

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.1

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.1-2 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 Netteler & Mitsova (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.

## 1. INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica de Itaipu está localizada no Rio Paraná, na fronteira entre o Brasil e o Paraguai. Os materiais geológicos encontrados na área pertencem aos depósitos basálticos da Formação Serra Geral da Bacia do Paraná. Os basaltos estudados durante a fase da construtiva da barragem foram classificados em cinco principais derrames, denominados derrames A, B, C, D, e E, dispostos da base para o topo nesta ordem.

Ao longo da obra foram realizados diversos tipos ensaios de campo e laboratório para o projeto e construção da Barragem de Itaipu, no que diz respeito ao uso de materiais geológicos para fundação da estrutura principal, e como materiais de construção das barragens de terra e enrocamento, gerando assim, um rico arquivo técnico de investigações geológico-geotécnicas e estudos com grande interesse para a pesquisa e o desenvolvimento científico para a área da Geotecnia.

Dentre o banco de dados disponível para esta dissertação encontram-se informações específicas como, a classificação das sondagens rotativas efetuadas na área, mapas e perfis verticais com a distribuição dos materiais geológicos encontrados na área, e produção científica publicada, que foram utilizadas como base para a realização da pesquisa.

A obra já completou 35 anos, e este trabalho procura com o zoneamento tridimensional de dados Geológico-Geotécnicos, caracterizar localmente as rochas basálticas, e assim, contribuir com as pesquisas de segurança de barragens que vêm sendo realizadas pela Itaipu. Desta maneira, a pesquisa visa à representação 3D na área da propriedade geomecânica RQD, utilizando como ferramenta o programa GRASS-SIG.

Os dados das classificações de sondagens pré-existentes se encontram dispostos em planilhas estruturadas de formato GeoEas, junto aos boletins descritivos. Entretanto, para este estudo, estes dados foram transformados em arquivos de texto em formato ASCII, que é o padrão de entrada no programa GRASS (Geographic Resources Analysis Support System). Assim, realizar simulações computacionais e comparar os resultados com os dados prévios da

área de estudo, para gerar o zoneamento Geológico-Geotécnico do maciço rochoso.

O programa GRASS-GIS apresenta funções de interpolação de dados vetoriais, imagens raster e tabelas de atributos, que geram produtos como volumes ou superfícies a partir de valores pontuais interpolados, onde informações numéricas do banco de dados (vetorial, raster, ou tabela de atributos) são interpoladas. A geração de modelos tridimensionais é realizada a partir do método matemático Spline Regularizada por Tensão (RST) (NETTELER & MITASOVA, 2004).

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa foi escolhida uma área onde se localizam estruturas construídas como a Barragem Principal, Barragem Lateral Direita, Barragem de Ligação Esquerda e Direita, parte do lago e do Canal de Desvio. Para isto, foi utilizado um banco de dados com informações de sondagens rotativas realizadas no local, composto por coordenadas UTM, cota das manobras de sondagem, e classificação de RQD em cada manobra.

Os parâmetros RQD foram simulados computacionalmente e seus valores se distribuem espacialmente nos modelos tridimensionais entre o intervalo de RQD 0-100%. A partir dos modelos 3D foram produzidos perfis verticais e planos horizontais com distribuição dos parâmetros de RQD, estes foram comparados a dados prévios, como seções geológicas históricas de Itaipu e bibliografia prévia, com o intuito de caracterizar a distribuição tridimensional de RQD junto às informações geológicas e geotécnicas da área de estudo.

## 2. OBJETIVOS

Objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de simulações computacionais 3D de valores de RQD, utilizando-se como ferramenta o programa GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) e a partir dos resultados gerados por tais simulações, realizar as análises da distribuição tridimensional do RQD e compará-las com informações interpretadas e geradas por outros métodos.

Como objetivos específicos este trabalho teve:

- Reconstrução de banco de dados das sondagens rotativas para adequação a entrada de dados no software GRASS;
- Interpolação de superfícies de base e de topo para geração de topografia dos modelos 3D;
- Interpolação tridimensional dos valores de RQD;
- Geração de perfis verticais e planos horizontais extraídos dos modelos tridimensionais (RQD) a direções e cotas distintas do modelo 3D;
- Interpretação da distribuição dos parâmetros Geológico-Geotécnicos considerando o volume modelado;
- Comparação da distribuição tridimensional com feições litológicas, estruturais e geomecânicas presentes no maciço rochoso.



### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Para a execução deste trabalho foi necessário o levantamento bibliográfico de temas como a parâmetros para a classificação de do maciço rochoso a partir de sondagens rotativas e tratamento de dados por diferentes sistemas computacionais que realizam simulações 3D.

Com base na classificação de testemunhos de sondagens rotativas é possível determinar parâmetros como grau de alteração, grau de fraturamento, grau de consistência, porcentagem de recuperação e RQD, que propiciam análises de características do maciço rochoso segundo seus padrões de descontinuidades e litologia.

A partir da descrição de sistemas computacionais é possível determinar que tipo de programa tenha as características mais apropriadas para os dados a serem simulados, bem como os resultados que estes podem apresentar.

#### **3.1 Sondagem rotativa**

A sondagem rotativa é um método de investigação que utiliza um equipamento moto-mecanizado para a obtenção de amostras de materiais rochosos, contínuas e com formato cilíndrico, através de sua ação perfurante, dada basicamente por forças de penetração e rotação (ABGE, 1999).

O equipamento utilizado nesta prática (Figura 1) é composto pelo tripé, sonda rotativa, bomba d'água, hastes, barriletes, coroas, tubos de revestimento e demais acessórios e ferramentas necessárias para execução destas sondagens.

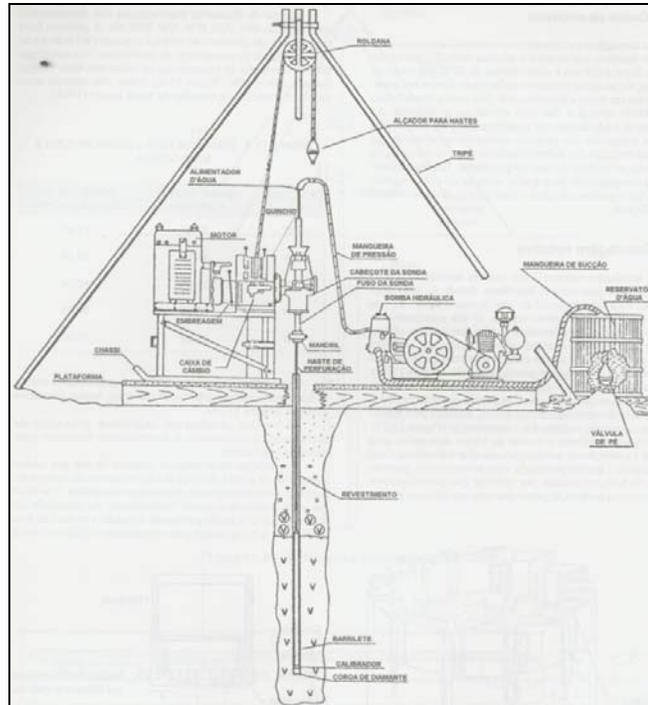


Figura 1-Esquema de execução de sondagem rotativa, FONTE: ABGE (1999).

O barrilete é dotado de peça cortante constituída de material de alta dureza em sua ponta como vídia e diamantes, possui uma camisa livre em seu interior para preservar o testemunho de sondagem. O conjunto do barrilete perfura o terreno através de movimento de rotação.

Para rochas mais brandas são utilizadas coroas com material cortante constituído de pastilhas de vídia e para rochas de durezas superiores utiliza-se coroa de diamantes industriais em forma de grãos incrustados ou grânulos disseminados numa matriz. Tal matriz, é composta por uma mistura de vários metais, que são submetidos a sintetização (ABGE, 1999).

Existem barriletes e coroas de diversas dimensões utilizadas para a perfuração em série telescópica. O diâmetro de furos e testemunhos são padronizadas segundo o padrão *Diamond Core Drill Manufactures Association* (DCDMA) ou padrão Americano que classifica os diâmetros segundo as seguintes nomenclaturas: EW, AW, BW, NW, e HW. Além deste, existe também o padrão Europeu, porém, os mais utilizados nas investigações Geológico-Geotécnicas no Brasil são os de padrão americano, NW e HW (ABGE, 1999).

A Tabela 1 apresenta informações detalhadas dos diâmetros de furo e diâmetros do testemunho de sondagem relacionados à sua nomenclatura, segundo o padrão Americano (ABGE, 1999).

Tabela 1- Diâmetros de furos e testemunhos de sondagem segundo padrão DCDMA ou Americano e métrico. Fonte: ABGE (1999).

Denominação (Padrão DCDMA)	Diâmetro de furo (mm)	Diâmetro do testemunho (mm)
EW	37,71	21,46
AW	48,00	30,10
BW	59,94	42,04
NW	75,69	54,73
HW	99,23	76,20

A operação da sondagem rotativa é realizada em ciclos sucessivos de cortes e retirada de testemunhos do interior do barrilete, procedimento denominado manobra de sondagem rotativa.

O avanço de cada manobra é dependente da qualidade do material do testemunho, pois, quando a rocha é de boa qualidade o comprimento do testemunho pode ser equivalente ao comprimento do barrilete. Entretanto, quando o material amostrado não tem uma qualidade muito boa, há perda ou destruição de material. Em locais de difícil amostragem o comprimento da manobra deve ser diminuído até o mínimo necessário (ABGE, 1999).

Para uma representação de boa qualidade do maciço rochoso é recomendado que em cada manobra o comprimento do testemunho amostrado seja superior a 95% do avanço. Existe a possibilidade de baixa recuperação devido à deficiência da operação do equipamento, neste caso, isto deve ser identificado na caixa de testemunho e no boletim de sondagem. Com isso, há necessidade dos testemunhos de sondagens serem armazenados em caixas de madeira ou plástico com tampa, e dispostos na sequência exata da sua posição no furo (Figura 2).

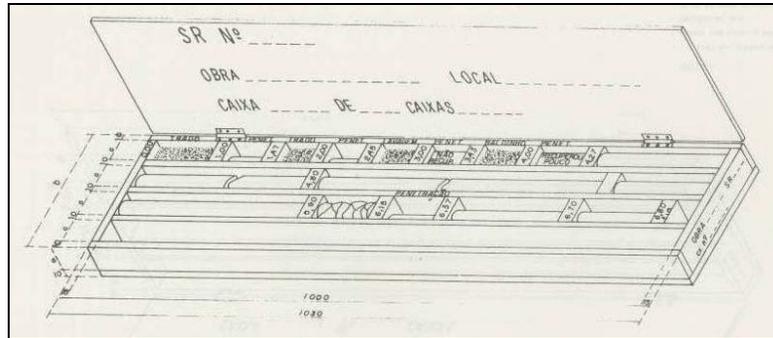


Figura 2- Esquema de caixa de testemunhos de sondagem rotativa, Fonte: ABGE, 1999.

As sondagens rotativas podem se diferenciar do modelo padrão de execução quando se opta por um testemunho com orientação ou com amostragem integral. A amostragem de testemunho com orientação é utilizada na investigação de maciço ao longo de uma feição específica que, ocorre ao longo de uma determinada direção. As sondagens com amostragem de testemunho integral é uma técnica de investigação que permite obter amostras integrais de trechos dos maciços, principalmente materiais que possuem recuperação baixa ou nula.

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil- LNEC utiliza uma técnica para recuperação integral de testemunho de sondagem, no qual empregam uma haste fixada com calda de cimento, em furo e diâmetro pequeno, como o EW, e é sobrefurada em diâmetro maior, como o HW, possibilitando a extração de todas as amostras na posição relativa original.

Para a execução da sondagem rotativa é necessário verificar quais as características do terreno em que será executada a atividade. Caso o terreno seja seco a sondagem só será iniciada após a limpeza de uma área que possa permitir o desenvolvimento das operações sem que haja algum obstáculo, abertura de um sulco para o desvio de águas de enxurradas, e ancoragem firme da sonda no solo, para minimizar vibrações e transmissões para o ensaio (ABGE, 1999).

Se o terreno for alagado ou coberto por lâmina d'água, este tipo de sondagem deve ser feito a partir de uma plataforma fixa ou flutuante bem

ancorada que cubra no mínimo a área delimitada pelos pontos de apoio do tripé, ou um raio de 1,5m a partir dos contornos da sonda.

As seguintes medidas devem ser tomadas para que a execução de sondagens rotativas seja eficaz (ABGE, 1999):

- Na área onde será feita a sondagem deverá ser cravado um piquete, com a identificação da sondagem, que servirá como ponto de referência para medidas de profundidade e amarração topográfica;
- Em áreas onde ocorre solo no local do furo, deverá ser executadas sondagens com medidas de SPTs até atingir o material rochoso;
- Quando o avanço da sondagem ocorrer com mais de 0,50m de material mole é necessária a execução de um ensaio de penetração SPT de 1m, seguido de outros até que se atinjam novamente condições para execução de sondagem rotativa;
- A sequência de diâmetros a serem utilizados deverá ser estabelecida pela fiscalização e será mudado apenas mediante autorização se comprovada à necessidade;
- O controle de profundidades do furo é dados com a precisão de 1 cm, e deverá ser obtida pela diferença entre o comprimento total das hastes com a peça de perfuração, e a sobra delas em relação ao piquete de referência;
- Caso a sondagem atinja o nível freático a sua profundidade deve ser anotada;
- O nível d'água e o artesianismo deverão ser medidos todos os dias antes do início dos trabalhos, e na manhã seguinte após a execução da sondagem;
- Com exceção a furos orientados, após a última leitura do nível d'água, ou término de um furo seco, este deverá ser totalmente preenchido, deixando na sua boca a estaca de identificação deste;
- Nos furos executados para construções de barragens, o preenchimento deverá ser feito com uma calda grossa de cimento

ou argamassa, até o fundo do furo com auxílio de um tubo que, será levantado à medida de seu preenchimento;

### **3.2 Características de maciços rochosos**

Um maciço rochoso representa um material intacto encontrado em um meio contínuo de dimensões variáveis, dependente sua gênese e composição mineralógica, onde podem ocorrer blocos de rocha separados por descontinuidades, as quais se encontram preenchidas ou não, deixando o sistema com características heterogêneas (ISRM, 1978).

As características que representam a qualidade de maciços rochosos, do ponto de vista da Engenharia Civil estão relacionadas com sua litologia, estado de alteração do material, coerência e descontinuidades (ABGE, 1999).

Para caracterizar os maciços rochosos conta-se com técnicas de investigação do subsolo através da prospecção Geotécnica. Estas técnicas podem ser diretas ou indiretas, um exemplo de técnicas diretas são as prospecções mecânicas, como a sondagem rotativa, e de técnicas indiretas as prospecções geofísicas.

A partir do testemunho da sondagem rotativa é possível determinar parâmetros para a classificação geomecânica dos maciços rochosos, como o RQD (Rock Quality Designation), grau de alteração, porcentagem de recuperação dos testemunhos, grau de consistência e grau de fraturamento, além da classificação litológica que determina o tipo de rocha, a partir da composição mineral, cor, textura, tamanho dos grãos, estruturas e outras feições importantes.

Nos furos de sondagem é possível a realização de ensaios de perda d'água sob pressão, visando a determinação da condutividade hidráulica e do comportamento dos maciços em relação à percolação da água por suas fissuras (ABGE, 1999).

### **3.2.1 Litologia**

A classificação litológica é baseada em conceitos petrográficos do material, este segmento da Geologia estuda as rochas por meio de sua identificação de composição mineral, cor, textura, tamanho de grãos, estruturas entre outras feições importantes. A presença de alguns minerais define a cor típica da rocha, que devem sempre constar na descrição litológica. Esta tem grande importância na avaliação da representatividade das características físico-mecânicas da rocha e extrapolação de resultados pontuais para o maciço como um todo, (ABGE, 1999).

### **3.2.2 Descontinuidades**

Uma descontinuidade é definida como toda a zona de fraqueza entre os blocos de rocha intacta como, juntas, fraturas, planos de cisalhamento, planos de xistosidade e contatos (U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 1998). E são resultantes das solicitações mecânicas e térmicas sofridas pelos maciços rochosos ao longo da sua vida (ANDERSON *et al.*, 1984; AUBELE *et al.*, 1988).

Estas estruturas podem ser classificadas como tectônicas ou atectônicas. As primeiras são geradas em estado de fluxo plástico ou rígido, gerando dobras, zonas de cisalhamento, foliações, juntas e falhas. Já as estruturas atectônicas são feições que ocorrem em zonas mais superficiais do maciço, como juntas de alívio, que são descontinuidades subparalelas à superfície topográfica, e se diferenciam dos planos de falhas por não apresentarem deslocamento em seu plano visível, assim como as estratificações, que são estruturas geradas durante deposições sedimentares. Estas podem se apresentar como planos para famílias de descontinuidades em arranjos paralelos ou subparalelos (U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 1998).

Nos maciços rochosos são encontradas descontinuidades tais como falhas, fraturas, planos de acamamento, juntas, fissuras e microfissuras, que ocorrem constantemente nos materiais rochosos.

Feições estruturais do maciço rochoso associadas à deformações plásticas são representadas por toda uma superfície planar oriunda de rochas metamórficas, como feições gnáissicas, foliações, xistosidades, e clivagens, e podem ser consideradas porções propícias a formação de descontinuidades. A Figura 3 representa famílias de fraturas ocorrentes em um maciço rochoso.



Figura 3- Exemplo de maciço rochoso com estrutura de descontinuidades paralelas e verticais. Fonte: Hudson & Harison (1997).

A obtenção de características das descontinuidades de um maciço permite qualificar e prever seu comportamento. Tais características são a natureza de sua ocorrência, localização de porções alteradas nas rochas, orientação, continuidade ou persistência, superfície geométrica, e a natureza e preenchimento das juntas.

### **3.2.2.1 Espaçamento**

O espaçamento é a distância perpendicular entre descontinuidades adjacentes, normalmente refere-se à média ou a moda estatística do espaçamento de um grupo de descontinuidades (ISRM, 1978). Tem forte influência na permeabilidade do maciço, em geral, a condutividade hidráulica

de um grupo de juntas deve ser inversamente proporcional ao seu espaçamento, comparando a abertura das juntas individualmente.

A medida do espaçamento deve ser feita com o auxílio de uma trena, colocada em posição perpendicular a parte exposta das paredes das descontinuidades adjacentes. Caso a trena não possa ficar em posição ortogonal a parede da descontinuidade são necessárias correções com um compasso, para que possa obter o verdadeiro espaçamento. Esta situação ocorre devido ao fato que as juntas podem não ser suficientemente paralelas em dadas famílias de descontinuidades, e para que se obtenha uma boa precisão utiliza-se o compasso juntamente com a trena na medição.

A Figura 4 ilustra a medida do espaçamento segundo uma linha que corta o maciço rochoso, interceptando as descontinuidades. O comprimento desta linha,  $L$  (m), o número de descontinuidades interceptadas,  $N$ , auxiliam na obtenção da frequência das descontinuidades,  $\lambda$ , e o espaçamento médio,  $\bar{x}$ , segundo as Equações 1 e 2.

$$\lambda = \frac{N}{L} \text{ (m)} \quad \text{(Equação 1)}$$

$$\bar{x} = \frac{L}{N} \text{ (m)} \quad \text{(Equação 2)}$$

A frequência das descontinuidades reflete o número de fraturas por metro, recíproco ao espaçamento médio. Também é possível considerar a distribuição do espaçamento individual entre fraturas.

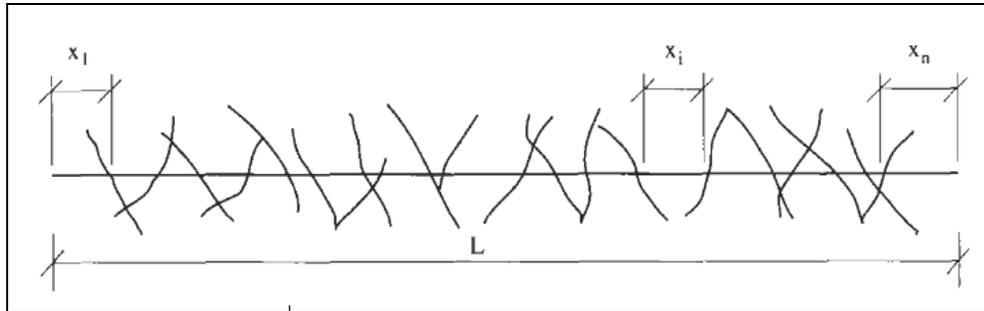


Figura 4- Esquema para quantificação do espaçamento de descontinuidade a partir de uma linha de referência que intercepta estas fraturas. Fonte: Hudson & Harison (1997).

Todas as distâncias de descontinuidades adjacentes medidas devem ter um tamanho menor que três metros, caso contrário este material não é considerado um maciço com descontinuidade, e sim dois corpos distintos. A classificação de descontinuidades segundo seu espaçamento é dada pela Tabela 2.

Tabela 2- Grau de espaçamento da descontinuidades. Fonte: ISRM (1978).

Descrição	Espaçamento (mm)
Muito próximo	<6
Próximo	6-20
Medianamente afastadas	20-60
Afastadas	60-200
Muito afastadas	>200

Quando uma amostra é suficientemente extensa utiliza-se os valores de espaçamento individuais para a geração de histogramas, onde a distribuição exponencial negativa é freqüentemente evidente. Deve se notar que a há uma maior tendência do histograma apresentar valores muito pequenos de espaçamento e uma menor tendência de apresentar valores altos de espaçamento nesta distribuição (Figura 5).

Embora existam mais valores de espaçamento pequeno do que valores grandes, um único valor de espaçamento alto pode aumentar em proporção o valor do espaçamento total do maciço (HUDSON & HARISON, 1997).

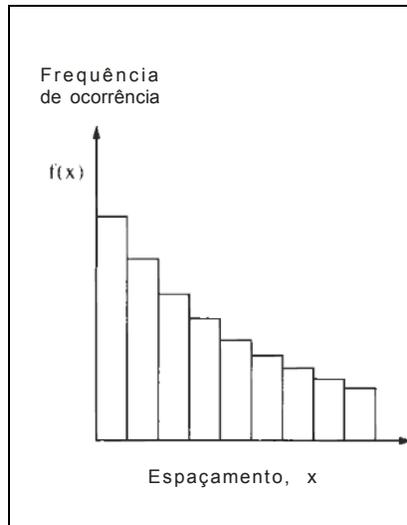


Figura 5- Distribuição exponencial negativa de valores de espaçamento de descontinuidades. Fonte: Hudson & Harison (1997).

### 3.2.2.2 Abertura

A abertura é a distância perpendicular entre as paredes adjacentes de uma descontinuidade, onde o espaço intermediário é preenchido por água ou ar. Mesmo aberturas mais fechadas representam uma influência considerável na condutividade hidráulica do maciço, sendo que a descrição do tipo de abertura é dada com relação ao seu tamanho (Tabela 3).

Tabela 3- classificação da abertura das descontinuidades. Fonte: ISRM (1978).

ABERTURA (mm)	DESCRIÇÃO	
<0,1 (mm)	Muito fechada	Feições fechadas
0,1-0,25 (mm)	Fechada	
0,25-0,50 (mm)	Parcialmente aberto	
0,50-2,5 (mm)	Aberto	Feições abertas
2,5-10 (mm)	Moderadamente largo	
>10 (mm)	Largo	
1-10 (cm)	Muito Largo	Feições muito abertas
10-100 (cm)	Extremamente Largo	
>1 (m)	Cavernas	

### 3.2.2.3 Persistência

A persistência corresponde à extensão em área, ou, o tamanho da descontinuidade contida em um plano. Tem influência na resistência ao cisalhamento dos maciços rochosos, grande importância a projetos de taludes e fundações de barragens. Em geral, uma descontinuidade possui baixa resistência, por isso dimensioná-la em relação às dimensões de um projeto é essencial para definir o modelo geomecânico (ABGE, 1999).

Sua determinação pode ser obtida a partir da observação das medidas de comprimento do traço da descontinuidade em uma superfície exposta, utilizando uma trena de comprimento mínimo de 10 metros, onde são feitas medidas do tamanho das descontinuidades de cada família, a fim de obter um valor médio de comprimento que será o índice de caracterização da persistência.

Rochas individuais expostas, ou, domínios identificados, devem ser descritos de acordo com a persistência presentes em famílias de descontinuidades. Estas famílias podem ser classificadas pelo termo *persistente*, *sub persistente*, e *não persistente* segundo o seu tamanho medido na rocha em questão (Tabela 4).

Tabela 4- Classificação da persistência das descontinuidades. Fonte: ISRM (1978).

<b>Categoria</b>	<b>Comprimento do traço (m)</b>
Persistência muito baixa	<1
Persistência baixa	1-3
Persistência média	3-10
Persistência alta	10-20
Persistência muito alta	>20

#### **3.2.2.4 Resistência das paredes**

Os maciços rochosos com descontinuidades freqüentemente são alterados nas paredes destas. A resistência das paredes deve ser menor que a da rocha intacta caso exista à alteração. As condições das superfícies das paredes são extremamente relevantes quando se trata da resistência das descontinuidades. Uma superfície de paredes com contato rocha-rocha deve ter uma resistência maior que uma superfície que tenha preenchimento argiloso.

O material de preenchimento pode ser composto de minerais como calcita, clorita, e argilominerais, e mesmo de materiais pétreos proveniente de ação de falhas, como brechas. Este é um fator de influência nas classificações Geológico-Geotécnicas de uma descontinuidade, quanto à resistência ao cisalhamento e a deformabilidade, onde uma descontinuidade preenchida por material pétreo pode ser mais resistente e menos deformável que a resistência da própria rocha (ABGE, 1999).

O comportamento físico de uma descontinuidade preenchida depende de fatores como, o tipo de material, espessura, presença d'água e condições de permeabilidade. Descontinuidades com preenchimento de argilominerais em contato com água geram um grande decréscimo na resistência do maciço. Entretanto descontinuidades com este mesmo material de preenchimento pode alterar a condutividade hidráulica do maciço, o deixando menos permeável.

Porém, nos casos em que o preenchimento é dado por materiais de alta resistência, como pedaços menores de rocha, ou mesmo não havendo

preenchimento algum entre as paredes da descontinuidade, obtendo um contato rocha-rocha entre as paredes da descontinuidade, haverá um acréscimo da resistência do maciço devido ao intertravamento das paredes.

A Tabela 5 demonstra a relação dos contatos de superfícies e tipos de descontinuidades, usualmente adotada para basaltos no Brasil.

Tabela 5- Tipos de contatos de descontinuidades e sua classificação.

Fonte: IPT (1984).

<b>Sigla</b>	<b>Descrição das superfícies</b>
D <sub>1</sub>	Contato rocha-rocha, parede sã
D <sub>2</sub>	Contato rocha-rocha, presença de material pétreo rijo- Ca- calcita e Si- sílica
D <sub>3</sub>	Paredes com alteração incipiente, sinais de percolação de água, preenchimento ausente
D <sub>4</sub>	Paredes alteradas, preenchimento ausente
D <sub>5</sub>	Paredes alteradas, com preenchimento: ag1- preenchimento argiloso com espessura de 1 mm; gr10- preenchimento granular com espessura de 10 mm;

### **3.2.2.6 Rugosidade**

Em termos gerais as descontinuidades tendem a apresentar ondulações, chamadas rugosidades, que são formadas por tensões de ruptura, que em pequena escala, a superfície tende a ser rugosa, pois o material rochoso geralmente é composto de minerais com diferentes tipos de dureza, que se alteram diferentemente (Figura 6).

As paredes rugosas de descontinuidades são componentes potencialmente importantes para a resistência ao cisalhamento de um maciço, especialmente no caso de feições não deslocadas e intertravadas. É importante considerar a declividade e abertura das rugosidades, espessura de preenchimento, além do aumento de algum deslocamento da rocha.

Na prática ondulações afetam a direção inicial do deslocamento do plano de descontinuidade. Para obter a resistência de descontinuidades quanto ao deslocamento do maciço rochoso pode ser feito o ensaio de cisalhamento direto *in situ* (ISRM, 1978), observado na Figura 6, onde é demonstrada uma

descontinuidade sendo ensaiada em diferentes escalas para rugosidades em diferentes escalas.

Se a direção potencial de deslizamento é conhecida, a rugosidade pode ser ensaiada por perfis lineares obtidos paralelamente um ao outro. Em muitos casos é relevante a direção ser paralela à direção de mergulho do perfil. Existem situações em que o deslizamento é controlado pela intersecção de duas descontinuidades planas, a direção do potencial de deslizamento é paralela a intersecção dos planos.

Em casos onde a direção do potencial de deslizamento não é conhecida a rugosidade deve ser ensaiada em três dimensões ao invés de duas. O ensaio pode ser feito utilizando compasso e clinômetro para a obtenção de medidas de direção. Segundo ISRM (1978), métodos de ensaios para rugosidades são feitos com o intuito de estimar a resistência ao cisalhamento e dilatação, tanto a abertura das paredes das descontinuidades, quanto o material de preenchimento desta, influenciam na resistência do material em que esta descontinuidade está constituída.

Descontinuidades rugosas contam com o acréscimo da resistência devido às irregularidades da superfície, e podem apresentar uma maior resistência que uma descontinuidade lisa.

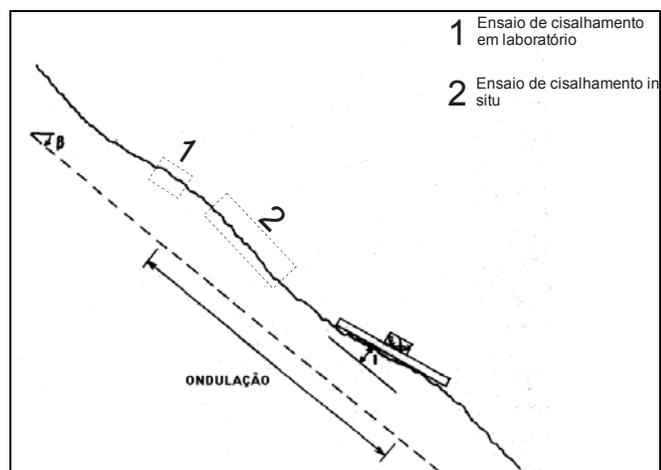


Figura 6- Esquema de ensaio de cisalhamento *in situ*, onde  $\beta$  é o ângulo de atrito. Fonte: modificado de ISRM (1978).

### **3.2.3 Índices Geomecânicos**

Para classificação de um maciço rochoso é necessário a obtenção de algumas propriedades geomecânicas do material a ser avaliado, tais como, o grau de alteração, o grau de consistência, o grau de fraturamento, a porcentagem de recuperação, e o RQD.

#### **3.2.3.1 Grau de alteração**

O grau de alteração avalia a alteração dos minerais e o decréscimo da resistência mecânica em função da ação do intemperismo, onde na maioria dos tipos de rochas pode ser correlacionada com o grau de coerência. No entanto, para a maioria das rochas sedimentares (rochas brandas) a classificação será apenas com base no seu grau de coerência. A água pode afetar o desempenho mecânico de um maciço, tanto quando se trata do agente de intemperismo, quanto às tensões causadas pela sua presença, reduzindo a resistência ao cisalhamento do maciço, aumentando então a alteração que influencia no comportamento do maciço.

Os principais tipos de alteração são a deutérica, que ocorre em ambiente endógeno e é dependente de fenômenos magmáticos, e a alteração meteórica, que ocorre na dependência da hidrosfera e atmosfera dentro de um ambiente exógeno. Em regiões de clima tropical o intemperismo, principalmente o químico, pode atingir grandes profundidades, afetando o comportamento dos maciços.

Para identificar o estado de alteração de um maciço, a Geologia de Engenharia conta com a caracterização táctil-visual, baseando-se em variações do brilho, da cor do mineral, e a friabilidade. Este critério é mais utilizado para comparação de maciços com mesma classificação litológica, e tem melhor aplicação para rochas metamórficas e magmáticas, pois em rochas sedimentares a evolução dos processos de alteração podem não resultar em diminuição de suas características mecânicas, como exemplo um arenito limonitizado, que se apresenta mais resistente que o original.

Na Tabela 6 apresenta-se a classificação para a intensidade de alteração de uma amostra de rocha, segundo IPT (1984). *O U. S. Department*

of Interior (1998), caracteriza os materiais segundo o grau de alteração em nove classes distintas, classificando-as de rocha sã a rocha decomposta (Tabela 7). Para classificação do maciço rochoso investigado na área da construção da Usina de Itaipu foi gerada uma descrição de grau de alteração própria, com cinco classes (Tabela 8).

Tabela 6- Grau de alteração. Fonte: IPT (1984)

<b>Sigla</b>	<b>Denominação</b>	<b>Característica</b>
<b>A1</b>	Rocha sã ou praticamente sã	Apresenta minerais primários sem vestígios de alteração ou com alterações químicas e físicas incipientes. Neste caso, a rocha é ligeiramente descolorida.
<b>A2</b>	Rocha medianamente alterada	Apresenta minerais medianamente alterados e a rocha é bastante descolorida.
<b>A3</b>	Rocha muito alterada	Apresenta minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis.
<b>A4</b>	Rocha extremamente alterada	Apresentam minerais totalmente alterados e a rocha é intensamente descolorida, gradando para cores de solo.

Tabela 7 - Grau de Alteração. Fonte: modificado de U. S. Department of Interior (1998).

<b>Sigla</b>	<b>Classificação</b>	<b>Características observadas</b>
W1	Rocha sã	A rocha e fraturas não apresentam descoloração e oxidação. Não existe mudança na textura, nem lixiviação dos minerais. Com batida do martelo apresenta som metálico.
W2	Rocha sã- Rocha pouco alterada	Combinação da descrição de W1 e W3.
W3	Rocha pouco alterada	A rocha e algumas fraturas apresentam descoloração e oxidação superficial. A textura apresenta-se preservada, há pequena lixiviação de alguns minerais solúveis. Apresenta som metálico na batida com martelo. O corpo rochoso não está alterado.
W4	Rocha pouco alterada- Rocha moderadamente alterada	Combinação da descrição de W3 e W5.
W5	Rocha moderadamente alterada	São presentes descoloração e oxidação nas fraturas e nos minerais da rocha, principalmente os compostos por ferro e magnésio em sua composição, onde apresentam oxidação superficial, e o feldspato mostra-se opaco. Todas as superfícies de fraturas se apresentam descoloridas e oxidadas. A textura se apresenta preservada. Grande parte dos minerais solúveis foram lixiviados. Na batida do martelo não apresenta som metálico. O corpo da rocha está ligeiramente alterado.
W6	Rocha moderadamente alterada- Rocha intensamente alterada	Combinação da descrição de W5 e W7.
W7	Rocha intensamente alterada	A rocha apresenta descoloração e oxidação, todos os feldspatos e minerais ferro- magnesianos se encontram alterados, se desagregando. Todas as superfícies de fraturas se apresentam oxidadas e são friáveis. A textura apresenta-se alterada por mudanças químicas dos minerais. os minerais solúveis foram completamente lixiviados. O material rochoso pode ser quebrado facilmente com pressão do dedos ou golpe leve do martelo em locais que não apresentem planos de fraqueza.
W8	Rocha com intensidade de alteração muito alta	
W9	Rocha decomposta	A rocha apresenta-se totalmente descolorida e oxidada. Porém minerais como quartzo, podem não estar alterados. Feldspatos e minerais ferro-magnesianos foram transformados em argila. O material se assemelha a um solo, entretanto a estrutura da rocha matriz pode estar preservada. O material pode ser desagregado com a mão.

Tabela 8- Grau de alteração adotado por Itaipu.

<b>Sigla</b>	<b>Classificação</b>	<b>Características da rocha</b>
A1	Rocha sã	-
A2	Rocha pouco alterada	Apresenta oxidação nas juntas
A3	Rocha medianamente alterada	Apresenta matriz pouco alterada
A4	Rocha muito alterada	Apresenta matriz profundamente alterada
A5	Rocha totalmente alterada	Solo com vestígio da estrutura original (rocha matriz)

### 3.2.3.2 Grau de Consistência

O grau de consistência ou coerência avalia de forma indireta as características de resistência da rocha através da análise de dureza, resistência ao impacto e desagregabilidade, apresentando relação com a qualidade do tipo rochoso. Este grau é definido com base na tenacidade, dureza e friabilidade das amostras de rocha. Tal caracterização é feita segundo a resistência da rocha ao impacto do martelo e ao risco com lâmina de aço (Guidicini *et al.*, 1972) (Tabela 9).

Para a caracterização dos materiais rochosos encontrados na área de construção da Itaipu foi elaborada uma classificação de grau de consistência própria (Tabela 10).

Tabela 9- Grau de coerência da rocha (consistência). Fonte: GUIDICINI et al. (1972)

<b>Sigla</b>	<b>Denominação</b>	<b>Característica</b>
<b>C1</b>	Rocha coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, produzindo fragmentos de bordas cortantes. Superfície dificilmente riscável por lâmina de aço. Somente escavável a fogo.
<b>C2</b>	Rocha medianamente coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo. Superfície riscável com lâmina de aço. Escavável a fogo.
<b>C3</b>	Rocha pouco coerente	Quebra com facilidade ao golpe do martelo, produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente. Superfície facilmente riscável com lâmina de aço. Escarificável.
<b>C4</b>	Rocha incoerente	Quebra com a pressão dos dedos, desagregando-se. Pode ser cortada com lâmina de aço. Friável e escavável com lâmina.

Tabela 10- Grau de coerência da rocha (consistência adotado por Itaipu.

<b>Sigla</b>	<b>Classificação</b>	<b>Características da rocha</b>
<b>C1</b>	Rocha muito consistente	Apresenta som metálico. Quebra com dificuldade ao golpe do martelo
<b>C2</b>	Rocha consistente	Não apresenta som metálico. Quebra com facilidade ao golpe do martelo
<b>C3</b>	Rocha medianamente consistente	As bordas dos blocos quebram com dificuldade com a pressão dos dedos
<b>C4</b>	Rocha pouco consistente	Desmancha-se com o golpe do martelo
<b>C5</b>	Rocha sem consistência	Desmancha-se com a pressão dos dedos

### 3.2.3.3 Grau de fraturamento

O fraturamento é descrito pela quantidade de fraturas ocorridas por metro linear de sondagem. Um critério de classificação muito utilizado no Brasil, segundo o IPT (1984), indica o número de descontinuidades por unidade litológica e por trecho de fraturamento homogêneo, independentemente das manobras (Tabela 11). Para a caracterização dos materiais rochosos encontrados na área de construção da Itaipu foi elaborada uma classificação de grau de fraturamento própria (Tabela 12). O U. S. Department of Interior (1998), caracteriza os materiais segundo o grau de fraturamento em nove classes de densidade de fraturas, classificando-as de rocha não fraturada a rocha muito intensamente fraturada (Tabela 13).

Tabela 11- Grau de fraturamento do maciço. Fonte: IPT (1984)

<b>Sigla</b>	<b>Fraturas/m</b>	<b>Denominação do maciço</b>
<b>F1</b>	<1	Ocasionalmente fraturado
<b>F2</b>	1 a 5	Pouco fraturado
<b>F3</b>	6 a 10	Medianamente fraturado
<b>F4</b>	11 a 20	Muito fraturado
<b>F5</b>	>20	Extremamente fraturado

Tabela 12- Grau de fraturamento do maciço adotado por Itaipu.

<b>Sigla</b>	<b>Fraturas/m</b>	<b>Características da rocha</b>
<b>F1</b>	<1	Pouco fraturada
<b>F2</b>	1 a 5	Fraturada
<b>F3</b>	6 a 10	Muito Fraturada
<b>F4</b>	11 a 20	Extremamente Fraturada
<b>F5</b>	>20	Fragmentada

Tabela 13- Classes de densidade de fraturamento. Fonte: modificado de U. S. Department of Interior (1998).

<b>Sigla</b>	<b>Classificação</b>	<b>Características observadas</b>
FD0	Rocha não fraturada	Não são observadas fraturas
FD1	Rocha muito pouco fraturada	Testemunho recuperado com comprimento maior do que 1m
FD2	Rocha muito pouco fraturada - Rocha pouco fraturada	*
FD3	Rocha pouco fraturada	Testemunho recuperado com comprimento entre 30 cm e 1m, poucos pedaços de rocha são menores do que 30 cm e maiores que 1m
FD4	Rocha pouco fraturada- Rocha moderadamente fraturada	*
FD5	Rocha moderadamente fraturada	Testemunho recuperado com comprimento entre 10 e 30 cm, grande parte dos fragmentos com comprimentos em torno de 20 cm
FD6	Rocha moderadamente fraturada- Rocha intensamente fraturada	*
FD7	Rocha intensamente fraturada	Testemunho recuperado com comprimento menor do que 10 cm. Comprimento dos fragmentos entre 3 e 10 cm, com intervalos fragmentados
FD8	Rocha intensamente fraturada- Rocha muito intensamente fraturada	*
FD9	Rocha muito intensamente fraturada	Testemunho composto por fragmentos de rocha em forma de lâminas e alguns fragmentos de pequeno comprimento

### 3.2.3.4 Porcentagem de recuperação

A porcentagem de recuperação (% recuperação) é um índice que representa o quanto de material rochoso recuperado existe por comprimento total de avanço de sondagem rotativa, em porcentagem. O cálculo é feito a partir da Equação 3, exemplificando com o mesmo testemunho mostrado na Figura 7, a porcentagem de recuperação desta amostra seria de 86%. Este índice avalia, além da qualidade do maciço rochoso, a qualidade do ensaio de sondagem rotativa.

$$\text{Recuperação} = \frac{L}{S} \cdot 100\% \quad \text{(Equação 3)}$$

$L$  = Comprimento do testemunho;

$S$  = Avanço total da manobra;

### 3.2.3.5 RQD (Rock Quality Designation)

O RQD (*Rock Quality Designation*) é um índice que estima o grau de compartimentação do maciço, baseado na análise de testemunhos de sondagens, onde mede a influência das descontinuidades no maciço. D.U. Deere (1964) desenvolveu este índice que vem sendo utilizado para identificar zonas de qualidades variáveis nos maciços. O valor de RQD é calculado conforme a Equação 4, proposta por Deere et al. (1967), e indicando a qualidade do meio rochoso aplicado aos testemunhos de sondagens rotativas, com diâmetro superior a 55 mm e restrito a rochas duras a medianamente duras.

$$RQD = \frac{\sum L}{S} \cdot 100\% \quad \text{(Equação 4)}$$

$L$  = Pedacos de rocha maiores, ou, iguais a 10 cm;

$S$  = Comprimento total do avanço da manobra;

A relação entre o índice RQD e a qualidade da rocha foi proposta por Deere (1967), e esta disposta na Tabela 14.

Tabela 14- Relação entre a qualidade do maciço e o valor de RQD (%).  
 Fonte: Deere (1967).

RQD (%)	Qualidade da rocha
< 25%	Muito pobre
25-50%	Pobre
50-75%	Razoável
75-90%	Boa
90-100%	Excelente

A Figura 7 representa um testemunho de sondagem rotativa de uma manobra com avanço de 150 cm, sendo que o somatório dos comprimentos de rocha maiores do que 10 cm resultam em 86 cm. Aplicando a Equação 4, obtém um valor de RQD de 57%, o que corresponde a um padrão geomecânico razoável do maciço, conforme é classificação de Deere *et al* (1967).

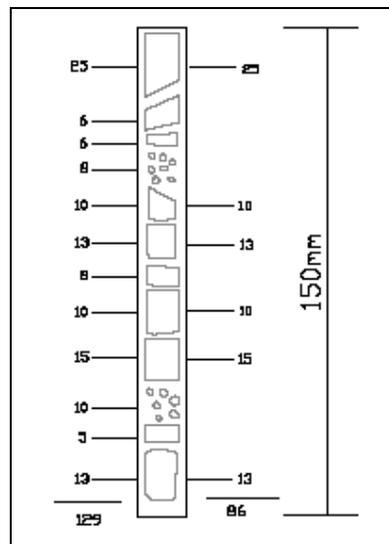


Figura 7- Esquema de testemunho de sondagem rotativa de uma manobra de 150 cm, representando os pedaços maiores que 10 cm ao longo do furo. Fonte: modificado de Deere (1988).

Existem diversas maneiras para medições de comprimento de testemunhos de sondagens, alguns dos trechos do furo podem ser medidos ao longo de uma linha central, de ponta a ponta, ou ao longo da seção de barrilete

circular inteira. O procedimento recomendado é a medição do testemunho ao longo de uma linha central (Figura 7).

Testemunhos fragmentados por processos de perfuração devem ser ajustados e somados juntos para fazer uma só classificação do furo. Estas quebras geralmente são evidenciadas pela presença de superfícies rugosas frescas. Alguns tipos de rochas, como argilitos, de resistência mais baixa, que teriam um valor de RQD de 100% apresentam um RQD com valor zero, devido a possíveis quebras durante o processo de perfuração, ou por processos de desintegração do material quando em contato com água, secagem, e intumescência do material.

Em rochas que apresentam xistosidades e laminações existe a dificuldade de discernir entre quebras geradas pela perfuração, e as quebras naturais do maciço, sendo que o cálculo da Equação 4 só deverá ser efetuado quando a situação de quebra for devido ao segundo caso.

A ISRM (1978) recomenda que valores de RQD, onde o perfil de sondagem tem comprimentos variáveis, sejam medidos a partir da separação dos materiais quanto ao seu acamadamento, domínios estruturais, zonas de fraqueza, que possam indicar uma variabilidade no terreno, e assim representarem uma maior acurácia nas medidas deste índice.

Priest & Hudson (1976) apresentaram uma maneira diferentes de estimar valores de RQD, baseada em distribuições estatísticas, pelos quais os valores de espaçamento são obtidos a partir de uma linha de referência do maciço. O levantamento de dados segundo uma linha de referência (*scanline*) consiste na medição de todas as descontinuidades que intersectam uma linha demarcada em uma frente do maciço rochoso.

A função da frequência de descontinuidades de espaçamento  $x$ ,  $F(x)$ , encontradas no maciço, relacionada com o número médio de descontinuidades por metro,  $\lambda$ , determina a frequência de espaçamento do maciço rochoso de um determinado local.

$$F(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad \text{(Equação 5)}$$

Teoricamente o valor de RQD, por este método, pode ser obtido através da curva da distribuição de frequência dos valores de espaçamento medido em campo (Figura 8), a partir de valores de espaçamento acima de 10 cm.

Assumindo que o espaçamento apresenta uma distribuição exponencial negativa, o valor de RQD é calculado segundo a Equação 6, onde a porção de material intacto  $t$  é igual a 10cm.

$$RQD = 100e^{-t\lambda}(t\lambda + 1) \quad \text{(Equação 6)}$$

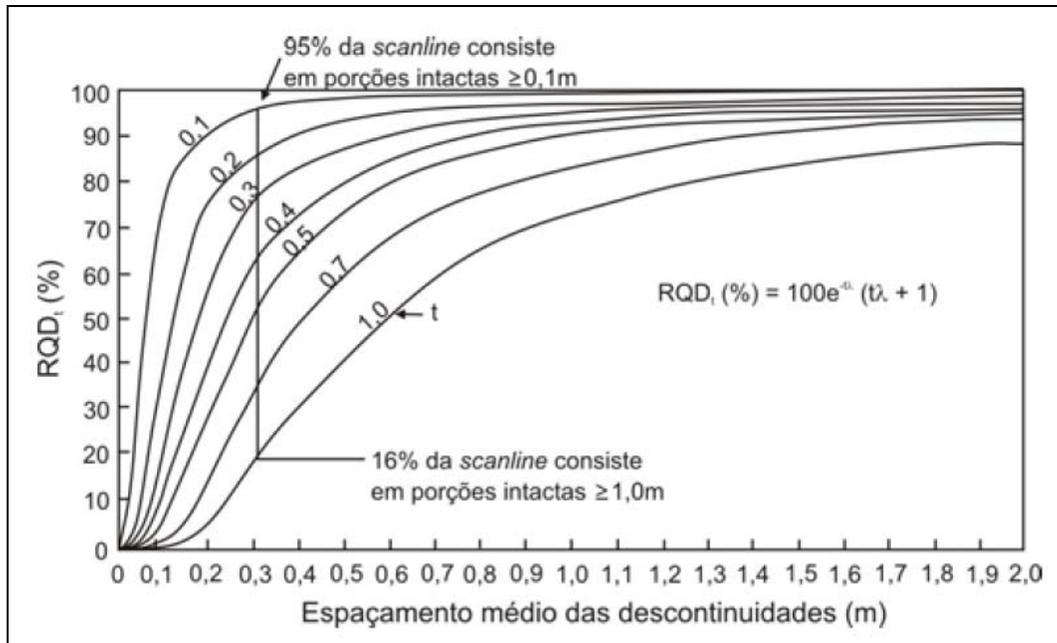


Figura 8-Variação de RQD *versus* o espaçamento médio das descontinuidades e t. Fonte: Priest & Hudson (1976).

Em construções de grande porte como túneis, barragens e rodovias, subterrâneas ou não, existe a necessidade de se conhecer as características dos materiais geomecânicos e litológicos, para fazer a previsão do fator de segurança, ou mesmo constatar se existe a necessidade do reforço de regiões escavadas. Para isto, na Geotecnia, os parâmetros de RQD são utilizados na classificação do material.

Um dos primeiros dados de estudo na área da construção são as informações de recuperação de testemunhos e os valores de RQD dos registros de perfurações exploratórias, além das descrições litológicas dos materiais. A porcentagem de recuperação, os valores de RQD, e as descrições geológicas do material podem ser realizadas *in situ*.

Há no campo da classificação geomecânica um conceito denominado *Red Flag*, que pode ser interpretado como valores de alerta, pelos quais necessitam que medidas de segurança sejam tomadas durante a construção. No caso do RQD este efeito é para valores inferiores encontrados, tanto em fases investigatórias, quanto em fases posteriores do projeto. O conceito de “*Red Flag*” foi desenvolvido para obras de construção de túneis, primeiramente para auxiliar na locação do túnel e seu eixo na melhor condição subterrânea possível, e em segundo para guiar os cálculos das condições do túnel e selecionar um suporte inicial.

Os valores baixos de RQD podem ser evidenciados devido a diversos fatores, como técnicas de perfuração, onde pode haver a ruptura dos testemunhos na manobra de perfuração; a tensão resiliente ou umidade do ar; e pela situação estrutural do maciço como, acamadamento ou zonas de juntas fechadas, zonas de rochas em condições pobres, que possam ter sofrido algum cisalhamento (DEERE, 1988). Uma maneira de quantificar este efeito é pela simples construção de um gráfico de barras contendo valores de tamanho total das manobras em função do valor de RQD, representado pela Figura 9, onde é apresentado um gráfico de barras verticais com valores de RQD *versus* tamanho total da manobra, sendo que, destacado em vermelho estão as manobras que obtiveram valores de RQD menores ou iguais a 50%, classificados como pobre a muito pobre (DEERE, 1967).

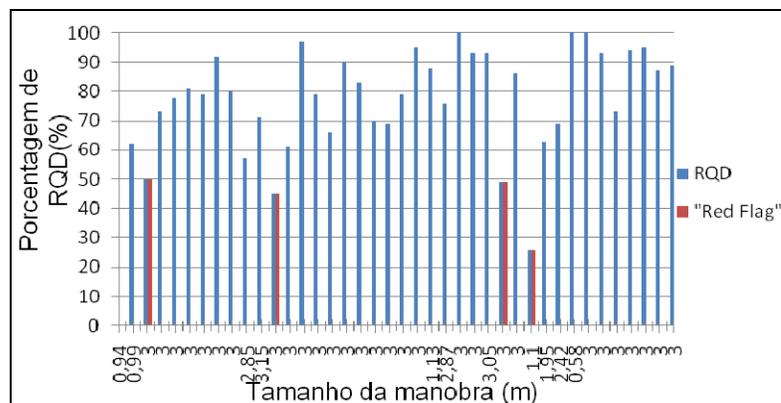


Figura 9- Porcentagem de RQD versus tamanho total da manobra de perfuração, com destaque para manobras com efeito de *Red Flag*. Fonte: dados de sondagem rotativa de Itaipu baseado na distribuição proposta por Priest & Hudson (1976).

Bieniawski (1973) e Barton et. al (1974) utilizaram o RQD e suas correlações para o desenvolvimento de um novo sistema de classificação geomecânica. O novo sistema incluía efeitos de características de juntas, tensão compressiva, tensão *in situ*, condições de nível d'água, orientação das fraturas entre outros que não são especificadamente inclusos na análise de RQD, mas que aumentam a capacidade discriminatória e correlativa dos sistemas de classificação.

Existe uma relação do índice RQD com o módulo de deformação *in situ*, relacionada com o fraturamento e a alteração do material. Ou seja, valores baixos de RQD implicam em valores baixos do módulo de deformação *in situ* (DEERE, 1988).

### 3.3 Métodos de classificação geomecânica

Desde a década de 40 sistemas de classificação geomecânica tem sido elaborado. Inicialmente eram utilizados apenas para projetos de escavações subterrâneas, mas posteriormente tiveram suas aplicações estendidas (ABGE 1999). Em geral, a aplicação destes sistemas é um procedimento simples, no momento em que o usuário seja esclarecido dos parâmetros envolvidos, e

acesso às informações detalhadas do maciço rochoso, como a resistência do maciço e condições do fluxo de água subterrânea.

As principais metodologias existentes foram obtidas pelos seguintes autores, Terzaghi (1946), Lauffer (1958), Deere et.al.(1967), Wickhan et.al.(1972), Barton et.al.(1974), Klengel (1978), Sancio & Brown (1980), Kirkaldie et.al.(1988), Robertson (1988), Bieniawski (1973), Laubscher (1977, 1990), Romana (1991), Scarpelli (1994) e outros.

Os sistemas de classificação de maciços rochosos mais utilizados como parâmetros de escavação na Engenharia Geológica são o “*Rock Mass Quality*”, o Q, elaborado por Barton et.al. (1974), e o “*Rock Mass Rating*”, o RMR, fundamentado por Bieniawisk (1973) atualizado Bieniawisk (1989). Tais procedimentos utilizam propriedades geológicas-geotécnicas, geométricas, e solicitações do projeto de engenharia, com o objetivo de obter um valor quantitativo, que possa descrever as qualidades geomecânicas do maciço.

Alguns aspectos são relevantes para determinar o comportamento de maciços rochosos, como a heterogeneidade, a anisotropia, o meio descontínuo, o efeito escala, o comportamento tensão-deformação, a presença d’água e os graus de alteração e consistência das rochas.

### 3.3.1 Sistemas de classificação Q

Este sistema foi desenvolvido na Noruega em 1974, pelos autores Barton, Lien e Lunde, que pertenciam ao Instituto Geotécnico Norueguês. O desenvolvimento deste representou uma grande contribuição para classificação de maciços rochosos, e teve proposta baseada na análise de 212 casos históricos de construção de túneis na Escandinávia.

O sistema Q representa um sistema quantitativo de classificação, muito útil em projetos de túneis, sendo levados em consideração os seguintes índices numéricos que compõem a Equação 7.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad \text{(Equação 7)}$$

$RQD$  = Índice de Fraturamento (%);

$J_n$  = Número de conjunto de juntas;

$J_r$  = Rugosidade de juntas ou discontinuidades;

$J_a$  = Grau de alteração ou preenchimento por minerais ao longo de juntas;

$J_w$  = Percolação de água;

$SRF$  = Condições de tensão;

### 3.3.2 Sistema RMR

O autor Bieniawisk ao longo dos anos de 1974, 1976, 1979 e 1984 desenvolveu um sistema de classificação que incorpora os seguintes atributos, resistência a compressão simples (índice de compressão puntiforme), RQD, espaçamento das discontinuidades, padrão das discontinuidades (persistência, rugosidade, a alteração das paredes e condições do material de preenchimento das discontinuidades), ação da água subterrânea e a orientação relativa das discontinuidades/escavação (Bieniawisk, 1989).

O sistema recebeu o nome de sistema RMR, e faz a classificação geomecânica de maciços por meio de atribuição de pesos a cada índice, permitindo inferir valores de referência para os parâmetros de resistência e para o tempo de auto-sustentação do maciço, bem como estabelecer correlações com outras grandezas, como módulos de deformabilidade e vãos livres (distância máxima à frente de escavações que pode permanecer sem suporte). A Tabela 15 mostra os parâmetros de classificação com suas devidas pontuações relacionada com a qualidade do maciço.

Tabela 15- Sistema de classificação RMR e seus respectivos pesos. Fonte: modificado de Bieniawisk (1989).

Parâmetros		Intervalo de valores							
1	Tensão na rocha intacta	Índice de tensão de carga pontual (Mpa)	>10	4 – 10	2 - 4	1 - 2	Para uma baixa razão, o teste de compressão uniaxial é indicado		
		Tensão de compressão uniaxial (Mpa)	>250	100 – 250	50 - 100	25 - 50	5 – 25	1 - 5	<1
	Razão	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%)	90 - 100	75 – 90	50 - 75	25 - 50	< 25			
	Razão	20	17	13	8	3			
3	Espaçamento das descontinuidades	>2m	0.6 - 2m	200 - 600 mm	60 - 200mm	<60 mm			
	Razão	20	15	10	8	5			
4	Condição das descontinuidades	Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, predes sem alteradas	Superfícies levemente rugosas, separação <1mm, paredes levemente intemperizadas	Superfícies levemente rugosas, separação <1mm, paredes altamente intemperizadas	Superfície estriada, separação <1mm, Paredes altamente intemperizadas	Superfície estriada ou ranhura <5mm, ou, separação 1- 5 mm, contínuos	Ranhuras leves <5mm, ou, separação <5mm, contínuas		
		Razão	30	25	20	10	0		
5	Água subterrânea	Vazão por 10 m de comprimento do túnel (L/min)	Nenhuma	<10	10 - 25	25 - 125	>125		
		Razão=(Pressão de água nas juntas)/(Tensão maior principal)	0	<0.1	0,1 - 0.2	0.2 - 0.5	>0.5		
		Condições gerais	Completamente seco	Úmido	Encharcado	Gotejando	Percolando		
	Razão	15	10	7	4	0			

### 3.4 Modelos 3D

A simulação computacional 3D processa dados em três dimensões por meio de diversos programas computacionais especializados que contam com uma gama de métodos matemáticos como ferramentas, por exemplo, técnica por polígonos, técnica por vértices e técnica por bordas, gerando por estes malhas complexas de segmentos que dão forma ao modelo.

Um dos princípios básicos desta simulação é o conhecimento dos objetivos do projeto, para obter-se o modelo conceitual que descreve as informações que o sistema computacional irá gerenciar, e quais os resultados esperados. Se o objetivo do usuário é construir um modelo digital de terreno uma das informações básicas será os dados georreferenciados de topografia da área.

Os modelos matemáticos dos sistemas computacionais podem se enquadrar no campo matemático dos elementos finitos, diferenças finitas,

geoestatística, métodos polinomiais, entre outros. A definição deste modelo é importante, pois com isso, há a possibilidade de verificar se os dados existentes a serem simulados necessitam de algum tratamento para sua utilização, bem como as limitações do programa.

Em geral, os dados utilizados na modelagem tridimensional apresentam uma estrutura dimensional que' podem ser caracterizados como adimensional, unidimensional (1D), bidimensional (2D), tridimensional (3D), além das dimensões 2,5 D e quadridimensional (4D). As representações dimensionais de dados são geradas a partir de informações dos atributos georreferenciados como, por exemplo, tipos de material geológico distribuído ao longo de área e/ou profundidade; anomalias de concentração mineral; presença de feições estruturais; variações de tensão e deslocamento solo/rocha; contato entre diferentes tipos de materiais; variação do nível freático em área, entre outros.

Um ponto é considerado uma representação adimensional (Figura 10A), enquanto que um segmento de reta em um plano horizontal (X-Y) é uma representação unidimensional-1D (Figura 10B). Uma área pode ser representada bidimensionalmente quando apresenta dado atributo distribuído em um plano horizontal (X-Y) (Figura 10C). Havendo um terceiro atributo distribuído em área, além dos componentes de latitude e longitude (X, Y), teremos então uma representação 2,5D (Figura 10D), diferentemente de uma representação 3D, que possui as três coordenadas espaciais X, Y e Z (latitude, longitude e altitude) que representará um plano tridimensional junto com um atributo (Figura 10E). O volume gerado por simulação computacional é uma representação tridimensional em forma de *voxels*, que são os equivalentes dos pixels em três dimensões, sendo o menor elemento de uma imagem tridimensional.

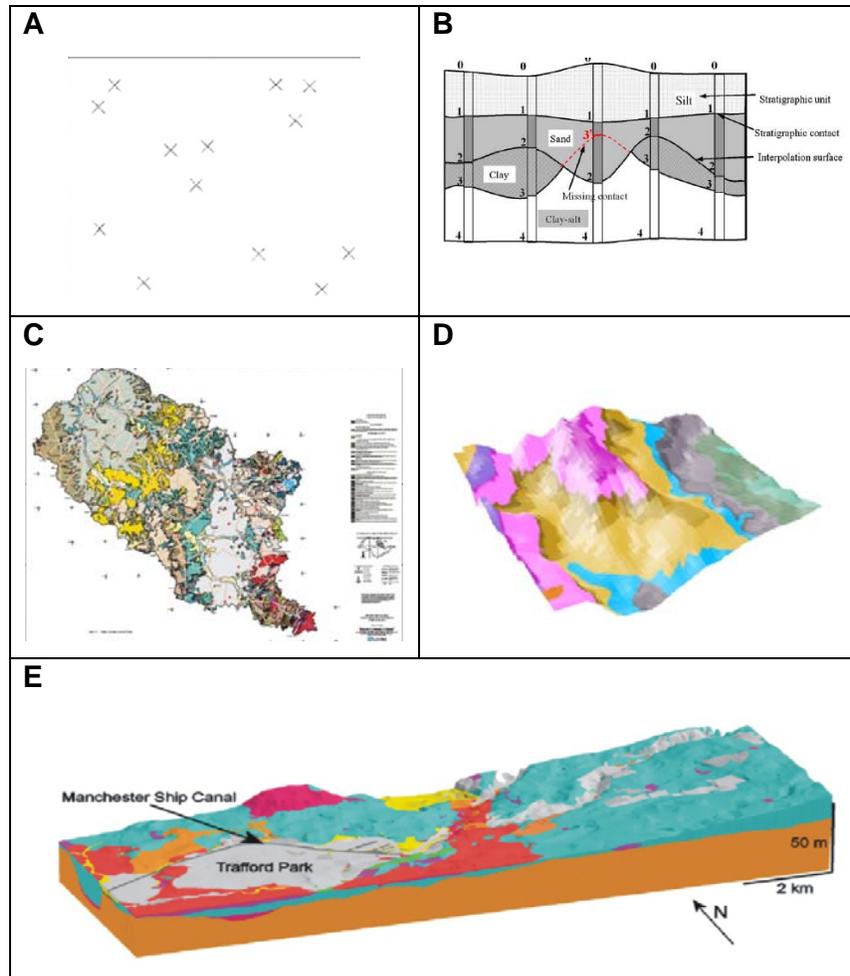


Figura 10- (A) Representação adimensional, pontos de localização de amostragem; (B) 1D, Perfil estratigráfico construído a partir de investigação geotécnica, Fonte: BAOJUN et. al (2009);(C) 2D, Mapa Geológico da Formação Jequitai, Fonte: modificado de CPRM, 2004; (D) 2.5D, Modelo Digital de Terreno de diferentes materiais Geológico-Geotécnicos, Fonte: RENGERS et. al (2002);(E) 3D, Disposição de materiais geológicos, Fonte: KESSLER et.al. (2009).

Um modelo geológico representa espacialmente a distribuição de materiais geológicos no terreno, fluxo de água subterrânea, migração de poluentes ou água salgada na subsuperfície, avaliação da variação de propriedades físicas e químicas de diferentes tipos de materiais, localização de estruturas geológicas (falhas, fraturas e juntas) presentes no maciço rochoso, entre outros. E tem como objetivo fornecer a compreensão dos processos geológicos ocorridos em uma determinada localização, fornecendo base

racional para a interpretação, compreensão e correlação de características geológicas e seus materiais.

A utilização de modelos Geológicos 3D tem sua difusão incrementada com as melhorias de resultados no processamento computacional nas últimas décadas (KESSLER & MATHERS, 2006; LELLIOTT et al., 2009). Para que estes modelos sejam utilizados com sucesso, seja como suporte para análises hidrogeológicas, para soluções de engenharia, prospecção de depósitos minerais, entre outros, é preciso representar, da maneira mais próxima possível, a real situação da área estudada. No contexto geológico, a real situação é frequentemente desconhecida, e os modelos representam uma interpretação da realidade, baseados em limites adotados. Conseqüentemente, a efetividade dos modelos depende da qualidade, a quantidade e distribuição dos materiais amostrados.

Os modelos geotécnicos são baseados em dados de informações geotécnicas georreferenciados como resultados de ensaios de sondagens “in situ”, poços ou trincheiras de investigação, medidas de tensões “in situ”, profundidade de nível d’água, entre outras. Os modelos tridimensionais são utilizados para a delimitação de unidades Geotécnicas, a partir de ferramentas para retro-análise de projetos de engenharia civil, para verificar a acurácia dos parâmetros e modelos assumidos para o projeto na determinada localidade, a verificação da precisão de modelos constituintes para a área, e o aperfeiçoamento das metodologias de construção ou dos equipamentos utilizados nesta (HACK et al. 2005).

Obter um modelo 3D do subsolo, de modo que sua visualização seja suficientemente boa e que a variabilidade seja a menor possível, ajuda a diminuir os riscos para a obra, e assim possa ser também diminuir o fator de segurança, pelo qual são relacionados custos.

As primeiras versões de programas para modelagem Geológica-Geotécnica eram feitas para duas dimensões, depois de alguns anos estas se estenderam para três dimensões, e quando é incorporado o tempo como um atributo no desenvolvimento espacial são gerados os modelos 4D (HACK et. al., 2005).

Na Geologia de Engenharia e Engenharia Geotécnica os primeiros esforços para utilizar simulações computacionais como ferramenta de auxílio às suas práticas foi da indústria de mineração, e por vezes, eram adaptados para solicitações particulares de Geologia de Engenharia. Há mais de dez anos este desenvolvimento sofreu uma completa modificação com a expectativa de que os modelos computacionais seriam padronizados para a área de Geologia de Engenharia e Engenharia Geotécnica. Entretanto, este desenvolvimento não foi tão rápido quando tem sido esperado (HACK et. al., 2005).

Para o desenvolvimento de um modelo tridimensional é importante trabalhar com uma base de dados consistente e ajustada ao tipo de programa computacional que realizara simulações.

### 3.4.1 Métodos de interpolação

Os métodos tradicionais de interpolação são baseados em idéias Newtonianas, em que a abordagem usual se dá pela montagem de uma malha geométrica sobre área a ser interpolada, e assim estimar valores por interpolação em cada nó de uma malha.

Dois tipos tradicionais de interpolação têm sido frequentemente abordados, o **método da média ponderada** que seleciona um grupo de pontos vizinhos para o nó da malha, e realiza o processo de interpolação utilizando os valores do grupo selecionado. O segundo tipo de interpolação é o **método de trechos polinomiais**, onde uma superfície de interpolação pode ser gerada precisamente conforme a inclinação e elevação de cada ponto de dados. Entretanto, tal método sofre de algumas desvantagens, devido à menor continuidade nas bordas do polígono de interpolação do que no interior do polígono interpolado.

A simulação dos dados para geração de um modelo 3D pode ser realizada de três maneiras, pela interpolação de superfícies, camadas, e de blocos diagramas.

As superfícies de interpolação são realizadas para representar informações nos limites das unidades geológicas, estratigráficas, petrográficas, topografias, ou mesmo os limites de um modelo volumétrico. Estas são

geradas a partir de dados vetoriais interpolados, imagem raster, tabela ou pontos de atributos.

O modelo digital de uma superfície é gerado a partir de uma amostra de pontos com localizações de latitude, longitude e cota topográfica (x,y e z), respectivamente, e informação do atributo particular do fenômeno a ser interpolado (w), por exemplo, se a superfície a ser gerada seja a topografia de uma área o atributo (w) são os valores de altitude. É relevante considerar que o resultado final das superfícies interpoladas é uma representação 2,5D, porém o empilhamento de duas superfícies limites (Figura 11) gera um volume de mesmas características entre elas (KRÖGER & HINSBY, 2009).

