

Interpolação 3D de dados de Rock Quality Designation: Barragem de Itaipu, Paraná, Brasil *Three-dimensional interpolation of Rock Quality Designation Data: Itaipu Damarea, Paraná State, Brazil*

Vivian Athaydes Canello^{1,2}, Josiele Patias³ , Lázaro Valentim Zuquette¹ 

¹Universidade de São Paulo - USP, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, Avenida Trabalhador São Carlense, 400, CEP 13566-590, São Carlos, SP, BR (viviancanello@hotmail.com.br; lazarus1@sc.usp.br)

²CPRM, Goiânia, GO, Brasil.

³Itaipu Binacional Brasil/Paraguai, Foz do Iguaçu, PR, BR (josielepatias@yahoo.com)

Recebido em 11 de julho de 2019; aceito em 8 de julho de 2020

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados da aplicação de método computacional para interpolação tridimensional de dados de *Rock Quality Designation* (RQD) obtidos a partir de um conjunto de 143 sondagens rotativas, que foram realizadas na fase de investigação geológico-geotécnica para a construção da Barragem de Itaipu, localizada no rio Paraná, na fronteira entre o Brasil e o Paraguai, inserida no contexto geológico dos derrames basálticos da Formação Serra Geral. As interpolações foram desenvolvidas no programa *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS) utilizando o método numérico *spline* regularizado com tensão (RST). A interpolação foi desenvolvida para um volume de 28.10^7 m^3 a partir de 4.736 dados de entrada obtidos de 143 sondagens rotativas e considerando *voxel* 3D com resolução horizontal de 25 m e vertical de 3 m, que gerou cerca de 149.330 *voxels*, resultando em uma média de dados de entrada de 0,032/*voxel*. Os dados de entrada de RQD apresentaram média aproximada de 80, mediana 87, desvio padrão 23, coeficiente de variação de cerca de 30% e variância de 529; enquanto os dados interpolados resultaram em média 74, coeficiente de variação de 27%, variância de 400 e desvio padrão 20. O resultado da interpolação mostrou que o método utilizado é eficiente e os programas GRASS e PARAVIEW adequados e de fácil domínio para estudos de interpolação. Por outro lado, reforçou que apesar da quantidade de dados iniciais, a distribuição espacial dos dados de entrada interfere na interpolação, o que reforça a importância de um plano de investigação geológico-geotécnico adequado para obter um zoneamento com baixa incerteza.

Palavras-chave: Interpolação 3D; *Rock Quality Designation*; *Voxel*; *Geographic Resources Analysis Support System*; Barragem de Itaipu; Itaipu.

Abstract

This text presents the results of the computational method for three-dimensional interpolation of RQD data obtained from a set of 143 rotary drillings carried out during the geological-geotechnical investigation phase for the Itaipu Dam project, located in the Paraná River, in the frontier between Brazil and Paraguay. The area is inserted in the geological context of the basaltic terrain of the Serra Geral Formation. The interpolations were developed in the Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) program using the numerical method Regularized *Spline* with Tension (RST). The interpolation was developed for a volume of 28.10^7 m^3 , considering the 4,736 input data obtained from 143 rotary probes and voxel with horizontal resolution of 25 m and vertical of 3 m, which generated about 149,330 voxels, resulting in an average of 0.032/*voxel* input data. RQD input data has average value around 80, median of 87, standard deviation of 23, coefficient of variation of about 30%, and variance of 529. Meanwhile, interpolated RQD data resulted in a mean of 74, coefficient of variation of 27%, variance of 400, and standard deviation of 20. The result of the interpolation showed that the method used is efficient to data treatment and the GRASS and PARAVIEW programs are adequate and easy to use for volumetric interpolation studies. On the other hand, the result confirms that despite the amount of initial data, the spatial distribution of the input data interfere in the interpolation, which reinforces the importance of an adequate geological and geotechnical investigation plan to obtain a zoning with low uncertainty.

Keywords: 3D Interpolation; *Rock Quality Designation*; *Voxel*; Geographic Resources Analysis Support System; Itaipu Dam; Brazil.

INTRODUÇÃO

A análise, o zoneamento e a visualização de características geológicas, geotécnicas e ambientais em 3D têm sido grande motivação de estudos voltados à avaliação das variabilidades e das incertezas na qualificação e na quantificação dos atributos, das propriedades e dos respectivos parâmetros.

Durante os últimos 30 anos muitos estudos foram desenvolvidos no sentido de avaliar a simulação e a criação de modelos em diferentes dimensões (1D... 3D), como os de Rengers et al. (2002), Baojun et al. (2009) e Kessler et al. (2009). A utilização de modelos geológicos 3D teve sua difusão incrementada com as melhorias de resultados no processamento computacional durante as últimas décadas — conforme considerado por Hack et al. (2005), Kessler e Mathers (2006), Xionge Yuan (2008), Lelliott et al. (2009), Muzik et al. (2015), Wang et al. (2016) e Aswar e Ullagaddi (2017a, 2017b, 2017c) —, assim como para casos mais específicos, como nas avaliações dos níveis de incertezas (Tacher et al., 2006; Yamamoto et al., 2014; Schweizer et al., 2017), principalmente com o objetivo de direcionar as investigações geológicas e geotécnicas visando diminuir o nível de incertezas e obter dados com maior confiabilidade. Os estudos desenvolvidos com distribuição em 3D podem auxiliar em análises de áreas em diferentes escalas e para variadas finalidades relacionadas à Geologia de Engenharia, à Hidrogeologia, à mineração, aos aspectos geotécnicos e, nos casos de estudos geoambientais, às áreas contaminadas. Quanto à Geologia de Engenharia, o uso de modelos 3D, além dos citados anteriormente, são relativos a análises da variabilidade dos materiais geológicos e suas estruturas, distribuição dos valores de um parâmetro relativo a uma propriedade e destinados a detalhar as investigações geológico-geotécnicas para obras, o mapeamento geotécnico, a análise de eventos perigosos e a reestruturação de áreas urbanas. Os recursos existentes são variados, desde a geoestatística até os métodos de interpolação que passam por grande evolução, como atestado nos trabalhos de Kröger e Hinsby (2009). Por outro lado, existem diversos programas que foram desenvolvidos para análise da distribuição espacial de informações geológicas e geotécnicas em 3D, tais como 3D GEOMODELLER, LYNX, GSI3D, GEOSCENE 3D, GOCAD, SKUA-GOCAD, ANSYS e *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS). Os modelos 3D são frequentemente desenvolvidos com base em conjuntos de dados obtidos a partir de sondagens, trabalhos de campo, amostragens e levantamentos geofísicos, utilizando diferentes recursos gráficos, tais como seções verticais-2D e correlações entre dados especializados sustentados pelo conhecimento do profissional em relação ao aspecto em modelamento. De acordo com Aswar e Ullagaddi (2017a), diferentes tipos de dados podem ser usados nos variados tipos de modelos em função dos objetivos

e dos usos das informações, assim como dos dados disponíveis, e podem ser enquadrados em três categorias: dados geológicos (litologias, *Rock Quality Designation* — RQD, contatos geológicos, feições estruturais, seções verticais, linhas de drenagem, entre outros), dados geofísicos e parâmetros físicos obtidos em campo e em laboratório (permeabilidade, pH, entre outros). Por outro lado, Apel (2006) considera que existem duas possibilidades para representar aspectos geológicos: os modelos baseados em geo-objetos e em *voxel/grid*. Segundo Wang et al. (2016), os modelos de dados geológicos 3D têm sido adaptados para retratar e tratar dados complexos e são diretamente associados à possível aplicação em zoneamentos espaciais específicos.

Em geral, a execução das investigações a partir de sondagens é realizada de maneira crescente no sentido de diminuir o nível das incertezas e aumentar o conhecimento sobre a variabilidade geológico-geotécnica. Porém, existe um limite a partir do qual as informações obtidas com base nas sondagens (RQD, grau de fraturamento, perdas de água etc.) são interpoladas para gerar zoneamentos volumétricos ou determinar superfícies. As sondagens rotativas são executadas para diferentes finalidades, entre as quais a obtenção de parâmetros físicos, como o RQD, que são utilizados para gerar um zoneamento que orientará as tomadas de decisões. Porém, os custos e o aspecto temporal levam à execução de um grupo reduzido de sondagens rotativas, o que dificulta o zoneamento e gera necessidades de interpolações, assim como generalizações, e ambas aumentam as incertezas. No sentido de avaliar possíveis meios para auxiliar os processos de interpolações e generalizações, foi desenvolvido um estudo com o objetivo de analisar a distribuição espacial do parâmetro físico (RQD) que apresenta distribuição espacial com zonas de alta e baixa densidade de dados, a partir de um *software* livre baseado na teoria dos *voxels* para a interpolação e o zoneamento, considerando as seguintes condições:

- Conjunto de sondagens realizadas na investigação da área da Barragem de Itaipu, Paraná, Brasil;
- Utilização do parâmetro RQD, por ser empregado em diversas classificações geomecânicas de maneira direta ou indireta e representar a qualidade do maciço rochoso (*rock mass*);
- Utilização do *software* GRASS (2012), de domínio público há mais de 30 anos, e do PARAVIEW (2010), também de domínio público;
- Os resultados foram comparados com seções geológicas elaboradas durante a construção da Barragem de Itaipu;
- Comparação da distribuição tridimensional de RQD com as informações geológicas da área de estudo.

Durante a obra de construção da Barragem de Itaipu, localizada no rio Paraná, nos limites entre o Brasil e o Paraguai, foram realizados diversos tipos de investigação *in situ* e em laboratório para a caracterização dos materiais

geológicos destinados ao projeto das fundações das estruturas de barramento. Com os resultados dessas investigações foi desenvolvido um arquivo das investigações geológico-geotécnicas, e desse arquivo foram selecionados perfis de sondagens rotativas das quais os dados de RQD foram coletados para este estudo.

