

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA CIVIL

Daniela Villibor Amaral  
Joseane Batista Feitosa  
Michelle Andrade Mongiat

MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO

São Paulo  
2016

Daniela Villibor Amaral  
Joseane Batista Feitosa  
Michelle Andrade Mongiat

## MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Sérgio Vicente Denser Pamboukian

São Paulo  
2016

Dedicamos às nossas famílias que, independentemente de qualquer coisa sempre estiveram ao nosso lado, dando forças e apoiando, para que não fossem vencidas pelas adversidades. Às minhas amigas, pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas. Com vocês, as pausas entre um parágrafo e outro de produção melhoram tudo o que tenho produzido na vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A esta Universidade, seu corpo docente que oportunizaram a janela que hoje vislumbramos um horizonte superior.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Sergio Vicente Denser Pamboukian, pelo suporte, incentivos e pelas suas correções.

Ao nosso co-orientador Prof. Dr. Henrique Furia Silva.

Aos nossos pais pelo incentivo, apoio incondicional e a oportunidade de nos darem a condição de exercer o curso de Engenharia Civil.

Aos nossos amigos e irmãos pela compreensão do tempo ausentado diante da execução de nosso Trabalho de Conclusão de Curso.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigada.

## RESUMO

Este estudo tem o objetivo de criar um modelo computacional em três dimensões capaz de representar a relação de dependência espacial entre as informações de furos de sondagem para a caracterização do subsolo, com o auxílio do geoprocessamento e da geoestatística, priorizando *softwares* gratuitos. Foram realizadas pesquisas bibliográficas para auxiliar na compreensão dos conceitos básicos de geoprocessamento, Sistemas de Informações Geográfica (GIS), geoestatística e métodos direto e indireto de investigação do subsolo, pesquisa documentais com base em dados de sondagens existentes e simulações em *softwares*, complementares e suplementares, para validação de dados e geração de imagens em 2D, 2.5D e 3D para análise. Utilizando as informações da pesquisa documental, nos aplicativos QGIS, GRASS e ParaView foram realizados respectivamente o georreferenciamento dos pontos das sondagens no terreno, a interpolação utilizando os métodos *Inverse Distance Weighting* (IDW) e o *Regularized Spline Tension* (RST) com a geração de imagens em 2D e 2.5D e a geração de imagens tridimensionais com cortes. A partir da comparação entre os dados e imagens foi possível avaliar os parâmetros utilizados e selecionar os mais adequados. Os resultados obtidos foram satisfatórios, mostrando que é possível criar um modelo 3D para representação do subsolo, que pode ser utilizado para determinar a capacidade de carga do mesmo. Vale ressaltar que este é um estudo inicial e o modelo gerado é aproximado, mostrando assim a necessidade de aprofundamento, que pode ser feito através de simulações com a variação de mais parâmetros, outros métodos de interpolação ou outros *softwares* propiciando assim o aperfeiçoamento do modelo.

**Palavras-chave:** subsolo, modelo, interpolação, *Inverse Distance Weighting* (IDW), *Regularized Spline Tension* (RST).

## ABSTRACT

The objective of this study is to create a computer model in three dimensions capable of representing the spatial relationship of dependence between the drill hole information to characterize the sub soil, with the help of geoprocessing and geostatistics, prioritizing free software. Bibliographic research has been done to help understand the basics of GIS, Geographic Information Systems (GIS), geostatistics and direct and indirect methods of underground research; documentary research based on existing polling data and simulations software, complementary and supplementary, for data validation and generation of images in 2D 2.5D and 3D for analysis. Using the information of documentary research in QGIS applications, GRASS and ParaView were performed respectively georeferencing points of surveys in the field, interpolation using the Inverse Distance Weighting (IDW) and Regularized Spline Tension (RST) with the imaging 2D and 2.5D and generating three-dimensional images with cuts. Comparing the data and images it was possible evaluate and select the most appropriate. The results were satisfactory, showing that it is possible to create a 3D model for representation of the sub soil and can be used to determine the loading capacity of itself. It is important to know that this is an initial study and the generated model is approached, showing the need for further study, it can be done through simulations with the variation of parameters, other interpolation methods or other software providing the improvement of the model.

**Key-words:** sub soil, model, interpolation, Inverse Distance Weighting (IDW), Regularized Spline Tension (RST).

## RESUMEN

Este estudio tiene por objetivo de crear un modelo computacional en tres dimensiones para representar la relación de dependencia espacial entre las informaciones de la perforación del agujero para caracterizar el subterráneo, con la ayuda del geo procesamiento y de la geo estadística, priorizando los softwares gratis. Fueron hechas búsquedas bibliográficas para ayudar en el entendimiento de los conceptos básicos del geo procesamiento. Sistemas de informaciones Geográficas (SIG), geo estadística y métodos directos e indirectos de investigación del subterráneo; búsquedas de documentos con bases de datos de perforación existentes y simulaciones en softwares complementares y suplementares, para la validación de datos y generación de imágenes en 2D, 2.5D y 3D para análisis. Utilizando las informaciones de búsqueda de documentos, en los aplicativos QGIS, GRASS y ParaView fueron realizados respectivamente el georreferenciación de los puntos de las perforación del terreno, la interpolación utilizando los métodos Ponderación por el Inverso de la Distancia (IDW) y el *Spline* Regularizada por la Tensión (RST), con la generación de imágenes tridimensionales con cortes. Haciendo la comparación entre los datos e imágenes fue posible validar los parámetros utilizados y seleccionar el mejor. Los resultados finales fueron satisfactorios, mostrando que es posible crear en modelo 3D en representaciones del subterráneo, que puede ser utilizado para determinar la capacidad de carga del mismo. Es importante decir que es un estudio inicial y el modelo generado es próximo, mostrando que la necesidad de profundización, que puede ser hecho por simulaciones con variaciones de más parámetros, otros métodos de interpolación u otros softwares que ayudan mejorar el modelo.

**Palabras-clave:** subterráneo; modelo, interpolación, Ponderación por el Inverso de la Distancia (IDW), *Spline* Regularizada por la Tensión (RST).

## LISTA DE IMAGENS

Imagem 1 - Locação das Sondagens à Percussão.....	16
Imagem 2 - Ferramentas utilizadas no ensaio .....	22
Imagem 3 - Equipamento montado para realização do ensaio .....	22
Imagem 4 - Distâncias usadas no ensaio .....	23
Imagem 5 - Boletim de Sondagem .....	25
Imagem 6 - Camadas em um Sistema de Informações Geográficas .....	29
Imagem 7 - Georreferenciamento de imagens.....	30
Imagem 8 - Superfície da Terra, geóide e elipsoide .....	31
Imagem 9 - Projeção Cilíndrica.....	32
Imagem 10 - Projeção Cônica .....	32
Imagem 11 - Projeção Plana ou Azimutal .....	33
Imagem 12 - Fusos ou Zonas UTM.....	33
Imagem 13 - Camada vetorial com o cadastro urbano de Brasília .....	35
Imagem 14 - Tabela de Atributos da camada vetorial com o cadastro urbano de Brasília .....	36
Imagem 15 - Mapa Temático baseado em regra do atributo Renda .....	37
Imagem 16 - Superfície interpolada com tension = 30.....	42
Imagem 17 - Superfície interpolada com tension = 100.....	43
Imagem 18 - Superfície interpolada com smooth = 0 .....	43
Imagem 19 - Superfície interpolada com smooth = 0.1 .....	44
Imagem 20 - Superfície interpolada com smooth = 1.0 .....	44
Imagem 21 - Camada gerada utilizando TIN .....	45
Imagem 22 - Modelos 2D (a), 2.5D (b) e 3D (c).....	49
Imagem 23 - Localização do terreno em estudo.....	51
Imagem 24 - Pontos de sondagem existentes no terreno.....	52
Imagem 25 - Pontos de sondagem utilizados .....	53
Imagem 26 - Localização do terreno e pontos de sondagem.....	55
Imagem 27 - Tabela de atributos com o valor de $N_{SPT}$ por sondagem .....	55
Imagem 28 - Superfícies de boca e fundo .....	56
Imagem 29 - Modelo 3D do subsolo .....	57
Imagem 30 - Interpolação da boca com power = 2.0 .....	60
Imagem 31 - Interpolação da boca com power = 2.0 .....	60
Imagem 32 - Interpolação da boca com power = 2.0 .....	61

Imagem 33 - Interpolação da boca com power = 3.0 .....	61
Imagem 34 - Interpolação da boca com power = 3.0 .....	61
Imagem 35 - Interpolação da boca com power = 6.0 .....	62
Imagem 36 - Interpolação da boca com power = 0.20 .....	62
Imagem 37 - Interpolação da boca com power = 0.20 .....	63
Imagem 38 - Interpolação do fundo com power = 2.0 .....	63
Imagem 39 - Interpolação do fundo com power = 2.0 .....	63
Imagem 40 - Interpolação do fundo com power = 4.0 .....	64
Imagem 41 - Interpolação do fundo com power = 4.0 .....	64
Imagem 42 - Interpolação do fundo com power = 1.0 .....	65
Imagem 43 - Interpolação do Fundo com power = 1.0 .....	65
Imagem 44 - Interpolação do fundo com power = 0.50 .....	65
Imagem 45 - Interpolação do fundo com power = 0.50 .....	66
Imagem 46 - Superfície interpolada com tension = 10 e smooth = 0.....	67
Imagem 47 - Superfície interpolada com tension = 30 e smooth = 0.....	67
Imagem 48 - Superfície interpolada com tension = 40 e smooth = 0.....	68
Imagem 49 - Superfície interpolada com tension = 70 e smooth = 0.....	68
Imagem 50 - Superfície interpolada com tension = 100 e smooth = 0.....	69
Imagem 51 - Superfície interpolada com tension = 100 e smooth = 0.....	69
Imagem 52 - Superfície interpolada com tension = 100 e smooth = 0,2.....	70
Imagem 53 - Superfície interpolada com tension = 100 e smooth = 0,5.....	70
Imagem 54 - Superfície interpolada com tension = 100 e smooth = 1,0.....	70
Imagem 55 - Pontos de $N_{SPT}$ importados metro a metro de cada sondagem.....	73
Imagem 56 - Volume interpolado com tension = 50 e smooth = 0 (vista superior).....	74
Imagem 57 - Volume interpolado com tension = 50 e smooth = 0 (vista inferior).....	74
Imagem 58 - Fatias (slice) para delimitar o parâmetro da interpoção volumétrica (a) tension = 40, (b) tension = 50, (c) tension = 60, (d) tension = 70 .....	75
Imagem 59 - Fatias na coordenada Y – Retirando SP-02 – (a) tension = 50 (b) tension = 60.....	77
Imagem 60 - Cortes na coordenada X e Y.....	79
Imagem 61 - Threshold aplicado para a faixa de valores de 0 a 5 golpes/30 cm .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Média dos erros de interpolação (boca) .....	59
Tabela 2 - Desvio padrão dos erros de interpolação (boca) .....	59
Tabela 3 - Média dos erros de interpolação (fundo).....	60
Tabela 4 - Desvio padrão dos erros de interpolação (fundo).....	60
Tabela 5 - Resumo das médias - RST - Fundo .....	71
Tabela 6 - Resumo dos desvios-padrão - RST - Fundo.....	72
Tabela 7 - $N_{SPT}$ real - SP-02 .....	75
Tabela 8 - Comparativo $N_{SPT}$ real x $N_{SPT}$ interpolado - SP-02.....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

2D	- Duas Dimensões
2.5D	- Duas Dimensões e Meia
3D	- Três Dimensões
ANVISA	- Agência Nacional de Vigilância Sanitária
EMPLASA	- Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano
EPSG	- <i>European Petroleum Survey Group</i>
GIS	- <i>Geographic Information System</i> (Sistema de Informações Geográficas)
GPS	- <i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
GPR	- <i>Ground Penetrating Radar</i> (Radar de Penetração do Solo)
GRASS	- <i>Geographic Resources Analysis Support System Geographic Information System</i>
IDW	- <i>Inverse Distance Weighted</i> (Inverso Ponderado da Distância)
IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MATLAB	- <i>Matrix Laboratory</i>
NBR	- Norma Brasileira
N <sub>SPT</sub>	- Índice de Resistência a Penetração do Solo
OSGeo	- <i>Open Source Geospatial Foundation</i>
QGIS	- <i>Quantum Geographic Information System</i>
RST	- <i>Regularized Spline Tension</i> (Spline Regularizada por Tensão)
SAD	- <i>South American Datum</i>
SIG	- Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS	- <i>Sistema de Referência Geocêntrico para Las Américas</i> (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas)
SPT	- <i>Standard Penetration Test</i> (Ensaio de Penetração Dinâmica)
SRC	- Sistema de Referência de Coordenadas
TIM	- <i>Triangulated Irregular Network</i>
UTM	- <i>Universal Transverse Mercator</i> (Sistema de Projeção Universal Transversa de Mercator)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS.....	17
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>17</b>
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	METODOLOGIA .....	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>21</b>
2.1	MÉTODOS DIRETOS PARA RECONHECIMENTO DO SUBSOLO.....	21
<b>2.1.1</b>	<b>Sondagem à Percussão .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Sondagem a Trado .....</b>	<b>26</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Sondagem à Rotopercussão .....</b>	<b>26</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Sondagem Rotativa .....</b>	<b>26</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Sondagem Mista .....</b>	<b>27</b>
2.2	MÉTODOS INDIRETOS PARA RECONHECIMENTO DO SUBSOLO.....	27
<b>2.2.1</b>	<b>GPR - <i>Ground Penetrating Radar</i>.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Geosísmico.....</b>	<b>27</b>
2.3	CONCEITOS BÁSICOS DE GEOPROCESSAMENTO .....	28
<b>2.3.1</b>	<b>Sistema de Informações Geográficas (SIG) .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Georreferenciamento .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Sistema de Referência de Coordenadas (SRC).....</b>	<b>30</b>
2.3.3.1	Representação da Superfície Terrestre.....	30
2.3.3.2	Sistemas de coordenadas .....	31
2.3.3.3	Projeções cartográficas.....	32
2.3.3.4	Projeção Universal Transversa de Mercator .....	33
2.3.3.5	Grupo de Pesquisa Petrolífera Europeia (EPSG).....	34
<b>2.3.4</b>	<b>Organização das Camadas em um SIG.....</b>	<b>34</b>
2.4	SOFTWARES ANALISADOS.....	37
<b>3</b>	<b>GEOESTATÍSTICA .....</b>	<b>38</b>
3.1	VARIÁVEL REGIONALIZADA.....	38
3.2	VARIÁVEL ALEATÓRIA .....	38
3.3	PRINCIPAIS MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO.....	39

3.3.1	<i>Inverse Distance Weighting - Inverso Ponderado da Distância (IDW)</i> .....	39
3.3.2	<i>Regularized Spline Tension - Spline Regularizada por Tensão (RST)</i> .....	40
3.3.3	<b>Crigagem (Krige)</b> .....	44
3.3.4	<b>Triangulated Irregular Network (TIN)</b> .....	44
3.3.5	<b>Outros Métodos de Interpolação</b> .....	45
3.4	<b>VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO</b> .....	45
3.4.1	<b>Desvio padrão</b> .....	45
3.4.2	<b>Validação cruzada</b> .....	46
3.4.2.1	Leave-one-out.....	47
3.4.2.2	Holdout.....	47
3.4.2.3	K-fold .....	47
3.4.3	<b>Desvio</b> .....	48
3.5	<b>MODELAGEM 3D</b> .....	48
4	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	51
4.1	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	51
4.1.1	<b>Dados de sondagem</b> .....	51
4.1.2	<b>QGIS</b> .....	53
4.1.3	<b>GRASS</b> .....	53
4.1.4	<b>Para View</b> .....	54
4.2	<b>GEORREFERENCIAMENTO DOS DADOS DE SONDAJENS</b> .....	54
4.3	<b>TESTES DE INTERPOLAÇÃO</b> .....	56
4.3.1	<b>Método IDW – “Inverse Distance Weighted”</b> .....	57
4.3.1.1	Delimitação do parâmetro .....	57
4.3.1.2	Considerações para as interpolações .....	58
4.3.1.3	Análise das camadas boca e fundo .....	59
4.3.2	<b>Método RST - “Regularized Spline Tension”</b> .....	66
4.3.2.1	Delimitação dos parâmetros <i>tension</i> e <i>smooth</i> para interpolação de superfícies ...	66
4.3.2.2	Validação Cruzada - <i>Cross-Validation</i> (fundo e boca das sondagens) .....	71
4.3.2.3	Considerações para a Interpolação Volumétrica .....	73
4.3.2.4	Delimitação dos parâmetros <i>tension</i> e <i>smooth</i> para a interpolação volumétrica....	74
4.3.2.5	Escolha do parâmetro <i>tension</i> e validação do modelo tridimensional .....	76
5	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	80
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	83
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	84

<b>ANEXO A - DOCUMENTO DE CONSENTIMENTO .....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXO B - BOLETIM FINAL DE SONDAÇÃO .....</b>	<b>89</b>
<b>APÊNDICE A - LISTA DE SONDAGENS.....</b>	<b>91</b>
<b>APÊNDICE B - TABELA DE ATRIBUTOS DO QGIS.....</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICE C - SONDAGENS COM COORDENADAS UTM.....</b>	<b>95</b>
<b>APÊNDICE D - PONTOS DE SONDAÇÃO COM <math>N_{SPT}</math> DETALHADO .....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE E - TESTES MÉTODO IDW BOCA .....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE F - TESTES MÉTODO IDW FUNDO .....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE G - TESTES MÉTODO RST FUNDO .....</b>	<b>112</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Projetos de engenharia civil sejam eles de edifícios, barragens, viadutos, pontes ou estradas, demandam diversos estudos preliminares, entre os quais avaliações de viabilidade técnica, econômica e análises topográficas e geológicas.

Entre as análises geológicas, existe a investigação do subsolo, que em seus estudos utiliza métodos classificados como diretos e indiretos. Métodos diretos englobam sondagens à percussão, a trado, mista, à rotopercussão, entre outras, e mostram a composição do solo no ponto de coleta sem, entretanto, indicar a composição no entorno do ponto em estudo.

A fim de suprir esta necessidade, surgiram os métodos indiretos (geofísicos), como o *Ground Penetrating Radar* (GPR) e o geosísmico, que analisam materiais e estruturas geológicas presentes no subsolo sem a coleta de amostras e possibilitam a criação de um mapeamento geológico.

“A investigação geofísica possui ainda a vantagem de fornecer uma rápida e ampla amostragem do volume investigado do subsolo, em seu estado natural e não perturbado por intervenções diretas (sondagens, cavas e trincheiras).” (GANDOLFO, 2012, p.56).

O presente estudo aborda uma das técnicas mais utilizadas para análises geológicas de investigação do subsolo, a sondagem à percussão, e a possibilidade de gerar um modelo computacional do subsolo a partir de dados deste tipo de sondagem.

Por ser um dos métodos mais econômicos, rápidos e eficientes, a técnica é a mais utilizada para realizar a caracterização do subsolo, embora apresente as limitações de um método direto, como a não identificação do tipo de solo e da resistência à penetração entre os pontos sondados.

No Brasil, a Sondagem de Simples Reconhecimento com *Standard Penetration Test* (SPT), conhecida popularmente como sondagem à percussão, teve o primeiro equipamento para sua realização produzido em 1938 pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), que se baseou em especificações americanas e passou a utilizar o amostrador do tipo IPT. Este método só ficou internacionalmente conhecido, no entanto, em 1948, com a publicação pelo engenheiro tcheco Karl Von Terzaghi de “*Soil Mechanics in Engineering Practice*”.

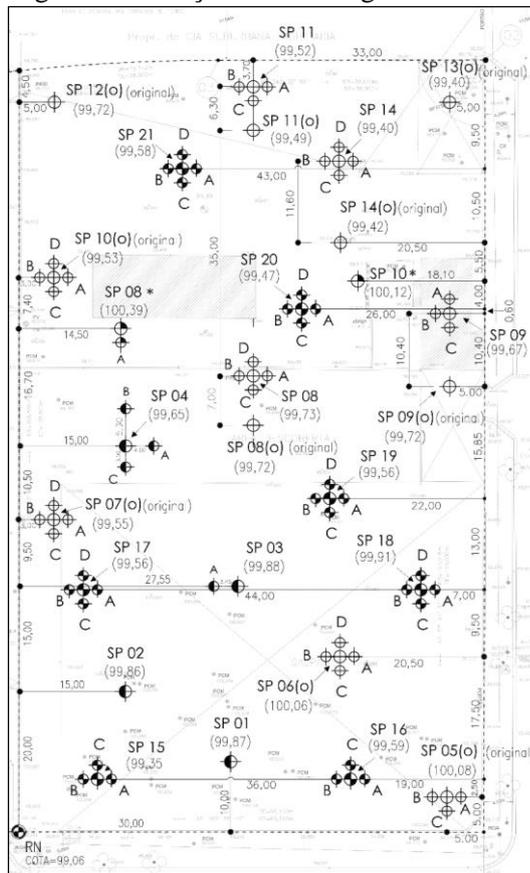
Após essa internacionalização, foi trazido para o Brasil em 1957 o amostrador padronizado “Terzaghi-Peck” e em 1983 surgiram normatizações brasileiras, como a NBR 8036 – “Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de

edifícios”, que especifica o número mínimo e a localização de sondagens a serem realizadas no terreno.

Em 1997, foi adotada a NBR 6484 – “Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio”, cuja atualização mais recente se deu em 2001. Esta norma define o procedimento do ensaio, englobando o processo de perfuração, coleta das amostras, número de resistência à penetração, critérios de paralização, observação do nível do lençol freático, identificação das amostras, além dos resultados que devem ser expressos no relatório de campo e, posteriormente, no relatório definitivo.

Com objetivo de evitar subdimensionamento ou superdimensionamento das fundações, o presente estudo propõe a criação de um mapeamento do subsolo em três dimensões, que forneça a resistência do solo no terreno estudado, com o auxílio do geoprocessamento e da geoestatística, utilizando interpolações estatísticas por meio de *softwares*.