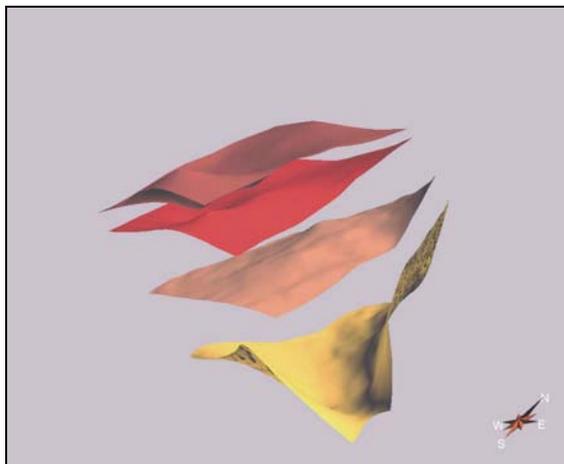


Figura 11- Disposição espacial de superfícies de interpolação. Fonte: KRÖGER & HINSBY (2009).

As camadas são geradas com bases em superfícies de interpolação que formam um modelo de corpo, apresentando o modelo com a representação de volume (Figura 12) (KRÖGER & HINSBY, 2009).

Alguns modelos volumétricos devem ser gerados apenas por interpolação de pontos vetoriais distribuídos espacialmente, sem que haja a necessidade de uma superfície que delimite camadas, por exemplo, modelos de litologias que estejam associados a estruturas geológicas (falhas e fraturas), representação de materiais de rochas plutônicas, que não apresentem continuidade lateral muito grande, e assim formando um bloco volumétrico, ou, bloco diagrama (Figura 13), onde o modelo 3D representa materiais litológicos

e solos cortados por materiais provenientes de zonas de falhas, representadas em vermelho.

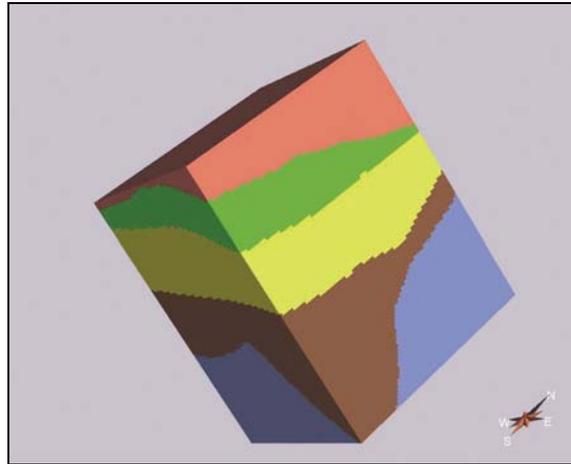


Figura 12- Modelo 3D a partir da intercalação de camadas interpoladas entre superfícies. Fonte: KRÖGER & HINSBY (2009).

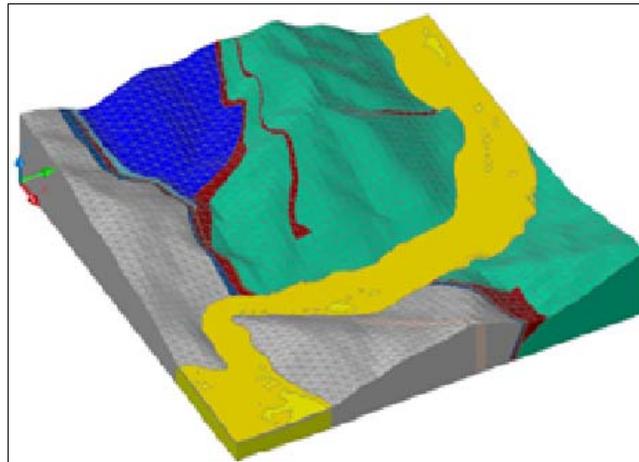


Figura 13- Representação de modelo 3D contendo materiais geológicos-geotécnicos interceptado por zona de falhas (cor vermelha), FONTE: SCHUBERT (2005).

### 3.4.2 Sistemas de simulação computacional 3D

Existem diversos softwares utilizados para a geração de modelos Geológico-Geotécnicos como o GSI3D, GOCAD, ANSYS e o GRASS, que será utilizado como ferramenta para este trabalho.

O programa GSI3D foi desenvolvido principalmente para as indústrias de exploração de hidrocarbonetos e mineração, e tem sido desenvolvido desde o ano de 2001, com parceria da “*British Geological Survey*” (BGS) que utilizam o programa rotineiramente para a geração de modelos geológicos 3D comercialmente (KESLLER et. al 2009).

Imagens raster de mapas topográficos, fotos aéreas e imagens de satélites podem ser importadas dentro do programa em forma de Georegistro, com a extensão \*.JPEG, assim como arquivos em formato \*.ASCII, com informações de elevação de modelo digital de terreno (DTM), batimetria, topo rochoso, nível d’água ou inconformidades. A BGS mantém todos os dados gerados no formato da ESRI, pontos, linhas e polígonos podem ser carregados dentro do programa na forma de “*shape files*” (KESLLER ET. AL, 2009).

O programa apresenta uma metodologia baseada na construção de modelos de subsuperfície, com compreensão da sequência geológica completa e provável evolução geomorfológica do estudo de uma área (FOOKES 1997 apud KESLLER ET. AL, 2009). A geração dos modelos são realizados a partir de informações de seções e limites de camadas de cada unidade, e é dada por métodos de triangulações irregulares nas redes (TINs) (Figura 14), que formam malhas, pelo método de interpolação por triangulação de Delaunay tridimensional e tetraedros de Delaunay, em que os pontos amostrados pertencem aos vértices dos tetraedros. A triangulação Delaunay, faz com que malha triangular tenha geometria mais próxima possível de triângulos equiláteros, com isto, evita-se a criação de ângulos internos agudos (GREEN & SIBSON 1978 apud KESLLER et. al 2009).

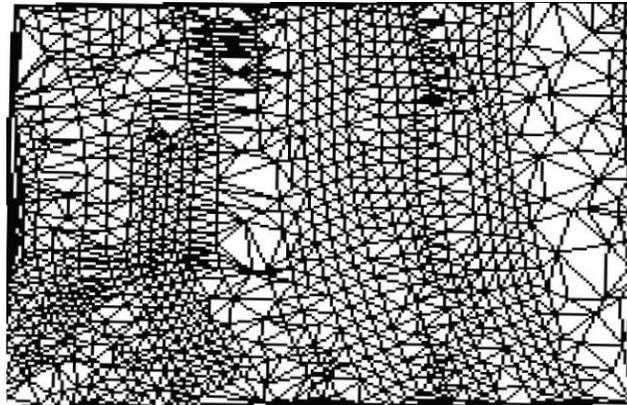


Figura 14- Malha de interpolação a partir de TINs. Fonte: XIONG & YUAN (2008)

As simulações geradas GSI3D se baseiam nas práticas análogas existentes, feitas por geólogos, por meio de comandos computacionais. Além disso, ele está programado para trabalhar com rapidez e de forma verdadeiramente dinâmica, permitindo processos de pesquisa interativa e interpretativa (KESLLER ET. AL, 2009).

A Figura 15 apresenta o produto final de uma simulação com este programa, a partir de dados de perfis de sondagem, mapa geológico, e seções verticais de correlações de furos de sondagens.

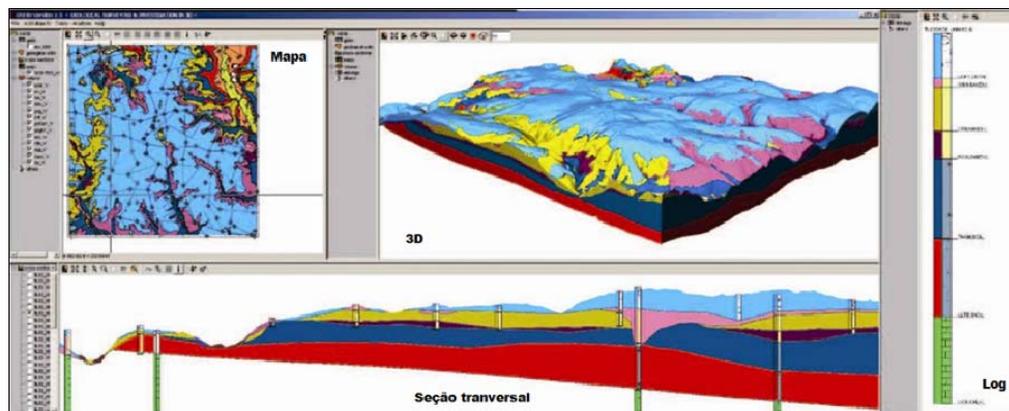


Figura 15- Exemplo de resultados originados pelo programa GSI3D, a partir de mapa geológico, perfil de sondagem e seção transversal. Fonte: KESLLER et. al 2009.

Um segundo programa de simulação tridimensional é o GOCAD, personalizado para lidar com informações de ambientes geológicos. É utilizado na modelagem de superfícies geológicas geradas a partir de contornos dos estratos envolvidos no espaço tridimensional, onde é realizada a modelagem automática semi-inteligente, com características de interfaces amigáveis e feições eficazes. Entretanto, ele é um programa restrito, não livre, e de preço alto para obtenção.

Este programa tem como finalidade gerar modelos que possam embasar projetos geológico-geotécnicos a partir de visualização tridimensional de boa qualidade, para gerar modelos de estruturas geológicas, reservatórios, unidades estratigráficas, além de identificar incertezas computacionais na geometria e distribuição de propriedades do modelo, entre outras características geológicas e geotécnicas relevantes a projetos de obras civis (Figura 16). Ajusta curvas da superfície com exatidão, expressando a topografia da área com relação aos seus elementos geométricos, a partir da estrutura de dados denominada representação de contornos (BRep). A metodologia tem como característica ajustar curvas da superfície com exatidão, expressando a topografia da área, e pode ser aplicada para formas geométricas e triangulações irregulares nas redes (TINs), e assim, reproduzir o estrato da área no modelo.

Neste programa também é utilizada uma estrutura de dados denominada Quadri-borda como ferramenta de interpolação que realiza o reconhecimento de uma única aresta em uma topologia de malha poligonal fechada, entre duas faces e dois vértices, e é introduzida para formar a topografia, relacionando-as com triangulações irregulares nas redes (TINs).

O ANSYS é o terceiro programa a ser descrito, baseia-se no método matemático de elementos finitos para geração de modelos 3D e utiliza um aplicativo denominado DataViewer, com interfaces gráficas de controles que permitem a exploração em tempo real dos dados a serem investigados por meio de diversas técnicas de visualização científica e controle de modificação de parâmetros nos algoritmos de visualização.

O pré-processamento no ANSYS possui diversos recursos de geração de malhas computacionais, possibilitando buscar a melhor elaboração de

modelos de elementos finitos, aplicados em problemas estáticos ou dinâmicos, análise de fluidos, problemas de transferência de calor, entre outros problemas físicos onde o método dos elementos finitos é aplicável. Embora este software seja muito eficiente no processamento, a apresentação dos resultados, ou pós-processamento, é feita de maneira simplificada não proporcionando amplas possibilidades para exploração interativa dos dados, inclusive para a visualização do interior de volumes de dados (NETO et. al. 2007).

Este programa pode ser utilizado para o mapeamento de deslocamento de tensões de uma encosta instável, onde a aplicação é feita pelo método de elementos finitos, a partir de estudos comparativos baseados nos métodos de equilíbrio limite de uma encosta natural. A partir de avaliações de tensões e deformações da massa de solo no campo, o método de elementos finitos permite uma estimativa mais acurada da provável conformação geométrica futura do maciço.

Tais aplicações são importantes na análise do desempenho de dutos enterrados, localizados em regiões limites no interior de maciços terrosos, devido a movimentos lentos da encosta, as tensões e deslocamentos acrescidos aos dutos já existentes podem gerar sua ruptura.

A visualização computacional transforma os resultados simbólicos em geométricos, permitindo que pesquisadores observem seus experimentos e simulações computacionais, sendo que o objetivo da visualização é prover uma maior compreensão de um determinado processo. Dessa forma, a visualização apoiada em técnicas de computação gráfica tem proporcionado inúmeros benefícios para as mais diversas áreas, como o aumento de produtividade, e maior rapidez e eficiência na tomada de decisões baseada na análise de grandes conjuntos de dados.

Para a visualização dos resultados gerados pelo ANSYS seguem três passos fundamentais: a aquisição de dados, transformação em uma forma apropriada para representação, e a renderização (*'rendering'*), que é a representação na tela, ou, em outra superfície de visualização, do produto da simulação. A visualização dos resultados consiste em um importante recurso para obter uma visão global do comportamento de maciços rochosos, direções e intensidades dos deslocamentos resultantes relevantes na tomada de

decisões relativas a projetos de contenção e estabilização de taludes (Figura 16).

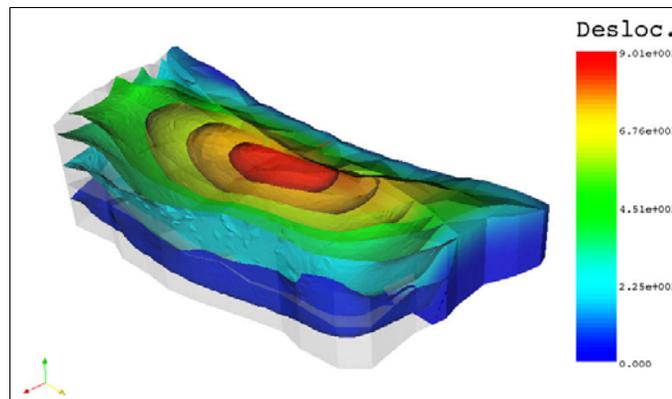


Figura 16- Visualização da análise de uma encosta e seus níveis de deslocamento de modelo 3D gerado pelo programa Ansys. Fonte: Neto et.al. (2007).

### 3.5 GRASS-SIG

O quarto sistema computacional descrito será utilizado como ferramenta básica para simulação dos dados desta dissertação de mestrado é o GRASS-SIG, que é um Sistema de Informações Geográficas (SIG) com funções orientadas para dados do tipo vetorial e raster.

Este programa trata dados com os objetivos de redução e prevenção de desastres naturais, exploração de recursos naturais, avaliação do meio ambiente e classificação geotécnica, gerando modelos tridimensionais que auxiliam nas análises de casos diversos de Geologia e Geotecnia.

Para inserção dos dados de entrada neste programa é necessário definir a região espacial em que serão simulados. Tal região é dada pela geração de um subdiretório denominado **locations**, onde são definidos para área de trabalho o sistema geodésico (*Datum*), limites geográficos em UTM (Norte, Sul, Leste e Oeste), e resoluções bidimensional e tridimensional. Ao definir a *location* é criado dentro dela, um subdiretório chamado **mapset**, que consiste na porção ativa e utilizada para análise, que pode ter tamanho igual ou menor que a *location*, e vários *mapsets* podem ser definidos para a mesma *location*. Dentro de cada mapset são armazenados os arquivos gerados pelas atividades

do programa, como dados de entrada, mapa de vetores, imagens raster, superfícies, e volumes (NETELLER & MITASOVA, 2004).

Esta região espacial definida para a área de trabalho é denominada **region**, onde tanto a resolução espacial, quanto as coordenadas do retângulo envolvente podem ser facilmente alteradas sem a necessidade da reinicialização do sistema, ou criação de novos projetos, e tem-se a possibilidade de salvar as configurações da *region* para acessá-las facilmente quando necessário.

O GRASS apresenta ambientes multivariados, onde várias pessoas podem trabalhar em um mesmo *location*, e ao mesmo tempo, porém não no mesmo *mapset*. Para controlar essa limitação os dados de interesses comuns podem ser armazenados em um *mapset* especial ao quais todos os usuários têm acesso, chamado de **Permanente**.

Os dados de entrada no GRASS podem ser de diversos formatos, a partir da importação de mapa raster, vetorial e malha de volume 3D, quais podem ser classificados em dados geométricos e de atributos.

A importação de vetores admite dados com variadas extensões como, OGR, ASCII, DXF, ESRI, GPS, GEOnet, Mappem e antigos vetores dos GRASS. Os dados de importação do tipo raster podem ter extensões como, GDAL, agregado ASCII xyz, malha ASCII, GRIDDATB.FOR, malha ESRI, MAT-FILE, SPOT NDVI, SRTM hgt e Terra Aster.

### 3.5.1 Dados geométricos

Estes dados definem a situação espacial dos objetos, sua forma e posição, com relações ao sistema de coordenadas de referência, e podem ser do tipo raster (matricial, pixel) e vetoriais (pontos, linhas, polígonos, áreas e sólidos) (Figura 17).

Os dados de imagens raster (ou **bitmap**), são compostos pela descrição de cada pixel em posição aos gráficos vetoriais, o tratamento destas imagens requer ferramentas especializadas, geralmente utilizadas em fotografia, pois envolvem cálculos muito complexos, como interpolação por álgebra matricial. Uma das desvantagens de se trabalhar com dados raster é a quantidade de

memória do computador que estes dados utilizam, bem como o tempo de processamento, que é aumentado exponencialmente com a resolução espacial utilizada para determinados modelos, além de que eles não possuem relações de vizinhanças, uma vez que cada pixel é definido de maneira independente dos outros.

Dados vetoriais são utilizados para informações de objetos pontuais, lineares, ou áreas definidas por polígonos georreferenciados. Cada objeto vetorial pode possuir vários atributos armazenados em um banco de dados. Em comparação com dados raster, estes utilizam menos memória do computador e tem um tempo menor de processamento. Além disso, no GRASS, os vetores possuem relações de topologia, onde o objeto vetorial tem informações de quais vértices possui, ou, com quais áreas faz vizinhança. Dados pontuais são considerados parte especial dos dados vetoriais, em que armazenam informações pontuais espalhadas em uma área de amostragem (GROHMANN, 2008).

### **3.5.2 Dados de atributos**

São os atributos relacionados aos tipos de dados raster, vetoriais e pontuais, que são armazenados em um banco de dados interno do sistema SIG ou em um banco de dados externo de uma interface DBMI (*Database Management Interface*) (Figura 17).

No GRASS existem diversos módulos que permitem a conversão de estruturas diferentes, como pontos vetoriais com valores de localização espacial e atributos, que podem ser convertidas para uma representação contínua por interpolação para imagem raster, onde os pontos podem ser importados pelo programa como vetores, e por meio de interpolação matemática podem gerar uma imagem raster.

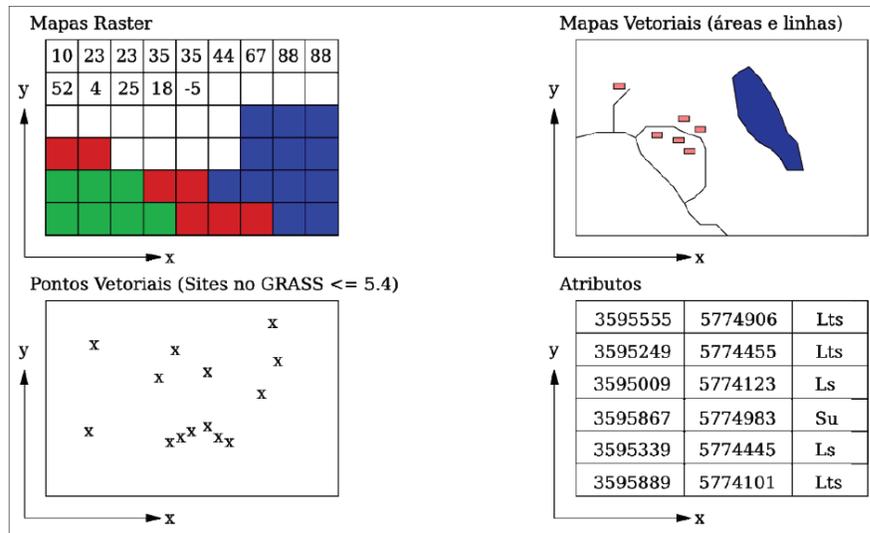


Figura 17- Dados geométricos e de atributos. Fonte: Grohmann (2008).

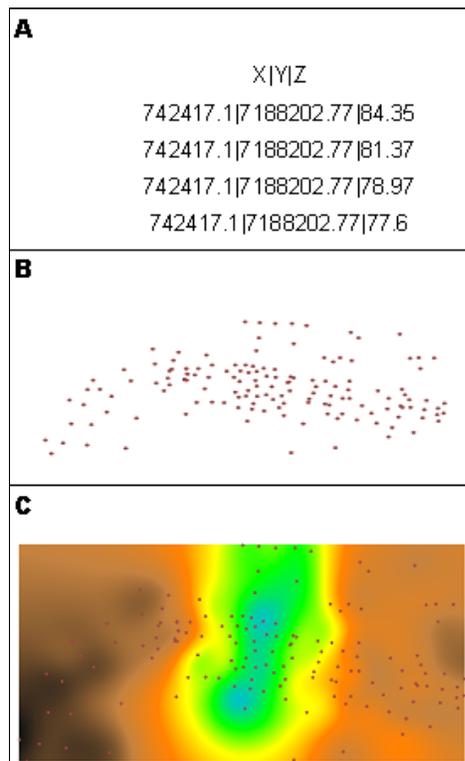


Figura 18- (A) Tabela de atributos – Em formato ASCII; (B) Pontos importados pelo programa como vetores; (C) Imagem raster gerada a partir de interpolações de valores dos pontos vetoriais. Fonte: Simulação de dados de sondagens rotativas de Itaipu.

### 3.6 Simulação de dados no GRASS

O conceito que baseia a interpolação espacial é a similaridade, onde os valores dos pontos próximos no espaço têm maior probabilidade de serem parecidos do que os pontos que estão mais afastados. A interpolação pode ser aplicada quando, por exemplo, o tamanho da célula ou orientação é diferente daquele desejado, como tamanho ou orientação de uma grade; a superfície contínua é representada por uma estrutura de dados diferentes da requerida (transformação de estrutura vetorial em estrutura matricial); e os dados disponíveis não cobrem completamente o domínio de interesse (BURROUGH & MCDONNELL, 1998).

Existem diversos métodos para a interpolação de dados numéricos no programa, como a interpolação pelo inverso da potência da distância (IDW), e por Spline regularizada por tensão (RST), sendo que para interpolação tridimensional apenas o segundo método é utilizado.

Segundo Mitas e Mitasova (1999), a interpolação de dados pelo método Spline segue a premissa de que um conjunto de dados  $N$  de um fenômeno em estudo  $z_j$ , onde  $j = 1, \dots, n$ , medidos em pontos amostrados:  $r_j = (x_j^{[1]}, x_j^{[2]}, \dots, x_j^{[d]})$ ,  $j = 1, \dots, n$ , determinada região  $d$ -dimensional, pela função  $F(r)$   $d$ -variável, em que a interpolação passe pelos pontos de dados, e ao mesmo tempo, ser o mais suave possível, pressuposto dos autores.

Para que se atinjam estas duas condições a Equação 8 combina uma simples minimização somatória dos desvios dos pontos de dados e a seminorma de suavização da função Spline.

$$\sum_{j=1}^N |z - F(r_j)|^2 w_j + w_0 I(F) = \text{mínimo} \quad \text{(Equação 8)}$$

Onde,

$w_j$  e  $w_0$  = ponderações positivas dos atributos;

$I(F)$  = seminorma de suavização;

Devido à função Spline ter como uma de suas premissas passar pelos pontos de dados amostrados, ou o mais próximo a eles, a suavização minimiza a curvatura da superfície, que pode ser descrita com relação a dois componentes diferentes segundo a Equação 9.

$$F(r) = T(r) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r, r_j) \quad \text{(Equação 9)}$$

Em que,

$T(r)$  = função tendência, que representa a suavidade da função;

$R(r, r_j)$  = função base radial, dependente de  $I(F)$ ;

A função Spline Regularizada por Tensão (RST) é a ferramenta matemática do programa GRASS, e foi proposta por Mitasova et. al. (1995), com o objetivo de reunir todas as propriedades necessárias a interpolação em uma só função. A Equação 10 e 11 a seguir definem a seminorma de suavização e a função RST, respectivamente.

$$I(F) = \sum_{\min} c_{\min}(\varphi) \int [F_x^m]^2 dr \quad \text{(Equação 10)}$$

$$R_d(r, r_j) = R_d(|r, r_j|) = R_d(r) = \rho^{-\delta} \gamma(\delta, \rho) - \frac{1}{\delta} \quad \text{(Equação 11)}$$

Onde,

$$r = |r, r_j|;$$

$$\delta = \frac{d-2}{2};$$

$$\rho = \left(\varphi \frac{r}{2}\right)^2;$$

Sendo,

$\varphi$  = o parâmetro de tensão;

$\gamma(\delta, \rho)$  = função gama incompleta;

Nesta função a curvatura é minimizada segundo derivadas de n-ordens, onde a ponderação das funções base permite determinar as funções de base para domínios bi e tridimensionais (IESCHECK, 2008). Ou seja, na interpolação volumétrica o parâmetro de Tensão da função pode aproximar ou distanciar o resultado dos valores amostrados, controlando a função interpolação de dados dispersos por funções bivariadas e trivariadas. As funções bivariadas e trivariadas de dados distribuídos são derivadas, e são construídas pela minimização explícita da função generalizada de suavização.

O parâmetro de tensão ajusta a relação entre os pesos da menor e da maior ordem derivativas da seminorma atenuada, e controla o comportamento da superfície resultante. O valor generalizado do parâmetro de tensão tem que ser determinado empiricamente. Entretanto sugere experiências que valores adequados devem ser encontrados com pequenos ensaios (MITAS & MITASOVA, 1993).

Segundo Mitas & Mitasova (1993) o parâmetro de tensão para a interpolação se baseia nas seguintes premissas:

- É invariável com a rotação das coordenadas espaciais, porque a função básica depende apenas da distancia. A caracterização da interpolação é a direção independente. Entretanto, em muitos casos reais o fenômeno modelado exhibe vários graus de anisotropia e a função interpolação deve imitar esses efeitos para certas extensões;
- É de escala invariável e mudando a escala equivalentemente tem que mudar o parâmetro de tensão. Quando se muda a escala de um eixo a tensão original também é modificada.

A tensão controla a distância sobre determinado ponto de influencia a superfície resultante ou hipersuperfície, e pode ser interpretada como o caráter de ajuste a superfície resultante. A escolha adequada dos parâmetros de suavização “smoothing” e tensão são importante para uma interpolação bem sucedida. A possibilidade para encontrar ótimos parâmetros pode ser obtida pela aplicação da validação cruzada (WAHBA 1990; HUTCHINSON & GESSLES 1993 apud MITASOVA 1995).

A validação cruzada é a técnica dos modelos que avalia como os resultados de uma análise estatística que generaliza um conjunto de dados e

tem como objetivo analisar a acurácia dos modelos interpolados (MITAS & MITASSOVA, 1993), e pode ser realizada por três métodos distintos, o holdout, K-fold, e leave-one-out.

O método holdout é um tipo simples de validação cruzada, e os dados são separados em duas séries de valores para o ajuste do modelo e para o cálculo do erro nestes dois grupos. Um grupo é denominado de treinamento e o outro de teste. Inicialmente são simulados apenas os dados de treinamento, a partir de uma função de aproximação, e em seguida, esta função simula os valores de para os dados do conjunto de teste (REFAEILZADEH et. al., 2008). Os erros gerados são acumulados antes de se apresentar o erro médio absoluto do conjunto de teste utilizado para avaliar o modelo. A vantagem deste método é que leva um tempo rápido para execução dos cálculos de erros. No entanto, sua avaliação pode ter uma grande variação.

No método K-Fold cross-validation o conjunto de dados é dividido em "K" intervalos, em seguimentos de tamanhos iguais. São realizadas subsequentes iterações "K", onde é aplicado o método de validação cruzada repetidamente K vezes. Cada vez um dos subconjuntos K é utilizado na validação como conjunto de teste, e os restantes "K-1" subconjuntos se reúnem para formar o conjunto de treinamento, esta é uma boa maneira de melhorar a relação ao método de validação. Com isso, o erro médio em todos os conjuntos de testes "K" são computados, assim cada ponto de dado chega a ser um conjunto de testes ao menos uma vez, e a ser um conjunto de treinamento "k-1" vezes. A desvantagem desse método é que o algoritmo tem que ser treinado k vezes.

O método leave-one-out cross validation é o método k-fold cross validation levado ao seu extremo lógico, onde K é igual a N, o número de pontos de dados no conjunto. O que significa que o conjunto é subdividido N vezes, e a função aproximação é treinada em todos os dados, exceto por um ponto. Com isto, uma previsão é feita para tal ponto. E como antes, calcula-se o erro médio e o utiliza para avaliar o modelo.

A relação existente entre o método Spline a Krigagem Universal é um freqüente questionamento, os autores Neteller & Mitassova (2004) consideram que o primeiro método é formalmente equivalente a Krigagem

Universal, mas com uma melhor escolha de variação de covariância determinados pelas seminormas atenuadas (“*smoothness seminorm*”).

A Krigagem assume uma distribuição espacial, onde os fenômenos geográficos podem ser modelados pela realização de uma função randômica e usos de técnicas estáticas para analisar dados e critérios estatísticos para prognóstico. Entretanto, decisões subjetivas são necessárias, tanto quanto o julgamento sobre estacionariedade, e escolha por uma função, pela teoria variográfica (modelo variograma). Portanto, bem sucedida por um fenômeno com uma grande componente aleatório, ou, com problemas, onde a estimativa das características estatísticas (incerteza) é a solução.

### 3.6.1 Geração de superfícies

A simulação computacional de dados no programa GRASS-SIG para a geração de modelos de superfícies utiliza como base matemática para interpolações os métodos ***Inverso da Potência da Distância (IDW)*** e ***Spline Regularizada por Tensão (RST)***.

O método do inverso da potência da distância (IDW) (Figura 19) é baseado na similaridade de pontos com distâncias menores ser maior que os pontos mais distantes. Os pesos dos valores são inversamente proporcionais a potência da distância (NETELER & MITASSOVA, 2004). Os pontos a serem interpolados,  $r = (x,y)$ , podem ser estimados pela Equação 12.

$$F(r) = \sum_{i=1}^m w_i z(r_i) = \frac{\sum_{i=1}^m z(r_i) / |r - r_i|^p}{\sum_{j=1}^m 1 / |r - r_j|^p} \quad \text{(Equação 12)}$$

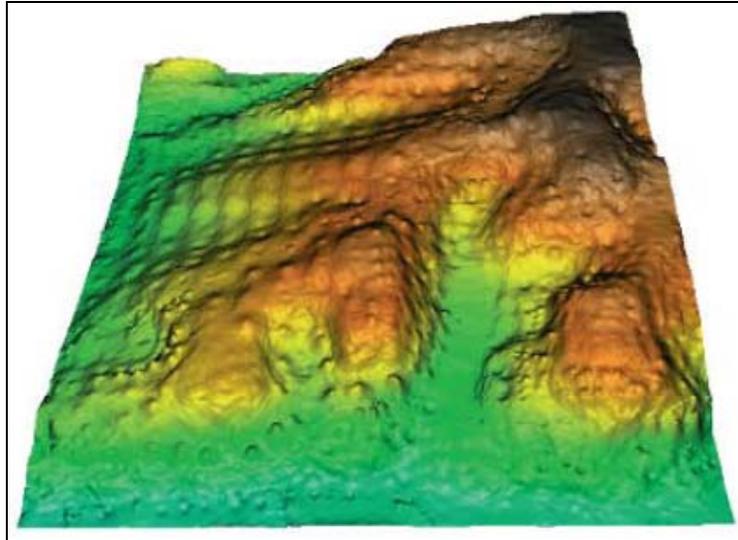


Figura 19- Modelo digital de terreno (MDT) gerado por interpolação pelo método do Inverso da Potência da Distância (IDW). Fonte: MITAS & MITASSOVA (1999).

O método *spline regularizado por tensão (RST)* para a geração de superfícies de interpolação no programa GRASS pode ser realizado a partir dos parâmetros declividade (*Topographic parameters slope*), inclinação e curvaturas, geradas segundo os princípios de geometria diferencial (NETTELER & MITASSOVA, 2004). Expressões matemáticas de derivadas para estes parâmetros são realizadas, a partir de princípios básicos de geometria diferencial, e são dadas pelas notações simplificadas das Equações 13 e 14.

$$f_x = \frac{\partial z}{\partial x}, f_y = \frac{\partial z}{\partial y}, f_{xx} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, f_{yy} = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}, f_{xy} = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \quad \text{(Equação 13)}$$

$$p = f_x^2 + f_y^2 \quad \text{(Equação 14)}$$

$\gamma$  = Ângulo abrupto de declive;

$\alpha$  = Ângulo de inclinação;

Tais ângulos são calculados pelo gradiente  $\nabla f = (f_x, f_y)$ , e são dados pelas Equações 15 e 16:

$$\gamma = \arctan \sqrt{p} \quad \text{(Equação 15)}$$

$$\alpha = \arctan \frac{f_y}{f_x} \quad \text{(Equação 16)}$$

Por vezes, é necessário computar a diferenciação da superfície em dada direção do ângulo  $\alpha$ , onde a superfície  $z = g(x, y)$  pode ser calculada pela derivada direcional da Equação 17, onde  $(x, y)$  equivalem às coordenadas geográficas, e  $\alpha$  é o ângulo de inclinação que, dá a direção do declive na topografia (NETTELER & MITASOVA, 2004).

$$E = \frac{\partial g}{\partial s} = \frac{\partial g}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial g}{\partial y} \sin \alpha \quad \text{(Equação 17)}$$

Em geral, uma superfície tem diferentes curvaturas, em distintas direções, para aplicações na Geociência, o gradiente de direção da curvatura é importante, pois, reflete a mudança do ângulo de declive, e deste modo, controla a velocidade do fluxo de massa a escorregar ao longo da curva de declive.

A curvatura a uma direção perpendicular ao gradiente reflete a mudança no ângulo de inclinação e influência da divergência/convergência do fluxo de água, estas são medidas a um plano normal. As equações para estas curvaturas podem ser derivadas usando a equação geral de curvatura,  $K$ , de uma seção plana verdadeira, a partir de um ponto de uma superfície (NETTELER & MITASOVA, 2004), a equação para a curvatura de perfil,  $K_s$  (Equação 18).

$$k_s = \frac{f_{xx}f_x^2 + 2f_{xy}f_xf_y + f_{yy}f_y^2}{p\sqrt{q^3}} \quad \text{(Equação 18)}$$

Para uma curvatura tangencial,  $K_t$ , o ponto utilizado se encontra na curvatura com direção da tangente a linha de contorno do terreno.

$$k_t = \frac{f_{.xx}f_y^2 - 2f_{xy}f_xf_y + f_{yy}f_x^2}{p\sqrt{q}} \quad \text{(Equação 19)}$$

Os valores positivos e negativos das curvaturas de perfil e tangencial podem ser combinados para definir a geometria básica das formas de relevo. As formas côncavas e convexas na direção de gradiente têm o escoamento acelerado e decrescido, e formas côncavas e convexas em direções tangenciais tem o escoamento divergido e convergido, tais processos podem ser observados na Figura 20.

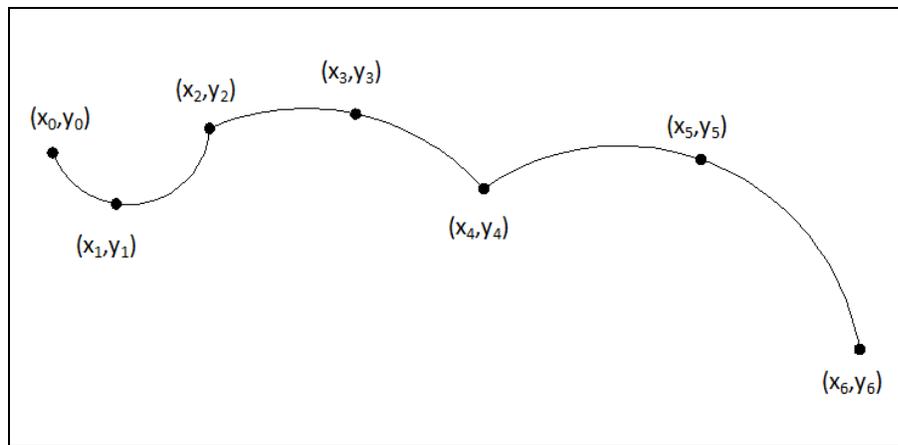


Figura 20- Curvatura de interpolação pelo método Spline Regularizado por Tensão (RST). Fonte: modificado de Netteler & Mitasova (2004).

Com o incremento do parâmetro de tensão na interpolação a superfície a ser interpolada tende a passar sob mais pontos, e apresentar uma topologia com relevo mais brusco. Este parâmetro é inversamente controlado pela influência da média dos pontos de dados. Também é importante observar que quanto maior o valor atribuído ao parâmetro de suavização "smoothing" para a geração da superfície alguns pontos de dados podem ser descartados na interpolação, para que a topologia gerada seja a mais suave possível, não passando por estes pontos (NETELLER & MITASOVA, 2004).

### 3.6.2 Geração de volumes

Os volumes podem ser simulados por uma interpolação trivariada, em geral na forma da função  $w = f(x, y, z)$ , em que os atributos  $w$  seriam gerados com dependência às coordenadas geográficas  $x$  e  $y$ , e altitude  $z$ . A função é diferenciada por ser ao menos de segunda ordem, onde os parâmetros de tridimensionais podem ser computados diretamente por derivadas parciais (MITASOVA et. al. 1995), pelas Equações 20, 21, e 22.

$$f_x = \frac{\partial f}{\partial x}, f_y = \frac{\partial f}{\partial y}, f_z = \frac{\partial f}{\partial z} \quad \text{(Equação 20)}$$

$$f_{xx} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}, f_{xy} = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}, f_{xz} = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial z} \quad \text{(Equação 21)}$$

$$f_{yy} = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}, f_{yz} = \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial z}, f_{zz} = \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \quad \text{(Equação 22)}$$

Na geração do volume, o programa GRASS transforma dados pontuais com informações, pelos métodos de “*voxelização*”, onde é realizada a conversão direta de pontos para as suas respectivas representações tridimensionais por “*voxels*”. Porém, tal método fica restrito aos valores de dados existentes, não gerando novos valores por interpolação. Assim, a partir do método de interpolação por Spline Regularizada por Tensão (3D-RST), os dados existentes são interpolados, compondo valores de atributos para toda a região tridimensional pré-definida (*region*), e então é possível obter a renderização completa do volume.

A renderização é o processo pelo qual se obtém o produto final de um processamento digital qualquer, e é muito aplicada para objetos tridimensionais, convertendo um arquivo 3D para uma visualização em 2D, para representar uma imagem estática, ou, obter imagens foto-realísticas em vídeo (animação 3D). O termo “renderizar”, do inglês “*to render*”, vem sendo

utilizado na computação gráfica com a finalidade de converter uma série de símbolos gráficos em um arquivo visual, ou seja, "fixa" as imagens em vídeo, convertendo um tipo de arquivo para outro, ou, ainda "traduz" de uma linguagem para outra. O processo de renderização 3D é feito automaticamente pelo programa GRASS quando realiza-se uma interpolação volumétrica, e a exporta para uma extensão em que o modelo possa ser visualizado.

A visualização destas imagens é feita por programas computacionais específicos. Assim, para a análise de modelos 3D obtidos pelo programa GRASS necessita-se de um segundo programa que tenha a possibilidade de fazer visualizações tridimensionais.

### **3.7 Visualização de modelos 3D e superfícies de interpolação**

O programa GRASS-SIG não disponibiliza em suas ferramentas um visualizador de volumes simulados, apenas apresenta um para modelos de superfícies, o Nviz. Para visualização dos modelos tridimensionais e perfis transversais é preciso exportá-los para extensões como, ASCII 3D, Vis5D e VTK, que são suportadas por programas visualizadores de imagens 3D como o Vis5D e o Paraview.

Neste trabalho foram utilizados como ferramentas o visualizador Nviz, para representações de superfícies interpoladas no GRASS, e o PARAVIEW, para a visualização de volumes.

#### **3.7.1 Visualizador Nviz**

O GRASS disponibiliza apenas a visualização de superfícies interpoladas, a partir da ferramenta Nviz, um código que faz parte do código-fonte padrão do programa. A Figura 21 representa uma superfície de interpolação gerada pelo programa GRASS, obtidas a partir de dados de sondagens em materiais geológicos (MATSUMOTO et.al., 2006).

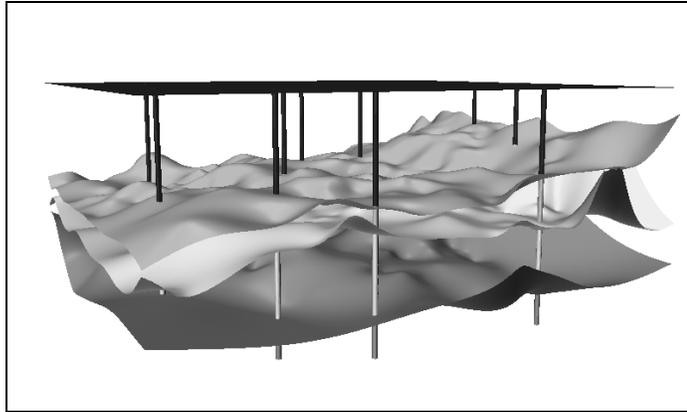


Figura 21- Exemplo de imagem de superfície a partir de dados de furos de sondagem usando o Nviz do GRASS. Fonte: MATSUMOTO et.al., 2006.

### 3.7.2 Visualizador PARAVIEW

O programa que vem sendo utilizado recentemente para visualização de volumes 3D simulados pelo GRASS é o PARAVIEW, desenvolvido para analisar conjuntos de dados extremamente grandes, usando recursos de computação de memória distribuída. Foi desenvolvido com uma arquitetura de código livre que suporta modelos computacionais de grande conjunto de dados, ou seja, modelos pesados, além disto, tem uma interface flexível e intuitiva, de fácil acesso ao usuário.

O PARAVIEW utiliza o Visualization Toolkit (VTK) para o processamento dos dados e renderização dos modelos, esta extensão faz processamento de imagens e sua visualização. O VTK consiste de uma biblioteca de linguagem computacional C ++, e várias camadas de interface, incluindo a Tcl / Tk, Java e Python, e suporta uma grande variedade de algoritmos de visualização, incluindo vetor, escalar, textura tensor e métodos volumétricos e técnicas avançadas de modelagem, tais como, modelagem implícita, a redução de polígonos, malhas de alisamento, corte de contorno, e triangulação de Delaunay. O VTK é multi-plataforma e funciona em Linux, Windows, Mac e Unix.

Este software apresenta diversas ferramentas que auxiliam uma visualização completa do modelo, sendo estas o *Clip*, que corta parte do modelo deixando apenas a outra porção a ser visualizada; o *Slice*, utilizada

para fazer cortes longitudinais no modelo deixado visível apenas as informações presentes neste corte; o *Threshold*, que separa o modelo em intervalos de dados definidos pelo usuário, além da possibilidade de rotação dos modelos em todas as direções para uma melhor representação, e a transformação destas visualizações em imagens digitais em formato TIFF, para a formatação e impressão. É importante ressaltar que os modelos quando visualizados no PARAVIEW se encontram georreferenciados e na escala em que foram modelados.

#### 4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO DA BARRAGEM DE ITAIPU

A Usina Hidrelétrica de Itaipu localiza-se no Rio Paraná, especificamente na fronteira entre o Brasil e o Paraguai, a 14 km à montante da Ponte Internacional da Amizade. Sua construção foi iniciada após ter sido assinado um tratado entre os dois países em 26 de abril de 1973 (ITAIPU BINACIONAL, 2008).

As principais estruturas construídas na barragem de Itaipu podem ser observadas na Figura 22, as quais totalizam uma extensão de 7800m. O reservatório da usina compreende uma área de 1350Km<sup>2</sup> e volume de 2,9. 10<sup>10</sup>m<sup>3</sup>, quando este se encontra em seu nível normal máximo de 220m (do nível médio do mar). A barragem de ligação esquerda e direita tem comprimento de respectivamente, 350 e 182m, a barragem lateral direita tem 968 m de extensão, a barragem principal tem 612m, e o vertedouro tem 374m (ITAIPU BINACIONAL, 2008).

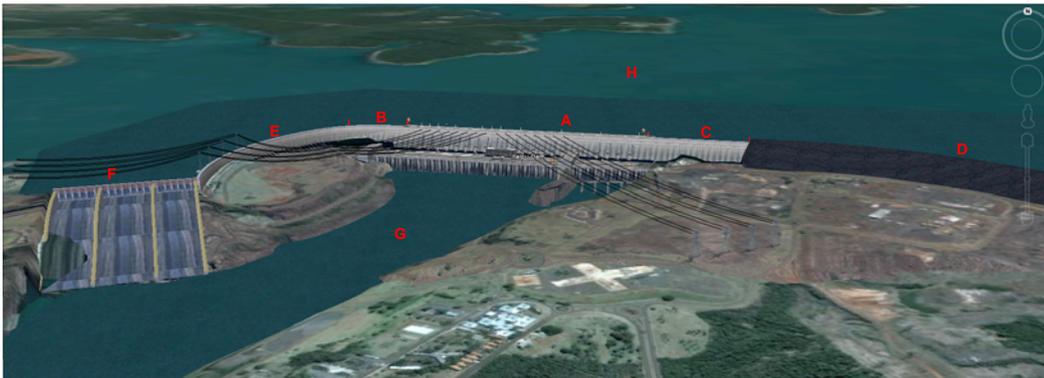


Figura 22- Vista aérea da área Barragem de Itaipu. (A) Barragem principal; (B) Barragem de ligação direita; (C) Barragem de ligação esquerda; (D) Barragem de enrocamento; (E) Barragem lateral direita; (F) Vertedouro, (G) Canal de desvio do Rio Paraná; (H) Reservatório de Itaipu. Fonte: modificado de GOOGLE EARTH (visualização março/2011).

Com o objetivo de conhecer e compreender melhor as estruturas geológicas e a qualidade dos materiais existentes na área da obra, a Itaipu Binacional realizou diversos ensaios de laboratório, interpretações de fotos

aéreas e investigações diretas e indiretas *in situ*. Tais investigações, disponíveis no acervo próprio da usina, consistiram em sondagens rotativas; sondagens à percussão (SPT); teste de injeção sob pressão; amostragem de sondagem integral; escavação de túneis; poços exploratórios; trincheiras; ensaios de cone (CPT); macaco plano; dilatômetro; medição de tensões em rocha; e permeabilidade. Já os ensaios laboratoriais consistiram em ensaio de resistência ao desgaste (Abrasão Los Angeles); compressão simples; compressão triaxial; ensaios de alterabilidade; cisalhamento direto e ensaio de caracterização (ITAIPU BINACIONAL, 2008).

#### **4.1 Geologia Regional**

A Usina Hidroelétrica de Itaipu está inserida no contexto geológico dos derrames basálticos da Formação Serra Geral, que se encontram dispostos na Bacia do Paraná, sobrepondo rochas sedimentares da Formação Botucatu. A Bacia do Paraná constitui uma sinéclise intracratônica, desenvolvida a partir do Neo-Ordoviciano (ZALÁN et al., 1990; MILANI, 2004), composta rochas sedimentares e vulcânicas, como derrames, diques e *sills*.

Durante o Eocretáceo iniciou-se um intenso magmatismo predominantemente toleítico, que originou as rochas magmáticas da Formação Serra Geral na Bacia do Paraná. O material vulcânico ocorre por meio de uma sucessão de derrames de lavas basáltica, considerada como típico derrame, que pode chegar a espessura máxima de 1700 m. Cada derrame distribuiu rochas vulcânicas a grandes extensões da bacia, apresentando espessuras variáveis de 10 a 80m (MARQUES & ERNESTO, 2004).

Os derrames basálticos são normalmente constituídos por diferentes níveis de alternância textural, gerados pelo processo de resfriamento da lava. A porção superior constitui, em geral, um expressivo horizonte vesicular-amigdaloidal, decorrente do resfriamento muito rápido da lava. A porção central do derrame é geralmente composta por basalto maciço, de textura afanítica a fanerítica fina, quando o derrame é relativamente espesso, esta porção ocupa cerca de 2/3 da espessura total do derrame. A porção interderrames pode ser constituída por brechas vulcânicas caracterizadas normalmente pela presença

de fragmentos de basaltos cimentados por matriz areno-siltosas ou basálticas (lavas aglomeráticas) (GUIDICINI & CAMPOS, 1968).

As feições estruturais comumente encontradas nos derrames basálticos correspondem as disjunções colunares, geradas pelo resfriamento da lava, que compreendem juntas subverticais presentes predominantemente na porção central do derrame. Na literatura são reconhecidas também ocorrências de significativas fraturas sub-horizontais, com características diversas, atribuídas a diferentes processos genéticos (GUIDICINI & CAMPOS, 1968; CURTI, 2011).

#### **4.2.1 Geologia da Área da Barragem**

Na área da Barragem de Itaipu podem se encontrar numerosos derrames basálticos, que se apresentam dispostos a uma profundidade aproximada de 700 metros, intercalados por brechas e com contatos em direções NW e mergulho de 2° a NE (ITAIPU BINACIONAL, 1972).

Estes derrames apresentam características como: horizontalidade, espessuras entre 20 e 60m; descontinuidades, que ocorrem próximas dos contatos entre derrames ou na zona de transição com direções plano paralelas; e presença de brechas basálticas, de espessuras médias entre 1 a 20m, nas zonas interderrames e se situam entre os basaltos de granulometria fina a média, e o diabásio.

Na área das obras de Itaipu os basaltos da Formação Serra Geral normalmente apresentam alta porcentagem de piroxênio (Augita) e de plagioclásio (Labradorita), e por vezes, contém uma quantidade de quartzo maior que o comum. Contudo, são encontradas, além do piroxênio e o plagioclásio, pequenas quantidades de sílica amorfa, sílica cristalina, e quantidades extremamente pequenas de zeólitas (ITAIPU BINACIONAL, 1972).

Minerais secundários como calcita, clorita e nontronita, são encontrados preenchendo as vesículas, fraturas e diáclases existentes nos basaltos, e a calcita presente se comporta como agente cimentador das brechas existentes no contexto geológico vulcânico da área. A clorita e a nontronita são produtos da transformação de piroxênios e zeólitas, encontrados originalmente na

composição do basalto. A nontronita é uma argila de caráter expansivo, que poderia ser nociva à construção da Barragem de Itaipu, já que as características de expansividade de argilas podem gerar diversos problemas geotécnicos. Por este motivo durante a fase de investigação foi levado em consideração estas características, exigindo estudos avançados durante as investigações subseqüentes (ITAIPU BINACIONAL, 1997).

No processo de deposição vulcânica, cada derrame apresenta uma gradação da porção inferior e central para zonas de transição do basalto, que se torna de estrutura densa a vesicular-amgdaloidal, da base para o topo do derrame (Figura 23). É importante ressaltar que feições como vesículas e amígdalas se situam na porção mais superficial do derrame, as camadas vesiculares apresentam grandes variações de mineralogia, textura, dimensões e preenchimento. Tais características são geradas devido ao fluxo de líquidos da porção de basalto mais densa para a porção mais superficial do derrame, devido à pressão de gases nestes locais.

Na área da construção de Itaipu foram estudados quatro tipos de brechas vulcânicas classificadas abaixo segundo Itaipu binacional (1997):

- Brecha Tipo I, altamente resistente, compacta, e com fragmentos fortemente cimentados;
- Brecha Tipo II, resistente, porém porosa pela alta porcentagem de basalto vesicular;
- Brecha Tipo III, extremamente porosa e cavernosa, mas rigidamente estruturada por veios de quartzo e carbonato. Esta é responsável pelos grandes vazios encontrados em diversos pontos da fundação, que trouxeram diversos problemas para a liberação do topo rochoso para o lançamento do concreto;
- Brecha Tipo IV, argilosa, altamente compressível, ocorrendo sempre em bolsões descontínuo. A presença desta nunca foi aceita nos níveis superiores da fundação, que determinou uma série de rebaixos parciais e totais dos blocos de concreto;

Na zona de transição de derrames, é comum ocorrer minerais como sílica, que seriam provenientes da absorção da areia preexistente no terreno quando houve o processo vulcânico de extrusão. A absorção da sílica alterou a

cor dos basaltos desta zona na maior parte dos derrames, ou seja, na parte superior do derrame o basalto tem cor cinza-escuro e se modifica para uma cor avermelhada (ITAIPU BINACIONAL, 1972).

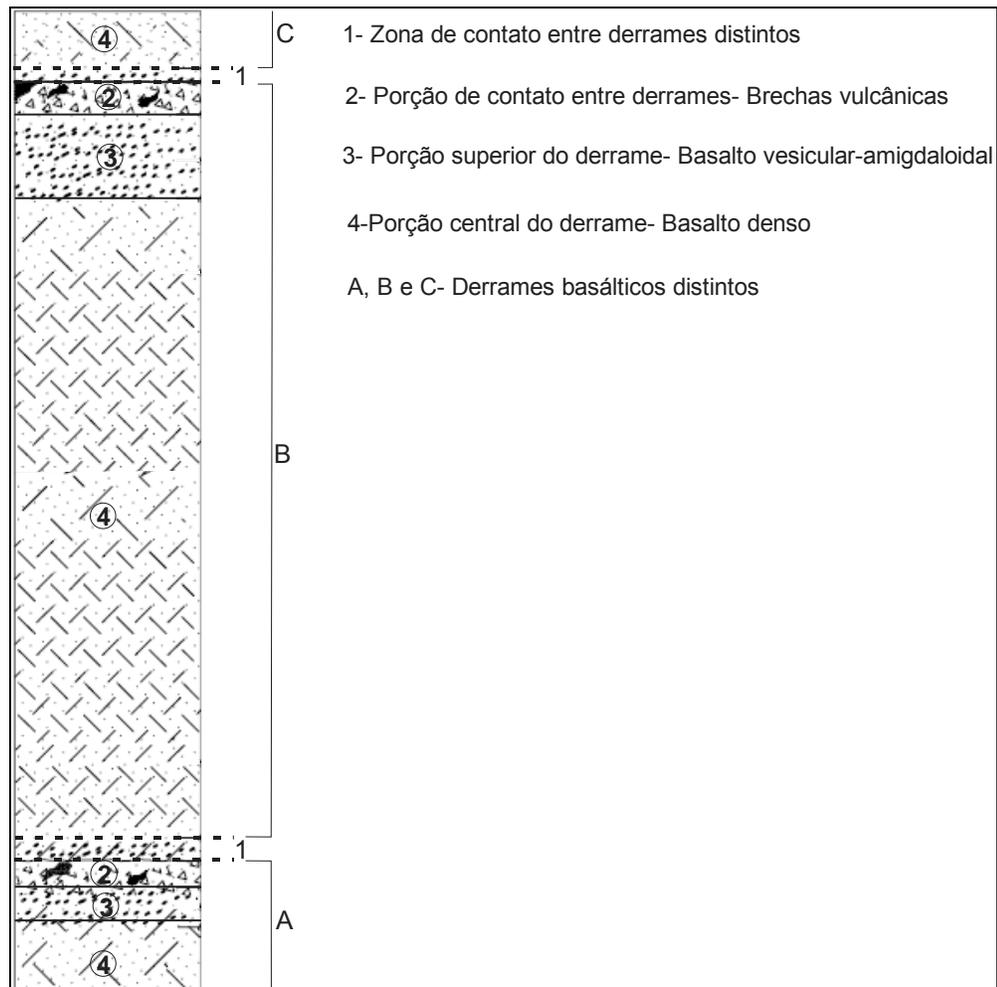


Figura 23- Seção litológica típica de um derrame de basáltico da área de Itaipu e suas zonas interderrames, Fonte: modificado de ITAIPU BINACIONAL, 1972.

Abaixo da camada vesicular-amidaloideal encontra-se a porção densa do derrame, qual apresenta, em geral, textura afanítica, podendo chegar a fanerítica fina, no centro desta porção do derrame, onde houve um resfriamento mais lento, pode ocorrer uma textura tipo granitóide ou diabásica grossa (WAICHEL et al., 2006). Esta zona, nos derrames mais espessos, foi

completamente protegida dos efeitos de alteração, com isto mantendo as características originais da rocha.

Na área de construção da Usina de Itaipu foi estudada uma seqüência de cinco derrames principais, denominados derrames A, B, C, D e E, associados a descontinuidades de gêneses distintas, tanto de origem singenética aos derrames basálticos, quanto devido ao alívio de tensões gerado pela erosão e formação do rio Paraná (ITAIPU BINACIONAL, 1997).

Estas descontinuidades foram denominadas A, B, D, e E, e se encontram dispostas nesta ordem da base ao topo, sendo a descontinuidade A, localizada próximo da cota 10m; a descontinuidade B, próximo da cota 60m; a descontinuidade D, próxima da cota 125m, tem sua gênese associada à deposição dos derrames vulcânicos ocorrentes nesta área; e a descontinuidade E, originada pelo alívio de tensões no maciço rochoso, ocorreu devido à remoção de pelo menos 150m de espessura de material rochoso.

O alívio de tensão ocasionou o aumento de condutividade hidráulica ao longo do contato entre os derrames A e B, e a descontinuidade A. Como prova de tal fenômeno foram observados no fundo do vale pressões de água significativas em feições próximas ao leito do rio, onde foi verificado artesianismo, tais evidências indicam um possível arqueamento do fundo do rio (ITAIPU BINACIONAL, 1997).

As feições detectadas abaixo do talvegue do rio, onde são observados deslocamentos, se encontram sempre no basalto denso, já que os litotipos brecha vulcânica e basalto vesicular-amigdaloidal que ocorrem no topo dos derrames, são capazes de absorver as deformações sem originar deslocamentos representativos devido a sua estrutura geológica diferente à encontrada no basalto denso (ITAIPU BINACIONAL, 1997).

Entretanto, o processo erosivo que deu origem a calha do rio Paraná não seria suficiente para causar o efeito de arqueamento encontrado na área de Itaipu. As tensões tangenciais de tamanha grandeza devem ser provenientes de esforços tectônicos, gerados pelo reflexo dos esforços da cadeia mesoatlântica, ou mesmo, pelo processo de subsidência da Bacia do Paraná na região em estudo.

#### **4.2.1.1 Derrame E**

O derrame E ocorre entre as elevações 158 a 163m, onde o basalto denso se caracteriza pela presença de fraturamento vertical a subvertical dominante, sendo que o desenvolvimento destas fraturas é limitado pelas profundidades na ordem de dezenas de metros (ITAIPU BINACIONAL 1979).

Este material apresenta um grau de alteração baixo (A1-A2), rocha são a pouco alterada, com exceção ao topo rochoso, onde a alteração é acentuada ao longo de fraturas subverticais e horizontais; fraturamento médio (F2-F3), rocha pouco fraturada a fraturada, entretanto, com base a análise dos testemunhos de sondagem o fraturamento do derrame é, em geral, considerado de classe F2, pois não é considerado o fraturamento vertical; e consistência alta (C1 a C2), rocha muito consistente a consistente (ITAIPU BINACIONAL, 1979).

Entretanto, nestas rochas ocorrem famílias de fraturas subverticais, próximo a plataforma de 165m, características geomecânicas baixas, onde o grau de alteração caracterizado esta na classe A3, e fraturamento na classe F5. Tais observações foram feitas em materiais “in situ” e correlacionadas com sondagens vizinhas (ITAIPU BINACIONAL, 1979).

A descontinuidade E se apresenta na margem esquerda do rio, sob a forma de uma, ou, mais fraturas com contato rocha-rocha são, e localmente se apresenta aberta e preenchida por rocha decomposta. É importante ressaltar que, após estudos investigativos na área da barragem se confirmou que esta descontinuidade não se prolonga até a margem direita.

#### **4.2.1.2 Derrame D**

O derrame D tem espessura variável de 12 a 20m, sendo que no topo do derrame ocorre uma zona de aproximadamente 2 a 7m de basalto denso de contato, gerado pelo resfriamento rápido do magma, com diáclases próximas entre si, e de basalto vesicular (ITAIPU BINACIONAL, 1977 <sup>(2)</sup>). Abaixo desta

zona ocorre o basalto denso de coloração rosada, com espessura aproximada de 9 a 16m, e esta porção apresenta três zonas secundárias:

- O basalto da zona superior, com aproximadamente 3m de espessura, com teor variável de nontronita, diáclases de espaçamento moderado, e com superfícies manchadas de verde azulado;
- O basalto da zona intermediária, mais espesso e com resistência superior ao do basalto da zona superior, neste ocorrem juntas de resfriamento, onde na porção superior da zona intermediária ocorre um teor mais elevado de argila expansiva que as demais porções;
- O basalto da zona inferior tem espessura em torno de 3m, é caracterizado por apresentar juntas mais próximas entre si, este nível de basalto equivale a base deste derrame;

Neste corpo basáltico ocorre a descontinuidade D, localizada na estrutura de desvio entre as cotas 117 e 118m, é definida pela separação das paredes do maciço com faixa contendo argila, ou, material de baixa resistência (ITAIPU BINACIONAL, 1977). Esta descontinuidade ocorre no basalto com alto teor de nontronita, ou, onde ele tem textura grosseira, quase amigdalóide. O basalto próximo a descontinuidade tem grau de alteração entre as classes A3, A4 e A5, sendo comum encontrar materiais de classe A5, que resultam numa argila mole com alta plasticidade e manchas dispersas de nontronita na cor verde (ITAIPU BINACIONAL, 1977). Dentro da faixa da descontinuidade podem ocorrer lentes de areia fina, subangular, com pequenas proporções de argila. Estas são mais comuns no lado direito da escavação e tem mineralogia parecida com as areias encontradas no rio atualmente.

A descontinuidade D foi a mais extensa investigada na área das obras da Usina de Itaipu, ocorre próximo a base do basalto denso da zona superior. Ela não é uniforme, apresentando uma ou mais zonas. Tais zonas consistem na descontinuidade preenchida por argila de espessura maior que 1cm e algum contato resistente rocha-rocha, ou, preenchida por argila de espessura maior que 25cm, onde ocorrem pequenos blocos tabulares, e um pouco de contato rocha-rocha.

Segundo Itaipu Binacional (1977), esta descontinuidade tem sua gênese associada a esforços tectônicos que produziram rupturas com deslocamentos

muito pequenos ao longo de uma zona de cisalhamento de fluxo, ocorrente entre a zona superior e intermediária do basalto denso, resultando nos pequenos deslocamentos que formaram vazios na rocha, permitindo a alteração rápida do material geológico. Tais alterações ocorreram quando o rio Paraná estava sendo erodido em níveis superiores, durante este período a areia fina e a argila plástica se misturaram com o basalto denso totalmente alterado, preenchendo os vazios da descontinuidade sob a ação de 40m de água.

#### **4.2.1.3 Derrame C**

Este derrame se localiza entre as cotas 115 e 82 m, e apresenta uma seqüência litológica, com brechas do tipo II, que são brechas resistentes, porém porosas pela alta incidência de basalto vesicular; e brechas do tipo III, extremamente porosas e cavernosas, entretanto, rigidamente estruturadas por veios de quartzo e carbonatos.

O basalto denso deste derrame possui coloração cinza, com fraturamento subhorizontal na parte superior e subvertical a inclinado na parte inferior. A camada de basalto de coloração rosada é composta de basalto vesicular-amidaloidal classificado como medianamente alterado a muito alterado, e medianamente a pouco consistente.

No canal de desvio o basalto tem coloração escura, alta resistência mecânica, amídalas de calcedônia dispersas e ligeiramente alongadas na direção horizontal, e fraturas distribuídas de forma semelhante ao derrame, porém, com maior freqüência na direção subhorizontal (ITAIPU BINACIONAL, 1977<sup>(2)</sup>).

Em campanhas investigativas baseadas em sondagens rotativas observaram que o contato entre os derrames C e D se apresenta aberto na maioria das sondagens, evidenciado pelos ensaios de perda d'água, considerado um caminho para a percolação de água (ITAIPU BINACIONAL, 1977). Este contato se encontra exposto nas paredes de escavação do canal de desvio, e quando analisado se encontra semi-aberto, principalmente onde

ocorre a brecha C. Tal tipo litológico se apresenta irregular, por vezes, oxidado, e com infiltrações.

O contato com a brecha acima do derrame C é plano, e aparentemente fechado, constatam-se também a presença de película ou vestígios de argilas. Entretanto, dada as imprecisões da amostragem convencional não há como afirmar que possa ocorrer preenchimento argiloso com espessura significativa (ITAIPU BINACIONAL, 1977).

#### **4.2.1.4 Derrame B**

Este derrame é localizado entre as cotas de 80 e 20m, apresenta no seu topo brecha basáltica do tipo II, com espessuras médias de 4m, e 10 a 13m no canal de desvio, onde se notou a presença de vesículas com bolsões isolados do tipo cavernoso (BARBI, 1981). Abaixo dessa camada, verificou-se a presença do basalto vesicular-amidaloidal, apresentando no topo e na base, vesículas revestidas de argila esverdeada e amígdalas de calcedônia.

O basalto denso do derrame B possui coloração cinza e não apresenta direção das fraturas. Notou-se que as fraturas subhorizontais são curtas, desaparecendo nos encontros com as fraturas subverticais. Na base desse basalto foi observado uma faixa de 50 cm extremamente fraturada, com presença de fraturas curtas, entrecruzadas e de pequena inclinação.

Segundo Itaipu Binacional (1978<sup>(3)</sup>), as rochas do derrame B se apresentam com alteração baixa, rocha sã (A1), e por vezes, rocha pouco alterada (A2). O grau de fraturamento nas paredes é classificado como rocha muito fraturada (F3), por vezes, rocha fraturada (F2), com exceção à faixa onde é encontra a descontinuidade B, local onde o grau de fraturamento é de rocha fragmentada (F5).

A descontinuidade B mergulha de 1 a 2° para norte e as fraturas do feixe principal se encontram abertas e com preenchimento silicoso. A partir do estudo da geologia sob o talvegue do rio, foi verificado que os derrames A e B são os que mais interessavam às fundações da barragem principal e casa de força. À montante se situa acima da brecha vulcânica acima do derrame B,

enquanto as demais estruturas construídas se situam no basalto denso do derrame B (ITAIPU BINACIONAL, 1978).

O material rochoso encontrado no leito do rio encontra-se habitualmente alterado e muito fraturado, e suas fraturas são abertas e oxidadas, lhe caracterizando alta permeabilidade. A brecha vulcânica situada acima do derrame B é considerada porosa devido aos bolsões cavernosos encontrados nesta rocha, o que constitui uma fundação permeável à montante (ITAIPU BINACIONAL, 1978<sup>(2)</sup>).

Na barragem principal a feição mais relevante é a zona fraturada, situada na base do derrame B, no contato entre os derrames A e B. Esta zona é composta por planos de fraqueza subhorizontais, subparalelos, por vezes, imbricados, e em geral abertos, apresentando grande circulação de água e preenchimento argiloso. Tal feição caracteriza esta porção do maciço, com espessura de 0,6 a 8m, com uma classificação geomecânica baixa. Este contato encontra-se fechado em 50% da área investigada, próximo a ele, o basalto denso tem grau de fraturamento de classe F3 e F4, e em geral, tem espessura variável e inferior a 5m, entretanto, em algumas áreas esta espessura chega a 10m (ITAIPU BINACIONAL, 1977<sup>(4)</sup>).

#### **4.2.1.5 Derrame A**

O derrame A está localizado abaixo da cota 20m, constituído superiormente por brecha basáltica do tipo I, e inferiormente por brechas do tipo II. Abaixo da brecha ocorre basalto vesicular-amigdaloidal, classificado como muito consistente (C1) e grau de alteração rocha são a pouco alterada, A1 a A2, respectivamente. Sotoposto a essa camada, nota-se a presença de um material caracterizado como brecha do tipo II. Em porções subjacentes, encontra-se novamente uma camada de basalto vesicular e amigdalóide, com estrutura semelhante à primeira camada encontrada de basalto vesicular-amigdaloidal.

O basalto denso é encontrado aproximadamente na cota 12m, de coloração roxo escuro, denso e muito fraturado, com fraturas curtas, em feixes de 3 a 5 fraturas paralelas (ITAIPU BINACIONAL, 1972).

Segundo Itaipu Binacional (1977<sup>(3)</sup>), a descontinuidade A se encontra aproximadamente 60 cm acima do contato com o basalto denso, e não apresenta qualquer indício de infiltração ao longo desta. No basalto vesicular-amigdaloidal, ocorre um contraste devido sua resistência menor, quando comparada às rochas localizadas superior e inferiormente.

A descontinuidade A apresenta atitude semelhante a dos derrames em que esta inserida, é plana com ondulações suaves e mergulho médio de 2° N-NE. A rocha próxima a descontinuidade mostra-se pouco alterada a medianamente alterada (A2 a A3), medianamente coerente (C3) e pouco fraturada (F1). O basalto vesicular-amigdaloidal apresenta amígdalas preenchidas por minerais de características expansivas e de coloração verde.