Background

Os modelos tridimensionais de dados geológico-geotécnicos possibilitam analisar informações sobre determinada área de estudo com a finalidade de definir e delimitar unidades a partir de diferentes recursos, entre eles as interpolações de dados prévios. A obtenção de modelos tridimensionais de uma área auxilia no diagnóstico de possíveis heterogeneidades dos materiais geológicos, assim como na distribuição das fraturas, dos blocos de rochas, das cavernas e do zoneamento quanto às condições dos materiais rochosos em termos de grau de alteração, de consistência e de fraturamento.

Os modelos geológico-geotécnicos são baseados em informações geotécnicas georreferenciadas, como resultados de trabalhos de campo, ensaios de sondagens e ensaios *in situ*, poços ou trincheiras de investigação, medidas de tensões *in situ*, profundidade de nível de água, topografia e interpretações de imagens de satélite, entre outras.

Para a simulação de um modelo tridimensional efetivo é importante que se utilize uma base consistente de dados e ajustada ao tipo de programa computacional que irá processar as simulações, em que a efetividade dos modelos depende da qualidade, da quantidade e da distribuição espacial das informações para a interpolação 3D.

Os modelos matemáticos utilizados como ferramentas são diversos e podem se enquadrar no campo matemático dos elementos finitos, das diferenças finitas, da geoestatística, dos métodos polinomiais, entre outros. Para interpolação tridimensional existem diversos métodos numéricos, conforme citado por Burrough (1986), Watson (1992), Mitas e Mitasova (1999), Netteler e Mitasova (2004), Sahlin et al. (2014) e Muzik et al. (2015), descritos brevemente a seguir:

- Interpolação bilinear, que utiliza quatro valores próximos e estima o valor para o ponto desconhecido a partir da interpolação linear em duas direções ortogonais (leste-oeste/norte-sul), e apesar da denominação, a função é não linear;
- A interpolação bicúbica considera um conjunto de 16 valores, sendo os coeficientes resultantes da altura dos quatro vértices associados a três derivadas parciais de cada vértice, considerando os vértices vizinhos;
- O método de interpolação denominado de krigagem está inserido no subcampo da estatística denominado geoestatística e considera a distância e a direção da autocorrelação espacial para a estimativa do valor desejado e a avaliação da acurácia do valor interpolado (kriging value). Assim, krigagem é um método que usa a combinação

linear de pesos de pontos conhecidos para a estimativa de valor para um ponto desconhecido. Os variogramas são ferramentas importantes e são utilizados para avaliar se a interpolação é viável e, portanto, os pesos são dependentes do arranjo espacial das amostras;

- O método da média ponderada, que considera um grupo de pontos vizinhos para o nó da malha em questão e o processo de interpolação ocorre pelo uso das relações entre os valores do grupo selecionado;
- Os métodos polinomiais, em que uma superfície de interpolação pode ser gerada considerando a inclinação e a elevação de cada ponto de dado, é um método que apresenta algumas desvantagens em razão da menor continuidade nas bordas do polígono de interpolação do que em seu interior;
- O método do inverso da potência da distância (IDW) é baseado na similaridade entre pontos amostrados mais próximos dos pontos a serem gerados que os mais distantes, os quais terão maior peso que pontos mais distantes na interpolação. Os pesos (w_i) diminuem na medida em que a distância aumenta e, portanto, são inversamente proporcionais à potência da distância, segundo a Equação 1, apresentada por Netteler e Mitasova (2004):

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

Em que:

$$w_i = \frac{1}{|r - r_j|^p}$$

r = ponto a ser estimado;

m = número de pontos próximos considerados;

i = número do ponto inicial;

w = peso médio de ponderação;

z = posição de ponto;

p = um parâmetro empírico;

j = indica o ponto considerado.

- O método *spline* regularizado com tensão (RST) é desenvolvido considerando uma função radial base dependente de uma seminorma de suavização, que é obtida a partir da minimização da somatória dos desvios de pontos de dados relativa à minimização da soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo de interpolação foi baseado em dados de RQD obtidos a partir de sondagens rotativas executadas durante

a fase de investigações geológicas e geotécnicas para o desenvolvimento do projeto da Barragem de Itaipu, no rio Paraná (Brasil/Paraguai).

A interpolação foi desenvolvida pelo método de RST, cuja base é uma função radial dependente de uma seminorma de suavização, que é obtida a partir da minimização da somatória dos desvios de pontos de dados relativa à minimização da soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados. As Equações de 2 a 4 representam a minimização, a seminorma de suavização e a função radial base, respectivamente, de acordo com Mitas e Mitasova (1999):

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

Em que:

N = número de pontos considerados;

j = indica o ponto considerado;

z = posição de ponto;

F = medida de suavização;

r_j = ponto com coordenadas específicas;

w_j e w_0 = ponderações positivas dos atributos;

$I(F)$ = seminorma de suavização.

$$I(F) = \sum_{\min.} c_{\min.}(\varphi) \int [F_x^n]_x^m dr \quad (3)$$

Em que:

c = condição relativa ao parâmetro de tensão generalizado;

φ = parâmetro de tensão;

n, m, x = condições limites para integração;

dr = condição de integração.

$$R_d(r, r_j) = R_d(|r, r_j|) = R_d(r) = \rho^{-\delta} \gamma(\delta, \rho) - \frac{1}{\delta} \quad (4)$$

Em que:

$$r = |r, r_j|$$

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

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

R_d = função de base radial;

r, r_j = pontos discretos com coordenadas específicas dentro de um espaço;

ρ, δ = parâmetros de função gama incompleta;

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

d = constante;

φ = parâmetro de tensão;

O método de RST tem como pressuposto que a interpolação passe por todos os pontos de dados ou o mais próximo a estes, de modo mais suave possível, e se difere do método simples de *spline* regularizada, por utilizar o parâmetro tensão, que força as estimativas a ficarem mais próximas dos dados da amostra.

Para os processos de interpolação bi e tridimensional no programa GRASS é necessário que se definam os parâmetros a partir de procedimentos de calibração. Tais parâmetros definem as resoluções horizontais e verticais dos *voxels*, que são unidades de volume geralmente tratadas como um conjunto ordenado de elementos de volume ou como um conjunto ordenado de células. O *voxel* é o equivalente tridimensional do *pixel* e contém informações ordenadas de suas dimensões, localização espacial e atributos associados (Raper, 2000). A geometria do *voxel* está ilustrada na Figura 1, que representa uma célula 3D gerada a partir das coordenadas x, y, z de um ponto de dado (valor de RQD) e seu atributo.

O estudo foi desenvolvido por etapas, conforme o fluxograma da Figura 2, envolvendo desde o levantamento das sondagens rotativas nos arquivos (físicos) da Itaipu Binacional até as análises finais dos resultados da interpolação:

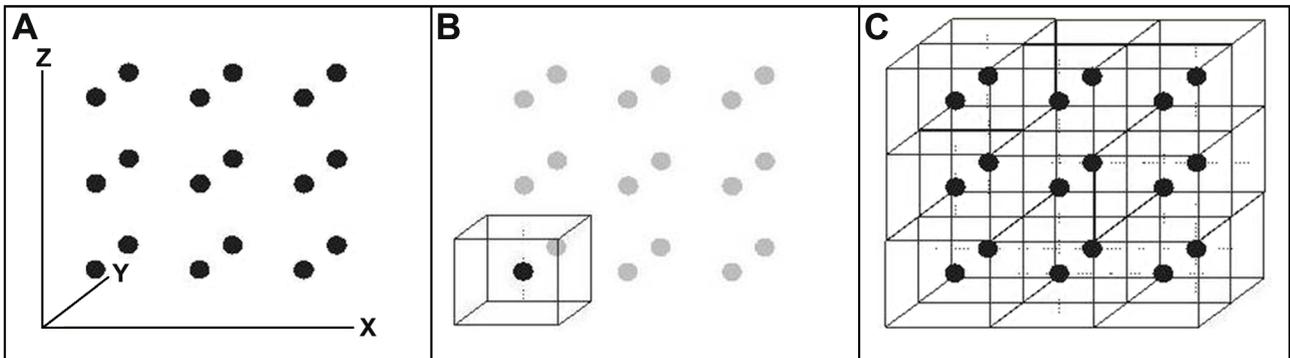
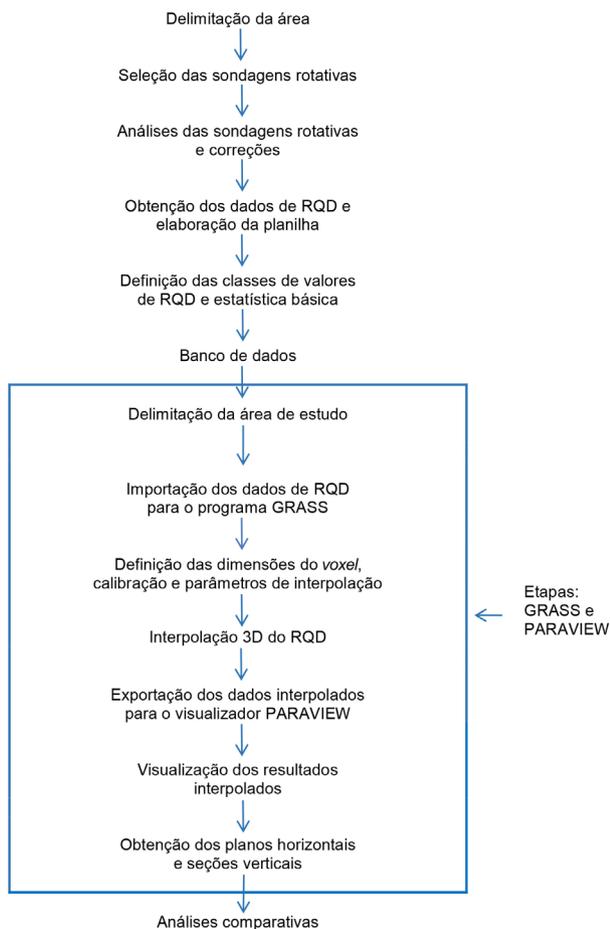


Figura 1. Relações entre *voxels*: (A) exemplo de rede de pontos amostrados (x, y, z); (B) geometria do *voxel*; (C) modelo 3D.



