz.....	82
3.7.2	Visualizador PARAVIEW.....	83
4.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO DA BARRAGEM DE ITAIPU	85
4.1	Geologia Regional .....	86
4.2.1	Geologia da Área da Barragem .....	87
4.2.1.1	Derrame E.....	91
4.2.1.2	Derrame D.....	91
4.2.1.3	Derrame C.....	93
4.2.1.4	Derrame B.....	94
4.2.1.5	Derrame A.....	95
5.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	97
5.1	Análise estatística do banco de dados.....	98
5.2	Reestruturação do banco de dados.....	99
5.3	Definição dos limites geográficos da área de interpolação (REGION) .....	100
5.4	Importação de dados vetoriais da tabela ASCII.....	104
5.5	Interpolação de superfícies topográficas .....	107
5.6	Calibração de resoluções 3D para interpolação de volume .....	112
5.7	Interpolações vetoriais para a geração de volumes.....	113
5.6	Exportação do modelo gerado para extensão VTK .....	116
5.7	Visualizações e análises do modelono PARAVIEW .....	117
5.8	Diagramação e impressão dos modelos e seus perfis transversais.....	122
6.	RESULTADOS E ANÁLISES .....	123
6.1	Resultados de dados prévios.....	123
6.1.1	Mapa de localização de sondagens e estruturas da barragem.....	123
6.1.2	Mapa de localização da área de trabalho.....	124
6.1.4	Banco de dados.....	126
6.2	Calibração dos parâmetros para interpolação 3D.....	128
6.2.1	Determinação dos parâmetros T (topo) e B (base) .....	128
6.2.2	Determinação dos parâmetros tensão, smooth, npmin, <i>tbres</i> e <i>res3</i> .....	137
6.2.2.1	Parâmetro <i>smooth</i> .....	137
6.2.2.2	Parâmetro tensão.....	139

6.3	Análise de Estudo de Caso Geral- Simulação 3D de RQD para a área da Barragem Principal.....	144
6.3.1	RQD de 0-25%.....	157
6.3.2	RQD de 25-50% .....	161
6.3.3	RQD de 50-75% .....	165
6.3.4	RQD de 75-90% .....	169
6.3.5	RQD de 90-100%.....	173
6.3.3	Planos horizontais.....	177
6.3.3.1	Cota 20m .....	177
6.3.3.2	Cota 40m .....	183
6.3.3.3	Cota 128m.....	189
6.3.4	Perfis verticais.....	195
6.3.4.1	Perfil vertical 1 .....	196
6.3.4.2	Perfil vertical 2 .....	201
6.4	Análise de Estudo de Caso Específico- Margem esquerda do Rio Paraná..	207
6.4.1	Modelo 3D de RQD do Caso Específico- Voxel de 25mx25mx3m .....	211
6.4.1.1	RQD de 0-25% .....	215
6.4.1.2	RQD de 25-50% .....	217
6.4.1.3	RQD de 50-75% .....	219
6.4.1.4	RQD de 75-90% .....	221
6.4.1.5	RQD de 90-100% .....	223
6.4.2	Modelo 3D de RQD do Caso Específico- Voxel de 10mx10mx1m .....	225
6.4.2.1	RQD de 0-25% .....	229
6.4.2.2	RQD de 25-50% .....	231
6.4.2.3	RQD de 50-75% .....	233
6.4.2.4	RQD de 75-90% .....	235
6.4.2.5	RQD de 90-100% .....	237
6.4.3	Modelo 3D de RQD do Caso Específico- Voxel de 10mx10mx1m com 7 sondagens não reais.....	239
6.4.3.1	RQD de 0-25% .....	247
6.4.3.2	RQD de 25-50% .....	248