Abaixo do leito do rio próximo ao contato do derrame A/B, onde foi encontrada uma zona com alto fraturamento, foi realizado tratamento a partir de túneis localizados na cota 20m. Tal tratamento foi realizado com o preenchimento destas zonas por concreto, pelo sistema de chavetas de injeção descrito por Bertoli et. al. (1999).

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho tem como metodologia a aplicação da simulação computacional de informações de 143 sondagens rotativas realizadas na área da barragem principal da Usina Hidrelétrica de Itaipu a partir do programa GRASS-SIG, para a geração de modelo volumétrico de parâmetros de RQD.

Para tal, foram realizadas as seguintes atividades: análise estatística da base de dados original; reestruturação da base de dados original para entrada no programa; definição bi e tridimensional da área de interpolação; calibração dos parâmetros de interpolação do programa; importação de dados; interpolação de superfícies de base e topo do modelo 3D; interpolação tridimensional do atributo RQD; análise estatística dos dados de entrada e dos modelos 3D; exportação para o visualizador; visualização tridimensional do modelo; construção de perfis de corte vertical e horizontal; comparação dos resultados com dados prévios. As principais etapas para a realização do modelo tridimensional, pelo programa GRASS, se apresentam ilustradas pelo fluxograma da Figura 24.

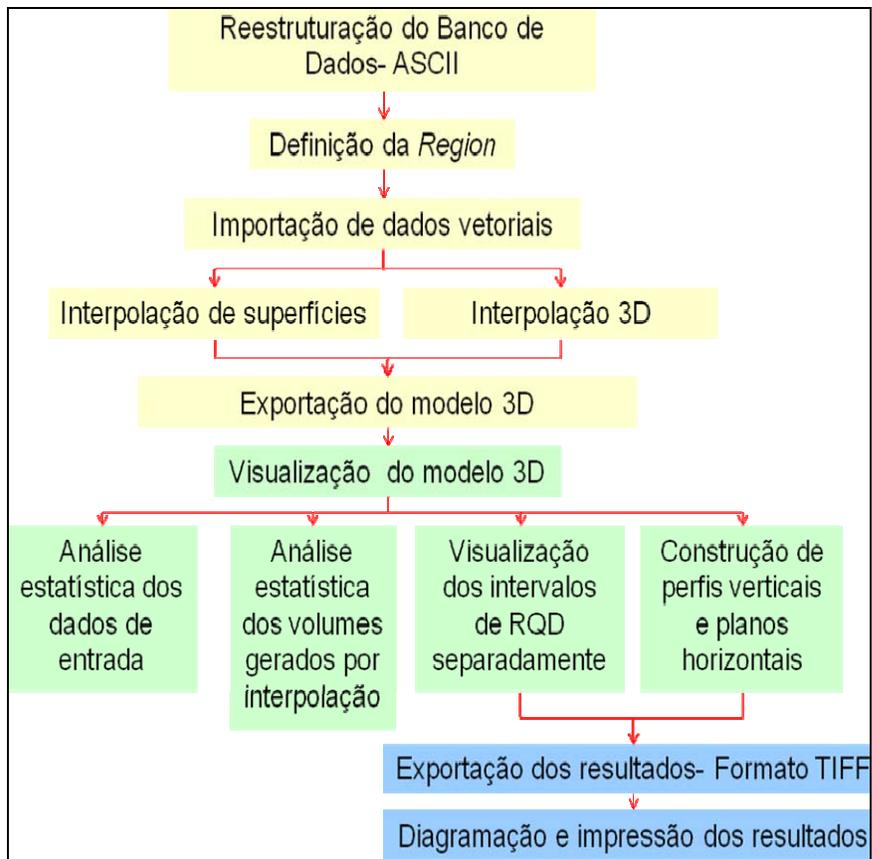


Figura 24- Fluxograma das atividades para a geração do modelo tridimensional do maciço da área da barragem principal de Itaipu a partir dos parâmetros de RQD.

### 5.1 Análise estatística do banco de dados

O banco de dados original era composto por informações de localização (coordenadas UTM), cota e valores numéricos de RQD para cada manobra das sondagens rotativas. Tais dados foram analisados por métodos de estatística básica como, média, mediana e histogramas de frequência de espessuras das manobras de sondagens; média das distâncias entre as sondagens em planta; histogramas de frequência e porcentagens de pontos de dados com informações de intervalos de RQD, classificados segundo Deere (1967).

Estas análises foram fundamentais para a definição bi e tridimensional da área de interpolação do modelo, resoluções horizontais e verticais das dos voxels, e quantificação percentual das classes de RQD dos dados de entrada.

## 5.2 Reestruturação do banco de dados

Nesta etapa foi realizada a transformação do banco de dados, que se encontrava em planilhas estruturadas em formato \*xls (Tabela 16) para arquivo de texto em formato \*txt.

O programa GRASS não aceita como dados de entrada arquivos no formato original do banco de dados, os arquivos devem se apresentar em formato ASCII, onde as colunas são separadas por barras verticais ou tabulação (Tabela 17). Após a transformação para formato ASCII os dados foram salvos em arquivos de formato \*txt (Tabela 18).

Além da reestruturação das planilhas originais para o formato de texto dos dados foi necessário a exclusão das linhas que continham valores negativos como -99, que no banco de dados original representa locais com ausência de informações de classificação geomecânica. Esta medida foi tomada, pois dados negativos influenciam nos cálculos de interpolação volumétricas, levando a erros durante a simulação computacional.

Após este tratamento o banco de dados original pode ser considerado ideal para ser simulado pelo programa GRASS-SIG, e ficou composto por informações de longitude e latitude (UTM) do furo de sondagem, cota, RQD, grau de alteração, consistência, fraturamento e porcentagem de recuperação de cada manobra das sondagens rotativas.

Tabela 16- Modelo da planilha de dados estruturados em formato

\*GEOeas. Fonte: modificado de PATIAS (2010).

Nome da sondagem	Longitude (m)	Latitude (m)	Cota inicial da sondagem (m)	Cota final da sondagem (m)		
R022042427	742192,96	7187873,04	163,770	106,22		
Início da manobra	Final da manobra	RQD	Alteração	Consistência	Fraturamento	Recuperação
0,00	1,30	-99	2	1	3	97

Tabela 17- Modelo de dados transformados no Excell do formato estruturado para ASCII.

Longitude (m)	Latitude (m)	Cota (m)	RQD	Alteração	Consistência	Fratramento	Recuperação
742192,96	7187873,04	162,47	-99	2	1	3	97
742192,96	7187873,04	160,6	65	2	1	3	90
742192,96	7187873,04	159,6	100	1	1	2	98
742192,96	7187873,04	157,47	100	1	1	2	99
742192,96	7187873,04	156,87	80	1	-99	-99	98

Tabela 18- modelo de dados de entrada modificados para ASCII, e em formato \*.txt.

742192,96	7187873,04	162,47	-99	2	1	3	97
742192,96	7187873,04	160,6	65	2	1	3	90
742192,96	7187873,04	159,6	100	1	1	2	98
742192,96	7187873,04	157,47	100	1	1	2	99
742192,96	7187873,04	156,87	80	1	-99	-99	98

### 5.3 Definição dos limites geográficos da área de interpolação (*REGION*)

Antes de iniciar as simulações no programa GRASS-SIG é preciso criar um *location*, que representa a área de trabalho em que será feito o tratamento dos dados, e um *mapset*, que define a subpasta dentro da pasta *location*, onde serão armazenados os produtos da simulação. Na criação da *location* o usuário determinará quais serão os limites da área de trabalho, bem como seu sistema de referência e zona UTM (fuso). Esta etapa é desenvolvida segundo os passos a seguir:

- 1- Inicialmente abre-se o programa GRASS, e clica no botão “*location wizard*” (Figura 25), para iniciar a configuração do local de trabalho.



Figura 25-Página inicial do Grass, para definição de novas *locations*.

- 2- Nomeia-se a nova *location* (Figura 26A);
- 3- Selecione a opção “*select coordinate system parameter from list*”, onde é escolhido o sistema de coordenadas em que sua área esteja contida dentre uma lista com diversos sistemas de coordenadas (Figura 26B), e avance a etapa. Para a área de trabalho foi escolhida a projeção Universal de Mercator-UTM (Figura 26C);
- 4- Em seguida será necessário confirmar se utilizará *datum* associado a um elipsóide, ou apenas um elipsóide, escolhe-se a primeira opção e identifica a zona de projeção, em que a área de trabalho esteja contida, no caso é zona 21 do hemisfério sul (Figura 26D), assim avance ;
- 5- Então, especifica-se qual será o *datum*, no caso do trabalho admitiu-se o SAD\_69 (Figura 26E), avance, e finalmente já terá sua *location* determinada clicando em *finish* (Figura 26F);

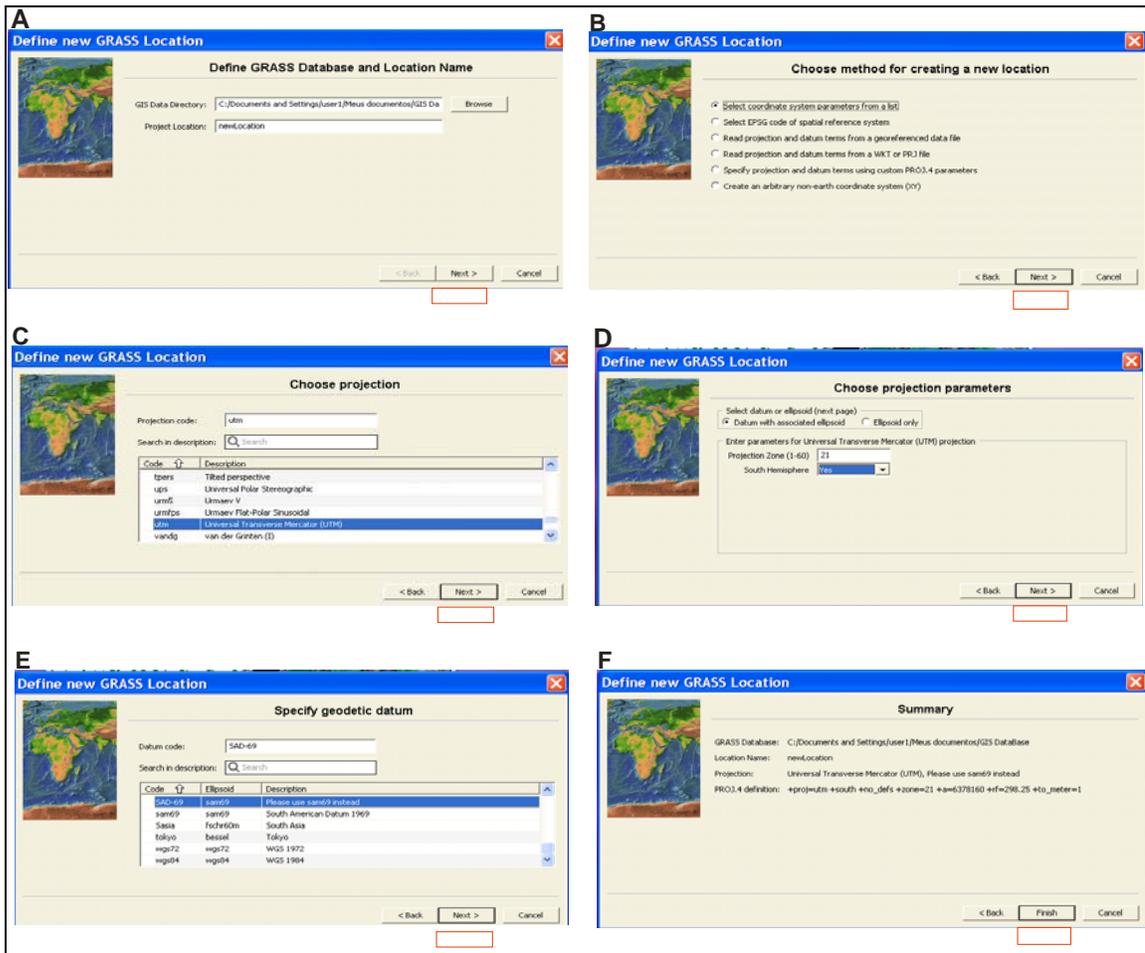


Figura 26-Etapa de configuração espacial de uma nova *location*.

Em seguida o programa questiona se o usuário deseja definir a os limites da região, denominada *REGION*, então clica na opção sim, abrindo então página onde serão definidas as coordenadas geográficas limitantes da área a ser interpolada (UTM Norte, Sul, Oeste e Leste), e as resoluções 2D e 3D do bloco diagrama a ser gerado (Figura 27).

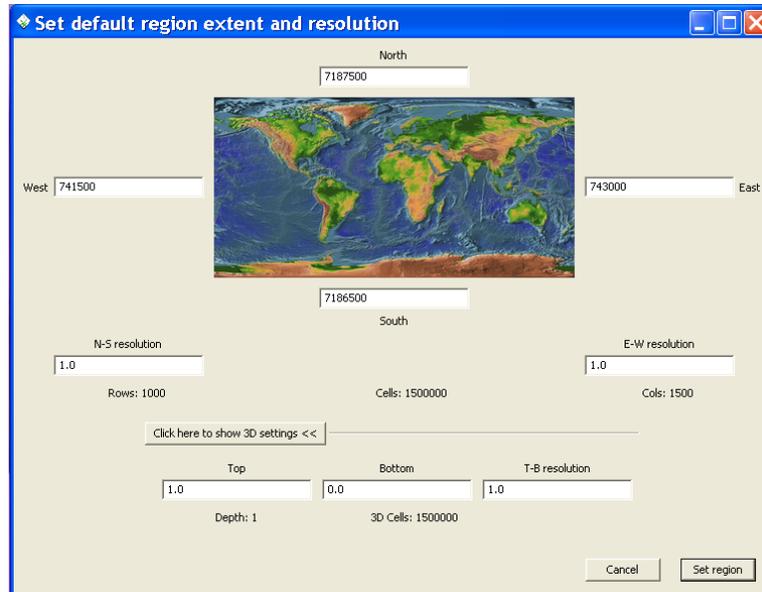


Figura 27-Definição dos limites geográficos e resoluções 2D e 3D da região a ser interpolada (*REGION*).

- 6- E finalmente será possível criar um *mapset* para a nova *location*, clicando em criar *mapset* (Figura 28A), onde aparecerá a opção de nomear este *mapset*. E assim, podem-se iniciar as atividades no programa GRASS-SIG (Figura 28B) clicando na opção *start GRASS*.

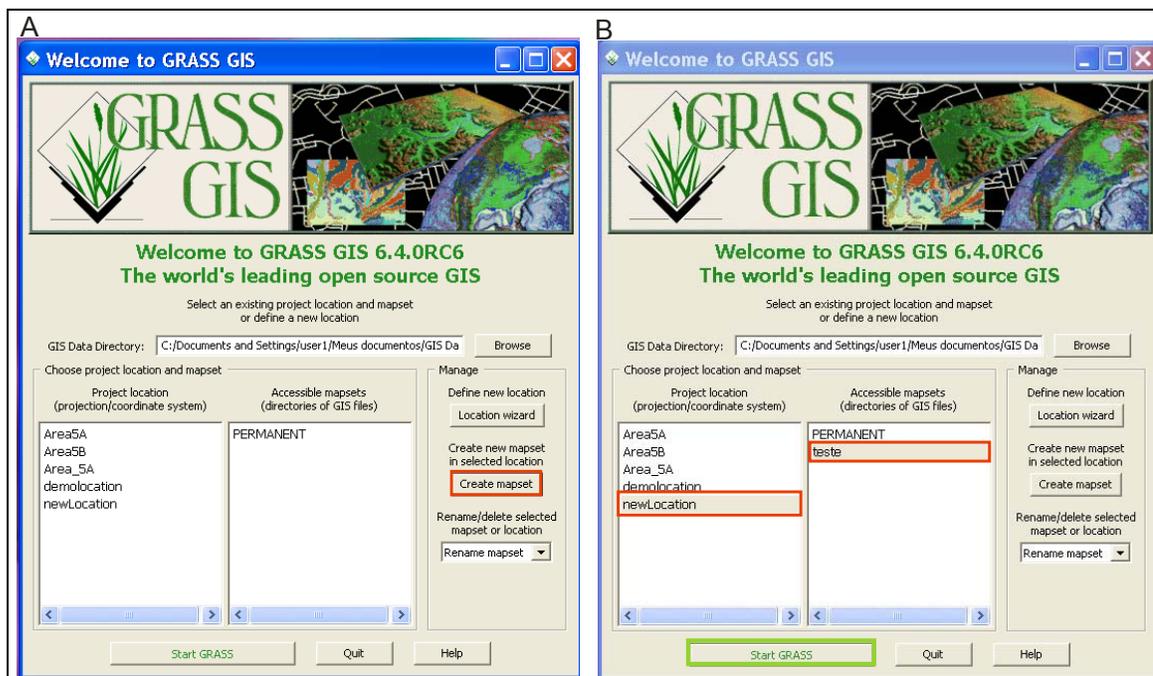


Figura 28- (A) Geração de um novo mapset; (B) Iniciando o programa.

## 5.4 Importação de dados vetoriais da tabela ASCII

Nesta etapa os dados em formato ASCII serão importados para o GRASS como vetores, e com isso gerar uma distribuição espacial dos pontos em área, quais, posteriormente, serão interpolados. É importante salientar que os pontos vetoriais importados se apresentam no GRASS como dados georreferenciados, vinculados com o espaço geográfico. As atividades realizadas nesta etapa estão descritas abaixo:

- 1- Abra a página inicial do GRASS, e inicie o processo de importação dos dados seguindo o caminho FILE→IMPORT VECTOR MAP→ASCII POINTS OR GRASS ASCII VECTOR (Figura 29).

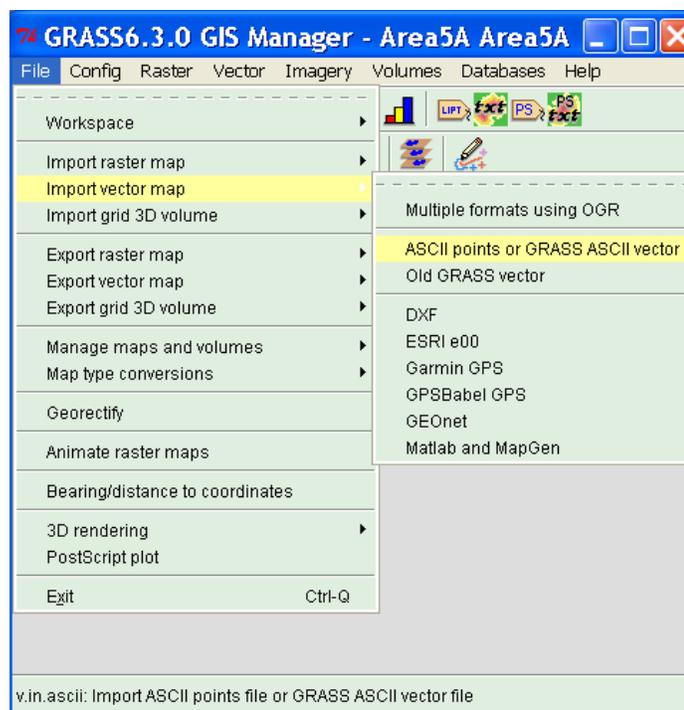


Figura 29-Importação de dados pontuais em formato ASCII.

Assim, será aberta uma página denominada *vin.in.ascii*, onde serão escolhidas algumas opções para a importação dos dados vetoriais como, criar um arquivo 3D, o tipo de separador de informações (se tabulação ou barra

vertical), quantas colunas serão utilizadas para o tratamento dos dados pelo programa (coluna 1-longitude, coluna 2-latidade, coluna 3- altitude e coluna 4- atributo), sendo que para a geração de superfície utiliza-se apenas as três primeiras colunas.

- 2- Na página de configuração de importação de dados, *v.in.ascii*, especifica-se que gere um arquivo 3D, com dados separados por barras verticais (|), e busca-se o arquivo de dados a ser importado na sua pasta especificada na lacuna *input* (Figura 30A);
- 3- Nomeia-se na lacuna *output*, as colunas que serão trabalhadas, e clica em *run* (Figura 30B).

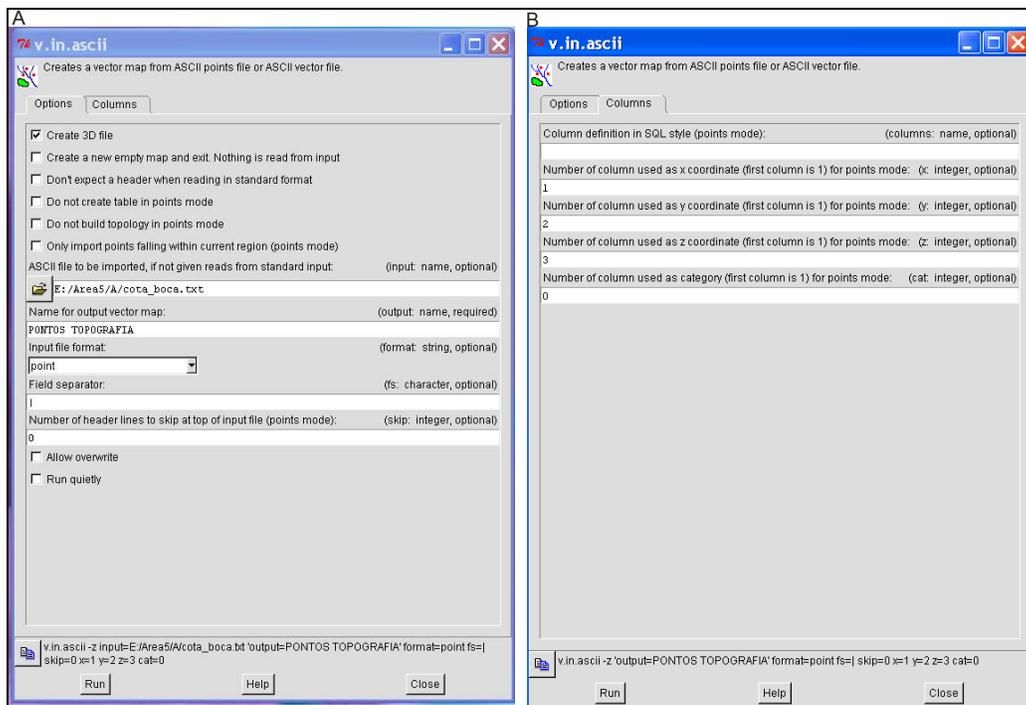


Figura 30- (A) Página de configuração para importação de vetores a partir de dados ASCII; (B) definição de números de colunas que serão executadas.

A página de *output* do programa mostra ao usuário em que situação se encontra a atividade que ele acionou, ela apresenta se ocorreu algum erro, se os dados foram excluídos, porcentagem concluída, e se foi realizada corretamente a importação de dados (Figura 31).

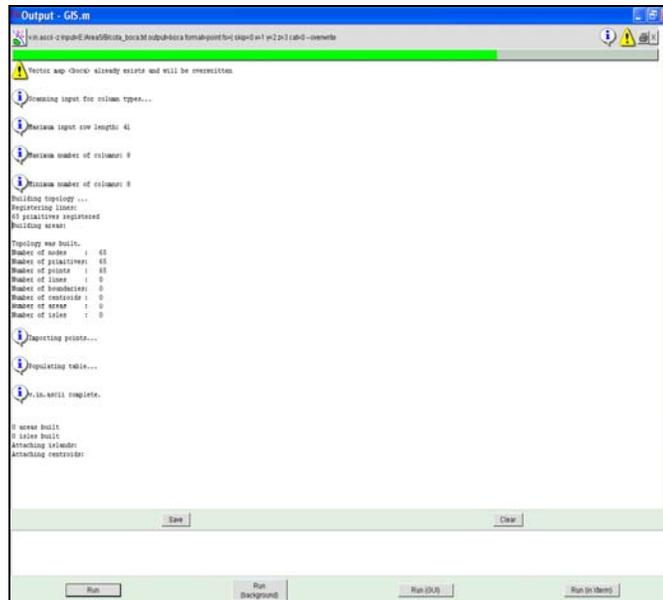


Figura 31-Página de *output*, saída escrita das ações do programa durante a atividade configurada do usuário.

4- Na página inicial do GRASS, clicase no ícone ADD VECTOR LAYER



, para selecionar o vetor gerado e visualizá-lo na página do MAP DISPLAY (Figura 32).

5- Dentro do MAP DISPLAY existe a opção de obter informações sobre

o ponto selecionado. Para isto, clicase em QUERY , e posteriormente em cima do ponto que queira informações, estas informações aparecerão na janela do *OUTPUT* (Figura 33).

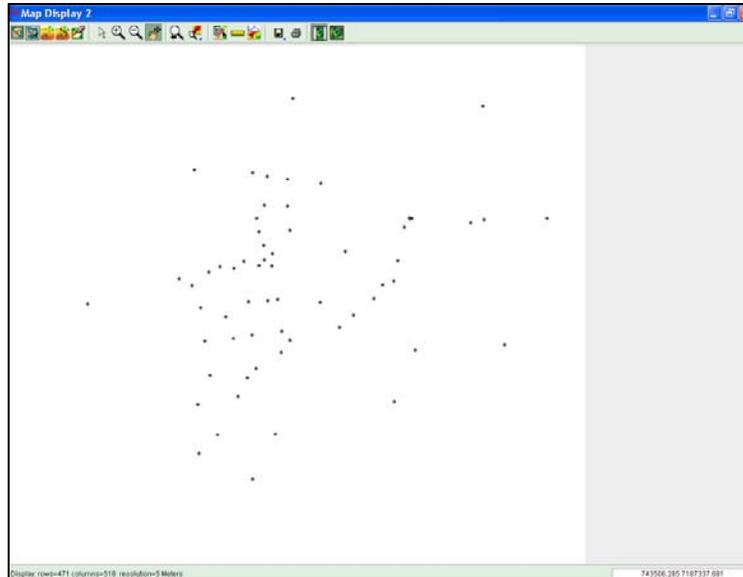


Figura 32- Página do MAP DISPLAY- pontos vetoriais com informações de coordenadas geográficas e altitude.

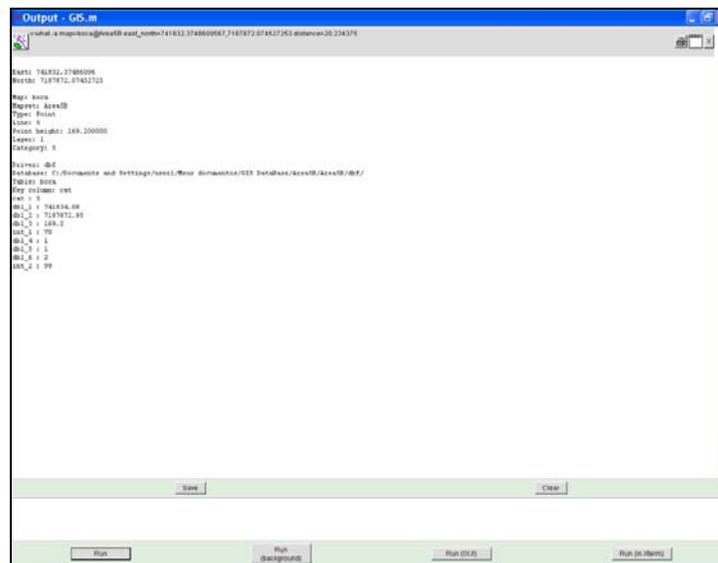


Figura 33-Página com as informações sobre um ponto, obtidas a partir da ferramenta QUERY do MAP DISPLAY

## 5.5 Interpolação de superfícies topográficas

Após a importação dos pontos existe a necessidade de configurar as resoluções das células 2D e 3D (pixels e voxels, respectivamente) a serem geradas por interpolação, bem como o alinhamento da área para deixá-la

regular quanto as latitudes e longitudes máximas e mínimas. Esta etapa se encontra descrita abaixo:

- 1- As configurações das resoluções são feitas por linhas de comandos dentro da tela do *OUTPUT*, assim é necessário digitar a seguinte linha de comando: *g.region vect=boca res=5 -ap*.

A linha de comando digitada pode ser entendida da seguinte forma quando se digita os seguintes comandos:

- *g.region*, indica que as ações feitas no programa estarão dentro da região delimitada antes de abrir o programa quando configurou o Norte, Sul, Leste e Oeste;
- *vect=boca*, determina qual serão os pontos vetoriais que serão interpolados, por exemplo, boca é o nome do arquivo vetorial importado;
- *res=5*, significa que a resolução horizontal dos pixels variam de 5 em 5 metros, neste caso para a topografia foi o valor médio das variações de altitude encontrados para estes pontos;
- *- ap* representam, *a* o alinhamento de latitude e longitude máximas e mínimas dos pontos, que serão alinhadas para gerar uma área regular, e *p* indica a representação de um resultado bidimensional;

Após digitar estes comando clica-se em *run*, e assim, na tela do *OUTPUT* aparecerá informações como quantas células 2D foram geradas, os limites geográficos da região, quantas linhas e colunas são geradas e o tamanho da resolução em latitude e longitude (Figura 34).

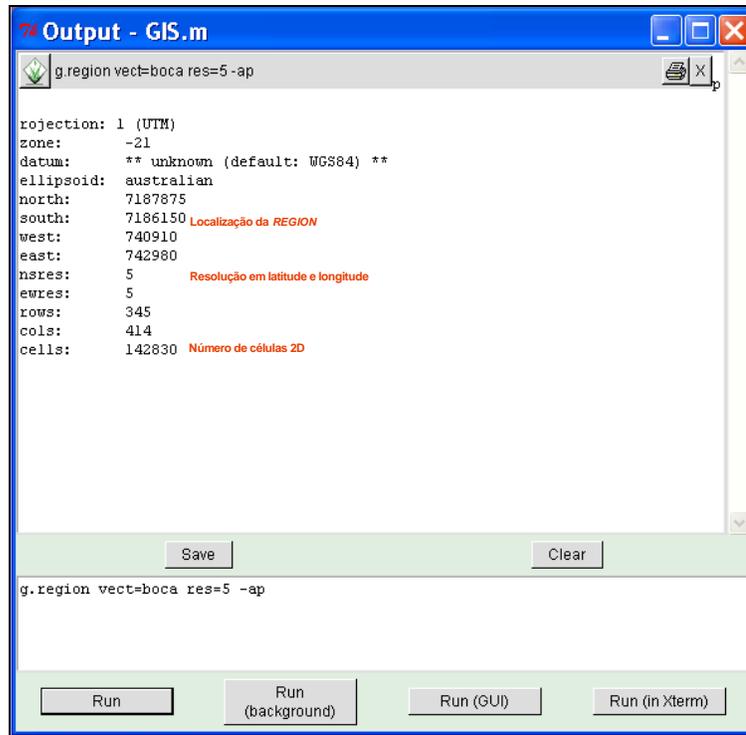


Figura 34- Informações sobre os pontos que serão interpolados para a geração de superfícies ou volumes.

Inicia-se então a etapa de interpolação de superfícies segundo os passos a seguir:

1. Na página principal do GRASS, clica-se na opção RASTER e escolhe as seguintes opções INTERPOLATE SURFACE→REGULARIZED SPLINE TENSION (*v.surf.rst*), onde será realizada a interpolação de dados vetoriais para geração de uma imagem raster pelo método matemático spline regularizado por tensão (RST);
2. Na página *v.surf.rst* serão colocadas as informações necessárias para esta interpolação na subpágina OPTIONS, assim clica-se no ícone  para escolher os pontos vetoriais importados para simular o modelo de superfície, e denomina-se o nome de saída para o resultado da interpolação;
3. Na subpágina SETTINGS serão configurados o parâmetro de tensão, que controla a distância em que cada ponto influencia no produto

resultante; o SEGMAX, número máximo de pontos para um segmento; o NPMIN, número mínimo de pontos utilizados para a interpolação, cujo valor deve ser maior que *segmax* e menor de 700; o DMIN, distância mínima entre os pontos; e o DMAX, distância máxima entre os pontos;

4. Para confirmar estas configurações na tela do INTERPOLATE SURFACE→REGULARIZED SPLINE TENSION (*v.surf.rst*), clica-se em Run.

A interpolação superficial será considerada uma interpolação 2D, pois utilizará as informações geográficas do ponto e um atributo, que será a altitude em onde este ponto está inserido, e o resultado final será uma imagem raster de dimensão 2.5D, observada na página do MAP DISPLAY (Figura 35), e pelo visualizador NVIZ presente como ferramenta do GRASS, clicando no ícone  dentro do MAP DISPLAY (Figura 36).

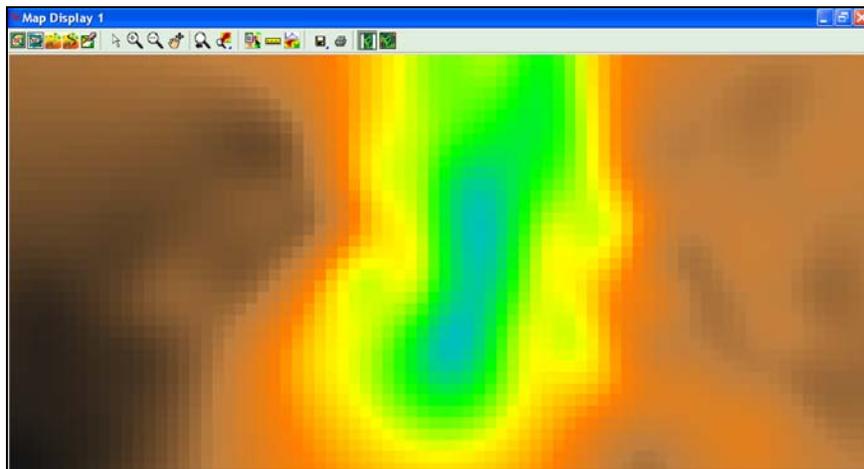


Figura 35-Página de visualização no MAP DISPLAY de imagem raster gerada por interpolação de dados vetoriais por método Spline Regularizada por Tensão.

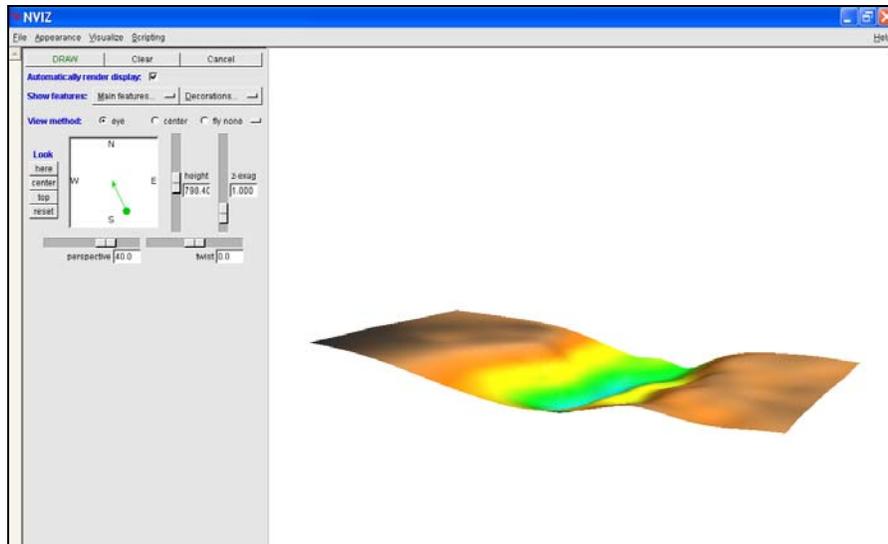


Figura 36- Página de visualização no NVIZ da imagem raster de superfície (topo das sondagens).

Após a geração da superfície de topo do maciço rochoso investigado, denominado BOCA, foi realizada, com a mesma metodologia da interpolação da superfície de topo do maciço, a geração da superfície de base do maciço investigado, a partir dos pontos vetoriais de cotas mais profundas das sondagens, denominada FUNDO.

É importante ressaltar que estas superfícies geradas não é a verdadeira topografia do terreno, é uma topografia gerada por interpolação de pontos com valores de cotas retirados do início e final dos dados de sondagens rotativas. A visualização das duas superfícies pode ser feita ao mesmo tempo pelo visualizador NVIZ (Figura 37).

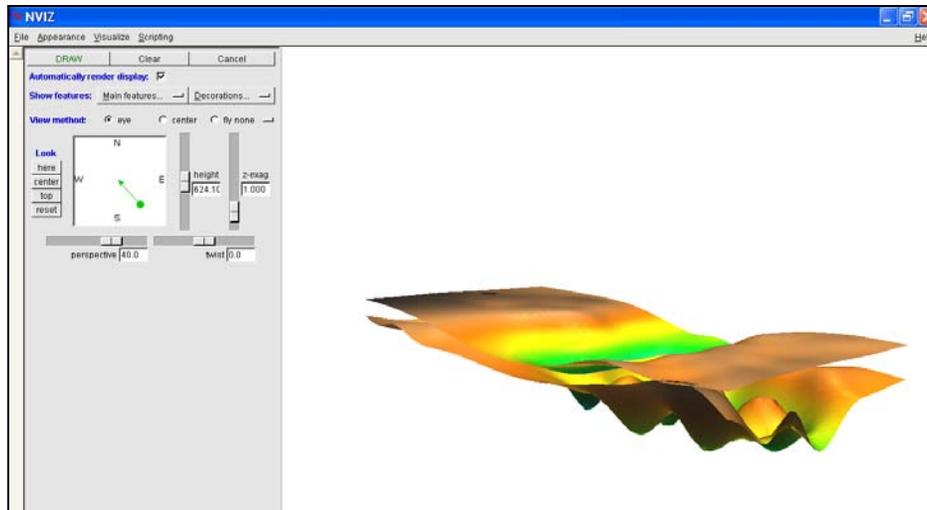


Figura 37- Página de visualização no NVIZ das imagens raster da topografia de topo e base do pacote rochoso investigado.

Estas superfícies serão utilizadas posteriormente, na fase de exportação do modelo 3D, para delimitar as superfícies de topo e fundo do volume gerado, ou seja, o limite inferior do modelo é a superfície de base do maciço interpolado, e o limite superior é a superfície de topo do maciço interpolado.

## 5.6 Calibração de resoluções 3D para interpolação de volume

Os parâmetros definidos conseqüentemente devem ser o **T** e o **B**. O parâmetro **T**, cota topográfica mais alta do modelo, foi definido a partir da cota mais alta das sondagens rotativas.

Já os parâmetros **B**, cota topográfica mais baixa do modelo, “**smooth**” (parâmetro de suavização), **npmin**, **dmin**, **tension** (tensão), e **segmax**, **tbres** e **res3**, tiveram uma complexidade maior associada a sua obtenção do que o **T**. Assim, foram realizadas diversas simulações computacionais, que foram e comparadas com as análises estatísticas dos dados de entrada, para que tais parâmetros pudessem ser definidos de maneira mais propícia.

## 5.7 Interpolações vetoriais para a geração de volumes

A interpolação de dados vetoriais é realizada a partir de pontos vetoriais importados como vetores, contendo as três informações espaciais (x, y e z) e o atributo a ser interpolado, que no caso desta pesquisa são os parâmetros de RQD. A simulação computacional dos dados foi realizada a partir do método matemático spline regularizado por tensão (RST). Para a aplicação deste método é importante que, se calibre os parâmetros do programa GRASS para como, a tensão, suavidade “*smooth*”, *npmin*, *dmin*, e *segmax*, a fim de obter resultados que representem, de modo mais próximo possível, a realidade do terreno.

Assim, inicialmente é preciso importar os dados pontuais, como foi descrito no item 5.4. Após a importação dos pontos existe a necessidade de configurar novamente as resoluções das células (“*voxels*”); o alinhamento da área, para deixá-la regular quanto as latitudes e longitudes máximas e mínimas; e configurar as resoluções 3D.

Na tela do OUTPUT aparecerá informações das dimensões bidimensionais que serão geradas segundo os limites geográficos delimitados na *region* e a calibração dos parâmetros de interpolação 3D definidos pelo usuário. Os comandos utilizados na calibração tridimensional do programa para a simulação 3D são descritos como linha de comando na tela do OUTPUT segundo o exemplo a seguir:

```
g.region vect=RQD b=-180 t=190 tbres=2.5 res3=25 -p3
```

onde,

*res3*= significa que a resolução horizontal dos voxels;

*tbres*= é a resolução vertical dos voxels;

*-p3*= indica a representação do resultado tridimensional.

*t*= é a cota máxima em que os valores serão interpolados;

*b*= é a cota mínima em que os valores serão interpolados;

Na tela do OUTPUT aparecerá informações de quantas células 2D e 3D serão geradas, os limites geográficos da região, quantas linhas e colunas em 2D e 3D serão utilizadas, o tamanho da resolução em latitude e longitude, a resolução em altura e os valores de altitude máxima e mínima (Figura 38). Após a importação e configuração de dados vetoriais é possível iniciar os passos para a interpolação do volume.

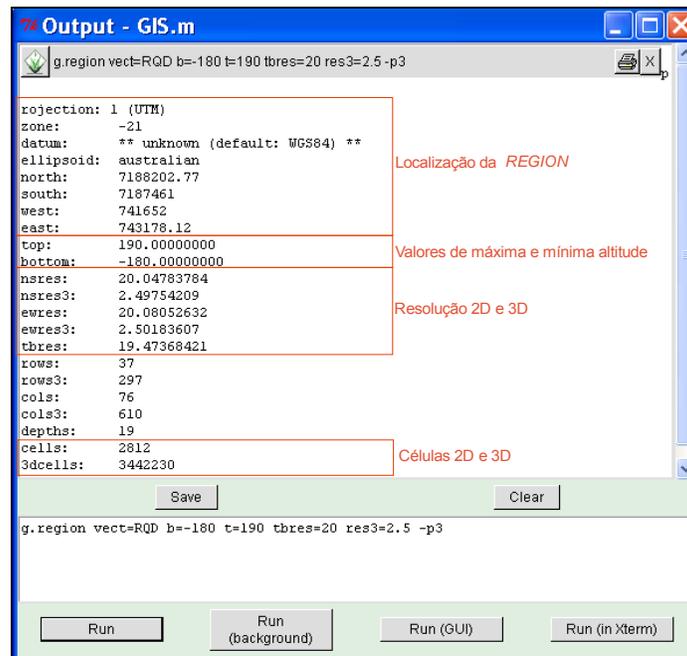


Figura 38- Página do OUTPUT com informações sobre os pontos que serão interpolados para geração de volume

1. Abra a tela principal do GRASS, e na opção VOLUMES clique em INTERPOLATE VOLUME FROM VECTOR POINTS, onde será aberta a página *v.vol.rst*, e serão configuradas informações sobre a interpolação na subpágina OPTIONS (Figura 39A), assim, clique no ícone , onde estão os pontos vetoriais importados, escolhe o arquivo vetorial que contenha os dados a ser interpolados;
2. Na subpágina SETTINGS, são configurados os parâmetros de tensão, segmax, npmin, dmin e o dmax (Figura 39B);

- Para confirmar as configurações e iniciar a interpolação clica-se em run e acompanhe o andamento da interpolação na tela do OUTPUT (Figura 40);

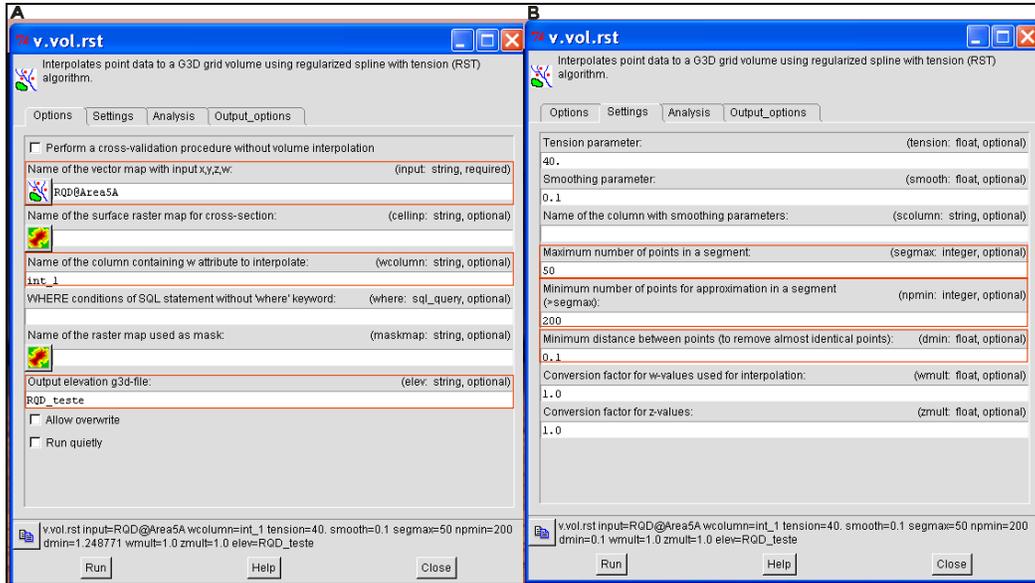


Figura 39- Página da tela de configuração dos parâmetros de interpolação RST (Regularized Spline Tension)- (A) Subpágina OPTIONS; (B) Subpágina SETTINGS.

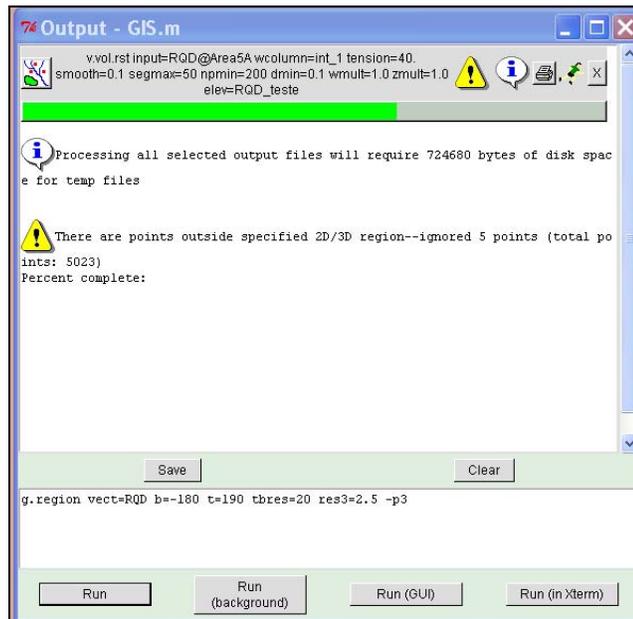


Figura 40- Página do OUTPUT com informações sobre o andamento da interpolação

Com o intuito de obter o resultado mais preciso do modelo 3D, foram realizadas diversas simulações tridimensionais no programa GRASS-SIG. Nestas simulações foram testados diferentes parâmetros de calibração, onde os parâmetros profundidade máxima do modelo, tensão, suavização, segmax e npmin, sofreram variações gerando blocos diagramas com distribuição do atributo diferente.

Associadas a cada interpolação 3D foram realizadas análises estatísticas dos volumes de intervalos de RQD, que representam as porcentagens destes intervalos em cada modelo. E para complementar a escolha da melhor representação tridimensional foi realizada a validação cruzada dos modelos pelo método Holdout.

## **5.6 Exportação do modelo gerado para extensão VTK**

Após interpolação tridimensional do modelo de dados e sua validação cruzada, é preciso exportar-lo para a extensão VTK, para assim poder visualizá-lo no programa o PARAVIEW. Nesta etapa são inseridas as superfícies de topo e base interpoladas antes do volume, estas foram geradas para delimitar o topo e a base do modelo tridimensional.

- 1- Na tela principal do GRASS configura-se a exportação pelo seguinte caminho: FILE→EXPORT GRID 3D VOLUME→VTK, gerando a abertura da tela *r3.out.vtk*;
- 2- Na página *OUTPUT* insira o arquivo do modelo 3D gerado na opção INPUT. Nesta mesma página nomeie o modelo a ser exportado na opção OUTPUT (Figura 41A);
- 3- Na página SURFACE OPTIONS serão inseridas as superfícies de topo e base do pacote de maciço rochoso investigado (Figura 41B). Posteriormente, clica em *run* e acompanhe o andamento da interpolação na tela do OUTPUT;

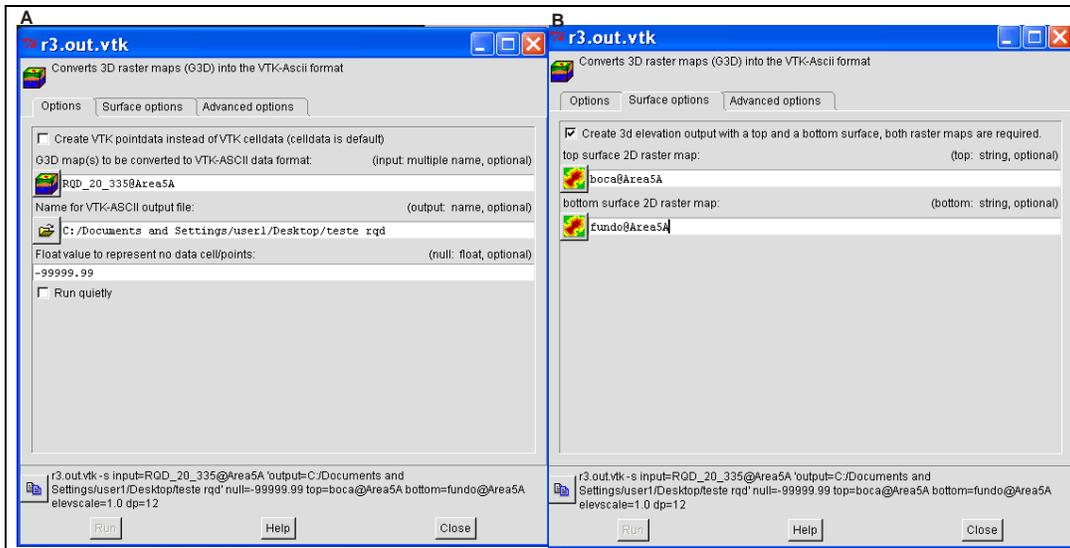


Figura 41- Página de configuração para exportação de modelo 3D- (A) Tela para OPTIONS; (B) Tela para SURFACE OPTIONS.

## 5.7 Visualizações e análises do modelono PARAVIEW

As visualizações, construção de perfis verticais e horizontais, e análises do modelo 3D serão realizadas no programa PARAVIEW.

- 1- No PARAVIEW abra o modelo exportado pelo GRASS na extensão VTK no caminho OPEN→FILE, assim, será aberta uma tela com opções de formatos de dados a serem abertos, escolha a opção LEGACY VTK FILES (*partitioned*);
- 2- Na tela do OBJECT INSPECTOR→PROPERTIES clique em APPLY, e abrirá o modelo (Figura 42);

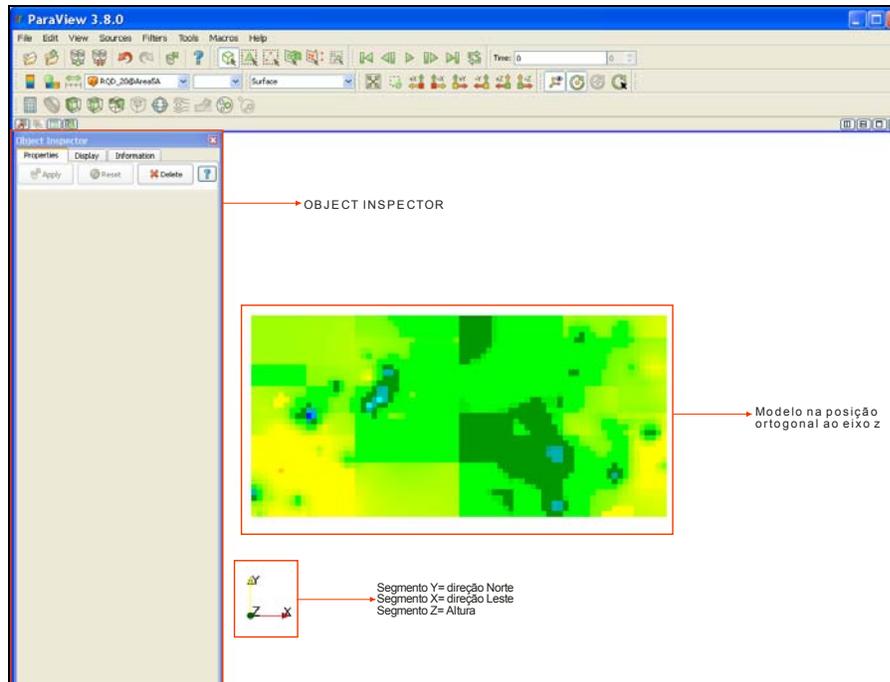


Figura 42- Tela do PARAVIEW- Modelo tridimensional da propriedade RQD da Área 1, a partir de uma visualização da porção superficial ortogonal a altitude do modelo.

Após a abertura do modelo no programa é preciso definir a escala de cores que represente bem a variação dos parâmetros ao longo do espaço, a separação do volumes em intervalos pré-definidos, como por exemplo, faixa de porcentagem em que o RQD é classificado como *muito pobre* (0-25 %), e a escolha de cortes verticais e horizontais.

As cores são escolhidas na tela COLOR SCALE EDITOR, além de, escolher as cores na opção COLOR SCALE, também é possível formatar a legenda de cores no COLOR LEGEND, onde se formata a fonte das letras da legenda na tela COLOR SCALE EDITOR (Figura 43).

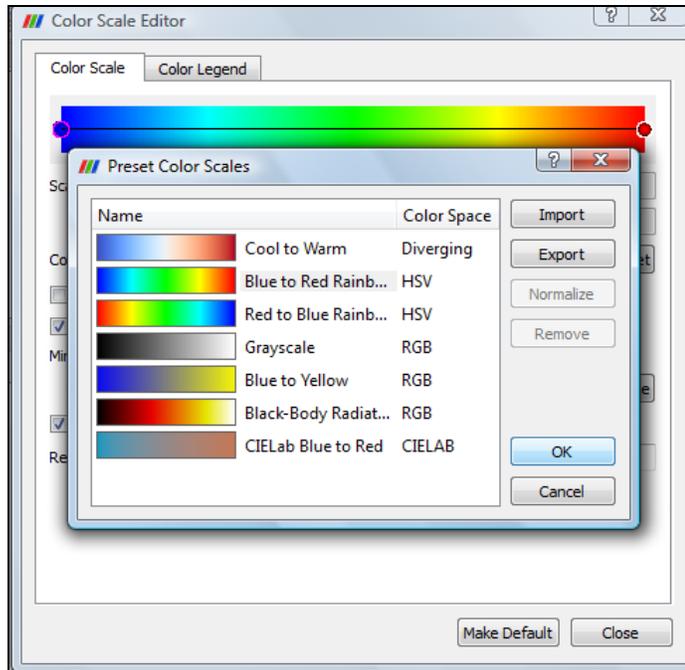


Figura 43- Página de palhetas de cores (COLOR SCALE EDITOR).

Para realizar a análise espacial dos parâmetros é preciso separar este modelo em intervalos pré-definidos de acordo com o interesse, no caso de RQD, é segundo a classificação de Deere (1967), tal separação, mostra o volume de material em cada intervalo e sua localização no modelo.

A ação é realizada pela ferramenta THRESHOLD, onde os valores serão escolhidos segundo limites superiores e inferiores do intervalo dado pelo usuário. A Figura 44A representa o volume total do modelo de RQD e a Figura 46B o volume com valores de RQD distribuídos no intervalo de 50 a 75 %, assim facilitando a comparação da distribuição dos intervalos espacialmente, a partir da ferramenta THRESHOLD.

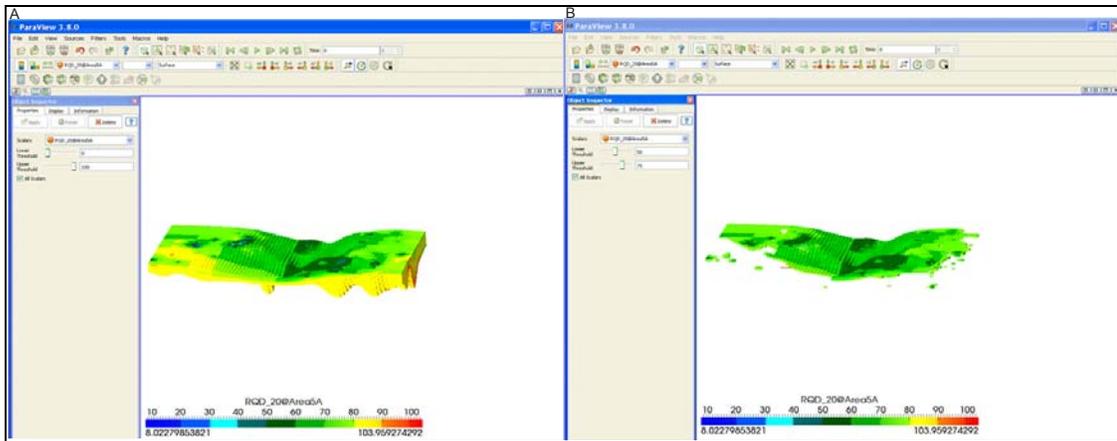


Figura 44- (A) modelo com todos os valores de RQD; (B) modelo com valores de RQD no intervalo de 50 a 75%.

Posteriormente, é realizada a escolha de perfis verticais e horizontais do modelo 3D a direções selecionadas a partir de perfis geológicos construídos previamente, na época de construção de Itaipu e materiais acadêmicos com temas associados a área da barragem.

Tais perfis são obtidos pela ferramenta SLICE, que faz corte vertical ou horizontal no modelo, representando apenas as informações que ocorrem ao longo deste perfil. Esta ferramenta dispõe as informações segundo direções normal aos eixos x,y,z (Figura 45). Assim, configure a direção de onde será realizado o corte no modelo e clique em APPLY para obter o perfil transversal (Figura 46).

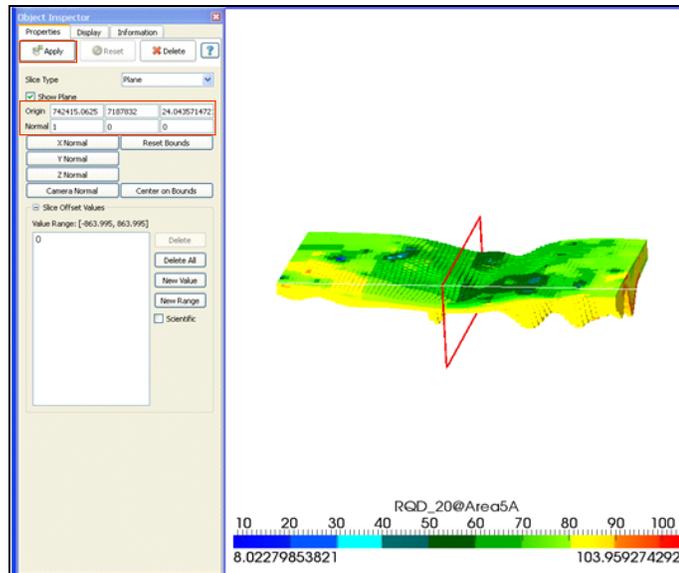


Figura 45- Página de configuração das direções do perfil vertical no modelo

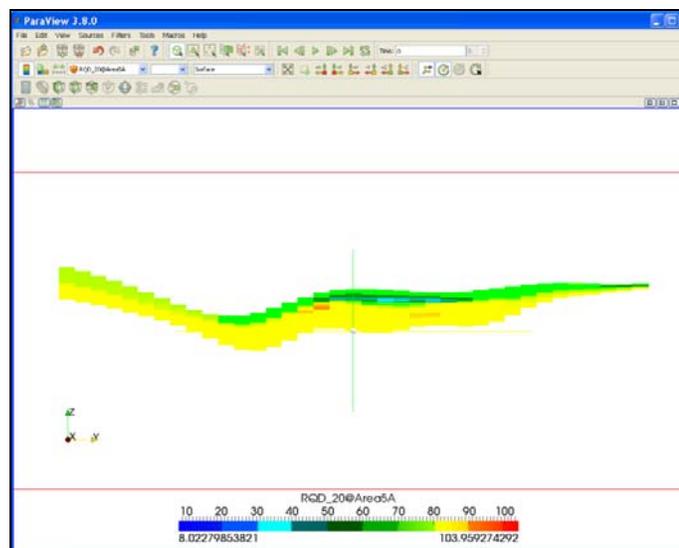


Figura 46- Perfil vertical elaborado após a seleção da direção de corte no modelo 3D.

Assim, por meio de ferramentas como THRESHOLD e SLICE são realizadas as análises do modelo 3D, comparando-as com materiais produzidos previamente como, mapas e perfis verticais geológicos da barragem, perfis horizontais de parâmetros geomecânicos, distribuições das discontinuidades e litotipos estudados no maciço.

## **5.8 Diagramação e impressão dos modelos e seus perfis transversais**

Após a visualização dos blocos diagramas dos modelos 3D e geração de perfis verticais e horizontais é necessário exportar-los como imagens no formato TIFF, para serem diagramados no programa Corel Draw.

## **6. RESULTADOS E ANÁLISES**

### **6.1 Resultados de dados prévios**

Após diversos estudos e investigações na área de construção, a Itaipu Binacional gerou um acervo técnico rico em informações geológico-geotécnicas da região, composto por relatórios técnicos, mapas de escavação, mapas de localização de estruturas construídas, mapas de localização de ensaios geotécnicos, mapa geológico, perfis geológicos e geotécnicos, boletins de sondagens rotativas, banco de dados da classificação de sondagens rotativas, entre outros.

Neste capítulo são apresentados modelos tridimensionais de RQD simulados em duas áreas e análises conjuntas destes resultados com dados prévios citados nos seguintes itens.

#### **6.1.1 Mapa de localização de sondagens e estruturas da barragem**

O mapa de localização de sondagens e estruturas de barragem apresenta a distribuição de todos os ensaios investigativos realizados na área de construção de Itaipu, como sondagens rotativas, sondagens percussivas (SPT), sondagem de cone (CPT) e poços.

Além dos pontos de investigação do terreno também são encontradas as estruturas construídas, como a Barragem Principal, Barragem de Ligação Esquerda e Direita, Barragem Lateral Direita, Barragem de Enrocamento, Vertedouro, Canal de Desvio e Casa de Força (ANEXO 1- Mapa de localização de sondagens e estruturas construídas).

Ao analisar os pontos de sondagens rotativas foi observado que a maior concentração de pontos de dados se encontra na área da barragem principal. A distância média entre os pontos de sondagens é de aproximadamente 50m , distribuídas de forma heterogênea na região.

### **6.1.2 Mapa de localização da área de trabalho**

A partir do mapa de localização de sondagens e estruturas de barragem (ANEXO 1- Mapa de localização de sondagens e estruturas construídas), foi delimitada a área de trabalho para a simulação computacional 3D dos parâmetros de RQD, e a partir foi desse construído um mapa de localização da área de trabalho para o estudo de Caso Geral- Área da barragem principal (APÊNDICE 1- Mapa de localização da área de trabalho do estudo de Caso Geral).

Na área de trabalho encontram-se distribuídas 143 sondagens rotativas, com profundidades variando de 50 a 300m, além das estruturas construídas, como a Barragem Principal, porção Norte da Barragem Lateral Direita, Barragem de Ligação Esquerda e Direita, porção norte do Canal de Desvio (a jusante da barragem) e porção sul do Lago de Itaipu (a montante da barragem). A área se localiza entre as coordenadas 7188200 N, 7187500 S, 741600 W, e 743200 W e tem 1,12 km<sup>2</sup> de área.

A área de estudo de Caso Específico se localiza entre as coordenadas 7187900N, 7187600S, 742600W e 743000E e contém 28 sondagens rotativas, utilizadas para a simulação computacional do modelo 3D de RQD para a localidade.

### **6.1.3 Mapa geológico e perfis geológicos e geotécnicos**

O mapa geológico geral para a Barragem de Itaipu foi elaborado em 1974, baseado em mapeamentos geológicos realizados na área. Neste são distribuídos materiais geológicos e rochosos como brechas vulcânicas, basalto vesicular-amgdaloidal e basalto denso de diferentes derrames vulcânicos ocorridos na região, além de localização de alguns pontos de sondagens rotativas e direções dos perfis geológicos verticais (ANEXO 2- Mapa geológico geral).

Este documento permite a compreensão do contexto geológico em que a Barragem de Itaipu está inserida, assim como a análise das seções geológicas elaboradas na fase de estudo para a construção do empreendimento, tais

documentos são passíveis de utilização na análise Geológico-Geotécnica dos modelos 3D de RQD resultantes desta dissertação.

As seções geológicas foram utilizadas na análise comparativa dos resultados. A primeira é caracterizado como seção transversal da barragem principal, foi construída com orientação paralela a esta estrutura, mostrando a distribuição de rochas dos derrames A, B, C e D e descontinuidades associadas (ANEXO 3- Seção geológica da barragem principal). Para esta seção foi elaborada uma adaptação da distribuição geológica e suas descontinuidades para um modo mais visual (APÊNDICE 2- Seção geológica da barragem principal modificada). A segunda seção geológica tem orientação transversal à barragem principal e é composto pela distribuição de rochas dos derrames B, C, D e E e suas descontinuidades associadas, e foi posicionada ao longo do eixo do Bloco F1 da Barragem Principal (ANEXO 4- Seção Geológica pelo Eixo do Bloco F1 da Unidade U1).

Além destas seções geológicas verticais foram utilizados para análise dos modelos gerados três planos horizontais de distribuição de parâmetros de RQD, resultantes do trabalho publicado por Patias (2010). Estes foram gerados em três diferentes cotas da área de Itaipu, e a partir destes serão analisados os planos horizontais extraídos dos modelos 3D de RQD simulados a partir do programa GRASS-SIG para as cotas 20, 40 e 125m.

O perfil horizontal de cota 20m localiza-se na área da barragem onde são encontradas a barragem principal, canal de desvio, barragem de ligação esquerda e parte da barragem lateral direita, próximo a esta cota ocorre o contato litológico entre materiais dos derrames A e B.

O perfil horizontal de cota 40m localiza-se na área da barragem onde ainda se encontram a barragem principal, barragem de ligação esquerda, canal de desvio, e parte da barragem lateral direita.

O perfil horizontal de cota 125m localiza-se na área da barragem, onde são localizadas estruturas construídas como a barragem principal, canal de desvio, barragem de ligação esquerda, e a barragem lateral direita, próximo a cota de 125m ocorre a descontinuidade D encontrada no basalto denso do derrame D.

#### 6.1.4 Banco de dados

O banco de dados utilizado como base para a construção dos modelos tridimensionais de RQD era composto por dados das sondagens rotativas, e se encontrava em formato estruturado de planilhas de Excell.

Para a utilização destas informações foi necessária a reestruturação deste banco de dados para transformá-lo em arquivo de formato ASCII de extensão \*.txt, compatível com a entrada de dados no programa GRASS-SIG.

#### 6.1.5 Avaliação da distribuição dos dados de entrada

Para a obtenção dos parâmetros fundamentais de calibração do interpolador 3D e estimativa das porcentagens de entrada, houve a necessidade de realizar análises estatísticas dos dados de entrada, com o intuito de obter valores da variação média da profundidade das manobras, para a calibração do parâmetro **res3** no GRASS, além de quantificar a proporção dos parâmetros de RQD segundo a classificação de Deere (1967).

Esta análise foi realizada a partir de tratamento estatístico básico, onde foram obtidos valores de média, desvio padrão, mediana e histogramas de freqüência dos dados. Os histogramas de freqüência foram obtidos a partir dos valores de variações de profundidades dos trechos de manobras de sondagem para cada área em que seriam interpolados modelos 3D, e da freqüência dos intervalos de RQD.

A análise estatística das profundidades médias das manobras na área de trabalho apresentou média com valores de distância vertical igual a 2,5 m, desvio padrão de 0,80 m e freqüência entre 2,8 e 3 m (Figura 47). A distribuição estatística indica uma grande concentração de valores de 2,8 a 3 m de distância vertical entre os trechos de sondagens na área da barragem principal.

Considerando que a mediana dos valores de distância vertical é 3 m, o desvio padrão 0,80 m e a grande concentração de valores de distância vertical estar entre 2,8 a 3m, foi assumido inicialmente que o valor para o **res3** deveria ser igual a 3 m para a calibração do modelo 3D no programa GRASS-SIG.