RQD: *Rock Quality Designation*; GRASS: *Geographic Resources Analysis Support System*.

Figura 2. Fluxograma da sequência utilizada para o desenvolvimento do estudo.

- Etapa 1: Levantamento, junto aos arquivos da Itaipu Binacional, dos dados referentes às sondagens rotativas e dos dados complementares. As sondagens passaram por correções em termos de posicionamento e verticalidade, e foi elaborada a planilha com os dados de RQD obtidos das sondagens rotativas considerando as manobras;
- Etapa 2: Análises estatísticas básicas dos dados de RQD, como média e porcentagens para as diferentes classes adotadas da classificação de maciço rochoso (*rock mass*) de Bieniawski (1989): 0 a 25%, 25 a 50%, 50 a 75%, 75 a 90% e 90 a 100%;
- Etapa 3: Estruturação do banco de dados com os valores de RQD e posicionamento espacial. Com o banco de dados pronto para ser inserido no programa, é necessário obter a região (*region*) onde serão simulados os modelos 3D. A *region* (limites da área de estudo — maior e menor extensão) é definida pelas suas coordenadas

UTM extremas (Norte, Sul, Leste e Oeste), pelo sistema de referência (Datum) e pela zona UTM (fuso). Dessa maneira, os pontos de dados são importados ao programa GRASS;

- Etapa 4: Delimitação bi e tridimensional dos limites, assim como das altitudes de boca e base das sondagens rotativas;
- Etapa 5: Definição das dimensões dos *voxels* a partir de testes de sensibilidade e calibração, considerando diferentes dimensões e valores dos parâmetros de interpolação;
- Etapa 6: Importação dos dados do banco de dados para o *software* GRASS e definição final dos parâmetros de interpolação. A importação dos dados numéricos para o programa GRASS foi a partir dos dados em formato ASCII na extensão *.txt, que foram transformados do banco de dados original para tal formato, visto que estavam no formato GEOEAS com extensão *.xls;
- Etapa 7: Calibração dos parâmetros de interpolação, importação de dados e interpolação de superfícies de base e topo do modelo 3D. Durante o processo de calibração dos parâmetros de interpolação, também foram definidas: as cotas máximas de topo e da base do bloco a ser interpolado; as distâncias mínimas para interpolação dos pontos de dados; a tensão, que controla a distância sobre determinado ponto de influência à superfície resultante ou hipersuperfície e que pode ser interpretada como o caráter de ajuste à superfície resultante; o *smooth* (suavização), que determina o grau de suavização da superfície de interpolação; o número mínimo de pontos utilizados para a interpolação (NPMIN); e o número máximo de pontos para um segmento (SEGMAX). Para a escolha final dos parâmetros foram avaliadas diferentes combinações de tensão, *smooth*, NPMIN, *tbres* (resolução vertical do *voxel*) e *res3* (resolução horizontal do *voxel*);
- Etapa 8: Interpolação tridimensional do atributo RQD e exportação do modelo tridimensional para o visualizador PARAVIEW. Para a interpolação das superfícies foram utilizados os valores das UTM, das cotas de topo e base de cada sondagem para a geração das superfícies de topo e base do modelo 3D. Para a interpolação tridimensional de RQD foram utilizadas as informações das UTM, as cotas topográficas e o valor de RQD de cada manobra das sondagens rotativas encontradas no volume de interpolação. As interpolações foram realizadas no programa GRASS para gerar o zoneamento geológico-geotécnico do maciço rochoso. A partir dos modelos 3D foram gerados perfis verticais e planos horizontais com distribuição dos parâmetros de RQD nas diferentes classes;
- Etapa 9: Visualização tridimensional do modelo e análise estatística das classes de RQD interpoladas. Para a visualização do modelo tridimensional foi necessário exportar os resultados das interpolações em formato

*VTK, assim como para realizar as análises das percentagens dos volumes de RQD em cada classe;

- Etapa 10: Elaboração de seções verticais em direções previamente definidas e de planos horizontais em diferentes altitudes a partir dos dados interpolados no programa PARAVIEW, e comparação dos resultados com dados prévios obtidos por outros meios;
- Etapa 11: As análises dos resultados foram desenvolvidas considerando dois aspectos:
 - (i) comparação dos resultados da interpolação com dados da análise estatística dos valores de RQD de entrada e com os dos volumes de RQD apresentados no modelo interpolado; e
 - (ii) comparações da seção geológica vertical adotada para a área a partir de trabalhos de campo e dados de sondagens com seção e planos extraídos do modelo 3D da interpolação dos valores de RQD, a partir do programa GRASS.

CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA

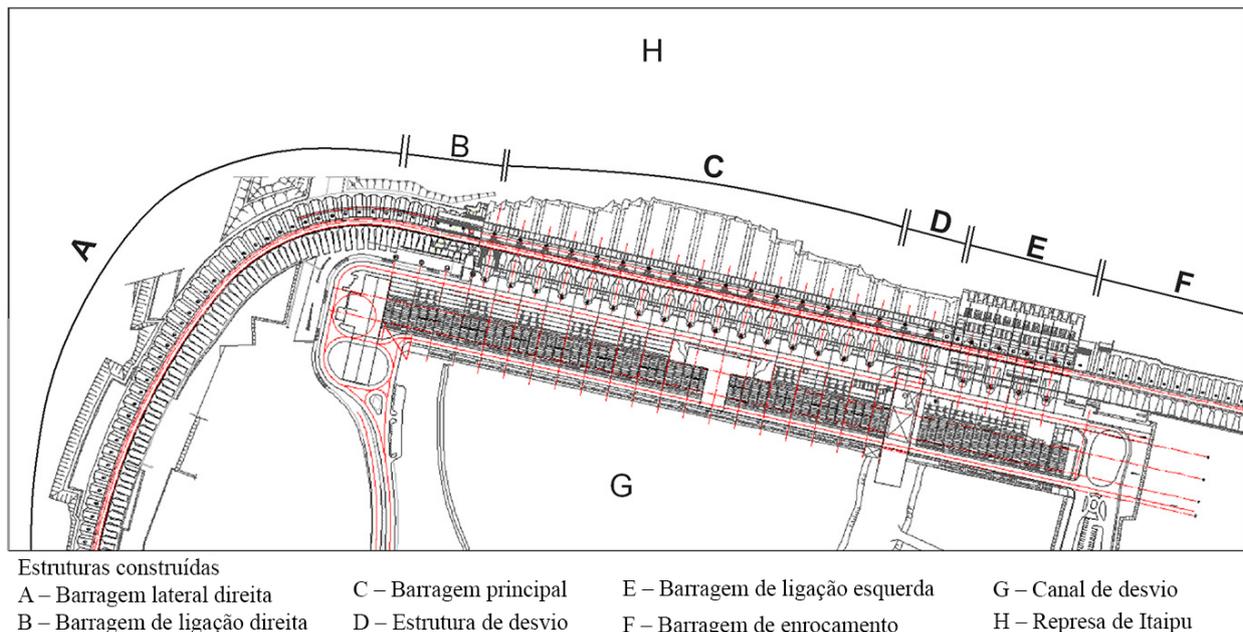
A área de trabalho tem 1,12 km² e refere-se à área de construção da barragem principal de Itaipu, englobando as estruturas construídas: barragem principal, barragens de ligação esquerda e direita, barragem lateral direita, estrutura de desvio, barragem de enrocamento, canal de desvio e parte da Represa de Itaipu (Figura 3).

A Usina Hidroelétrica de Itaipu está inserida no contexto geológico da Bacia do Paraná, tendo como fundação diferentes derrames basálticos da Formação Serra Geral.

O conjunto de camadas de material basáltico pode atingir uma espessura total máxima de 1.700 m e os derrames, individualmente, apresentam espessuras variáveis de 10 a 80 m (Marques e Ernesto, 2004). Na área em estudo, a espessura total é da ordem de 700 m, e cada derrame basáltico, em geral, é constituído de diferentes níveis de alternância de textura, gerados pelo processo de resfriamento da lava. A porção superior é constituída de uma camada vesículo-amigdaloidal, gerada pelo resfriamento muito rápido da lava, e a porção central do derrame é composta de basalto de estrutura maciça de textura afanítica a fanerítica fina. A terceira porção do derrame está tanto em contato basal quanto em contato com o topo de outro derrame, e é constituída de brechas vulcânicas caracterizadas, normalmente, pela presença de fragmentos de basaltos cimentados por matriz arenossiltosa ou basáltica (Guidicini e Campos, 1968).

Durante a etapa de investigação geológico-geotécnica da obra foram estudados cinco derrames distintos, denominados A, B, C, D e E. Para exemplificar, encontra-se na Figura 4 a distribuição típica de um derrame basáltico encontrado na área segundo seus tipos rochosos e zonas de transição entre derrames (contato).