6.4.3.3 RQD de 50-75% .....	249
6.4.3.4 RQD de 75-90% .....	251
6.4.3.5 RQD de 90-100% .....	253
6.4.4 Modelo 3D de RQD do Caso Específico- Voxel de 10mx10mx1m com exclusão 4 sondagens reais e 1 falsa .....	255
6.4.4.1 RQD de 0-25% .....	263
6.4.4.2 RQD de 25-50% .....	265
6.4.4.3 RQD de 50-75% .....	267
6.4.4.4 RQD de 75-90% .....	268
6.4.4.5 RQD de 90-100% .....	269
6.4.5 Modelo 3D de RQD do Caso Específico- Voxel de 10mx10mx1m com exclusão 4 sondagens reais e 4 sondagens falsas- Validação do modelo .....	270
6.4.5.1 RQD de 0-25% .....	275
6.4.5.2 RQD de 25-50% .....	277
6.4.5.3 RQD de 50-75% .....	279
6.4.5.4 RQD de 75-90% .....	281
6.4.5.5 RQD de 90-100% .....	283
6.5 Análises de Planos horizontais .....	285
6.5.1 Cota 20m .....	285
6.5.2 Cota 40m .....	291
6.5.3 Cota 128.....	297
6.6 Análise do perfil vertical .....	303
7. CONCLUSÕES .....	309
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	313
ANEXO 1 .....	323
ANEXO 2 .....	325
ANEXO 3 .....	327
ANEXO 4 .....	329
APÊNDICE 1 .....	331
APÊNDICE 2 .....	333

## GLOSSÁRIO

**Estrutura de dados**= é a organização dos dados e dos algoritmos de forma que seu uso seja bem efetuado, o modo como um conjunto de dados é organizado e como as operações são efetuadas influenciam na resolução de problemas para geração do modelo. Existem diversos tipos de estruturas de dados, dependentes dos algoritmos e da linguagem de programação.

**Fence diagrams** = é uma técnica clássica para visualização de informações geológicas tridimensionais, e consiste em informações de furos de sondagens ou afloramentos conectados em seções transversais e apresentam uma visualização que pode ser intuitivamente interessantes e com informações boas (Van Driel, 1989).

**Modelo numérico de terreno (MNT)**= é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre, levando em consideração dados de relevo, informações geológicas, batimetria, meteorologia, dados geofísicos e geoquímicos.

**Representação de contornos (BRep)**= é um tipo de estrutura de dados que ajusta curvas da superfície com exatidão, expressando a topografia da área em relação entre elementos geométricos.

**Renderização** = é o processo pelo qual se pode obter o produto final de um processamento digital qualquer, é muito aplicada para objetos 3D, fazendo a conversão de uma representação 3D para 2D, seja para obter uma imagem estática, seja para obter imagens foto-realísticas em vídeo (animação 3D). O termo "renderizar" (do inglês *to render*) vem sendo usado na computação gráfica, significando converter uma série de símbolos gráficos num arquivo visual, ou seja, "fixar" as imagens num vídeo, convertendo-as de um tipo de arquivo para outro, ou ainda "traduzir" de uma linguagem para outra.

**Splines Regularizada com Tensão (RST)**= A spline é um termo em inglês utilizado para denominar as antigas réguas flexíveis, muito usadas no desenho de curvas que contêm pontos pré-determinados. Baseada em uma função de interpolação que deve passar pelos pontos amostrados ou próximos a eles, de maneira mais suave possível. Estes dois requisitos são combinados a uma condição de minimização da soma dos desvios e suavização da semi-norma da função spline (MITAS e MITASOVA, 1999).

**Triangulação** = é a divisão de um plano em triângulos, ou mesmo em simplexos, que são extensões de triângulos em outras dimensões como segmentos de reta e tetraedros que formam os vértices e arestas de um triângulo.