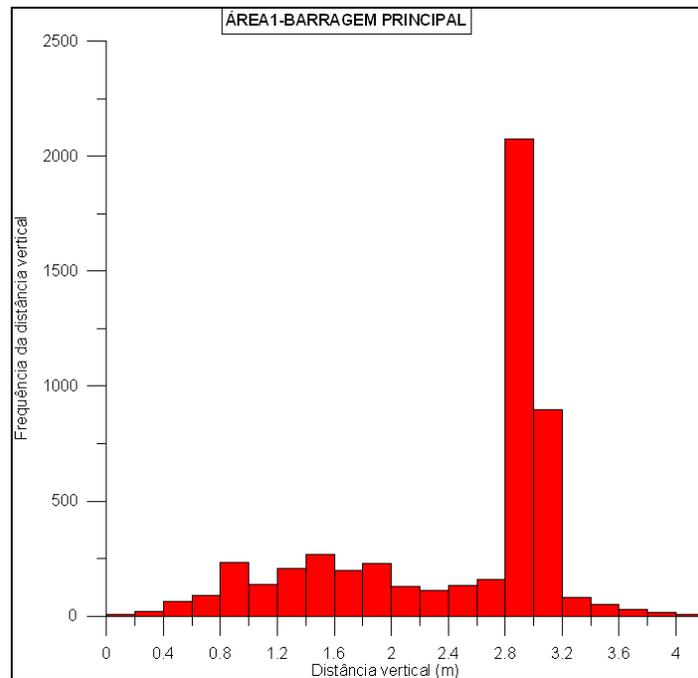


Figura 47-Histograma da distribuição de valores de distância vertical entre trechos de manobra das sondagem rotativa da área de trabalho.

A análise estatística para os parâmetros de RQD foi realizada com a finalidade de obter uma possível validação dos modelos tridimensionais de RQD a partir dos dados de entrada deste atributo, comparando as porcentagens de valores destes dados com as porcentagens das células 3D geradas para cada intervalo do parâmetro após a interpolação volumétrica dos modelos simulados.

A análise estatística dos dados de entrada do parâmetro RQD demonstrou média de aproximadamente 79,3 de RQD, além de desvio padrão de aproximadamente 22,5. O histograma de frequência (Figura 50) indicou a distribuição de frequência com assimetria negativa, aproximadamente 4% dos dados se encontram no intervalo de 0 a 25% de RQD, 6% em 25 a 50%, 17% em 50 a 75%, 30% em 75 a 90% e 43% em 90 a 100%. Estes valores se distribuem no histograma apresentado na Figura 48. Observa-se que as porcentagens predominantes de valores de RQD encontradas na simulação 3D convergem para a média  $\pm$  o desvio padrão.

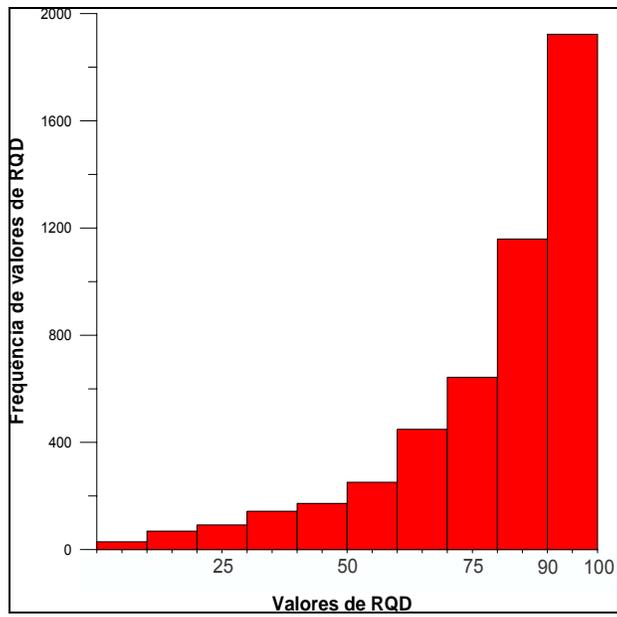


Figura 48-Histogramas dos dados de entrada de RQD na área.

## 6.2 Calibração dos parâmetros para interpolação 3D

Para a calibração da interpolação tridimensional foi necessário a definição de parâmetros que controlam a resolução espacial dos voxels definidos no capítulo materiais e métodos, como `tbres`, `res3`, `tension`, `smooth`, `segmax`, `npmin`, T (topo) e B (base).

Para a definição dos parâmetros de interpolação utilizou-se os resultados estatísticos dos valores de entrada para a área de interpolação 3D como base para a avaliação da acurácia dos modelos 3D que foram interpolados como testes.

### 6.2.1 Determinação dos parâmetros T (topo) e B (base)

Os primeiros parâmetros a serem definidos para o início das simulações foram o T (topo) e o B (base). O parâmetro T foi definido a partir da cota mais alta das sondagens rotativas, que se encontrava ao longo de toda a área com um valor de 200m.

O parâmetro B apresentou uma complexidade maior associada a sua obtenção do que o parâmetro T. Para a definição do mesmo, foram realizados diversos testes a partir de simulações computacionais com calibrações diferentes a fim de obter um modelo 3D com resultado que representasse a realidade mais próxima do terreno em relação a estatística dos dados de entrada.

No primeiro teste a simulação do Modelo RQD 1- Área 1 utilizou os parâmetros npmin, segmax, dmin, smooth, tension com valores iguais ao DEFAULT do programa, como determina o manual (<http://grass.fbk.eu/grass64/manuals>, consultado em março de 2011), com os seguintes valores: npmin=200, segmax=50, dmin=0.5, smooth=0.1, tension=40. Para o parâmetro B foi admitido o valor da cota mais profunda dentre o conjunto de sondagens utilizado na interpolação, sendo o valor de cota -187m.

Assim, o volume total do bloco 3D seria de 0,43 km<sup>3</sup> e área de 1,12 km<sup>2</sup>, com um total de 209664 voxels, onde aproximadamente 0,012% de RQD apresentou valores nos intervalos 0-25%; 0,36% apresentou valores nos intervalos de 25-50%; 26,5% apresentou valores nos intervalos de 50-75%; 70,83% apresentou valores nos intervalos de 75-90%; e finalmente 2,29% de RQF apresentou valores nos intervalos de 90 a 100%.

Foi observado no resultado desta simulação que o modelo gerado tem uma representatividade do intervalo de RQD com intervalo de 90 a 100%, pequena ao compará-lo com a porcentagem dos dados de entrada, que é de 43%. Porém, se comparados com o total de voxels gerado para o volume simulado, todos os dados de entrada representam cerca de 2,4% dos pontos de dados encontrados no modelo 3D interpolado, e isso pode influenciar na geração da malha tridimensional a ser gerada, que gera uma proporção de 0,024 pontos de dados de entrada por célula tridimensional gerada.

Analisando estatisticamente o volume total das células geradas na interpolação do modelo, foi encontrada uma média dos voxels com valores em torno de 77% de RQD, com desvio padrão de aproximadamente 8% de RQD, o que levaria o modelo apresentar valores no intervalo de 69 e 85%. Então, tais valores poderiam estar distribuídos nos intervalos de RQD de 75-90% e 50-

75% de RQD, que representam, respectivamente, as maiores proporções na simulação.

Observou-se que as células tridimensionais geradas dentro o intervalo de 0-25% de RQD se encontram distribuídas a SE, onde se localizavam apenas alguns pontos de dados de entrada com valores neste intervalo (Figura 49). O mesmo ocorre com os demais intervalos de RQD, com exceção ao intervalo de 75 a 90% de RQD, sendo que as células geradas entre o intervalo de 90 a 100% se limitaram a porção SE a profundidades intermediárias a altas do modelo.

A possível justificativa para tal situação é dada pela análise estatística dos valores gerados por interpolação, onde se observou que estes apresentam cerca 54% dos seus valores acima 82,5% de RQD, e complementarmente foi constatado que os dados de entrada do intervalo de 90 a 100% se apresentam com cerca de 58% entre o intervalo de 90 a 95%.

Se admitirmos que mais da metade dos valores de entrada do intervalo de 90 a 100% são de valores inferiores a 95% de RQD e que mais da metade dos voxels gerados para o intervalo de 75 a 90% se encontram acima de 82% de RQD, podemos concluir que a interpolação não é ineficaz, pois cerca de 38% do volume do modelo tridimensional gerado equivale a valores superiores a um RQD de 82%. Estes 38% do volume total somados aos 2,29% do volume proveniente do intervalo de 90 a 100%, temos 40,29% do volume total se encontra com valores acima de RQD 82%.

Assim, comparando as porcentagens de dados de entrada do intervalo de 90-100% de RQD e as porcentagens de RQD geradas na simulação com valores acima de 82% de RQD, podemos concluir que a interpolação utiliza os valores de intervalo de RQD de qualidade excelente para a geração de valores de RQD de intervalo de qualidade boa, 75 a 90% de RQD. O modelo de interpolação é global, portanto, utilizam os dados reduzindo estes a média dos valores entre 70 a 80%, ressaltando que em locais onde não apresentam informações influenciam no produto final da interpolação, pois o programa interpola todo o bloco volumétrico retangular, com volume definido pelos limites de coordenadas geográficas e os parâmetros B (base) e T (topo).

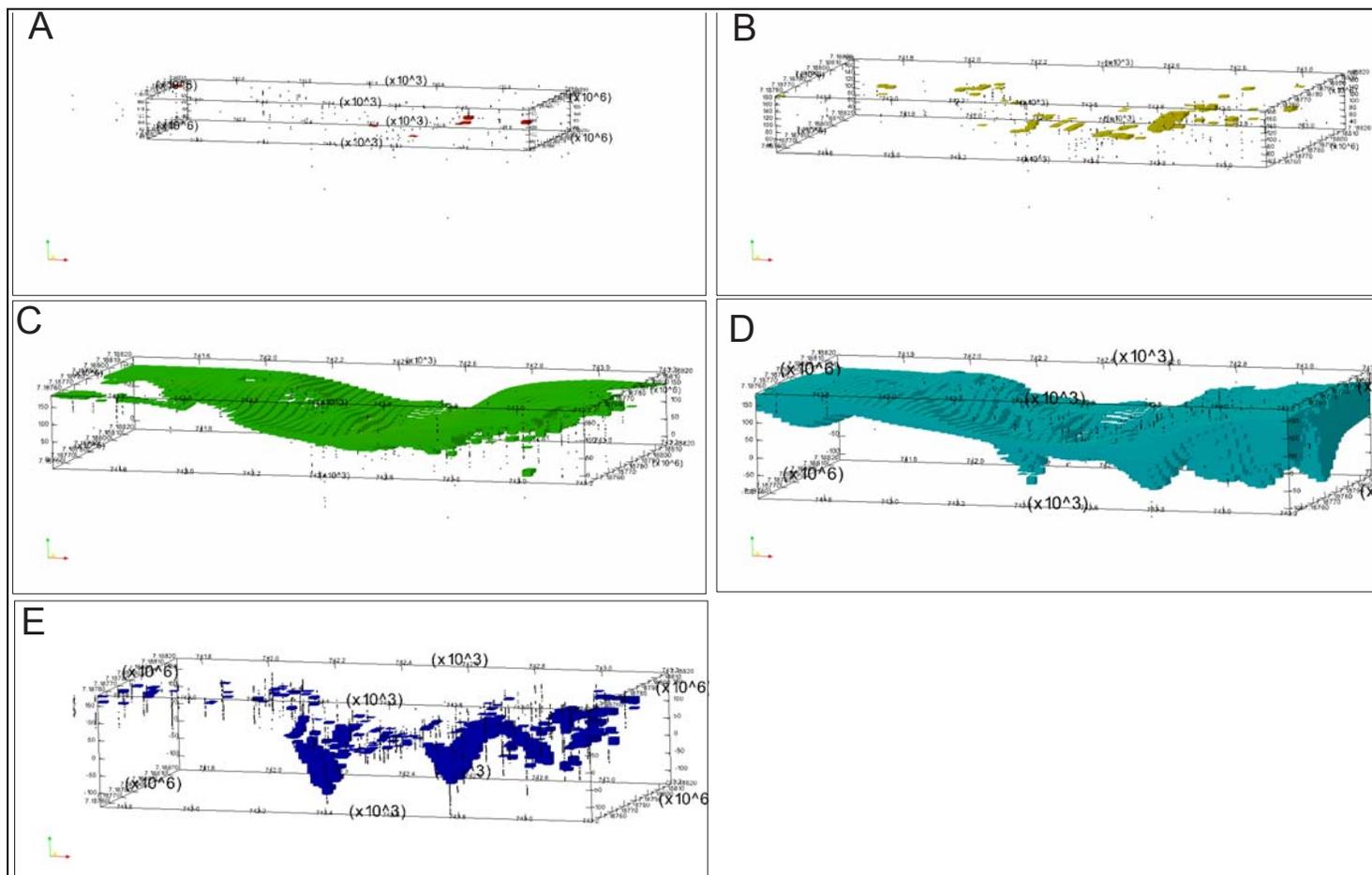


Figura 49-Representação dos volumes dos intervalos de RQD do modelo RQD 1- Área 1 e os pontos de dados de entrada para cada intervalo de RQD-(A) 0-25%;(B) 25-50%;(C) 50-75%;(D) 75-90%;(E) 90-100%.



O segundo teste foi realizado (RQD 2- Área 1) com os parâmetros: npmin=200, segmax=50, dmin=0.5, smooth=0.1, tension=40. E o parâmetro B foi de -50m, pois foi verificado que como o limite máximo de cota de sondagem no teste RQD 1- Área 1 era de -187m não havia distribuição uniforme das cotas mínimas, pois na porção oeste da área os dados de sondagens encontravam-se a superfícies inferiores a -187m. Tal fato gerou um volume dentro do bloco 3D com grande falta de dados para a interpolação em profundidades mais rasas, conseqüentemente o modelo gerado não representaria com qualidade a realidade da distribuição de RQD no terreno.

Antes da simulação do segundo modelo teste foi verificado que os dados entre as cotas de -50 e -187m representam apenas 3,7% dos dados de entrada, porcentagem muito pequena em relação ao volume interpolado. A análise para obtenção deste parâmetro não contou apenas com a definição da porcentagem de dados que seriam excluídos da interpolação (3,7% dos dados de entrada) e sim da porcentagem de cada uma das classes de atributos que seriam excluídos após a diminuição da espessura do bloco (Tabela 19), analisando a porcentagem dos intervalos de RQD de todo o banco de dados, que seriam excluídos da interpolação.

Tabela 19- Relação entre as porcentagens de dados excluídos e dos totais do banco de dados, segundo os intervalos de RQD.

Intervalo de RQD (%)	Porcentagem do banco de dados completo (%)	Porcentagem de dados excluídos (%)
0-25	4.82	0.04
25-50	5.95	0.10
50-75	17.49	0.32
75-90	24.86	0.71
90-100	46.88	2.81

Assim, definiu-se que o parâmetro **B** seria a cota -50m para o teste **RQD 2- Área 1**. A análise estatística dos 148736 *voxels* gerados para esta simulação apresentou a seguintes porcentagens de dados por intervalos: 0,012% para RQD de 0 a 25%, 0,44% para RQD de 25 a 50%, 38,9% para RQD de 50 a 75%, 59,3% para RQD de 75 a 90% e 1,32% para RQD de 75 a 90%, verificando assim, que a interpolação teve representatividade maior do intervalo

de RQD de 75 a 90% em seu modelo 3D, e houve uma diminuição proporcional de metade do volume de RQD 90 a 100% no teste **RQD 2- Área 1**.

Esta análise pode indicar que os pontos de dados de 90 a 100% de RQD utilizados na interpolação se localizavam a cotas mais profundas a oeste da malha de sondagens, quando a profundidade do modelo foi diminuída de -187 para -50m, estes dados foram excluídos, assim, havendo uma mudança no total de voxels para este intervalo, aumentando a influência de dados de entrada com valores de RQD inferiores, como intervalo de RQD entre 50-75% (Figura 50).

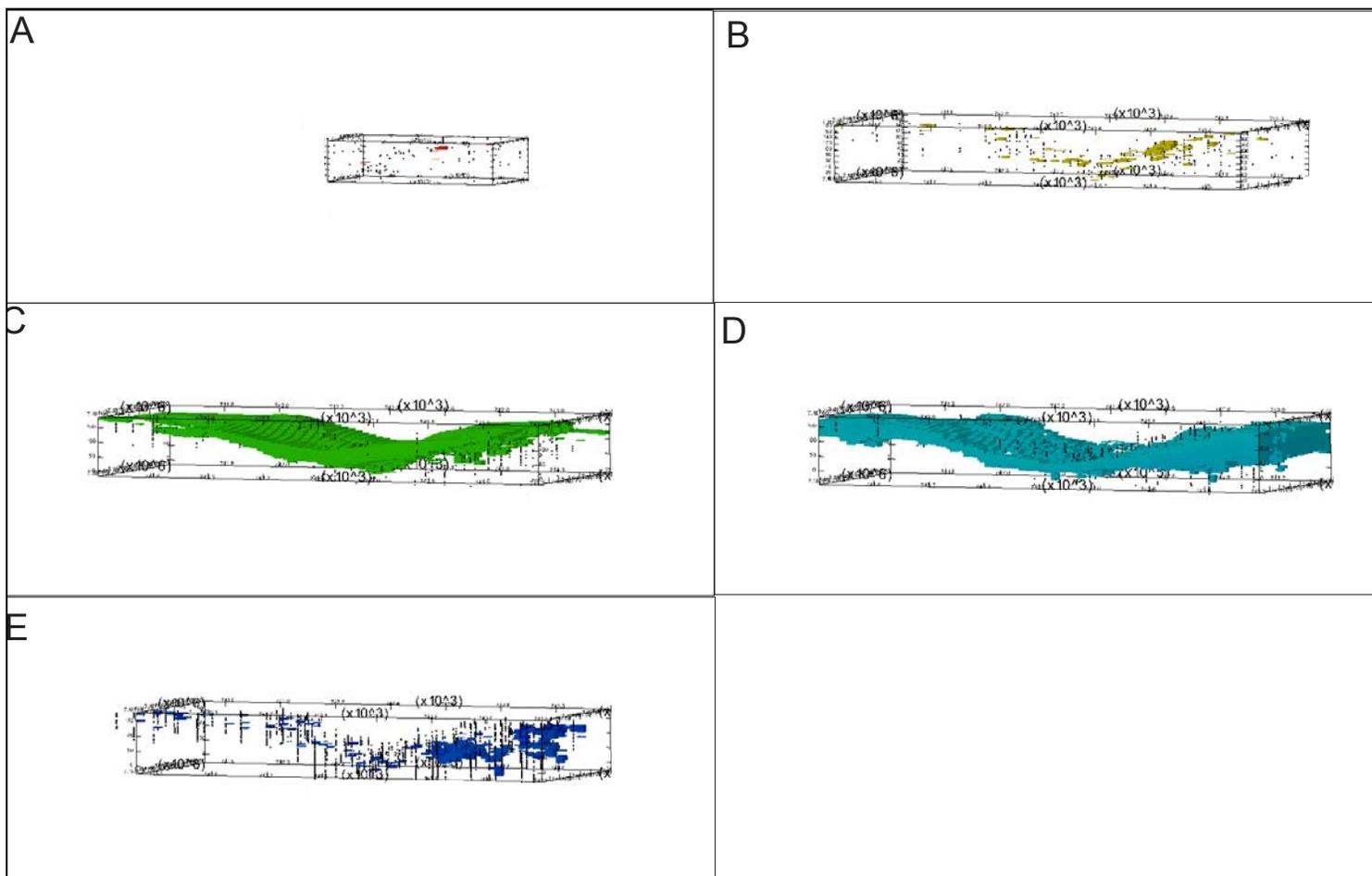


Figura 50- Representação dos volumes dos intervalos de RQD do modelo RQD 2- Área 1 e os pontos de dados de entrada para cada intervalo de RQD-(A) 0-25%;(B) 25-50%;(C) 50-75%;(D) 75-90%;(E) 90-100%.



### 6.2.2 Determinação dos parâmetros tensão, smooth, npmin, tbres e res3

Os parâmetros tensão, smooth, npmin, tbres e res3 foram avaliados em diversos testes com valores de parâmetros com valores variáveis segundo a Tabela 20 para a verificação da calibração adequada destes parâmetros para a interpolação do modelo 3D a ser analisado.

Tabela 20- Variação dos parâmetros de calibração para 12 simulações 3D de RQD para a calibração final do modelo.

Parâmetros de calibração			
	npmin	tensão	smooth
Valores	51	40	0,1
	100	40	0,1
	200	40	0,1
	51	20	0,1
	100	20	0,1
	200	20	0,1
	51	40	0,01
	100	40	0,01
	200	40	0,01
	51	20	0,01
	100	20	0,01
	200	20	0,01

#### 6.2.2.1 Parâmetro *smooth*

Analisando o comportamento do parâmetro suavização (*smooth*), a partir do gráfico de dispersão da variação do parâmetro *smooth* versus a porcentagem de cada intervalo de RQD (Figura 51), observou-se que os volumes dos intervalos 0-25%, 25 -50% e 90-100%, que, em geral, nas simulações apresentam proporções inferiores, com *smooth* igual a 0,1(Figura 51A) tem suas porcentagens reduzidas se comparadas com a distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD para os modelos gerados com *smooth* 0,01 (Figura 51B) .

Ambos gráficos da Figura 51 verifica-se que os modelos com parâmetro igual a 0,1 os valores do intervalo de 75 a 90% são elevados a mais de 65% quando simulado conjuntamente com o parâmetro de tensão igual a 40, assim como o intervalo de 50 a 75%, que se apresentou proporção entre 30 a 50%, os demais intervalos de RQD não apresentaram porcentagens superiores a 5% (Figura 51A).

O gráfico da distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD simulados com *smooth* igual 0,01 (Figura 51B), quando gerados a tensão igual a 40, tem a proporção de intervalo de RQD de 75 a 90% decrescida, em torno de 50%, intervalo de RQD de 50 a 75% com proporções variando entre 30 a 40%, e os demais intervalos de RQD (0-25%, 25-50% e 90-100%) foram decrescidos chegando próximo a uma proporção de 10%.

É importante analisar que este parâmetro nas simulações conjuntas com a tensão igual a 20, há o aumento dos intervalos de menores proporções (0-25%, 25-50% e 90-100%), onde estes começam a apresentar volumes com distribuição mais próxima da estatística dos dados de entrada.

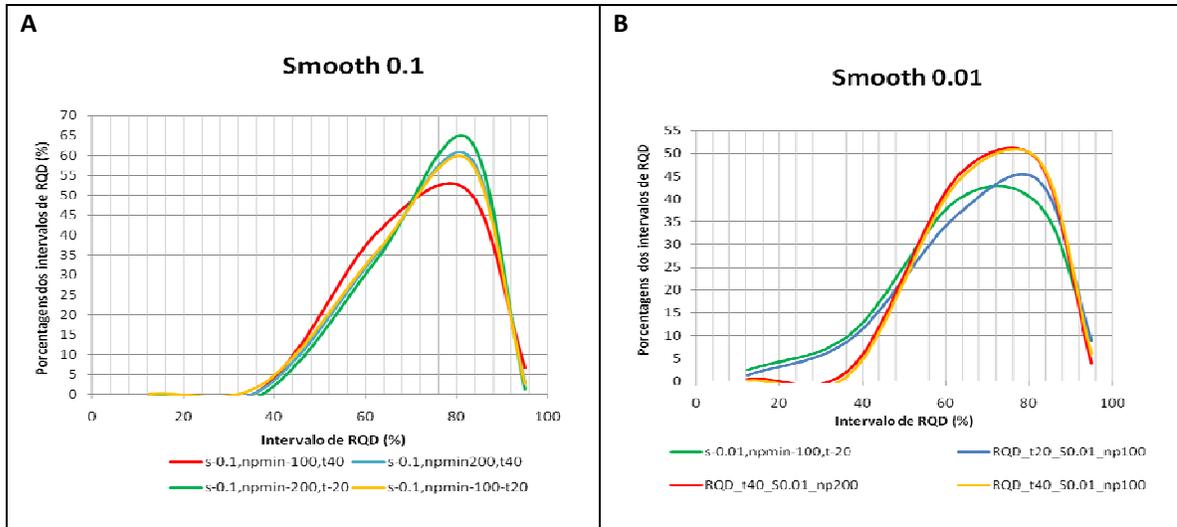


Figura 51- (A) distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD simulados com *smooth* igual 0,1; (B) distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD simulados com *smooth* igual 0,01.

### 6.2.2.2 Parâmetro tensão

Analisando separadamente os resultados para os parâmetros de tensão iguais a 20 e 40, a partir da distribuição de porcentagens dos intervalos de RQD os resultados com **smooth** 0,1 apresentam intervalo de RQD 75 a 90% com porcentagens mais elevadas, em torno de 45 a 60% para tensão igual a 20 (Figura 52A) e cerca de 50 a 65% para a tensão igual a 40 (Figura 52B).

Nos resultados para tensões 20 e 40 e **smooth** igual a 0,01 as porcentagens do intervalo de 75 a 90% de RQD são reduzidas para 40 a 45% quando se utiliza a tensão igual a 20 (Figura 52A) e em torno de 50 a 55% quando é analisada a tensão igual a 40 (Figura 52B).

Com parâmetros de **smooth** igual a 0,01 e tensão 20, os valores das porcentagens dos intervalos de RQD de volumes inferiores (0-25%, 25-50% e 90-100%) se encontram a proporções mais elevadas, podendo chegar a próximo a 10% do volume total dos dos modelos (Figura 52B).

Assim, com o intuito de obter uma boa representatividade nos modelos 3D, comparando-os com a análise estatística dos dados de entrada, foi considerado que o melhor valor a ser utilizado para o parâmetro **smooth** é 0,01 e **tensão** deve ser igual a 20.

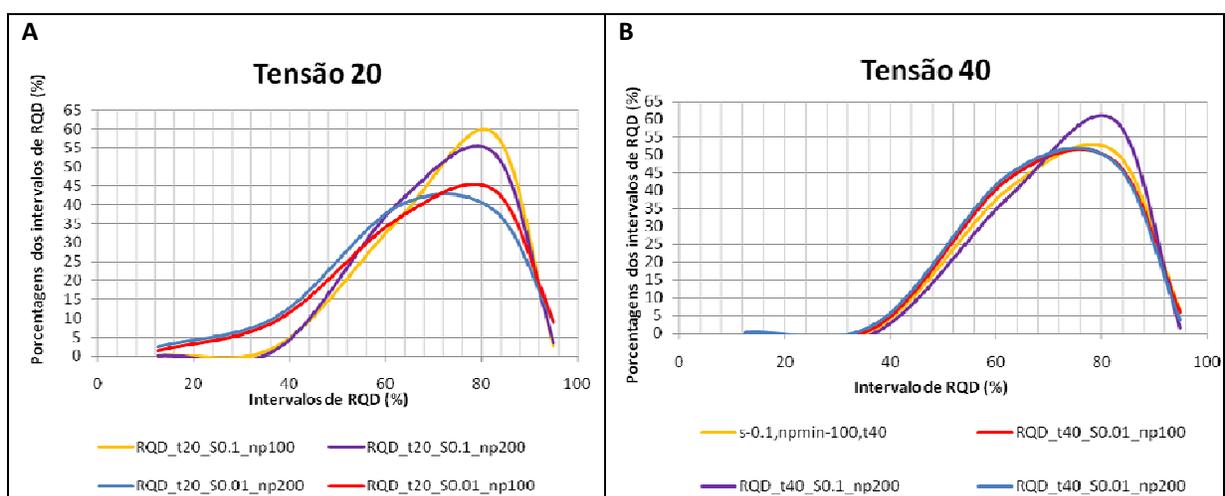


Figura 52- (A) distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD simulados com tensão igual 20; (B) distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD simulados com tensão igual 40.

### 6.2.2.3 Parâmetro *tbres*

Para a obtenção do parâmetro *tbres* considerou diversas simulações distintas, com valores de *tbres* iguais a 2.5, 3, 5 e 10m, a fim de observar o comportamento das distribuições dos valores de RQD para diferentes valores.

As simulações foram realizadas utilizando valores de cota entre 200 e -50m. Além do *tbres* variou-se também o parâmetro *npmin* conjuntamente nestas simulações (Figuras 53, 54 e 55).

Tais demonstraram que os parâmetros com valores de 5 e 10m apresentam curvas bastante próximas com todos os *npmins* testados e tem comportamento diferentes para as curvas de 2.5 e 3m, as quais são encontradas nas curvas picos máximos de 45% dos voxels entre os intervalo de RQD 60 a 80% e em contrapartida, para os valores de 10 e 5m estes picos se elevam para valores superiores a 45 % dos voxels entre os intervalos de 75 a 90%.

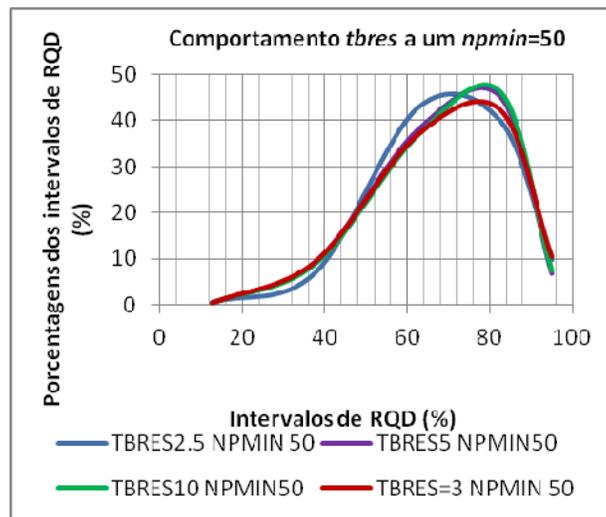


Figura 53-Distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD (%) para os modelos 3D simulados com *tbres* iguais a 2.5, 3, 5, 10m e *npmin* igual a 50.

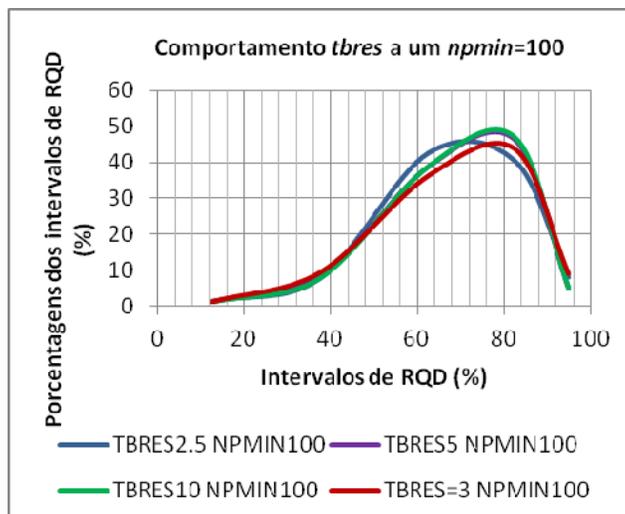


Figura 54-Distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD (%) para os modelos 3D simulados com *tbres* iguais a 2,5, 3, 5, 10m e *npmin* igual a 100.

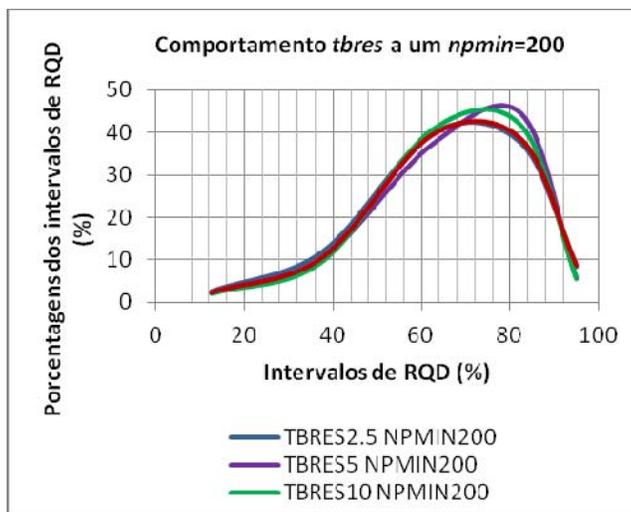


Figura 55-Distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD (%) para os modelos 3D simulados com *tbres* iguais a 2,5, 3, 5, 10m e *npmin* igual a 200.

Dentre as diversas simulações foi observado que a distribuição de RQD mais próxima dos dados de entrada para os valores de *tbres* 2,5 e 3m. E segundo a análise estatística dos pontos de distância entre as manobras de sondagens rotativas no item **6.1.5**, o valor assumido ao *tbres* foi de 3m, equivalente à mediana dos dados de entrada e equivalente ao tamanho das

manobras de sondagens rotativas. Então, para a simulação dos modelos será assumido valor de **tbres** igual a 3m.

#### 6.2.2.4 Parâmetro **res3**, **npmim** e **segmax**

Para a definição do parâmetro **res3** foram testadas diversas condições com valores variando entre 25 a 50m, conjuntamente com variações do parâmetro de **npmim** a valores de 50, 100 e 200 e parâmetros **tbres** variando de 3 para 10. Os modelos de **res3** igual a 25 foram simulados para **tbres** de 3 e 10m e os de **res3** igual a 50m foram simulados com **tbres** de 10m, ambos com **npmim** variável em cada simulação (Figura 56, 57 e 58).

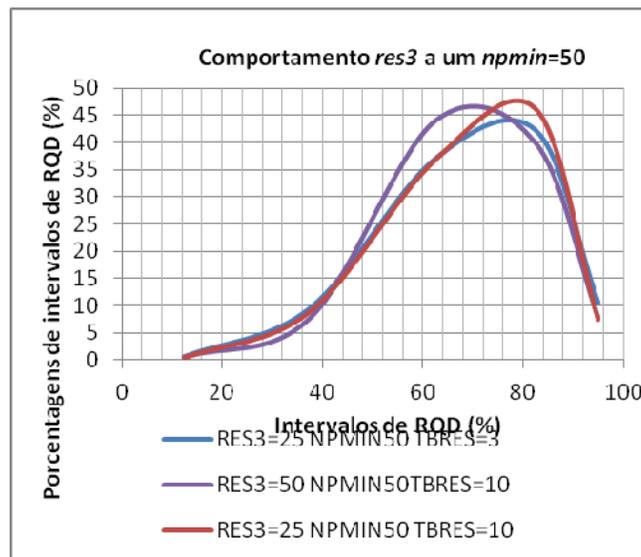


Figura 56-Distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD (%) para os modelos 3D simulados com **res3** variando de 25 e 50m e **npmim** de 50.

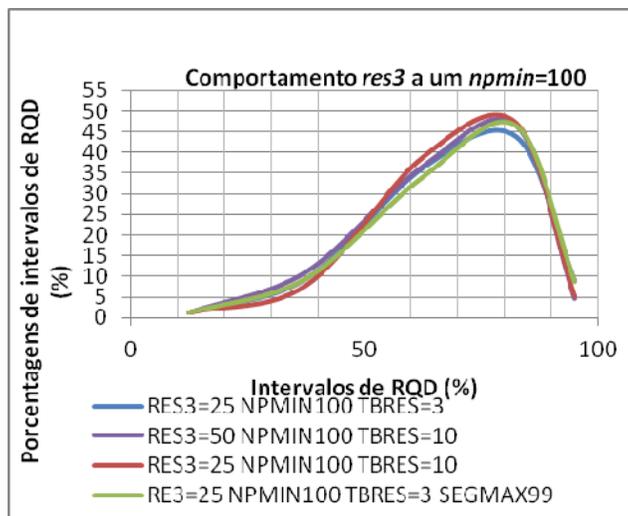


Figura 57-Distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD (%) para os modelos 3D simulados com *res3* variando de 25 e 50m e *npmin* de 100.

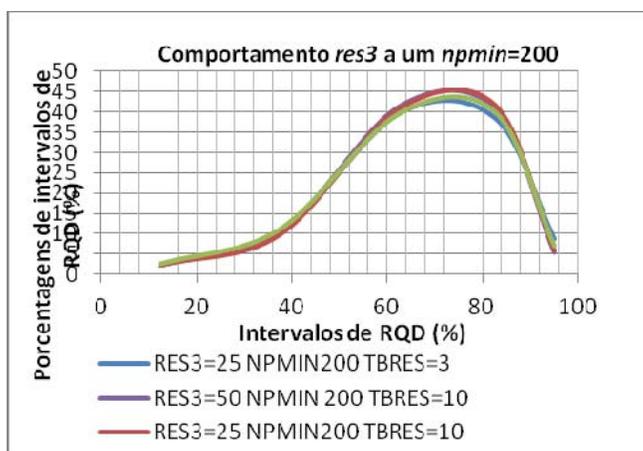


Figura 58-Distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD (%) para os modelos 3D simulados com *res3* variando de 25 e 50m e *npmin* de 200.

Dentre os gráficos de distribuição de porcentagens de intervalos de RQD para a avaliação do *res3* simulação que mais se aproximou das análises estatísticas dos dados de entrada foi o **res3** igual a 25m interpolado conjuntamente com **tbres** igual a 3, **npmin** igual 200 e **segmax** igual a 199 (curva de coloração azul da Figura 58).

O parâmetro **res3** igual a 25m é compatível ao valor da metade das distâncias médias entre as sondagens rotativas realizadas na área da obra de

construção da barragem (ANEXO 1-Mapa de localização de sondagens e estruturas construídas)

Com o valor do parâmetro **res3** igual a 25m define-se que a área de cada voxel será de  $625\text{m}^2$  e seu volume de  $1875\text{m}^3$ , considerando o valor de 3m para o parâmetro **tbres**.

A distância mínima entre os pontos na interpolação **dmin** foi definida pela avaliação dos testes de interpolações dos dados na área, onde foi considerado o melhor valor o que não excluía pontos de entrada na simulação computacional, que foi de 0,01m.

Assim as configurações do modelo 3D de RQD a ser simulado teria a calibração final segundo a Tabela 21.

Tabela 21-Parâmetros de calibração para geração de modelo 3D de RQD segundo análise de testes prévios.

<b>T (topo)</b>	<b>B (base)</b>	<b>smooth</b>	<b>tensão</b>	<b>npmin</b>	<b>segmax</b>	<b>tbres</b>	<b>res3</b>	<b>dmin</b>
200m	-50m	0,01	20	200	199	3	25	0,01m

### **6.3 Análise de Estudo de Caso Geral- Simulação 3D de RQD para a área da Barragem Principal**

O modelo tridimensional de RQD simulado para a área da barragem principal de Itaipu representa um volume de  $2,8.10^8\text{m}^3$ , onde se apresentam distribuídos em intervalos de 0 a 100% de RQD 148736 voxels.

O número de dados pontuais de entrada para interpolação no GRASS foi de 4836, durante o processo de interpolação foram excluídos 100 pontos, devido ao conjunto de valores dos parâmetros de interpolação admitidos para tal processo, restando enfim 4736 pontos que foram realmente considerados na simulação 3D. Este número de pontos utilizados, quando analisado com o volume final de voxels gerados, apresenta uma relação de 0,31 dados por voxel.

Os pontos de dados de entrada para a interpolação tridimensional de RQD se encontram separados segundo os intervalos de RQD de 0-25%, 25-50%, 50-75%, 75-90% e 90 a 100% nas Figuras 59, 60 e 61.

Observando a Figura 59 é possível constatar que há ausência de sondagens rotativas a SW, centro-sul e parte de NE da área de interpolação. Na Figura 60 esta ausência é verificada na porção W (abaixo da cota 50m) e no centro (entre a cota 200 a 100m), área onde se localiza o canal de escavação do Rio Paraná.

Analisando a distribuição das sondagens rotativas no bloco 3D de interpolação (Figura 61), foi verificado que há uma concentração maior de sondagens na porção SE e central do bloco 3D (entre as cotas de 100 a -50m). A maioria destas sondagens se encontra distribuídas na mesma orientação da barragem principal de Itaipu (blocos de contraforte).

Em todas as representações de distribuição das sondagens rotativas é visível a predominância dos intervalos de 75 a 90% e 90 a 100% de RQD, principalmente nas porções mais profundas e a SE da área, onde há grande concentração do intervalo de 90 a 100%



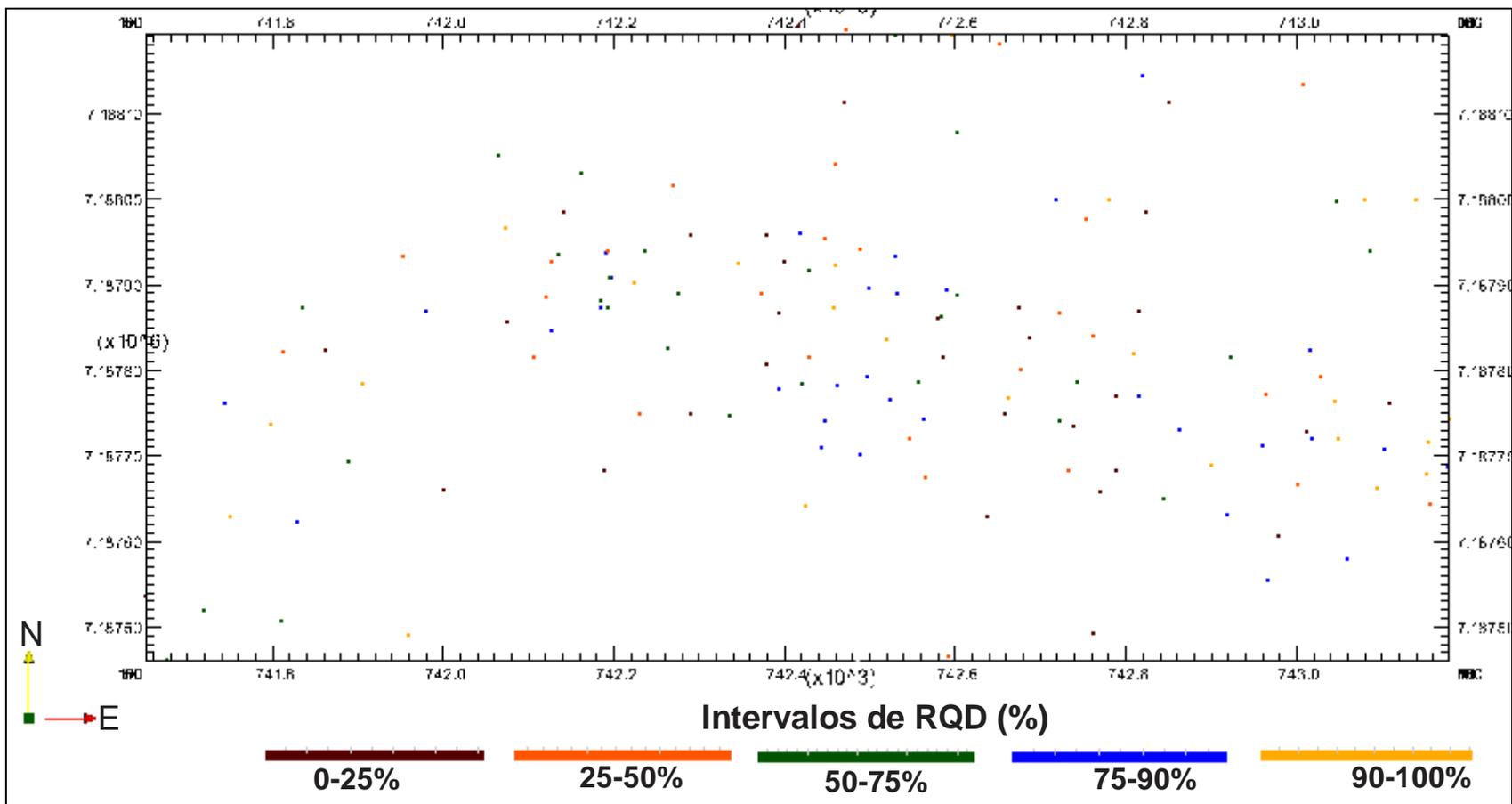


Figura 59-Vista em planta (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição dos pontos nas cotas mais altas das sondagens rotativas, separados por intervalos de RQD (%).



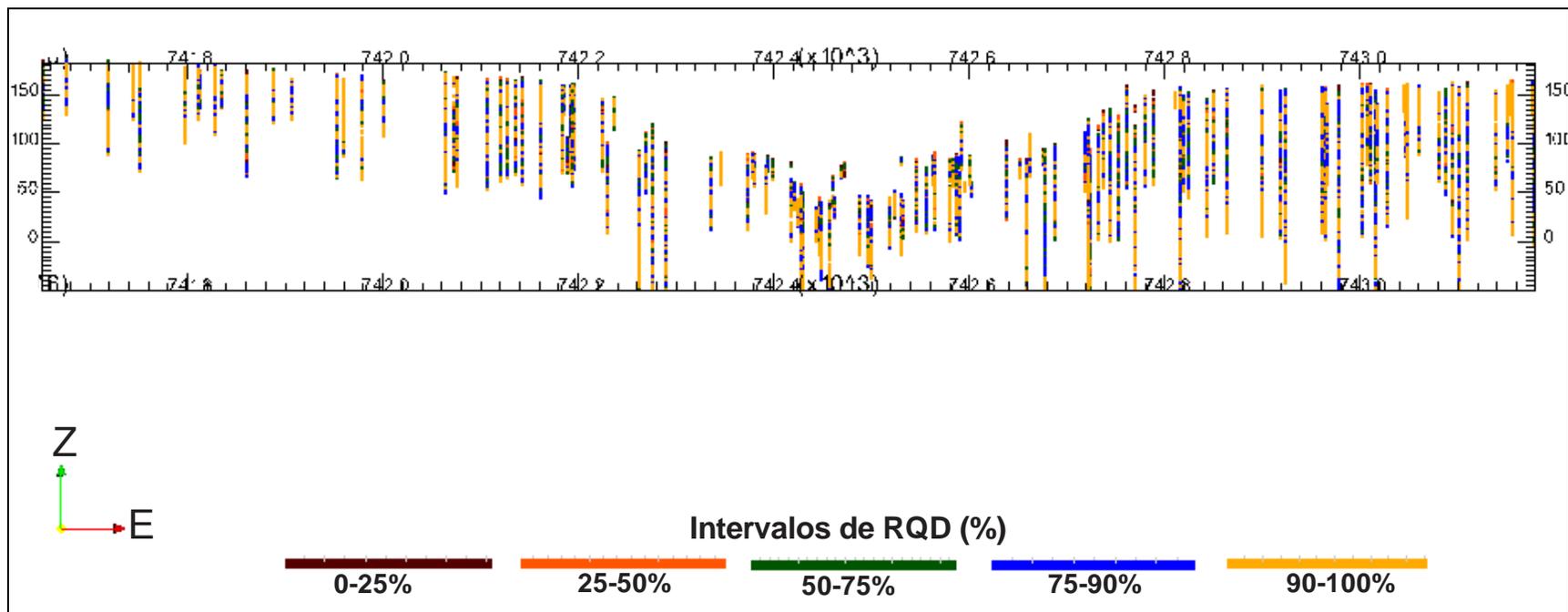


Figura 60-Vista frontal (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição dos pontos de entrada da área da jusante para montante, separados por intervalos de RQD (%).



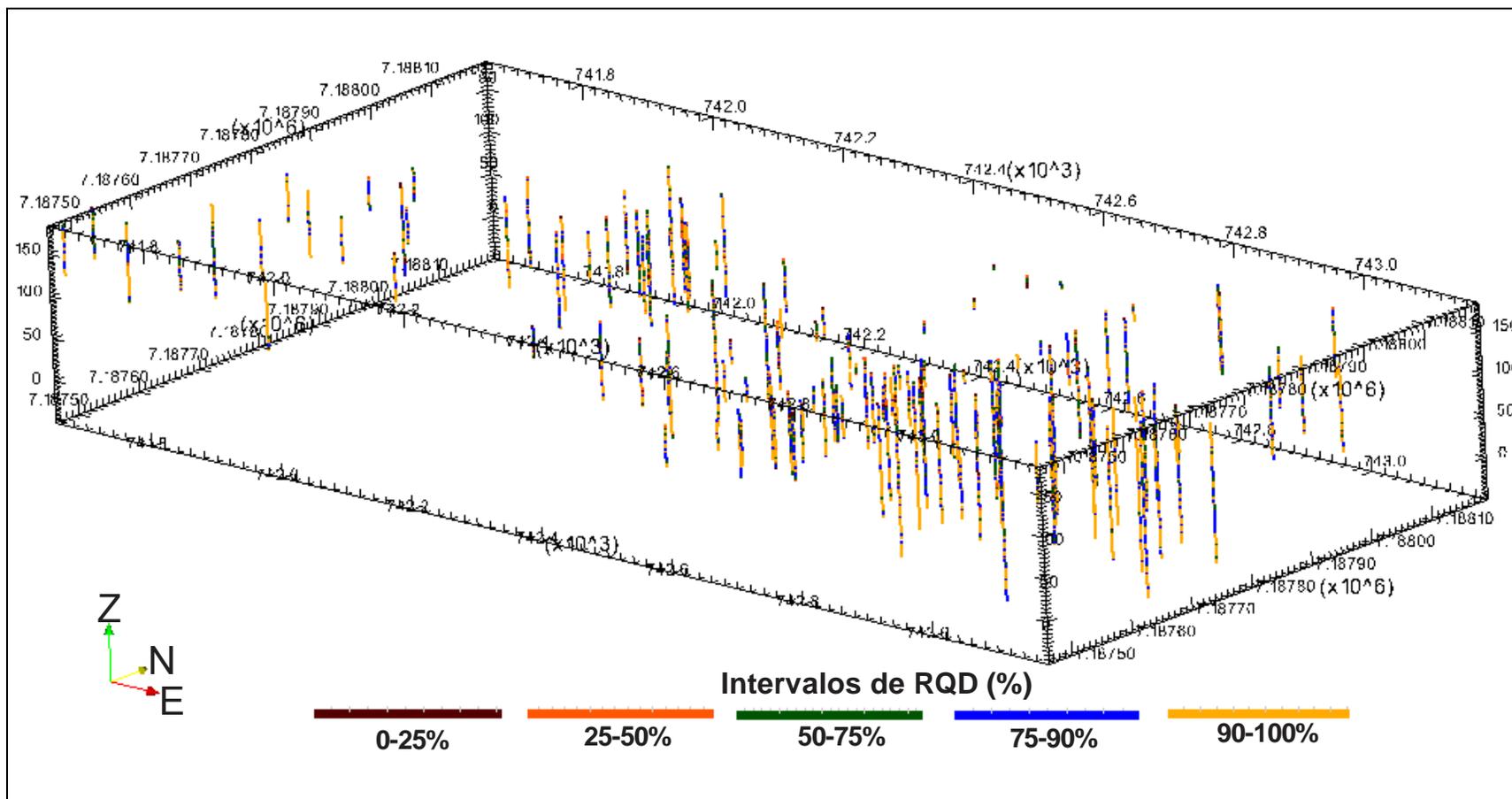


Figura 61-Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição dos pontos de entrada, separados por intervalos de RQD (%).



Utilizando a malha de sondagens distribuídas segundo as Figuras 59, 60 e 61, foi interpolado o modelo 3D dos parâmetros de RQD encontrados nestas sondagens, utilizando valores para os parâmetros de interpolação definidos no item **6.3**.

A distribuição em volume dos intervalos de RQD foi de 2,5% entre o intervalo de 0-25% de RQD, 11% de 25-50%, 39,5% de 50-75%, 40% de 75 a 90% e 7% de 90-100%.

Os valores resultantes de volumes para cada intervalo de RQD foram influenciados pelo método de interpolação e a distribuição da malha de sondagens na área, sendo que estas porcentagens se apresentam bastante distinto da estatística dos dados de entrada, que se resumia em: 4% dos dados entre o intervalo de 0-25% de RQD, 6% a 25-50%, 17,5% a 50-75%, 25% a 75-90% e 47,5% a 90-100%.

Com esta análise foi possível verificar que houve pequena influência dos pontos de entrada de 90-100% de RQD na interpolação, pois este gerou apenas 7% do volume total, sendo que originalmente seria o intervalo mais significativo dos dados de entrada. Os valores deste intervalo de RQD apesar de serem predominantes na amostragem se encontravam intercalados com valores menores próximo à superfície (Figura 60), além de terem sua predominância localizada nas proximidades de regiões onde havia a ausência de dados. Tais fatores podem ter levado a interpolação do modelo 3D a uma situação em que este intervalo fosse representado em menor proporção.

Analisando o bloco diagrama geral é possível constatar que os intervalos de 0-25% de RQD ocorrem próximo às porções superficiais do modelo, em geral, na cotas mais elevadas, apresentando uma relação direta com os materiais de intervalo 25-50%, sendo encontrado no núcleo de concentrações de RQD 25-50% (Figura 62).

Os volumes do intervalo de 25-50% de RQD interpolado neste modelo 3D se apresentam-se intercalados a valores de intervalos 0-25%, 50-75% e 75-90% na porção superficial do bloco 3D e ocorre com grande influência próximo a antiga calha do rio Paraná, em ambas as margens, se intercalando com materiais de RQD 0-25% e 50-75%.

Nas profundidades superficiais à intermediária do modelo ocorre a predominância do intervalo de RQD de 50-75%, que se intercala com materiais de 25-50%, nas porções mais superficiais e próximas da antiga calha do rio, além do intervalo de 75-90% que ocorrem na superfície em pequenas proporções a SW, SE e próximo a margem direita do rio.

O intervalo de RQD 75-90% ocorre predominantemente a profundidades intermediárias a basal do modelo 3D, se intercalando principalmente com materiais de intervalo de 90 a 100%, em geral, nas porções intermediárias a basal a SE e SW do bloco. Existem distribuições, mais escassas, deste material a profundidades superiores, onde eles se intercalam com materiais de RQD 50-75% a SW, próximo a margem direita do rio e a SE.

Finalmente, os volumes com RQD de 90-100% se distribuem a profundidades intermediárias a basal do modelo 3D, com predominância nas porções SE e SW. Entretanto, na margem direita próximo ao centro do modelo ocorre este intervalo pode ser representado, assim como a NE do bloco 3D.





### 6.3.1 RQD de 0-25%

Observando separadamente o intervalo de 0-25% no modelo 3D (Figura 63) verifica-se que ele se distribui principalmente nas porções SE, NW e próximo a calha do Rio Paraná, na sua margem esquerda, entre as cotas de 180 a 20m, sendo que os pontos de sondagens com valores neste intervalo que foram utilizados na interpolação 3D para geração destes valores se localizam nas porções a NW, entre as cotas de 200 a 160m, central, entre as cotas de 80 a 50m, SE e NE, entre as cotas de 160 a 120m.

Comparando-se com aspectos de morfologia de relevo, as áreas onde ocorrem estes materiais são mais susceptíveis a erosão, pois os materiais geológicos ficavam expostos a fatores como chuva, sol, e mesmo a dinâmica do rio que passava por estes materiais aumentando o grau de alteração das rochas.

Além disto, quando se analisa este modelo 3D com o a seção geológica do APÊNDICE 2- Seção geológica da barragem principal modificada, observa-se que nas profundidades mais baixas a SW e NE, estes materiais ocorrem logo abaixo do basalto vesiculare-amigdaloidal do derrame E, nas porções superficiais do basalto denso do derrame E, entre o basalto denso do derrame B, onde há uma forte influência de zonas de alto fraturamento, e as brechas vulcânicas do topo do derrame A, próximo a calha do rio, entre as cotas 80 e 20m, onde se localiza as descontinuidades A e B estudadas na área de Itaipu (APÊNDICE 2- Seção geológica da barragem principal modificada).

Tais considerações podem justificar a queda na qualidade destes materiais, apresentando um RQD de qualidade muito ruim, segundo Deere (1967), já que brechas vulcânicas e basalto vesicular-amigdaloidal possuem estrutura mais heterogênea que o basalto denso, onde estes tendem a se alterarem mais facilmente quando expostos a agentes intempéricos. Além das descontinuidades ocorrerem logo abaixo destas porções.



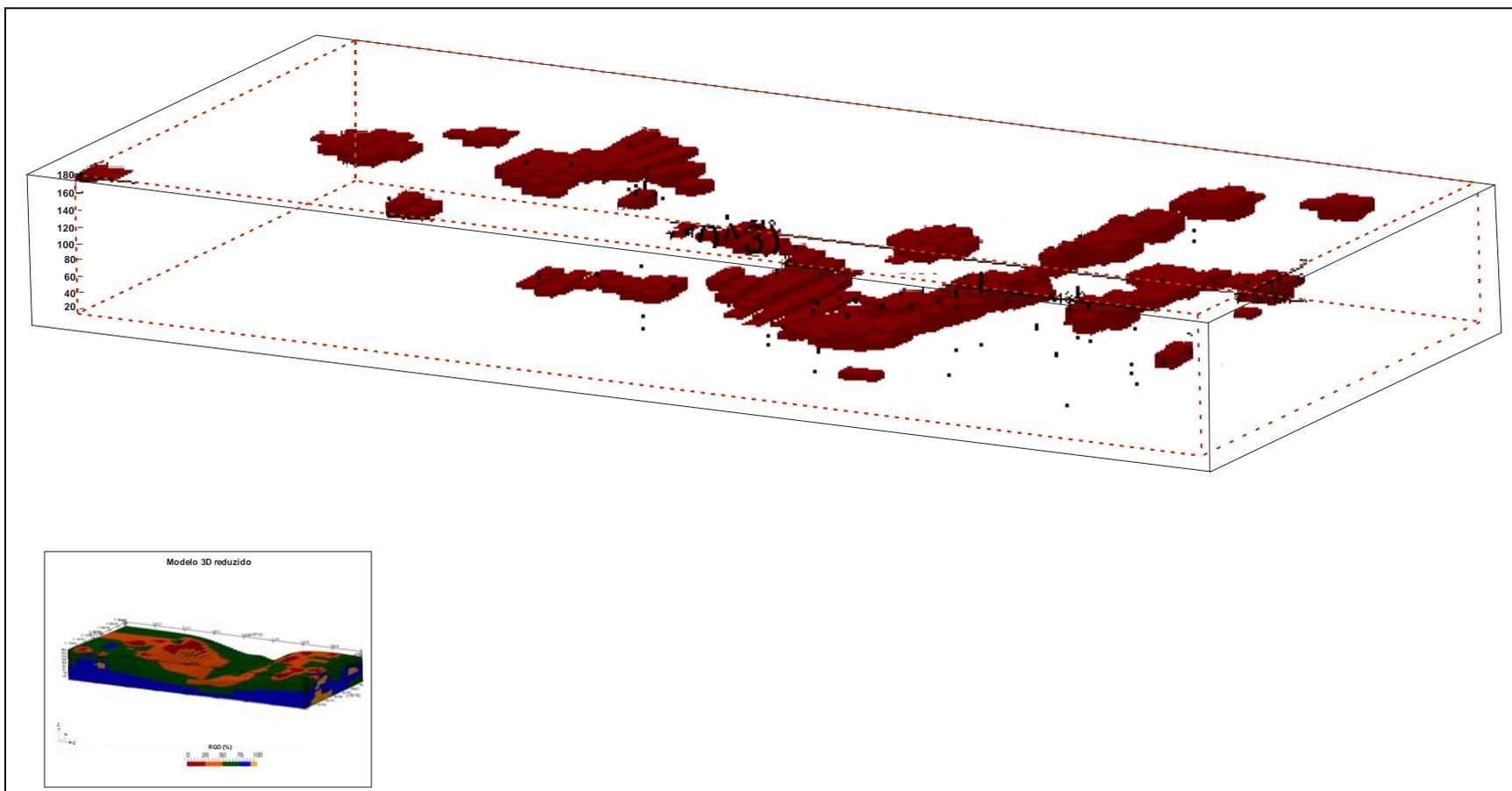


Figura 63-Vista em 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) da distribuição dos volumes de RQD para o intervalo de 0-25%.



### 6.3.2 RQD de 25-50%

O intervalo de RQD de 25 a 50% se distribui ao longo da porção superficial do modelo 3D, com exceção as porções NW e SW, onde este material ou se apresenta escasso ou nem é encontrado. Tal intervalo se concentra, principalmente, em ambas as margens do Rio Paraná, exatamente na calha por onde passava o rio, nas porções SE, NE e em direção a W do modelo. E o volume de materiais com esta característica geomecânica se encontra localizado entre as cotas de 180 a 0m.

Observando os pontos de sondagens rotativas, onde ocorre RQD com este intervalo, que são representados na Figura 61 como ponto de cor preta é possível constatar, que com exceção a porção SE do modelo onde estes pontos se apresentam intercalados a pontos de RQD com intervalos de 75-90% e 90-100% (Figura 64), a maioria das sondagens com valores neste intervalo foram interpoladas para voxels equivalentes.

Se comparamos o resultado do modelo 3D com a seção geológica do APÊNDICE 2- Seção geológica da barragem principal modificada, a porção a W do modelo estes materiais se distribuem entre as cotas de 200 a 140m, onde são encontrados materiais geológicos variando das brechas vulcânicas a base do derrame E, além destes são encontrados pequenas porções de materiais intercalados outros materiais de RQD de 90 a 100%, entre as cotas de 120 a 60m, onde são encontrados rochas do topo do derrame C até a parte intermediária do basalto denso do derrame B.

À porção E do modelo esta distribuição se encontra entre as cotas de 200 a 140m, onde é encontrado basalto denso do derrame E. Além destas porções, estes materiais se intercalam a outros entre as cotas de 40 a 0m, e podem estar relacionados às brechas vulcânicas e basalto vesicular-amigdaloidal do derrame A, além de ter sua gênese influenciada pela descontinuidade A.

Na porção central do modelo onde ocorre a antiga calha do Rio Paraná estes materiais ocorrem entre as cotas 100 a 20m, e podem estar associados a rochas do basalto denso da base do derrame até os basaltos vesicular

amigdaloidais do derrame A e localizados entre a zona de alto fraturamento, que ocorre entre as descontinuidades A e B.

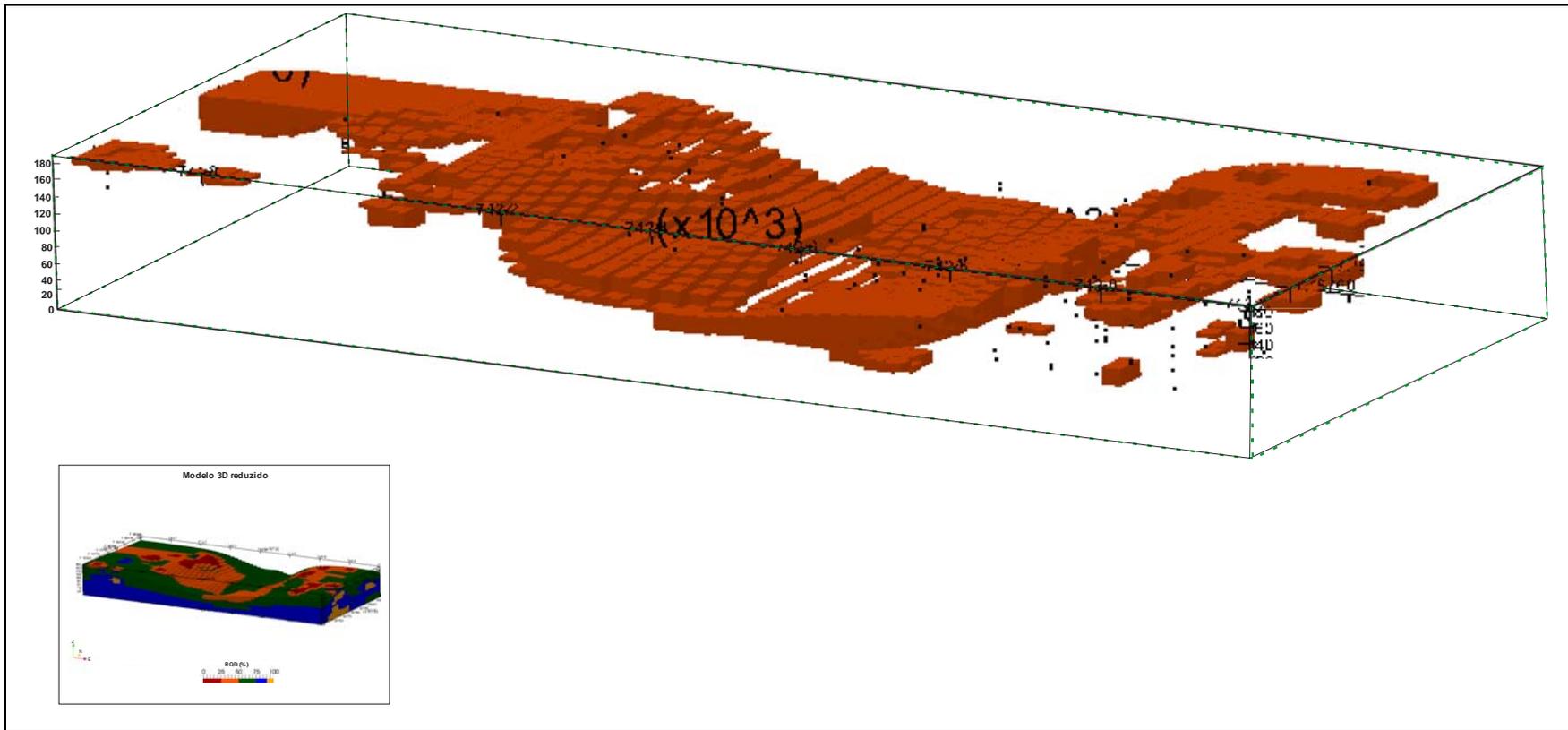


Figura 64- Vista em 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) da distribuição dos voxels de RQD para o intervalo de 25-50%.



### 6.3.3 RQD de 50-75%

O intervalo de RQD de 50-75% apresentou um volume muito superior na interpolação se comparado com os dados de entrada. Ele representa aproximadamente 40% do volume total do modelo, sendo que os dados de entrada desta categoria equivaliam a 17,5% dos dados de sondagens rotativas. Houve um aumento em volume deste intervalo considerável.

Tal situação pode ter sido influenciada pelas regiões onde havia ausência de dados, e os dados mais próximos, que podem ser de categoriais inferiores foram utilizados juntamente com esta zona como falta de dados, que pode ter sido considerada como atributo o valor zero, assim diminuindo a qualidade do RQD para o volume interpolado, então gerando um considerável aumento do volume neste intervalo.

Em comparação com a Figura 61, onde estão representadas as sondagens rotativas por intervalos de RQD, com o volume de RQD de 50-75% (Figura 65) é possível constatar, que a maioria dos pontos de sondagens, que consistiam neste intervalo foram utilizada na interpolação 3D, exceto nas porções mais superficiais onde estes se encontravam intercalados com dados de RQD de qualidade inferior e na porção SE, onde estes dados se intercalam com dados de RQD com intervalo de 90-100% e 75-90%.

A distribuição do volume deste intervalo se dá ao longo de toda a área do modelo 3D, entre as cotas de 180 a 20m, mas a maior proporção deste se localiza a porções de profundidades baixas a intermediárias, entre as cotas de 180 a 100m. E ao fazer uma análise comparativa da representação da Figura 65 com o APÊNDICE 2 (APÊNDICE 2- Seção geológica da barragem principal modificada), volumes com este intervalo de RQD se associam a materiais geológicos que se estendem desde o basalto vesicular-amigdaloidal do derrame E até a porção intermediária do basalto denso dos derrame C, podem ter associações com a descontinuidade D, que se localiza no basalto denso D e ocorre ao longo de toda a área do bloco 3D, além das zonas de alto fraturamento que ocorrem no basalto denso do derrame C.

Entretanto, parte do volume, localizados nas porções centra e sul do modelo, se encontram entre as cotas de 60 a 20m, e são correlacionáveis a

materiais geológicos desde o basalto denso do derrame B até as brechas vulcânicas do derrame A, além da presença da descontinuidade B e da zona de alto fraturamento, que ocorre próximo a calha do rio.