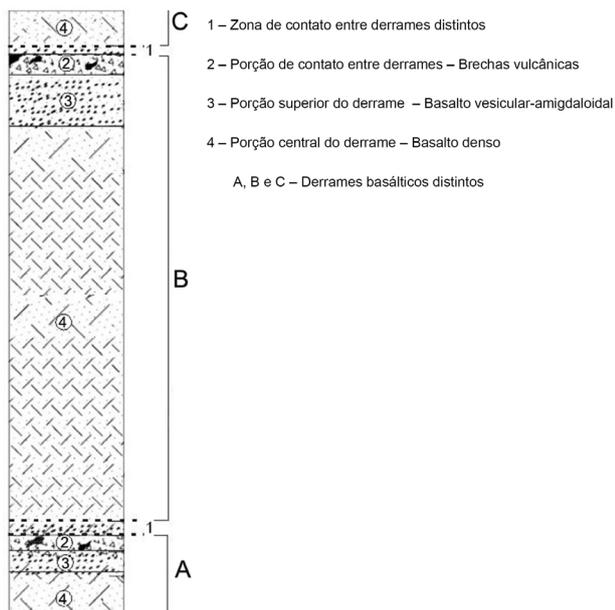
Nesse contexto geológico foram encontradas descontinuidades (superfícies que apresentam resistência à tração medida na ortogonal muito baixa ou nula) localizadas nos



Fonte: modificado de Patias (2010).

Figura 3. Localização da área de estudo e as estruturas construídas.

pacotes rochosos dos derrames A, B, D e E — denominadas descontinuidades A, B, D e E, respectivamente —, dispostas da base para o topo. A Descontinuidade E, mais superficial, foi originada pelo processo de alívio de tensões no maciço rochoso, que ocorreu em razão da remoção de pelo menos



Fonte: modificado de Itaipu Binacional (1972).

Figura 4. Exemplo de uma seção típica de derrame basáltico na área de Itaipu.

150 m de espessura de material rochoso. As descontinuidades A, B e D têm suas gêneses associadas aos derrames vulcânicos e aos processos tectônicos (Itaipu Binacional, 1972).

A Descontinuidade D é a estrutura mais importante na área de Itaipu — posicionada entre as cotas de 110 e 130 m, de acordo com os arquivos e as escavações — e as rochas onde ocorre apresentam em suas paredes alto teor de minerais formados por processos de intemperismo, como a nontronita. O basalto denso nessa porção tem graus de alteração variando de medianamente a totalmente alterado (Itaipu Binacional, 1997). Essa descontinuidade tem 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 a zona intermediária do basalto denso, resultando nos pequenos deslocamentos que formaram vazios na rocha, permitindo a percolação de água e a alteração rápida do material geológico.

RESULTADOS

Como resultado do levantamento junto ao arquivo da Itaipu Binacional, coletou-se um conjunto de 143 perfis de sondagens rotativas com topos com altitude aproximada de 200 m e algumas bases atingindo valores de até -187 m, distribuídas na área de estudo de maneira irregular, conforme se observa na Figura 5. Considerando as dimensões citadas, o volume considerado no processo de interpolação é da ordem de 28.10^7 m^3 .

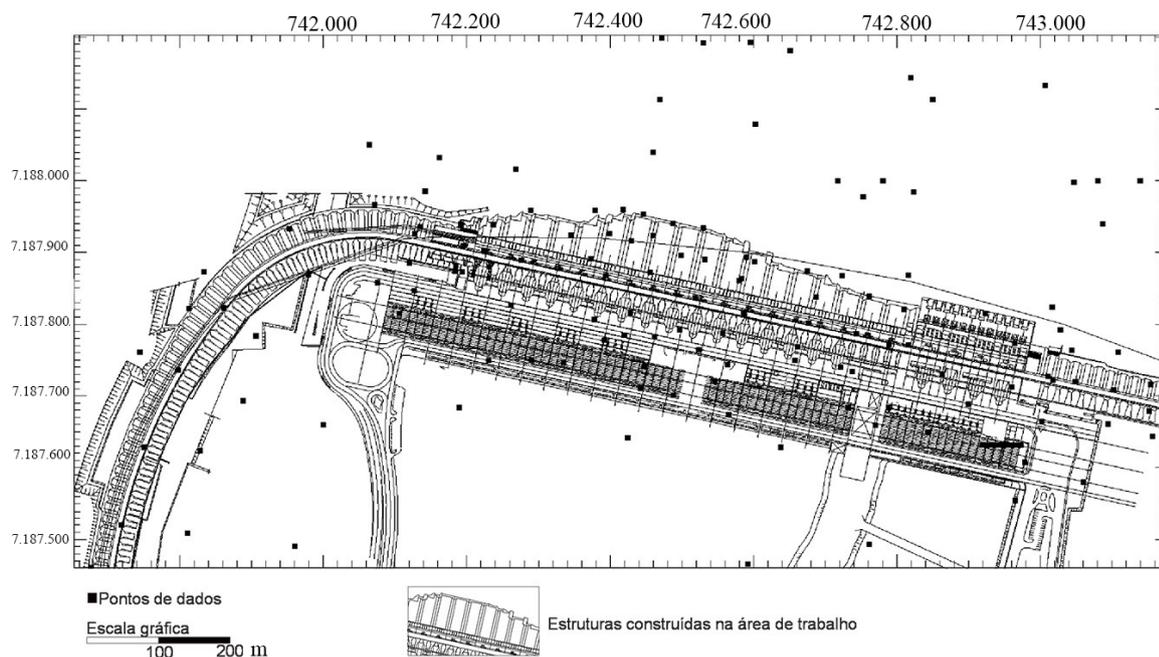


Figura 5. Mapa com a localização das sondagens rotativas na área de estudo.

Parâmetros de interpolação

Para a escolha dos parâmetros de interpolação foram testadas diversas combinações de parâmetros, e os resultados foram analisados em relação aos dados de entrada. Os parâmetros de calibração admitidos para a simulação computacional do modelo 3D de RQD estão na Tabela 1 e foram adotados a partir de diversas avaliações, considerando diferentes valores até atingir o conjunto mais equilibrado.

Distribuição dos valores de Rock Quality Designation e voxels

As 143 sondagens rotativas apresentam dados de RQD obtidos para manobras de valor médio de 2,5 m com desvio padrão de 0,80 m — cerca de 3 mil manobras estão na faixa de 2,8 a 3,2 m — e que geraram 4.736 valores de RQD. Considerando o volume total do bloco (28.10^7 m^3) e o de cada *voxel* ($25 \times 25 \times 3 \text{ m}$), de 1.875 m^3 obteve-se um arranjo de 149.333 *voxels*, que associados aos dados de RQD resultaram em um valor médio de 0,032 dado/*voxel*.

Na Figura 6, encontra-se o histograma de frequência dos dados de RQD usados como entrada para a interpolação (4.736) com assimetria negativa, com 4% dos dados na classe de 0 a 25%; 6%, na de 25 a 50%; 17%, na de 50 a 75%; 30%, na de 75 a 90%; e 43%, na de 90 a 100%, com média 80, mediana 87, desvio padrão 23, coeficiente de variação de 30% e variância de 529. O predomínio dos dados entre 75 e 100% reflete as sondagens mais profundas que atingem materiais rochosos mais intactos que os superficiais e que apresentam maiores valores de RQD. Portanto, esse aspecto reflete um direcionamento potencial para essa faixa de valores.

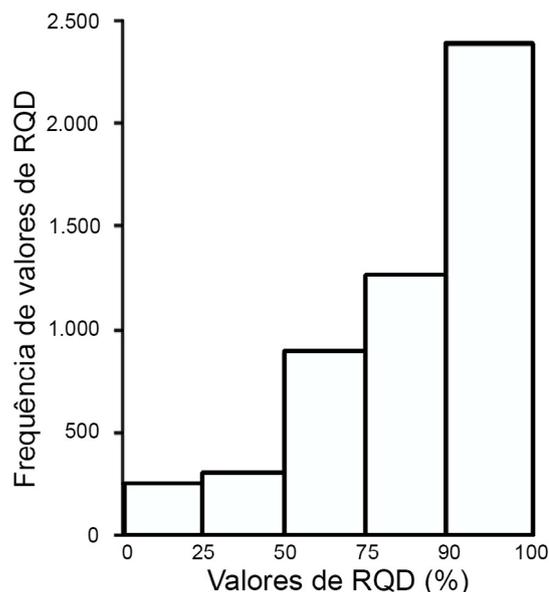
Análise dos resultados da interpolação 3D de Rock Quality Designation

Os dados provenientes da interpolação tridimensional de RQD, considerando os parâmetros de interpolação (Tabela 1) e os

Tabela 1. Parâmetros de interpolação adotados no estudo.

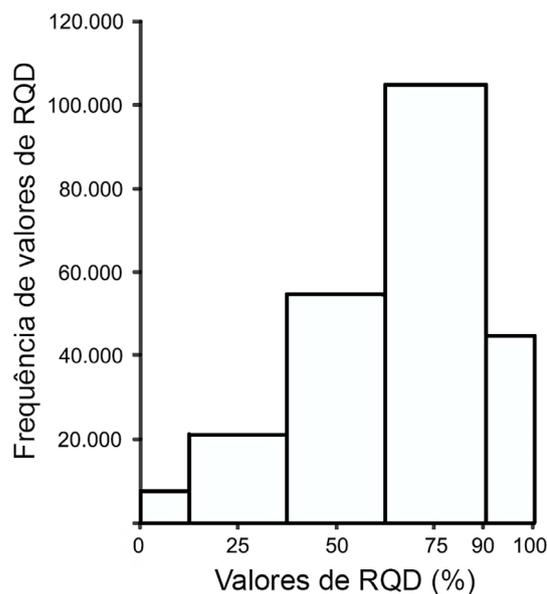
Parâmetros de interpolação	
Dimensão horizontal do <i>voxel</i>	25 m
Dimensão vertical do <i>voxel</i>	3 m
Altitude máxima do volume interpolado	200 m
Altitude mínima do volume interpolado	-50 m
Volume total	28.10^7 m^3
Distância mínima entre pontos interpolados	0,1 m
Tensão	20
<i>Smooth</i>	0,01
NPMIN (número mínimo de pontos utilizados para a interpolação)	200
SEGMAX (número máximo de pontos para um segmento)	199

dados de entrada, geraram um histograma com assimetria negativa (Figura 7), com 3,2% de 0 a 25%; 9,1% de 25 a 50%; 23,4% de 50 a 75%; 45,1% de 75 a 90% e 19,1% de 90 a 100%, que resultou em média 74, coeficiente de variação de 27%, variância de 400 e desvio padrão 20.