Imagem 1 - Locação das Sondagens à Percussão



Fonte: Even Construtora e Incorporadora S/A (2012a)

A Imagem 1 indica o terreno analisado e a localização dos furos das sondagens realizadas. Através de *softwares*, como Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e visualizadores de três dimensões, foi feita a interpolação dos dados obtidos em campo para se chegar à modelagem computacional em 3D.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é criar um modelo computacional em três dimensões capaz de representar a relação de dependência espacial entre as informações de furos de sondagem para a caracterização do solo, com o auxílio do geoprocessamento e da geoestatística.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Para cumprir o objetivo geral, é necessário:

- familiarizar-se com os conceitos básicos de geoprocessamento como Sistemas de Referência de Coordenadas (SRC), projeções cartográficas, imagens vetoriais e matriciais, técnicas e algoritmos de geoprocessamento como, por exemplo, georreferenciamento de imagens, edição vetorial, edição de tabelas de atributos, interpolação e outros;
- estudar os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) – *Geographic Information System* (GIS) – e os visualizadores 3D para escolher os *softwares* adequados ao desenvolvimento da parte prática do trabalho e, em seguida, familiarizar-se com os conceitos básicos destes *softwares*;
- organizar os dados do estudo em um projeto SIG. Definir uma camada vetorial, baseada na planta georreferenciada da região em estudo, com a indicação dos pontos de cada sondagem realizada no terreno, conforme mapa de locação. Os dados de profundidade e resistência ( $N_{SPT}$ ) deverão ser inseridos na tabela de atributos da camada e servirão para gerar o modelo computacional;
- analisar os métodos de interpolação (geoestatística) em 2D e 3D disponíveis nos *softwares* GIS, bem como os parâmetros existentes em

cada um deles, a fim de escolher o melhor método para a geração do modelo;

- gerar o perfil de resistência do subsolo do terreno em 3D;
- avaliar o modelo gerado.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os principais imprevistos possíveis de ocorrer em obras estão direta ou indiretamente ligados ao estudo feito anteriormente sobre o subsolo e seu histórico, como, por exemplo, a necessidade de troca do tipo de fundação na execução da obra e possíveis manifestações patológicas que possam surgir devido a movimentações de solo inesperadas.

Isto ocorre, pois, em busca de evitar altos custos no projeto ou por impossibilidade da realização de mais ou novos furos de sondagem, alguns profissionais se baseiam no número mínimo de sondagens estipulado pela normatização brasileira e extrapolam os resultados dos pontos sondados no entorno de cada um deles. Deste modo, o perfil geológico é traçado por meio da experiência profissional de cada responsável pelo projeto de fundações, e não de forma concreta baseada em dados e testes que tenham sido previamente validados.

Segundo Dickran Berberian (2011),

As chamadas sondagens de terreno estão hoje para a engenharia na mesma proporção que os exames clínicos preliminares apresentam-se para a medicina. Da mesma forma que um médico não opera o paciente sem examiná-lo, não deve haver obra sem sondagem.

Na construção de edifícios, alguns problemas estão relacionados ao subdimensionamento ou superdimensionamento das fundações, que podem gerar recalques e manifestações patológicas nas estruturas. Já em estradas, os problemas consistem em deslizamentos de taludes, rompimento das contenções e trincas nos pavimentos. Em barragens, por outro lado, podem ocorrer rompimentos e recalques.

Estas complicações, que normalmente decorrem da falta de conhecimento a respeito do que há no subsolo local, podem ocasionar aumento de custo e tempo de execução, além de perdas de vidas, e demandar, futura ou imediatamente, reforços estruturais.

Ao fornecer um diagnóstico detalhado do terreno em que se vai construir, o modelo computacional do subsolo em três dimensões pode aperfeiçoar o projeto de fundações e, assim, evitar problemas.

### 1.3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho foram feitas pesquisas bibliográficas, pesquisas documentais e simulações em *software*.

As pesquisas bibliográficas auxiliaram na compreensão dos conceitos básicos sobre geoprocessamento, SIG, geoestatística e os métodos direto e indireto de investigação do subsolo. Estes conceitos serviram como base para a análise e escolha dos *softwares* necessários para a modelagem em 3D.

A pesquisa documental se realizou com base em dados de sondagens já existentes, enquanto as simulações em *software* se fizeram necessárias para conceber o modelo computacional.

Para iniciar a simulação em *software*, foi produzido um mapa georreferenciado do terreno com a locação dos pontos de sondagem. Este mapa foi elaborado com o auxílio de imagens orbitais fornecidas gratuitamente pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S.A. (EMPLASA) e de imagens do *Google Maps* através de um *software* GIS.

Posteriormente, foram adicionados à tabela de atributos deste mapa vetorial os dados de sondagem (profundidade e resistência  $N_{SPT}$ ) do terreno em estudo.

A partir das informações desta camada vetorial, foram interpoladas duas superfícies referentes à boca dos furos de sondagem (superfície do terreno) e fundo dos furos de sondagem (profundidade onde o solo se torna impenetrável). Estas duas superfícies (boca e fundo), junto com as demais informações de sondagem, permitiram a criação do modelo 3D do subsolo.

Antes de gerar estas superfícies, foi necessário analisar os métodos fornecidos pela geoestatística para efetuar a interpolação das cotas de boca e fundo e realizar testes para a determinação do melhor método e seus respectivos parâmetros. Nesta etapa, também foram analisados os métodos para a interpolação 3D dos valores de  $N_{SPT}$  utilizados para a geração do perfil de resistência do subsolo (volume).

A escolha do melhor método de interpolação foi feita levando-se em conta métodos de validação como, por exemplo, a validação cruzada. Após esta etapa, foram geradas as superfícies de boca e fundo e, por fim, o sólido que representa o modelo do subsolo.

A última etapa avaliou visualmente o modelo gerado, confrontando os valores de resistência interpolados com os valores reais.

Importante salientar que, embora seja possível a concepção do modelo em 3D do subsolo, a quantidade mínima de sondagens à percussão estipulada em norma deve ser respeitada.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis seções.

A seção 1 introduz o estudo e é composta pelos itens: texto de conceituação e caracterização do tema, objetivos, justificativa e metodologia.

A seção 2 reúne os métodos para reconhecimento do subsolo e as geotecnologias, de maneira singular ou conjunta.

A seção 3 apresenta conceitos sobre a geoestatística, a validação do modelo e a modelagem 3D.

A seção 4 desenvolve o estudo, apresentando o processamento dos dados e as simulações nos *softwares*.

A seção 5 analisa os resultados obtidos, avalia os *softwares* utilizados e as dificuldades encontradas.

A seção 6 conclui o trabalho e indica recomendações para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção aborda os métodos diretos e indiretos de investigação do subsolo, assim como os conceitos básicos de geoprocessamento, os Sistemas de Informações Geográficas e os *softwares* que podem ser utilizados para gerar a modelagem computacional tridimensional do subsolo.

### 2.1 MÉTODOS DIRETOS PARA RECONHECIMENTO DO SUBSOLO

Estes métodos têm a característica de serem executados com a observação e análise direta do solo, ou seja, têm perfuração do solo, seja ela por meios manuais ou mecânicos, além da retirada de amostras.

#### 2.1.1 Sondagem à Percussão

A sondagem à percussão é um método essencial para a investigação dos solos na geotecnia.

Para Quaresma *et al.* (1998 *apud* FONTELES, 2003, p. 5),

Sua simplicidade de execução e baixo custo associado são os principais pontos atrativos para sua ampla utilização por parte de empresas de Geotecnia no Brasil, assim como em trabalhos acadêmicos. Neste tipo de sondagem é possível se obter uma classificação expedita dos solos amostrados por exame táctil-visual; uma caracterização da compacidade/consistência dos solos; um perfil estratigráfico; a profundidade do nível d'água no momento da execução da sondagem e; amostras para análises.

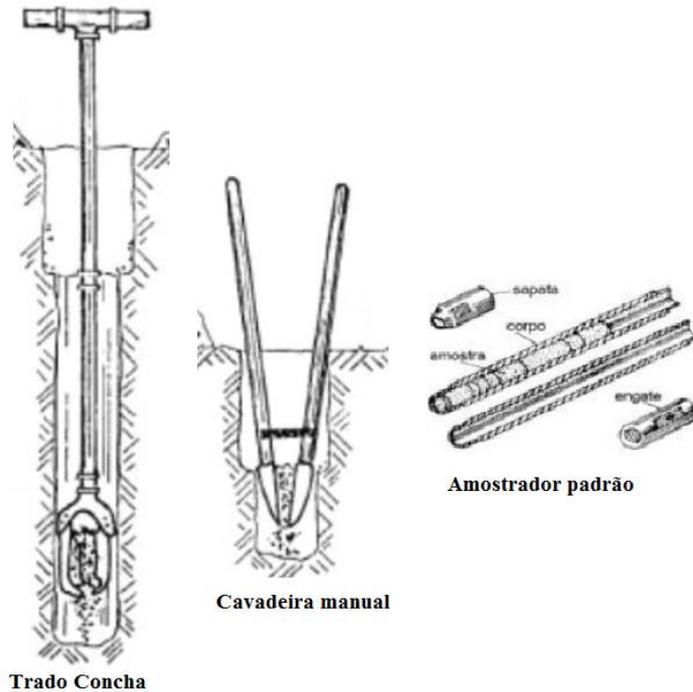
Com a escolha do terreno, é feita uma planta com as coordenadas topográficas do local e a locação dos pontos onde o ensaio será realizado. Após a limpeza do local são iniciados os procedimentos da sondagem.

Todas as medidas e equipamentos descritos no texto e usados na prática são normatizados e podem ser consultadas na última atualização, da NBR 6484, feita em 2001.

Primeiramente é necessário com a utilização do trado concha ou cavadeira manual, que se chegue ao primeiro metro de profundidade do terreno a partir de sua cota da superfície e, por meio do amostrador padrão, seja coletada uma amostra deste solo.

As ferramentas utilizadas nessa etapa do ensaio, trado concha, cavadeira manual e o amostrador padrão, podem ser observadas na Imagem 2.

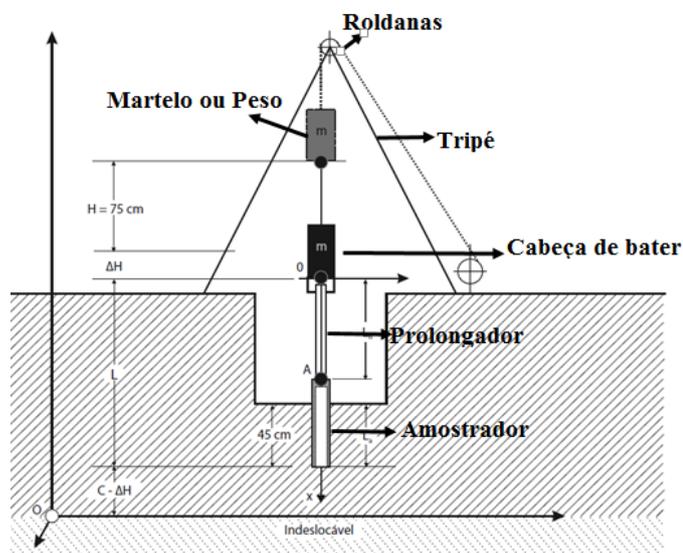
Imagem 2 - Ferramentas utilizadas no ensaio



Fonte: Simão (2014) e Figueiredo (2013), Adaptado pelo autor.

Depois de atingido o primeiro metro de solo, é feita a montagem do equipamento (Imagem 3) composto por tripé, roldanas, o martelo ou peso de sessenta e cinco quilos (65 kg), cabeça de bater e o amostrador, que será introduzido no solo e deve chegar ao fundo do furo sem que haja nenhum atrito lateral. Vale lembrar que a profundidade é atingida conectando prolongadores ao amostrador.

Imagem 3 - Equipamento montado para realização do ensaio

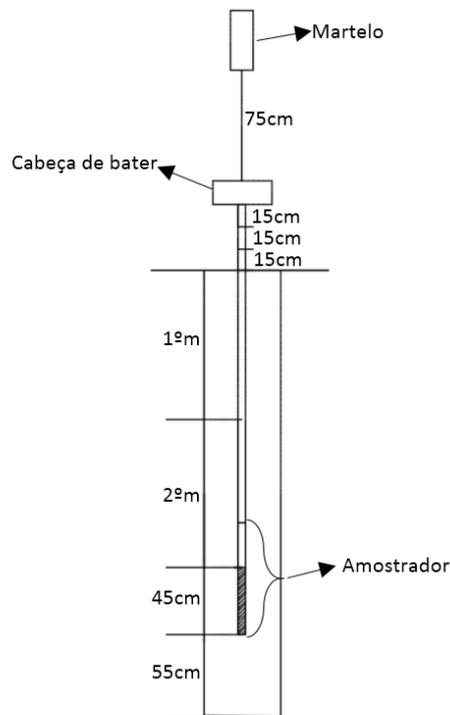


Fonte: Cintra (2013), Adaptado pelo autor.

Para evitar influências que adulterem o resultado, a montagem do equipamento deve ser feita cuidadosamente no momento de posicionar o martelo, pois este não deve entrar em contato com a cabeça de bater antes do início do ensaio.

Posteriormente à preparação do equipamento, devem ser feitas três marcações no prolongamento que ficar acima do nível do terreno, a cada quinze centímetros (15 cm), partindo da superfície do terreno, totalizando uma distância de quarenta e cinco centímetros (45 cm), para início e fim do ensaio (Imagem 4).

Imagem 4 - Distâncias usadas no ensaio



Fonte: Próprio autor (2016)

Para dar início à coleta de dados, o martelo é levantado a uma altura de setenta e cinco centímetros (75 cm) acima da cabeça de bater, altura padrão, com o auxílio de corda e haste guia. Então se solta o martelo em queda livre, assim há uma menor dissipação de energia.

O procedimento de içamento e queda do martelo se repete até que os quarenta e cinco centímetros (45 cm) tenham sido cravados no solo. O índice de resistência à penetração do solo na profundidade ensaiada ( $N_{SPT}$ ) é dado pelo número de golpes necessários para a cravação dos últimos trinta centímetros (30 cm).

Após serem cravados quarenta e cinco centímetros (45 cm) no solo, é necessário retirar o amostrador, coletar amostra de solo contida nele e depois limpá-lo, para que não haja interferência nos resultados do próximo metro. Os cinquenta e cinco centímetros (55 cm) restantes de solo até que se atinja o próximo metro da sondagem são retirados por meio do trado concha ou cavadeira manual. Esse procedimento se repetirá metro a metro, até que se encerre na coleta da amostra.

Pode-se considerar o ensaio finalizado quando se atinge o nível d'água ou uma camada impenetrável, ou seja, se após dez minutos de operação o avanço for inferior a cinco centímetros (5 cm). Nestes casos, se necessário, a perfuração continua por circulação de água ou lavagem por tempo, em que amostrador padrão, martelo e cabeça de bater são substituídos por um sistema de circulação de água composto por bomba, barrilete, amostrador e coluna de hastes, semelhante ao amostrador padrão, porém para este uso específico.

Neste caso, também é necessário o uso do revestimento para que o solo no entorno do furo não venha a desmoronar, prejudicando o ensaio, e respeite os limites de distância do fundo do furo do máximo de um metro (1,00 m) e mínimo de dez centímetros (10 cm).

Para dar início ao processo, deve-se levar o sistema de circulação de água a uma altura de trinta centímetros (30 cm) e, durante sua queda (simultaneamente à injeção de água), deve-se empregar manualmente um movimento de rotação na coluna de hastes.

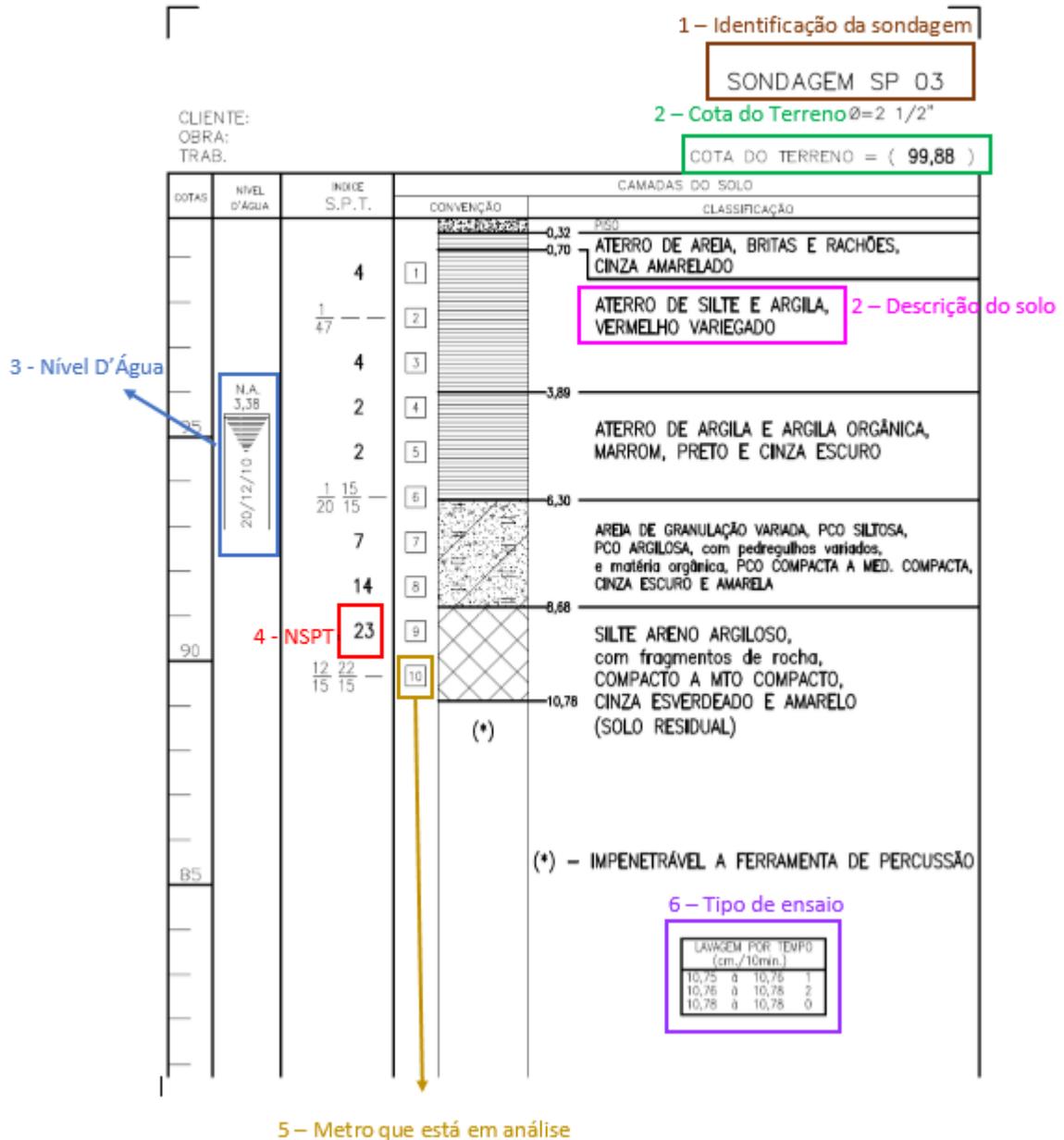
A coleta de dados é feita com o avanço obtido a cada dez minutos de operação contínua ou pelo tempo gasto para atingir a cota do ensaio.

Durante o ensaio, é feito o boletim de campo da sondagem, que contém datas de início e término da sondagem, métodos de perfuração adotados, profundidade de cada camada de solo, análise prévia tátil-visual e leitura do nível d'água, além de informações adicionais que podem ser acrescentadas em caso de interesse para o estudo.

Por fim, para cada ponto onde o ensaio foi realizado, será gerado um boletim final da sondagem, como pode ser visto na Imagem 5.

Este boletim final contém a análise realizada por um geólogo, cuja finalidade é complementar o que foi feito em campo, principalmente a análise tátil-visual. Esta descrição é feita a cada metro perfurado e inclui a classificação litológica, cor, tonalidade, informações sobre formação geológica, mineralogia, textura e estado de alteração das rochas.

Imagem 5 - Boletim de Sondagem



Fonte: Even Construtora e Incorporadora S/A (2012b), Adaptado pelo autor.

A análise final e a interpretação dos resultados são baseadas no  $N_{SPT}$ , utilizado no cálculo da capacidade de carga do solo, que é empregado para o dimensionamento de fundações, entre outras informações sobre o solo que podem ser obtidas através de correlações que não serão abordadas neste estudo.

Bitar *et al.* (2000) acrescentam que, além das sondagens, devem-se utilizar mapeamentos geológico-geotécnicos e ensaios do subsolo para aprimorar o conhecimento do terreno, melhorar o planejamento do uso do solo e evitar, por conseguinte, imprevistos geológicos que aumentam os custos da obra.

### **2.1.2 Sondagem a Trado**

A sondagem a trado é um método de investigação do subsolo realizado manualmente, por meio do trado concha (duas peças) ou do trado helicoidal (uma peça), sem o auxílio de aparelho moto mecânicos.

Neste tipo de sondagem, retiram-se somente amostras de camadas de solo com baixa resistência, ou seja, que não oferecem grande dificuldade ao avanço da perfuração manual.

O ensaio começa com a utilização do trado concha retirando as amostras do solo a cada metro de profundidade. Há exceção quando houver mudança de solo no decorrer desse metro em análise, pois é necessário que haja amostras de todo tipo de solo. Caso o solo venha a oferecer resistência ao trado concha, o ensaio deve prosseguir com o uso do trado helicoidal até que se atinja a profundidade especificada no serviço, ocorra o desmoronamento do furo, avance-se menos que 5 cm em 10 minutos de perfuração contínua ou o terreno seja impenetrável.

### **2.1.3 Sondagem à Rotopercussão**

Este método é utilizado quando é necessária a obtenção de informações de maciços rochosos ou de camadas de maior resistência presentes no solo.

No início do ensaio para a abertura do furo, são utilizadas perfuratrizes a ar comprimido, às quais podem ser adaptadas equipamentos de circulação de água para a remoção dos detritos e limpeza do furo.

Durante a perfuração, são anotadas as descrições tátil visuais dos detritos retirados a cada metro de profundidade ou toda vez que há mudanças do material.

Também são anotadas as mudanças de velocidade, ruídos ou perdas de água de acordo com a profundidade, pois, assim, as mudanças que ocorrem no maciço são percebidas e descritas, e há uma melhor análise dos resultados.

### **2.1.4 Sondagem Rotativa**

A sondagem rotativa, assim como à rotopercussão, é realizada quando se tem um material rochoso ou maciço, mas se utiliza de um conjunto motomecanizado.

Unindo a rotação à força utilizada para a penetração do conjunto, que possui um cilindro na extremidade em contato com o solo, é possível a obtenção da amostra.

### 2.1.5 Sondagem Mista

Realizada em duas etapas, a sondagem mista é a combinação da sondagem à percussão com a sondagem rotativa.

Na primeira etapa, utiliza-se a sondagem à percussão até que a resistência do solo seja significativa a ponto de não ser mais possível se obterem informações por este método. Então, inicia-se a segunda etapa, na qual se utiliza a sondagem rotativa, que retira amostras e valores de resistência à penetração de maciços rochosos ou camadas de maior resistência.

## 2.2 MÉTODOS INDIRETOS PARA RECONHECIMENTO DO SUBSOLO

Os métodos indiretos para investigação do subsolo são conhecidos como geofísicos. Mesmo não sendo estipulados em norma, colaboram para investigação, favorecendo melhores resultados quanto às relações geográficas e amostrais entre os pontos de sondagem, por meio da análise de distribuição dos pontos sondados em profundidade, sendo possível analisar o solo em três dimensões.