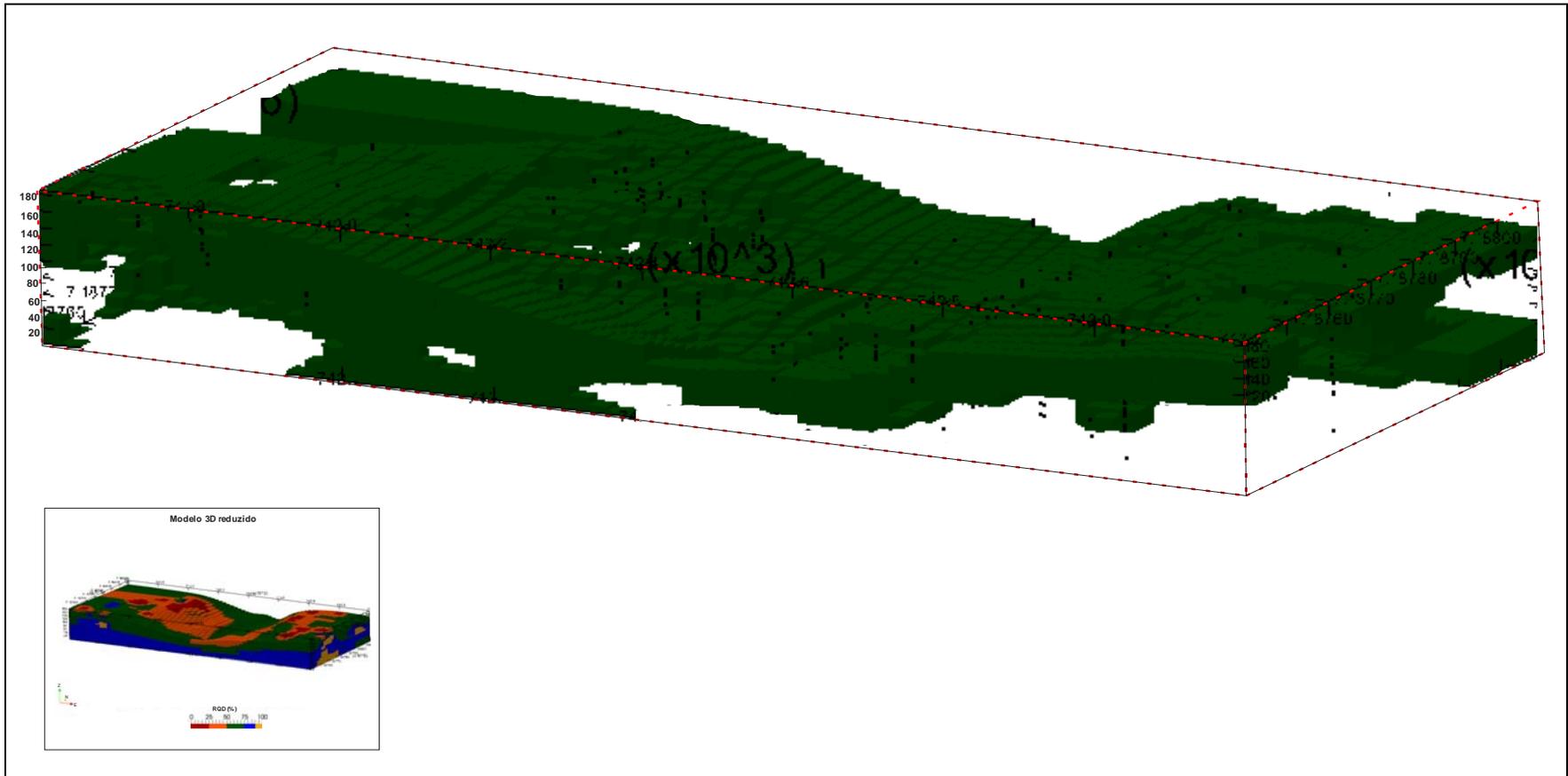


Figura 65-Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) da distribuição dos volumes de RQD para o intervalo de 50-75%.



#### **6.3.4 RQD de 75-90%**

O intervalo de 75 a 90% é o que apresenta volume mais proeminente do modelo 3D, cerca de 40% do volume total foi interpolado para esta categoria de RQD. Entretanto, se analisar as sondagens rotativas com dados de RQD para este intervalo (Figura 61) e compararmos com o modelo gerado com apenas a distribuição deste intervalo (Figura 65), é possível verificar que as sondagens em profundidades menores não foram utilizadas na interpolação do modelo para este intervalo.

Este intervalo apresentou volume predominante entre as cotas de 100 a 0m, onde estão dispostos materiais geológicos desde a porção intermediária do basalto denso do derrame C até o basalto vesicular-amigdaloidal do derrame A, englobando as zonas de alto fraturamento do basalto denso B e as descontinuidades A e B (APÊNDICE 2- Seção geológica da barragem principal modificada).

Em porções a N, NW e NE, estes volumes se apresentam entre as cotas de 180 a 140m, onde são encontrados os materiais geológicos do derrame E (basalto vesicular-amigdaloidal e basalto denso).

Em duas porções a S e SW não foram interpoladas células para este intervalo, não representando intervalos de RQD de 75 a 90% nestas áreas (Figura 65), onde foram interpolados voxels de intervalos diferentes a este discutido. Por exemplo, na porção S houve o preenchimento desta região por valores de intervalos de RQD 25-50%, onde segundo a Figura 66, havia as sondagens com intercalações de dados de 50-75% e de 75 a 90% em grande quantidade. Já na porção SW o preenchimento destas porções foi por volume de intervalo de RQD de 90-100%.



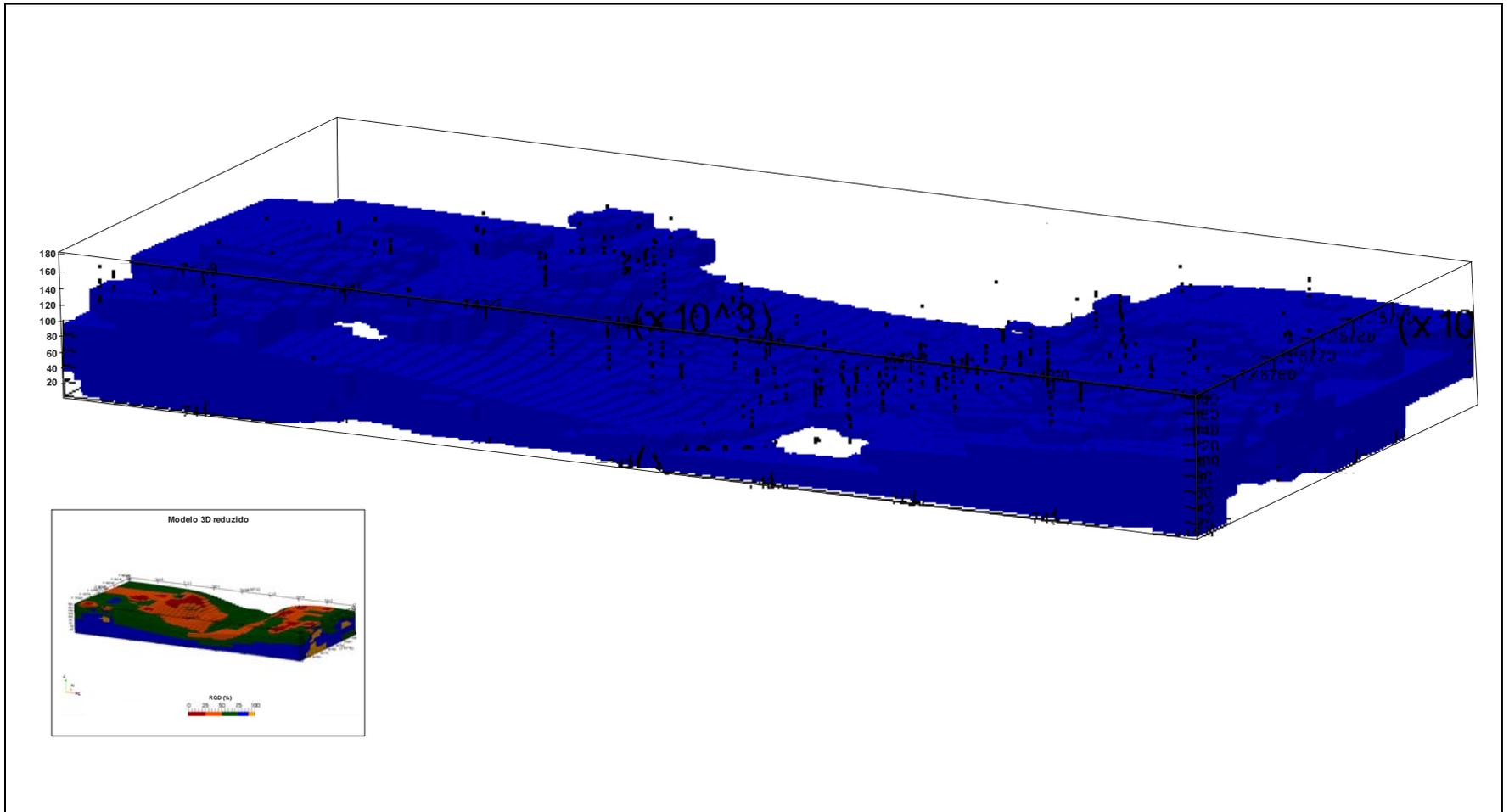


Figura 66-Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) da distribuição dos volumes de RQD para o intervalo de 75-90%.



### 6.3.5 RQD de 90-100%

O intervalo de RQD de 90-100% foi o que apresentou maior discrepância quanto ao percentual de entrada de dados das sondagens rotativas para a interpolação. Ele apresentou interpolado apenas 7% do volume total do modelo 3D de RQD, sendo que este intervalo perfazia aproximadamente 40% dos dados de entrada para a simulação.

Tal fato indica que a simulação computacional do modelo tridimensional tem problemas quanto à distribuição dos volumes gerados. Estes problemas podem estar associados à distribuição em área da malha de amostragem, o volume de voxel gerado em relação à quantidade de dados de entrada, as irregularidades na distribuição dos dados de entrada em determinadas porções da área de interpolação, que gerou falta de dados de entrada em determinadas regiões do bloco 3D para a simulação matemática, entre outros.

Se comparar o volume do intervalo de 90-100% de RQD (Figura 67) com a distribuição das sondagens rotativas separadas por intervalos na área de interpolação (Figura 61), verifica-se que apenas em profundidade intermediária a baixas do modelo 3D nas porções SE, entre as cotas de 140 a -50m, porção NW, entre as cotas de 140 a -50m e na porção central do modelo, entre as cotas de 20 a -50m, foram utilizados os pontos de dados deste intervalos para a geração de volume para o mesmo intervalo. Pois, a maioria dos pontos de sondagens rotativas existentes com esta categoria simulou volumes com RQDs de categorias inferiores, principalmente, no intervalo de 50-75% e 90-100% de RQD. Apenas nas porções SW e NE estes volumes se apresentam a cotas menos profundas, entre 160 a 100m.

Estes materiais estão associados a rochas desde o topo do derrame B até a base do derrame A, com influência das discontinuidades D, B e A (APÊNDICE 2- Seção geológica da barragem principal modificada).



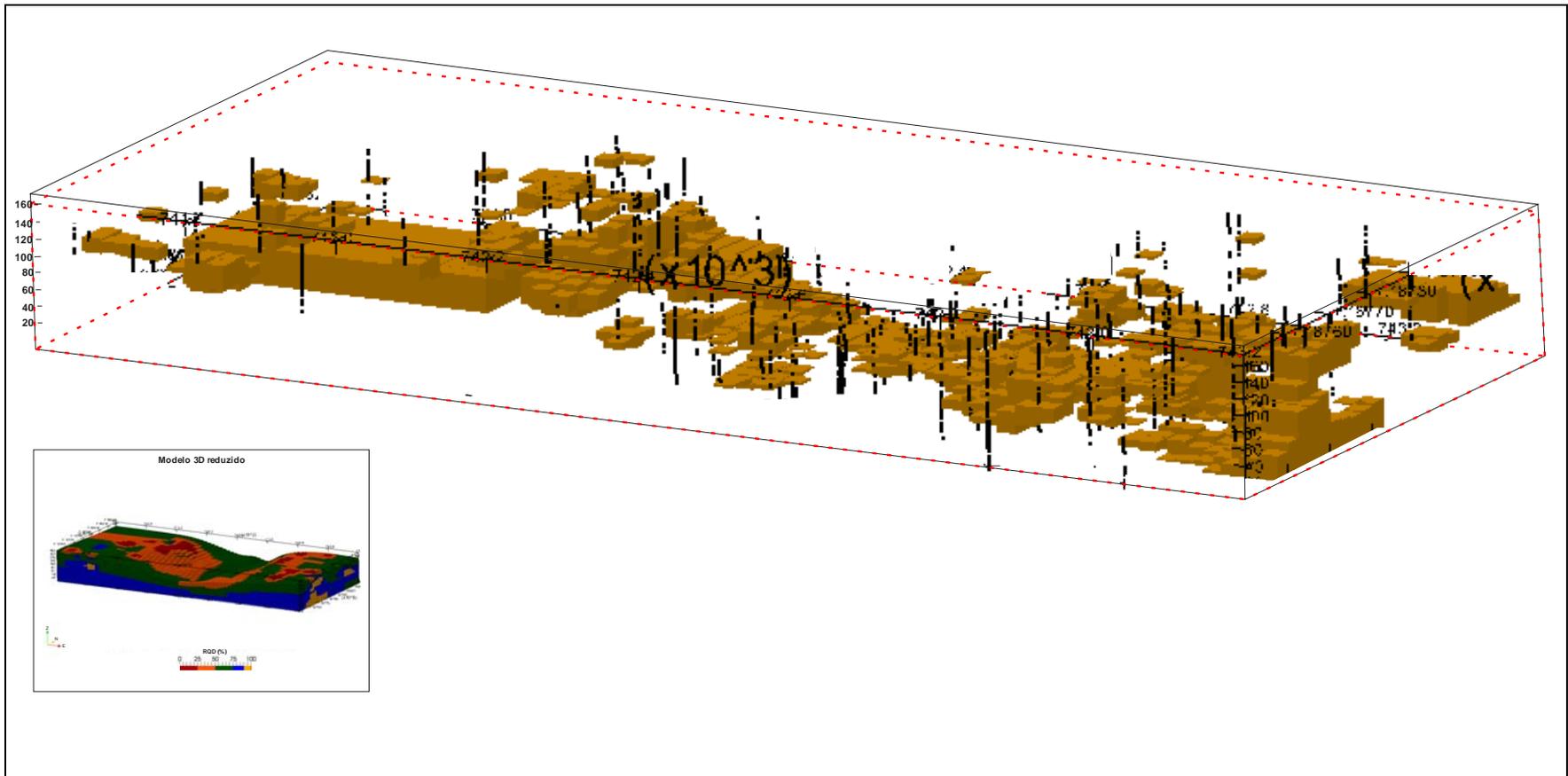


Figura 67-Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) da distribuição dos volumes de RQD para o intervalo de 90-100%.



### **6.3.3 Planos horizontais**

A análise dos planos horizontais foi realizada para obter informações da distribuição do parâmetro RQD em diferentes cotas dos modelos 3D. A partir de tal distribuição foi realizada a análise comparativa dos resultados obtidos com a bibliografia existente.

#### **6.3.3.1 Cota 20m**

A utilização do resultado da distribuição de RQD no plano de cota 20m é interessante para a análise, pois a esta profundidade ocorre o contato litológico entre os materiais dos derrames A e B.

O parâmetro RQD neste plano (Figura 68) apresentou um zoneamento com a predominância de materiais entre o intervalo de 75 a 90%, classificando esta porção do maciço uma qualidade boa (DEERE, 1967).

A distribuição de materiais de RQD com valores mais baixos ocorre principalmente na porção central do perfil, onde a cotas maiores se localiza a antiga calha do Rio Paraná. Nesta porção ocorrem intercalados materiais com RQD de 0-100%, sendo que em sua maioria ocorrem materiais com valores de RQD de 50-75% e 75-90%. O intervalo de RQD de 90 a 100%, classificado como excelente, se encontra além da área supracitada, distribuído a SE e NW do plano. A mesma situação ocorre aos materiais de intervalo de 50- 75%, de qualidade regular, que apesar de se apresentarem intercalados a materiais com RQD inferior ao seu no centro do plano, tem sua distribuição em maior proporção nas regiões NW, SW e NE.

Analisando o resultado nesta cota realizado por Patias (2010) pela Figura 69, é possível fazer associações com o resultado deste trabalho. A área da barragem principal apresenta como intervalo predominante entre 75-100%, ocorrendo nas porções NE, SE e em menor proporção a NW (Figura 69). Nas porções SE, NE e S ocorrem em maior proporção valores de RQD entre o intervalo de 90-100%, e o intervalo de 75-90% tem predomínio nas porções SW e NW. Entretanto, na região próxima a calha do rio o resultado apresenta porções com valores de RQD de 50-75%, de qualidade regular a boa.

Os dois resultados seguem a tendência de apresentar porções com RQD inferior nas mesmas regiões da área, ou seja, próximo a antiga calha do Rio Paraná. Porém, neste trabalho o resultado para esta cota apresenta pequenas porções com valores de RQD entre 0-50% intercaladas a valores de 50-75% (Figura 68). Na Figura 59 não ocorreram valores de RQD menor que 50%.

Um dos motivos para justificar este fato seria que os métodos de interpolação dos dados deste trabalho e do trabalho realizado pela autora foram distintos. Patias (2010) utiliza a geoestatística como um dos métodos para interpolação deste atributo, como a krigagem ordinária, além do método de equações multiquadráticas, com a utilização do programa GeoVisual. Já o resultado apresentado nesta dissertação (Figura 58) trata-se de um plano horizontal extraído do modelo tridimensional interpolado pelo método spline regularizado por tensão a partir do programa GRASS.

As diferentes metodologias utilizadas em ambos trabalhos justificaria as pequenas diferenças das distribuições de valores para a mesma localização. Entretanto, o fato dos mesmos locais apresentarem quedas nos valores de RQD não afastam a veracidade da interpolação de ambos modelos, cabendo assim a questão de metodologia limitar os resultados finais.

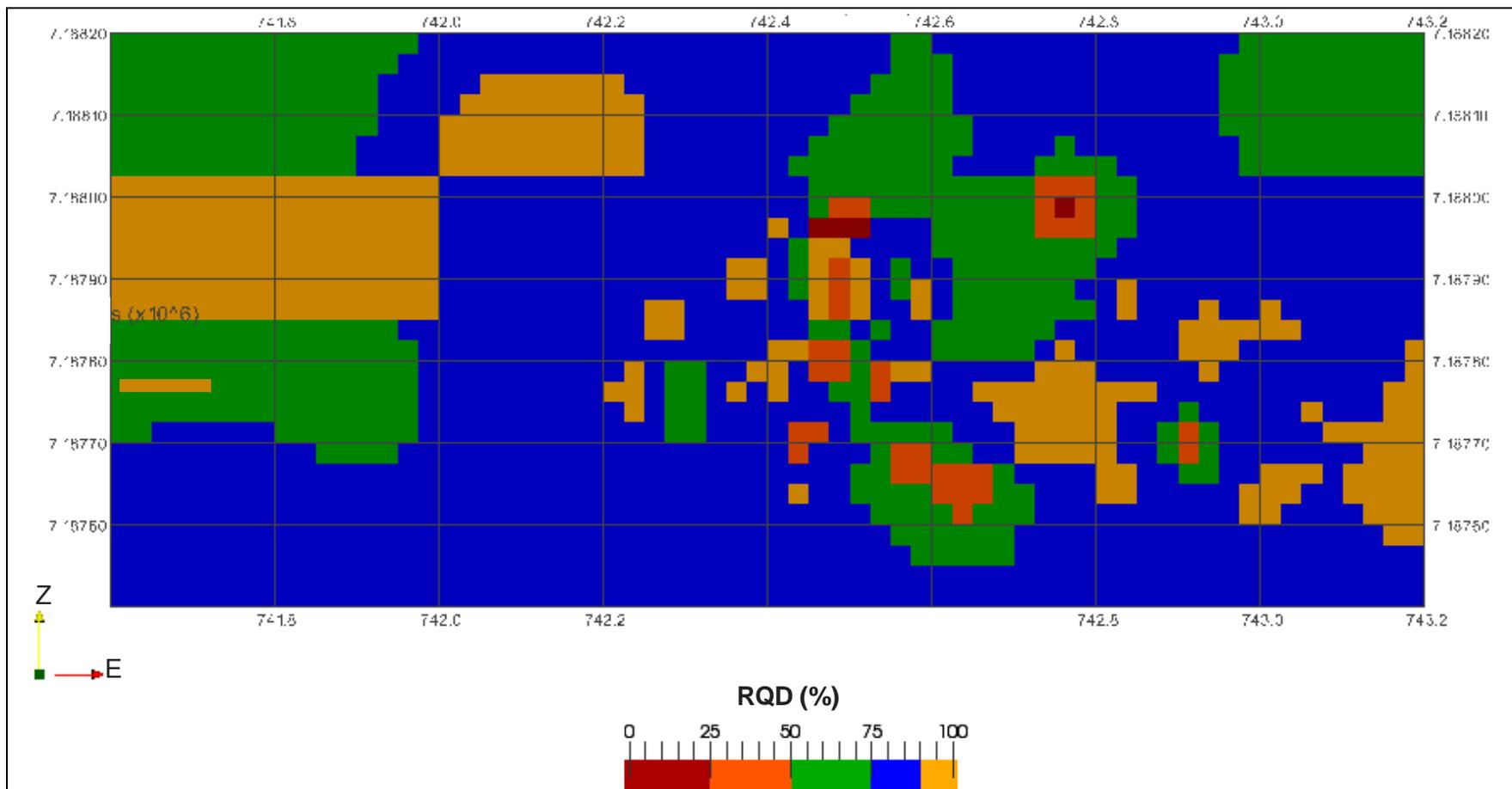


Figura 68-Plano horizontal na cota 20m (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área.



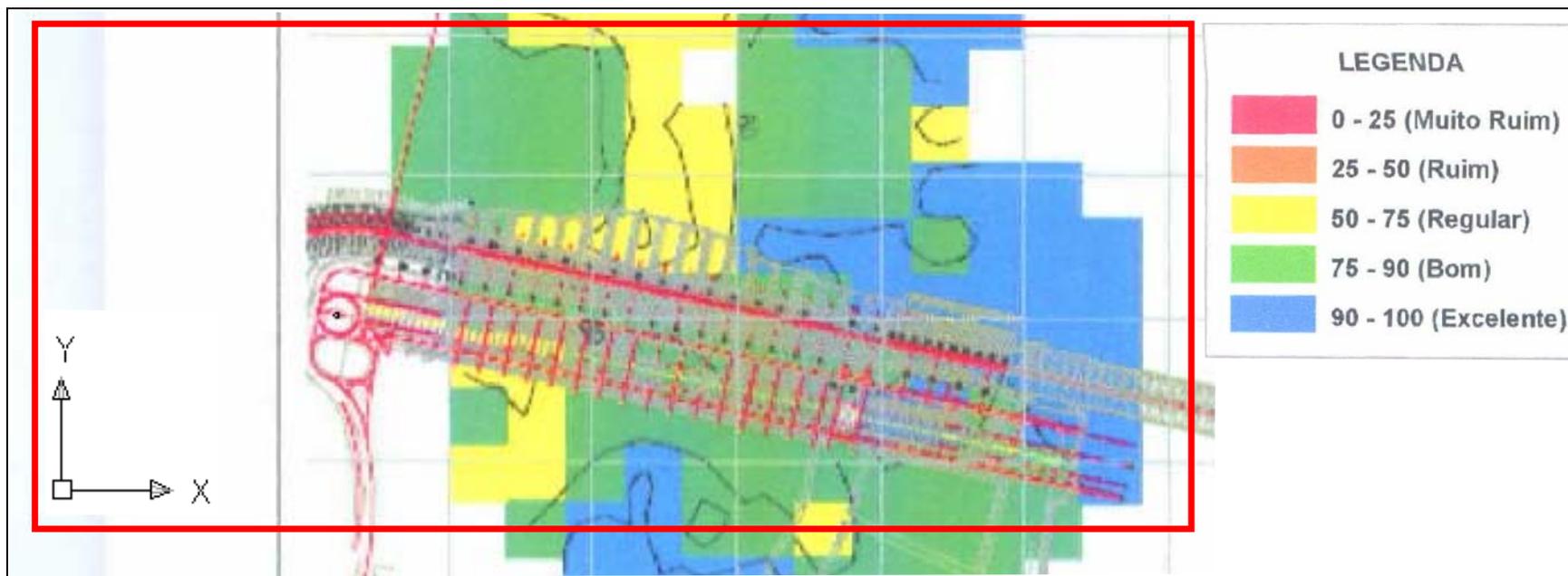


Figura 69-Parte do plano horizontal da cota 20m com a delimitação da área de interpolação 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área, Fonte: Patias (2010).



### 6.3.3.2 Cota 40m

Embora haja a predominância de materiais com RQD de 75-90% ao longo de todo o plano horizontal de cota 40m, sua porção central apresentou intervalos de RQD distribuídos entre 0-75%, onde se localizava a antiga calha do rio. O plano apresenta uma distribuição considerável do intervalo de RQD 50-75% nas porções NW, SW, S e SE, além de valores de RQD entre 90-100% nas porções a W e SE (Figura 70).

As comparações deste corte com o resultado de Patias (2010) para esta mesma cota, representado pela Figura 71, apresentaram algumas diferenças significativas como maior proporção de valores de RQD 50-75% na porção central do plano, são encontrados valores de RQD entre 0-50% próximo a calha do rio e representação de menor proporção de valores de RQD entre 90-100% localizados a SE (Figura 70).

O zoneamento apresentado na Figura 71 indica a predominância de valores de RQD de 75-90%, mas nas regiões próximas a calha do rio estes valores caem até o intervalo de 50-75%.



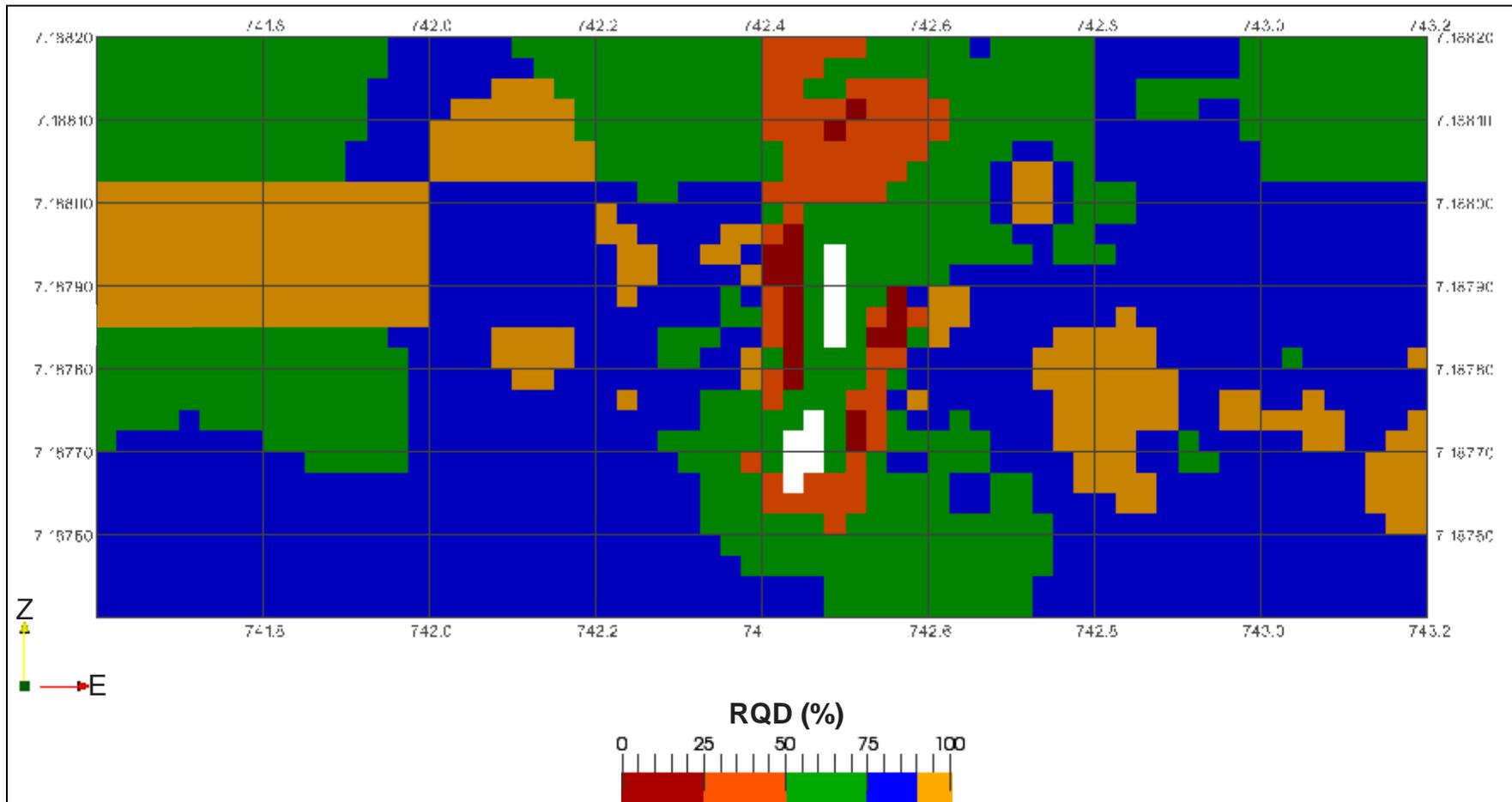


Figura 70-Plano horizontal de cota 40m (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área.



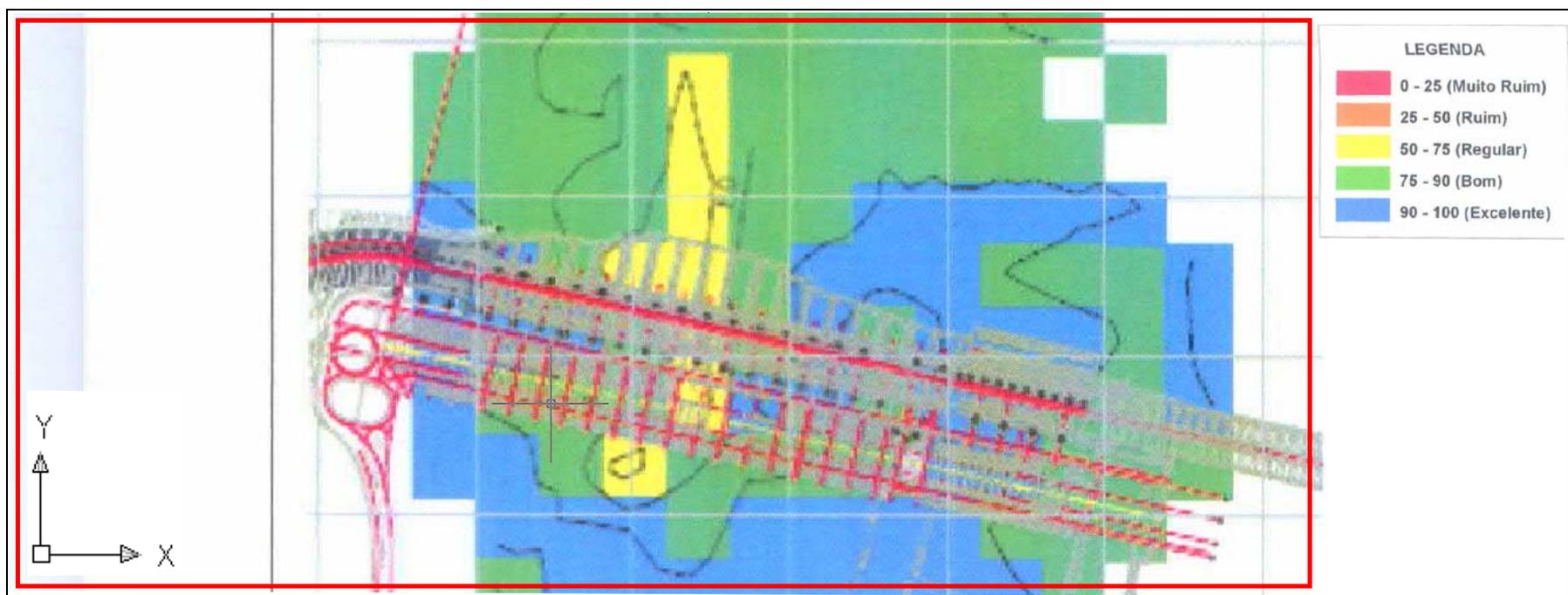


Figura 71- Parte do plano horizontal da cota 40m com a delimitação da área de interpolação 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área, Fonte: Patias (2010).



### 6.3.3.3 Cota 128m

Próximo a cota de 128m ocorre a Descontinuidade D encontrada no basalto denso do derrame D, sendo esta uma cota interessante para avaliação da distribuição de RQD interpolados no modelo 3D.

No resultado apresentado na Figura 72, há o predomínio de RQD no intervalo de 50 a 75%, que se intercalam com matérias de RQD de 0-25% e 25-50%. Nesta cota é possível delimitar claramente o antigo canal do Rio Paraná, podendo dividir esta seção em margem direita e margem esquerda.

A margem direita apresenta uma maior proporção da distribuição de RQD no intervalo de 75-90% do que na margem esquerda. Porém, materiais com intervalos de 90-100% são mais escassos na margem direita. Próximo ao leito do rio os valores de RQD decrescem para o intervalo de 25-50%, sendo que mais ao N ocorrem pequenas porções de RQD 0-25%.

A margem esquerda, no geral, apresenta uma situação mais crítica quanto aos valores de RQD distribuídos, há predomínio do intervalo de 50-75% e o intervalo de 75-90% se apresenta em proporções inferiores aos localizados na margem direita. Próxima a calha do rio os intervalos de 25-50% e 0-25% de RQD se apresentam mais relevantes. No entanto, a concentração do intervalo de 90-100% é superior principalmente a SE.

Comparando este resultado com o plano horizontal de cota 128m de Patias (2010) pela Figura 73, foi verificado que na margem esquerda há grande proporção de materiais de RQD com intervalo de 50-75%, seguidos pela distribuição de RQD de 75-100% em direção a E. Porém, materiais com valores de RQD entre 25-50% se localizam em porções a SE do plano, onde foram interpolados valores com RQD de intervalos 0-25%, 25-50%, predominante, e 50-75% para este trabalho (Figura 72). Na Figura 73 a proporção de valores com RQD de 90-100% na margem esquerda é superior que na direita.

As mesmas correlações destas distribuições podem ser feitas para a margem direita, onde na Figura 73 ocorrem valores de RQD de 50-75% aumentando para valores 75-90% intercalados com 90-100% em direção a W do plano, sendo que nesta, próximo a calha do rio, ocorrem pequenas porções de RQD com valores entre 0-25% e 25-50%.



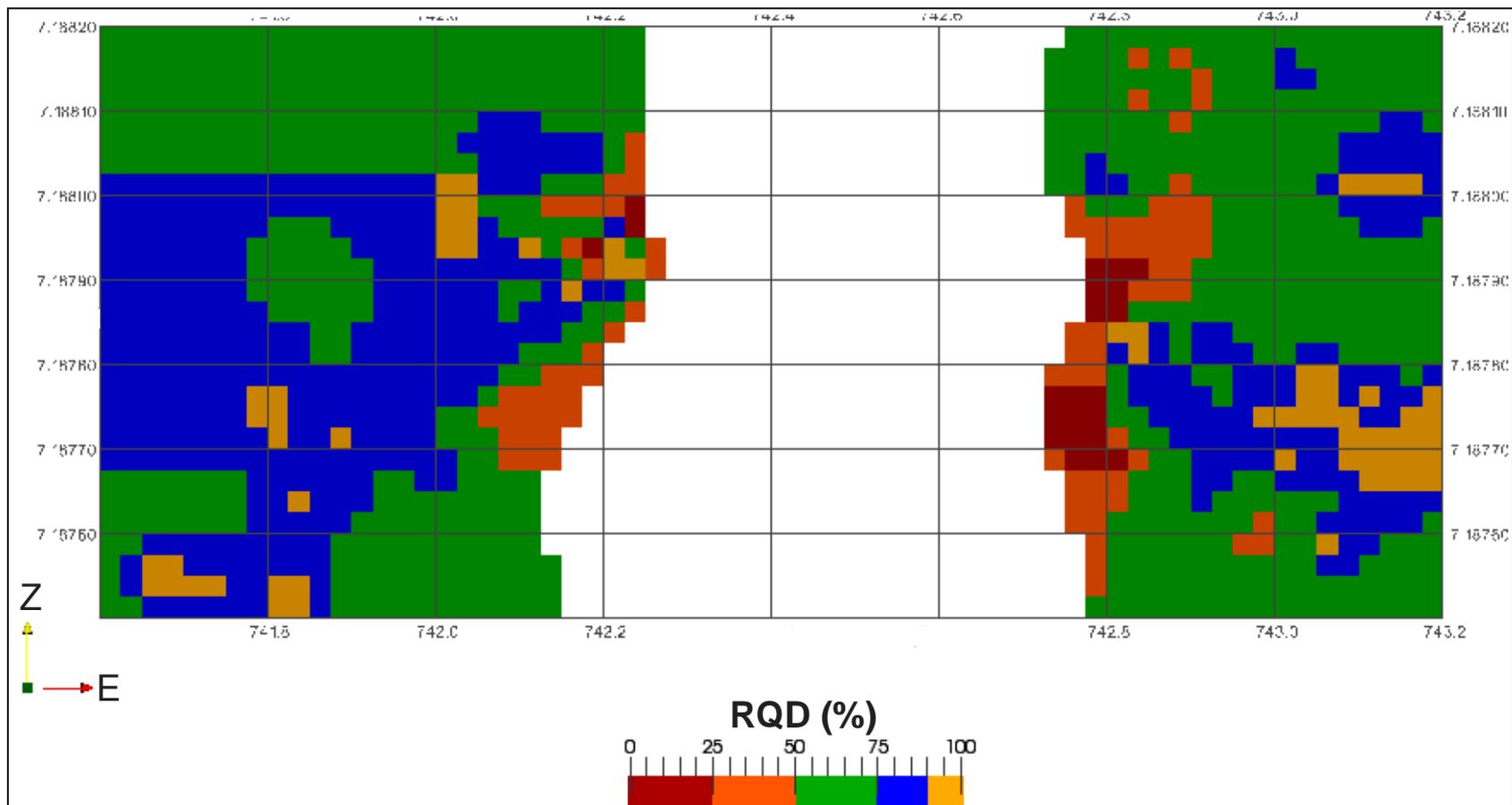


Figura 72-Plano horizontal da cota 125m (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área.



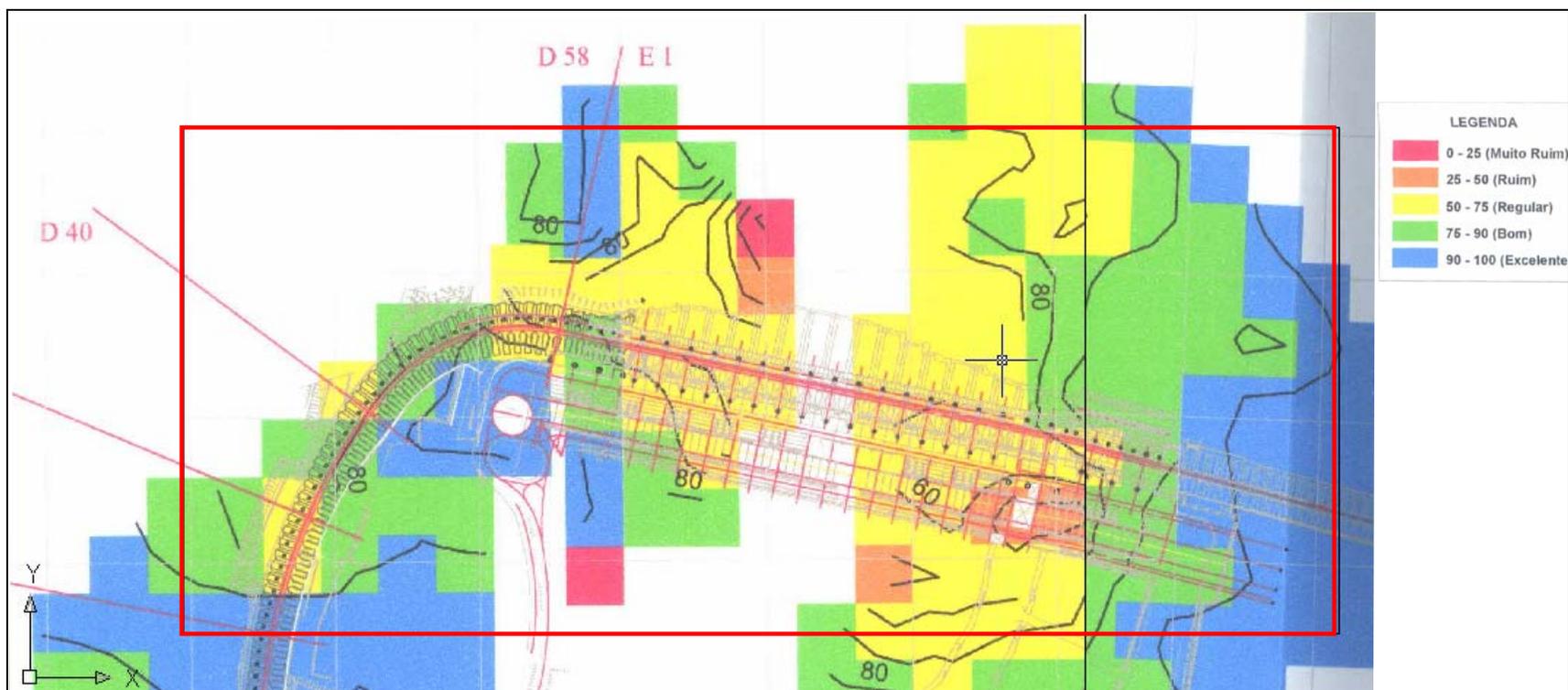


Figura 73-Parte do plano horizontal da cota 128m com a delimitação da área de interpolação 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área, Fonte: Patias (2010).



Analisando conjuntamente os três perfis horizontais apresentados acima é possível constatar que há um relativo decréscimo da qualidade dos materiais próximos a calha do rio.

Este fato é devido à maior exposição superficial das rochas nestas porções, a ação das águas do rio como agente intempérico e a presença de planos de fraqueza como as descontinuidades A, B e D localizadas próximo das cotas de 20, 40 e 128m, respectivamente (Figuras 58, 70 e 72).

Foi possível verificar que há uma tendência do intervalo de RQD de 90-100% se distribuir ao longo da direção SE pelo fato de que as maiores concentrações desta categoria em sondagens rotativas estar distribuídas ao longo desta porção (Figura 75). Este intervalo durante a interpolação sofreu maior desequilíbrio se consideramos suas proporções dentre os dados de entrada das sondagens rotativas e os resultados das interpolações, apresentando-se menor que o esperado para o modelo 3D.

Com a diminuição da profundidade dos planos horizontais, a predominância dos intervalos de RQD foi variando de qualidades superiores a regulares, sendo que no plano mais profundo, de cota 20m, havia grande proporção de RQD entre o intervalo de 75-90%, já no plano de cota 128m a distribuição dos volumes interpolados predomina para o intervalo de 50-75%.

#### **6.3.4 Perfis verticais**

Foram realizados cortes verticais no modelo tridimensional do estudo de Caso Geral em duas direções, a primeira sendo paralela ao eixo da barragem principal e a segunda transversal a estrutura de barramento na margem direita do rio.

Os resultados destas seções foram comparados com seções geológicas pertencentes ao acervo da Itaipu Binacional como o ANEXO 3- Seção geológica da barragem, ANEXO 4- Seção Geológica pelo Eixo do Bloco F1 da Unidade e APÊNDICE 2- Seção geológica da Barragem Principal de Itaipu modificada, afim de realizar a comparação e possível relação entre a distribuição do RQD gerada por simulação computacional e a distribuição dos materiais geológicos estudados pela empresa.

#### 6.3.4.1 Perfil vertical 1

O perfil vertical 1 tem orientação A-A' segundo a Figura 74 e é representado pela Figura 75, seu corte foi baseado na direção da seção geológica da barragem principal de Itaipu com vista da jusante para a montante (ANEXO 3- Seção geológica da barragem).

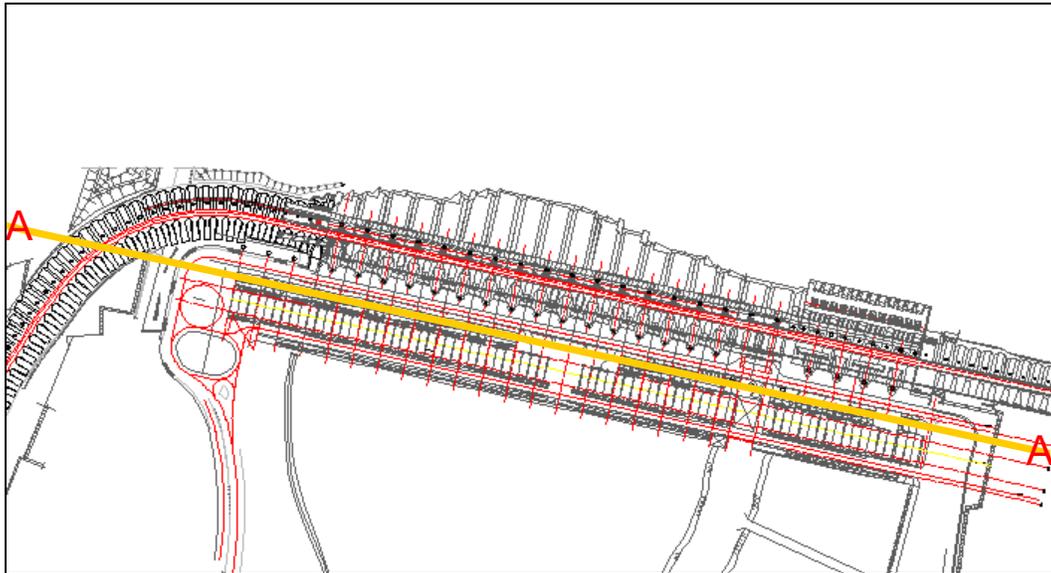


Figura 74-Orientação do Perfil vertical 1 segundo a direção A-A', representado pela linha amarela, Fonte: modificado de Patias (2010).

A propriedade RQD observada ao longo deste perfil foi correlacionada com as rochas dos derrames A, B, C e D, apresentados na seção geológica da barragem principal com vista da jusante para a montante pelo ANEXO 3- Seção geológica da barragem principal e APÊNDICE 2- Seção geológica da Barragem Principal de Itaipu modificada.

Os materiais rochosos localizados abaixo da cota de 20m das seções geológicas representadas pelo ANEXO 3 e APÊNDICE 2 pertencem ao derrame A, o mais basal dos cinco derrames estudados na área de Itaipu. Em geral, o RQD encontrado nesta porção do perfil vertical 1 (Figura 75), apresenta intervalos de 75 a 90%, de qualidade boa, a 90 a 100%, de

qualidade excelente. Entretanto, na porção a E o RQD ocorre com valores entre o intervalo de 50 a 75%, de qualidade regular, até 25 a 50%, entre as cotas de 20 a -50m.

Na porção do derrame A onde ocorrem valores entre o intervalo de 25-50% de RQD é encontrado o basalto vesicular-amigdaloidal, que se encontra próximo da descontinuidade A, fato importante a ser considerado, pois, no topo deste derrame ocorre um zona bastante fraturada na porção central do perfil. Nestas zonas são verificadas porções de materiais de qualidade regular, com RQD de 50-75%, correlatas ao basalto vesicular-amigdaloidal e as brechas vulcânicas do derrame A.

Analisando os materiais do derrame B, verifica-se que os parâmetros de qualidade regular, 50 a 75% de RQD, apresentam-se mais proeminente nas porções a W e central do perfil. Materiais com estas características se intercalam a materiais de qualidade boa, 75 a 90%, que são predominantes entre as cotas de 60 e 20m. São encontrados intercalados a valores de RQD de 75-90%, a proporções razoáveis, materiais de RQD 90-100%.

Neste mesmo derrame, onde ocorre RQD de qualidade regular, com RQD de 50-75%, é encontrado o basalto denso do derrame B, abaixo da descontinuidade B. E valores com este intervalo de RQD podem estar relacionados às brechas vulcânicas e basalto vesicular-amigdaloidal do derrame B ocorrentes acima da descontinuidade B.

Na porção central do perfil, entre as cotas próximas de 80 a 20m, ocorre a presença do derrame B e C, são verificados porções de materiais de qualidade de RQD razoável a muito ruim intercalados, entre intervalo de RQD de 0-50%, respectivamente. Tais materiais se correlacionam do topo para a base com as brechas vulcânicas e basalto vesicular-amigdaloidal do derrame B, nas margens esquerda e direita da antigo leito Rio Paraná antes da construção do empreendimento, além de ocorrer, próximo ao contato do derrame A/B, abaixo da descontinuidade B. Locais onde ocorrem estes valores no basalto denso do derrame B se associam a zona muito fraturada.

No pacote representado entre as cotas 120 e 80m do perfil 1 são encontrados os litotipos do derrame C. Nesta porção há o predomínio de materiais com RQD 75-90%, de qualidade boa, principalmente, a W e E do

perfil. Estes valores se encontram intercalados com materiais de RQD 90-100%, de qualidade excelente, próximo a margem direita do rio e na porção a E do perfil. Estas intercalações ocorrem no basalto denso do derrame C. Na porção W deste pacote os valores de RQD se intercalam com materiais de qualidade regular, de RQD 50-75%, onde são encontrados desde brecha vulcânica até o basalto denso do derrame C.

A profundidades acima de onde ocorrem os valores de RQD 75-90%, dentro do pacote de rochas do derrame C, a W do perfil, se apresenta a distribuição de valores de RQD de 25-50%. Nestas porções são encontradas brechas vulcânicas do derrame C, localizadas próximo ao contato entre derrame C/D. Também há distribuição de valores de RQD 25-50% próximo ao antigo leito do rio, se intercalando com materiais de RQD de 50-75% e 0-25%.

Os materiais de qualidade muito ruim encontrados neste pacote, com RQD de 0-25%, ocorrem principalmente a E do perfil, na margem esquerda, entre cotas aproximadas de 120 a 80m, e se associam tanto com brechas vulcânicas e basaltos vesiculares-amigdaloidais, próximo ao contato entre C/D, quanto aos basaltos densos do derrame C.

No pacote representado pelas rochas do derrame D neste perfil, entre as cotas de 120 a 160m, há o predomínio de materiais de RQD 25-50%, que recobrem materiais de RQD de 50-75% a W e de 50-90% a E.

Entre as cotas de 130 a 160m, a W próximo a calha do rio e a E do perfil, ocorrem três porções de RQD 0-25% intercaladas com materiais de RQD 25-50%. Na margem esquerda do perfil, há uma maior proporção de materiais de RQD 50-75%, que se encontram intercalados com materiais de qualidade inferiores, de 0-50%.

Todos os valores de RQD distribuídos no pacote de rochas do derrame D estão associados ao basalto denso. A variação da qualidade das rochas nesta porção do perfil pode estar associada a exposição a agentes intempéricos, devido estas se encontrarem em posição mais rasa do terreno, e a presença da descontinuidade D, que se encontra próxima da cota 125m.

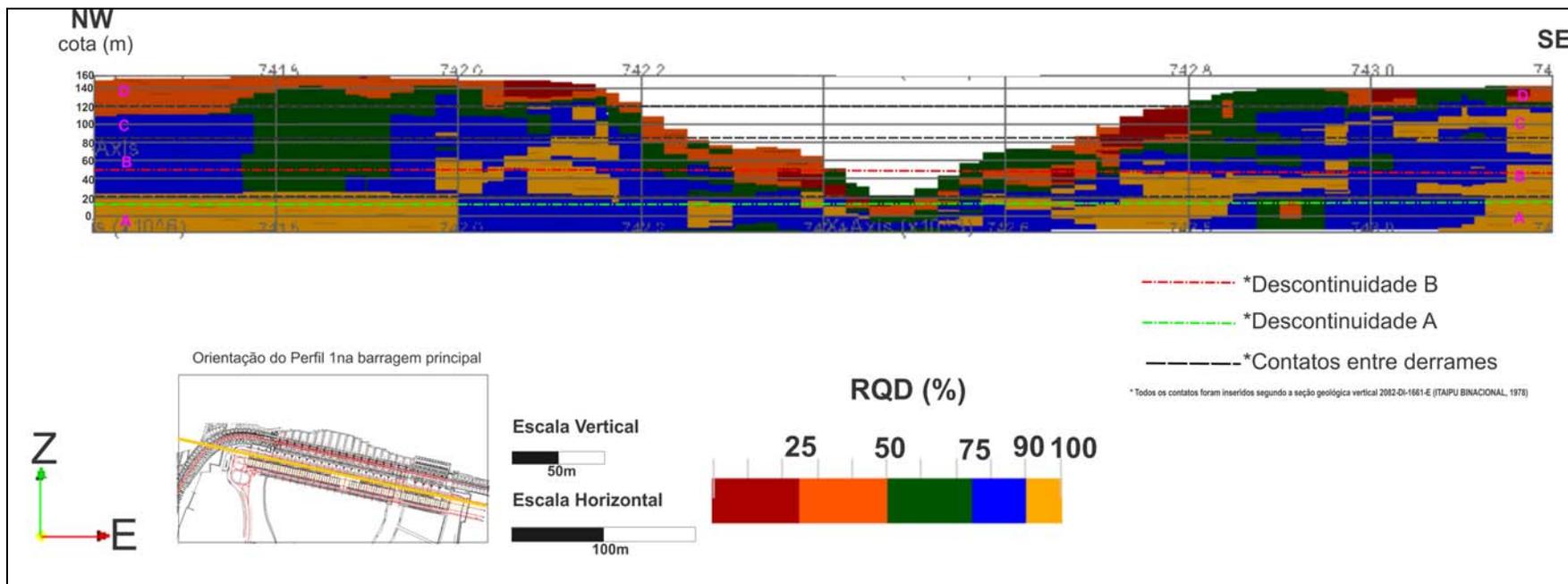


Figura 75-Perfil vertical 1 (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior), obtido a partir de corte vertical no modelo 3D de RQD da área estudo de Caso Geral-Barragem Principal segundo a orientação apresentada.



### 6.3.4.2 Perfil vertical 2

O perfil vertical 2 tem orientação B-B' (Figura 76), tem sua localização baseada na seção geológica da barragem principal de Itaipu pelo eixo do bloco F1, tendo orientação ao eixo da barragem principal (ANEXO 4- Seção Geológica pelo Eixo do Bloco F1 da Unidade). Este perfil está inserido no perfil vertical extraído dos modelos 3D de RQD do estudo de Caso Geral- Barragem Principal que tem a orientação observada na Figura 77.

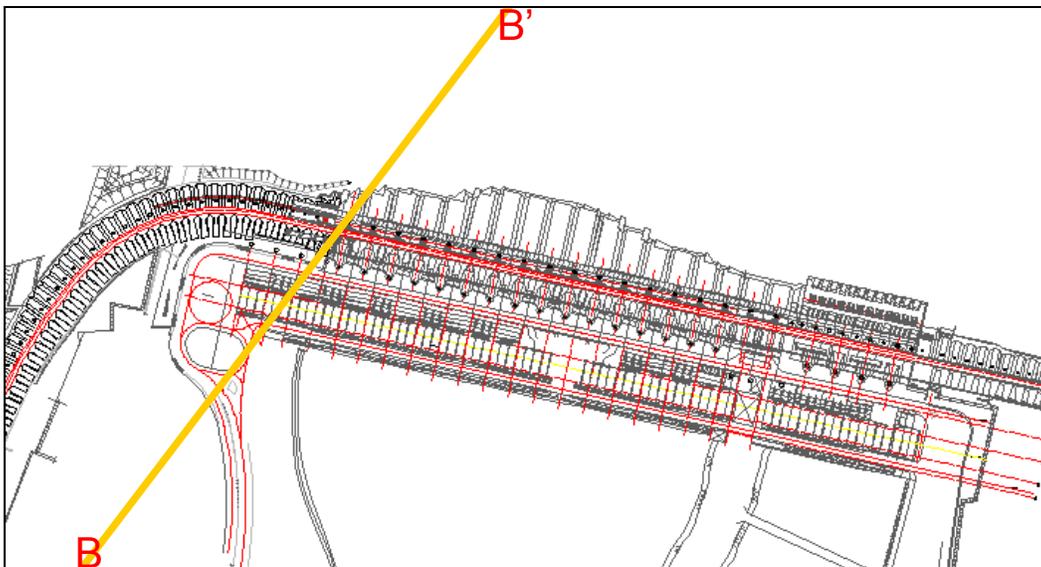


Figura 76-Orientação do Perfil vertical 1 segundo a direção B-B', representado pela linha amarela, Fonte: modificado de Patias (2010).

Os parâmetros de RQD distribuídos neste perfil foram correlacionados com a seção geológica do ANEXO 4- Seção Geológica pelo Eixo do Bloco F1 da Unidade U1, onde se encontram materiais rochosos dos derrames B, C, D, e E.

Abaixo da cota de 25m se localiza o topo do derrame A, onde se encontra com predomínio materiais com RQD de 75-90% ao longo de todo este pacote, se intercalando a RQD de 90-100% a E do perfil, entre as cotas de 0 a -50m.

O derrame B se localiza entre as cotas de 85 a 25m. Abaixo da descontinuidade B, é encontrado o basalto denso B ocorrendo o predomínio de distribuição de valores de RQD entre 75-90%, de qualidade boa, que se intercalam com RQD de 90-100%, de qualidade excelente. Em porções próximas ao centro do perfil, entre as cotas 60 e 25m, são verificados materiais com RQD de 50-75%, predominantemente, com intercalações de RQD de 25-50%.

Na porção NE do perfil, entre as cotas de 65 a 45m, próximo a descontinuidade B, são encontrados valores de RQD de 50-75% intercalados com materiais com valores de RQD 25-50%.

Entre as cotas 85 a 65m, acima da descontinuidade B e abaixo do contato entre os derrames B/C, são encontrados materiais de RQD 75-90% na porção W e ao centro do perfil, sendo que na porção central estes valores se intercalam com RQD de 90-100% e se encontram associados as brechas vulcânicas e basalto vesicular amigdaloidal do derrame B.

A E desta porção os materiais com RQD de 75-90% deixam de ser predominantes, ocorrendo materiais de RQD com intervalo de 50-75% e 25-50%, intercalando-se entre si a W a E, estando esses associados às brechas vulcânicas e basalto vesicular amigdaloidal do derrame B.

Ao longo de todo o pacote rochoso do derrame C, pode-se observar a tendência da distribuição dos intervalos de RQD similar ao pacote do derrame B, com exceção da porção a extremo W, onde são encontrados predominantemente valores de RQD de 50 a 75% do topo a base do derrame.

Próximo ao contato com o derrame D, próximo ao centro do perfil, onde ocorrem as brechas vulcânicas do derrame C, são encontradas porções de RQD variando 25-50% até 0-25%. A distribuição de materiais com valores de RQD de 0-25% se eleva desde a porção próxima ao contato dos derrames C/D até a descontinuidade D, entre as cotas aproximadas de 130 a 110m.

Acima da descontinuidade D, são encontradas distribuições de valores de RQD predominantes entre o intervalo de 0-75%, sendo que a NE do perfil nesta porção do perfil os valores de RQD 90-100% e 75-90% são mais escassos. Os materiais geológicos que se correlacionam a este pacote vão

desde brechas vulcânicas até o basalto vesicular amigdaloidal do derrame D, no contato com a descontinuidade D, do topo para base, respectivamente.

O pacote entre as cotas de 130 a 170m, onde são encontradas as rochas do derrame E, especificamente os basaltos densos, há distribuição de valores de RQD em maior proporção entre os intervalos de 50-75% a 0-25%, sendo que materiais com RQD de 90-100% e 75-90% ocorrem com menor frequência na porção central do perfil. Entretanto, na porção superficial localizada no centro do perfil, entre as cotas aproximadas de 165 a 140m, são encontrados valores de RQD de 0-25% sobrepondo materiais de RQD 25-50% e 50-75%.



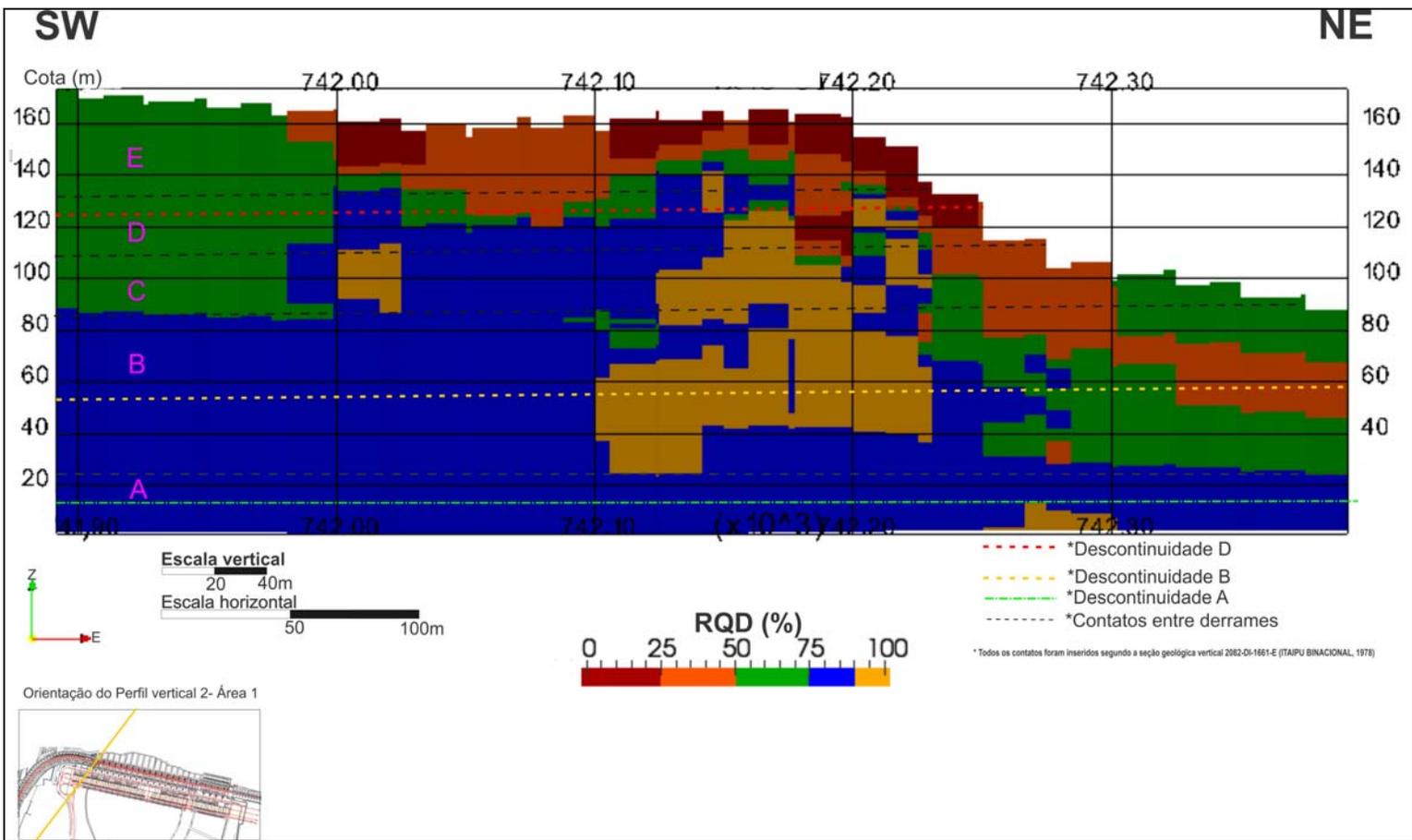


Figura 77-Perfil vertical 2 (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior), obtido a partir de corte vertical no modelo 3D de RQD da área estudo de Caso Geral-Barragem Principal segundo a orientação apresentada.



#### **6.4 Análise de Estudo de Caso Específico- Margem esquerda do Rio Paraná**

Para o estudo de Caso específico foi realizada simulações tridimensionais de RQD para uma porção da margem esquerda do Rio Paraná, localizada dentro dos limites: N=71879000; S=7187600; W=742600 e E=743000. O bloco volumétrico simulado tem 150m de espessura e representa um volume de  $1,8 \cdot 10^7 \text{m}^3$ . Dentro da área de interpolação são encontradas 28 sondagens rotativas, que compunham 1122 pontos de dados.

Foram simulados modelos com dimensões de voxels variáveis. A primeira variável manteve as mesmas configurações de voxel utilizada para o Caso Geral, ou seja,  $25\text{m} \times 25\text{m} \times 3\text{m}$ , obtendo um volume  $1875\text{m}^3$  por voxel e gerando um total de 9600 voxels para o volume de interpolação.

Como simulações com voxels de dimensões menores aumentam o tamanho do arquivo computacional resultante, verificou-se a possibilidade da interpolação de voxels com dimensão de  $10\text{m} \times 10\text{m} \times 1\text{m}$  para a área do Caso Específico, já que o volume do bloco 3D nesta área é aproximadamente 15 vezes menor que o do Caso Geral. Resultou-se que o arquivo digital apresentou tamanho (em bytes) compatível a capacidade de memória da máquina utilizada para a realização deste trabalho, assim os modelos com estas configurações puderam ser visualizados.

Tal situação é uma limitação para a área de interpolação do Caso Geral, pois este tipo de processo realizado no volume desta geraria um arquivo digital bastante pesado (em bytes), sendo impossível obter visualização do modelo máquina utilizada como ferramenta para este trabalho.

Simulações com tal configuração realizadas para a área de Caso Específico apresentam um total 180000 voxels no modelo 3D.

Foram realizados novas simulações, com voxels de dimensões  $10\text{m} \times 10\text{m} \times 1\text{m}$ , a fim de testar o método de interpolação para o atributo de RQD, e obter resultados que se aproximem o máximo possível da distribuição real dos materiais do terreno, comparando os resultados destes com a distribuição estatísticas dos dados de entrada.

O primeiro teste de baseou na inserção de 7 sondagens não reais, que se situam abaixo da cota de 40m, compostas de valores de RQD igual a 100%, com o intuito de testar a influência dos pontos de dados com valores altos distribuídos a altas profundidades e onde havia ausência de sondagens. O segundo teste foi baseado na retirada de 4 pontos de sondagens reais e uma não real, que se encontravam muito próximas de outras sondagens. E finalmente no terceiro teste, foram retiradas todas as sondagens não reais inseridas e os quatro pontos que se situavam muito próximos de outras sondagens.

Durante os processos de interpolação dos modelos para esta área não foram excluídos nenhum ponto, podendo considerar que o conjunto de valores dos parâmetros de interpolação admitidos para tal processo utilizou todos os dados de entrada disponíveis para a simulação computacional.

A distribuição dos 1122 pontos de dados de entrada da área se apresenta ilustrado na Figuras 78, onde se encontram separados segundo os intervalos de RQD de 0-25%, 25-50%, 50-75%, 75-90% e 90 a 100%. Observando a Figura 78A é possível constatar que há ausência de sondagens rotativas a SW e a NE da área de interpolação. Na Figura 78B esta ausência é verificada na porção W, entre as cotas de 120 a 150m.

Analisando a distribuição das sondagens rotativas no bloco 3D de interpolação (Figura 78C), foi verificado que há uma amostragem considerável na porção SE e central da área de interpolação.