RQD: Rock Quality Designation.

Figura 6. Histogramas de frequência dos dados de entrada de Rock Quality Designation (considerando as cinco classes da Classificação de Bieniawski, 1989).



RQD: Rock Quality Designation.

Figura 7. Histogramas de frequência dos valores de Rock Quality Designation interpolados.

Na Figura 8, encontram-se as imagens dos volumes representando os resultados da interpolação para as cinco classes de valores inseridos no volume total considerado no processo de interpolação. Na Figura 8A, observa-se uma vista de montante, e na Figura 8B, de jusante.

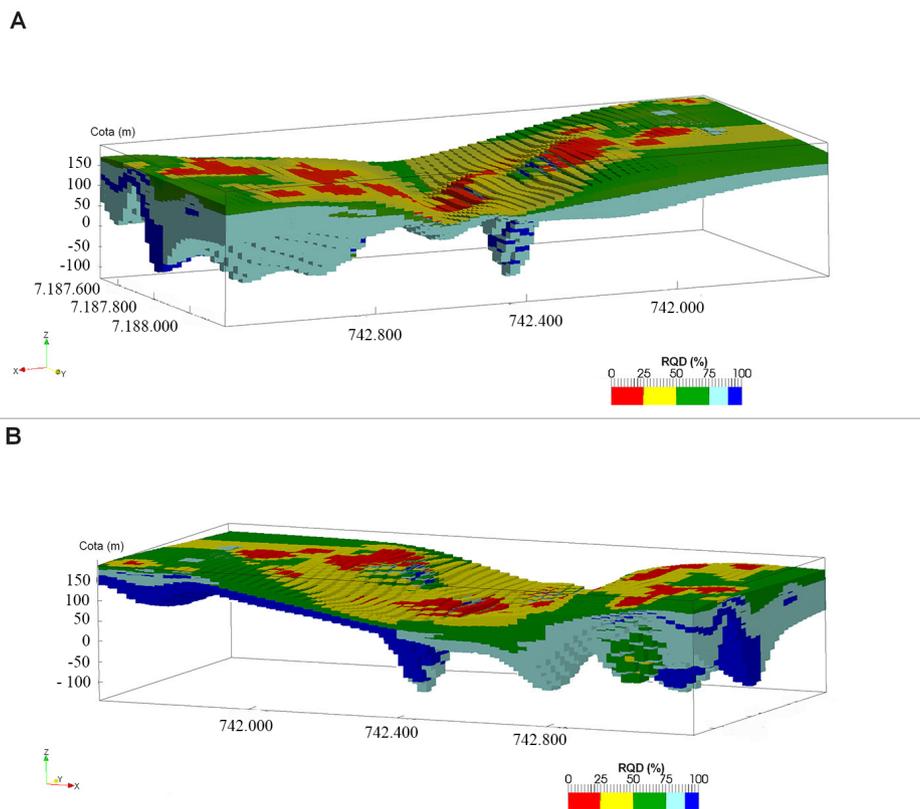
Verifica-se que valores de 75 a 90% estão distribuídos em todas as porções do modelo tridimensional entre as cotas de 160 a -115 m, seguindo as topografias de topo e fundo do modelo (Figura 8A). Na porção central do modelo, onde antes da construção do empreendimento se encontrava o leito do rio Paraná, a espessura desse intervalo é menor, passando a ocorrer cotas mais baixas que 0 m. Os valores de RQD 75 a 90% se intercalam com volumes da classe 90 a 100% na porção central do modelo (entre as cotas de 50 a -180 m), a NE (entre as cotas de 150 a 50 m), a SE (entre as cotas de 150 a -70 m) e a NW e SW (entre as cotas de 200 a 150 m). Os valores de RQD 90 a 100% se distribuem predominantemente nas porções SW (entre as cotas de 200 a 90 m) e SE (entre as cotas de 150 a -170 m) e no centro do modelo (entre cotas de 100 a -100 m), conforme Figura 8B.

Na Figura 9, encontram-se representados os volumes referentes aos valores de RQD interpolados para cada classe. Os valores de RQD 50 a 75%, em geral, sobrepõem

em termos de altitude os volumes de RQD 75 a 90%, distribuindo-se na porção superficial, entre as cotas de 200 a 0 m, seguindo as cotas da superfície de topo (Figuras 9A, 9B e 9C). Tais valores são intercalados a valores de 25 a 50% na porção central, entre as cotas de 100 a 10 m; a NW, entre as cotas de 170 a 100 m; a SE, entre as cotas de 150 a 10 m; e a NE, entre as cotas de 150 a 50 m, como é possível observar mais facilmente relacionando as Figuras 8 e 9E.

O volume interpolado de 25 a 50%, de maneira geral, distribui-se topograficamente acima dos volumes de 50 a 75%, como mostra a relação entre as Figuras 9C e 9D. Valores de RQD 25 a 50% se intercalam a volumes de 0 a 25% na porção central do modelo, entre as cotas de 100 a 10 m, e a SE, entre as cotas de 160 a 100 m. Os valores de RQD 0 a 25% também se distribuem na superfície do modelo 3D, entre as cotas de 180 a 40 m; na porção SW, a partir da cota 180 m; na porção NW, a partir da cota 170 m; a SE, a partir da cota 160 m; a NE, a partir da cota 150 m; e na porção central do modelo, desde a cota 100 m até a superfície de cota mais baixa, a 40 m (Figuras 9D e 9E).

Segundo a distribuição dos intervalos de RQD ao longo do modelo tridimensional, verificou-se que nas porções superficiais central, NW, NE e subordinadamente a SE são



RQD: *Rock Quality Designation*.

Figura 8. Distribuição espacial dos valores de *Rock Quality Designation* após a interpolação. (A) Vista de montante para jusante da barragem; (B) vista de jusante para montante da barragem.