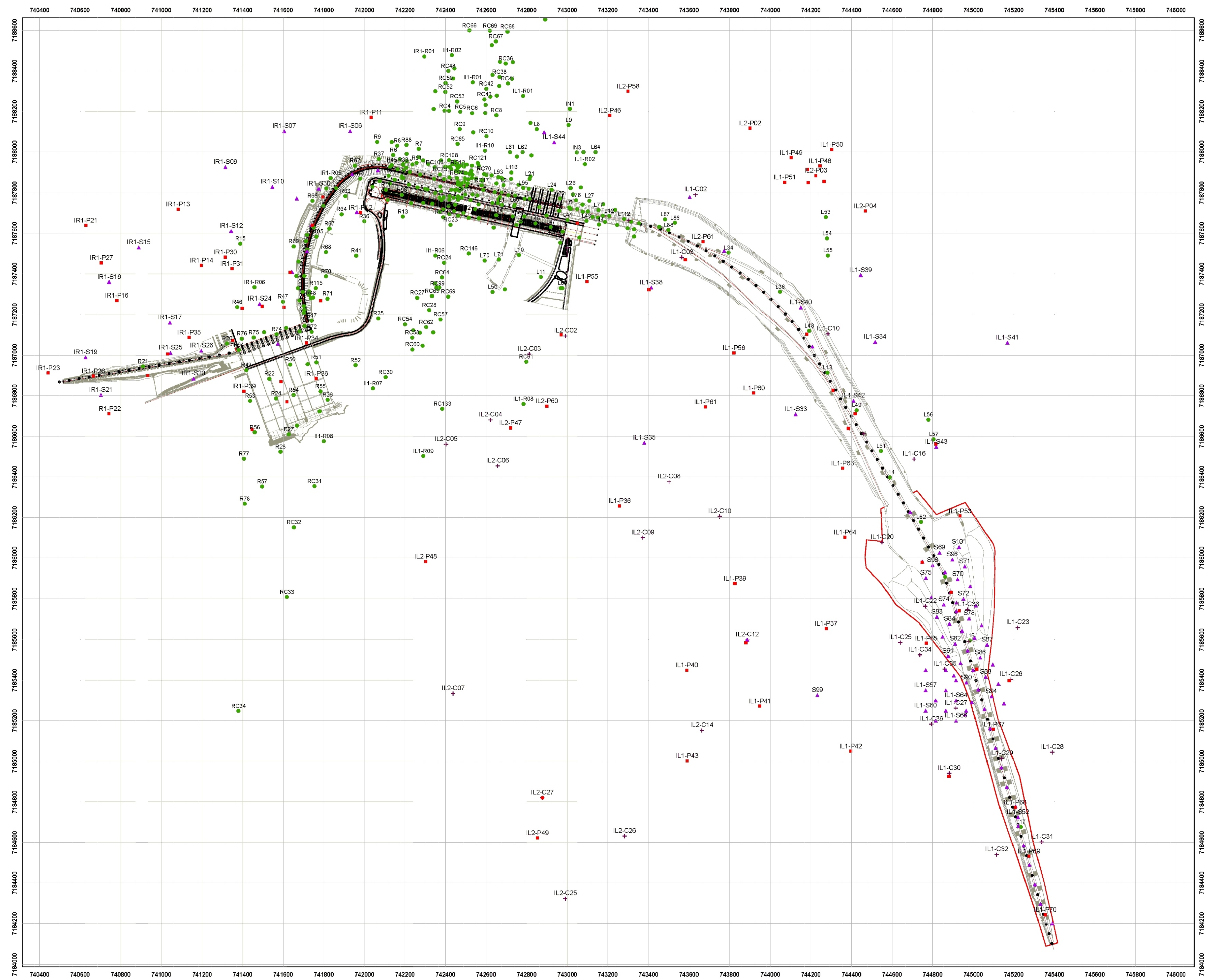
**Triangulação de Delaunay** = é um tipo de triangulação em que a geometria dos triângulos seja próxima de ângulos internos equiláteros, evitando a criação de triângulos com ângulos internos agudos.

**Triangulações irregulares nas redes (TINs)** = é uma representação da malha, que usa a triangulação de Delaunay tridimensional, tetraedros de Delaunay, no qual os pontos amostrados são os vértices dos tetraedros.

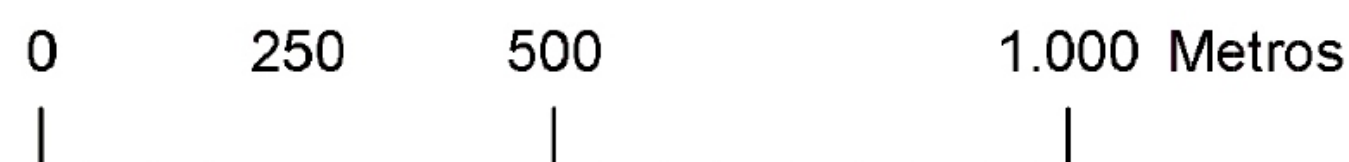

**Voxel** = é uma unidade de volume geralmente tratados como um conjunto ordenado de elementos de volume ou como um conjunto ordenado de células.