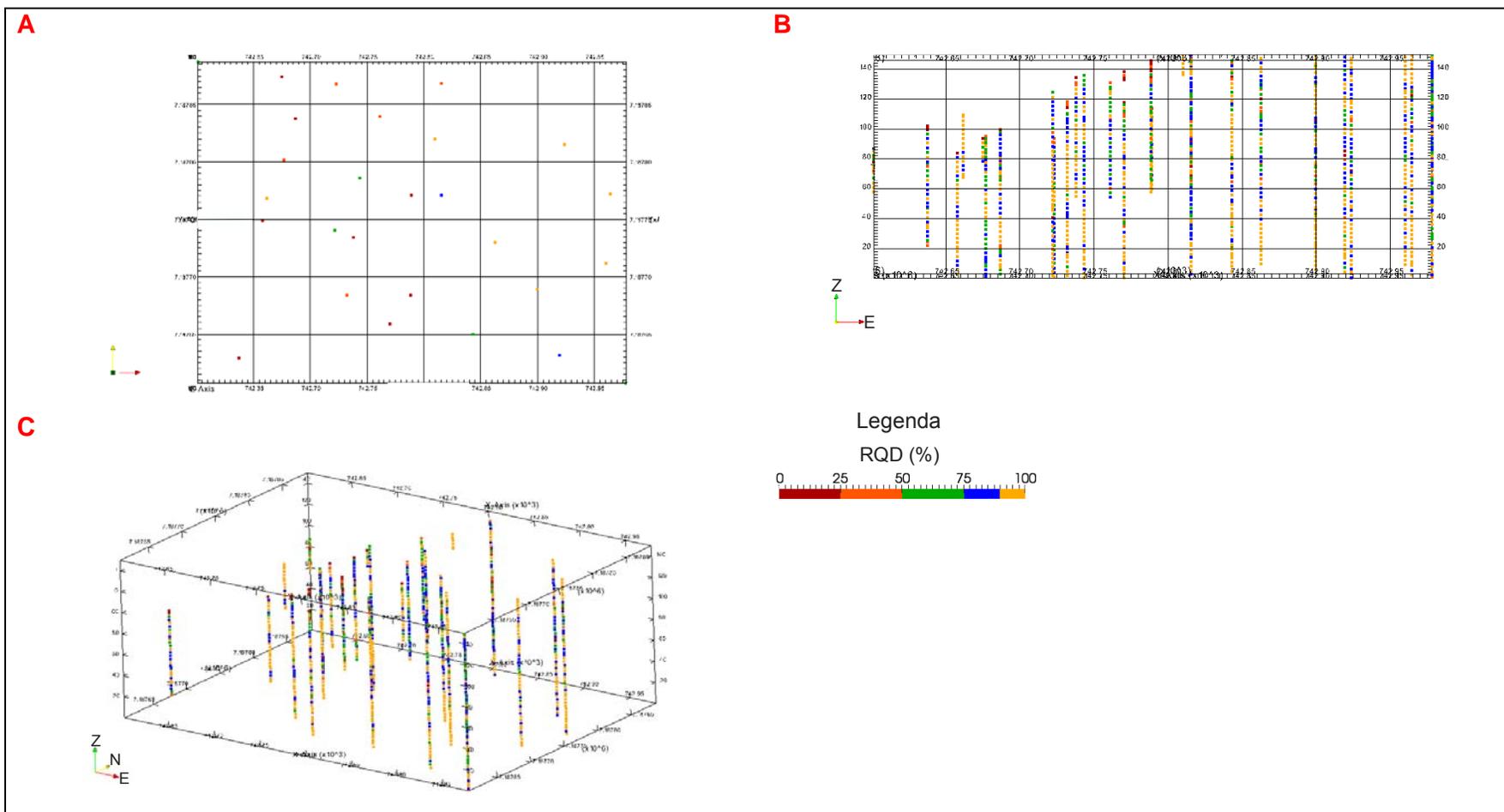


Figura 78- A) Vista em planta; B) Vista frontal da área da jusante para montante; C) Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição dos pontos das sondagens rotativas, separados por intervalos de RQD (%).



#### **6.4.1 Modelo 3D de RQD do Caso Específico- Voxel de 25mx25mx3m**

O modelo de RQD simulado com o mesmo tamanho de célula 3D do modelo do Caso Geral apresentou porcentagens de volume distribuídos no modelo 3D de 1,75% no intervalo de RQD de 0-25%, 7,38% no intervalo de 25-50%, 34,6% no intervalo de 50-75%, 51,50% no intervalo de 75 a 90% e 4,77% no intervalo de 90 a 100% (Figura 79).

As porcentagens dos intervalos de RQD analisados para os dados de entrada das 28 sondagens rotativas utilizadas eram: 4,10% no o intervalo de RQD de 0-25%, 6,15% no intervalo de 25-50%, 18,27% no intervalo de 50-75%, 28,43% no intervalo de 75 a 90% e 43,05% no intervalo de 90 a 100%. Assim, é possível constatar que durante o processo de interpolação 3D as proporções de intervalos de RQD 90-100% foram diminuídas cerca de dez vezes, enquanto os valores de RQD 75-90% distribuídos neste modelo se apresentam um aumento de quase o dobro das porcentagens de dados de entrada, se tornando o intervalo predominantemente no modelo.

Analisando a distribuição dos valores de RQD na Figura 79, é possível constatar que o intervalo de RQD 0-25% se encontra localizados a SW e a NW, em geral, como núcleo de voxels de valores de RQD 25-50%.

O intervalo de 50-75% se encontra distribuído ao longo de porções a NW, SW, centro e a menores proporções a NE e SE.

Os valores de RQD de 90 a 100%, em geral, tem distribuição predominante nas porções central, SE e NE do modelo, se intercalando, da base ao topo, com valores de RQD de 75-90%.



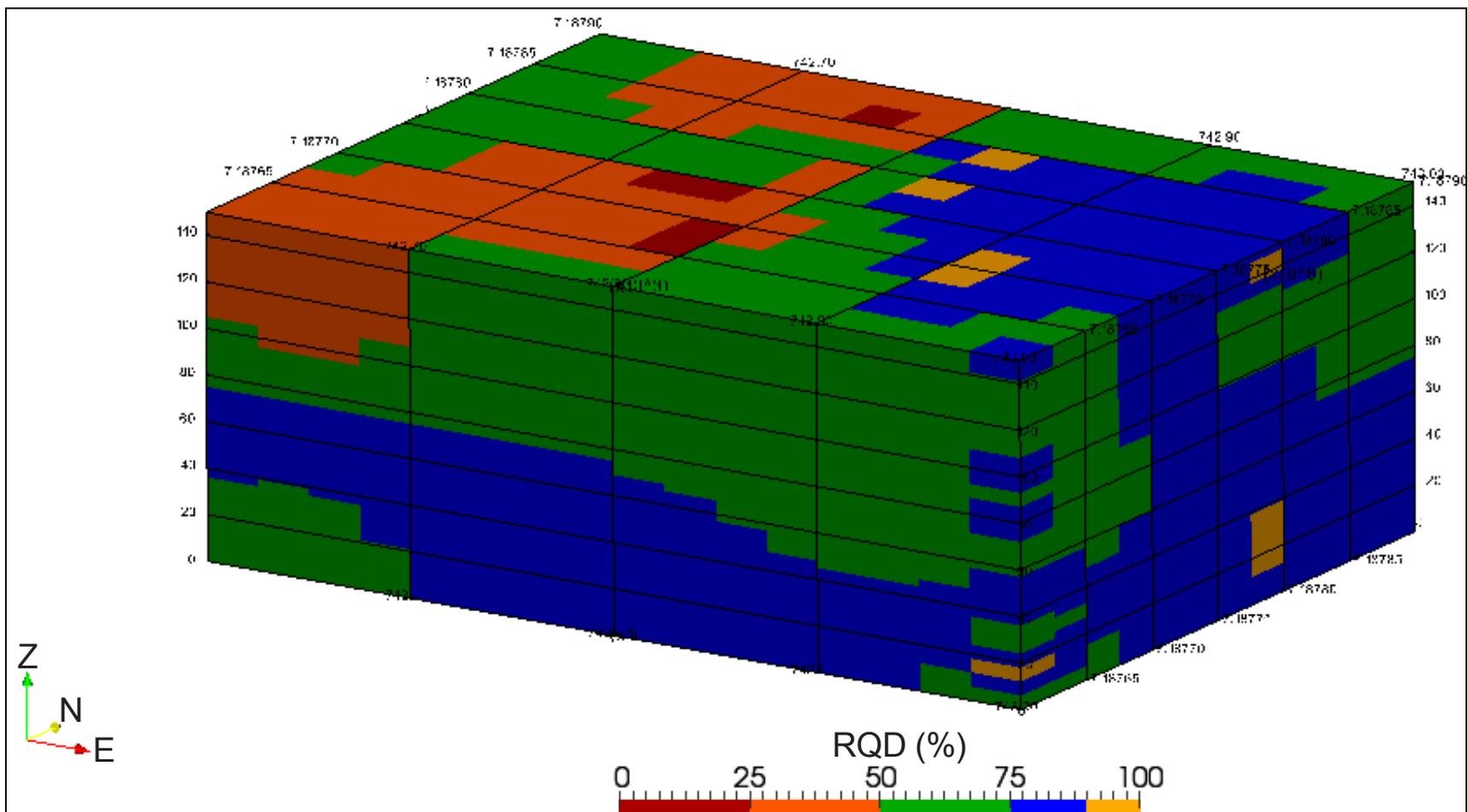


Figura 79-Vista do modelo com voxel de dimensão 25mx25mx3m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD.



#### **6.4.1.1 RQD de 0-25%**

Os valores de intervalo de RQD de 0-25% se apresentam nas porções NW e SW, entre as cotas de 150 a 90m (Figura 80), sendo que os pontos de entrada de dados com valores neste intervalo foram utilizados apenas nas porções SW e NW.

Nas porções SE, central e nas porções de profundidades maiores do modelo 3D, onde se encontram pontos de dados de entrada com este intervalo, não foram interpolados voxels com este intervalo. Isto pode ser justificado pela intercalação dos valores com outros valores de RQD nestas localidades, gerando no resultado da simulação 3D volumes com valores de RQD acima de 25%.

É importante considerar que foram geradas voxels com estes intervalos em porções onde não havia pontos de dados, principalmente na superfície central do modelo, entre as cotas de 160 a 120m. Este fato é verificado quando se compara a distribuição do intervalo de RQD de 0-25% da Figura 80 com a distribuição dos dados de entrada da Figura 78C.

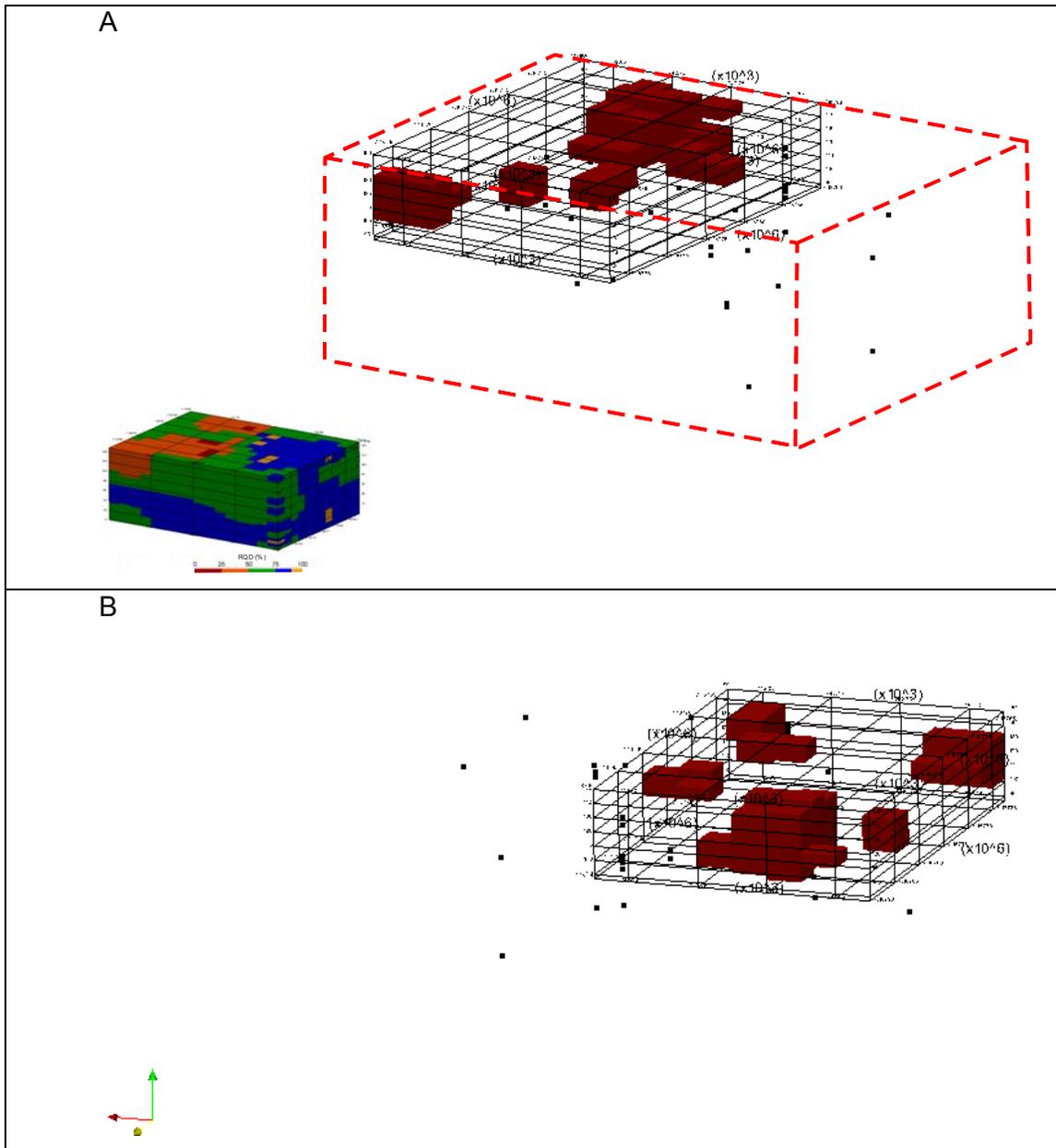


Figura 80- Vista do modelo com voxel de dimensão 25mx25mx3m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 0-25%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **6.4.1.2 RQD de 25-50%**

O intervalo de RQD de 25 a 50% se apresenta distribuído principalmente entre as cotas de 100 a 150m nas direções NW e SW, sendo que porções com volumes menores se distribuem a NE, entre as cotas de 60 e 100m, a SE entre cotas de 80 a 85m e 0 a 20m, e a SW, entre as cotas de 0 a 20m.

Observando a Figura 81, é possível verificar que os pontos de dados de entrada com valores de RQD neste intervalo não foram utilizados na interpolação que se localizam nas porções abaixo da cota 100m, a SW, NW e central do modelo 3D, além dos pontos encontrados nas porções a NE e SE. Ou seja, os únicos pontos de sondagens utilizados com estes valores foram a SW e NW, entre as cotas de 150 a 100m.

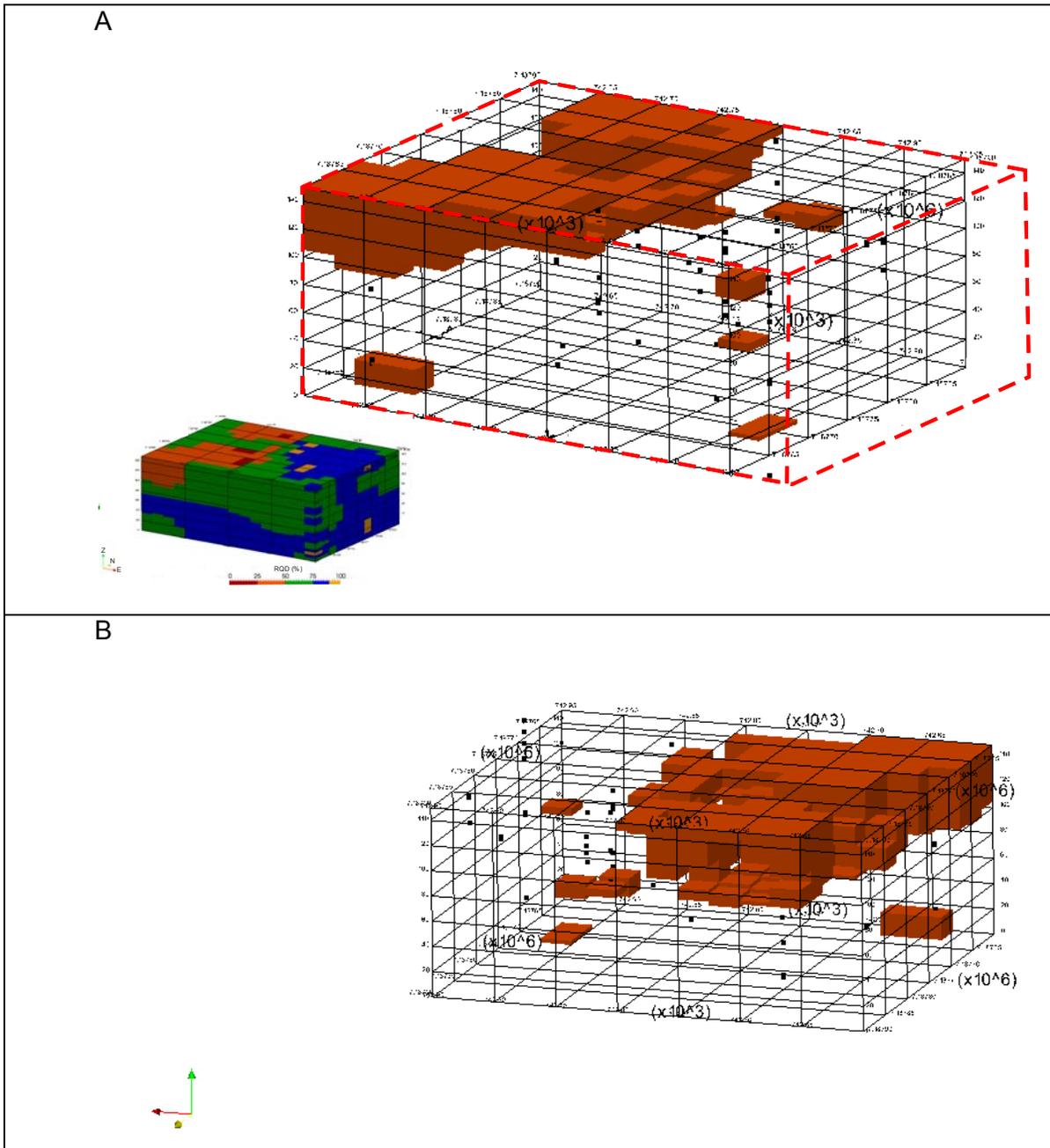


Figura 81- Vista do modelo com voxel de dimensão 25mx25mx3m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 25-50% - A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

### **6.4.1.3 RQD de 50-75%**

O intervalo de RQD de 50-75% foi o que apresentou o segundo maior volume de voxels distribuídos no modelo 3D. Encontra-se, principalmente, nas porções superficiais a intermediárias, entre as cotas de 150 a 60m, a NW, NE, SE e central do bloco diagrama. Nas porções SW, NW, SE e NE a distribuição destes volumes ocorrem da porção basal até atingir cotas próximas de 60 e 20m.

Em geral, todos os pontos de dados de entrada se apresentam englobados pelos valores deste intervalo de RQD, representado pela Figura 82, sendo que apenas nas porções basais central, SW e extremo SE, alguns destes pontos se apresentam sem interpolação de voxel de RQD 25-50%. Nestas porções foram interpolados valores de RQD superior a 75%.

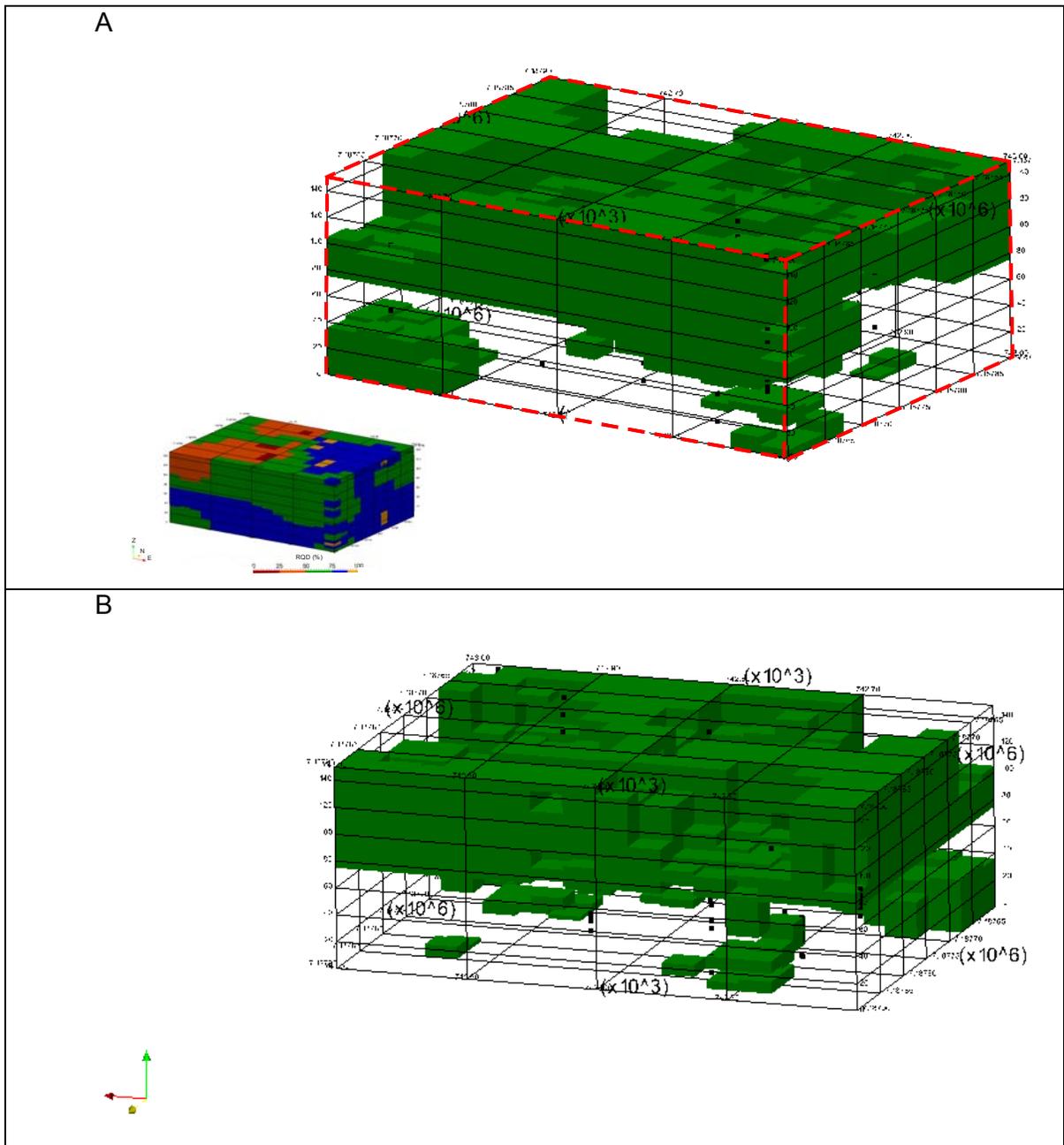


Figura 82- Vista do modelo com voxel de dimensão 25mx25mx3m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 50-75%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **6.4.1.4 RQD de 75-90%**

Este intervalo se apresenta como o volume predominante gerado pela simulação 3D de RQD e ocupou praticamente toda a porção intermediária a basal do bloco diagrama, entre as cotas de 75 a 0m (Figura 83).

Na porção SW e em uma pequena porção a SE, entre as cotas de 40 a 0m, os valores com este intervalo se intercalam com RQD de 25-75%, entre as cotas de 80 a 0m. Nas porções a SW, SE, NE e próximo ao centro do modelo, estes valores se intercalam com RQD superior a 90%, entre as cotas de 80 a 0m.

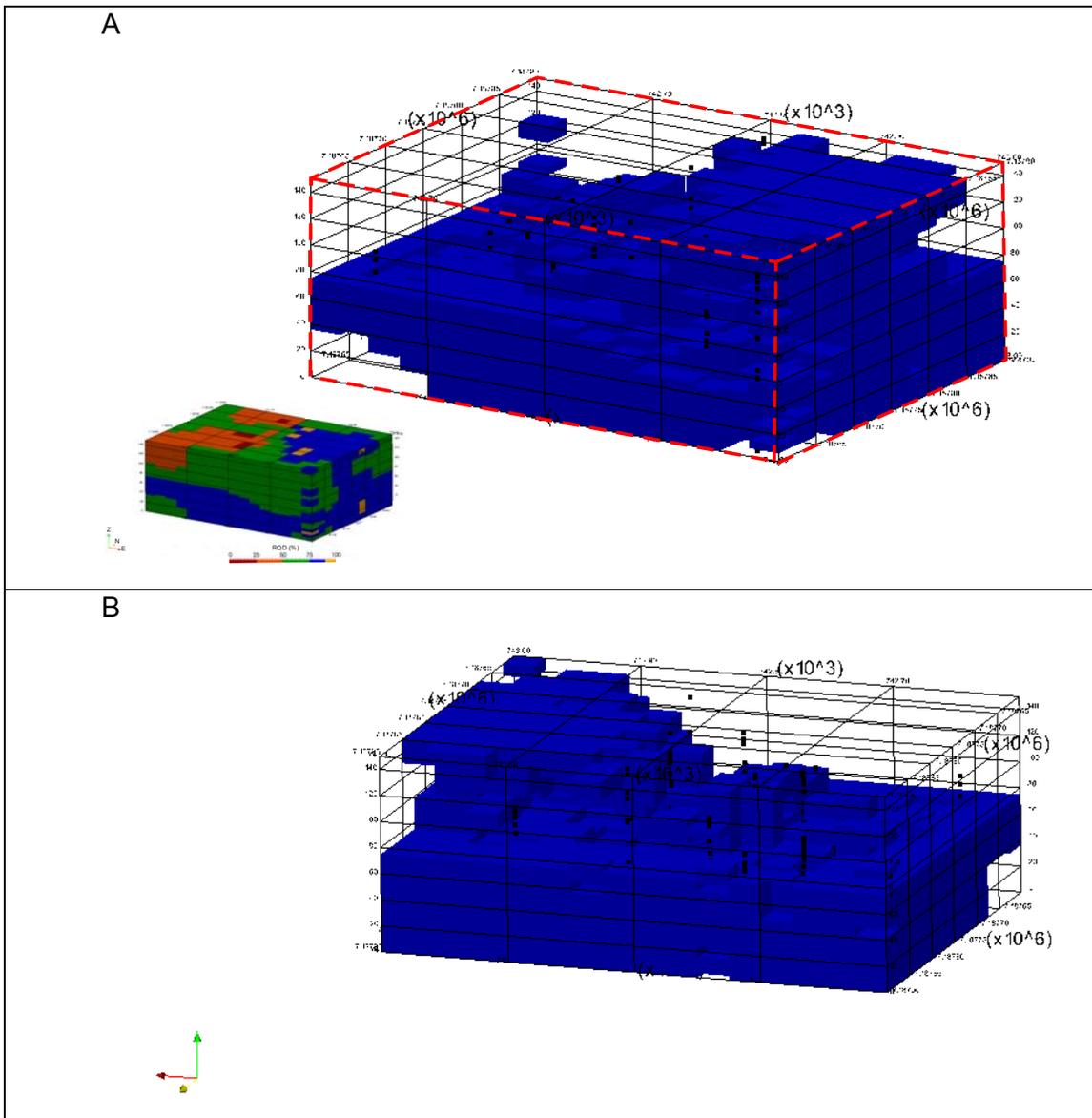


Figura 83- Vista do modelo com voxel de dimensão 25mx25mx3m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 75-90%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **6.4.1.5 RQD de 90-100%**

O volume de RQD com menor proporção foi o de 90 a 100% (Figura 84), apesar deste apresentar a maior porcentagem de dados de entrada para interpolação.

Este fato pode ter ocorrido devido a dimensão dos voxels para esta interpolação ser grande e pelo fato destes pontos de dados estarem intercalados com dados de RQD inferiores a 90%, o que levou a geração de valores de voxels menores que 90% utilizando pontos de dados de entrada com valores de RQD 90-100% situados a SW, NE e N.

A maior proporção do volume de RQD de 90-100% ocorre na porção central do modelo entre cotas de 80 a 0m, sendo em pequenas porções localizadas a NE, entre cotas de 150 a 130m, no centro, entre as cotas 40 a 20m, a NW, entre cotas de 130 a 90m, e a SE, entre cotas de 20 a 0m, onde são encontrados voxels com valores de RQD neste intervalo.

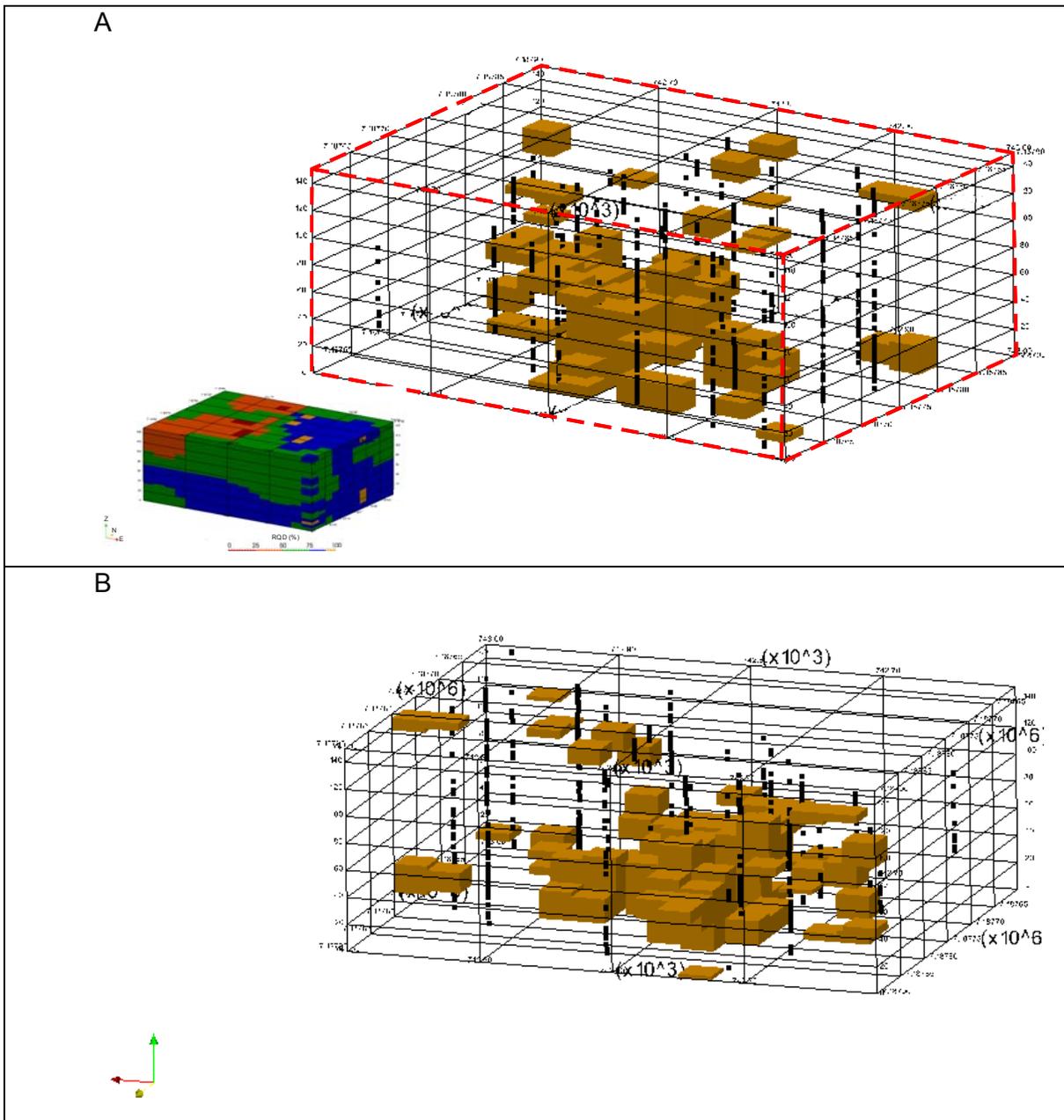


Figura 84- Vista do modelo com voxel de dimensão 25mx25mx3m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 90-100%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **6.4.2 Modelo 3D de RQD do Caso Específico- Voxel de 10mx10mx1m**

O modelo tridimensional de voxels de dimensões de 10mx10mx1m (Figura 85) foi simulado para se obter uma maior acurácia na distribuição dos intervalos de RQD, para que estes pudessem se aproximar mais da estatística dos pontos de dados de entrada e assim representar de maneira mais real a distribuição destes parâmetros na área.

Este modelo apresentou distribuição de volume com 7% de RQD com intervalo de 0-25%, 12,3% com intervalo de 25-50%, 32,5% com intervalo de 50-75%, 34% com intervalo de 75 a 90%, e 14,2% com intervalo de 90 a 100%.

Neste modelo as porcentagens intervalos como de 90 a 100% não chegam a ser tão próximas da estatística dos dados de entrada, porém, comparando-se este modelo com o descrito no item 6.4.1, este intervalo teve seu volume triplicado.

Observando a Figura 85 e ainda relacionando o modelo resultante desta simulação com o descrito no item 6.4.1, verifica-se a presença de valores de RQD de 75-90% distribuídos com volume predominante e intercalados por valores de RQD de 50-75% na superfície da porção central, SE e NE do modelo, entre as cotas de 160 a 130m, e nas porções intermediárias a basais a SW, entre as cotas de 0 a 30, a NW, entre as cotas de 160 a 80m, e a SE, entre cotas de 80 a 0m.

Na superfície a porção intermediária do modelo, entre as cotas de 160 a 100m, também ocorrem valores de RQD 50-75% a SW, NW, SE e NE, valores de RQD de 25-50% distribuídos a SW, NW e SE, e valores de RQD de 0-25% a NW e SE. Além da porção central, SE e NE desta porção, onde a presença de valores de RQD de 90-100%.

Voxels com valores de RQD de 90-100% também se apresentam intercalados com voxels de RQD 75-90% nas porções intermediárias a basais do modelo, entre as cotas de 80 a 0m, a SW, SE e NE.



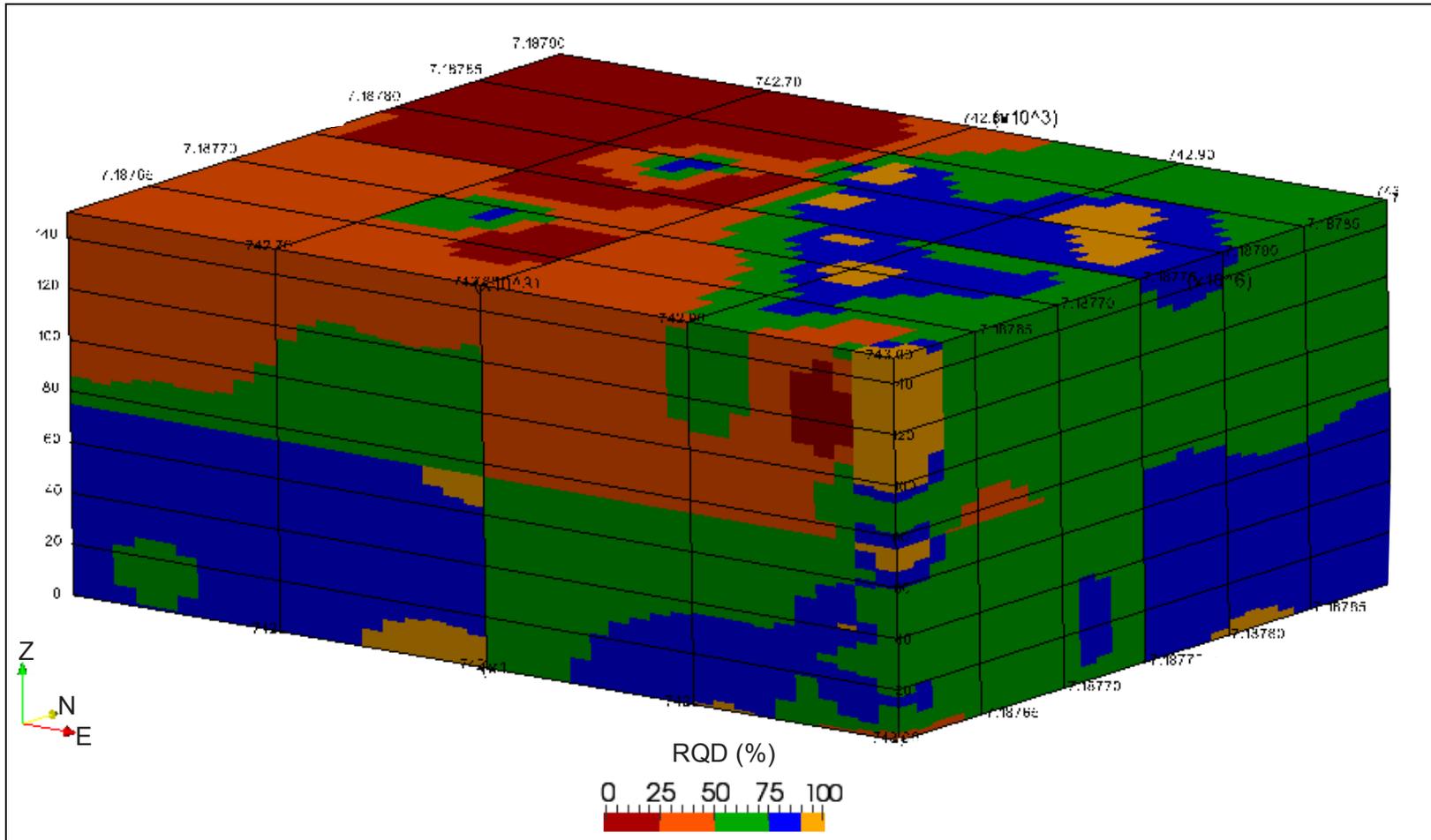


Figura 85- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD.



#### **6.4.2.1 RQD de 0-25%**

O intervalo de RQD de 0-25% apresentou volumes distribuídos principalmente nas porções NW a central do modelo 3D, entre as cotas de 150 e 80m (Figura 86). Além destas porções foram encontrados voxels com estes valores a SW, entre cotas de 150 a 110m, e a SE, entre cotas de 150 e 110m, 85 a 90m e 10 a 20m.

Relacionando este o intervalo de RQD de 0-25% deste modelo com o descrito no item 6.4.1.1 houve uma geração maior de voxels com estes valores na porção NW, ocupando toda a superfície desta, entre as cotas de 160 a 120m.

Além disto, foram utilizados na interpolação mais pontos de dados de entrada com este intervalo nesta simulação que a realizada para a geração do modelo do modelo descrito no item 6.4.1, principalmente nas porções central e SE do bloco diagrama.

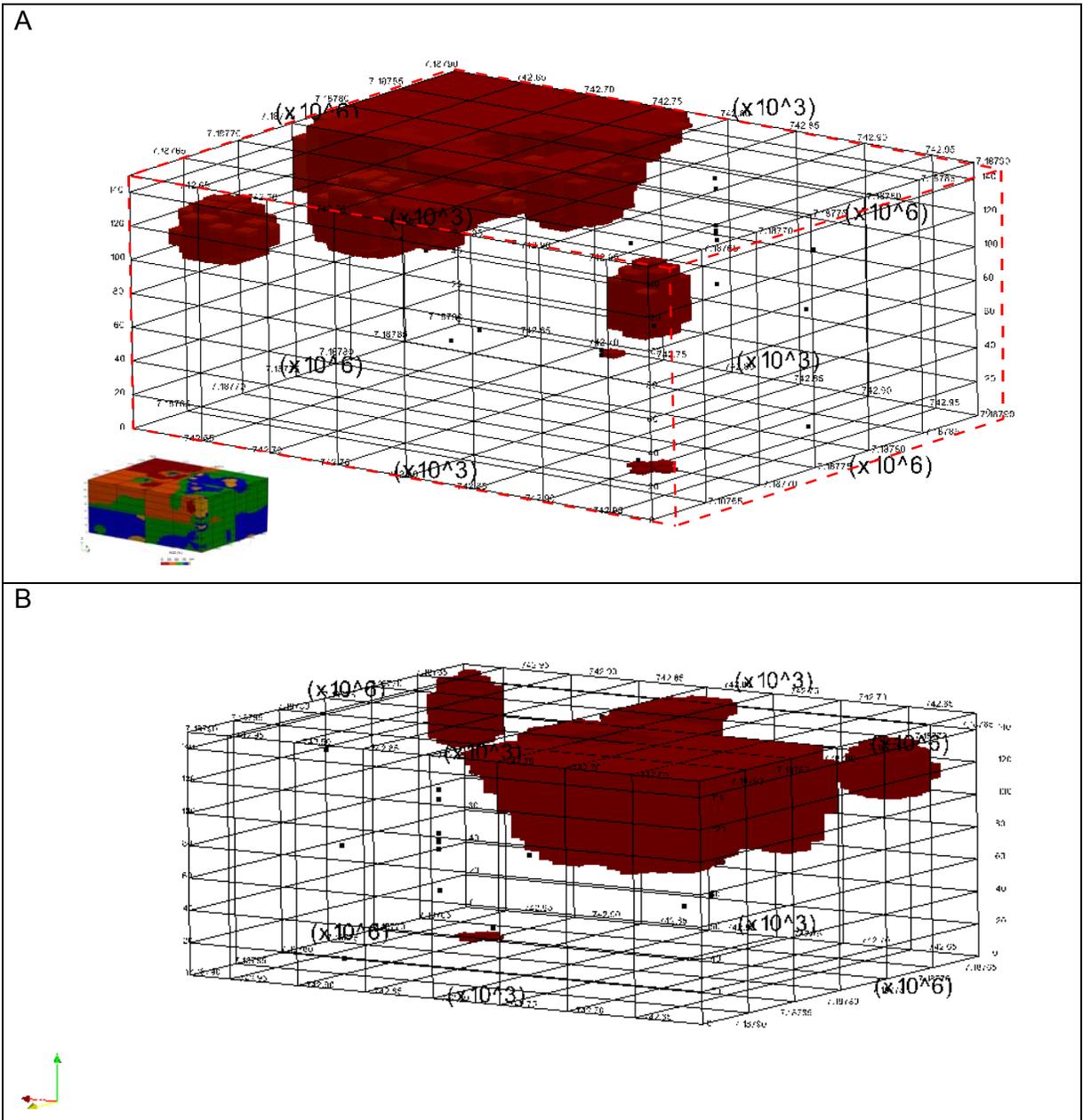


Figura 86- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 0-25%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **6.4.2.2 RQD de 25-50%**

A representação do intervalo de RQD de 25-50% para este modelo (Figura 87) evidencia a distribuição predominante nas porções SW, S e central, ocupando um volume não constante entre as cotas de 150 a 80m. Além de pequenas porções situadas a SW, entre cotas de 20 a 0m, central, entre 40 a 20m, a SE, entre cotas de 6 e 0m, e NE, entre cotas de 100 a 80m.

Com relação do modelo neste intervalo e o descrito no item 6.4.1.2 , há um aumento do volume na porção S e diminuição a NW. Entretanto, neste modelo foram utilizados na simulação 3D mais pontos com estes valores do que no modelo anterior, principalmente algumas sondagens com estes valores nas porções SE, NE e central do modelo.

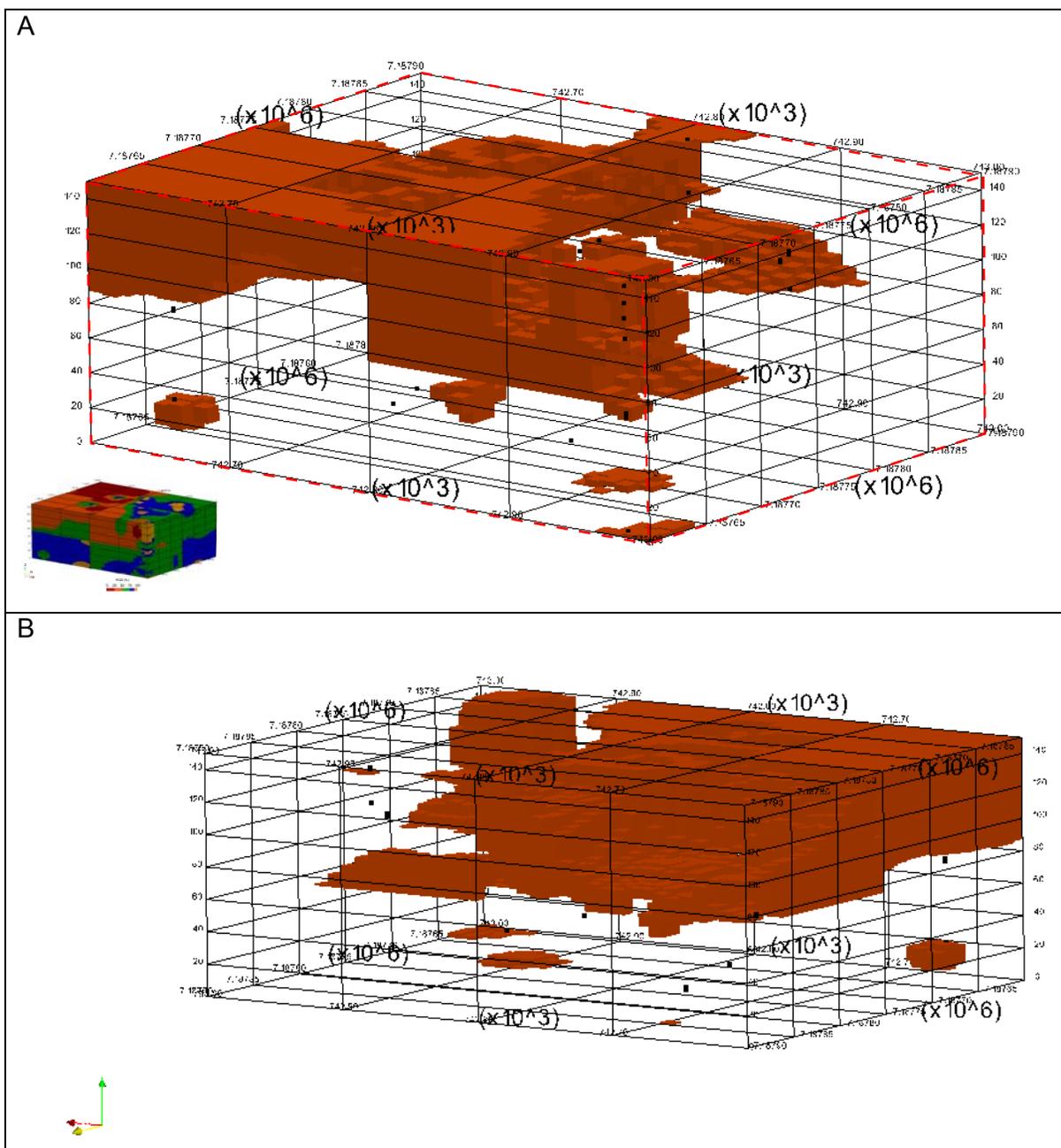


Figura 87- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 25-50%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

### 6.4.2.3 RQD de 50-75%

Este intervalo ocupa a segunda maior porcentagem do volume total do modelo 3D de RQD e se apresenta distribuído em todas as porções em cotas variáveis. Na porção a NE o volume de RQD de 50-75% se distribui, não constantemente, entre as cotas de 150 e 80m, e na porção basal, entre cotas de 0 a 6m (Figura 88).

A SE o volume distribuído ocorre do topo até a base do modelo simulado, porém próximo a base ele é representado por uma porção menor de voxels, onde são visualizadas cavidades, que são preenchidas por valores de RQD com intervalo de 75-90%.

Na porção SW ocorrem dois grupos de volumes distribuídos a intervalos de cotas diferentes, sendo que o primeiro apresenta maior proporção em volume, porém não representa uma distribuição constante tanto no eixo horizontal, como no vertical, se localizando entre a superfície do modelo e a cota próxima de 60m. O segundo grupo representa três porções de volumes com este intervalo que se distinguem pela distribuição a cotas diferentes, ou seja, entre as cotas de 30 a 0m, na porção mais extrema de SW, de 40 a 50m e de 20 a 50m, em porções mais próximas ao centro do modelo.

Nas porções NW e central, o volume gerado para este intervalo se apresentou com espessuras variáveis, desde porções superficiais a intermediárias, entre as cotas de 140 a 60m, até porções localizadas na base, entre cotas de 0 a 60m.

Em comparação com o modelo descrito no item 6.4.1.3 este apresentou um volume maior nas porções a SW e centro do bloco, entretanto, o volume descrito na porção superficial a NW e central do modelo de voxel com dimensão 25mx25mx3m deixa de existir neste. Ou seja, houve um aumento de volume a SE a maiores profundidades, porém, ocorreu diminuição na porção superficial a NW e central. E assim, a porcentagem do volume deste intervalo sobre o bloco diagrama todo é próxima nos resultados de ambas as simulações.

Neste resultado a maioria dos pontos de dados de entrada com este intervalo foram utilizados na simulação, com exceção da parte das sondagens localizadas a NW e em uma sondagem a SE.

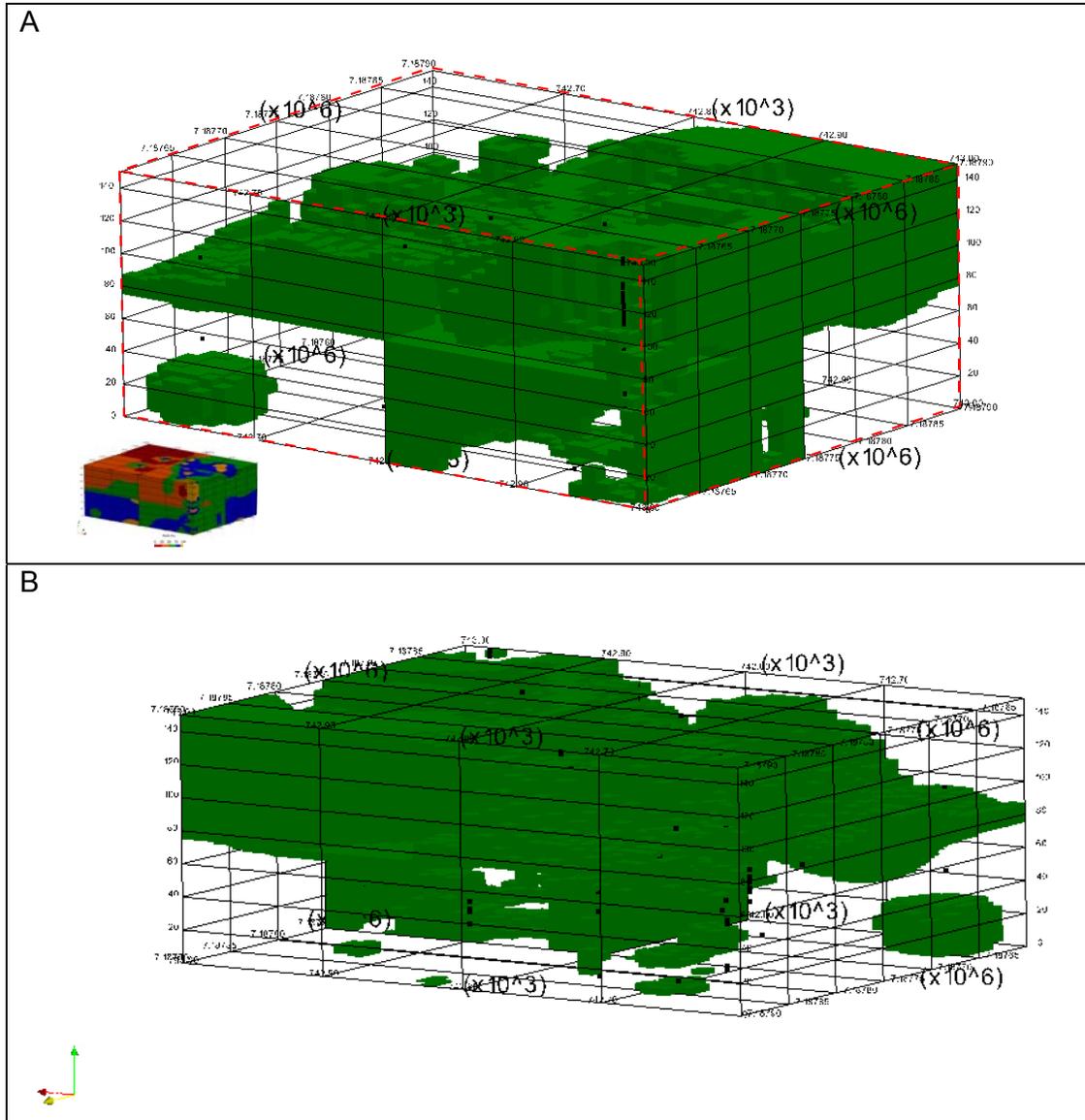


Figura 88-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 50-75% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **6.4.2.4 RQD de 75-90%**

Os valores de intervalo de RQD 75-90% apresentaram o maior volume distribuído neste bloco diagrama, sendo que ocorrem em quase toda porção intermediária a basal do modelo, entre as cotas de 80 a 0m (Figura 89).

Nas porções entre as cotas de 150 a 80m a distribuição deste intervalo ocorre predominantemente a SE e NE, e subordinadamente a SW, NW e centro-S da área. Entretanto, entre as cotas de 150 a 80m não ocorre volumes com valores de RQD com tal intervalo na porção extrema de NE.

Comparativamente com o modelo descrito no item 6.4.1.4 este apresenta uma menor proporção do volume total do bloco, decrescendo sua porcentagem aproximadamente de 50% para 34%, sendo que algumas das sondagens que continha tal intervalo não foram utilizadas nesta simulação, estas se localizam em porções a SE, NW e central do bloco diagrama.

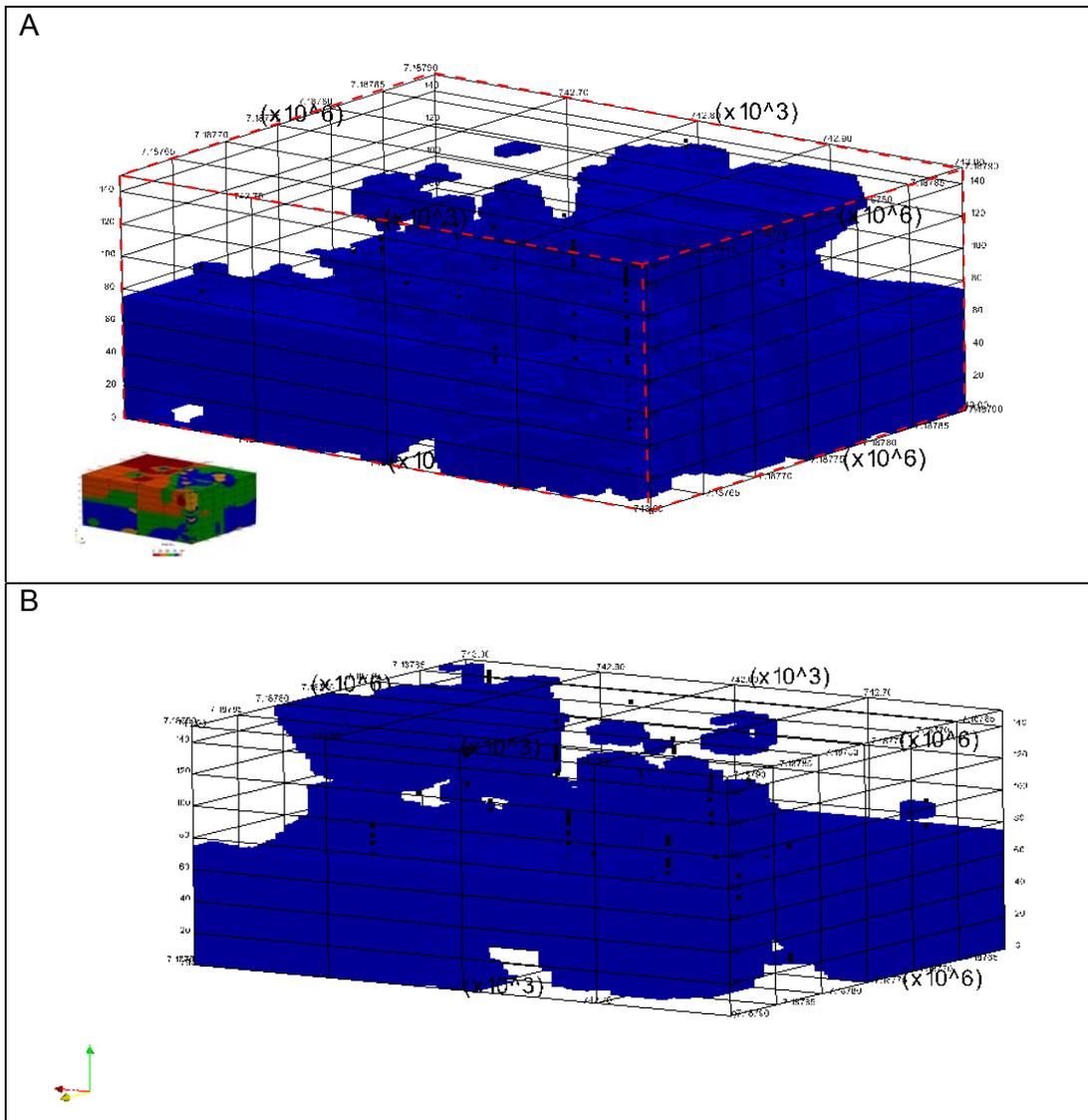


Figura 89-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 75-90% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **6.4.2.5 RQD de 90-100%**

Para o intervalo de RQD de 90-100% avaliado neste modelo, foi verificado que houve um aumento da porcentagem de volume de aproximadamente 5 para 14% do volume total, comparando o modelo com o apresentado no item 6.4.1.5.

Entretanto, mesmo com um volume superior muitos dos pontos de dados de entrada com valores de RQD neste intervalo não foram utilizados integralmente, principalmente nas porções SE e NE.

Houve uma maior interpolação destes valores em porções a SW, NW, SE e NE, se comparado com o modelo do item 6.4.1. Estes valores se distribuem predominantemente entre as cotas de 80 a 0m (Figura 90).

Contudo, esta distribuição não é homogênea nem ao longo do eixo vertical, quanto ao eixo horizontal. Nas porções extremas de SW, SE e NE a distribuição deste volumes é escassa, ou, simplesmente não ocorre.

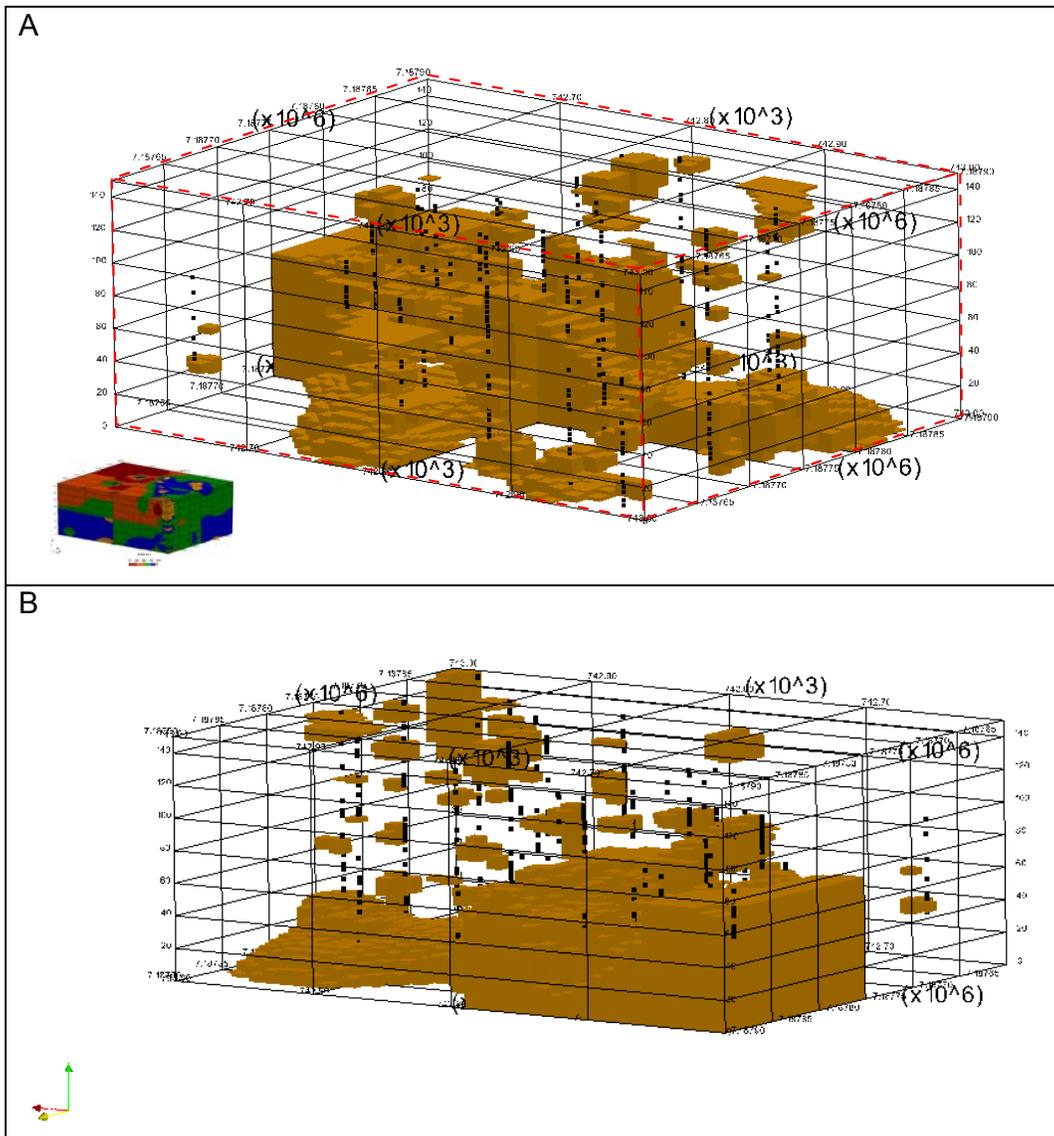


Figura 90- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 90-100% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

### **6.4.3 Modelo 3D de RQD do Caso Específico- Voxel de 10mx10mx1m com 7 sondagens não reais**

O terceiro modelo 3D de RQD simulado para a área de estudo de Caso Específico contou com a inserção de 7 pontos com valores de RQD, distribuídos verticalmente como os demais dados extraídos das sondagens rotativas.

A estes pontos foram atribuídos valores de RQD de 100%, localizados nas porções NW, SW, NE e SE, entre as cotas de 40 a 0m (Figura 91). Assim o número de sondagens utilizadas para a interpolação aumenta de 28 para 35.

A inserção de pontos com valor de RQD de categoria excelente, 100%, tem grande influência na simulação tridimensional na distribuição dos volumes com intervalos de 90 a 100%. Principalmente, porque as sondagens não reais ocupam porções onde não havia dados de entrada (Figura 91C), assim tornando a malha de amostragem mais homogênea nestas porções e com peso maior de atributos para interpolação 3D com valores de intervalo de RQD 90-100%.



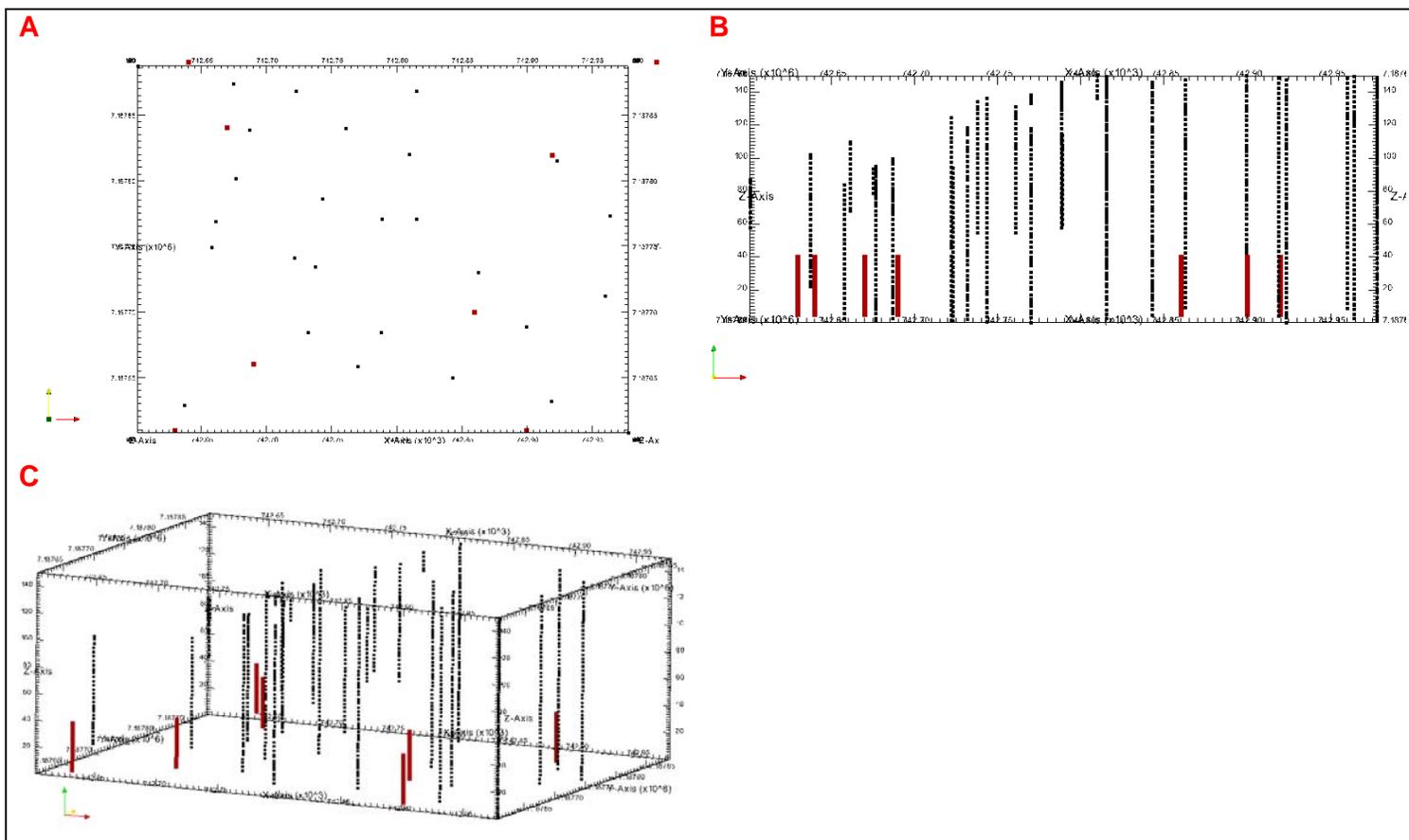


Figura 91-A) Vista em planta; B) Vista frontal da área da jusante para montante;C) Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição dos pontos das sondagens rotativas reais e não reais, de cor preta e vermelha, respectivamente.



Foi observado no modelo 3D de RQD interpolado com inserção de dados de sondagens falsas, que a distribuição dos voxels com valores de RQD foi diferente dos resultados apresentados nos itens 6.4.1 e 6.4.2, pois apresentou quantidade maior de voxels para intervalo de RQD 90-100%, localizado nas porções abaixo da cota 80m, a SW, SE e NE (Figura 92).

Este modelo apresentou volume do bloco 3D com 7% entre o intervalo de RQD 0-25%, 12,3% entre o intervalo de RQD de 25-50%, 30,2% entre o intervalo de RQD de 50-75%, 29% entre o intervalo de RQD de 75 a 90% e 21,5% entre o intervalo de RQD de 90 a 100%.

Tais porcentagens representam o aumento do volume de valores entre intervalo de RQD 90-100% com cerca do dobro dos resultados gerados no item 6.4.2, e ao mesmo tempo há diminuição de cerca de 1/5 do volume com intervalo de RQD 75-90% do modelo discutido no item 6.4.2 para este.







### 6.4.3.1 RQD de 0-25%

A distribuição deste intervalo não foi alterada, mantendo a porcentagem de volume no modelo igual ao do item 6.4.2.1.

A distribuição de voxels com tal intervalo de RQD ocorre predominantemente a NW, entre cotas de 150 a 80m, e em pequenas porções a SE, SW e central do modelo, entre cotas de 150 a 100m, e a SE e NE, entre as cotas de 0 a 6m (Figura 93).