Há dois métodos que colaboram para tal investigação de modo significativo, sendo eles o *Ground Penetrating Radar* (conhecido popularmente como GPR) e o Geosísmico, ambos realizados por ondas eletromagnéticas e sísmicas, respectivamente, lançadas ao solo, não sendo assim um método invasivo.

### 2.2.1 GPR - *Ground Penetrating Radar*

O *Ground Penetrating Radar* (GPR), que na tradução significa Radar de Penetração do Solo (conhecido também como Georadar), é um dos métodos indiretos cuja função é obter leituras de reflexão das camadas do subsolo através da emissão de ondas eletromagnéticas. Este processo ocorre devido à propagação de correntes elétricas e pode ser considerado como um método de investigação geotécnica estatística.

Segundo Gandolfo (2012, p. 56) “O GPR fornece como resultado uma seção que corresponde a uma imagem de alta definição do subsolo, mostrando as interfaces onde as ondas eletromagnéticas sofreram reflexões e retornaram à superfície.”.

### 2.2.2 Geosísmico

O método geosísmico é realizado através de ondas sísmicas. Existem vários tipos destas ondas, porém as mais utilizadas são as compressionais e as cisalhantes, cuja finalidade é o estudo geotécnico. A diferenciação entre elas é a direção em que a onda é

gerada, sendo as compressionais em direção à propagação da onda e as cisalhantes de forma perpendicular.

Em métodos convencionais para os estudos, as ondas sísmicas compressionais vêm sendo as mais utilizadas atualmente, devido a sua aquisição ser simples e barata.

Segundo Gandolfo (2012, p.57) “A sísmica de reflexão vem sendo cada vez mais utilizada em ambientes urbanos graças à evolução tecnológica e instrumental da técnica no decorrer dos últimos anos.”.

## 2.3 CONCEITOS BÁSICOS DE GEOPROCESSAMENTO

O geoprocessamento é uma ferramenta que dispõe de métodos matemáticos e computacionais para analisar dados espaciais como, por exemplo, valores de resistência do solo em profundidade, dentre outras finalidades de segmentos distintos. Desta forma, ele contribui para a criação de um modelo geológico que pode ser utilizado para a investigação do subsolo em três dimensões.

Segundo Houlding (1994 *apud* FONTELES, 2003, p. 91),

Um modelo geológico representa o resultado da interpretação dos fenômenos endógenos e exógenos responsáveis pela formação e disposição espacial dos conjuntos litológicos (rochas e materiais inconsolidados) e feições estruturais (juntas e dobras, etc.).

O modelo geológico, obtido a partir da união das tecnologias de análise de dados espaciais e informações de sondagem, também auxilia em estudos de mudanças climáticas, pois o seu conhecimento permite saber como o solo se modificou com o passar do tempo e os agentes que atuaram sobre ele.

Uma das principais ferramentas do geoprocessamento é o Sistema de Informações Geográficas (SIG).

### 2.3.1 Sistema de Informações Geográficas (SIG)

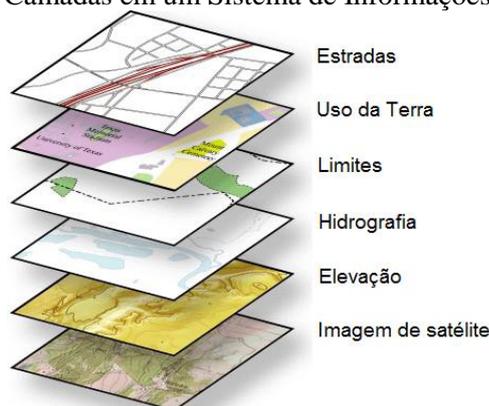
Segundo Felgueiras e Câmara (2014), o SIG é um sistema de *hardware*, *software*, informação espacial e procedimentos computacionais, que faz uso integrado das geotecnologias, possibilitando a elaboração de análises complexas que combinem diversos mapas com bancos de dados georreferenciados (possuem localização geográfica). Andrade (2014) também aponta que este tipo de sistema permite analisar e representar o espaço.

Segundo Crepani *et al.* (2001, p. 8),

Com o avanço dos softwares de processamento de imagens e a capacidade de armazenamento e velocidade dos computadores, nos últimos anos tem incentivado o desenvolvimento de novas metodologias de interpretação digital de imagens de alta e média resolução espacial, especialmente para grandes áreas. As informações obtidas podem ser integradas com outros tipos de informações (cartográficas e dados de campo) e introduzidas em um banco de dados georreferenciado [...].

Um SIG trabalha com um sistema de camadas sobrepostas, que podem ser ligadas e desligadas para melhor visualização, e que contêm diferentes tipos de informação como sistema viário, rios, curvas de nível e imagem de satélite, como mostra a Imagem 6. As camadas de um SIG podem ser vetoriais ou matriciais e são abordadas no item 2.3.4.

Imagem 6 - Camadas em um Sistema de Informações Geográficas



Fonte: ESRI (2009), Adaptado pelo autor.

Para a utilização de uma ferramenta SIG, são necessárias várias etapas como a coleta de dados, armazenamento, tratamento e análise dos dados obtidos.

A obtenção dos dados pode ser determinada por levantamentos topográficos, Sistema de Posicionamento Global (GPS), aerofotogrametria, cartografia digital, sensoriamento remoto, satélites, a fim de definir as formas de relevo, redes de drenagem, tipos de vegetação, entre outras características, armazenando os resultados em Bancos de Dados Geográficos.

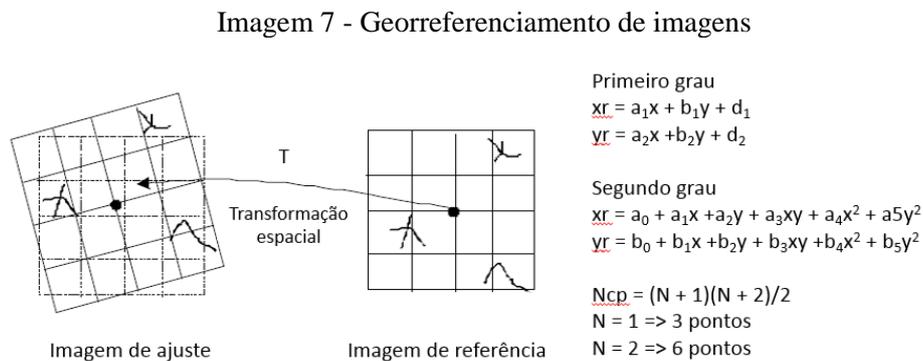
O tratamento e a análise das informações espaciais são efetuados pela modelagem de dados como mapeamento do uso e ocupação do solo, vazios urbanos, áreas de preservação ambiental, estradas existentes, rios, redes de drenagem, esgoto sanitário e plantações. Além disso, é possível mapear um estado para auxiliar na divisão do zoneamento

das cidades e identificar quais áreas necessitarão de mais recursos, quais são desregularizadas, de várzea ou de risco.

### 2.3.2 Georreferenciamento

Os dados obtidos por meio das geotecnologias, para serem utilizados nos *softwares* do Sistema de Informações Geográficas, precisam ser georreferenciados, ou seja, precisam ter posição geográfica definida e precisa.

O georreferenciamento de imagens é uma transformação geométrica que relaciona as coordenadas (linha e coluna) de uma imagem do tipo jpg, bmp ou tif, por exemplo, com as coordenadas geográficas (latitude e longitude) ou coordenadas planas (x e y) de um mapa (Imagem 7).



Fonte: Lopes (2009)

Todas as camadas de um SIG precisam ser georreferenciadas para que a sobreposição das mesmas seja feita de forma correta.

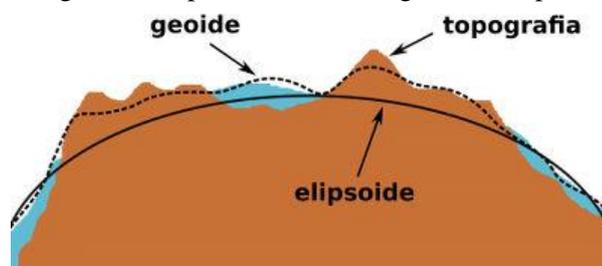
### 2.3.3 Sistema de Referência de Coordenadas (SRC)

Todo projeto SIG, bem como cada uma de suas camadas, deve ter um Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) bem definido. Em um SRC temos diversos parâmetros (como por exemplo, elipsoide, *datum* e projeção), estes utilizados para localizar as informações espaciais sobre a superfície terrestre.

#### 2.3.3.1 Representação da Superfície Terrestre

O formato da Terra já foi muito discutido e várias teorias fizeram com que a sua configuração fosse de plana para esférica, de esférica para elipsoidal e de elipsoidal para Geoidal, que é a forma mais aceita atualmente (Imagem 8).

Imagem 8 - Superfície da Terra, geoide e elipsoide



Fonte: Madeira (2013)

Carl Friedrich Gauss (1828, *apud* OLIVEIRA, 2015) definiu o geoide como o sólido formado pelo nível médio não perturbado dos mares supostamente prolongado por sob os continentes, que coincide com a superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra. Como o geoide é uma superfície irregular e de difícil representação matemática, o mesmo foi simplificado através de um elipsoide de revolução.

A posição do elipsoide em relação à superfície terrestre é feita através de um ponto de referência padrão denominado *datum*, localizado na intersecção entre a face do geoide e a face do elipsoide, a partir do qual as distâncias, altitudes e aceleração da gravidade dos demais pontos em um mapa são definidas.

### 2.3.3.2 Sistemas de coordenadas

Existem diversos sistemas de coordenadas. Os mais utilizados são as coordenadas topográficas, geográficas e planas.

As coordenadas topográficas utilizam dois eixos de referência, eixo X (abscissas, paralelo à direção Leste-Oeste) e eixo Y (ordenada, paralelo à direção Norte-Sul), e são obtidas a partir de um ponto de referência.

As coordenadas geográficas utilizam linhas imaginárias desenhadas sobre o elipsoide. Os paralelos são linhas paralelas à linha do Equador e indicam a latitude de um ponto. Os meridianos são linhas paralelas ao meridiano de Greenwich e indicam a longitude de um ponto.

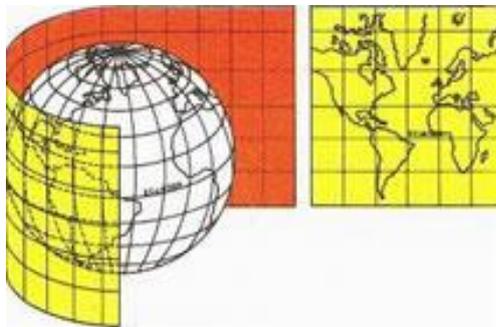
O sistema de coordenadas planas é semelhante ao sistema de coordenadas topográficas, porém trabalha apenas com coordenadas positivas e com um referencial no elipsoide.

### 2.3.3.3 Projeções cartográficas

As projeções cartográficas são representações do globo, em planta, ou seja, em um plano, porém esse tipo de representação traz consigo distorções. Em busca de minimizar tais distorções, foram criados vários tipos de projeção.

Projeção cilíndrica, como o próprio nome diz, é a projeção do globo em um cilindro onde os paralelos e meridianos são representados por linhas retas que nunca se encontram, a não ser ortogonalmente (Imagem 9).

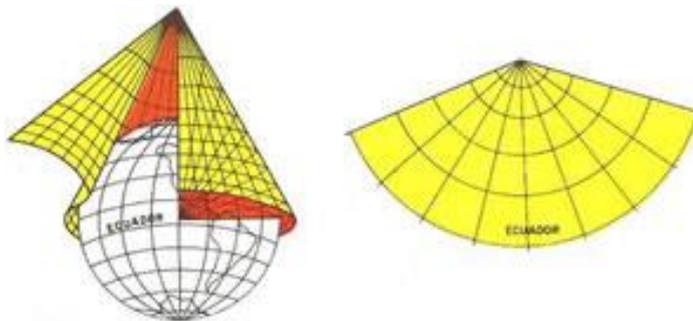
Imagem 9 - Projeção Cilíndrica



Fonte: Francisco (2014)

Na projeção cônica, as linhas paralelas ao Equador são dispostas de forma concêntrica, porém os meridianos se direcionam aos polos, como se todas as paralelas fossem de um polo a outro e se encontrassem em um único ponto (Imagem 10).

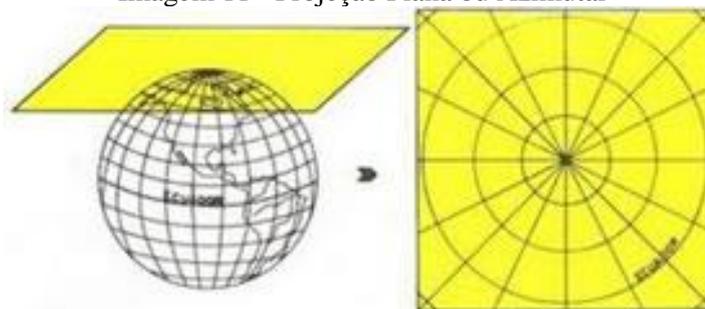
Imagem 10 - Projeção Cônica



Fonte: Francisco (2014)

Projeção Plana ou Azimutal é a projeção de um plano tangente ao globo, onde os paralelos são representados por círculos concêntricos e os meridianos partem do centro do círculo para fora (Imagem 11).

Imagem 11 - Projeção Plana ou Azimutal



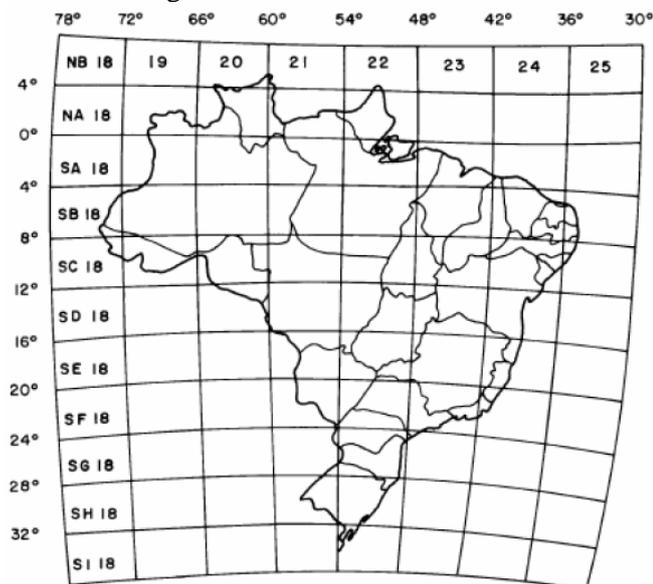
Fonte: Francisco (2014)

#### 2.3.3.4 Projeção Universal Transversa de Mercator

A Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) é uma das mais utilizadas mundialmente para mapas em grande escala. É um sistema bidimensional que utiliza projeção cilíndrica.

O sistema UTM, divide a Terra no sentido longitudinal em sessenta fusos (ou zonas) de seis graus ( $6^\circ$ ) cada. A numeração das zonas se inicia em 1 (um) da esquerda para a direita, com origem em  $180^\circ$  Oeste. Com o mapa brasileiro, pode-se observar que a capital de São Paulo, por exemplo, está no fuso 23 Sul, conforme Imagem 12.

Imagem 12 - Fusos ou Zonas UTM



Fonte: D'Alge (2001)

As coordenadas (X,Y) são definidas em metros. O eixo X tem sua origem no meridiano central do fuso com valor 500.000,00 metros, crescendo para Leste e decrescendo para Oeste. O eixo Y tem sua origem na linha do Equador. No hemisfério Norte, o valor de referência é 0,00 metros, crescendo em direção ao Norte. No hemisfério Sul, o valor de

referência é 10.000.000,00 metros, decrescendo em direção ao Sul. Desta forma, não existem coordenadas negativas em um sistema UTM.

Rosa (2005) diferencia que, em mapas nos quais se necessita de grande detalhamento, utiliza-se a Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), enquanto naqueles com poucos detalhes são usadas Coordenadas Geográficas.

#### 2.3.3.5 Grupo de Pesquisa Petrolífera Europeia (EPSG)

Como vimos, para trabalhar em um SIG é necessário que se determine um Sistema de Referências de Coordenadas (SRC), tanto para o projeto, quanto para os arquivos utilizados nas suas camadas.

Para facilitar a organização dos SRCs, o Grupo de Pesquisa Petrolífera Europeia - *European Petroleum Survey Group* (EPSG) - criou um código específico para cada SRC. Este código vem sendo utilizado em todo o mundo.

Por exemplo, o código EPSG:4674 indica o Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000, enquanto o código EPSG:29193 indica SAD69 / UTM Zona 23S.

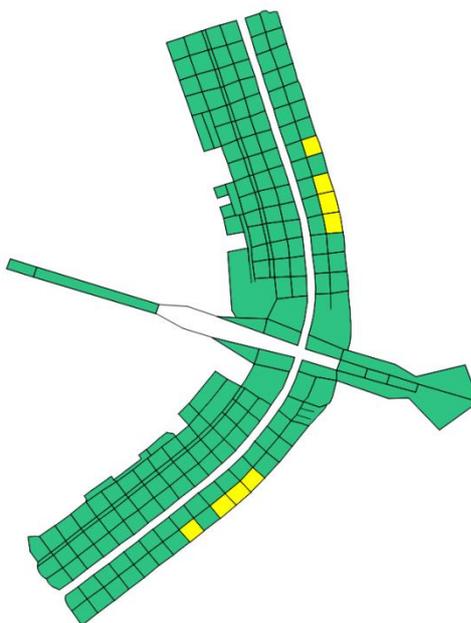
### 2.3.4 Organização das Camadas em um SIG

Uma das características de um SIG é a possibilidade de se trabalhar com diversas camadas (*layers*) ao mesmo tempo. As camadas podem ser do tipo vetorial (*shapefile*) ou matricial (*raster*). As camadas vetoriais são vinculadas a uma tabela de atributos, que podem ser quantitativos ou qualitativos.

Os *layers* podem ser construídos pelo usuário do SIG ou serem importados prontos para o programa. É possível trabalhar com mais de um *layer* ativo e mudar a transparência das camadas, de modo que estas fiquem sobrepostas e que o usuário consiga obter panoramas diferenciados conforme disposição das camadas de informações, possibilitando a análise de correlação entre elas.

As camadas vetoriais são compostas por elementos geométricos denominados feições. As feições utilizadas em um SIG são de três tipos: pontos, que indicam um evento único; linhas que podem representar um limitador; e polígonos que representam áreas delimitadas. Na Imagem 13 pode ser vista uma camada vetorial de polígonos representando as quadras de Brasília.

Imagem 13 - Camada vetorial com o cadastro urbano de Brasília



Fonte: Lopes (2009), Adaptado pelo autor.

As características de cada feição (cor, preenchimento, transparência, por exemplo) podem ser ajustadas de acordo com a preferência do usuário.

Silva, Monteiro e Pamboukian (2014) mostram o exemplo da utilização de um SIG para o planejamento urbano da cidade. Neste caso, uma camada vetorial seria composta por pontos, que mostram a localização de escolas, hospitais, etc., por linhas que representam as ruas, e por polígonos que representam as quadras do cadastro urbano, lagos, parques, etc.

Neste trabalho, os pontos de sondagem, por exemplo, podem ser representados por uma camada vetorial de pontos, enquanto as curvas de nível podem ser representadas por uma camada vetorial de linhas.

Já as camadas matriciais se referem a uma matriz de pontos que representam uma determinada característica da superfície terrestre. Elas podem ser imagens orbitais obtidas por satélites ou imagens de Sensoriamento Remoto, por exemplo. Elas também podem ser geradas por alguns algoritmos do SIG como os mapas altimétricos, de declividade, ou resultantes da interpolação de dados.

Sua característica é que são formadas por *pixels* e, quanto maior o zoom aplicado à imagem, mais nítida fica a separação desses *pixels*, ou seja, a imagem é composta por diversos quadrados pequenos, coloridos ou não.

As tabelas de atributos (Imagem 14) carregam informações sobre as camadas vetoriais. Elas podem ser criadas no SIG ou importadas de programas como o Microsoft Excel

ou Access. Cada linha desta tabela possui as características de uma feição da camada, ou seja, cada elemento geométrico que compõe o *layer*.

Imagem 14 - Tabela de Atributos da camada vetorial com o cadastro urbano de Brasília

	NOME	ASA	USO	NUM_IMOVEL	POPULACAO	RENDA	PERIMETRO	AREA
0	SQN-416	NORTE	Lazer	3	150	100000.0000	1371.1531	116485.7012
1	SQN-415	NORTE	Residencial	500	1000	5000.0000	1324.8113	110053.2056
2	SQN-414	NORTE	Residencial	400	800	6000.0000	1430.4586	125543.1084
3	SQN-413	NORTE	Residencial	300	650	6500.0000	1310.3048	106176.1299
4	SQN-412	NORTE	Comercial	60	240	500000.0000	1316.8722	110370.5996
5	SQN-411	NORTE	Residencial	300	600	8000.0000	1314.9314	106619.1157
6	SQN-410	NORTE	Residencial	110	380	10000.0000	1340.8246	111260.3003
7	SQN-409	NORTE	Residencial	120	480	11000.0000	1308.0746	107723.6855
8	SQN-408	NORTE	Lazer	2	80	120000.0000	1394.4899	120577.8242
9	SQN-407	NORTE	Residencial	200	500	12000.0000	1351.5277	113283.2158

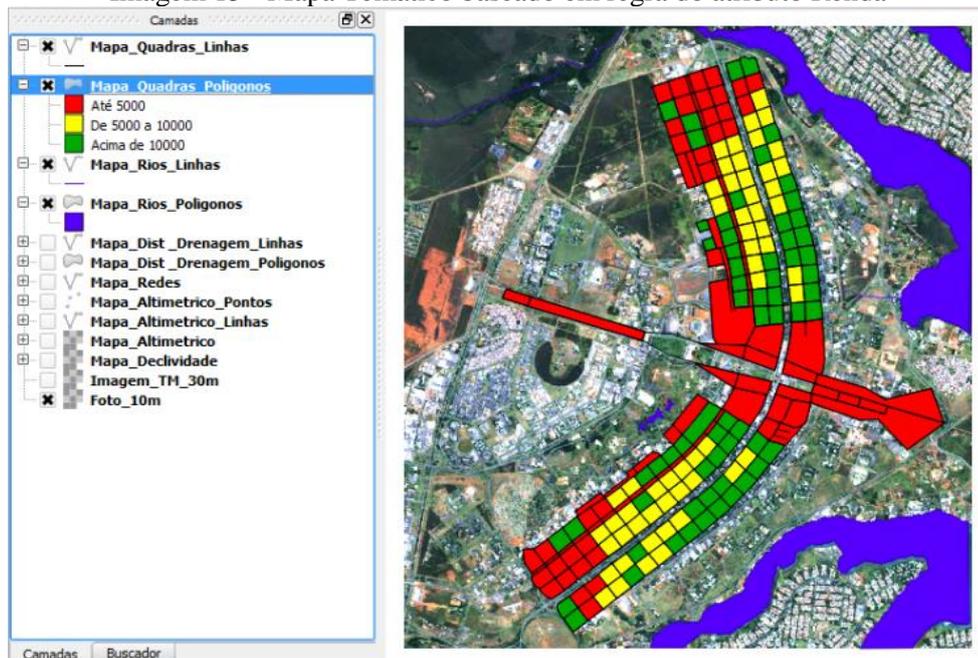
Fonte: Lopes (2009), Adaptado pelo autor.