## **ANEXO 1**



- LEGENDA**
- Poços
  - ▲ Percussão (SPT)
  - + Cone (CPT)
  - Sondagens Rotativas

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
Escola de Engenharia de São Paulo - EESC

Estudo baseado na interpolação 3D dos valores de RQD:  
Barragem de Itaipu, Brasil

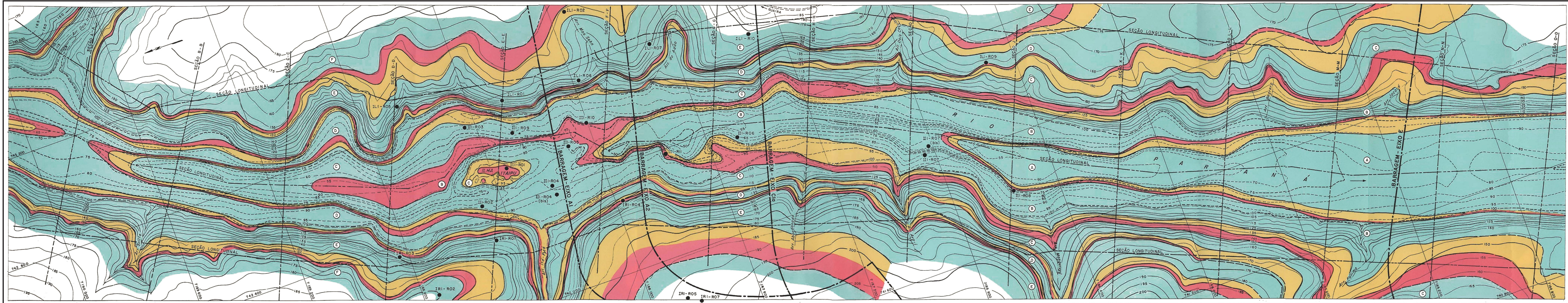
Vivian Athaydes Canelo  
Orientador: Lázaro Valentin Zuquette

**ANEXO 1**  
Mapa de localização de sondagens e estruturas construídas

Fonte: Patias (2010)

Escala: Gráfica | Dezembro/2011

## **ANEXO 2**



**LEGENDA:**

- Contorno
- Bordo visível união de bordos
- Bordo senso
- Designação do terreno
- Furo rotativo

**NOTAS:**

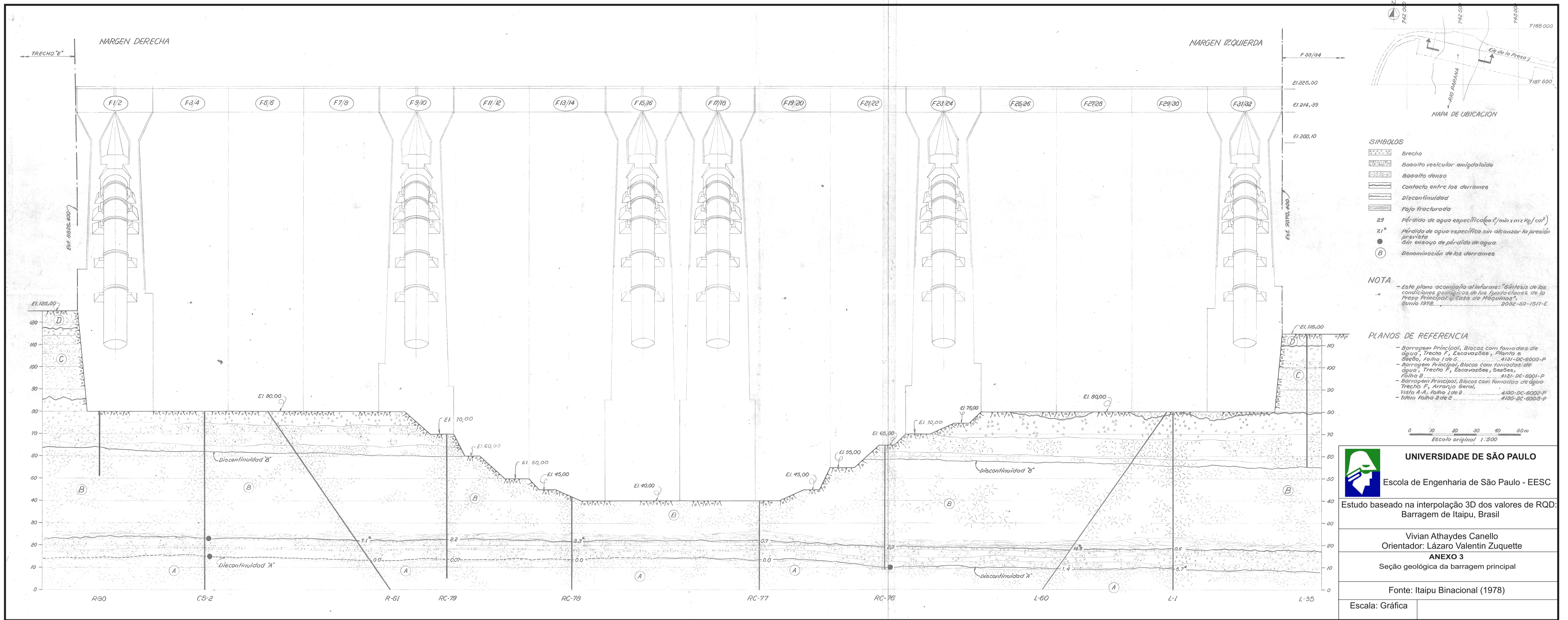
- 1 - Todas as dimensões e elevações estão em metros.
- 2 - O coponente e diagonais elevações são em metros.
- 3 - Os eixos de barragem indicados são alternativas estudadas.