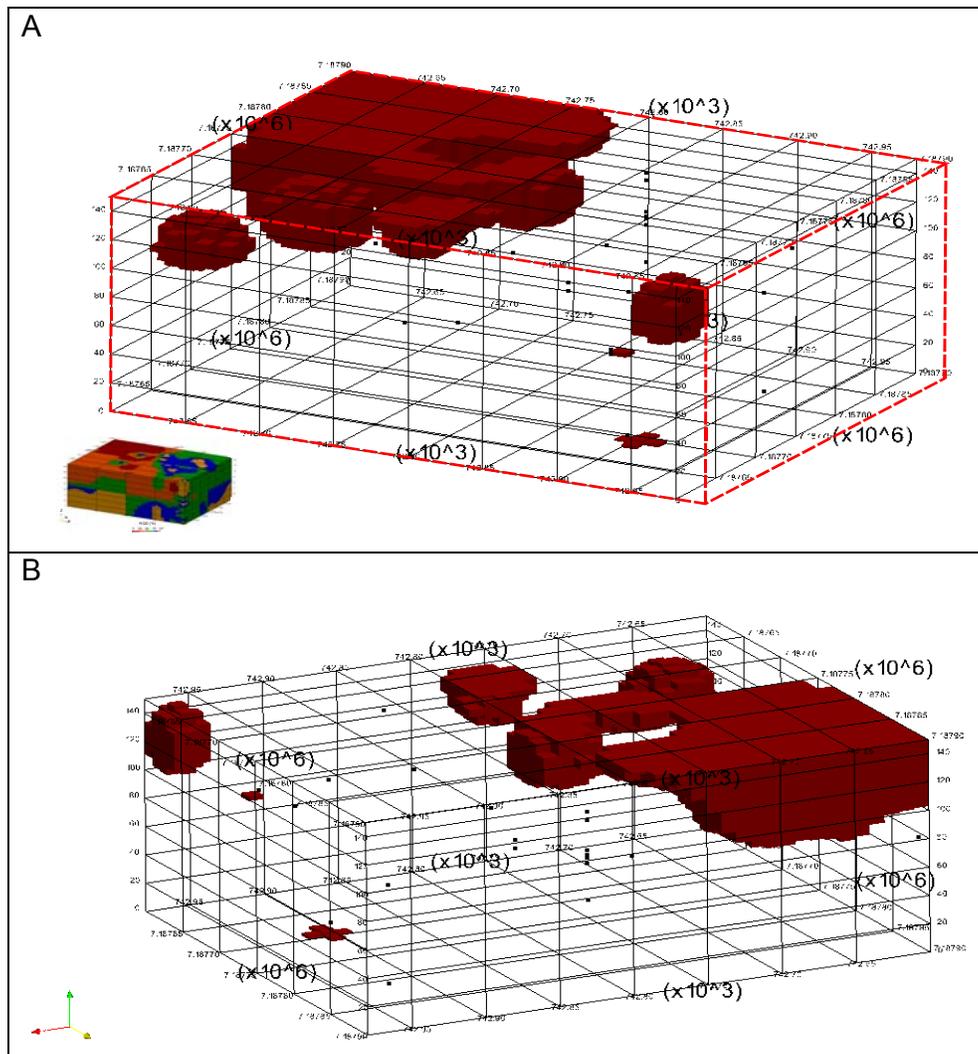


Figura 93- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com sondagens não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 0-25% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

### 6.4.3.2 RQD de 25-50%

Neste modelo o intervalo de 25-50% de RQD (Figura 94) se apresenta distribuídos com as mesmas localizações e volumes que o modelo 3D apresentado no item 6.4.2.

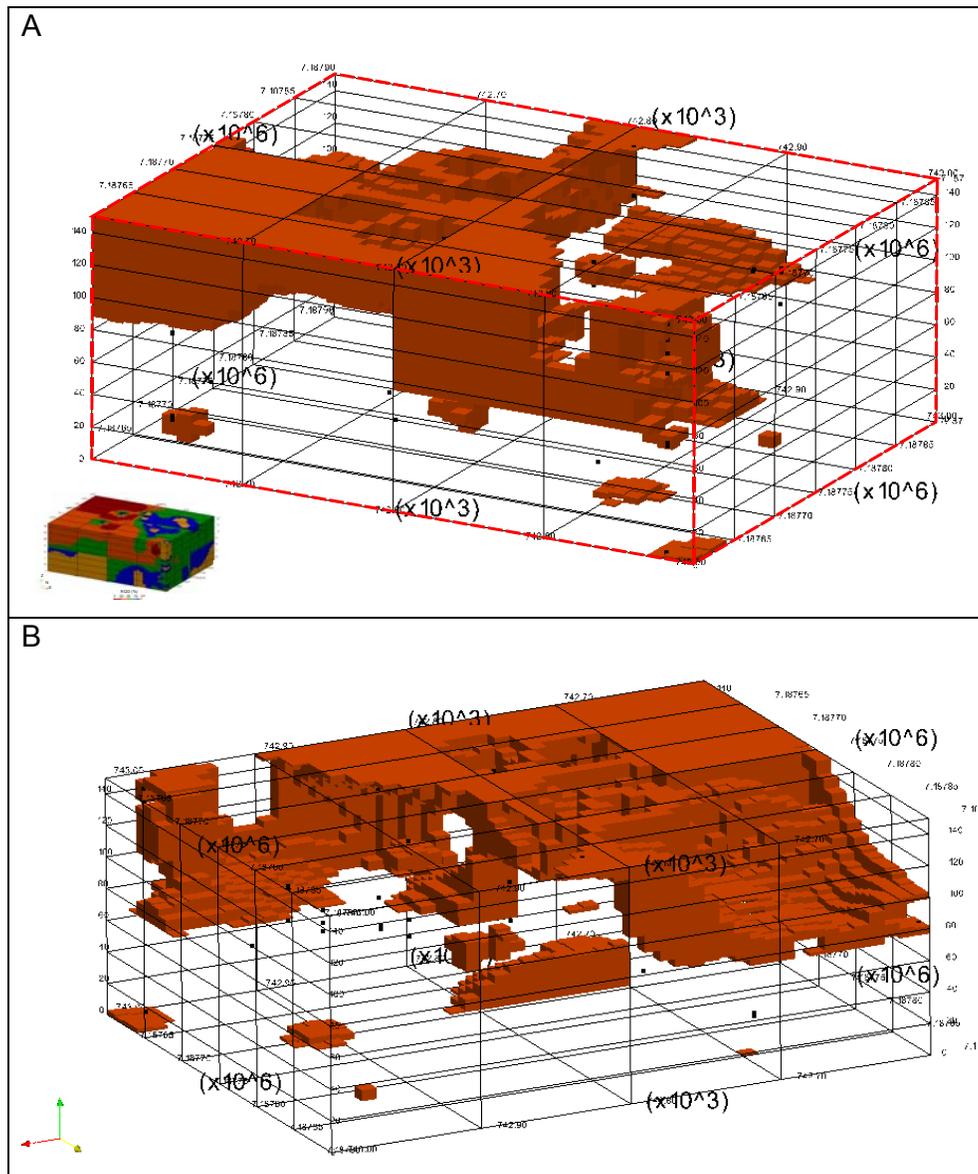


Figura 94-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com sondagens não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 25-50% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

### 6.4.3.3 RQD de 50-75%

Neste modelo o intervalo de RQD de 50-75% apresenta maior porcentagem de volume de RQD para o modelo 3D interpolado com inserção de sondagens não reais. A distribuição dos voxels com estes valores ocupa desde a cota 150 até 80m, com predomínio nas porções de SE e NE, mas subordinadamente nas porções NW e SW (Figura 95).

À profundidades intermediárias a basais, entre as cotas de 80 a 0m, a distribuição destes valores tem menor proporção que no pacote superior, de 150 a 80m, se distribuindo predominantemente a SE, além de pequenas porções a NW, SW e, subordinadamente, a NE.

Todos os pontos de dados de entrada com valores neste intervalo localizados da porção superficial a intermediária do bloco, entre 150 a 80m, foram utilizados na interpolação deste intervalo. Entretanto, alguns pontos de dados de entrada localizados a SW, NW e SE, abaixo da cota 80m, não foram utilizados na simulação do modelo para geração de valores que representariam este intervalo.

A SE o volume ocorre distribuído do topo até a base do bloco diagrama, sendo que próximo a base são visualizadas cavidades onde não apresentam voxels para estes intervalos. Tais cavidades são preenchidas por valores de RQD de 75-90%.

Na porção SW ocorrem dois grupos de volumes distribuídos a intervalos de cotas diferentes, sendo que o primeiro apresenta maior proporção, porém não representa uma distribuição homogênea no eixo horizontal e vertical, se localizando entre cotas de 150 a 60m. O segundo grupo representa três porções de voxels com este intervalo, que se distinguem pela distribuição em cotas diferentes, entre as cotas de 30 a 0m, na porção mais extrema de SW, entre as cotas de 40 a 50m, em porções centrais, e entre as cotas 20 a 50m, a SE do modelo.

Comparando este modelo com o apresentado no item 6.4.2.3, houve uma diminuição de volumes de voxels com RQD 50-75% nas porções intermediárias a basais, entre as cotas 30 a 0m, a SW e SE, e um aumento deste voxels na porção NE do modelo, entre as cotas de 64 a 0m.

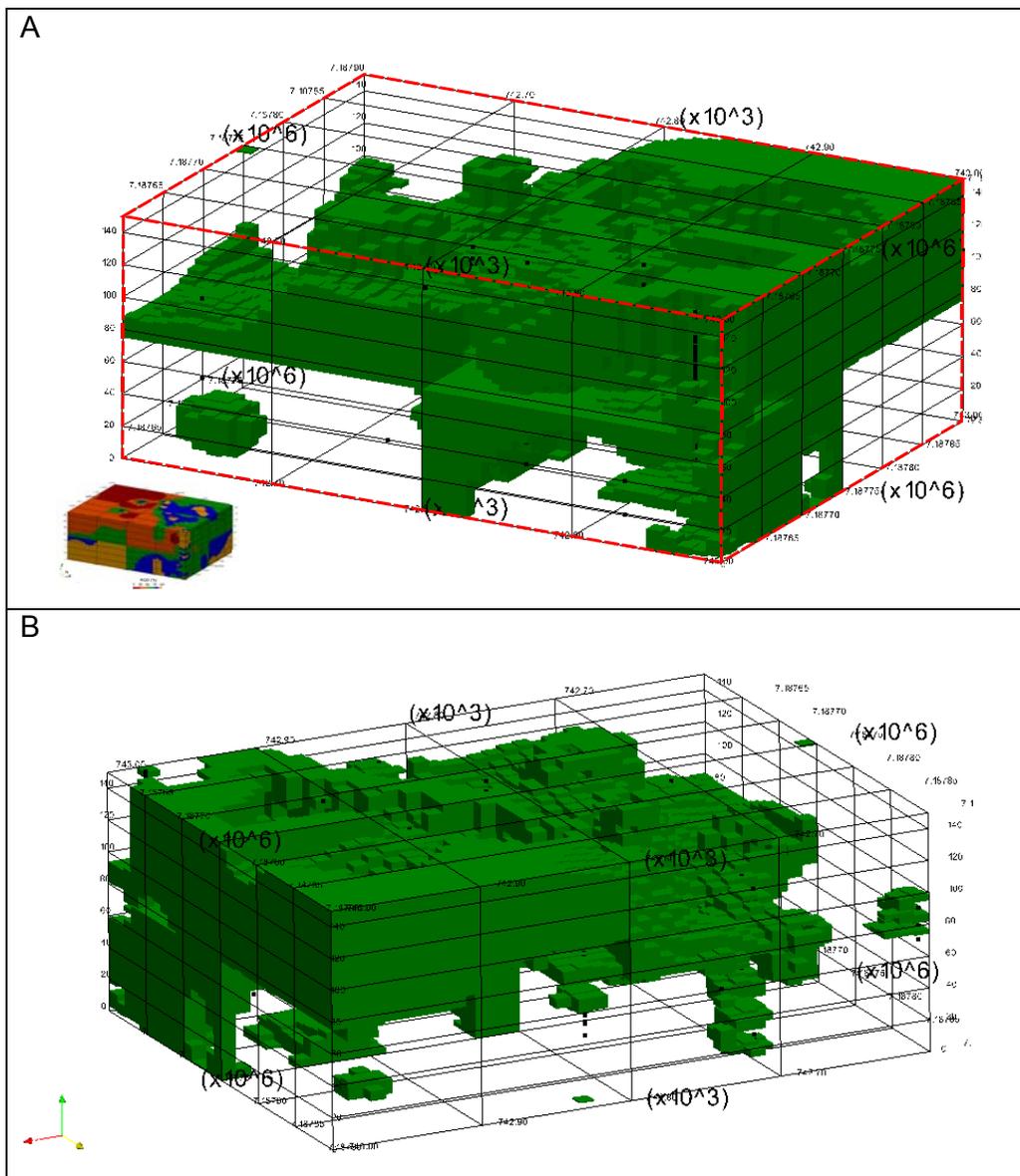


Figura 95-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com sondagens não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 50-75% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **6.4.3.4 RQD de 75-90%**

Os valores de RQD com intervalo entre 75-90% sofreram maior decréscimo de volume nesta simulação tridimensional (Figura 96). Este decréscimo ocorreu nas porções intermediárias a basais, entre as cotas de 0 a 80m, a SW, NW e NE, sendo que sua distribuição predominante foi nas porções SW e NW, entre cotas aproximadas de 80 a 0m, na porção central, entre cotas de 140 a 10m, a NE, entre intervalos de cotas 80 a 0m e 150 a 110m, e a SE, entre intervalos de cotas de 80 a 0m e 150 a 120m.

Na porção SW, entre cotas de 150 a 80m, alguns pontos de dados de entrada com valores neste intervalo de RQD não foram utilizados na interpolação de voxel do RQD 75-90%. Este fato teve sua constatação devido a comparação entre este modelo 3D e o apresentado no item 6.4.2.4.

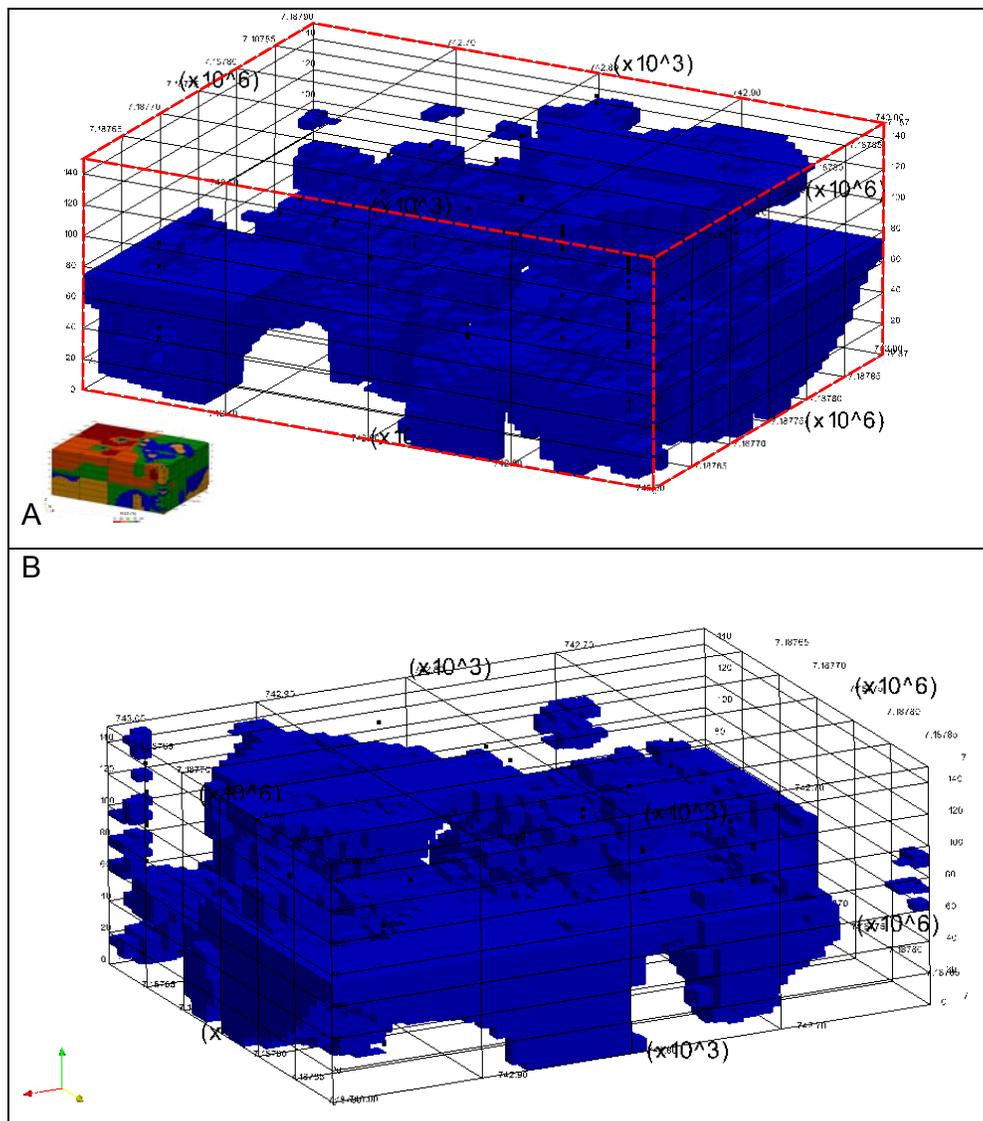


Figura 96-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com sondagens não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 75-90% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **6.4.3.5 RQD de 90-100%**

Observar a distribuição dos valores RQD de 90-100% foi o objetivo principal da simulação deste modelo, pois analisando os modelos descritos nos itens 6.4.1 e 6.4.2 verificou-se que neste intervalo de RQD apresentava-se porcentagens menos próximas das analisadas pela estatística dos dados de entrada para a área do estudo de Caso específico.

Analisando este modelo foi possível constatar que de fato houve um sucessivo aumento no volume de RQD de 90-100% nas porções intermediárias a basais do modelo, entre as cotas de 80 a 0m, principalmente a SW e NE (Figura 97).

Os pontos de dados provenientes das sondagens não reais tiveram grande influência na geração destes volumes, sendo que todos os pontos de dados não reais foram utilizados na simulação, pois se apresentam inseridos dentro dos voxels gerados com estes valores de RQD.

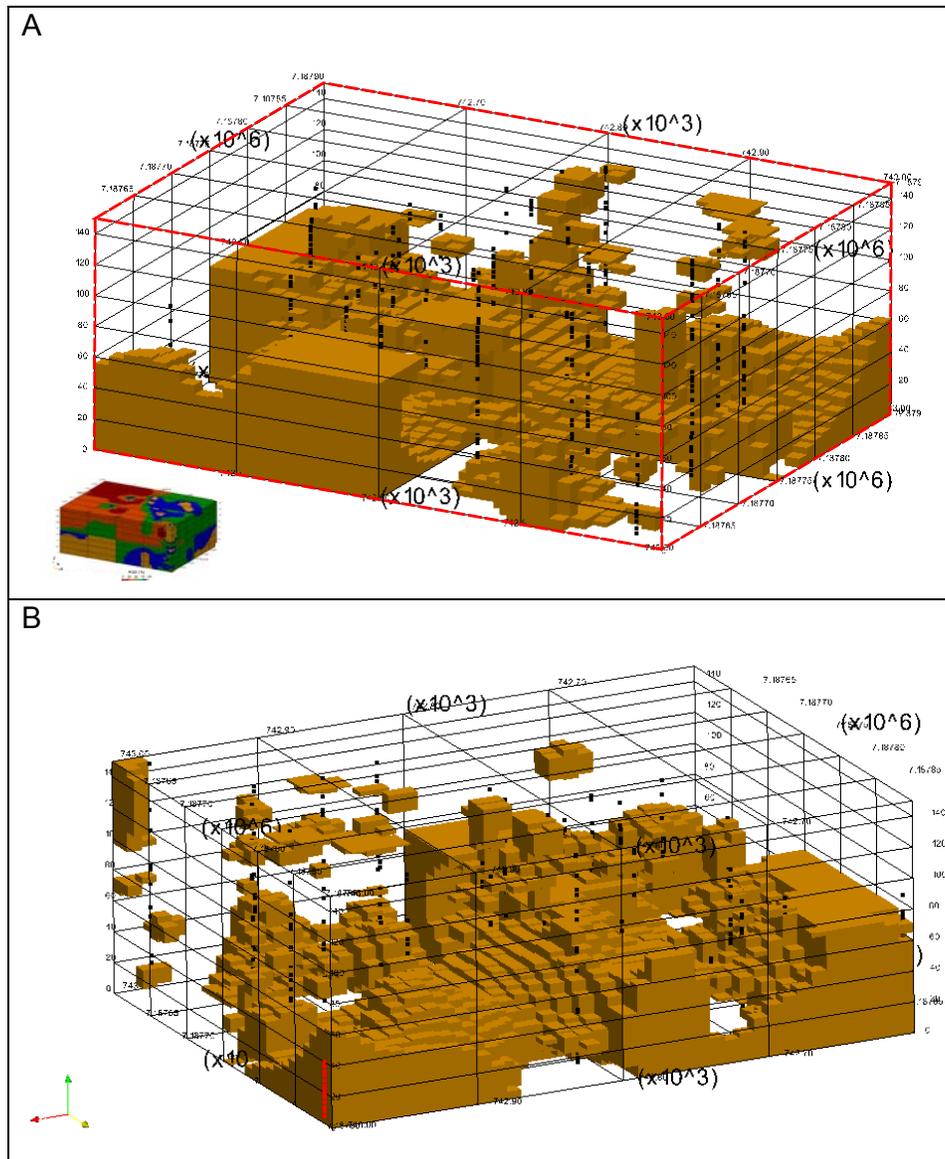


Figura 97- Vista do modelo com voxel de dimensões 10mx10mx1m com sondagens não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 90-100% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **6.4.4 Modelo 3D de RQD do Caso Específico- Voxel de 10mx10mx1m com exclusão 4 sondagens reais e 1 falsa**

Para a realização da simulação deste modelo foram retiradas 4 sondagens rotativas reais e uma não real, pois estas se apresentavam pouco espaçadas de outros pontos de sondagens. A localização de tais pontos retirados do banco de dados se encontra ilustrada pela Figura 98.

A simulação deste modelo tridimensional de RQD apresentou volumes com 9,9% entre o intervalo de RQD de 0-25%, 12,3% entre o intervalo de RQD 25-50%, 28,87% entre o intervalo de RQD 50-75%, 31,85% entre o intervalo de RQD 75-90% e 17,08% entre o intervalo de RQD 90-100%.

Foi possível constatar que com a retirada destes pontos houve uma modificação da distribuição das porcentagens dos intervalos de RQD se comparado com o item 6.4.3, principalmente no intervalo de 90-100%, que sofreu um decréscimo, no intervalo de 75-90%, onde houve aumento da sua porcentagem, e no intervalo de 0-25%, que apresentou aumento percentual de seu volume.



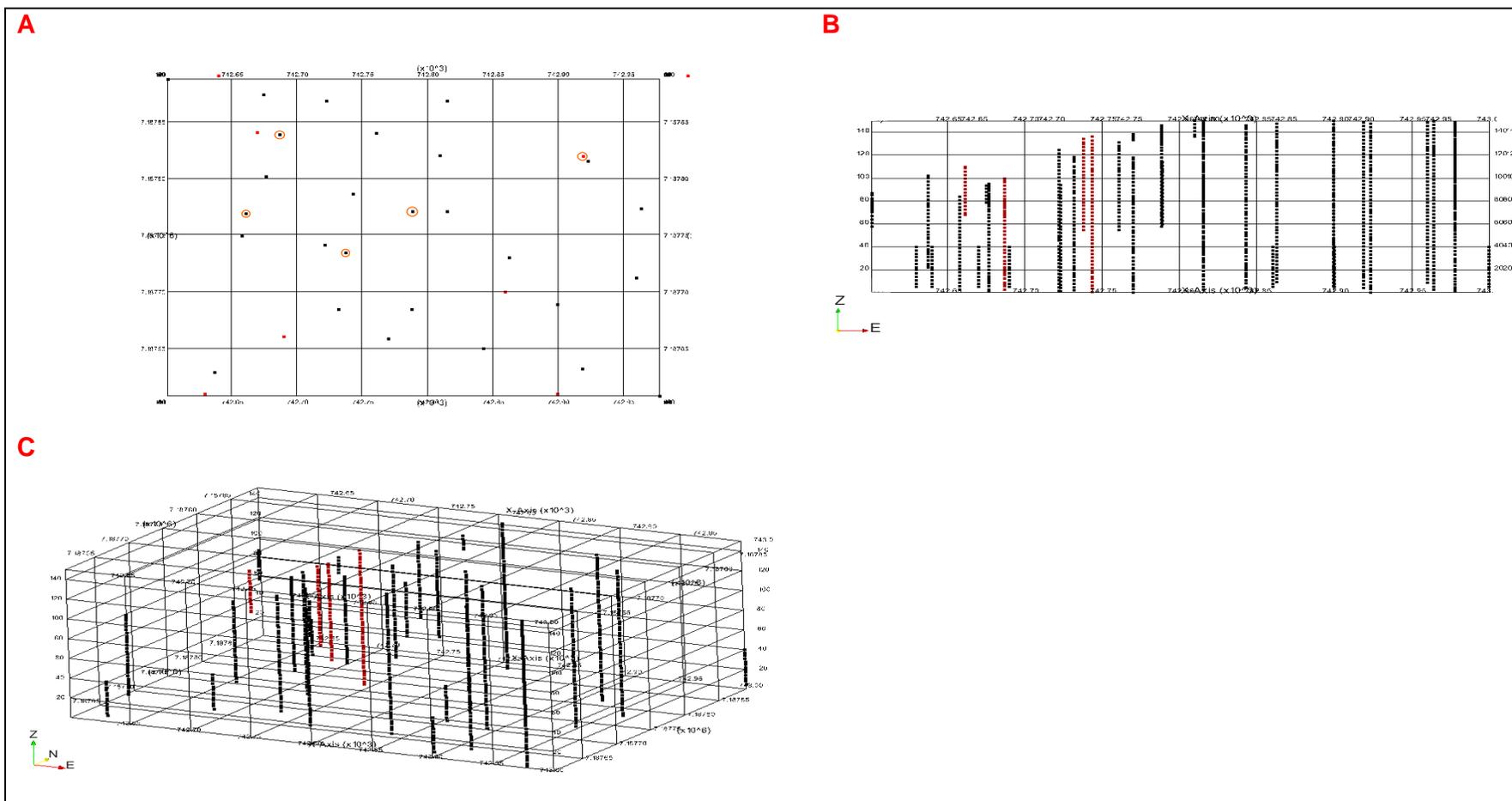


Figura 98-A) Vista em planta;B) Vista frontal da área da jusante para montante;C) Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição dos pontos das sondagens rotativas reais e não reais retirados e mantidos para interpolação, de cor vermelha e preta, respectivamente.



As distribuições de RQD para este modelo apresentam uma diferença visível em sua superfície se correlacionada com o modelo do item 6.4.3, ocorrendo aumento na porção a NW desta superfície de valores de RQD 0-25%, locais onde na simulação anterior (Figura 93) apresentavam porções de RQD 50-75% intercaladas a valores de 75-90%. Também pode-se verificar que houve a diminuição do volume de intervalo de 90-100% na porção intermediária a basal a SW, tais valores foram substituídos por valores de RQD 75-90% (Figura 99).

Tal fato deve ter ocorrido devido às sondagens excluídas serem compostas por pontos de dados com valores de RQD altos, com predomínio de valores maiores que RQD 90%, que nas simulações anteriores eram utilizados na interpolação dos voxels de RQD 90 a 100%, encontrados na porção intermediária a basal de SW.







#### **6.4.4.1 RQD de 0-25%**

Nesta simulação o intervalo de 25-50% se distribui nas mesmas porções que os demais modelos interpolados anteriormente no item 6.4.3.1.

Entretanto, houve um aumento de volume nas porções superficiais a SW e centro do modelo, entre as cotas de 160 a 100m, e diminuição de voxels com este intervalo na porção extrema a NW, entre as cotas aproximadas de 160 a 95m (Figura 100).

Os pontos de dados de entrada utilizados na interpolação de voxels com intervalo de 0-25% foram os mesmo utilizados nas interpolações dos modelos descritos nos itens 6.4.1, 6.4.2 e 6.4.3. Ou seja, mesmo com o aumento da porcentagem de volume para este intervalo não houve a utilização de pontos de dados a mais que nos outros modelos descritos.

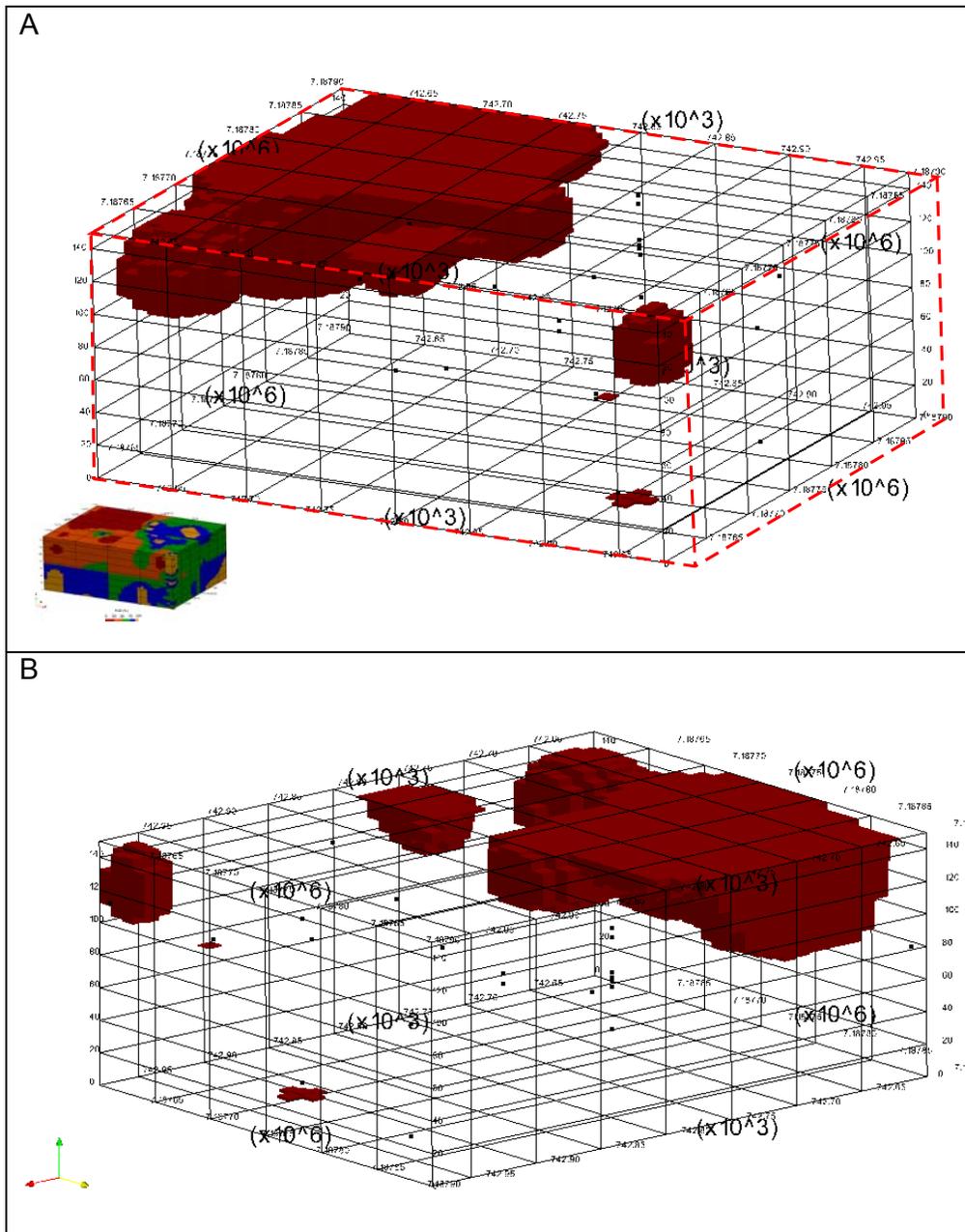


Figura 100-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m e exclusão de 4 sondagens reais e uma não real do estudo de Caso Especifico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 0-25% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **6.4.4.2 RQD de 25-50%**

Em geral a distribuição dos volumes neste intervalo ocupou as mesmas porções do modelo do item 6.4.3, ou seja, predomínio da distribuição a SE, SW, NW e N, entre as cotas de 150 a 80m (Figura 101).

Porém a SW houve um aumento no volume deste intervalo, entre as cotas de 120 a 80m, e a NW, entre as cotas de 150 a 130m, sendo que no extremo desta mesma porção, entre as cotas de 120 a 80m, este intervalo deixa de existir. A mesma situação ocorre a SW, entre as cotas de 140 a 120m, onde se apresentam cavidades geradas pela ausência de voxels deste intervalo.

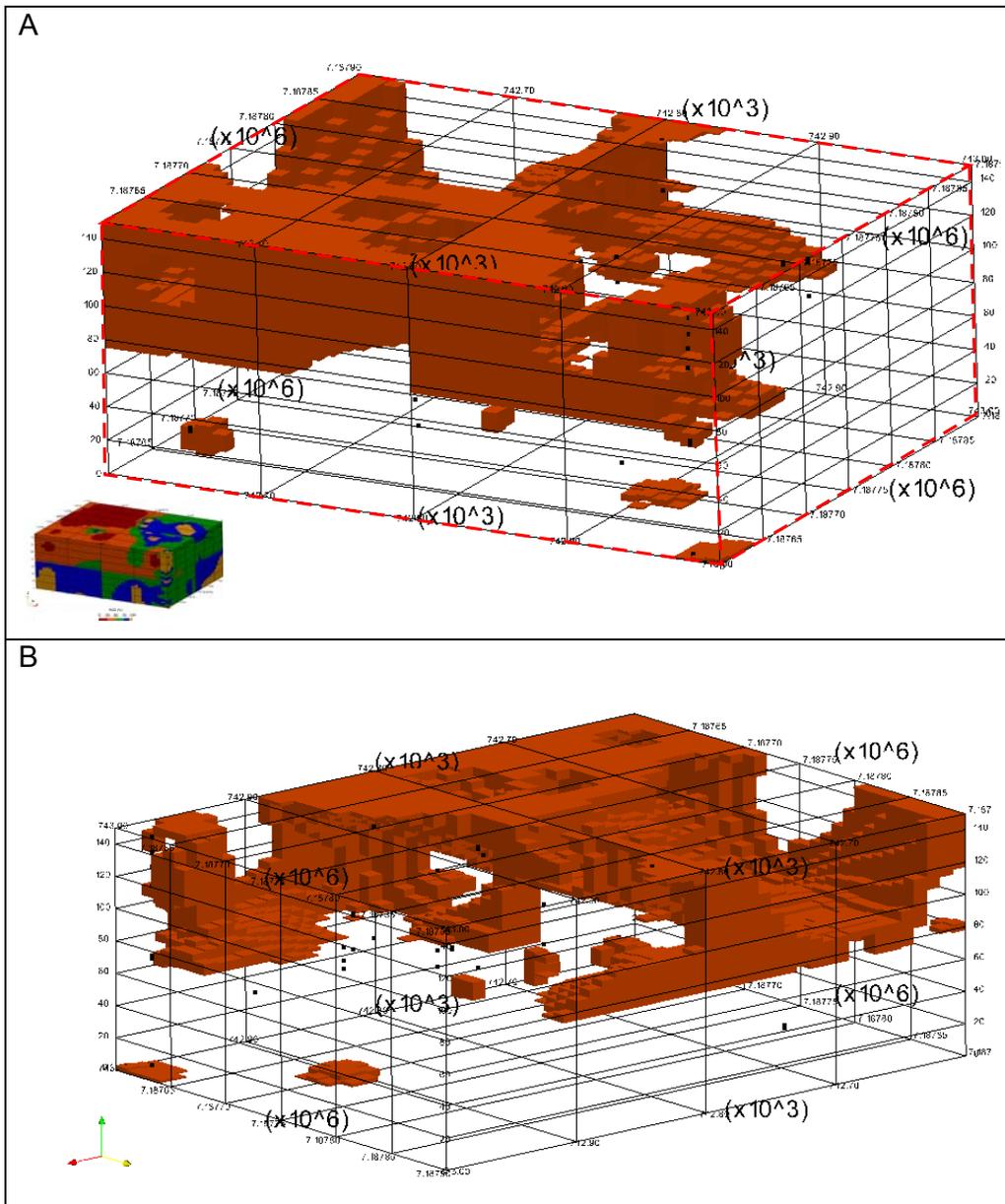


Figura 101-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m e exclusão de 4 sondagens reais e uma não real do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 25-50% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

### 6.4.4.3 RQD de 50-75%

Este intervalo basicamente se apresentou distribuído nas mesmas porções que o do modelo descrito anteriormente no item 6.4.3. Porém, houve uma diminuição dos voxels da superfície representadas neste modelo nas porções SW, NW e NE, acima da cota de 80m (Figura 102).

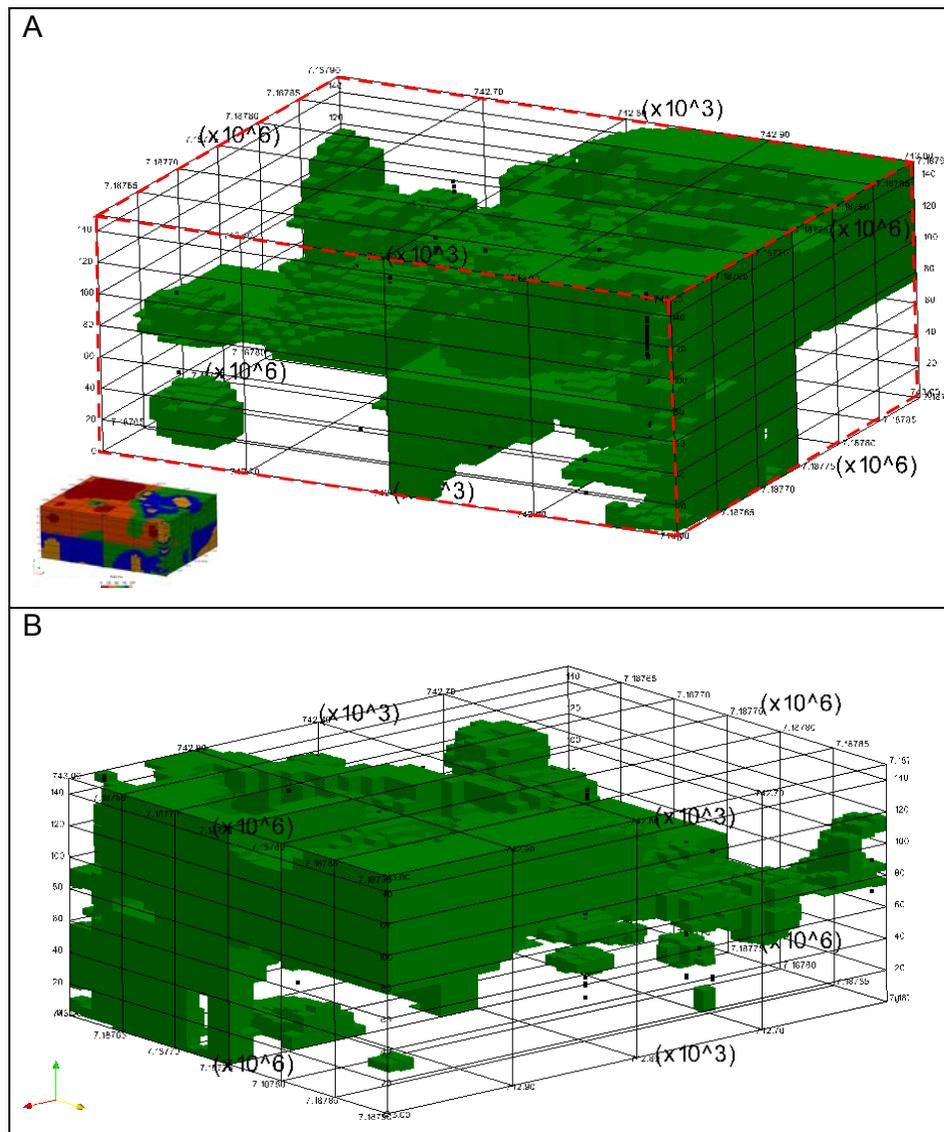


Figura 102-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m e exclusão de 4 sondagens reais e uma não real do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 50-75% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### 6.4.4.4 RQD de 75-90%

Este intervalo se apresentou distribuído nas mesmas porções que o do modelo descrito anteriormente no item 6.4.3., exceto por ter ocorrido diminuição no volume de voxels nas porções a SW, entre as cotas de 80 a 40m, e a NW, entre as cotas de 120 a 80m e de 30 a 0m (Figura 103).

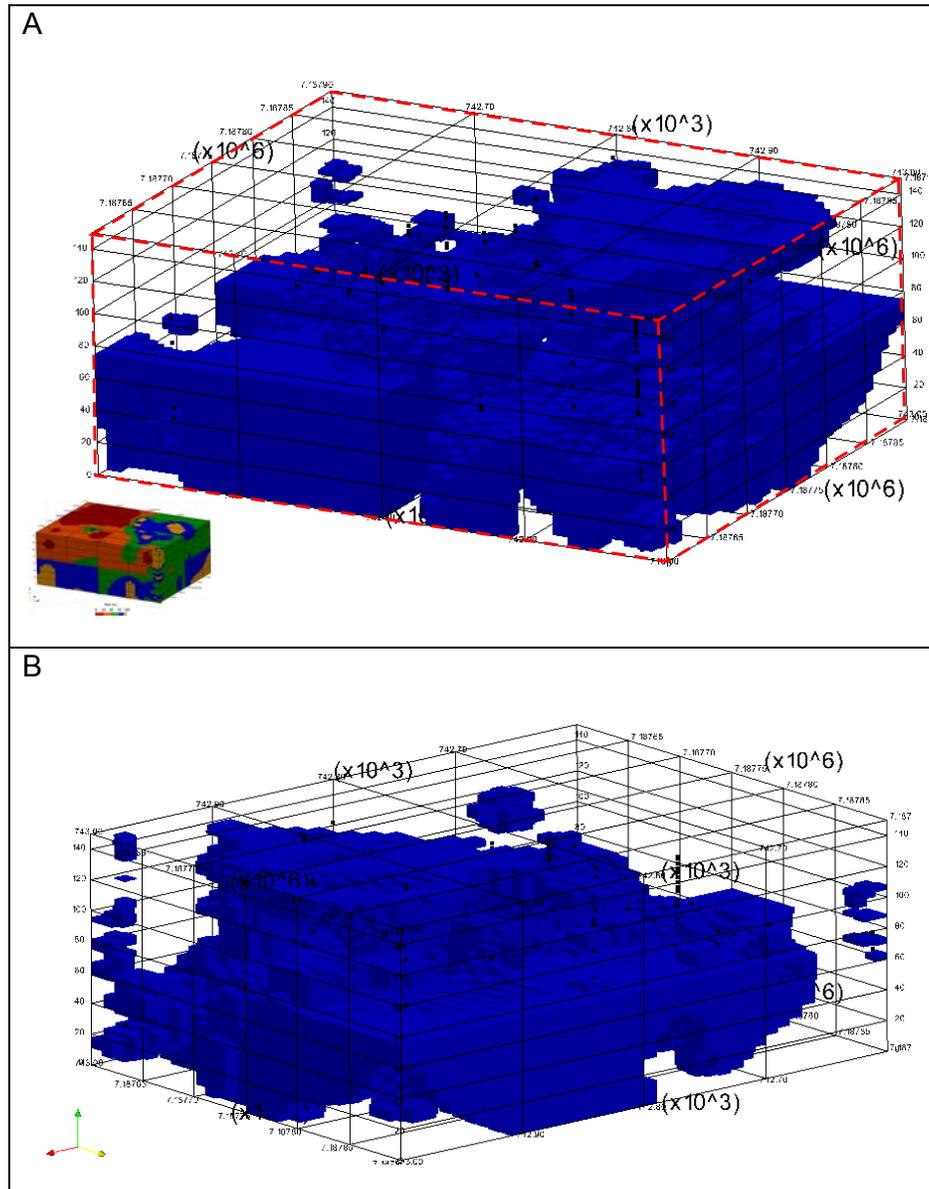


Figura 103-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m e exclusão de 4 sondagens reais e uma não real do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 75-90% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

### 6.4.4.5 RQD de 90-100%

Como no modelo 3D de RQD descritos no do item 6.4.3, os volumes para este intervalo se distribuem em geral nas mesmas porções que o item 6.4.3.5, entretanto houve aumento na distribuição de voxels, abaixo da cota 80m, nas porções SW, NW e SE deste modelo (Figura 104).

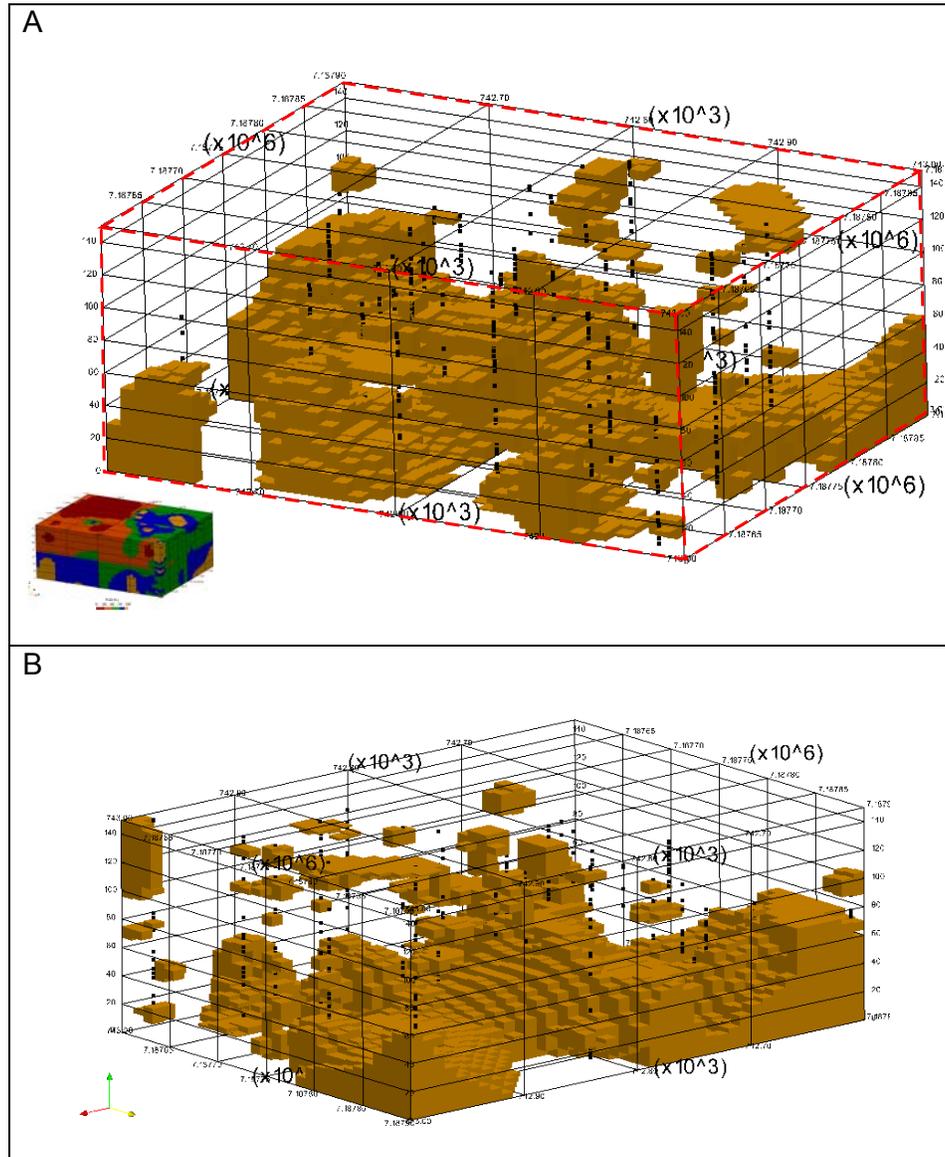


Figura 104-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m e exclusão de 4 sondagens reais e uma não real do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD com intervalo de 90-100% A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **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**

A simulação deste modelo teve como objetivo validar a interpolação tridimensional do modelo 3D de RQD para o estudo de Caso Específico a partir da retirada de 4 pontos de sondagens reais, já realizado na etapa de simulação do item 6.4.4 e das sondagens não reais, inseridas no item 6.4.3 para testar a simulação de dados com intervalo de 90-100%.

Assim, este processo utilizou apenas 24 sondagens rotativas distribuídas ao longo da área de interpolação. A distribuição dos pontos de dados de entrada para esta etapa do trabalho se encontra ilustrado pela Figura 105, onde há ausência de pontos em partes das porções a SW, NW e NE.

Esta simulação gerou distribuição de volumes de RQD com 10% entre o intervalo de 0-25% de RQD, 12,3% entre os intervalos de 25-50%, 33,5% entre os intervalos de 50-75%, 32,6% entre os intervalos de 75-90% e 11,6% entre os intervalos de 90-100% (Figura 106).

A distribuição dos volumes de RQD para este modelo é muito próxima do modelo do item 6.4.2, exceto pela diminuição dos intervalos de RQD 90-100% e 75-90%, ao mesmo tempo ocorrendo o aumento dos intervalos de RQD 0-25% e 50-75%.

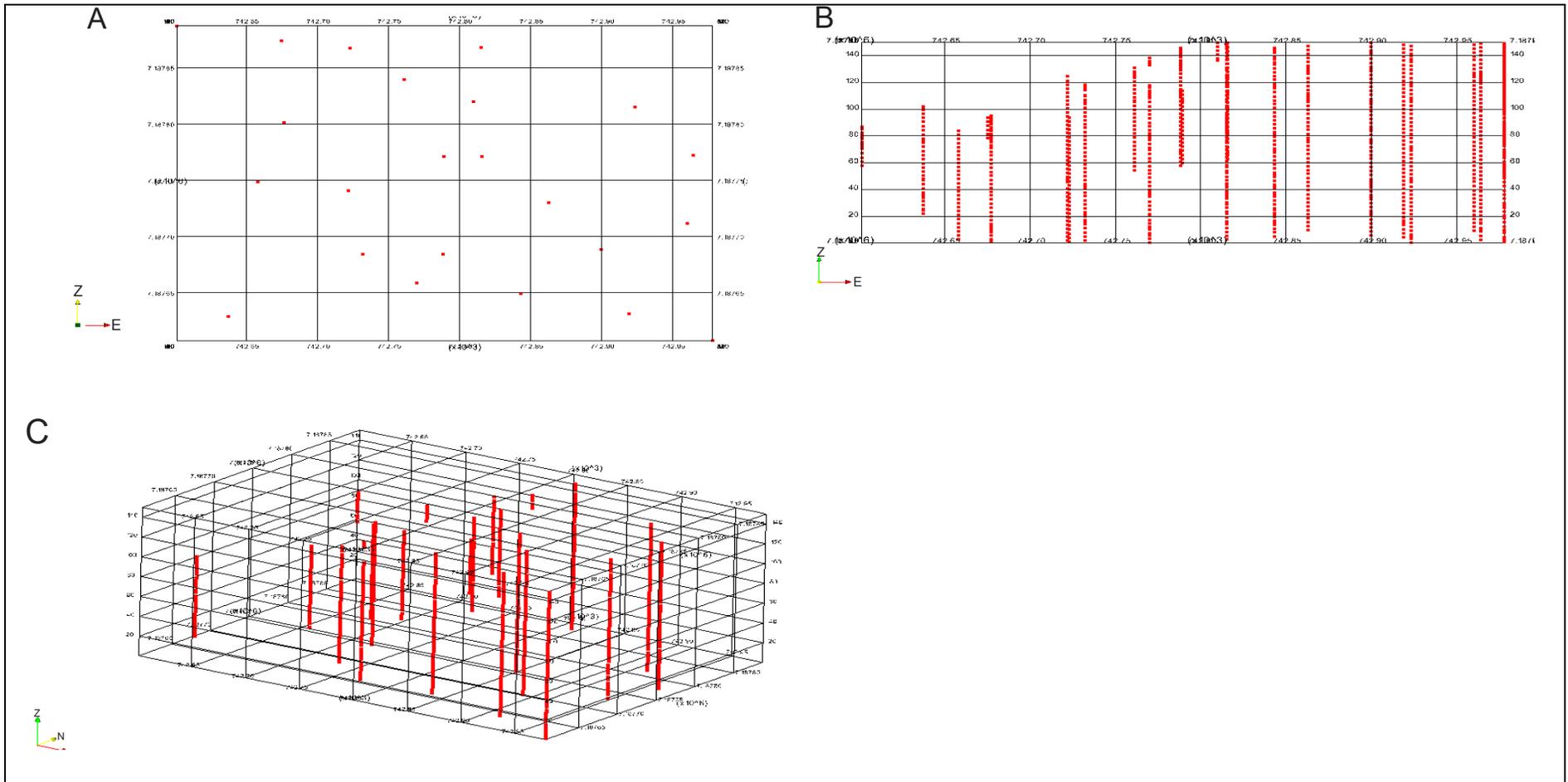


Figura 105-A) Vista em planta;B) Vista frontal da área da jusante para montante;C) Vista em bloco 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) da distribuição dos pontos das sondagens rotativas finais para a validação do modelo 3D.



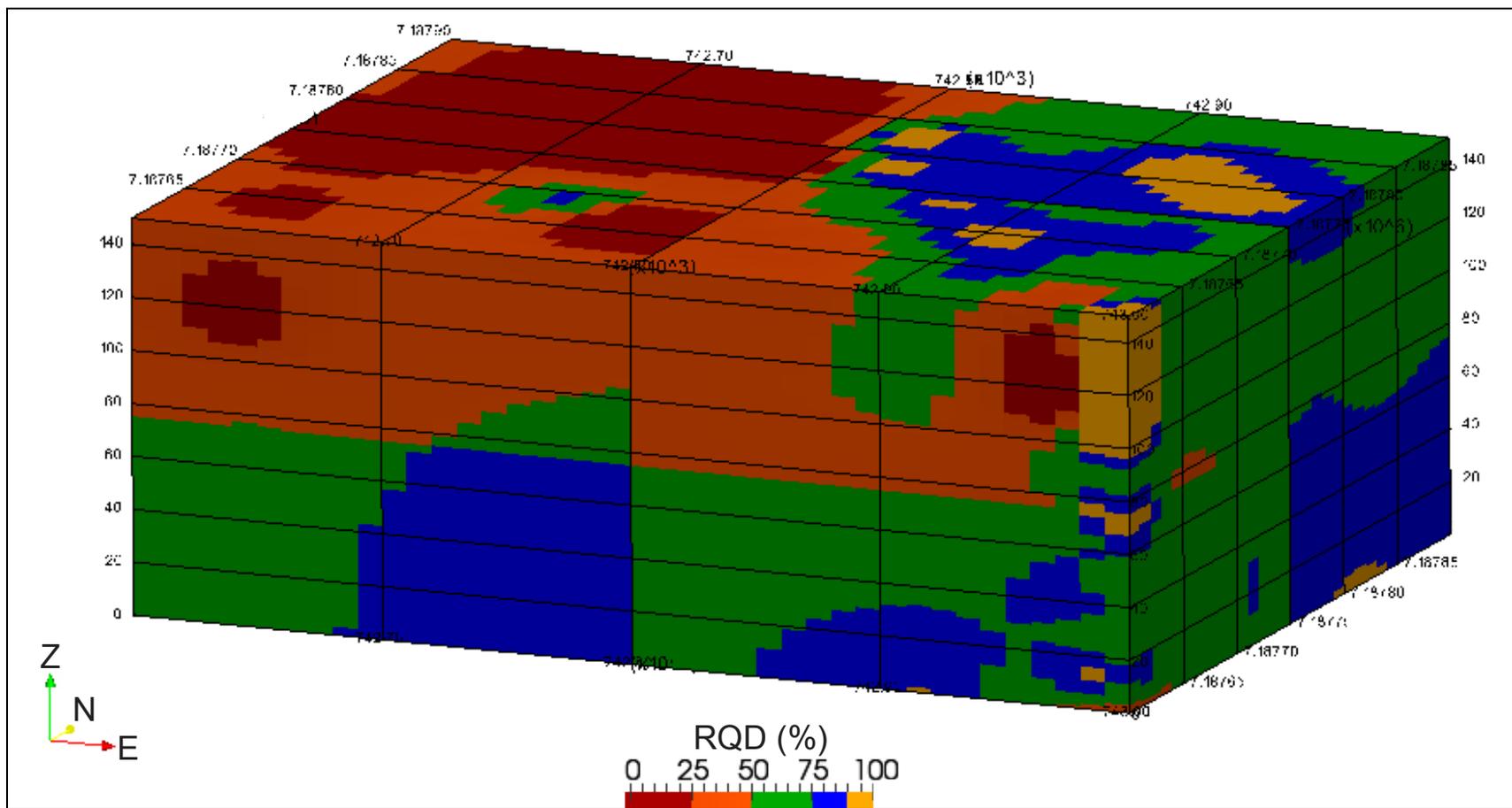


Figura 106-Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m e exclusão de 4 sondagens reais e todas as não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD.



#### **6.4.5.1 RQD de 0-25%**

Comparando este modelo simulado com apenas 24 sondagens, com o gerado a partir de 28 sondagens, descrito no item 6.3.2, foi observado que este apresentou um volume maior de RQD no intervalo de 0-25%, ficando evidente este aumento na porção a SW, entre as cotas de 150 a 100m, além da superfície que recobre toda a porção NW do modelo, entre as cotas de 150 a 130m, tendo também um leve acréscimo da distribuição de voxels com valores de RQD 0-25% na porção SE do modelo (Figura 107).

Os pontos de sondagens relevantes a este intervalos foram utilizados principalmente nas porções SW e NW, e subordinadamente na porção mais superficial a SE, fato este se repetindo ao longo de todos os testes para esta área de interpolação, confirmado neste modelo.

A retirada dos pontos de dados não influenciou bruscamente este intervalo de RQD, apenas gerou aumento de cerca de 3% do volume total neste intervalo.

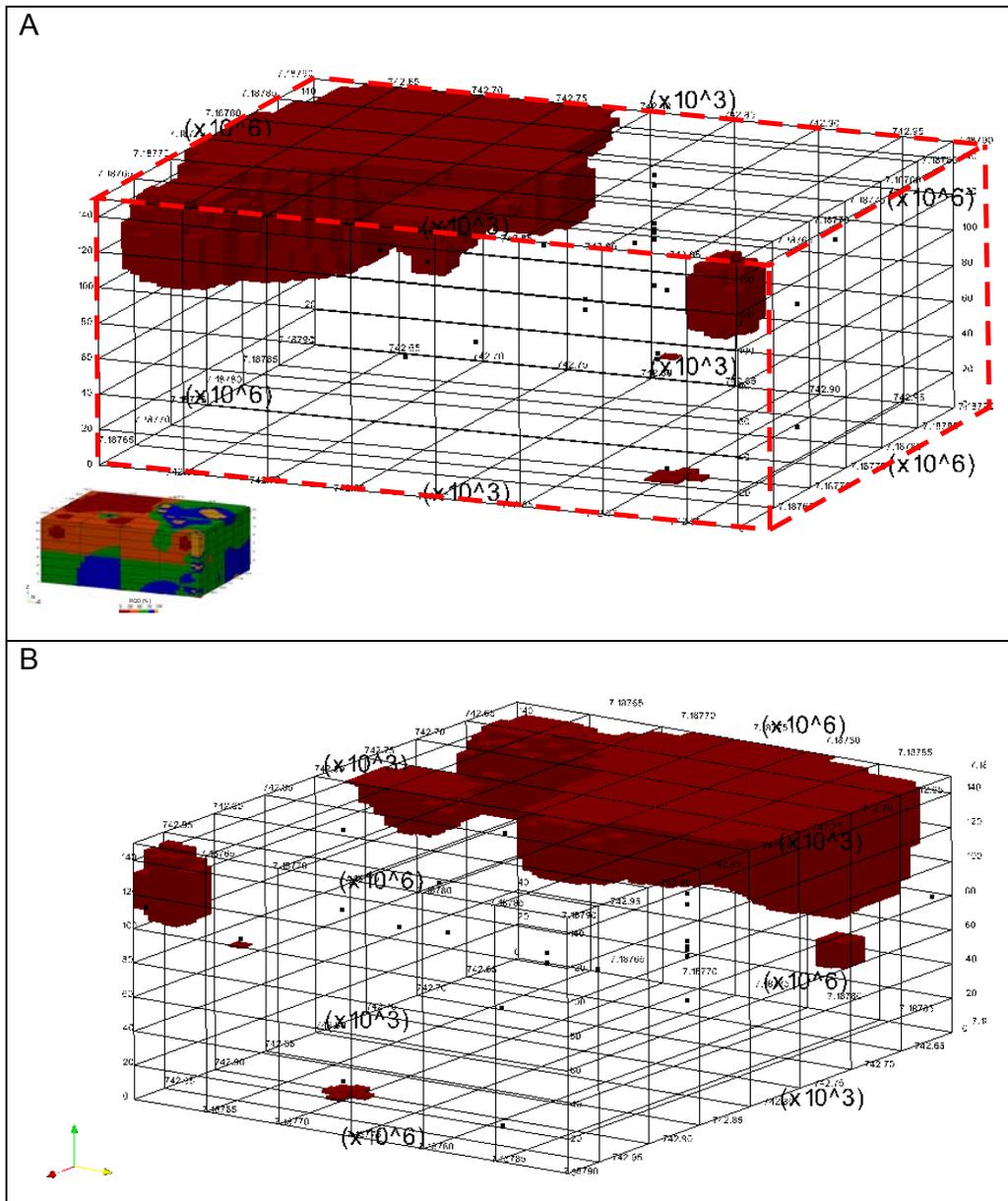


Figura 107- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com exclusão de 4 sondagens reais e de todas as não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD de 0-25%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **6.4.5.2 RQD de 25-50%**

Este intervalo foi o que obteve menor variação ao longo dos testes de interpolações, apresentando-se em geral nas porções SW, NW e SE, entre as cotas de 150 a 80m.

Neste modelo o intervalo se apresenta com um volume próximo ao do item 6.4.2, porém distribuídos com concentrações diferentes a SW e NW (Figura 108).

Ocorre uma diminuição na distribuição dos voxels nas porções SW e central do modelo, entre as cotas de 150 a 90m, e a NW, entre cotas de 100 a 80m. Entretanto, esta diminuição foi equilibrada pelo aumento do volume nas porções extremas a W, entre as cotas de 150 a 80m, além da ocorrência de voxels com estes valores a NW, SW e SE, entre cotas de 80 a 40m, 30 a 15m e 0 a 10m, respectivamente.

Em geral, só foram utilizados os pontos de dados com este intervalo a cotas acima de 80m, com exceção as porções a NW, SW e SE, entre cotas de 80 a 40m, 30 a 15m e 0 a 10m, respectivamente.

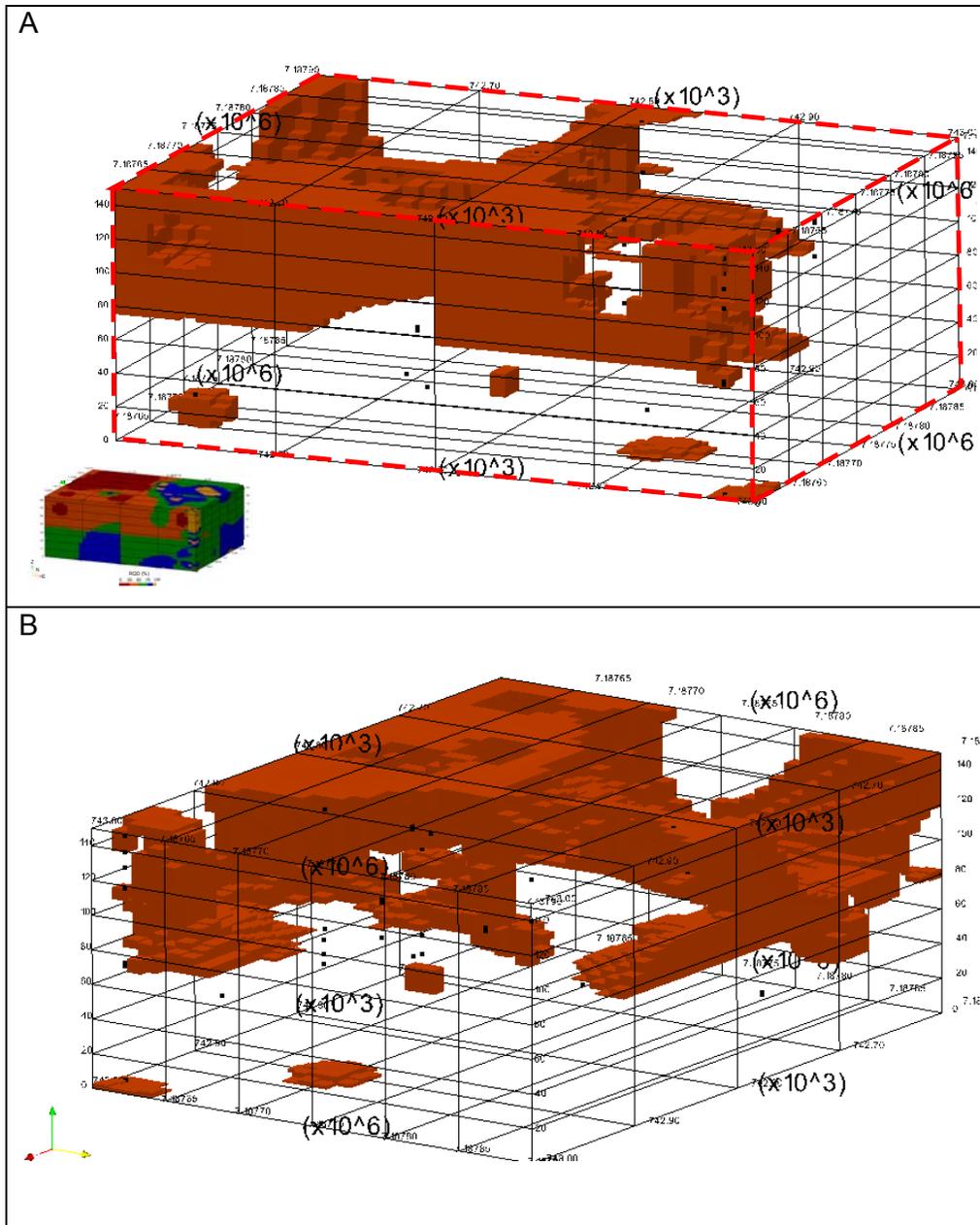


Figura 108- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com exclusão de 4 sondagens reais e de todas as não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD de 25-50%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

### **6.4.5.3 RQD de 50-75%**

Relacionando este modelo com intervalo de 50-75% de RQD com o do item 6.4.2, foi possível observar que há uma diminuição de volumes deste intervalo nas porções SW, NW e central do modelo, entre cotas entre 150 a 80m. Entretanto, esta diminuição é compensada pelo aumento do volume, principalmente, a SW e NW, nas porções intermediárias a basais, entre as cotas de 80 a 0m (Figura 109). Tal compensação eleva este intervalo a ser o de maior porcentagem de volume no modelo, seguido pelo intervalo de 75-90% de RQD.

Os pontos de dados de entrada com valores neste intervalo de RQD que se localizam entre as cotas de 80 a 0m, nas porções SW e NW, em geral, não são utilizados na interpolação de voxels com estes valores de RQD.

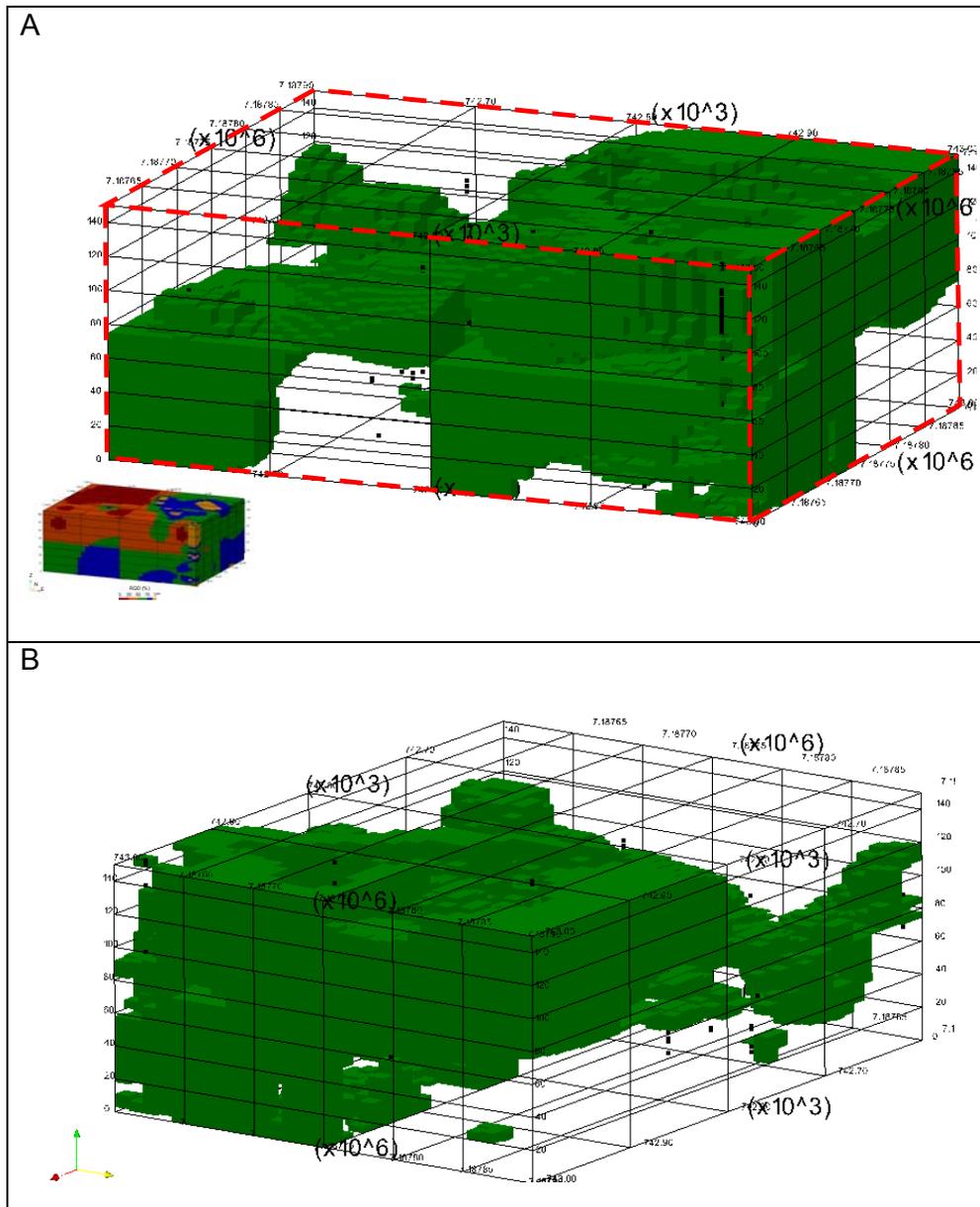


Figura 109- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com exclusão de 4 sondagens reais e de todas as não reais do estudo de Caso Especifico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD de 50-75%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **6.4.5.4 RQD de 75-90%**

Este intervalo representa a segunda maior porcentagem do volume total de RQD distribuído neste modelo. E apresenta distribuição de voxels com estes valores nas mesmas porções do item 6.4.2, com o adendo de que houve diminuição de volume, nas porções intermediárias a basais a SW, entre as cotas de 80 a 0m (Figura 110).