É possível fazer alterações e consultas nas tabelas. O modo operante é semelhante ao Microsoft Excel, pois usa de expressões lógicas, com operadores, os mesmos em sua maioria usados nas fórmulas do Microsoft Excel. Ainda é possível que sejam aplicados filtros à tabela para melhor visualização e interpretação de dados.

A fim de organizar melhor e analisar as informações contidas nas tabelas do SIG e em suas camadas de forma visual, podem ser criados mapas temáticos (Imagem 15), de quatro classes diferentes, segundo Silva, Monteiro e Pamboukian (2014):

- símbolo simples: todas as feições possuem as mesmas características;
- categorizado: de acordo com uma coluna da tabela de atributos, cada valor único possui uma cor com escala em dégradé;
- graduado: a cada intervalo de valores retirados da tabela de atributos, que obedece uma premissa, é adotada uma cor;
- baseado em regra: usa uma ou mais colunas da tabela de atributos para gerar regra de classificação (Imagem 15).

Imagem 15 - Mapa Temático baseado em regra do atributo Renda



Fonte: Lopes (2009), Adaptado pelo autor.

## 2.4 SOFTWARES ANALISADOS

Foram analisados diversos *softwares*, como o AutoCAD Civil 3D, MATLAB, Bentley, Surfer, PetraSim, ArcGIS, dentre outros.

Para o presente estudo, alguns dos *softwares* foram excluídos logo no início por necessitarem de licenças pagas para serem utilizados; outros não suportavam a modelagem em 3D e alguns não traziam um resultado satisfatório para o trabalho.

Diante das opções, os softwares apontados como melhores opções foram o QGIS (*Quantum Geographic Information System*) para a preparação de dados e geração de mapas em 2D, o GRASS GIS (*Geographic Resources Analysis Support System Geographic Information System*) para interpolação em 2D e 3D e geração do modelo em 2D e 2.5D, e o ParaView, que permite visualizar o modelo tridimensional como um todo, em fatias, cortes e *thresholds*.

### 3 GEOESTATÍSTICA

Como Penido (2013) aborda, a geoestatística é um ramo da estatística que une o conceito de variáveis aleatórias com o de variáveis regionalizadas, gerando um novo conceito de funções aleatórias, que são posteriormente processadas por aplicativos computacionais.

Para a análise do subsolo, foram testadas as possibilidades oferecidas pela geoestatística, por meio de interpolações numéricas, utilizando como variável regionalizada os dados coletados em campo. Para caracterizar os pontos a serem estudados, foram utilizados a profundidade e o respectivo  $N_{SPT}$  para cada ponto sondado.

Com os resultados das interpolações, é possível obter o valor de  $N_{SPT}$  de um ponto no qual o ensaio não foi realizado, tendo assim, portanto, uma estimativa que pode ser estudada e avaliada através da média e do desvio padrão dos erros.

#### 3.1 VARIÁVEL REGIONALIZADA

Variáveis regionalizadas caracterizam o comportamento espacial entre dois ou mais pontos, mostrando se estes obedecem, ou não, a uma continuidade entre si, além de demonstrarem seus aspectos de mudança e distorção à medida que estes pontos vão se distanciando.

Para se definir uma variável regionalizada são necessárias três características:

- localização: a variável é identificada com um valor numérico associado à amostra. Neste estudo, é representada pela cota do terreno ou pelos valores de  $N_{SPT}$ ;
- anisotropia: indica a variação dos parâmetros analisados em diferentes direções e dependendo do eixo de referência. Isto não ocorre no presente estudo;
- continuidade: a variação espacial dos dados pode ser grande ou pequena. No presente caso são pequenas, devido à homogeneidade do terreno tanto em tipos de solo quanto em cotas.

#### 3.2 VARIÁVEL ALEATÓRIA

Segundo Triola (1999, p.93) “Uma variável aleatória é uma variável (geralmente representada por  $x$ ) que tem um valor numérico único (determinado aleatoriamente) para cada resultado de um experimento.”.

Conforme a citação acima é possível determinar o conceito desta variável, sendo um evento cujo resultado não depende de qualquer circunstância ou outro evento para acontecer. Só é possível conhecer o valor da variável aleatória se o experimento tiver sido realizado e o evento concluído.

Esta é uma variável que pode ser classificada em dois tipos:

- discreta: o valor que servirá de resultado do experimento admite um valor finito e inteiro, ou seja, é limitado e enumerável. Por exemplo, um número resultante de um rolar de dado, estará sempre entre 1 e 6, e será sempre um número inteiro.
- contínua: admitem um valor qualquer, inteiro ou não, dentro de um intervalo pré-estabelecido. Por exemplo, em uma distância em que o mínimo é 10 metros e o máximo 20 metros, há uma infinidade de distâncias possíveis.

### 3.3 PRINCIPAIS MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

Interpolarmos é estimar o valor de uma função entre dois pontos já conhecidos. Pode-se proceder com uma interpolação de várias formas, como, por exemplo, linear, exponencial, polinomial, trigonométrica, entre outras.

Para executar uma interpolação, é necessário que se tenha ao menos dois pontos da função, ou seja, ao menos dois pares de coordenadas, além de uma das coordenadas do ponto desejado. Com estas informações, define-se o melhor tipo de interpolação a ser usado.

Na versão 7.0.1 do software GRASS, utilizada neste estudo, há vários métodos de interpolação como o *Raster Series Interpolation*, inverso ponderado da distância (IDW - *Inverse Distance Weighting*), Crigagem (*Krige*), *Spline* regularizada por tensão (RST - *Regularized Spline Tension*), *Bilinear and bicubic from vector points* e *Triangulated Irregular Network* (TIN).

#### 3.3.1 *Inverse Distance Weighting* - Inverso Ponderado da Distância (IDW)

O inverso ponderado da distância (IDW), é um dos métodos de interpolação empregados no presente trabalho. Para que se estime o valor de um ponto, utiliza-se uma relação matemática, que é a média dos valores dos pontos mais próximos, ponderada pelo inverso da distância destes pontos.

Neste método, o peso atribuído a cada um dos valores que compõem a média ponderada é distribuído conforme a distância entre o ponto a ser calculado e os demais pontos conhecidos. Quanto maior a distância de um ponto conhecido em relação ao ponto em análise, menor será o peso deste sobre o cálculo, como é demonstrado na Equação 1.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad \dots(1)$$

Sendo:

Z = valor interpolado para o nó do reticulado (grid);

Z<sub>i</sub> = valor do ponto amostrado vizinho ao nó;

h<sub>ij</sub> = distância entre o nó da grade e Z<sub>i</sub>;

β = expoente de ponderação (peso);

n = número de pontos amostrados utilizados para interpolar cada nó.

Quanto ao expoente β, sua influência sobre o resultado é dada da seguinte forma:

- expoentes baixos (0 a 2): destacam anomalias locais;
- expoentes altos (3 a 5): suavizam anomalias locais;
- expoentes ≥ 10: resultam em estimativas "poligonais" (planas);
- expoente = zero: resulta em estimativas de "média móvel";
- expoente = 2: inverso do quadrado da distância.

### 3.3.2 *Regularized Spline Tension - Spline Regularizada por Tensão (RST)*

O outro método empregado no presente estudo, além do IDW, é o RST, usado para a elaboração do modelo tridimensional do subsolo.

Segundo Mitas e Mitasova (1999, *apud* CANELLO, 2012 p.23) “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 que deve passar pelos pontos amostrados ou próximos a eles, de maneira mais suave possível.”.

O método RST, disponível no GRASS, permite a interpolação de superfícies por meio do módulo *v.surf.rst*, e de volumes, a partir do módulo *v.vol.rst*. Os demais métodos do *software* não permitem interpolações volumétricas.

Segundo Leite (2007, *apud* LEITE e CAMPOS, 2015, p. 20) “O algoritmo *spline*, corresponde a uma Função de Base Radial, com condição de minimização dos desvios entre valores observados e calculados, ao mesmo tempo, em que promove a suavização da superfície obtida.”.

A Equação 2, mostra como é feito o cálculo para que seja realizada a interpolação no método RST.

$$\sum_{j=1}^N |p^j - S(x^j)|^2 * w_j + w_0 * I(S) = \text{mínimo} \quad \dots(2)$$

Sendo:

- $p$ : é a posição em  $x$  do ponto no plano bidimensional;
- $w_i$  e  $w_0$ : coeficientes de ponderação;
- $I(S)$ : valor adotado no parâmetro *smooth*;
- $S(x)$ : é o valor do ponto.

Assim para  $w_i / w_0 = 0$ , a função  $S(x)$ , passa exatamente nos pontos observados.

Este método de interpolação permite a seleção de dez parâmetros:

- *tension*: tensão que controla a interferência do ponto na superfície;
- *smooth*: nível de suavização da diferença de valores entre pontos reais e interpolados;
- *maximum number of points in a segment*: indica o número máximo de pontos em um segmento;
- *name of column with smoothing parameters*: nome da coluna, na tabela de atributos, com os valores do parâmetro *smooth*;
- *minimum number of points for approximation in a segment*: número mínimo de pontos de aproximação em um segmento;
- *minimum distance between points*: mínima distância entre dois pontos para que um deles possa ser excluído desde que sejam quase idênticos;
- *maximum distance between points on isoline (to insert additional points)*: máxima distância entre dois pontos em uma isolinha para que entre eles sejam inseridos pontos adicionais;

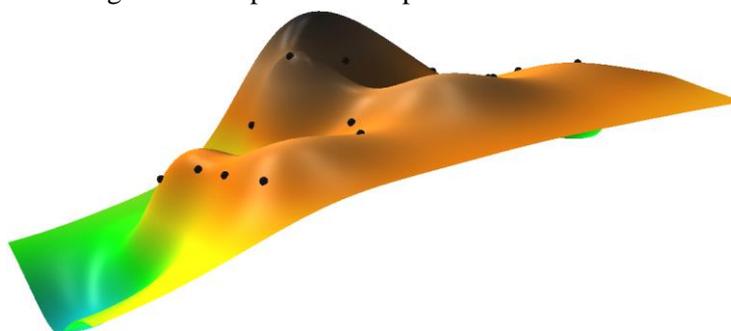
- *conversion factor for values used for interpolation*: fator de conversão para valores utilizados para a interpolação (escala);
- *anisotropy angle*: ângulo de anisotropia;
- *anisotropy scaling fator*: fator de escala a ser aplicado na anisotropia.

Neste trabalho foram estudadas apenas as variações dos dois principais parâmetros, *tension* (tensão) e *smooth* (suavização), cujas aplicações e características são detalhadas a seguir.

O parâmetro *tension* (tensão) controla a interferência de cada ponto na superfície, ou seja, à medida que se aumenta o valor desse parâmetro, diminui-se a influência dos pontos entre si. Quando se usa uma tensão baixa, os pontos exercem grande influência entre si na superfície obtida.

Outro modo de entender esse parâmetro é imaginar que há uma membrana maleável sobre os pontos que estão sendo estudados. Utilizar uma baixa tensão seria como simplesmente deixar a membrana sobre os pontos, tomando um formato irregular com picos e crateras, como se pode ver na Imagem 16, na qual foi usada tensão igual a 30.

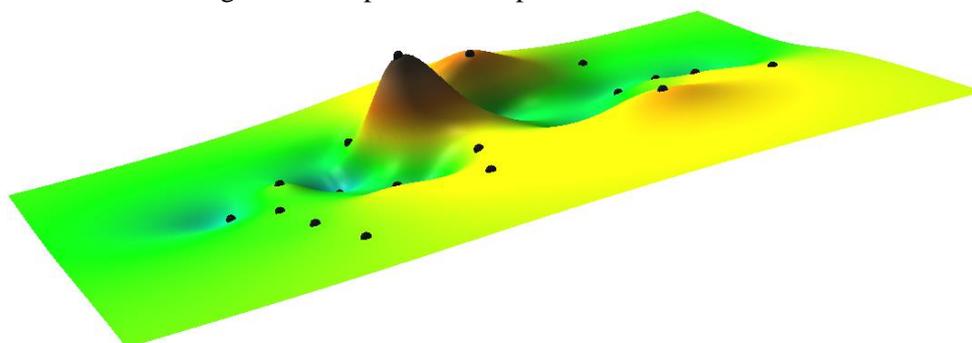
Imagem 16 - Superfície interpolada com *tension* = 30



Fonte: Próprio autor (2016)

À medida que a tensão aumenta, a membrana é esticada sobre os pontos, o que significa que alguns deles deixam de ter grande influência e passam a ser quase imperceptíveis na superfície formada pela membrana, como ilustrado na Imagem 17, em que se usou tensão igual a 100. As imagens das imagens 16 e 17 foram obtidas apenas variando o valor de tensão, todos os outros parâmetros foram mantidos. Note que em ambas as imagens os pontos reais utilizados para a interpolação foram os mesmos.

Imagem 17 - Superfície interpolada com *tension* = 100

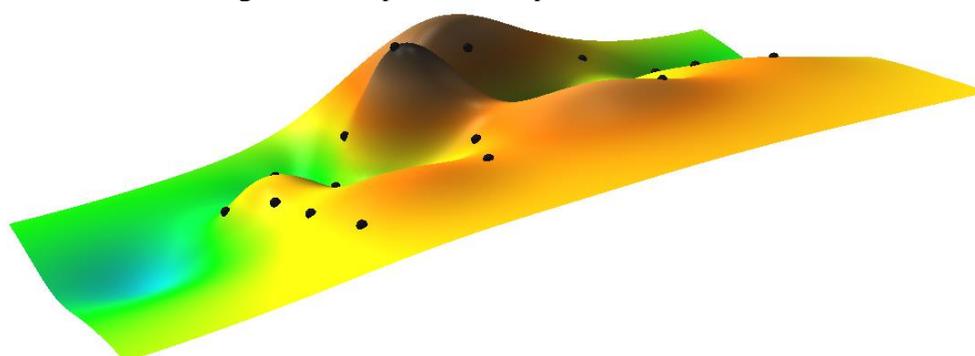


Fonte: Próprio autor (2016)

Na geração das superfícies através do método RST, é como se o GRASS gerasse uma membrana que passa por todos os pontos, ou próxima a eles. Para que essa membrana seja traçada pelo *software*, há um parâmetro, denominado *smooth* (suavização), que controla sua precisão, ou seja, se ela deve passar exatamente sobre todos os pontos ou próxima a eles.

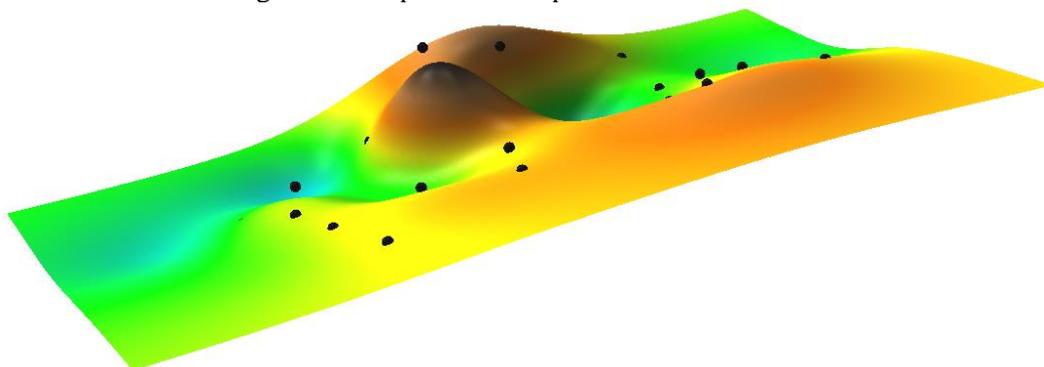
A suavização é diretamente proporcional a sua função, ou seja, quanto mais próxima a zero, mais fiel será a membrana em relação à posição dos pontos, passando exatamente por todos eles, como na Imagem 18.

Imagem 18 - Superfície interpolada com *smooth* = 0



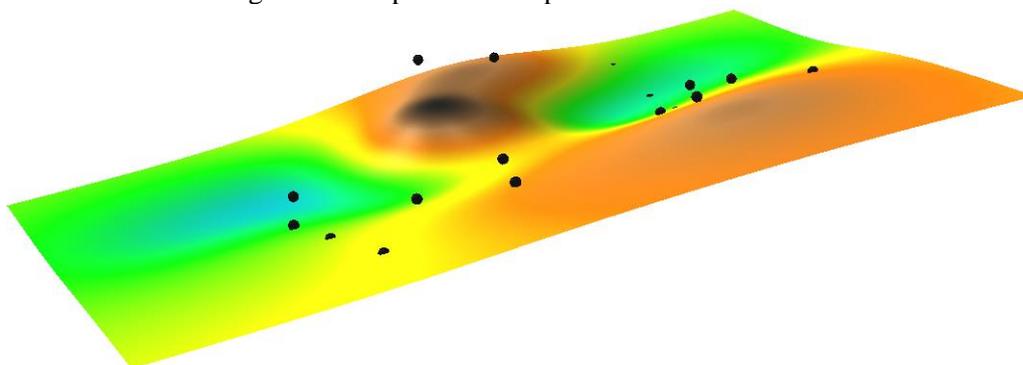
Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 19 - Superfície interpolada com  $smooth = 0.1$



Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 20 - Superfície interpolada com  $smooth = 1.0$



Fonte: Próprio autor (2016)

À medida que o parâmetro  $smooth$  é aumentado, a superfície da membrana se suaviza e os pontos ficam mais distantes dela, como mostra a Imagem 19, com  $smooth$  igual a 0.1, e a Imagem 20, na qual o  $smooth$  é igual a 1.0.

### 3.3.3 Crigagem (Kriging)

A Crigagem é um método de interpolação que leva em conta características espaciais semelhantes entre as variáveis regionalizadas. Para sua utilização, é necessária uma continuidade espacial, isto é, caso a variável apresente anisotropia, a ausência de continuidade espacial, este método não deve ser empregado.

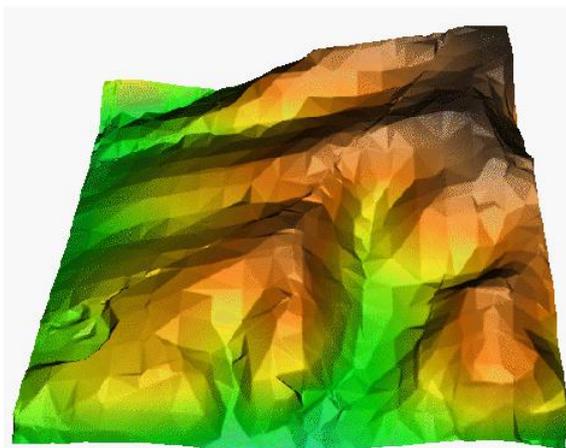
Existe mais de um tipo de Crigagem, como a simples, a universal e a indicativa. A mais usual, contudo, é a Crigagem ordinária.

### 3.3.4 Triangulated Irregular Network (TIN)

Segundo Bourrough (1989, p.41 *apud* FIRKOWSKI, 2002, p.30): “A superfície é representada de modo contínuo por uma organização de triângulos planos, formados de tal modo que sejam tanto quanto possível próximos de triângulos equiláteros.”.

Para que seja elaborada a superfície em estudo, o método TIN usa como referência os pontos de descontinuidade. Todavia, ao realizar os testes, nota-se que a aparência da superfície pode não apresentar as mudanças existentes no terreno de maneira suave, e sim com uma aparência demarcada, semelhante a dobras, como pode ser observado na Imagem 21.

Imagem 21 - Camada gerada utilizando TIN



Fonte: *Open Source Geospatial Foundation* (2015a)

### 3.3.5 Outros Métodos de Interpolação

Além dos quatro expostos acima, há também outros métodos de interpolação disponíveis nesta versão do GRASS, como o *Raster series interpolation*, Preencher células nulas e *Bilinear and bicubic from vector points*.

## 3.4 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO

Há diversas formas de se validar um estudo, modelo ou conjunto de dados. Entre estes métodos podemos destacar o desvio padrão e a validação cruzada.

Como define a ANVISA (2015) “A validação deve garantir, através de estudos experimentais, que o método atenda às exigências das aplicações analíticas, assegurando a confiabilidade dos resultados.”.

### 3.4.1 Desvio padrão

Para analisar a dispersão de valores obtidos com as interpolações realizadas, podem ser usados o desvio padrão e a variância. Estes métodos são simples e podem ser feitos com agilidade no Microsoft Excel, por exemplo.

Para chegar ao cálculo do desvio padrão, são necessárias algumas etapas. Primeiramente deve ser calculada a média dos valores, seguida de sua variância, para enfim se chegar ao valor do desvio padrão.

De acordo com Vieira (1999, p.65) “Para obter a média aritmética de um conjunto de dados basta dividir a soma dos valores de todos os dados, pelo numero deles. [...]”. Tal afirmação pode ser vista pela Equação 3.

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad \dots(3)$$

Sendo:

- x – Valores dos pontos;
- n – Número de amostras.

Vieira (1999, p. 88) ainda acrescenta que “[...]a variância, que pode ser definida como a soma dos quadrados dos desvios dividida pelo número de dados, isto é por n.”.

Desmonstrada na Equação 4.

$$S^2 = \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1} \quad \dots(4)$$

Sendo:

- x – Valor do ponto;
- $\bar{x}$  – Média dos valores;
- n – Número de amostras.

Segundo Vieira (1999, p.93) “Por definição, desvio padrão é a raiz quadrada, com sinal positivo, da variância. O desvio padrão é representado por S.”.

A Equação 5 demonstra a declaração de Vieira.

$$\sigma = \sqrt{S^2} \quad \dots(5)$$

### 3.4.2 Validação cruzada

A validação cruzada é um dos métodos que podem ser usados para realizar a validação de um modelo. Ela pode ser classificada em três tipos: *leave-one-out*, *holdout* e *k-fold*.

#### 3.4.2.1 Leave-one-out

O *leave-one-out* é um tipo de validação cruzada indicado para amostras pequenas, pois possibilita testar todos os pontos. Para executá-lo, um ponto da amostra é retirado, e então se faz a interpolação com os demais dados, para estimar o valor do ponto inicialmente retirado. Este roteiro se repete até que todos os pontos tenham sido retirados da amostra.