**DESENHOS DE REFERÊNCIA:**

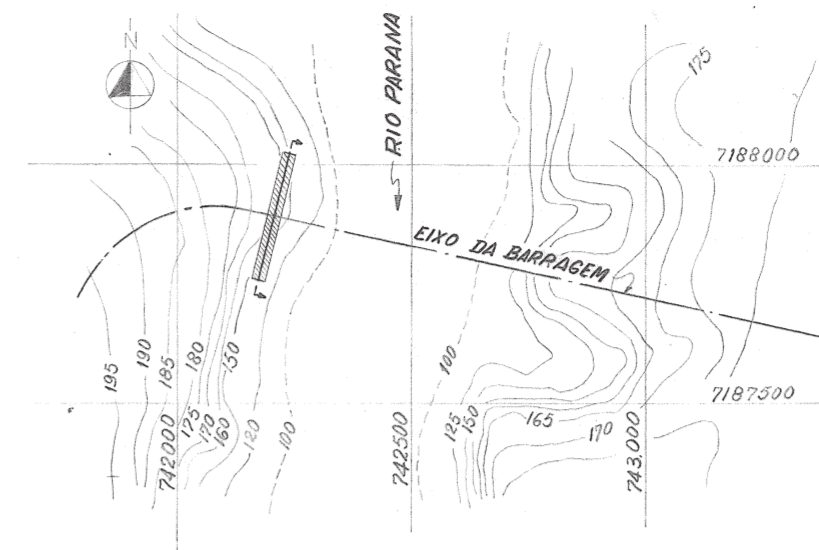
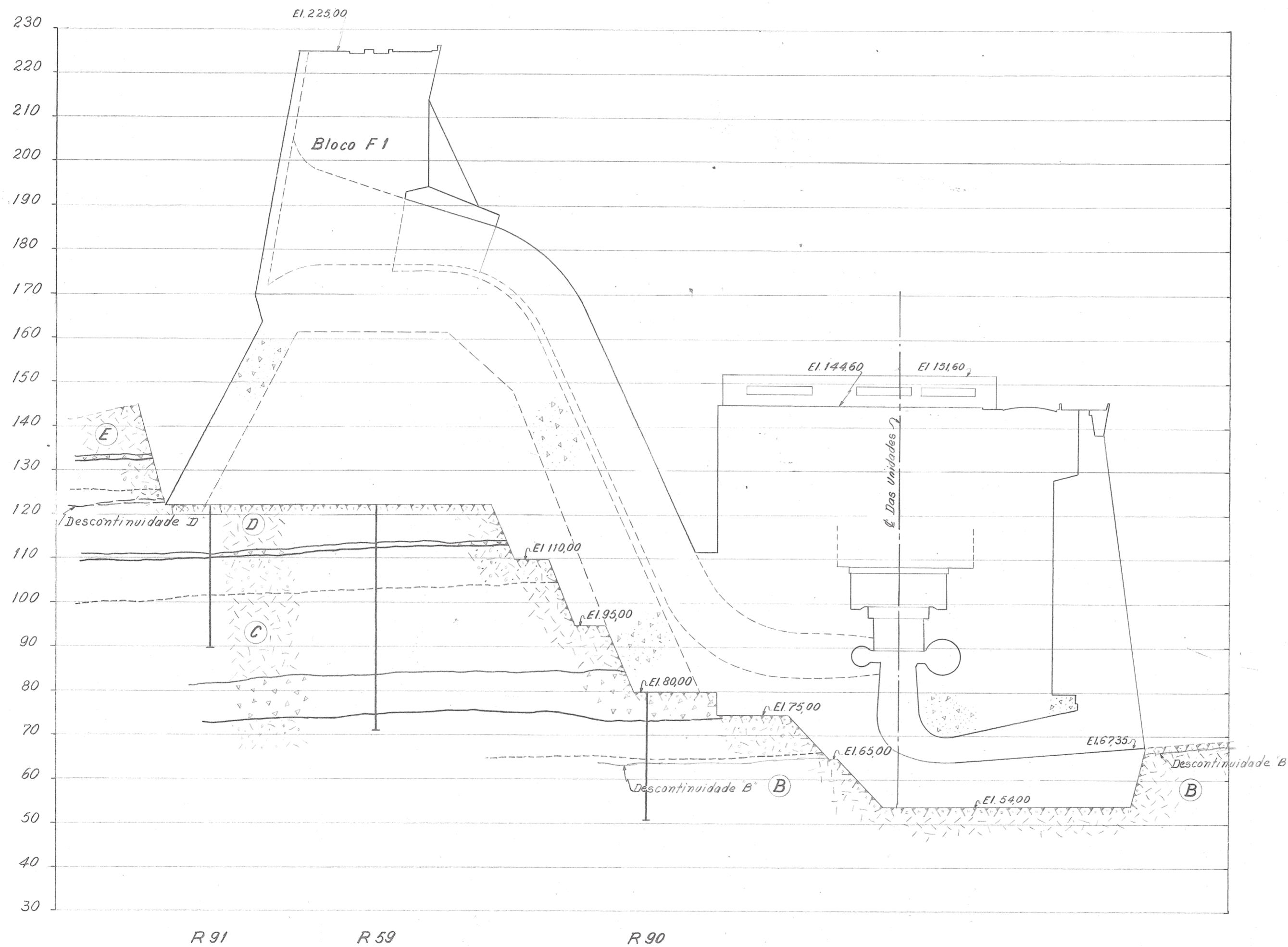
Projeto Hidrelétrico - Mapa das Investidas e Áreas Enclausuradas - GR-42-300P  
 Seções Geológicas Longitudinais - Seções Geológicas Longitudinais - Margem Direita e Esq. do Rio - FL-42-302P  
 Seções Geológicas Transversas - FL-42-303P  
 Seções Geológicas Transversas - FL-42-304P  
 Seções Geológicas Transversas - FL-42-305P  
 Mapa Geológico - Escala Alameda - FL-42-306P  
 Seção Geológica - Escala Alameda - FL-42-307P  
 Seção Geológica - Escala Alameda - FL-42-308P  
 Seção Geológica Longitudinal - Canal do Rio - GR-42-311P