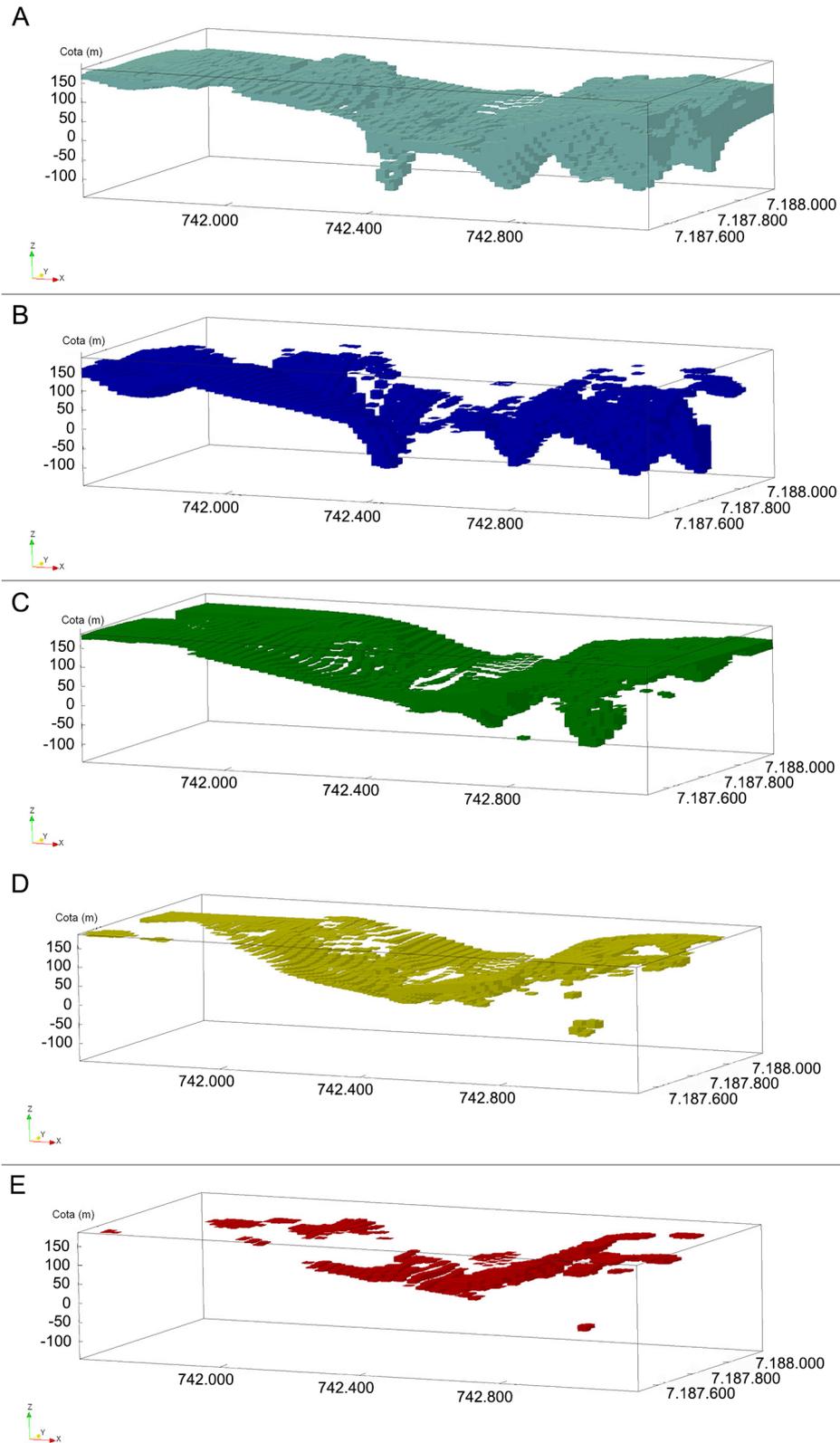


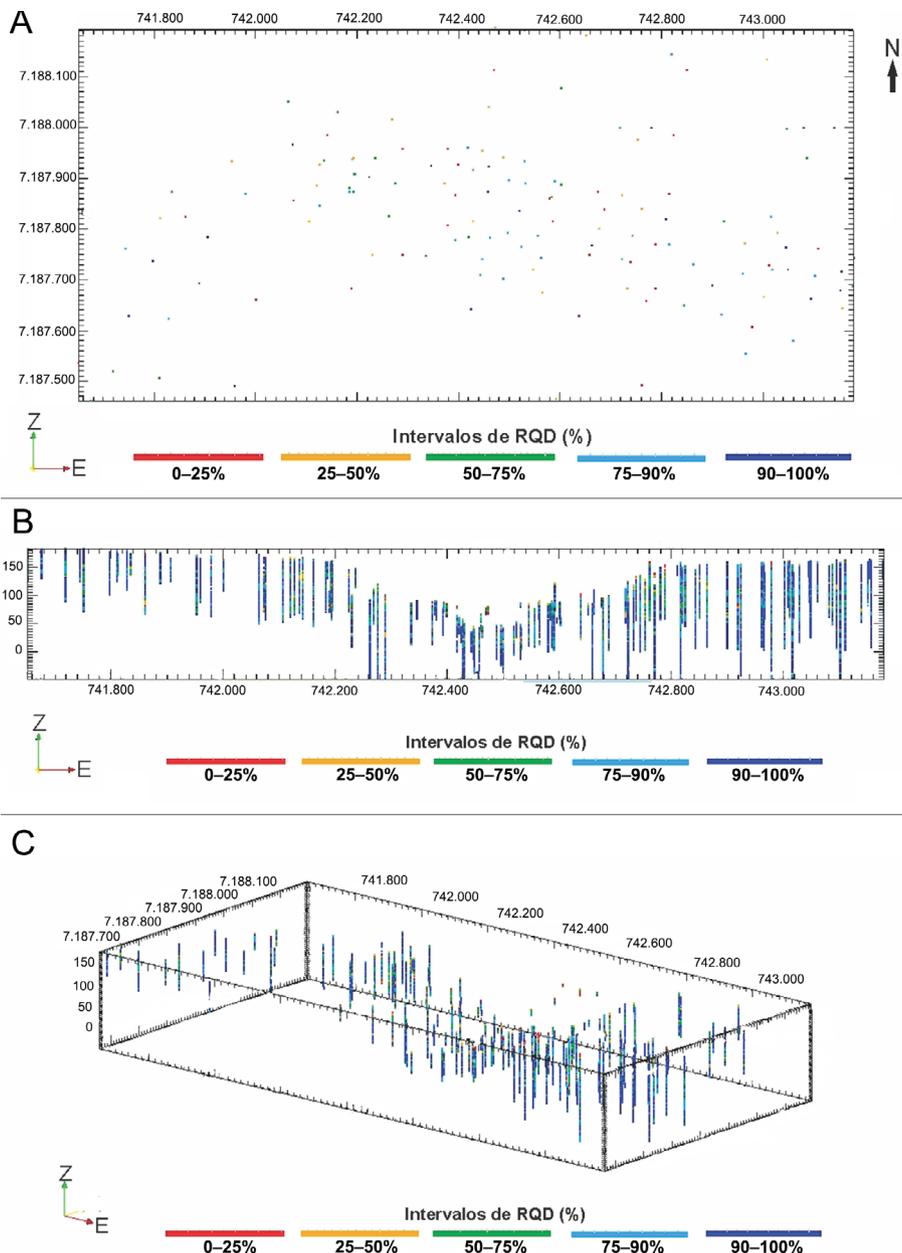
Figura 9. Representações das classes de *Rock Quality Designation* em 3D observadas de jusante para montante da barragem: (A) classe de 90 a 100%; (B) classe de 75 a 90%; (C) classe de 50 a 75%; (D) classe de 25 a 50%; (E) classe de 0 a 25%.

encontrados valores de 0 a 50%. As zonas com esses valores se distribuem, principalmente, na porção central, onde se localizava o antigo canal do rio Paraná, e nas superficiais nas quais o intemperismo foi mais intenso em razão do fluxo de água pelas descontinuidades.

Os valores de 90 a 100% tendem a se distribuir nas profundidades maiores nas porções NW e central, onde o maciço rochoso foi menos exposto a alterações intempéricas. Essas zonas também se apresentam com predominância nas

porções intermediária a basal, a SW, em que possivelmente não houve influência do intemperismo e do alívio de tensões.

Os resultados apresentados neste trabalho indicam que a distribuição espacial dos dados — no caso heterogênea — interfere fortemente na interpolação, pois a ausência ou o predomínio de um valor gerou o decréscimo da porcentagem de valores de RQD da classe de 90 a 100% e, sucessivamente, o extremo aumento do intervalo de 75 a 90%. Na Figura 10, observa-se a distribuição dos perfis das sondagens em área,



RQD: Rock Quality Designation.

Figura 10. Distribuição das sondagens rotativas no volume estudado. (A) Vista em área; (B) vista no volume com a distribuição dos valores de Rock Quality Designation; (C) vista em perfil realizado na direção W-E.

o volume total e o volume em perfil vertical, além de ser possível verificar, por exemplo, que nas porções SW e NW da área de trabalho, abaixo da cota 100 m, e nas porções central, NE e SE, abaixo da cota 50 m, há ausência de pontos de dados de entrada, gerando uma distribuição heterogênea de informações para a interpolação tridimensional.

Relação dos dados de Rock Quality Designation interpolados com os derrames

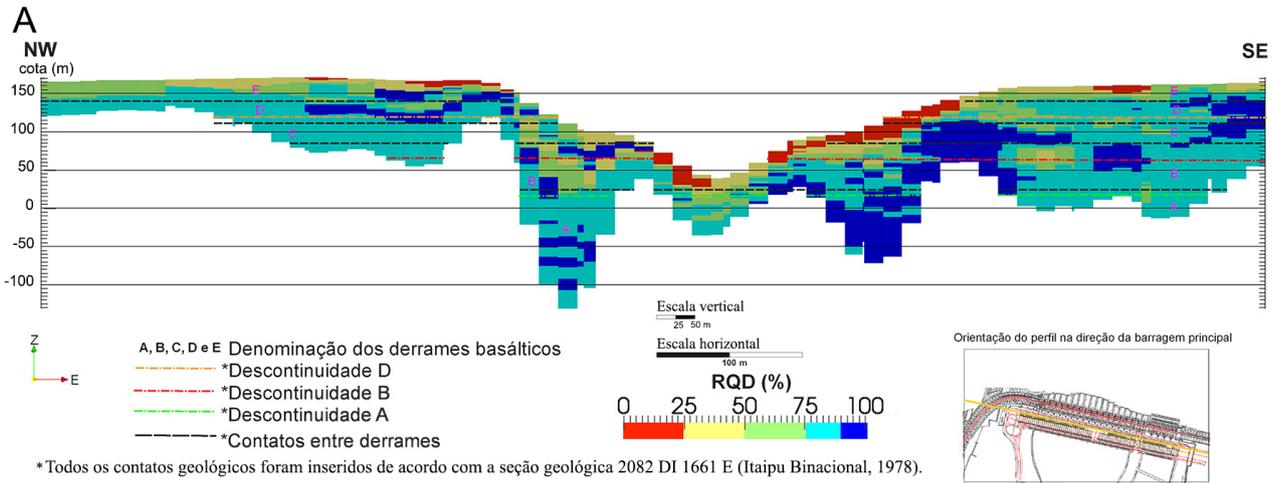
Na Figura 11, encontra-se o perfil vertical obtido a partir do modelo 3D interpolado segundo a orientação do eixo geral de construção da barragem principal de Itaipu e com a mesma direção da seção geológica realizada pela Itaipu Binacional (1978). O perfil vertical de RQD foi analisado comparativamente com a seção geológica da barragem principal, e a análise demonstrou que na direção do eixo da barragem principal a interpolação tridimensional apresenta

valores de RQD 75 a 100%, na porção onde ocorrem as rochas do Derrame A, com exceção das profundidades em que se encontra a Descontinuidade A, com os valores variando de 50 a 75%.

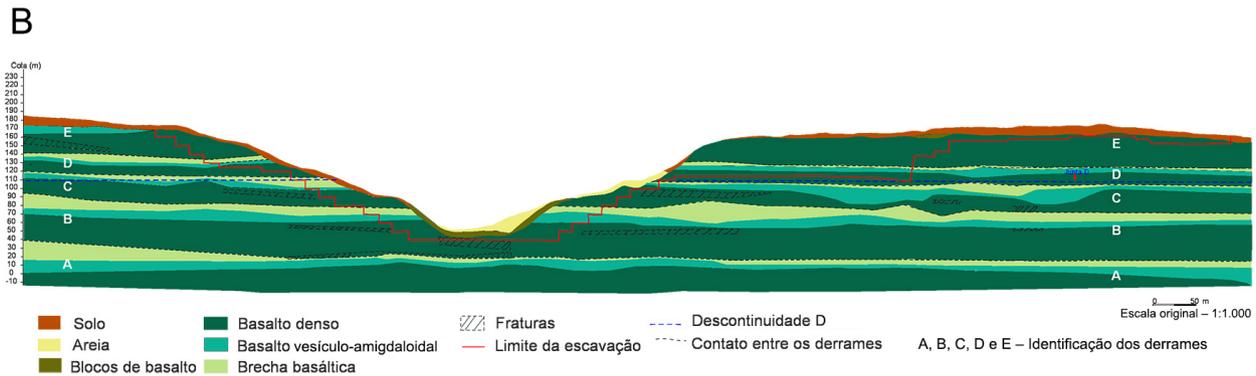
A porção com o Derrame B apresenta distribuição bastante heterogênea, em que valores de 0 a 50% ocorrem principalmente na porção central do perfil, próximo ao antigo leito do rio Paraná.