Como retorno deste tipo de validação cruzada, tem-se uma relação do erro por ponto retirado, ou seja, compara-se o valor real ao interpolado.

#### 3.4.2.2 Holdout

Sobre o método *holdout* explica Baldisserotto (2005, p. 32) “[...] a base de dados é dividida em dois conjuntos: conjunto de treinamento e conjunto de teste. O conjunto de treinamento fornece os dados para o treinamento da técnica utilizada e o conjunto de teste fornece dados novos, para testar a generalização da técnica. [...]”.

No tipo de validação cruzada *holdout*, os testes devem ser feitos várias vezes. Em cada teste serão encontrados erros, que devem ser somados e ter sua média calculada para que se possa avaliar os resultados, levando-se em conta a maneira como foi feita a divisão dos conjuntos.

#### 3.4.2.3 K-fold

A validação cruzada *k-fold* é parecida com o tipo *holdout*, porém a amostra é dividida em  $k$  amostras e os testes são realizados progressivamente. A cada teste, um grupo assume a posição de teste e os demais de treinamento.

Segundo Baldisserotto (2005), a vantagem deste método é que todos os dados são testados gerando assim um resultado mais confiável.

Baldisserotto (2005) defende ainda que: “O método *holdout*, porém é mais simples, e pode ser bem utilizado quando o número de padrões existente é grande e bem dividido entre as classes. Já, quando o número de padrões é pequeno, é aconselhável utilizar a validação cruzada.” com o método *k-fold*.

### 3.4.3 Desvio

Neste trabalho, para validar as interpolações feitas pelo método RST, foi utilizado, além da validação cruzada, o cálculo dos desvios, que possibilita fazer o levantamento da diferença entre valores interpolados e valores reais.

Como no exemplo citado anteriormente, caso se use um *smooth* igual a zero, a superfície criada passará exatamente sobre os pontos e se terá, portanto, um desvio nulo. Aumentando-se o *smooth*, a superfície poderia passar próxima, acima ou abaixo do ponto original, mas não mais sobre ele. Esta diferença de valor é expressa em módulo e indica o valor do desvio no ponto.

Para escolher o método de interpolação e o melhor conjunto de parâmetros utilizado na construção do modelo tridimensional, este estudo executou a validação cruzada pelo método *leave-one-out* e levou em conta também os valores dos desvios.

O uso destes métodos possibilitou o cálculo da média e do desvio padrão dos erros de interpolação, além dos desvios que o parâmetro *smooth* gera na superfície. Pôde-se, deste modo, comparar dados reais e estimados em testes e fazer uma análise mais completa.

## 3.5 MODELAGEM 3D

No presente estudo, a modelagem computacional em 3D foi utilizada como ferramenta auxiliar na visualização do terreno, para facilitar a análise do seu subsolo. Com a utilização do *ParaView*, foi possível a geração de *clips* (cortes), *slices* (fatias) e *thresholds*, que serão abordados e exemplificados no item 4.1.4.

Segundo Milton Golombek (2010, *apud* CONSTÂNCIO, 2011, p.3),

Nenhum ensaio geotécnico está com seu fim decretado, todos se complementam, e precisamos cada vez mais agregar, evoluir e aprimorar os recursos que dominamos, [...] Nenhum tipo de ensaio é obrigado a fornecer um universo de dados 100% compatível com a realidade, e nem foram concebidos para isso. Na verdade temos que nos familiarizar cada vez mais às limitações e trabalhar com conceitos estatísticos e racionalização dos dados recebidos.

Com base neste comentário observa-se a importância e necessidade que há em cada vez mais combinar ciências que possam agregar todas as áreas, além de ser preciso inovar nos meios técnico e acadêmico.

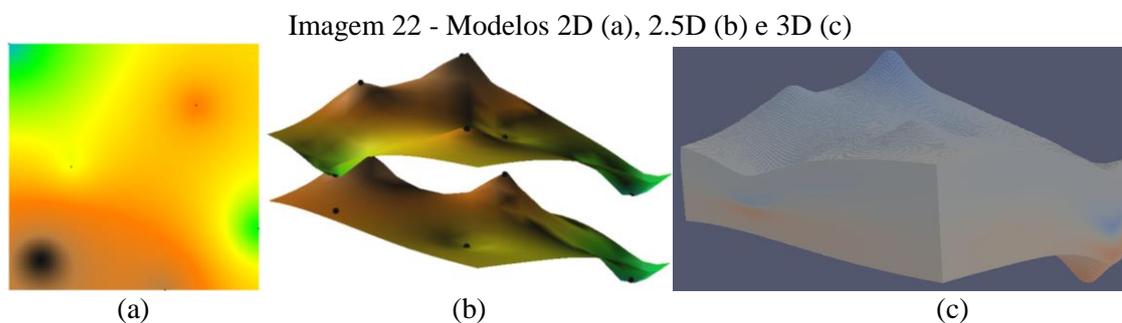
Unindo o ensaio SPT ao geoprocessamento e ao uso da geoestatística na modelagem 3D, foi possível criar um modelo virtual do subsolo, possibilitando assim um melhor estudo a partir das informações obtidas.

Para gerar o modelo computacional em 3D, é necessário seguir uma sequência de atividades:

1. entender o objeto de estudo, definindo a melhor forma de obtenção dos dados físicos primários, neste caso os pontos de sondagem;
2. organização dos dados, normalmente feita em tabelas, para serem inseridas nos respectivos programas. Esta etapa é denominada de modelagem matemática;
3. importar os dados para os softwares e realizar as interpolações necessárias;
4. inserir o sólido gerado no *software* que será utilizado para sua visualização.

A partir dos dados de sondagem do terreno é possível gerar os seguintes elementos gráficos:

- plano 2D: imagem matricial, formada por pixels (*picture elements*), que representa a vista de topo de uma interpolação, por exemplo (Imagem 22a);
- superfície 2.5D: também conhecida como iso-superfície, une pontos de mesma cota ou de mesmo  $N_{SPT}$ , por exemplo. Na Imagem 22b podemos ver superfícies 2.5D representando os limites de boca e fundo de sondagens;
- volume 3D: imagem formada por cubos conhecidos como *voxels* (volume *pixels*) que representam um objeto em 3D. Na Imagem 22c, por exemplo, vemos o modelo 3D de um subsolo.



Fonte: Próprio autor (2016)

Para De Sousa e Silva (2011, *apud* DUARTE e PEIXOTO, 2012, p. 11),

No entanto, para garantir a confiabilidade do modelo, é extremamente importante que sejam feitas coletas de todos os dados

necessários e de forma precisa, de modo que o resultado apresentado pelo modelo não fuja da realidade. Também é de suma importância que haja a calibração dos modelos computacionais, pois este consiste em ajustes dos parâmetros do modelo, de forma a fazer com que seus resultados se aproximem o máximo possível das medições feitas em campo. Logo, é importante ressaltar que um modelo é, no máximo, tão bom quanto os dados que o alimentam.

É importante salientar que não é possível basear-se somente no modelo computacional para o estudo do subsolo, devido às extrapolações estatísticas e pequenos erros acumulados.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Esta seção do presente estudo descreve o desenvolvimento do modelo computacional tridimensional do subsolo, o qual demandou, num primeiro momento, a reunião dos materiais cujos dados seriam processados pelos softwares e, posteriormente, a pesquisa acerca dos métodos de interpolação destes programas.

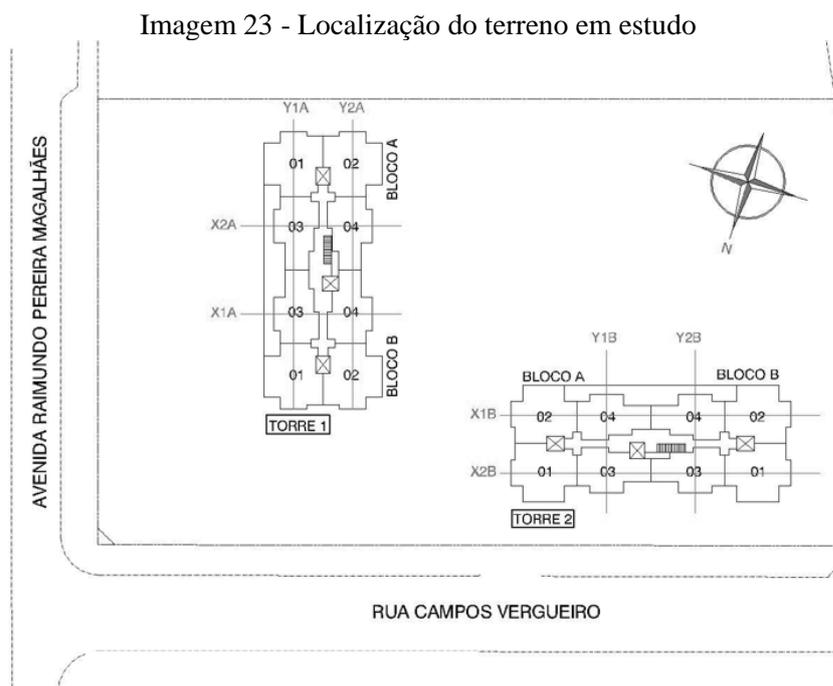
As etapas seguintes se sucederam, nesta ordem: georreferenciamento dos dados de sondagem, que localizou as coordenadas UTM dos pontos de sondagem; testes de interpolação, que buscaram o melhor método para gerar superfícies em 2D, 2.5D; e o desenvolvimento do sólido em 3D.

### 4.1 MATERIAIS E MÉTODOS MATERIAIS E MÉTODOS

Serão abordados nesta subseção os materiais e métodos empregados neste estudo: os boletins de sondagem cedidos pela Even Construtora e Incorporadora S/A, de acordo com documento apresentado no Anexo A, e os softwares utilizados para realizar as interpolações e gerar as superfícies em 2D e 2.5D e o modelo 3D.

#### 4.1.1 Dados de sondagem

Os boletins de sondagem se referem a uma obra residencial de duas torres localizada na Avenida Raimundo Pereira de Magalhães x Rua Campos Vergueiro, São Paulo, como pode ser observado na Imagem 23.



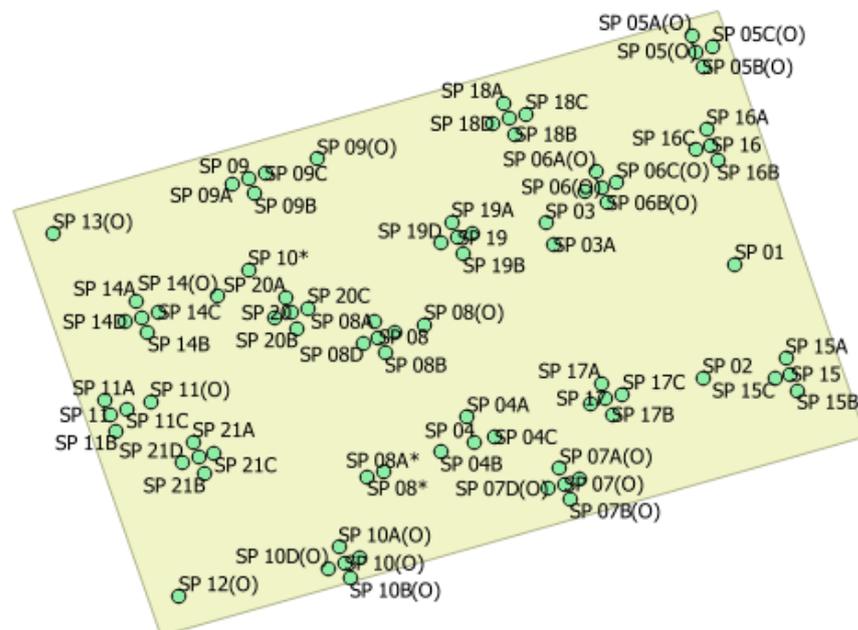
Fonte: Even Construtora e Incorporadora S/A (2012)

Os boletins de sondagem fornecidos ao estudo são de sondagens à percussão, supracitadas no item 2.1.1, que fornecem os valores de  $N_{SPT}$  por meio de golpes sucessivos e o tipo de solo através da coleta pelo amostrador.

No boletim final destas sondagens, com alguns exemplares apresentados no Anexo B e os demais disponíveis para consulta, constam nome do cliente, obra, data de realização, cota do terreno, nível d'água, método de perfuração adotado, análise tátil-visual do solo e sua descrição, e índice de resistência à penetração.

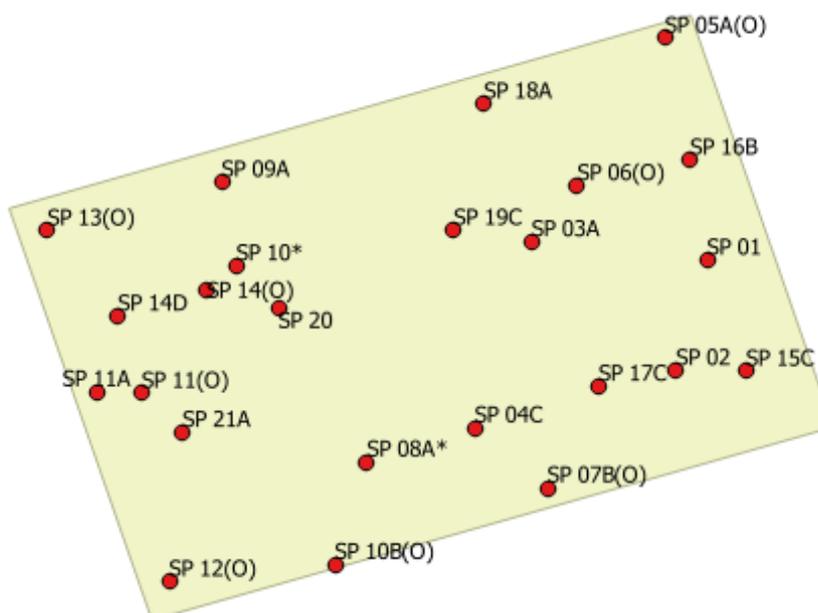
Como pode ser observado na Imagem 24, existem pontos sondados muito próximos entre si. Isso geralmente ocorre quando a sondagem não conseguiu atingir a profundidade pré-definida pelo engenheiro geotécnico responsável. O presente estudo desconsiderou as sondagens muito próximas, e considerou, entre as que tinham maior proximidade, apenas a mais profunda. Após a seleção destas sondagens, restaram 24 sondagens para a avaliação do modelo do subsolo local estudado, como pode ser visto na Imagem 25.

Imagem 24 - Pontos de sondagem existentes no terreno



Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 25 - Pontos de sondagem utilizados



Fonte: Próprio autor (2016)

Embora o estudo tenha considerado 24 sondagens, de acordo com a norma NBR 8036, o número mínimo necessário para o terreno estudado seria de 4 sondagens. Chegou-se a esse número calculando a área da projeção das duas torres no terreno, que é de, aproximadamente, 1308 m<sup>2</sup>. Segundo a norma, para áreas de projeção em planta de edificações entre 1200 m<sup>2</sup> e 2400 m<sup>2</sup>, deve-se realizar uma sondagem à percussão a cada 400 m<sup>2</sup>.

#### 4.1.2 QGIS

O *software* QGIS é um Sistema de Informações Geográficas (SIG) desenvolvido pela *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) em 2006. Este programa foi utilizado para o georreferenciamento dos pontos de sondagens e a criação da Tabelas de Atributos com informações dos boletins de sondagem.

Por ser de fácil utilização e devido a suas limitações, como fornecer apenas dois métodos de interpolação, TIN e IDW, e a impossibilidade de interpolações em 3D, este *software* foi adotado apenas no início do trabalho.

#### 4.1.3 GRASS

O desenvolvimento do GRASS, que também é um Sistema de Informações Geográficas (SIG), foi primeiramente liderado pelo exército dos Estados Unidos na década de

1980, com o intuito de gerenciar terrenos e planejamento ambiental. Aperfeiçoado por agências federais, universidades e empresas americanas na década seguinte, o *software* é atualmente utilizado por instituições de ensino e a iniciativa privada.

A partir dos locais sondados georreferenciados no QGIS, o GRASS foi empregado neste estudo para promover a interpolação de dados com base em parâmetros do programa, usando a geoestatística.

Em relação ao QGIS, este programa disponibiliza mais métodos de interpolação, como RST, IDW, Crigagem, entre outros. Para a interpolação volumétrica, no entanto, o único método disponível no GRASS é o RST.

Para a visualização do sólido tridimensional, impossível no GRASS, se fez necessário a utilização do *software* ParaView.

#### 4.1.4 ParaView

O *software* ParaView foi desenvolvido, a partir do ano 2000, pelas empresas Kitware e Los Alamos National Laboratory em um contrato de três anos com o Departamento de Energia dos Estados Unidos. Após o lançamento da primeira versão do programa, em 2002, a Kitware, junto da Los Alamos, da Sandia National Labs e do laboratório do exército dos Estados Unidos, tomou frente do desenvolvimento do *software*, que teve novas versões lançadas em 2005 e 2007.

O ParaView permite a visualização do sólido tridimensional, que irá representar o subsolo do terreno estudado fornecendo imagens do mesmo como um todo, em fatias (*slices*), cortes (*clips*) ou *thresholds*.

## 4.2 GEORREFERENCIAMENTO DOS DADOS DE SONDAGENS

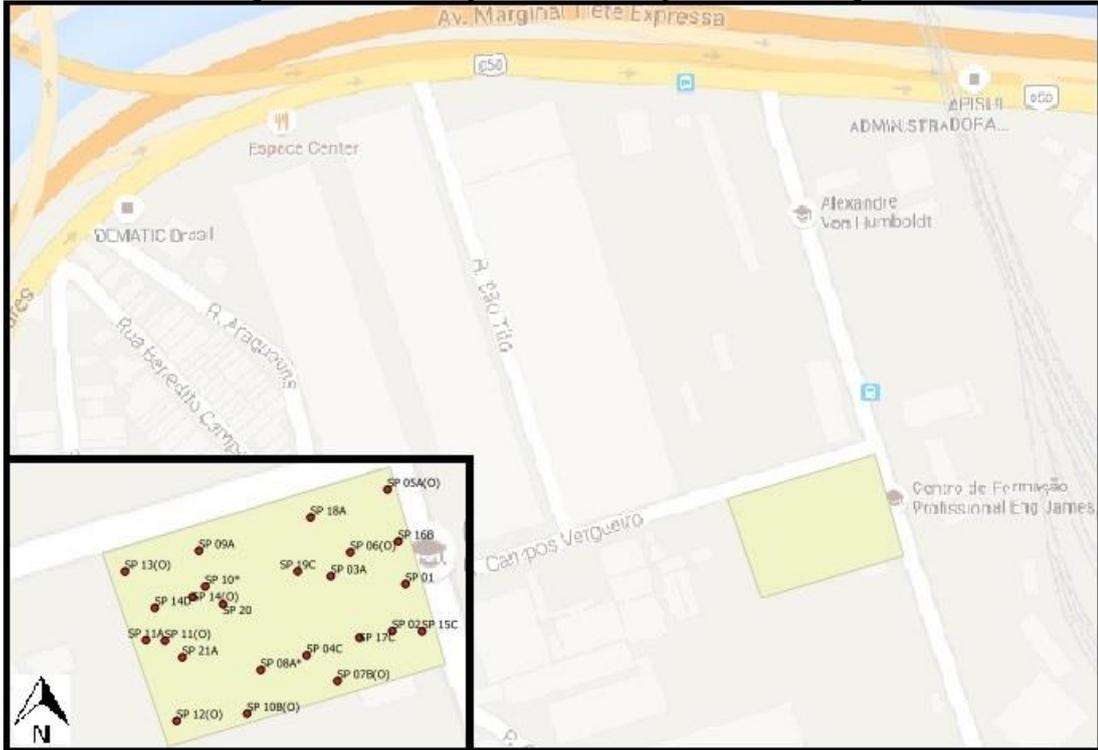
Para dar início ao trabalho, foi preciso georreferenciar os dados de sondagens, para que a sobreposição dos *layers* criados fosse feita de maneira correta, isto é, o ponto estará na mesma posição (X;Y) independente do *layer* em que estivermos trabalhando.

O georreferenciamento dos dados de sondagem foi realizado no *software* QGIS. Primeiramente foi inserida no programa uma imagem de satélite fornecida pelo Google Maps referente ao local em estudo. Como esta imagem não é georreferenciada, utilizou-se uma imagem da EMPLASA para realizar a compatibilização das coordenadas com base no Sistema de Referência de Coordenadas cujo código é EPSG:29183 (SAD 69 / UTM 23S deprecated).

Após o georreferenciamento, foram criadas no QGIS as seguintes camadas vetoriais: delimitação do terreno, pontos com todas as sondagens e pontos com as sondagens já selecionadas para a realização deste trabalho.

A Imagem 26 mostra o terreno e no detalhe a imagem vetorial com os pontos de sondagem escolhidos para o estudo.

Imagem 26 - Localização do terreno e pontos de sondagem



Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 27 - Tabela de atributos com o valor de  $N_{SPT}$  por sondagem

Attribute table - Sondagens utilizadas :: Features total: 24, filtered: 24, selected: 0												
id	Sondagem	1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m	11m
0 1	SP 01	3	0	4	4	3	2	21	12	46	0	0
1 2	SP 02	2	0	3	4	3	22	15	23	44	0	0
2 13	SP 06(O)	1	0	1	1	0	21	48	93	120	0	0
3 47	SP 12(O)	1	2	1	2	2	1	5	32	150	0	0
4 36	SP 10*	3	0	0	0	1	9	100	42	75	0	0
5 48	SP 13(O)	5	1	1	0	5	32	7	300	0	0	0
6 78	SP 20	2	0	1	1	1	1	9	32	225	450	0
7 39	SP 10B(O)	6	4	2	3	1	150	0	0	0	0	0
8 61	SP 16B	3	0	0	3	4	20	32	81	300	0	0
9 10	SP 05A(O)	1	1	1	2	1	26	14	115	112	0	0
10 84	SP 21A	1	0	1	0	1	16	7	68	192	300	0
11 26	SP 08A*	7	7	6	2	5	28	41	60	75	50	0
12 33	SP 09A	2	1	1	1	1	2	120	0	0	0	0
13 76	SP 19C	3	1	2	0	3	17	40	320	0	0	0
14 69	SP 18A	1	1	3	1	0	4	12	112	0	0	0
15 54	SP 14D	0	0	1	0	0	21	17	70	0	0	0
16 58	SP 15C	4	2	1	2	2	14	24	68	74	225	0
17 49	SP 14(O)	4	2	2	3	3	27	20	22	15	0	0
18 4	SP 03A	3	2	3	3	0	0	23	22	18	52	0
19 8	SP 04C	5	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0
20 20	SP 07B(O)	1	1	2	1	1	5	16	37	150	0	0
21 42	SP 11(O)	2	3	2	4	2	43	17	31	150	0	0
22 44	SP 11A	3	1	1	0	4	32	30	60	93	180	0
23 66	SP 17C	1	1	1	1	1	23	11	11	9	122	375

Fonte: Próprio autor (2016)

Na tabela de atributos da camada vetorial que representa as sondagens foram inseridos todos os pontos de sondagem e seus respectivos valores de resistência à penetração por metro de profundidade, como mostra a Imagem 27.