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
 Escola de Engenharia de São Paulo - EESC  
 Estado baseado na topografia de 20 metros de 1920  
 Município de São Paulo  
 Vitor Augusto Caspary  
 Orientador: Carlos Alberto Caspary  
 AMERCO S/A  
 Mapa geológico geral  
 Fonte: Mapa Estrutural (1974)  
 Escala: Original | Geotopo2011

## **ANEXO 3**



## **ANEXO 4**



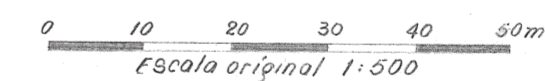
PLANTA CHAVE  
 0 100 200 300 400 500 m  
 Escala Original 1:10.000

LEGENDA

- Brecha entre derrames
- Basalto vesicular-amigdalóide
- Basalto denso
- Limite litológico
- Limite de derrame
- Denominação de derrame
- Sondagem rotativa

NOTA

1 Para Seções de escavação Ver desenhos 4131-DC-6007-P R1 (Seção Z-Z) e 4311-DC-7000-P R0 (Seção A-A)



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Paulo - EESC

Estudo baseado na interpolação 3D dos valores de RQD:  
 Barragem de Itaipu, Brasil

Vivian Athaydes Canello  
 Orientador: Lázaro Valentin Zuquette

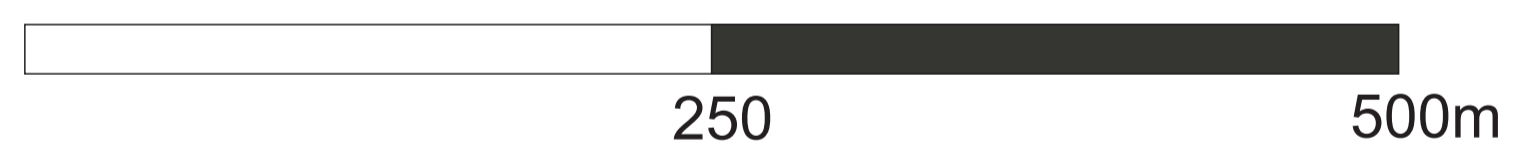
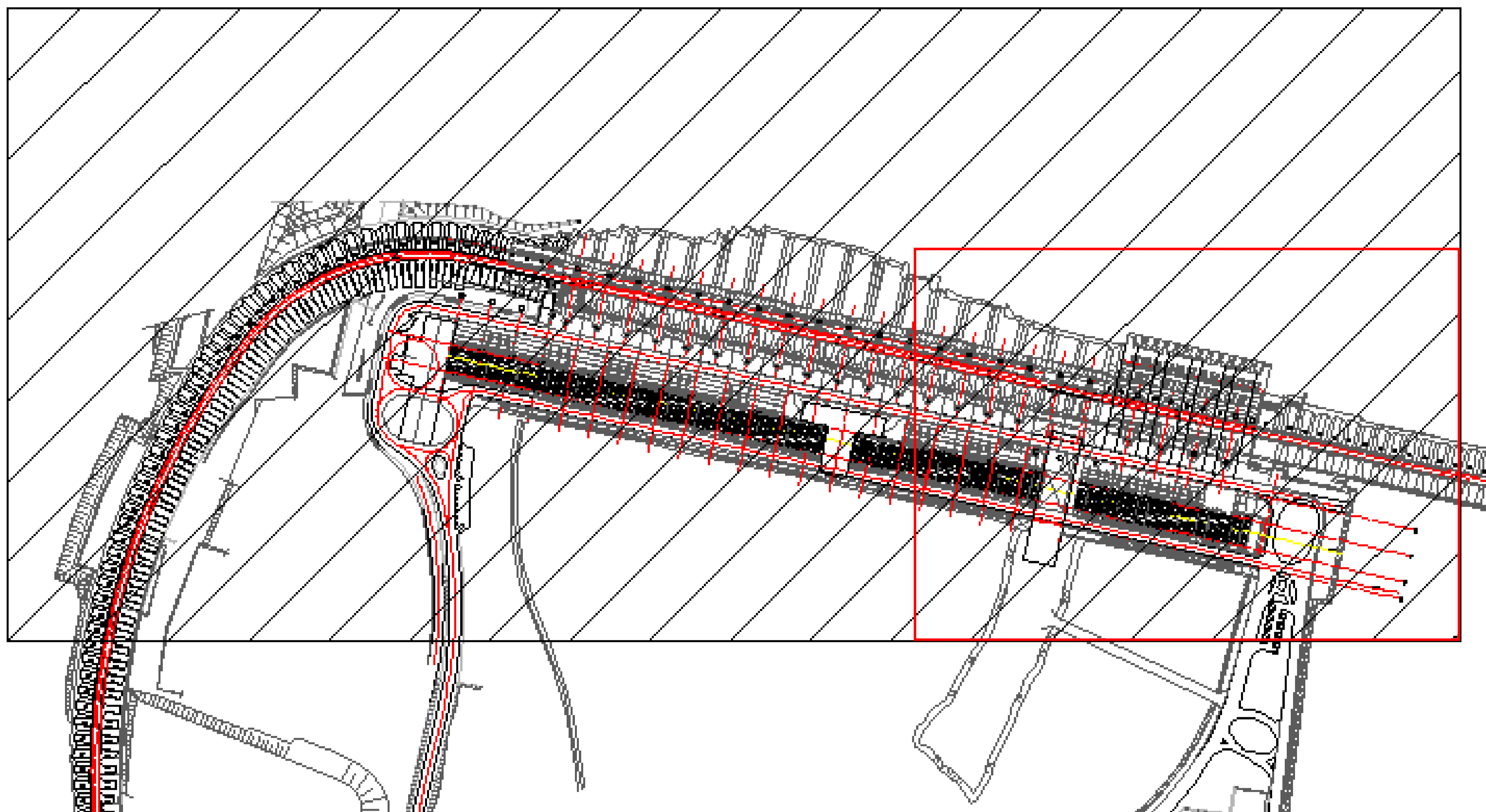
**ANEXO 4**  
 Seção Geológica pelo Eixo do Bloco F1 da Unidade U1