O Derrame C apresenta valores de 75 a 90% na margem direita do Rio Paraná e associados à porção de topo do basalto denso até as brechas vulcânicas do Derrame C.

Na porção da margem esquerda do rio Paraná, a SE do perfil, os valores de RQD têm predomínio entre 75 e 100%, nos basaltos densos do Derrame C, e ocorrem algumas concentrações de valores entre 50 e 75% onde ocorrem as brechas vulcânicas e o basalto vesículo-amigdaloidal com maiores espessuras. Na parte central do perfil, dentro do pacote rochoso do Derrame C, os valores de RQD apresentam



*Todos os contatos geológicos foram inseridos de acordo com a seção geológica 2082 DI 1661 E (Itaipu Binacional, 1978).



RQD: Rock Quality Designation.

Fonte: modificado de Itaipu Binacional (1978).

Figura 11. Seções verticais aproximadamente correlatas quanto ao posicionamento em direção paralela à barragem principal de Itaipu. (A) Dados de Rock Quality Designation interpolados; (B) seção geológica.

variação de 0 a 75%, onde são encontradas desde o basalto denso até as brechas vulcânicas do Derrame C. A diminuição dos valores de RQD está associada aos fraturamentos e aos fatores de intemperismo ocorridos nos materiais próximos da antiga calha do canal.

Na zona do Derrame D, observa-se grande variabilidade dos resultados, representando, também, a variabilidade dos materiais geológicos, como é possível observar na comparação das Figuras 11A e 11B. Distribuem-se na margem direita do canal, com valores de 75 a 100%, no basalto denso do Derrame D, entre o contato com o Derrame C e a Descontinuidade D. Acima da Descontinuidade D, desde o basalto denso até a brecha vulcânica do Derrame D, o RQD varia de 50 a 100%. Na margem esquerda do canal, os valores variam entre 50 e 100%, entre o contato com o Derrame C e a Descontinuidade D, e há valores de 75 a 100% acima dessa descontinuidade. Os valores mais baixos de RQD no pacote de rochas do Derrame D ocorrem na porção central, próximos à margem direita do rio, onde é verificada a presença de valores entre 0 e 25%.

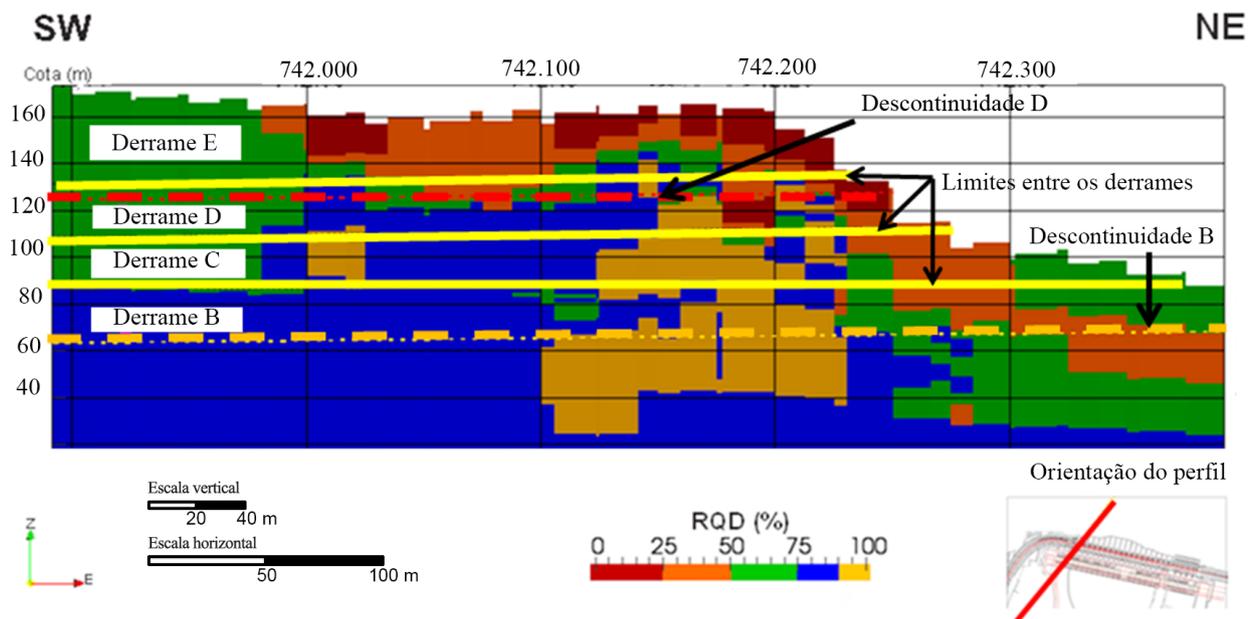
A porção do Derrame E é a mais superficial e apresenta variação intensa dos valores, entre 0 e 100% e decrescendo da base para o topo. Verifica-se na Figura 11B que o limite de escavação para a execução da obra contemplou a retirada de parcela significativa das zonas com os piores valores (RQD < 25%), e que muitas zonas

com magnitudes de valores menores (RQD < 50%) estão inseridas na fundação da barragem e foram o motivo de tratamento do maciço rochoso.

Na Figura 12, encontra-se uma secção vertical posicionada à margem direita do rio Paraná (lado Paraguai) com direção SW-NE para exemplificar a distribuição das diferentes classes de RQD e as diferentes possibilidades de uso nas investigações geológicas e geotécnicas, como a locação de ensaios *in situ* e sondagens mecânicas para fins específicos e em zoneamentos. Observa-se que existe uma zona de valores menores que 50% ocorrendo em praticamente toda a extensão mais superficial, assim como uma gradação crescente dos valores com a profundidade, como esperado em termos de maciços rochosos.

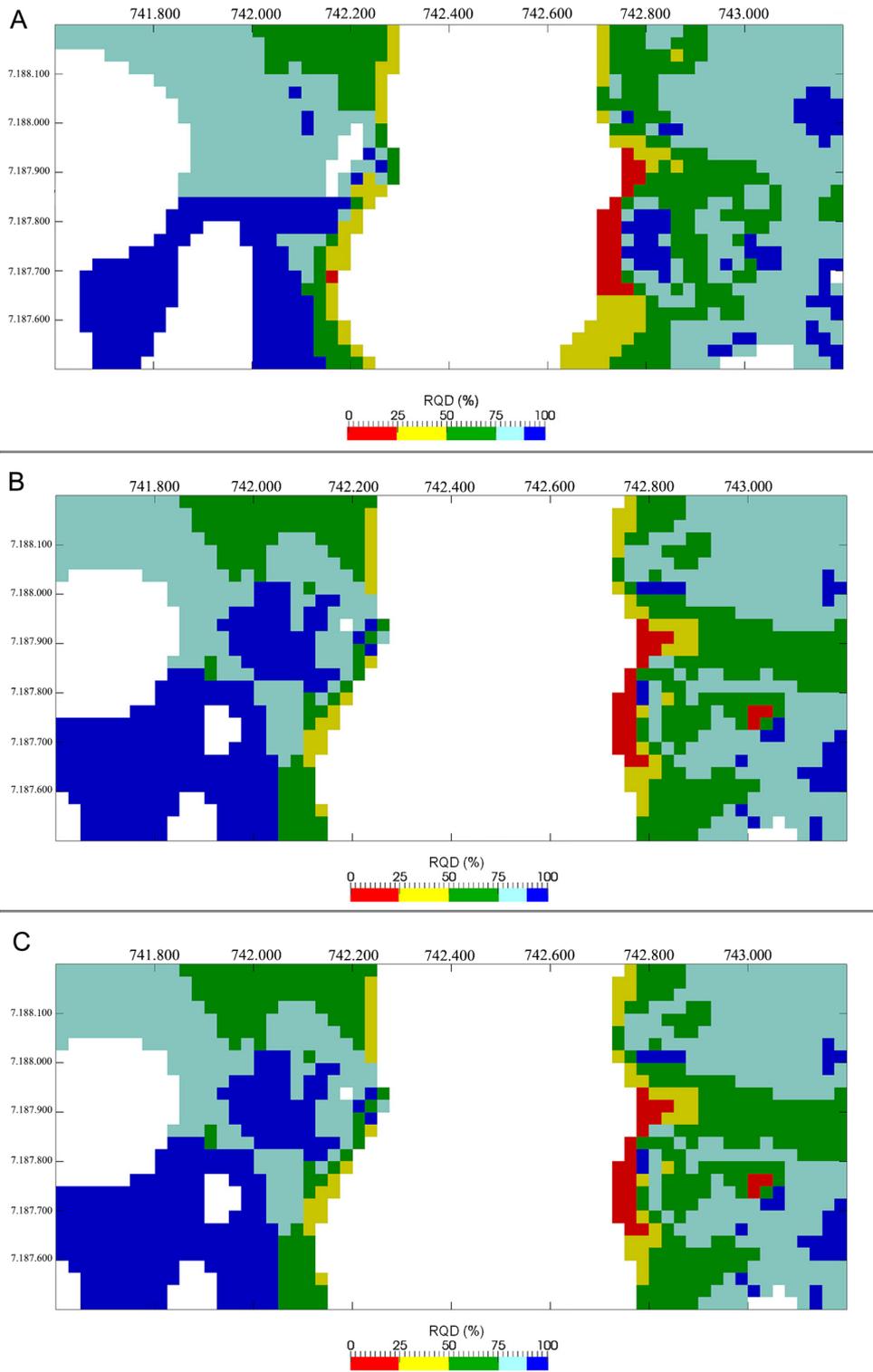
Análise dos dados interpolados em planos horizontais

A Descontinuidade D é a estrutura geológica na área de Itaipu com a maior extensão e ocorre próximo à base do basalto denso do Derrame D, não apresentando uniformidade e ocorrendo em uma faixa entre as altitudes de 110 a 130 m, conforme dados constantes do arquivo da Itaipu Binacional. No sentido de avaliar os resultados frente a uma condição geológica específica, foram gerados planos horizontais nas altitudes de 110, 125 e 130 m (Figura 13).