Na tabela de atributos, é necessário existir uma coluna com um número de identificação (ID) da feição. Sendo assim, a cada ponto de sondagem foi atribuído um ID (Apêndice A), este sendo utilizado como referência para correlacioná-los nos demais *softwares* utilizados.

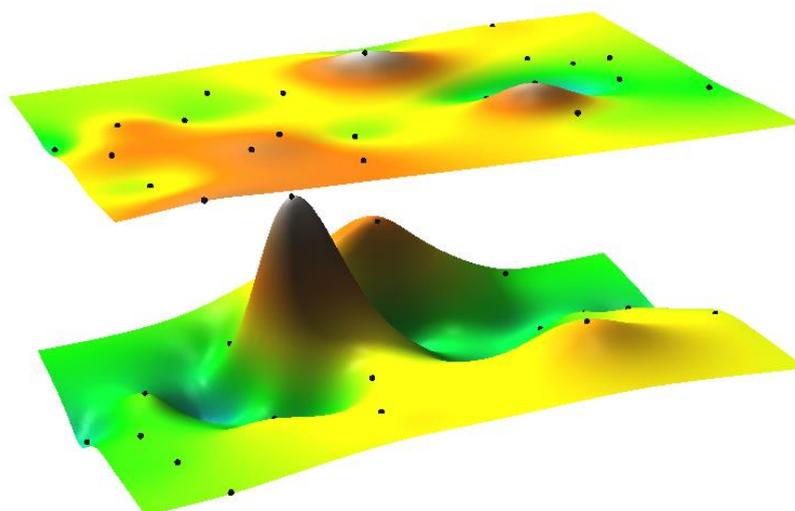
#### 4.3 TESTES DE INTERPOLAÇÃO

As informações que foram organizadas no QGIS (Apêndice B), como as coordenadas UTM de cada furo de sondagem (Apêndice C) e os dados dos boletins de sondagem (Apêndice D), foram exportadas para o GRASS para a geração de um modelo 3D do subsolo.

Para gerar o modelo, o GRASS precisa realizar diversas interpolações de dados através de métodos como IDW, RST e outros.

O primeiro passo para gerar o modelo 3D é fazer a interpolação das cotas referentes à boca de cada furo de sondagem gerando um modelo 2.5D (iso-superfície), semelhante a uma casca. Em seguida, fazer o mesmo para as cotas referentes ao fundo (limite do impenetrável) de cada furo. A Imagem 28 ilustra estas duas superfícies e os pontos utilizados para interpolação.

Imagem 28 - Superfícies de boca e fundo

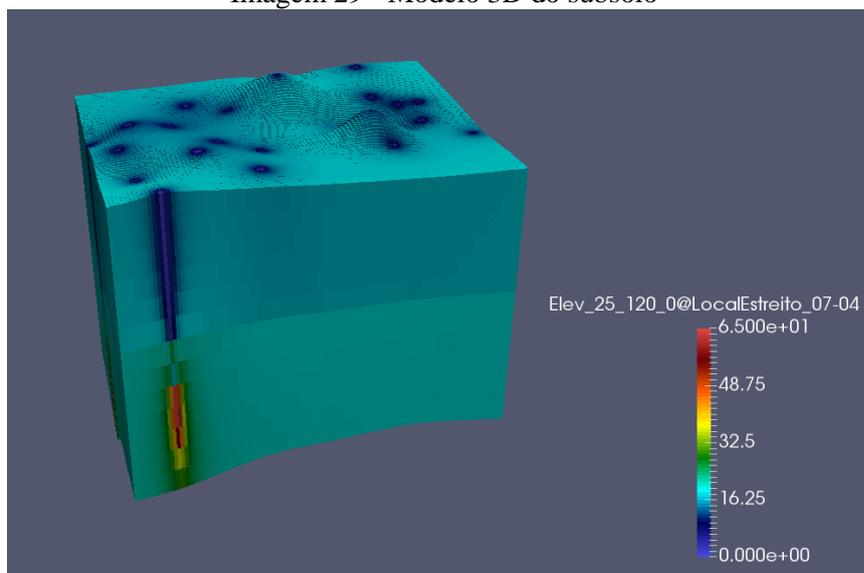


Fonte: Próprio autor (2016)

A partir dos dados de sondagem importados do QGIS e das superfícies de boca e fundo que limitam o modelo, pode-se gerar um modelo 3D do subsolo através de interpolação.

Convém ressaltar que o único método disponível para interpolação 3D (volume) no GRASS é o RST e que este software não permite a visualização do modelo. Para isto é necessário utilizar o software ParaView (Imagem 29).

Imagem 29 - Modelo 3D do subsolo



Fonte: Próprio autor (2016)

A seguir serão descritos os métodos de interpolação utilizados neste trabalho: IDW e RST.

#### 4.3.1 Método IDW – “*Inverse Distance Weighted*”

##### 4.3.1.1 Delimitação do parâmetro

O modelo estatístico Inverso das Distâncias (IDW) possui apenas um parâmetro de interpolação, o *power* (potência). O valor padrão considerado pelo manual do *software* é 2.0 sendo que quanto maior for o parâmetro, maior é a influência entre os pontos próximos.

Segundo o manual do *software* (*Open Source Geospatial Foundation, 2015b*),

“A Ponderação é atribuída a pontos amostrais através da utilização de um coeficiente de ponderação que controla como a influência da ponderação irá diminuir a medida que a distância a partir do ponto desconhecido aumenta.”.

Para encontrar a melhor faixa de valores de *power*, foi feita a interpolação da seguinte forma:

- para a boca, a interpolação foi feita primeiro com o valor padrão (2.0) e na sequência com valores acima (3.0 e 6.0) e abaixo (0.20) para a investigação do comportamento das cotas em relação às distâncias dos pontos sondados (superfície interpolada);
- para o fundo, a interpolação foi feita primeiro com o valor padrão (2.0) e na sequência valores acima (4.0) e abaixo (1.0 e 0.50) para investigação do comportamento das cotas em relação as distâncias dos pontos sondados (superfície interpolada).

#### 4.3.1.2 Considerações para as interpolações

O método IDW, utilizado neste trabalho para interpolar as superfícies de boca e fundo de sondagens, faz uso de cotas para realizar as interpolações, sem levar em consideração o valor do  $N_{SPT}$ . Os erros de interpolação são analisados com base na validação cruzada e nos desvios.

Para a validação cruzada, foi utilizado o método *leave-one-out*, onde foi retirado um ponto de sondagem, realizada a interpolação e, em seguida, feita a conferência do valor da cota original do ponto removido com o valor da cota interpolada. Este processo foi repetido para cada um dos pontos. Este tipo de validação é utilizado para verificar se a cota de um ponto pode ser corretamente prevista a partir de pontos vizinhos. Quanto menor a diferença (distância), melhor a previsão.

Para o cálculo dos desvios, a interpolação foi feita com todos os pontos de sondagem e após isto, foi verificado os valores das cotas de todos os pontos, indicando a diferença entre os valores da cota original e interpolada. Os desvios indicam a influência do processo de interpolação de forma geral, levando em conta todos os pontos interpolados.

O manual ainda acrescenta que (*Open Source Geospatial Foundation*, 2016),

“É importante notar que o método de interpolação IDW também possui algumas desvantagens: a qualidade da interpolação pode diminuir, se a distribuição de pontos amostrais é irregular. Além disso, os valores máximos e mínimos na superfície interpolada só pode ocorrer em pontos de dados de amostra.”.

A influência do parâmetro *power* na interpolação das superfícies da boca e do fundo foi analisada visualmente (Imagens 29 a 44) e também através dos valores tabelados extraídos das interpolações realizadas (Apêndices E e F) como detalhado a seguir.

#### 4.3.1.3 Análise das camadas boca e fundo

Foram realizados diversos testes para a análise do melhor parâmetro *power* para o método IDW. A análise foi feita através do cálculo da média aritmética e do desvio padrão dos erros encontrados:

- média aritmética: calculada com base nos valores interpolados pela validação cruzada (retirada de um ponto sondado por vez) e desvios (interpolação com todos os pontos sondados);
- desvio padrão: calculado com base nos valores interpolados pela validação cruzada (retirada de um ponto sondado por vez) e desvios (interpolação com todos os pontos sondados).

As Tabelas 1 e 2 indicam os erros encontrados na interpolação da boca e as Tabelas 3 e 4 indicam os erros encontrados na interpolação do fundo. As tabelas detalhadas encontram-se no Apêndice E (boca) e Apêndice F (fundo).

Tabela 1 - Média dos erros de interpolação (boca)

Testes	Parâmetros	Validação Cruzada (m)	Desvios (m)	Total (m)
1	0.2	0,23	0,19	0,42
2	2.0	0,28	0,00	0,28
3	3.0	0,26	0,00	0,26
4	6.0	0,30	0,00	0,30

Fonte: Próprio autor (2016)

Tabela 2 - Desvio padrão dos erros de interpolação (boca)

Testes	Parâmetros	Validação Cruzada (m)	Desvios (m)	Total (m)
1	0.2	0,16	0,15	0,30
2	2.0	0,22	0,00	0,22
3	3.0	0,21	0,00	0,21
4	6.0	0,25	0,00	0,25

Fonte: Próprio autor (2016)

Tabela 3 - Média dos erros de interpolação (fundo)

Testes	Parâmetros	Validação Cruzada (m)	Desvios (m)	Total (m)
1	0.25	9,04	9,06	18,10
2	0.5	9,07	9,05	18,12
3	1.0	9,10	9,03	18,13
4	2.0	9,16	9,03	18,19
5	4.0	9,12	9,03	18,15

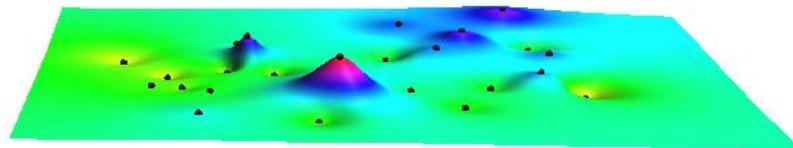
Fonte: Próprio autor (2016)

Tabela 4 - Desvio padrão dos erros de interpolação (fundo)

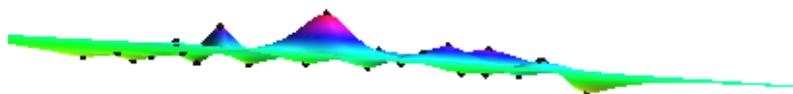
Testes	Parâmetros	Validação Cruzada (m)	Desvios (m)	Total (m)
1	0.25	0,28	0,48	0,76
2	0.5	0,29	1,16	1,45
3	1.0	0,39	1,59	1,98
4	2.0	0,92	1,59	2,51
5	4.0	1,31	1,59	2,90

Fonte: Próprio autor (2016)

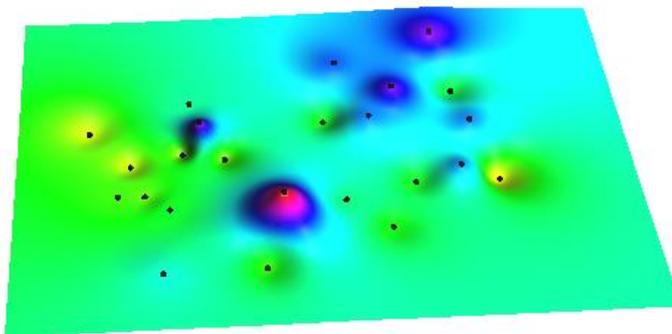
Para a interpolação da boca, foi feito um teste com o valor padrão (2.0), seguido de testes com valores acima e abaixo do padrão, para determinar o parâmetro com menor erro, tanto numérico quanto visual. As Imagens 30, 31 e 32 representam a interpolação com o *power* igual a 2.0.

Imagem 30 - Interpolação da boca com *power* = 2.0

Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 31 - Interpolação da boca com *power* = 2.0

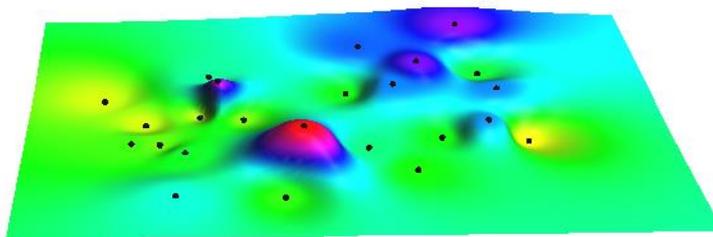
Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 32 - Interpolação da boca com  $power = 2.0$ 

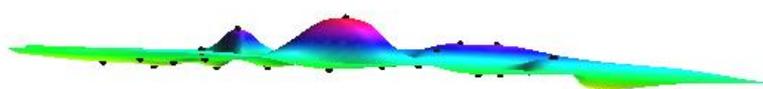
Fonte: Próprio autor (2016)

A partir das Imagens 30, 31 e 32 é possível verificar que os valores interpolados estão visualmente próximos dos valores das cotas originais, tanto as cotas com maior profundidade quanto as menores. Os dados obtidos pela tabela que consta no Apêndice E, também mostram a aproximação, sendo que os valores divergem entre 3 cm e 80 cm na validação cruzada e não há divergência de valores no desvio, totalizando em média 28 cm de erro entre a cota original e a interpolada, conforme a Tabela 1.

Após realizar a interpolação com o valor padrão, foi testado o  $power$  com valor 3.0. É possível visualizar, através das superfícies geradas, que os picos ficaram com maior área de influência, por exemplo, o pico em rosa visto nas Imagens 33 e 34.

Imagem 33 - Interpolação da boca com  $power = 3.0$ 

Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 34 - Interpolação da boca com  $power = 3.0$ 

Fonte: Próprio autor (2016)

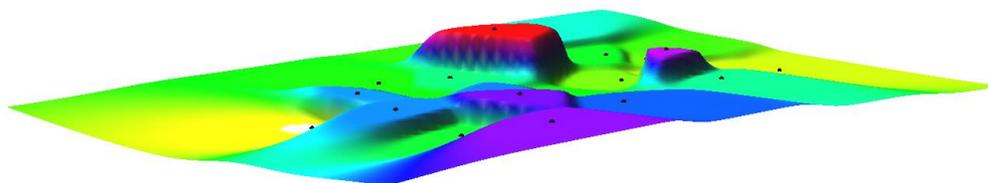
Se comparado com o valor padrão do método IDW, os erros da validação cruzada das cotas interpoladas são menores, estando na faixa entre 2 cm e 79 cm, não tendo divergência de valores no desvio, tendo em média 26 cm de erro entre a cota original e a

interpolada e 21 cm de desvio padrão, sendo os menores valores se comparados com os parâmetros testados para a boca, conforme a Tabela 1.

Com o parâmetro igual a 6.0, é possível verificar que os dados da validação cruzada variaram entre 3 cm e 81 cm de acordo com a tabela do Apêndice E, aumentando também a média dos erros da validação cruzada e o desvio padrão, quando comparado com os parâmetros cujo valores são 2.0 e 3.0.

Além disso, visualmente pode-se analisar que a superfície da boca ficou distorcida, já que para um determinado ponto de pico deveria haver apenas uma cota, o que não ocorre nos picos indicados em vermelho e roxo, conforme a Imagem 35.

Imagem 35 - Interpolação da boca com  $power = 6.0$



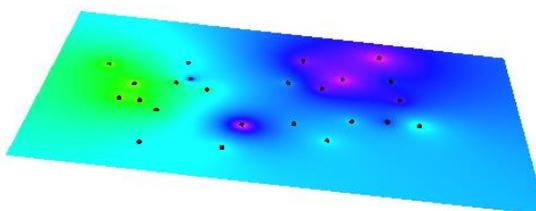
Fonte: Próprio autor (2016)

Após verificar que quanto maior o valor acima do padrão estipulado ( $power = 2.0$ ), maior é a dispersão da superfície da camada de solo, foi realizado o teste com o valor abaixo do padrão, para analisar a dispersão de valores quanto a validação cruzada e desvios.

Na interpolação com  $power$  igual a 0.2, a média e o desvio padrão da validação cruzada foram menores quando comparado com os valores testados acima do padrão, porém houve dispersão quanto aos desvios na camada de solo interpolada com todos os pontos, o que não ocorreu com os testes anteriores.

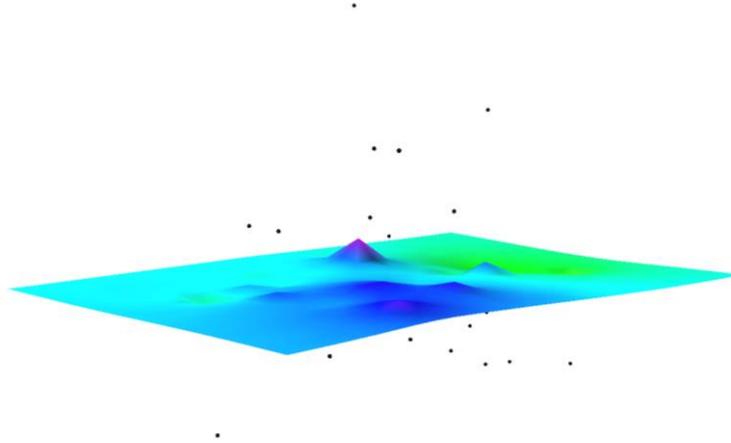
Além disso, é possível visualizar que as cotas originais ficaram distantes da camada interpolada de solo, havendo grande dispersão entre os dados originais e testados, conforme ilustra as Imagens 36 e 37.

Imagem 36 - Interpolação da boca com  $power = 0.20$



Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 37 - Interpolação da boca com  $power = 0.20$

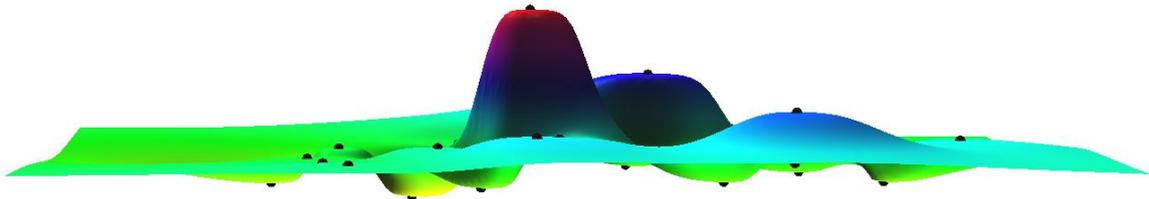


Fonte: Próprio autor (2016)

Para a interpolação das cotas do fundo, foram realizados cinco testes, sendo três abaixo do valor padrão e dois acima, conforme as Tabelas 3 e 4.

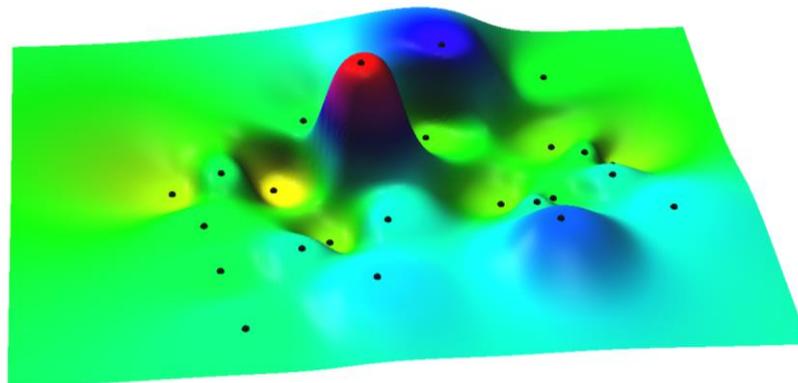
Baseando nas ilustrações que foram criadas a partir da interpolação com o parâmetro igual a 2.0, é possível verificar que os pontos originais coincidem com os pontos de máximo e mínimo na camada de solo, como é mostrado nas Imagens 38 e 39.

Imagem 38 - Interpolação do fundo com  $power = 2.0$



Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 39 - Interpolação do fundo com  $power = 2.0$

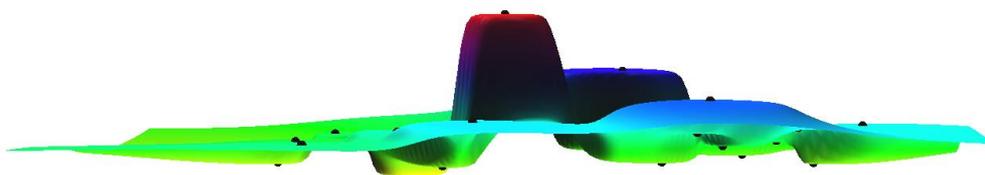


Fonte: Próprio autor (2016)

Entretanto, ao avaliar os dados obtidos após a interpolação (tabela do Apêndice F), verifica-se que as cotas variam entre 6,33 m e 10,84 m das cotas originais, sendo distâncias muito altas para serem consideradas como aproximadas ao solo existente.

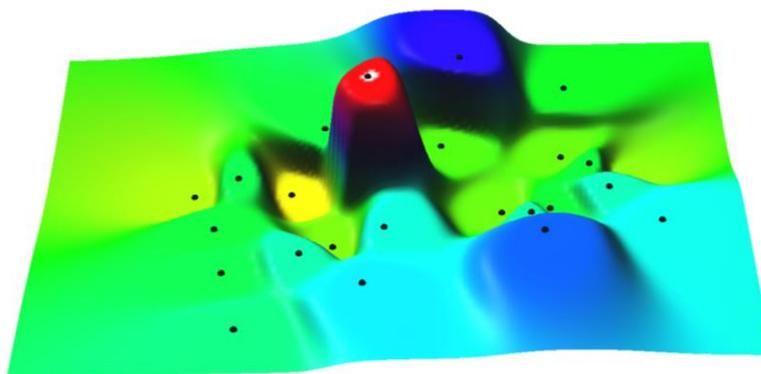
Ao aumentar o *power* para 4.0, é possível verificar visualmente que o ponto máximo e mínimo das cotas originais junto com a camada interpolada fica achatada, desta forma deixando a camada de solo em um único ponto de sondagem com várias cotas de profundidade iguais, como pode ser visto nas Imagens 40 e 41 com cor avermelhada ou rosa.