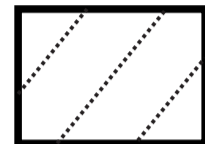
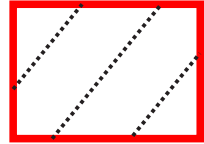
Fonte: Itaipu Binacional (1979)

Escala: Gráfica | Dezembro/2011



## APÊNDICE 1



-  Área de estudo de Caso Geral
-  Área de estudo de Caso Específico



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Paulo - EESC

Estudo baseado na interpolação 3D dos valores de RQD:  
Barragem de Itaipu, Brasil

Vivian Athaydes Canello  
Orientador: Lázaro Valentin Zuquette

**APÊNDICE 1**

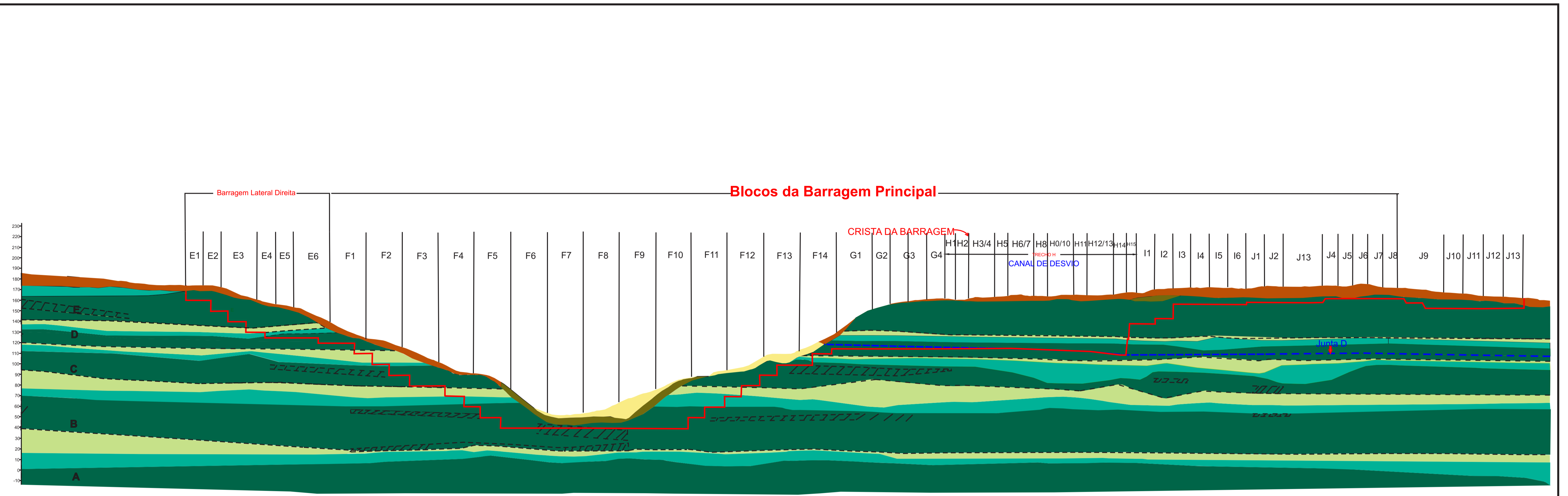
Mapa de localização da área de trabalho

Fonte: modificado de Patias (2010)

Escala: Gráfica

Dezembro/2011

## APÊNDICE 2



0 50m  
Escala original- 1:1000

## LEGENDA

- Solo
- Areia
- Blocos de basalto
- Basalto denso
- Basalto vesicular amgdaloidal
- Brecha basáltica
- Contato entre os derrames  
A,B,C,D,E, Identificação dos derrames
- Fraturas
- LINHA DE ESCAVAÇÃO
- DESCONTINUIDADE/ JUNTA D

	<b>UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO</b> Escola de Engenharia de São Paulo - EESC
Estudo baseado na interpolação 3D dos valores de RQD: Barragem de Itaipu, Brasil	
Vivian Athaydes Canello Orientador: Lázaro Valentin Zuquette	
<b>APÊNDICE 2</b> Seção geológica da barragem principal modificada	
Fonte: modificado de Itaipu Binacional (1978)	
Escala: Gráfica	Dezembro/2011