RQD: Rock Quality Designation.

Figura 12. Exemplo de secção vertical com direção SW-NE no lado direito do rio Paraná.



RQD: *Rock Quality Designation*.

Figura 13. Planos horizontais com distribuição das classes de *Rock Quality Designation* (RQD) interpolados ao longo da provável Descontinuidade D. (A) Altitude 110 m; (B) altitude 125 m; (C) altitude 130 m.

Segundo a análise dos planos horizontais, foi possível verificar que a interpolação dos dados resultou em uma distribuição diferente entre os dois lados do canal, o que é fruto da variação dos materiais geológicos (diferentes litologias) e da descontinuidade. Os valores nos intervalos de 0 a 75% se concentram, em geral, mais próximos à antiga calha do rio Paraná, onde ocorre maior grau de fraturamento, principalmente gerado por alívio de tensões e que está associado aos processos de intemperismo mais intensos.

Os planos horizontais não apresentam distribuição de valores de RQD 0 a 50% em grande proporção como eram esperados para as cotas supracitadas, porém os valores de 50 a 75% aumentam nas cotas mais elevadas.

CONCLUSÃO

O processo de interpolação volumétrica utilizando como unidade o *voxel* associado ao método de RST mostrou resultados interessantes, visto que permite adequada avaliação quanto aos volumes interpolados e às suas relações espaciais.

A utilização do programa GRASS apresenta como vantagem a sua rapidez no processo de interpolação dos dados, bem como a facilidade de obter atualizações em sua interface, pois é um programa livre e que pode ser obtido via internet, assim como o visualizador PARAVIEW, que apresenta ferramentas interessantes para a análise tridimensional e visualização adequada ao usuário.

O modelo tridimensional de RQD para a área de estudo apresentou o predomínio de RQD 75 a 90%. O intervalo de RQD 90 a 100%, apesar de ser o de maior proporção avaliada pela análise estatística dos dados de entrada, apresenta neste modelo volume com decréscimo de 43 para 19,1%, o que resultou em função da distribuição espacial dos valores dessa classe e que condicionou a interpolação.

Os valores de RQD 0 a 50% se distribuem nas porções próximas à superfície do antigo canal principal do rio Paraná e estão associados às zonas mais intemperizadas em razão da erosão dos materiais rochosos superficiais, que geraram alívio de tensões e fraturas.

Os resultados do estudo indicam que na fase de planejamento de investigações geológico-geotécnicas a distribuição espacial com menor heterogeneidade permite a indicação de número menor de investigações que geram interpolação e zoneamento mais seguros, ao invés de uma grande quantidade concentrada em uma porção ou distribuída de maneira irregular em porções com alta heterogeneidade.

Um recurso que pode ser efetivo na interpolação tridimensional de volumes dessa magnitude seria a divisão em volumes menores. Porém, nesse procedimento pode ocorrer o mesmo problema de distribuição espacial irregular, assim como demandaria a diminuição das dimensões do *voxel*, o que retornaria à mesma limitação da dimensão de

obtenção do parâmetro (individualmente), que no caso do RQD depende da medida da manobra da sondagem adotada em função do equipamento.

AGRADECIMENTOS

À Itaipu Binacional e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- Apel, M. (2006). From 3D geomodelling systems towards 3D geoscience information systems: data model, query functionality, and data management. *Computers & Geosciences*, 32(2), 222-229. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.06.016>
- Aswar, D. S., Ullagaddi, P. B. (2017a). An Overview 3-D Geological Modelling Part I- Basics of 3-D Geological Modelling. *International Journal of Latest Engineering and Management Research (IJLEMR)*, 2(11), 1-14. Disponível em: <<http://www.ijlemr.com/papers/volume2-issue11/19-IJLEMR-22541.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2020.
- Aswar, D. S., Ullagaddi, P. B. (2017b). An Overview 3-D Geological Modelling Part II- Basics of 3-D Geological Modelling. *International Journal of Latest Engineering and Management Research (IJLEMR)*, 2(11), 15-27. Disponível em: <<http://www.ijlemr.com/papers/volume2-issue11/20-IJLEMR-22542.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2020.
- Aswar, D. S., Ullagaddi, P. B. (2017c). An Overview 3-D Geological Modelling Part III- Basics of 3-D Geological Modelling. *International Journal of Latest Engineering and Management Research (IJLEMR)*, 2(11), 28-38. Disponível em: <<http://www.ijlemr.com/papers/volume2-issue11/21-IJLEMR-22543.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2020.
- Baojun, W., Bin, S., Zhen, S. (2009). A simple approach to 3D geological modeling visualization. *Bulletin of Engineering Geological and Environmental*, 68(559). <https://doi.org/10.1007/s10064-009-0233-y>
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. New York: John Wiley & Sons, 251 p.
- Burrough, P. A. (1986). *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Oxford: Clarendon Press.
- Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) (2012). *Geographic Resources Analysis Support System*. Disponível em: <<http://grass.fbk.eu/>>. Acesso em: maio 2012.

- Guidicini, G., Campos, J. O. (1968). Notas sobre a morfogênese dos derrames basálticos. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 17(1), 15-28. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/BSBG/article/view/12779>>. Acesso em: 15 jun. 2020.
- Hack, R., Orlic, B., Ozmutlu, S., Zhu, S., Rengers, N. (2005). Three and more dimensional modelling in geo-engineering. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 143-153. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0021-2>
- Itaipu Binacional (1972). *Estudo do Rio Paraná: Geologia e Materiais de Construção*, Apêndice B, Suplemento 1, Parte 1. Internacional Engineering Company (IEC), ENERCONSULT Engenharia Ltda (ELC).
- Itaipu Binacional (1978). *Geologia do maciço rochoso sob o talvegue do rio*. Internacional Engineering Company (IEC), ENERCONSULT Engenharia Ltda (ELC), 5 p.
- Itaipu Binacional (1997). *Relatório final de projeto de Itaipu*. Internacional Engineering Company (IEC), ENERCONSULT Engenharia Ltda (ELC), 58p.
- Kessler, H., Mathers, S. (2006). The past, present and future of 3D geology in BGS. *Journal Open University Geological Society*, 27(2), 13-15. Disponível em: <<http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/5193>>. Acesso em: 15 jun. 2020.
- 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(6), 1311-1321. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.04.005>
- Kröger, J., Hinsby, K. (2009). *Groundwater Resources in Buried Valleys*. Leibniz: Leibniz Institute for Applied Geosciences (GGA-Institut), 299 p.
- 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 Hidrogeology*, 42(1), 95-105. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/07-081>
- Marques, L. S., Ernesto, M. (2004). O magmatismo toléico da Bacia do Paraná. In: F. F. M. Almeida (Ed.). *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 647 p.
- Mitas, L., Mitasova, H. (1999). Spatial interpolation. In: P. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire, D. W. Rhind (Eds.). *Geographical information systems: principles, techniques, management and applications*. Nova York: Wiley, p. 481-492.
- Muzik, J., Vondrackova, T., Sitányiová, D., Plachý, J., Nývlt, V. (2015). Creation of 3D Geological Models Using Interpolation Methods for Numerical Modelling. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 25-30. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.007>
- Netteler, M., Mitasova, H. (2004). *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. Nova York: Kluwer Academic Publishers, Springer Press, 401 p.
- ParaView. (2010). *The ParaView guide*. Disponível em: <<http://www.paraview.org>>. Acesso em: 15 jul. 2011.
- Patias, J. (2010). *Zoneamento geotécnico com base em krigagem ordinária e equações multiquadráticas: Barragem de Itaipu*. Tese (Doutorado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.18.2010.tde-06122011-111314>
- Raper, J. (2000). *Multidimensional Geographic Information Science*. Londres: Taylor & Francis, 300 p.
- Rengers, N., Hack, R., Huisman, M., Slob, S., Zigterman, W. (2002). Information Technology applied to engineering geology. *9th Congress of the International Association for Engineering Geology and The Environmental*. Durban, South Africa: Engineering Geology for Developing Countries, p. 121-143.
- Sahlin, J., Mostafavi, M. A., Forest, A., Babin, M. (2014). Assessment of 3D Spatial Interpolation Methods for Study of the Marine Pelagic Environment. *Marine Geodesy*, 37(2), 238-266. <https://doi.org/10.1080/01490419.2014.902883>
- Schweizer, D., Blum, P., Butscher, C. (2017). Uncertainty assessment in 3-D geological models of increasing complexity. *Solid Earth*, 8, 515-530. <https://doi.org/10.5194/se-8-515-2017>
- Tacher, L., Pomian-Szrednicki, I., Parriaux, A. (2006). Geological uncertainties associated with 3-D subsurface models. *Computers & Geoscience*, 32(2), 212-221. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.06.010>
- Wang, Z., Qu, H., Wu, Z., Yang, H., Du, Q. (2016). Formal representation of 3D structural geological models. *Computers & Geosciences*, 90(Parte A), 10-23. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.02.007>
- Watson, D. F. (1992). *Contouring: a guide to the analysis and display of spatial data*. Oxford: Pergamon.
- Xiong, Z., Yuan, C. (2008). Study on the 3D Engineering-Geological Modelling and Visualization System. *International Conference on Computer Science and Software Engineering*. IEEE Computer Society, p. 931-934. <https://doi.org/10.1109/CSSE.2008.737>