Imagem 40 - Interpolação do fundo com *power* = 4.0



Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 41 - Interpolação do fundo com *power* = 4.0



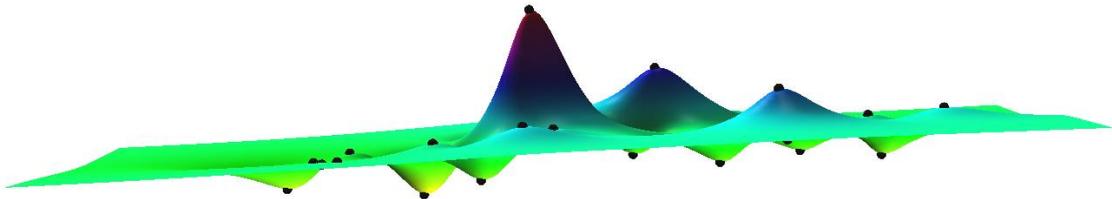
Fonte: Próprio autor (2016)

Além disso, como pode ser visto na tabela do Apêndice F, a faixa de valores que variou em relação a cota original e interpolada foi de 6,33 m e 11,0 m na validação cruzada e, 6,38 m e 11,08 m nos desvios.

Após a constatação de que quando há o aumento do parâmetro para o fundo, os pontos de máximo e mínimo ficam achatados e seus erros aumentam, foi feita a análise para o *power* igual a 1.0.

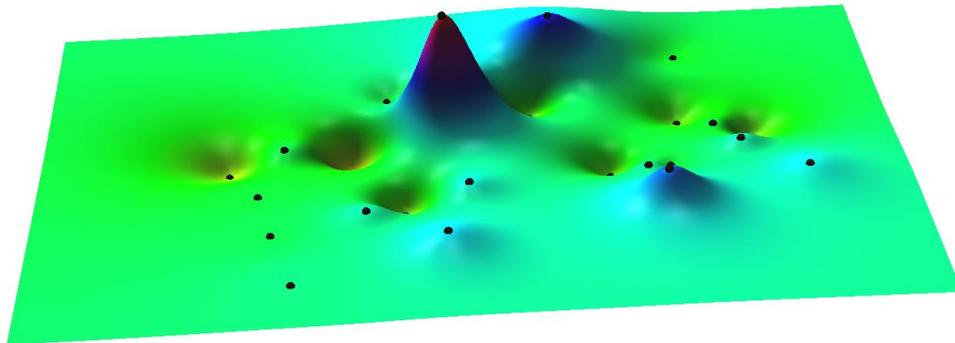
Com a diminuição do parâmetro, é possível verificar visualmente que os pontos das cotas originais coincidem com a camada interpolada, porém a superfície nos pontos de máximo e mínimo é muito acentuada, como pode ser visto nas Imagens 42 e 43.

Imagem 42 - Interpolação do fundo com  $power = 1.0$



Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 43 - Interpolação do Fundo com  $power = 1.0$

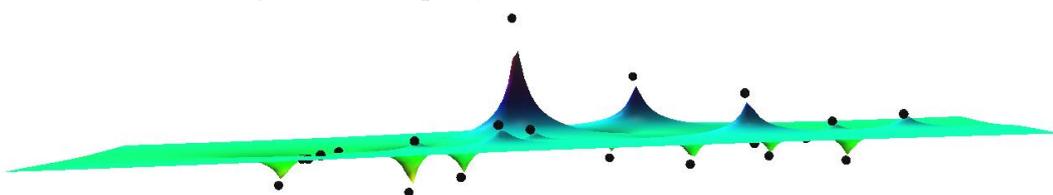


Fonte: Próprio autor (2016)

Já em comparação com os valores resultantes, as cotas variaram entre 8,73 m e 10,15 m na validação cruzada e de 3,67 m a 11,08 m no desvio, sendo considerado valores elevados para aproximação da camada de solo do fundo.

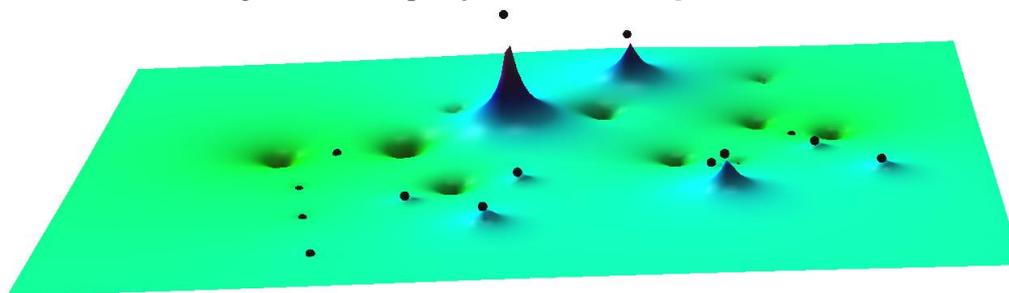
Como o teste com o parâmetro 1.0 não foi satisfatório, foi analisado um valor abaixo deste para verificar o comportamento da interpolação. As cotas em relação à validação cruzada variaram entre 8,71 m e 9,56 m, conforme tabela indicada no Apêndice F. Se comparado com os outros valores interpolados, a faixa que variou é menor que as demais, porém se analisado visualmente nota-se que as cotas originais e as cotas interpoladas junto a camada são muito distantes, ou seja, muito diferente da realidade do fundo, como mostra as Imagens 44 e 45.

Imagem 44 - Interpolação do fundo com  $power = 0.50$



Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 45 - Interpolação do fundo com  $power = 0.50$



Fonte: Próprio autor (2016)

Sendo assim, após os estudos abordados, concluiu-se que tanto para a boca quanto para o fundo o melhor valor de  $power$  é 2.0, pois ambos são próximos a realidade quanto a camada de solo original com a interpolação visualmente, mesmo contendo uma dispersão quanto aos valores obtidos por meio da validação cruzada e desvio.

Para o método RST analisado a seguir, decidiu-se realizar testes apenas para a superfície de fundo, por esta ser mais irregular do que a boca.

#### 4.3.2 Método RST - “Regularized Spline Tension”

Conforme citado no item 3.3.2, as interpolações feitas pelo método RST levam em conta dez variáveis (ou parâmetros). Para obter a representação mais próxima da superfície real do terreno estudado e do seu subsolo, foram elaborados testes de valores para duas delas, *tension* (tensão) e *smooth* (suavização).

Inicialmente, foi realizado um estudo teórico e visual para delimitar uma faixa de valores para o estudo de cada parâmetro. Em seguida, executaram-se testes com variações dos parâmetros dentro das faixas escolhidas, cujos resultados foram avaliados por meio dos métodos de validação cruzada e desvios gerados para cada ponto para superfície em 2D e 2.5D. No caso do sólido em 3D, empregou-se apenas o método visual.

##### 4.3.2.1 Delimitação dos parâmetros *tension* e *smooth* para interpolação de superfícies

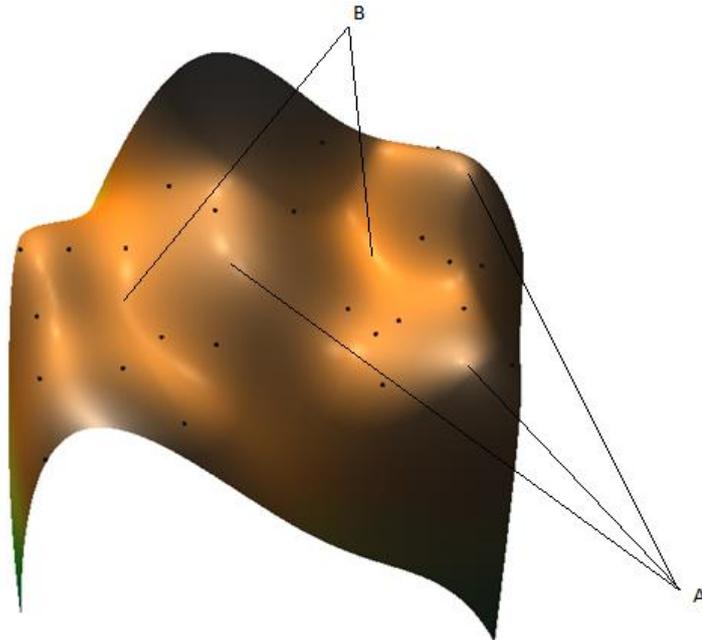
Os testes feitos para a determinação dos melhores valores para os parâmetros *tension* e *smooth* nas interpolações que geram as superfícies em 2.5D foram feitos para as cotas do impenetrável à ferramenta da percussão (fundo da sondagem).

Os valores testados para *tension* e *smooth* no fundo da sondagem variaram de 10 a 100 e de 0 a 1.0, respectivamente. *Tension* se limitou ao máximo de 100 porque, de acordo com o manual do GRASS, valores mais altos geram ondas artificiais ao longo dos

contornos da superfície estudada. Quanto a *smooth*, o manual do programa recomenda que não se utilize essa variável em valores maiores que 1,0, pois os pontos de referência ficariam dispersos em relação à superfície interpolada.

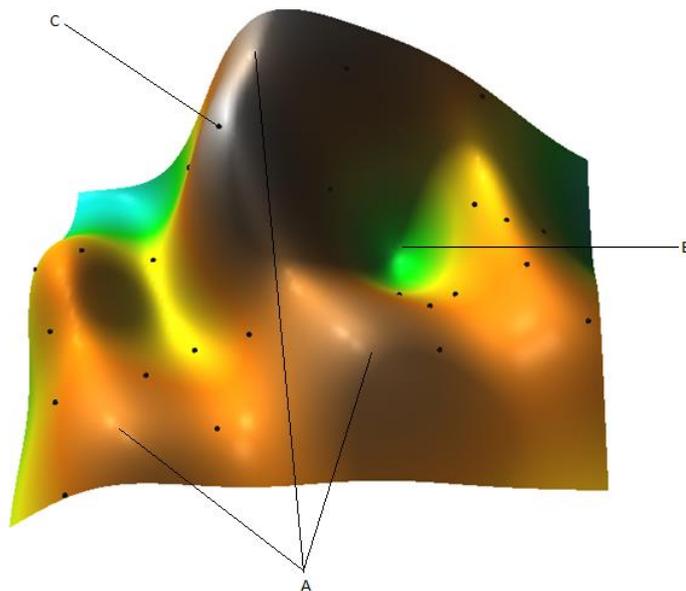
As Imagens 45 a 49 ilustram os resultados dos testes realizados para a delimitação do parâmetro *tension*, fixando o *smooth* em 0.

Imagem 46 - Superfície interpolada com *tension* = 10 e *smooth* = 0



Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 47 - Superfície interpolada com *tension* = 30 e *smooth* = 0



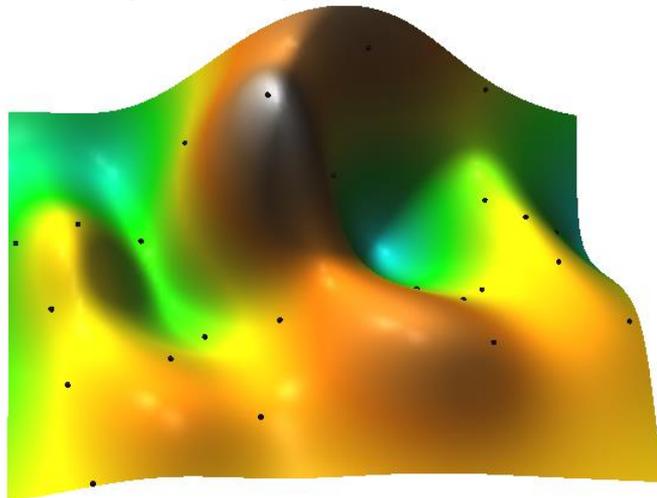
Fonte: Próprio autor (2016)

Nota-se nas Imagens 46 e 47 que tensões baixas geraram picos (ponto A) e várzeas (ponto B), mesmo sem haver pontos de sondagem próximos a essas regiões com essas cotas de fundo.

Já o ponto C, que representa a sondagem SP-04C (ID 8), é uma exceção no terreno porque provavelmente neste caso foi encontrado um matacão, que levou à paralisação da sondagem, cuja cota de fundo diverge das outras sondagens. Em função disto, portanto, a sondagem SP-04C (ID 8) não deveria estar influenciando os outros pontos do terreno.

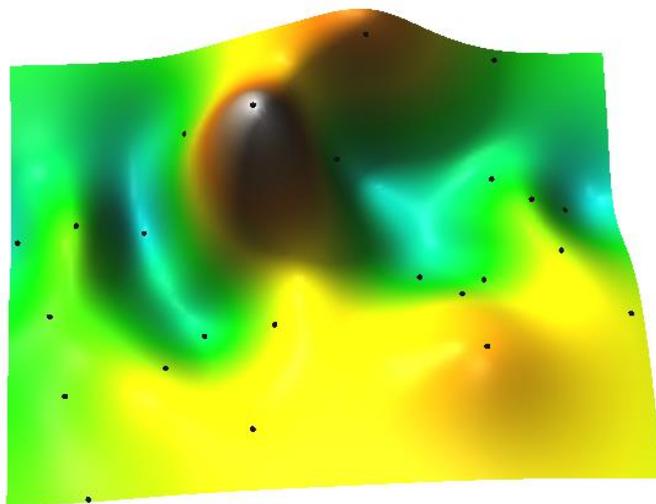
Deste modo, os parâmetros supracitados nas Imagens 46 e 47 se mostraram inadequados para representar as cotas de fundo das sondagens, ou seja, a delimitação do fundo do subsolo.

Imagem 48 - Superfície interpolada com  $tension = 40$  e  $smooth = 0$



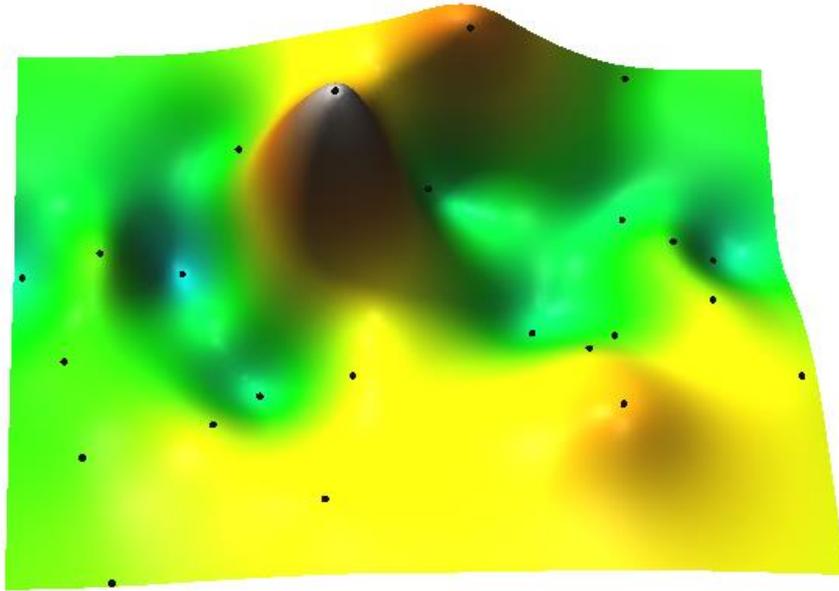
Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 49 - Superfície interpolada com  $tension = 70$  e  $smooth = 0$



Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 50 - Superfície interpolada com  $tension = 100$  e  $smooth = 0$

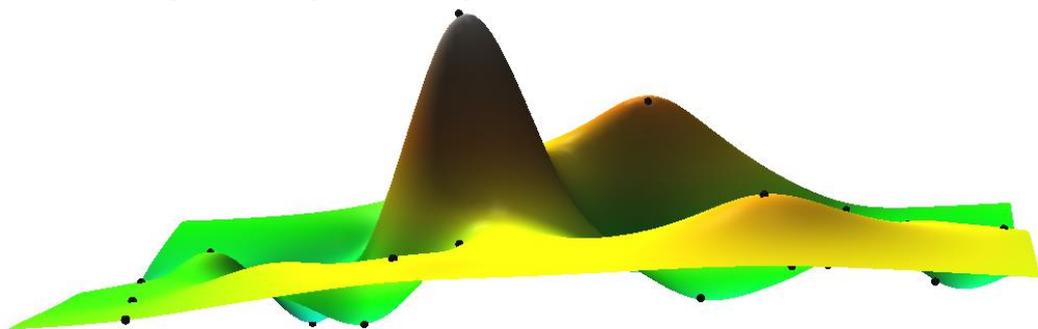


Fonte: Próprio autor (2016)

As Imagens 48 a 50 se mostraram coerentes quanto à representação da delimitação do fundo do subsolo, pois a interpolação gerou uma superfície com cotas condizentes entre os pontos de sondagem. Portanto, analisando as superfícies geradas e apresentadas nas Imagens 48 a 50, verifica-se que a faixa adequada para  $tension$  é de 40 a 100. A limitação deste parâmetro a partir de 40 se deve ao fato de que valores abaixo deste geram representações distantes da realidade do subsolo, como mostram as Imagens 46 e 47.

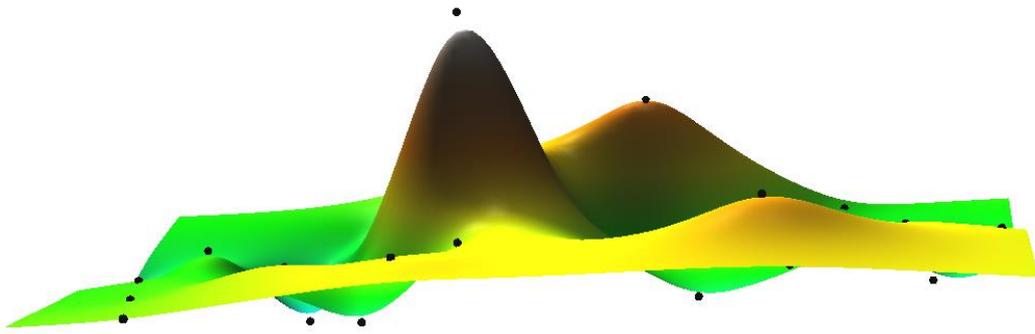
As Imagens 51 a 54 ilustram os resultados dos testes executados para a delimitação do parâmetro  $smooth$ , fixando o  $tension$  em 100.

Imagem 51 - Superfície interpolada com  $tension = 100$  e  $smooth = 0$



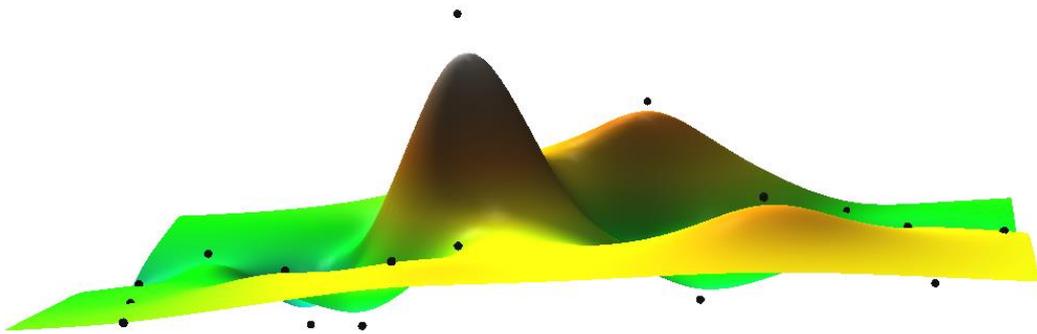
Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 52 - Superfície interpolada com  $tension = 100$  e  $smooth = 0,2$



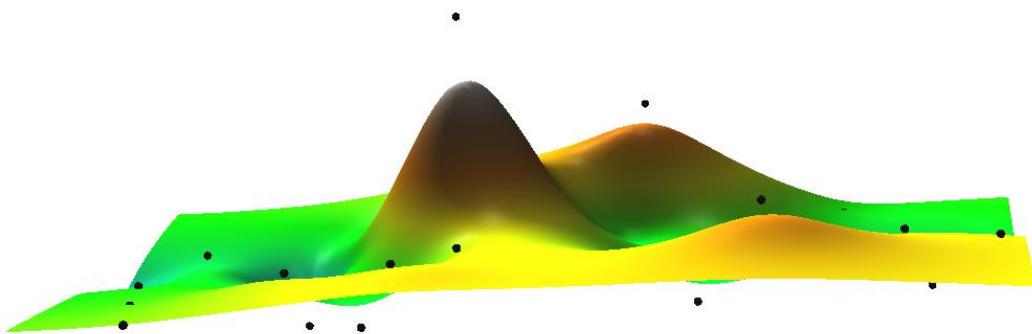
Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 53 - Superfície interpolada com  $tension = 100$  e  $smooth = 0,5$



Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 54 - Superfície interpolada com  $tension = 100$  e  $smooth = 1,0$



Fonte: Próprio autor (2016)

Analisando as distâncias dos pontos à superfície nos testes, observa-se que os valores apropriados para  $smooth$  vão de 0 a 0.2, como pode ser visto nas Imagens 51 e 52. O valor máximo para este parâmetro limitado a 0.2 se deve ao fato de que, quanto mais próximo de 1.0, mais distante da superfície o ponto será localizado, como se vê nas Imagens 53 e 54.

Conforme se verifica nas Imagens 46, 47, 53 e 54, há casos em que, por mais que ou  $tension$  ou  $smooth$  estejam dentro dos parâmetros adequados, se um ou outro estiver fora da delimitação ideal, obtêm-se como resultado superfícies interpoladas distantes da realidade do subsolo ou pontos distantes da superfície.

Conclui-se, portanto, que a faixa de parâmetros que melhor representa a superfície estudada é *tension* de 40 a 100 e *smooth* de 0 a 0.2.

#### 4.3.2.2 Validação Cruzada - *Cross-Validation* (fundo e boca das sondagens)

Para determinar os parâmetros de interpolação que geram a superfície mais próxima à realidade, este estudo empregou, por meio da cota de fundo, a validação cruzada e os desvios, apresentados, respectivamente, nos itens 3.4.2.1 e 3.4.3.

Foram realizados 21 testes utilizando a validação cruzada e os desvios (Apêndice G) com os parâmetros delimitados no item 4.3.2.1. As Tabelas 5 e 6 apresentam, respectivamente, um resumo das médias e desvios-padrão dos erros gerados pela validação cruzada e pelos desvios.