Alguns pontos de dados de entrada com valores neste intervalo, localizados entre as cotas de 150 a 80m, nas porções de SE, centro, SW e NW do modelo não são utilizados para a interpolação deste intervalo.

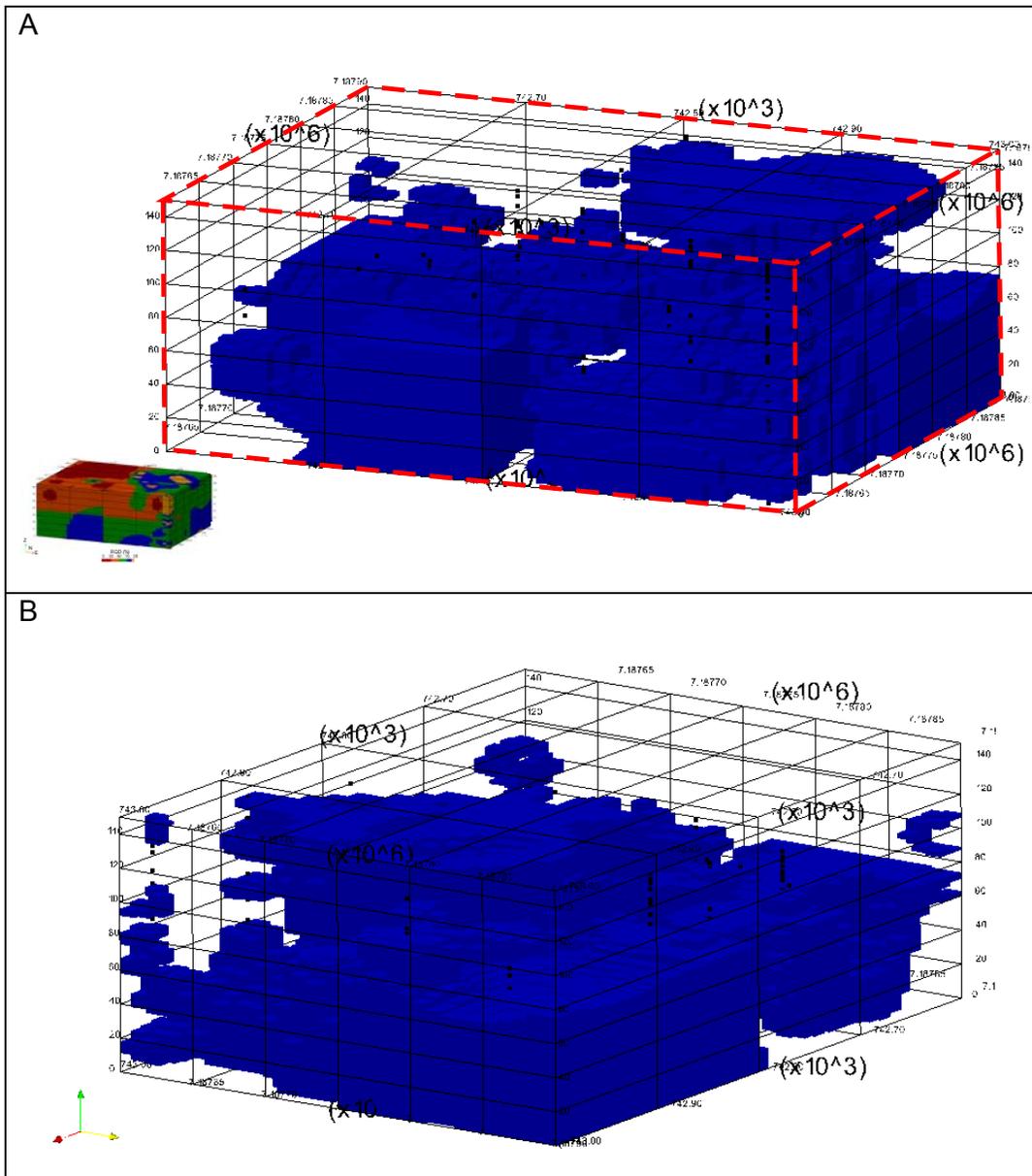


Figura 110- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com exclusão de 4 sondagens reais e de todas as não reais do estudo de Caso Específico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD de 75-90%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

#### **6.4.5.5 RQD de 90-100%**

Este intervalo de dados foi o mais afetado pela retirada das 4 sondagens reais e de todas as não reais, pois obteve uma queda com cerca de 10% do volume total se comparado com o modelo onde foram inseridas as sondagens não reais.

A simulação de modelos tridimensionais de dados de RQD a partir do GRASS é muito sensível a distribuição dos pontos de dados de entrada, pois, avaliando os testes realizados nos itens 6.4.4 e 6.4.5, com a inserção e exclusão de dados, respectivamente, resultam em modelos com distribuições de volumes de intervalos de RQD com porcentagens bastante distintas entre eles.

Comparando este modelo com o do item 6.3.2 para o intervalo de RQD 90-100%, foi possível observar que há diminuição do volume interpolado nas porções a SW e NW deste modelo, entre as cotas de 40 a 0m e de 75 a 0m, respectivamente (Figura 101).

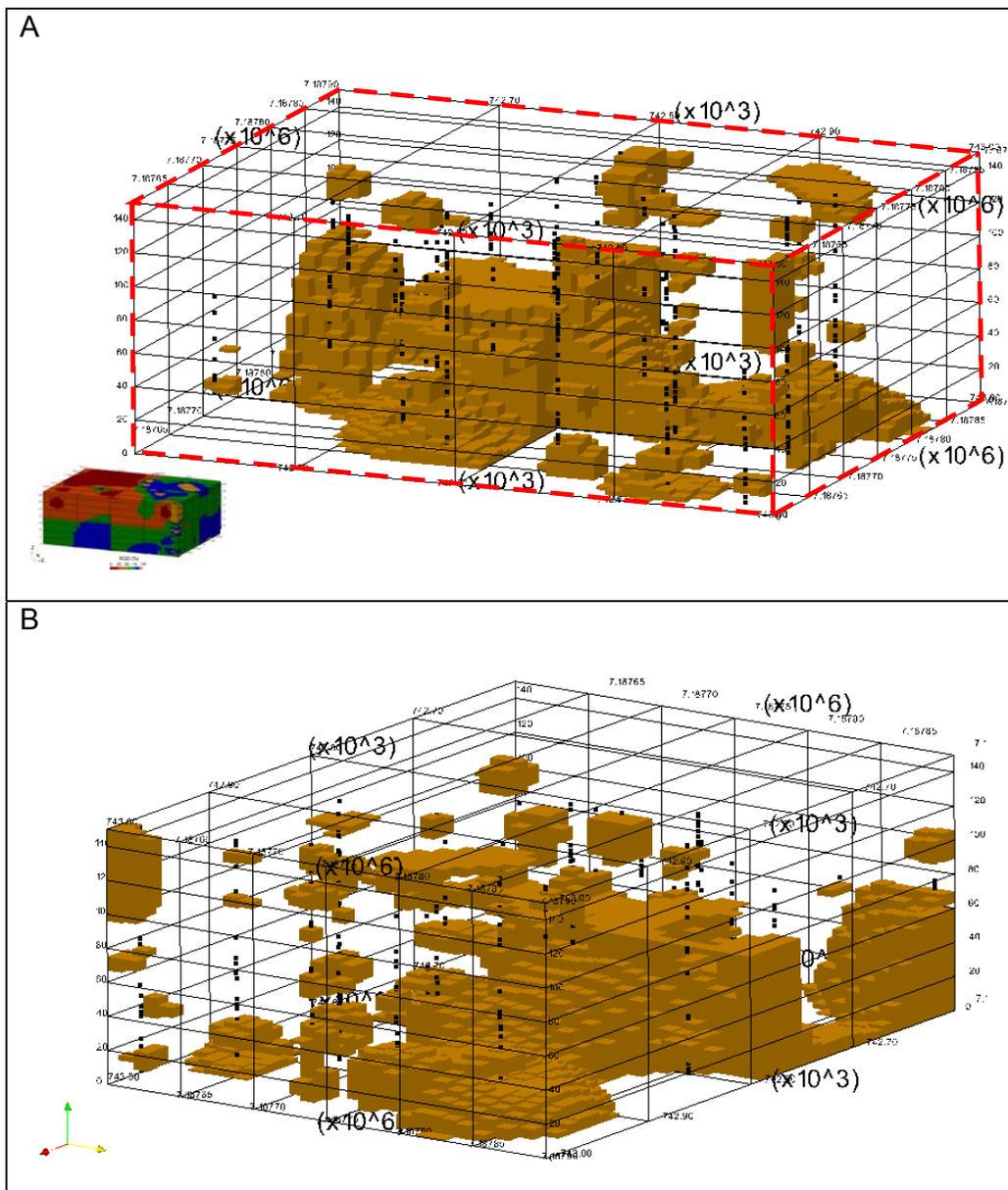


Figura 111- Vista do modelo com voxel de dimensão 10mx10mx1m com exclusão de 4 sondagens reais e de todas as não reais do estudo de Caso Especifico (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior junto ao modelo 3D geral) com a distribuição dos volumes de RQD de 90-100%- A) Vista de jusante para montante; B) Vista de montante para jusante.

## **6.5 Análises de Planos horizontais**

As análises dos planos horizontais extraídos do modelo 3D de RQD descrito no item 6.4.2, foram realizadas para obter informações da distribuição RQD em diferentes cotas dos modelos 3D e compará-las com a bibliografia existente.

Para tais análises foram comparados os planos extraídos do modelo 3D de RQD para o estudo de Caso Específico (item 6.4.2) com os planos horizontais de distribuição de RQD realizado por Patias (2010).

### **6.5.1 Cota 20m**

Próxima a cota 20m ocorre o contato litológico entre materiais dos derrames A e B, sendo esta uma cota interessante para avaliação das distribuições de RQD no modelo 3D.

O plano horizontal do modelo na cota 20m apresenta RQD variando entre 25-100%, entretanto na distribuição de valores há o predomínio de RQD no intervalo de 75-90%, que indica qualidade boa ao maciço, seguido do intervalo de 90-100% (Figura 112). Analisou-se comparativamente tal modelo com o resultado para esta mesma cota de Patias (2010) (Figura 113).

Na Figura 113 a distribuição dos valores de RQD pode ser separada em duas partes, uma central a E, onde há o predomínio de intervalo de 90-100%, classificando o maciço a uma qualidade excelente nesta cota, e a central a W onde há o predomínio de valores de RQD 75-90%, qualidade boa.

Segundo a comparação deste resultado apresentado por Patias (2010) com o plano da cota 20m do modelo 3D (Figura 112), é possível constatar que, em geral, há relação espacial da distribuição dos valores RQD entre os dois resultados. No entanto, na porção SW do plano apresentado na Figura 112 são encontrados valores com intervalo de RQD 25-50% envoltos por valores de RQD 50-75%. Tais intervalos de RQD não estão presentes no plano representado pela Figura 113.



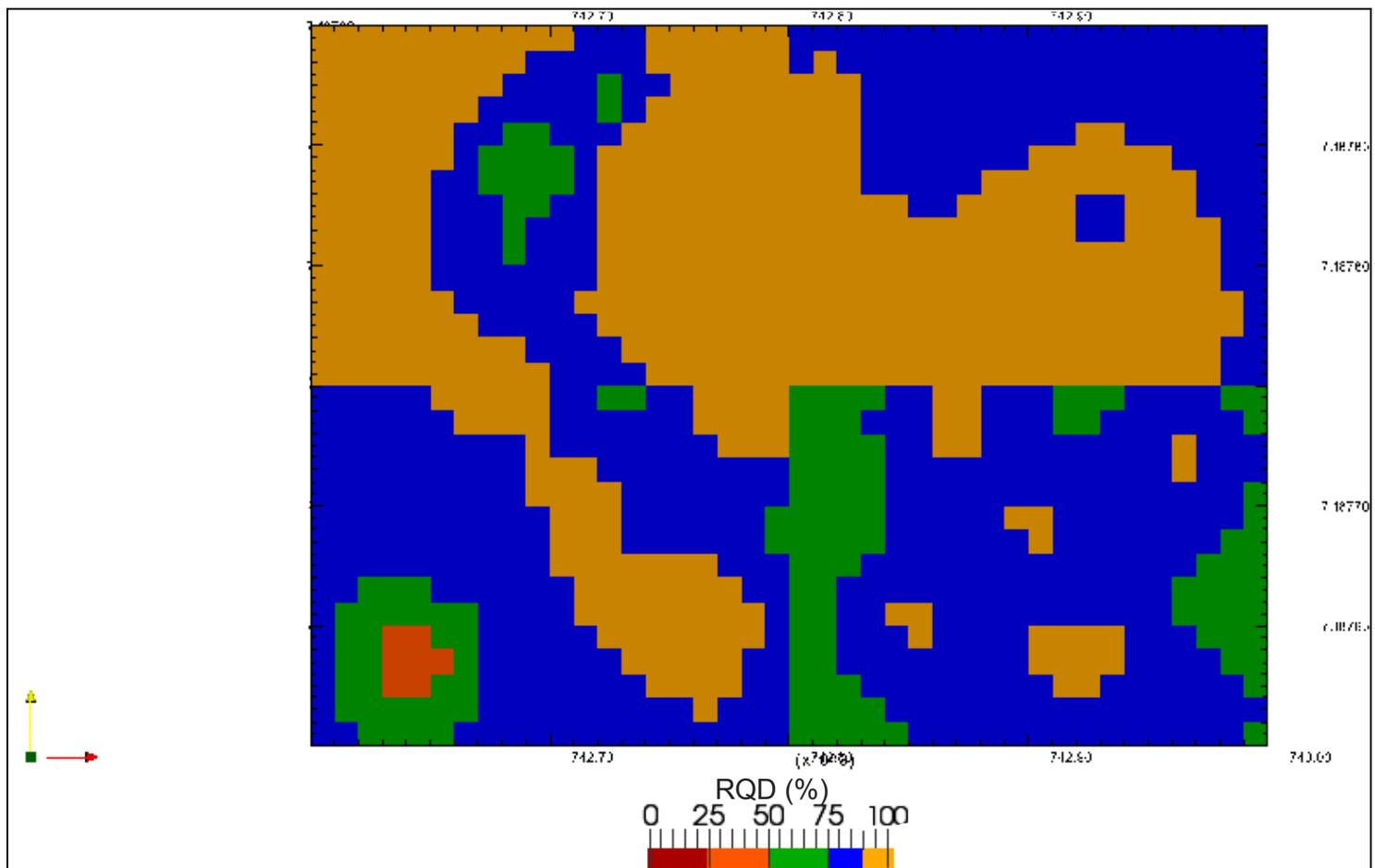


Figura 112- Plano horizontal de cota 20m (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área.



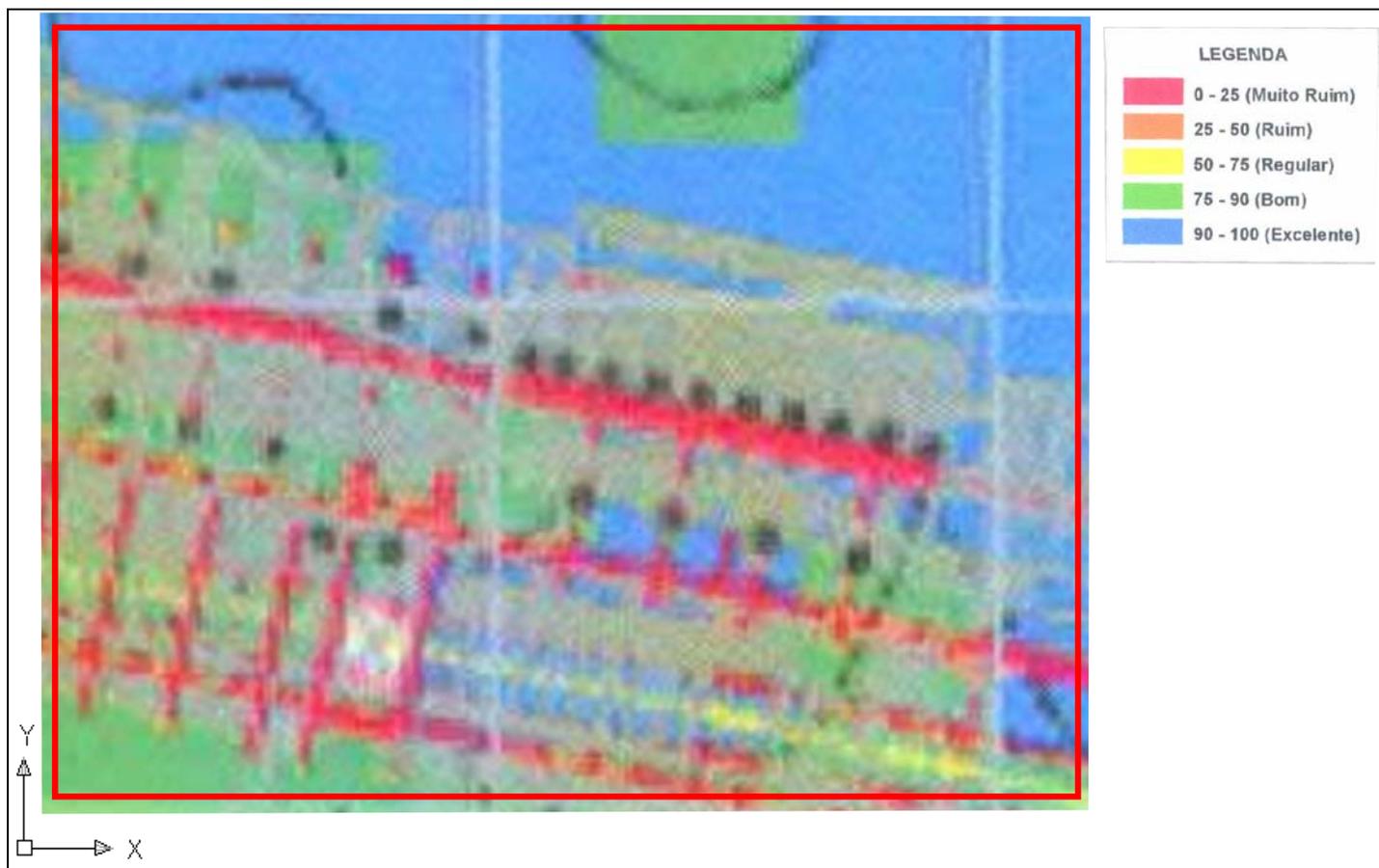


Figura 113- Parte do plano horizontal de cota 20m com a delimitação da área de interpolação 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área, Fonte: Patias (2010).



### 6.5.2 Cota 40m

A análise comparativa entre o resultado para o plano horizontal extraído na cota de 40m do modelo 3D de RQD (Figura 114) com o resultado para a mesma cota por Patias (2010) (Figura 115), deixou em evidencia algumas diferenças na distribuição dos intervalos de RQD.

No resultado de Patias (2010) para esta cota, apresentou-se predominantemente distribuição de valores de RQD 90-100% envolvendo concentrações de RQD 75-90% em porções a SW, NW, SE e NE (Figura 115).

No plano horizontal há predomínio de valores de RQD 75-90%, sendo que os valores de intervalo de 90-100% ocorrem apenas nas porções NW, N e central do plano (Figura 115). Na porção central, S e SE, são apresentados valores de RQD de 50-75%, sendo que no centro do plano ocorrem valores RQD de 25-50%.

Valores de RQD entre os intervalos de 25-50% e 50-75% não se apresentam distribuídos no resultado de Patias (2010). Nas mesmas porções onde ocorre a distribuição destes valores no plano horizontal extraído do modelo 3D, são encontrados na Figura 115 valores de RQD de 90-100%, a S e centro do plano, e RQD de 75-90%, a SE.



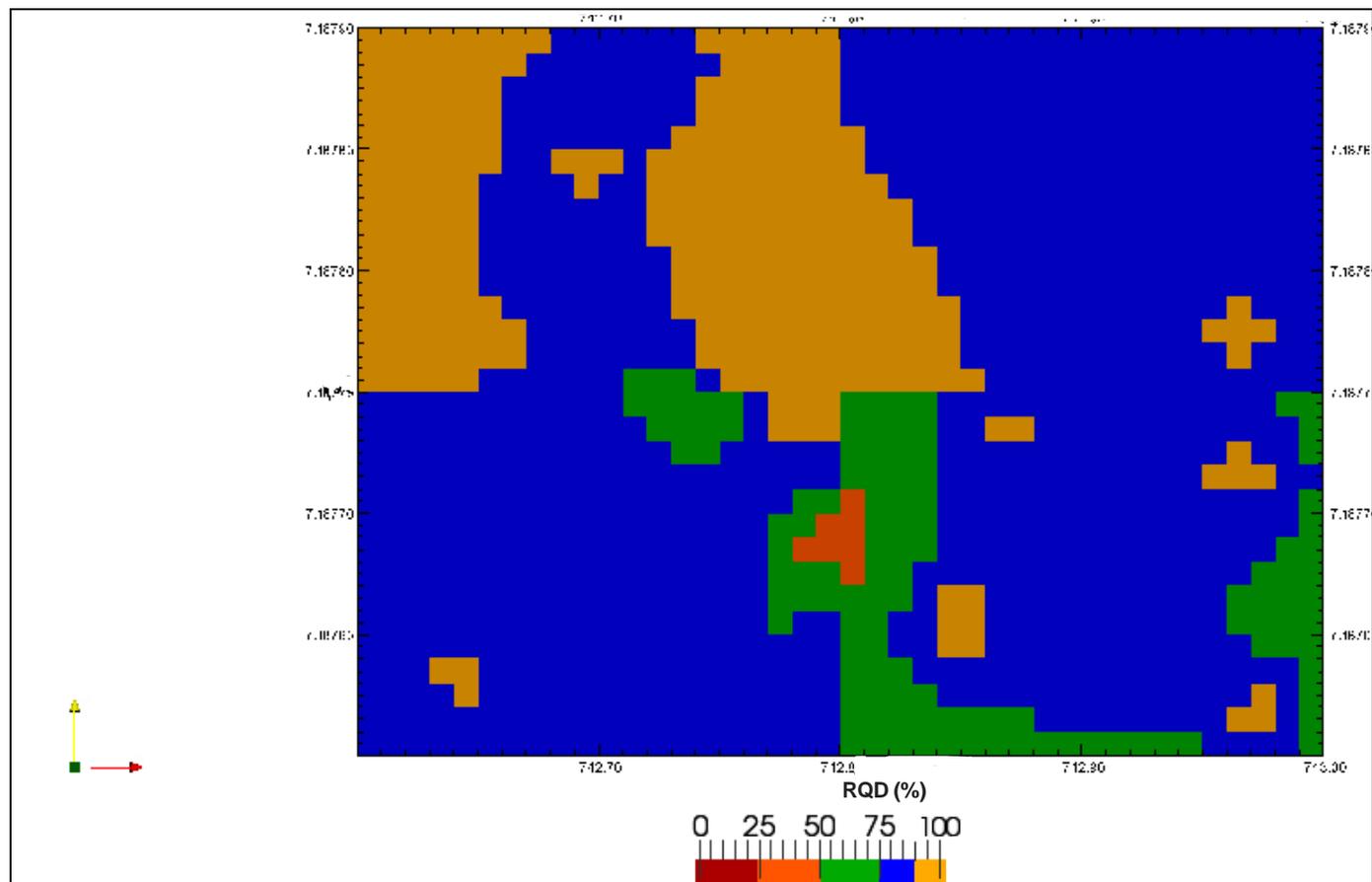


Figura 114- Perfil horizontal da cota 40m (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área.



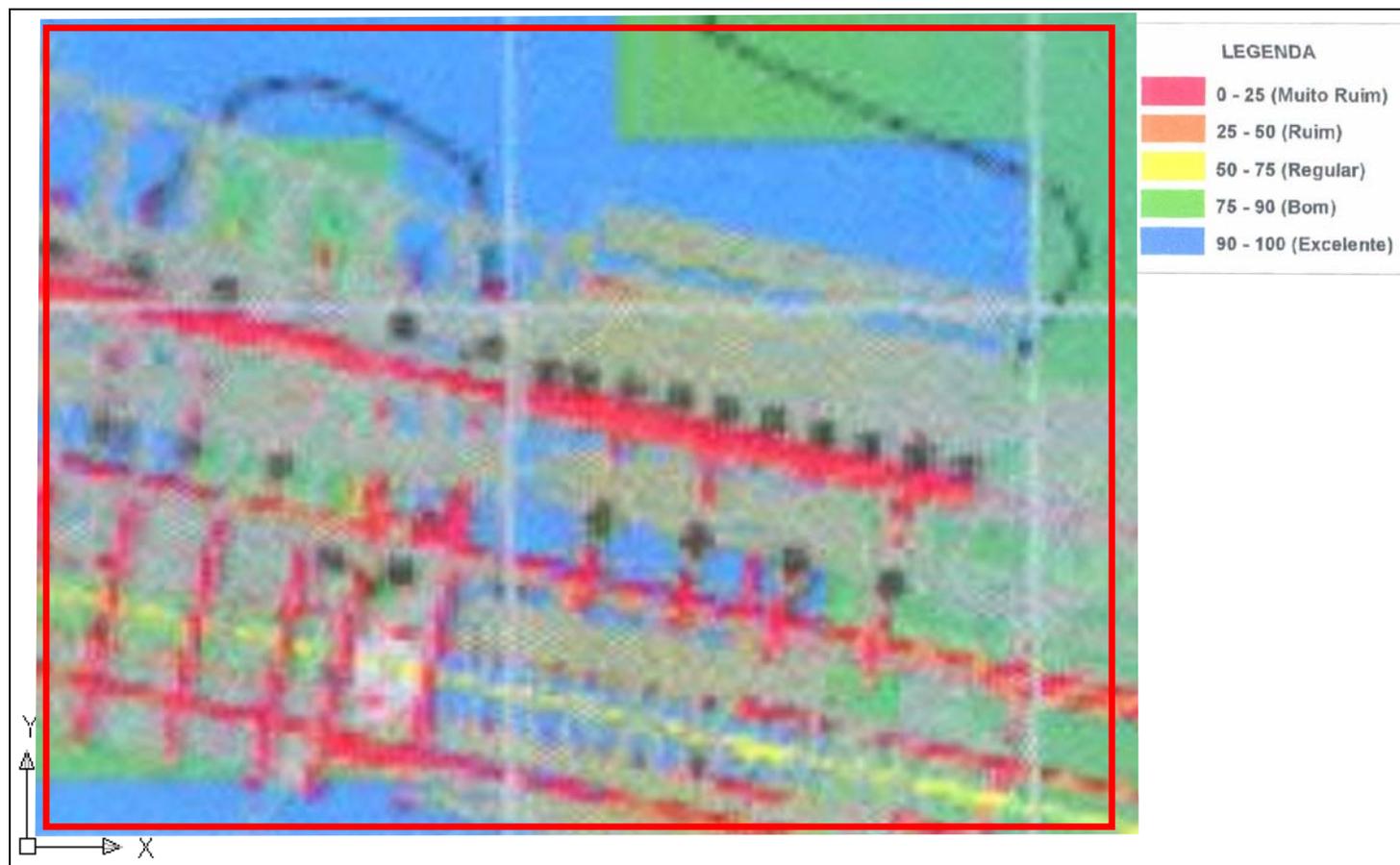


Figura 115- Parte do perfil horizontal da cota 40m com a delimitação da área de interpolação 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área de Patias (2010).



### 6.5.3 Cota 128

Na análise comparativa entre as figuras 116 e 117 foram verificadas diferenças na distribuição dos valores de RQD e ao mesmo tempo a tendência de aumento e diminuição de RQD nas mesmas porções do resultado do plano horizontal de cota 40m extraído do modelo 3D de RQD (item 6.4.2) e o resultado da distribuição de RQD para a mesma cota apresentado por Patias (2010).

A Figura 116 apresenta distribuição de valores de RQD com qualidade baixa a muito baixa, RQD de 0-50%, nas porções central, NE e SE do plano horizontal de cota 128m, e qualidade regular a excelente, RQD 50-100%. Nas porções NW e SW do plano, são encontrados intervalos de RQD predominante entre 25-50%, ocorrendo ainda pequenas porções de valores de RQD de 0-25%. Nas porções NE e SE são encontrados predominantemente valores com intervalo de RQD 50-75%, e nas porções central e SE do plano são encontrados valores de RQD 90-100% envolvidos por valores de RQD 75-90%.

Na porção SW da área da Figura 117, ocorrem valores de RQD variando de 50-75%, de qualidade regular, até 25-50%, de qualidade ruim, sendo que nas mesmas porções onde ocorrem os valores de RQD 50-75%, são encontrados valores de RQD de 0-50% na Figura 116. Já nas porções central SE e NE da Figura 117 há o predomínio de valores com RQD de 75-90%, onde em uma porção ao extremo E do plano, ocorre uma concentração pequena de valores de 90-100%. As porções central, NE e SE do plano foram que apresentaram maiores diferenças na comparação dos dois resultados, pois nestas porções, a Figura 116 apresenta predomínio de valores de RQD 50-75% em vez de RQD 75-90%, como ocorre na Figura 117.

Mesmo que a distribuição dos valores de RQD não são as mesma nas figuras 116 e 117, existe a tendência dos valores de RQD de se apresentarem a qualidades mais baixas nas porções SW e NW do plano, com RQD variando de 0-50% na Figura 116 e 25-75% na Figura 117, e qualidades mais altas nas porções central, NE e SE do plano, com RQD variando de 50-100% na Figura 116 e 75-100% na Figura 117.



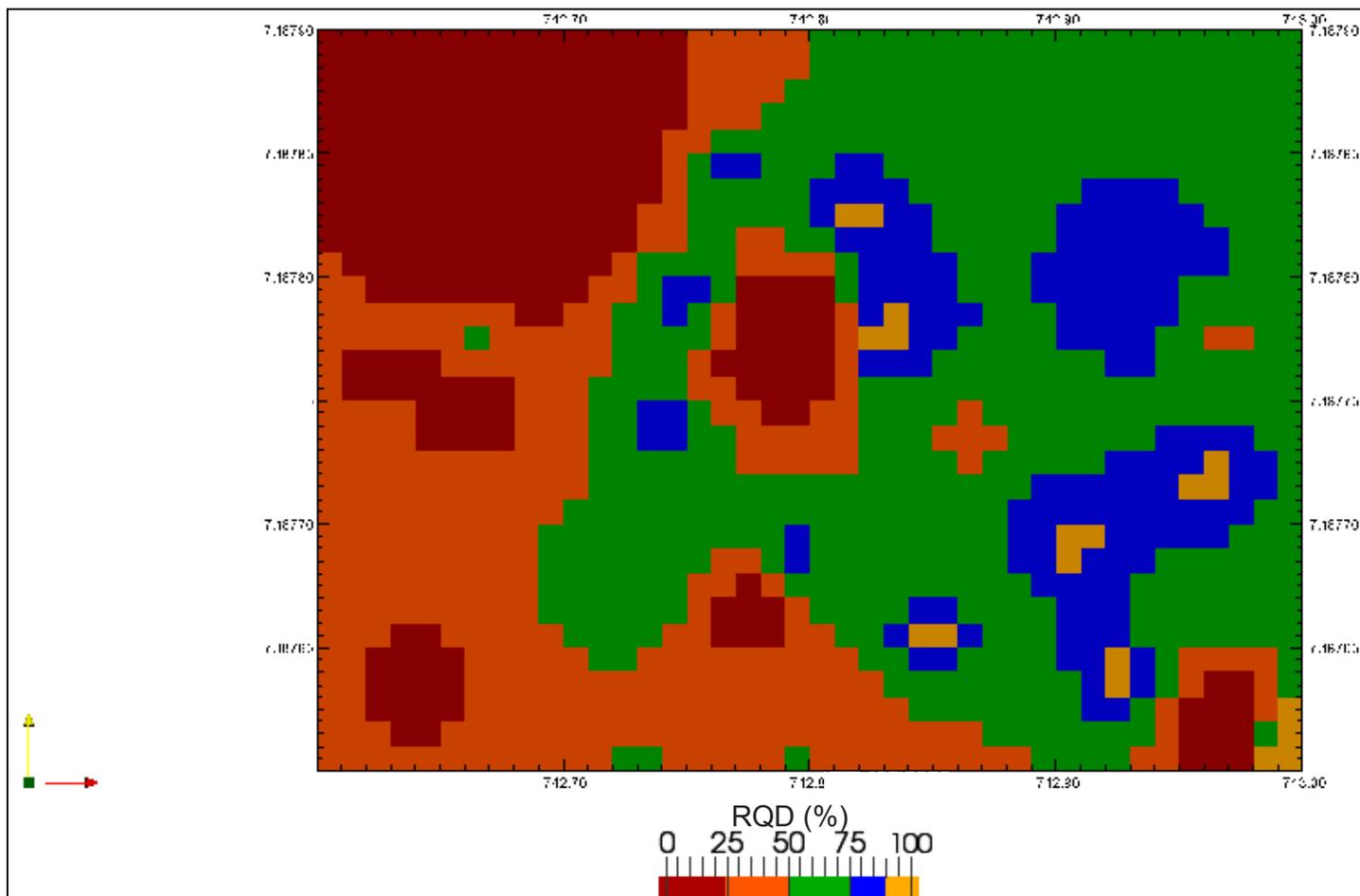


Figura 116- Perfil horizontal da cota 128m (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área.



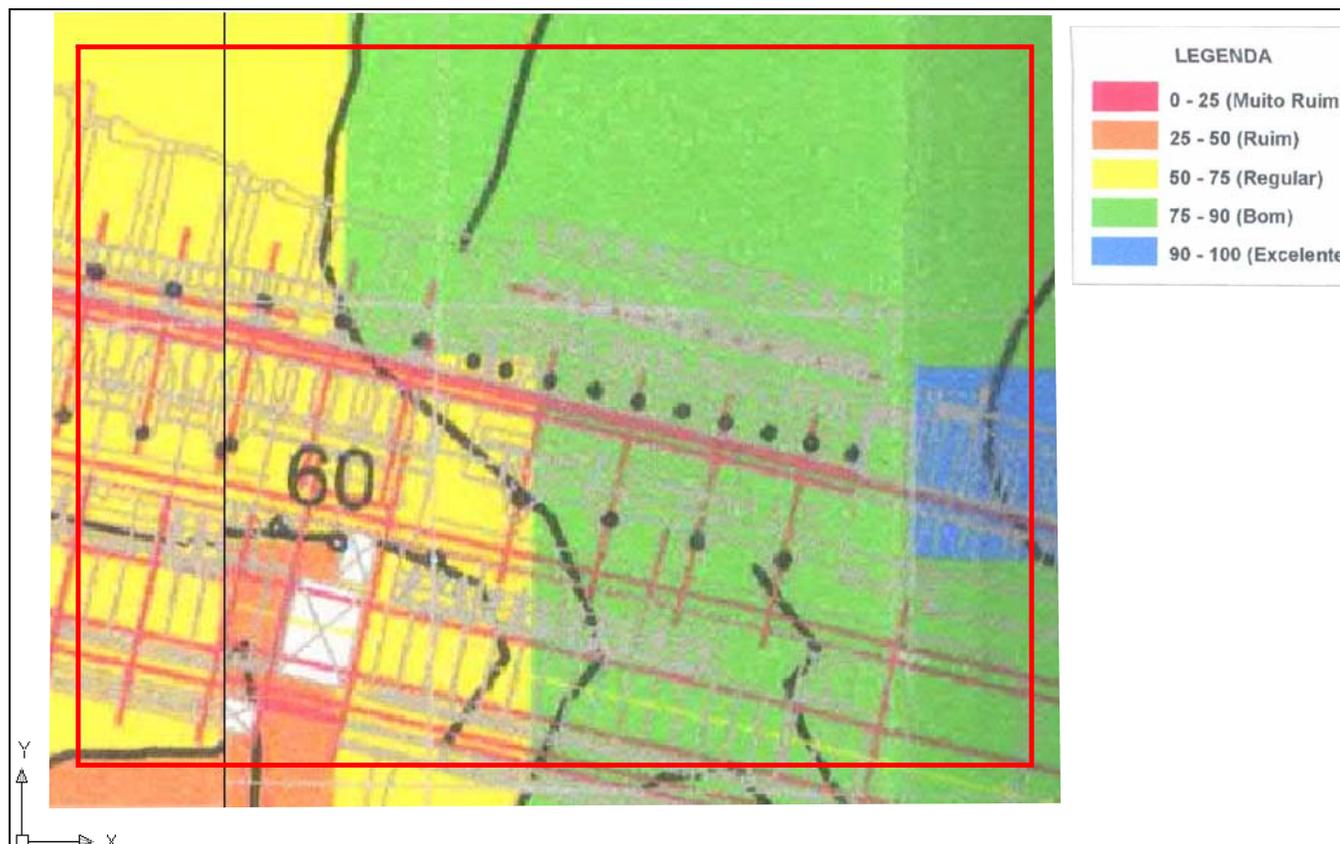


Figura 117- Parte do perfil horizontal da cota 128m com a delimitação da área de interpolação 3D (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior) com distribuição dos intervalos de RQD em área de Patias (2010).



## 6.6 Análise do perfil vertical

Foi realizado um corte vertical no modelo 3D de RQD, descrito no item 6.4.2, na direção do eixo da barragem principal de Itaipu (A-A') (Figura 118), para análise da distribuição dos valores de RQD e a relação que esta distribuição possa ter com os materiais geológicos encontrados na área de estudo de Itaipu. Para esta análise foi utilizada a seção geológica encontrada no ANEXO 3- Seção geológica da barragem principal e o APÊNDICE 2- Seção geológica da Barragem Principal de Itaipu modificada.

O material rochoso distribuído ao longo do perfil pode ser correlacionado com a sucessão de derrames A, B, C e D, da base para o topo, respectivamente, onde é possível inferir as zonas de descontinuidades D, B e A (Figura 119).

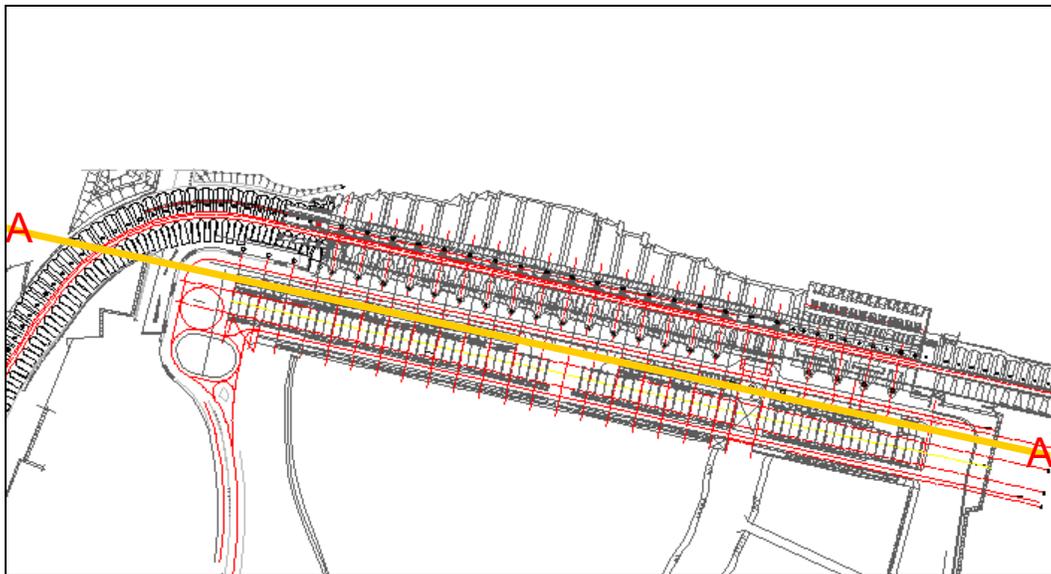


Figura 118-Orientação do Perfil vertical 1 segundo a direção A-A', representado pela linha amarela, Fonte: modificado de Patias (2010).

O pacote onde se localiza o derrame A ocorre entre as cotas 0 a 20m neste perfil. Neste pacote se distribuem valores de RQD 50-75%, na porção extrema de SE, que se intercalam com valores de RQD 75-90%, e se associam ao basalto vesicular-amigdaloidal do derrame A. Na porção a NE também são

encontrados valores de RQD 75-90% relacionados ao basalto denso do derrame A. Entretanto, neste pacote há o predomínio de valores de RQD 90-100%, de qualidade excelente, que ocorre ao longo de toda a porção central, se estendendo a E e W do perfil entre a cota de 0 a 20m.

Próximo ao contato com o derrame B a SE há distribuição de valores de RQD 50-75%, de qualidade regular, estes valores podem estar associados a zonas de brechas do derrame A, que ocorrem na zona de transição entre derrames.

O valor de RQD 90-100%, que se apresenta na porção central do pacote do derrame A, continua ocorrendo até o topo do derrame B, tendo uma diminuição da sua proporção com o decréscimo da profundidade, até a cota próxima de 75m. Os valores deste intervalo que também ocorrem na porção NW se mantêm contínuos vertical e horizontalmente até a cota próxima de 55m, onde começa decrescer até desaparecer na cota próxima a 75m. No intervalo de profundidade entre as cotas de 55 e 75m ocorrem as brechas vulcânicas e o basalto vesicular-amigdaloidal do derrame B, e também a descontinuidade B.

A distribuição de valores de intervalo de RQD 50-75% encontrados no derrame B deve estar associada à presença da descontinuidade B e ao pacote de rochas compostas por brechas vulcânicas e o basalto vesicular-amigdaloidal deste derrame.

Na porção NW deste pacote, entre as cotas de 75 a 90m, inicia-se a distribuição de valores de RQD de 25-50% de qualidade regular. Este intervalo aumenta a E até a cota próxima de 100m, onde inicia sua intercalação com valores de RQD de 0-25%, que se mantêm constante, passando pela descontinuidade D, localizada no basalto denso deste derrame, chegando até o topo do perfil.

No pacote do derrame C, há um predomínio de valores de RQD de 50-75%, que por vezes estão intercalados com valores de 75-90%, ao que próximo ao contato com o derrame D e B, na porção central a SE, ocorrem uma concentração de valores de 25-50%, podendo chegar a 0-25% nas cotas de próximas de 120 a 150m, próximo ao contato com D, passando pela descontinuidade D até o topo do perfil. Estes valores mais baixos de RQD se

associam ao conjunto zona de transição entre derrames e a descontinuidade D, onde o maciço rochoso se torna mais sensível.

Um fato relevante são as zonas de alto fraturamento, que podem ser visualizadas no APÊNDICE 2- Seção geológica da Barragem Principal de Itaipu, algumas destas estão presentes neste perfil na porção central a NW, entre as cotas de 50 a 90m, onde ocorrem as rochas desde o basalto vesicular-amigdaloidal do derrame B até o topo do basalto denso do derrame C.



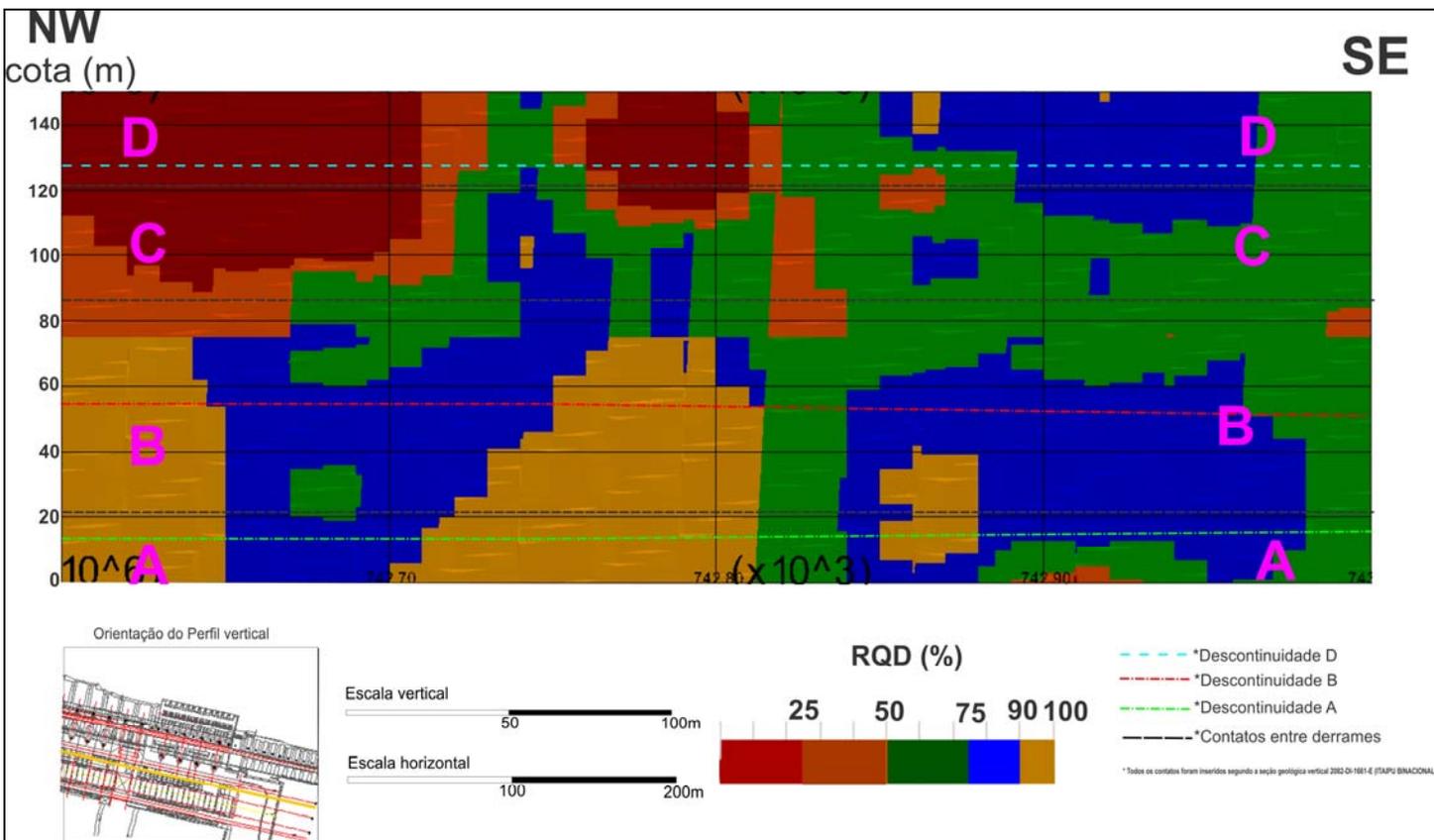


Figura 119-Perfil vertical 1 (observar a orientação da posição espacial no canto esquerdo inferior), obtido a partir de corte vertical no modelo 3D de RQD da área estudo de Caso Específico.



## 7. CONCLUSÕES

O resultado do modelo 3D de RQD para a Área de estudo de Caso Geral apresentou predominância de valores de RQD de 75-90%, com cerca de 40% do volume total de voxel. O intervalo de RQD de 90-100%, apesar de ser o de maior proporção avaliada pela análise estatística dos dados de entrada, neste modelo foi o que apresentou menor porcentagem de distribuição de voxel.

A relação entre o número de voxel e a quantidade de pontos de dados de entrada utilizados na interpolação do modelo 3D para a Área de estudo de Caso Geral foi de 0,31 pontos de dados/voxel. A heterogeneidade da distribuição das sondagens nesta área limitou a qualidade do resultado do modelo 3D gerado pelo método matemático Spline Regularizado por Tensão, juntamente com a dimensão dos voxels. Para a interpolação tridimensional efetiva de áreas e volumes grandes no programa GRASS é necessário que estas sejam segmentadas a tamanhos menores, onde poderão ser simulados modelos com dimensões de voxels menores.

A área de estudo de Caso Específico apresenta modelos 3D com dimensões de voxel distintas, de 25mx25mx3m e 10mx10mx1m. A relação entre o número de voxel e a quantidade de pontos de dados de entrada utilizados na interpolação foi de aproximadamente 0,12 pontos de dados/voxel para o modelo 3D com voxel de dimensão 25mx25mx3m e 0,06 pontos de dados/voxel para os modelos 3D com voxel de dimensão 10mx10mx1m.

Nesta área os modelos com voxel de dimensão 25mx25mx3m apresentou valores de RQD predominantes no intervalo de RQD 75-90%, onde o intervalo de 90-100% representa menos de 5% do volume total deste modelo. Já o modelo 3D com voxel de dimensão 10mx10mx1m os valores de RQD apresentam predomínio entre os intervalos de RQD 75-90% e 50-75%, que representam aproximadamente 34% e 32% do volume total de voxels do modelo 3D, respectivamente, sendo que porcentagem de valores de RQD de 90-100% distribuídos nesta área teve um aumento de aproximadamente 100% em relação à porcentagem deste intervalo para o modelo 3D da Área de estudo de Caso Geral.

A análise dos perfis verticais construídos para ambas as áreas de estudos, indicaram que a presença de valores de RQD com intervalos de 0-50% podem estar associados a materiais geológicos com grau de alteração maior que o basalto denso, como as rochas encontradas nas zonas de transição entre os derrames, a brecha vulcânica e o basalto vesicular-amigdaloidal, ou associadas à presença de zonas muito fraturadas e/ou ao longo das discontinuidades, que se encontram nos basaltos densos dos derrames, e também a cotas próximas da superfície do terreno, onde são mais relevantes os processo intemperismo e geração de discontinuidades por alívio de tensão, devido a erosão da calha do Rio Paraná.

As relações entre os planos horizontais gerados neste trabalho para ambas as áreas e os resultados presentes no trabalho de Patias (2010), são baseadas na tendência das distribuições de RQD de qualidades superiores, entre RQD de 75-100%, ou inferiores, entre RQD 0-50%, ao longo dos planos horizontais.

Segundo a análise comparativa entre os planos horizontais extraídos dos modelos 3D de RQD de ambas as áreas e os planos horizontais propostos por Patias (2010) nas mesmas cotas, foram verificados que houve uma maior correlação entre os resultados do modelo 3D da Área de estudo de Caso Geral com os resultados da distribuição de RQD gerada por Patias (2010) do que os resultados do estudo de Caso Específico, porque os resultados do apresentavam dimensões mais compatíveis de voxels e pixels para interpolação, respectivamente, do que os voxels delimitados para a interpolação do modelo 3D do estudo de Caso Específico.

A análise comparativa entre os resultados provenientes da simulação de RQD com voxels de 10mx10mx1m e 25mx25mx3m demonstrou que dimensões menores apresentam distribuições de valores de RQD mais próximos a estatística dos dados de entrada que os de dimensões maiores.

A distribuição heterogênea dos dados afeta nos resultados da interpolação podendo apresentar em regiões onde há ausência de dados valores superiores ou inferiores as características reais do maciço rochoso.

Os dados de entrada para a interpolação, apesar de se apresentar em grande volume, não possuem uma distribuição espacial boa para o método de

simulação utilizado pelo programa GRASS, principalmente para o intervalo de valores de RQD de 90-100%, que se concentram principalmente em porções da área de interpolação onde ocorrem zonas com ausência de dados.

Na área de estudo de Caso Específico com voxels de dimensão 10mx10mx1m, onde foram realizadas simulações com inserção de pontos não reais e retiradas de pontos de sondagens. Tais testes evidenciaram uma melhor distribuição dos valores de RQD quando se realizava a inserção de dados em locais onde não havia informações.

Existem diversas maneiras de se realizar a validação cruzada de modelos 3D, que podem ser realizadas por métodos como, Holdout, K-fold e Leave-one-out. Durante o processo de simulação tridimensional de RQD foi realizado diversos testes utilizando a técnica por meio do método K-fold, que não apresentaram diferenciação nos resultados gerados. Então, foram realizados testes adicionais para realizar a validação do modelo. Tais testes foram baseados na retirada de alguns pontos de dados de entrada e realização de uma nova simulação.

Os resultados destes testes foram comparados com o modelo simulado e indicaram grande influência da retirada de pontos, principalmente, os que apresentavam valores de RQD 90-100%.

Conclui-se que o programa GRASS executa bem simulações 3D quando são utilizados voxels com dimensões pequenas, a uma área restrita e com dados distribuídos de maneira homogênea no espaço. O visualizador PARAVIEW tem ferramentas bastante interessantes para a análise tridimensional, apresentando uma visualização adequada ao usuário.



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, A.T.; SWIHART, G.H.; ARTIOLI, G.; GEIGER, C.A. (1984). ***Segregation Vesicles, gas filter-pressing and igneous differentiation.*** Journal Geology, v.92, 1, p.55-72.

AUBELE, J.C.; CRUMPLER, L.S.; ELSTON, W.E.(1988) Vesicle zonation and vertical structure of basalts flows. **Journal Volcanol Geotherm Res.** V.35, p.349-374, 1988.

ABGE (1999)- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Manual de Sondagens.** Boletim n° 3, 4 ed. São Paulo. 73p.

ABGE (1998)-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (1998). **Geologia de engenharia.**, 4 ed. São Paulo. 573p.

BAOJUN, W., BIN, S., ZHEN, S. (2009). **A simple approach to 3D geological modeling visualization** IN: Bulletin Engeneering Geological Enviromental– (2009), pp.7.

BARBI, A.L. (1981)- **Comportamento do maciço rochoso em fundação de escavação do canal de desviu do rio Paraná- Usina Itaipu.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 3., 1981, Itapema, Santa Catarina. **Anais-** São Paulo ABGE, 1981, v.2, p.463-485.

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. (1974)- **Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support-** Rock Mechanics, v.6, n.4, pp.183-236.

BERTIOLLI, I; PORTO, E.C.; FIORINI, A.S.; PAREDES, M.A.L.; PIASENTINE, C.- ITAIPU- **Barragem Principal- Desempenhos das chavetas.** CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 9., 1999, São Pedro, SP. **Anais-ABGE**, 1999, 1 CD-ROM.

BIENIAWSKI, Z.T (1973). **Engineering Classification of Jointed Rock Masses-** Transactions of the South African Institution of Civil Engineers, v..15, n.12, pp.335-344.

BIENIAWSKI, Z.T. (1989). **Engineering Rock Mass Classification.** Wiley, New York. 251pp.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. (1998)- **Principles of geographical information systems.** Oxford University Press, 1998. 333 p.

CPRM- **Carta geológica do Brasil ao milionésimo – folha SE-23**, CPRM: 2004. 1 Mapa, color. Escala 1:1.000.000.

CURTI, D.K. (2011)- **Tipologia e origem das fraturas sub-horizontais em basaltos da Formação Serra Geral, Brasil.** 2011. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo- USP. 2011.

DEERE, D.U. (1964). **Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes-** Rock Mechanics and Engineering Geology, v.1,n.1, pp.17-22.

DEERE, D.U. (1967)-**Design of Surface and Near-Surface Construction in Rock-**Proceedings of the Eighth Symposium on Rock Mechanics (ed.Fairhurst,C.), American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, pp.237-302.

DEERE, D.U. & DEERE, D.W (1988)- **The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice**- Rock Classification System Engineering Purposes- ASTM STP 984- Ed. American Society for Testing and Materials- 1988

GROHMANN, C. H. (2008)- **Introdução á análise digital de terreno com GRASS-SIG**- Manual- Instituto de Geociências- USP- 93p.

GUIDICINI, G.; CAMPOS, J.O (1968). **Notas sobre a morfogênese dos derrames basálticos**. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, V.17, N.1, São Paulo, p.15-28.

GUIDICINI, G. ET AL. (1972). **Um método de classificação geotécnica preliminar de maciços rochosos**. In: Semana Paulista de Geologia Aplicação, 4, 1972, São Paulo. Anais... São Paulo: ABGE. v.3, p.285-331.

HACK, R.; ORLIC, B.; OZMUTLU, S.; ZHU, S.; RENGERS, N. (2005)- **Three and more dimensional modelling in geo-engineering**- Bull. Eng. Env.- Springer-Verlag- V. 65 pp. 143-153.

HUDSON, J.A.; HARINSON, J.P (1997)- **Engineering rock mechanics**- An Introduction to the Principles- 397 pp., Ed.1- Pergamon- Imperial College of Science, Technology and Medicine University of London, UK, (1997).

HUTCHINSON, M. F., GESSLER, P. E. (1993)- **Splines – more than just a smooth interpolator**. Geoderma 62: pp.45–67.

IESCHECK, A. L.- **Representação e visualização volumétrica de dados espaciais para avaliação de solos**- Tese de Doutorado- Universidade Federal do Paraná-2006- 166 p.

IESCHECK, A. L. (2008)- **Dados espaciais e interpolação qualitativa: Algumas Questões**- 5pp., Universidade Federal do Rio Grande do Sul-

Instituto de Geociências – Departamento de Geodésia, Porto Alegre/RS, (2008).

IPT (1984)- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Estudos Geológico-Geotécnicos para caracterização e classificação de maciços rochosos para projetos de engenharia (túneis, lavra a céu aberto e barragens)**. São Paulo, IPT – Relatório 19569.

ISRM (1978). **SUGGESTED METHODS FOR THE QUANTITATIVE DESCRIPTION OF DISCONTINUITIES IN ROCK MASS**. INT. J. ROCK MECH. MIN. SCI. & GEOMECH. ABSTR. PERGAMON PRESS, V.15,P.319-368.

ITAIPU BINACIONAL (1972)- INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IEC) (1974); ENERCONSULT Engenharia Ltda (ELC)- Estudo do Rio Paraná: Geologia e Materiais de Construção- Apêndice B, Suplemento 1, Parte 1, 1974.

ITAIPU BINACIONAL (1977)- INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IEC) (1974); ENERCONSULT Engenharia Ltda (ELC)- **Estudo entre o contato “B” e “A” e faixa fraturada da base do derrame “B”-1977**. 20pp.

ITAIPU BINACIONAL (1977<sup>(2)</sup>)- INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IEC) (1974); ENERCONSULT Engenharia Ltda (ELC)- **Estudo entre o contato “D” e “C” na área das obras-1977**. 19pp.

ITAIPU BINACIONAL (1977<sup>(3)</sup>)- INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IEC) (1974); ENERCONSULT Engenharia Ltda (ELC)- **Geologia da área das obras de estrutura de desvio- Escavação- Levantamento da Descontinuidade “D”-1977**. 12pp.

ITAIPU BINACIONAL (1977<sup>(4)</sup>)- INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IEC) (1974); ENERCONSULT Engenharia Ltda (ELC)- **Mapeamento geológico do túnel cota 12m (GR7) -1977**. 6pp.

ITAIPU BINACIONAL (1978)- INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IEC) (1974); ENERCONSULT Engenharia Ltda (ELC)- **Geologia do maciço rochoso sob o talvegue do rio** -1978. 5pp.

ITAIPU BINACIONAL (1978<sup>(2)</sup>)- INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IEC) (1974); ENERCONSULT Engenharia Ltda (ELC)- **Mapeamento geológico do túnel GR6 (Poço de grande diâmetro, cota 61m)** -1978. 10pp.

ITAIPU BINACIONAL (1979)- INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IEC) (1974); ENERCONSULT Engenharia Ltda (ELC)- **Estudo do fraturamento subhorizontal do basalto denso do derrame “E”** -1979. 17pp.

ITAIPU BINACIONAL (1997)- INTERNATIONAL ENGINEERING COMPANY (IEC) (1974); ENERCONSULT Engenharia Ltda (ELC)- **Relatório final de projeto de Itaipu**-1997. 58pp.

ITAIPU BINACIONAL (2008)- Usina Hidrelétrica de Itaipu- **Aspectos Técnicos das Estruturas Civas**. Superintendência de Engenharia- Diretoria Técnica. Foz do Iguaçu, 2008, 133p.

KESSLER, H.; MATHERS, S.; SOBISCH, H.(2009)- ***The capture and dissemination of integrated 3D geospatial knowledge at the British Geological Survey using GSI3D software and methodology***- Computers & Geosciences (35), pp. 1311-1321.

KRÖGER, J., HINSBY, K.- (2009)- ***Groudwater Resource in Buried Valleys***- 2006- Livro publicado: Leibniz Institute for Applied Geosciences (GGA-Institut). p. 299.

LEINZ, V. (1949)- ***Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil*** – Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo- 1949- v.103 (Geol.5); p. 1-16.

LELLIOT, M.R.; CAVE, M.R.; WEALTHAL, G.P. (2009)- ***A structured approach to the measurement of uncertainty in 3D geological models***- Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology-2009- v.42; pp. 95-105.

MARQUES, L.S.; ERNESTO, M. (2004). **O magmatismo toléico da Bacia do Paraná**. In: ALMEIDA, F.F.M. Geologia do continente Sul-Americano, 2004. São Paulo: Editora Beca, ed. 1, 647p.

MATSUMOTO, S.; NONOGAKI, S.; NEMOTO, T.; SHIONO, K.; RAGHAVAN, V. (2006)- ***Development of Visualization Tool for Geologic Information on GRASS GIS***- In: International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences- 2006- pp. 1-6.

MELO, M.M. (2010)- **Caracterização e compartimentação geológica e geomecânica de maciço basáltico heterogêneo, aplicado a engenharia**- Dissertação de mestrado- Instituto de Geociências-USP- 2010- 158 P.

MILANI, E.J. 2004. **Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná**. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, S. D. R.; BRITO, B. B. N. (Ed.) Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, p. 265-279.

MITASOVA, H., HOFIERKA, J. 1993- **Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis**. Mathematical Geology 25: 657-69p.

MITAS, L.; MITASOVA, H. (1993)- **Interpolation by regularised spline with tension: I. Theory and implementation**. Mathematical Geology 25: pp.641-55.

MITAS, L.; MITASOVA, H. (1999)- ***Spatial interpolation***- In: Geographical information systems: principles, techniques, management and applications. Eds. P. Longley et al., Wiley- 1999- p. 481-492.

MITASOVA, H.; MITAS, L.; BROWN, W. M.; GERDES, D. P.; KOSINOVSKY, I.; BAKER, T. (1995)- **Modelling spatially and temporally distributed phenomena: new methods and tools for GRASS GIS**. International Journal of Geographical Information Systems 9: pp.433–46.

NETTELER, M.; MITASSOVA, H. (2004)- **Open Source GIS: A GRASS GIS Approach**- Kluwer Academic Publishers- Springers Press- 2004- 401p.

NETO, M.A.S.; BURIOL, T.M.; SCHEER, S. (2007)- ***Um visualizador interativo para exploração de dados volumétricos obtidos em análises pelo método de elementos finitos***- CMNE/CILAMCE 2007- Porto- Portugal- 13 a 15 de Junho, 2007- 12 p.

OLIVEIRA, A.M.S; BRITO, S.N.A. **GEOLOGIA DE ENGENHARIA**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

PARAVIEW- **The paraview guide**. Disponível em: <http://www.paraview.org>- Acesso em: 15 JUL. 2010

PARAVIEW- CASE STUDIES- Polar Vortex Breakdown- Disponível em: <http://www.paraview.org/paraview/resources/applications.html>- Acesso em: 12 JAN. 2011

PATIAS, J. (2010)- **ZONEAMENTO GEOTÉCNICO COM BASE EM KRIGAEM ORDINÁRIA E EQUAÇÕES MULTIQUADRÁTICAS: BARRAGEM DE ITAIPU**- Tese de Doutorado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, Universidade de São Paulo-USP, 2010.

PRIEST, S.D.; HUDSON, J.A. (1976)- ***Discontinuity Spacings in Rock***- J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Pergamon Press –Vol.13 pp 135-148.

PRIEST, S.D.; HUDSON, J.A. (1979)- **Discontinuities and Rock Mass Geometry**- . J. ROCK MECH. MIN. SCI. & GEOMECH. ABSTR. PERGAMON PRESS - Vol.16 pp 339-362.

REFAEILZADE, P.; TAN G, L.; LIU H. (2008)- **Cross Validation**- Arizona State University production - 6pp. 2008.

RENGERS, N., HACK, R., HUISMAN, M., SLOB, S., ZIGTERMAN, W.- **Information Technology applied to engineering geology**- In: Engineering Geology for Developing Countries- 9<sup>th</sup> Congress of the International Association for Engineering Geology and The Environmental- Durban, South Africa- 2002- p. 121-143.

ROMANA, M. (1985)- **New adjustment ratings for application of Bieniawisk classification to slopes**. In. *Proc. IntSymp. Rock Mechanichs in Excavations and civil works*, Cidade do México, pp.59-58- ISRM (1985).

SCHULBERT, W. (2005). **STRUCTURED DESIGN PROCESS**. In: Sixth framework program of the European union, 2005. Presentation- p.13.

SERRA Jr, E.; OJIMA, L.M. (1998). **Caracterização de maciços rochosos**. In: OLIVEIRA, A.M.S; BRITO, S.N.A. *Geologia de engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p.211-226.

SOUZA, L.A.P.; SILVA, R.F.; IYOMASA, W.S. (1998). **Métodos de investigação**. In: OLIVEIRA, A.M.S; BRITO, S.N.A. *Geologia de engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1999. p.163-196.

Terzaghi, K.; Proctor, R. V. ;White, T. L. (1946)- "**Rock Tunneling with Steel Supports**," – Ed.1, 293 pp.- Commercial Shearing and Stamping Co. (1946).

U. S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR (1998). **Engineering Geology Field Manual. Segunda Edição**, v.2. Washington D. C. 478p.

VAN DRIEL, J.N. (1989)- **Three dimensional display of geologic data**- livro Three Dimensional Applications in Geografic Informations Systems, editado por Rapper. J.- cap.1. pp. 1-9.- editor British Library Cataloguing in Publication Data.

WAHBA, G. (1990)- **Spline models for observational data**. CNMSNSF Regional Conference Series in Applied Mathematics- v.59.Philadelphia, SIA.1990.

WAICHEL, B.L.; LIMA, E.F.; SOMMER, C.A.; LUBACHESKY, R. (2006). ***Pahoehoe flows from the central Paraná Continent Flood Basalts*** - Bull Vulcanol v.68, p.599-610.

WAICHEL, B.L.; LIMA, E.F.; SOMMER, C.A.; LUBACHESKY, R. (2007). ***Peperite formed by lava flows over sediments***: An example from the central Paraná Continent Flood Basalts, Brazil. Journal Vulcanol Geotherm Res. v.159, p.343-354.

XIONG, Z.; YUAN, C. (2008)- ***Study on the 3D Engineering-Geological Modelling na Visualization System***- International Conference on Computer Science and Software Engineering- 2008- IEEE Computer Society- pp. 931-934.

YAMAMOTO, J.K. (1994). **Curso de geoestatística aplicada**. Extensão universitária. São Paulo, apostila 82p.

ZALÁN P.V., WOLLF S., CONCEIÇÃO J.C.J., MARQUES A., ASTOLFI M.A.M., VIEIRA I.S., APPI V.T. & ZANOTTO O.A., 1990. **Bacia do Paraná**. In: Raja Gabaglia G.P. & Milani E.J. (eds.), Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Rio de Janeiro. Petrobras/SEREC/CEM-SUD: 135-168.