Tabela 5 - Resumo das médias - RST - Fundo

Testes	Tension	Smooth	Validação Cruzada (golpes/30cm)	Desvios (golpes/30cm)	Total (golpes/30cm)
1	40	0	1,82	0,00	1,82
2	50	0	1,66	0,00	1,66
3	60	0	1,57	0,00	1,57
4	70	0	1,52	0,00	1,52
5	80	0	1,48	0,00	1,48
6	90	0	1,45	0,00	1,45
7	100	0	1,42	0,00	1,42
8	40	0.1	1,69	0,31	2,00
9	50	0.1	1,59	0,20	1,79
10	60	0.1	1,53	0,14	1,67
11	70	0.1	1,49	0,10	1,59
12	80	0.1	1,46	0,08	1,54
13	90	0.1	1,43	0,07	1,50
14	100	0.1	1,41	0,06	1,47
15	40	0.2	1,58	0,38	1,97
16	50	0.2	1,54	0,29	1,83
17	60	0.2	1,50	0,23	1,73
18	70	0.2	1,46	0,18	1,64
19	80	0.2	1,42	0,15	1,57
20	90	0.2	1,41	0,13	1,54
21	100	0.2	1,39	0,11	1,50

Fonte: Próprio autor (2016)

Tabela 6 - Resumo dos desvios-padrão - RST - Fundo

Testes	Tension	Smooth	Validação Cruzada (golpes/30cm)	Desvios (golpes/30cm)	Total (golpes/30cm)
1	40	0	1,96	0,00	2,00
2	50	0	1,75	0,00	1,79
3	60	0	1,61	0,00	1,64
4	70	0	1,50	0,00	1,53
5	80	0	1,43	0,00	1,46
6	90	0	1,38	0,00	1,41
7	100	0	1,35	0,00	1,38
8	40	0.1	1,83	0,30	2,18
9	50	0.1	1,69	0,17	1,90
10	60	0.1	1,56	0,11	1,71
11	70	0.1	1,47	0,08	1,59
12	80	0.1	1,41	0,07	1,51
13	90	0.1	1,37	0,06	1,46
14	100	0.1	1,34	0,05	1,42
15	40	0.2	1,71	0,31	2,07
16	50	0.2	1,62	0,23	1,89
17	60	0.2	1,52	0,20	1,75
18	70	0.2	1,45	0,15	1,63
19	80	0.2	1,37	0,12	1,53
20	90	0.2	1,36	0,11	1,49
21	100	0.2	1,33	0,09	1,46

Fonte: Próprio autor (2016)

Os valores para *tension* e *smooth*, respectivamente em 100 e 0, destacados na Tabela 5, são os mais adequados para gerar a superfície de fundo. Isso se dá porque a média dos erros é menor que nos outros valores testados para os parâmetros.

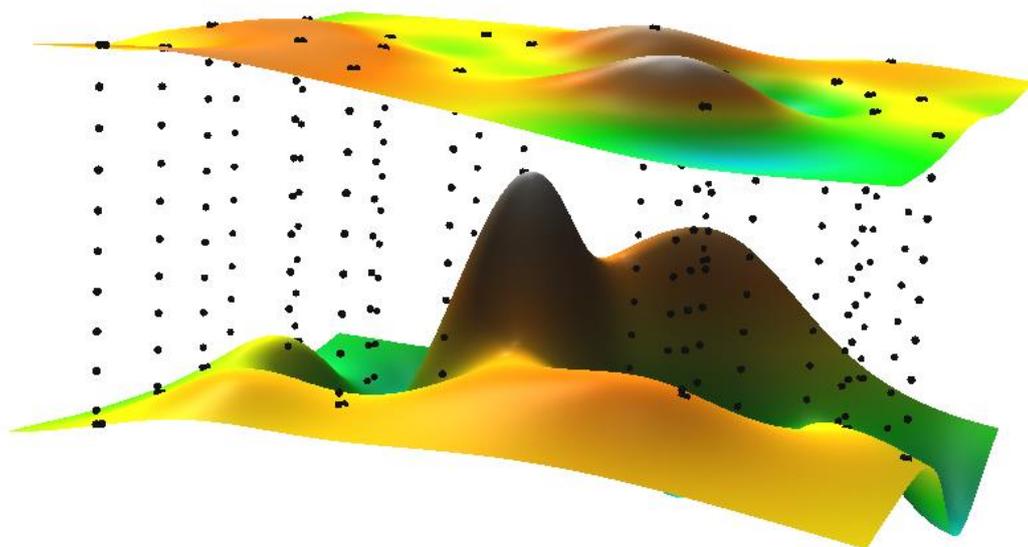
Além disso, se verificou que, para este conjunto de parâmetros, destacados na Tabela 6, o desvio-padrão dos valores, ou seja, a dispersão em relação à média, também é o menor.

Os parâmetros adequados para *tension* e *smooth* foram obtidos por meio da utilização da cota de fundo da sondagem. A escolha do fundo em detrimento da boca se deve ao fato de que o fundo apresenta mais variações e é, portanto, considerado mais crítico que a boca. Deste modo, pode-se atribuir à cota da boca, menos crítica, os mesmos parâmetros para interpolação: *tension* = 100 e *smooth* = 0.

#### 4.3.2.3 Considerações para a Interpolação Volumétrica

Determinados os parâmetros adequados para a boca e o fundo, este estudo importou para o GRASS os valores de resistência à penetração metro a metro de cada sondagem, representadas pelos pontos pretos mostrados na Imagem 55.

Imagem 55 - Pontos de  $N_{SPT}$  importados metro a metro de cada sondagem



Fonte: Próprio autor (2016)

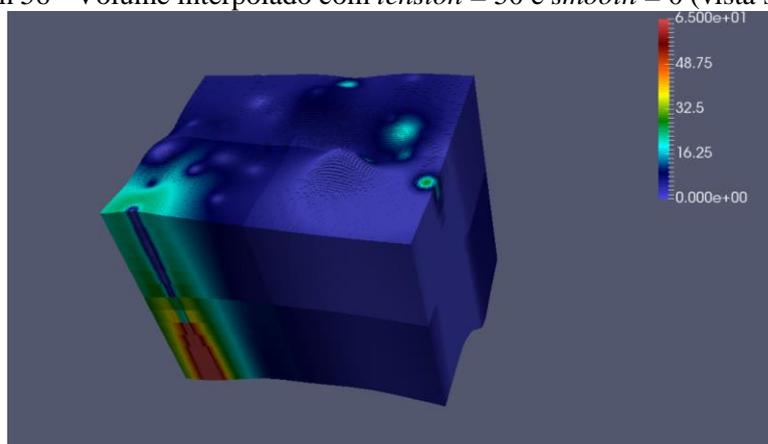
Para que a interpolação volumétrica dos valores de  $N_{SPT}$ , pelo método RST, fosse realizada, foram feitas quatro considerações:

- no primeiro metro das sondagens, não são medidos os valores de resistência à penetração. No entanto, à medida que para efeito de interpolação se faz necessário um valor, repetiu-se o primeiro valor de resistência à penetração encontrado;
- na cota do impenetrável à percussão das sondagens, não são medidos os valores de resistência à penetração. No entanto, à medida que para efeito de interpolação se faz necessário um valor, repetiu-se o último valor de resistência à penetração encontrado;
- para padronizar os valores de resistência à penetração importados no GRASS, utilizou-se como referência o número de batidas a cada 30 cm cravados no solo. Deste modo, embora a resistência obtida tenha sido de 10 golpes/15 cm, calculou-se proporcionalmente 20 golpes/30 cm;

- para melhor visualização no ParaView, considerou-se como valor máximo de resistência à penetração 65 golpes/30 cm, mesmo quando os valores eram maiores que esse. Isso não afeta os resultados em termos práticos, pois com esse valor de resistência o solo ou rocha encontrados são considerados impenetráveis.

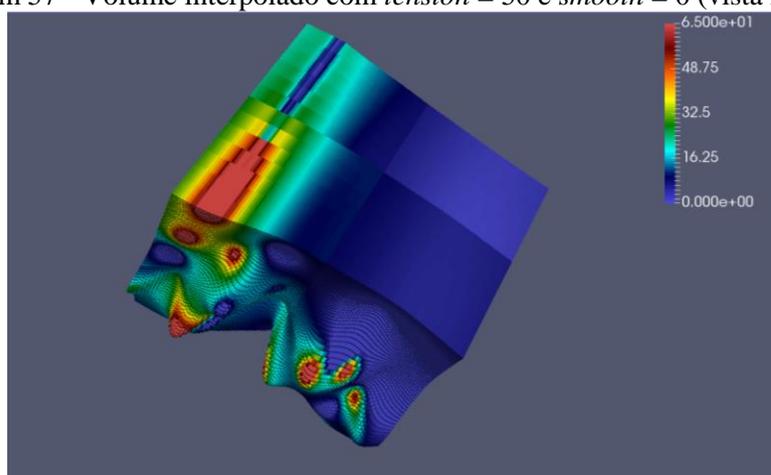
Após a interpolação volumétrica feita no GRASS, exportaram-se os dados obtidos ao ParaView e, assim, foi possível visualizar a resistência do subsolo como um sólido 3D, como mostram as Imagens 56 e 57.

Imagem 56 - Volume interpolado com *tension* = 50 e *smooth* = 0 (vista superior)



Fonte: Próprio autor (2016)

Imagem 57 - Volume interpolado com *tension* = 50 e *smooth* = 0 (vista inferior)



Fonte: Próprio autor (2016)

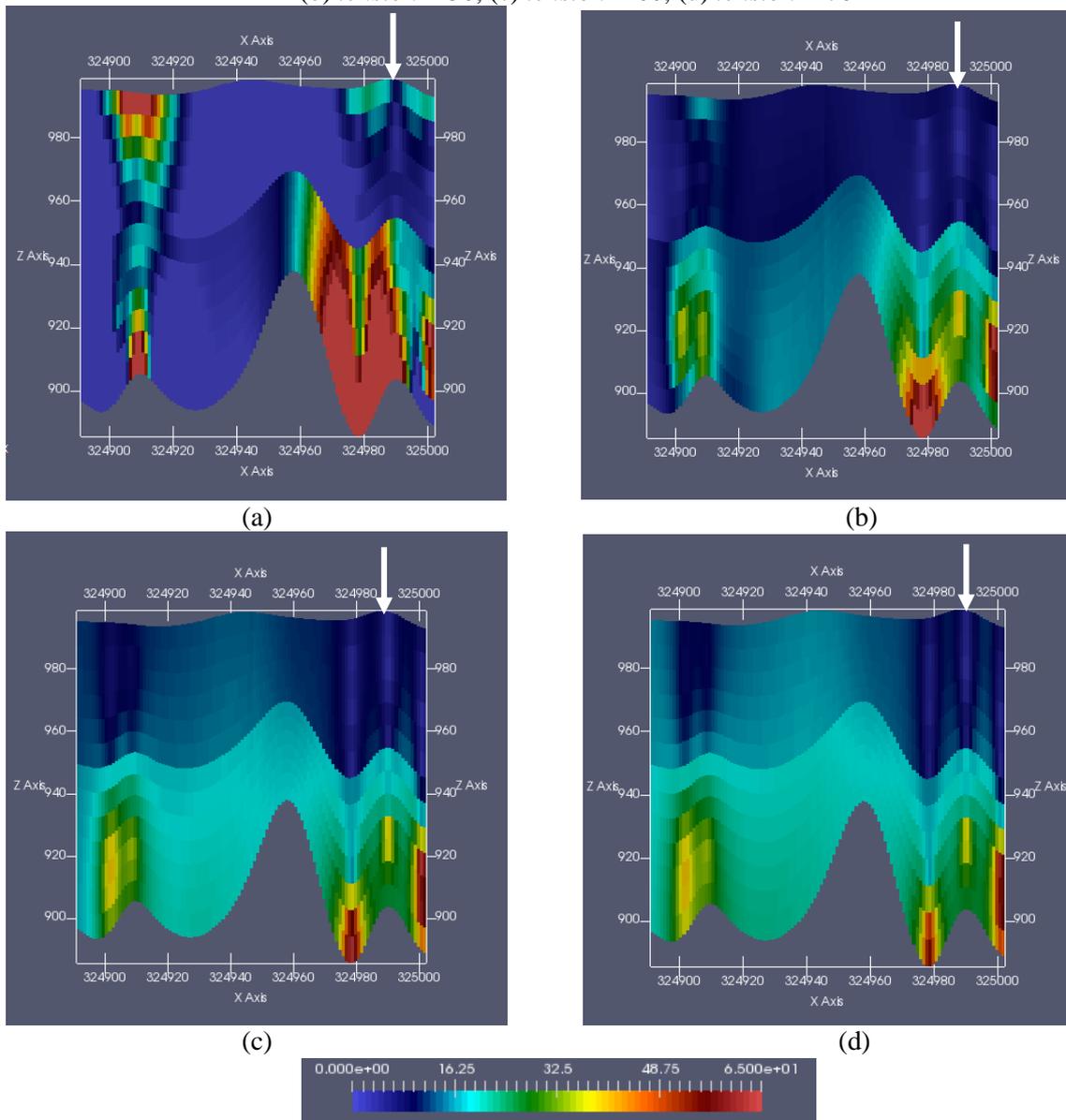
#### 4.3.2.4 Delimitação dos parâmetros *tension* e *smooth* para a interpolação volumétrica

Para verificar os parâmetros *tension* e *smooth* adequados à interpolação volumétrica dos valores de resistência à penetração, que considera todos os pontos de sondagem, foram feitos testes visuais analisando a sondagem SP-02.

Para a realização dos testes visuais, este estudo fixou o valor do *smooth* em 0 pois, como mostra o item 4.3.2.1, quando se mantém o parâmetro *smooth* neste valor, os pontos recaem sobre a superfície.

Em relação ao parâmetro *tension*, os testes, expressos na Imagem 58, começaram com o valor 40, já que este é o valor padrão fornecido pelo programa. Logo depois, testou-se o valor 50 para *tension*, que aperfeiçoou o resultado. Diante disso, ao invés de diminuir *tension* a valores inferiores a 50 ou 40, este estudo elevou o parâmetro a 60, que se manteve adequado, e depois a 70, valor que mostrou resultado insatisfatório.

Imagem 58 - Fatias (*slice*) para delimitar o parâmetro da interpoção volumétrica (a) *tension* = 40, (b) *tension* = 50, (c) *tension* = 60, (d) *tension* = 70



Fonte: Próprio autor (2016)

Tabela 7 - N<sub>SPT</sub> real - SP-02

ID	Sondagem	Coordenadas UTM		Cota	N <sub>SPT</sub> (golpes/30cm)
		x	y		Real
				99,86	2
				98,86	2
				97,86	0
				96,86	3
				95,86	4
2	SP - 02	324989,59	7398799,916	94,86	3
				93,86	22
				92,86	15
				91,86	23
				90,86	44
				90,39	44

Fonte: Próprio autor (2016)

Comparando os valores reais de resistência à penetração, apresentados na Tabela 7, com os resultados dos valores interpolados no local da sondagem SP-02 (indicada por uma seta na Imagem 58 (a), (b), (c) e (d)), nota-se que os resultados encontrados estão próximos aos valores reais em todos parâmetros testados. Isso significa, portanto, que o método de interpolação é válido no local onde se tem o ponto de sondagem.

Uma análise visual referente à Imagem 58 (a), com *tension* = 40, mostra que os valores interpolados entre as cotas 100 m e 95 m são praticamente 0 golpes/30 cm, proporção que não condiz com as sondagens existentes do terreno, as quais, até a cota 95 m, têm os valores de N<sub>SPT</sub> variando entre 0 e 5 golpes/30 cm.

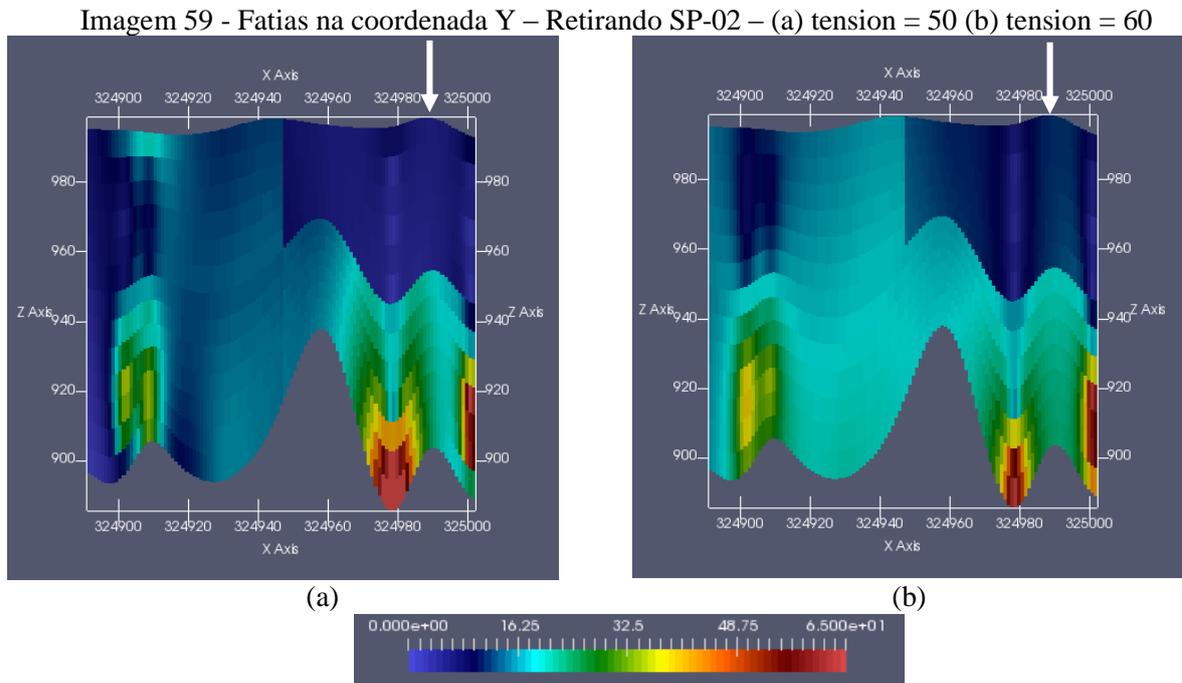
Já a análise da imagem 58 (b), com *tension* = 70, apresenta, no lado direito da sondagem, entre as cotas 100 m e 95 m, valores maiores que 15 golpes/30cm, que não fazem parte da realidade do subsolo deste terreno, conforme supracitado.

A faixa de valores para *tension* a ser estudada, portanto, está entre 50 e 60, Imagens 58 (b) e 58 (c), respectivamente. Estes números são os mais adequados aos parâmetros porque se aproximam da realidade do subsolo do terreno sondado. Entre as cotas 100 m e 95m, obtêm-se valores de N<sub>SPT</sub> entre 0 e 15 golpes/30 cm. Já da cota 95 m à 90 m, são apresentados valores entre 15 e 35 golpes/30 cm.

#### 4.3.2.5 Escolha do parâmetro *tension* e validação do modelo tridimensional

Executando a interpolação no GRASS a partir da exclusão da sondagem SP-02, o presente estudo comparou visualmente os valores de resistência à penetração interpolados

aos valores reais da sondagem, conforme as Imagens 59 (a), (b) e a Tabela 8. O presente estudo procedeu com testes visuais, em detrimento da validação cruzada automática, porque a validação cruzada para volumes exclui apenas um ponto de resistência à penetração por vez, e não a sondagem como um todo, o que não é interessante ao estudo.



Fonte: Próprio autor (2016)

Tabela 8 - Comparativo  $N_{SPT}$  real x  $N_{SPT}$  interpolado - SP-02

ID	Sondagem	Coordenadas UTM		Cota	$N_{SPT}$ (golpes/30cm)				
		x	y		Real	Interpolado <i>tension</i> = 50	Interpolado <i>tension</i> = 60		
2	SP - 02	324989,59	7398799,916	99,86	2	Varia de 0 a 5	Varia de 10 a 15		
				98,86	2				
				97,86	0				
				96,86	3				
				95,86	4				
				94,86	3				
				93,86	22				
				92,86	15				
				91,86	23			Varia de 15 a 30	Varia de 20 a 30
				90,86	44				
				90,39	44				

Fonte: Próprio autor (2016)

A Imagem 59 (a) representa uma fatia (*slice*) do sólido com *tension* = 50 e *smooth* = 0, já a Imagem 59 (b) tem *tension* = 60 e *smooth* = 0. Ambas foram feitas na coordenada Y que permite enxergar o local da sondagem SP-02, ora excluída da interpolação.

A Tabela 8 mostra a comparação entre os valores de  $N_{SPT}$  reais e interpolados quando se exclui o ponto de sondagem SP-02.

Em relação à imagem 59 (a), quando excluída a sondagem SP-02, a faixa de valores interpolados de  $N_{SPT}$  entre as cotas de 100 m a 95 m varia, aproximadamente, de 0 a 5 golpes/30 cm, enquanto a da cota de 95 m a 90 m varia de 15 a 30 golpes/30 cm. No último metro da sondagem, no entanto, há uma discordância entre o valor interpolado, que atingiu no máximo 30 golpes/30 cm, e o valor real, de 44 golpes/30 cm.

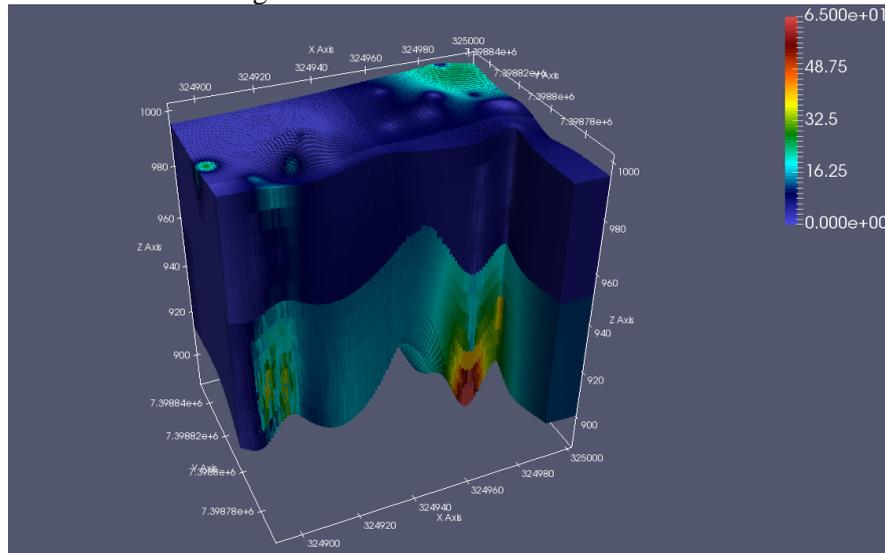
Já em relação à imagem 59 (b), a faixa de valores interpolados de  $N_{SPT}$  entre as cotas de 100 m e 95 m varia de 10 a 15 golpes/30 cm, ao passo que os valores nas cotas de 95 m a 90 m variam de 20 golpes/30 cm a 30 golpes/30 cm. No último metro da sondagem, contudo, também se observa uma discrepância entre o valor interpolado de, no máximo, até 30 golpes/30 cm, e o valor real, de 44 golpes/30 cm.

Analisando estes resultados, que são os que mais se aproximam da realidade do subsolo do terreno estudado, chega-se à conclusão de que o melhor parâmetro para a interpolação volumétrica é *tension* = 50 e *smooth* = 0.

Por não ter sido possível ao presente estudo proceder com a validação cruzada automática, e à medida que também não se excluiu cada um dos pontos de sondagem manualmente, pode-se considerar este um modelo tridimensional aproximado do subsolo. Não se recomenda neste modelo, portanto, a diminuição do número de sondagens do terreno ao mínimo previsto em norma. Os resultados mais próximos da realidade para este modelo tridimensional são obtidos com todas as sondagens.

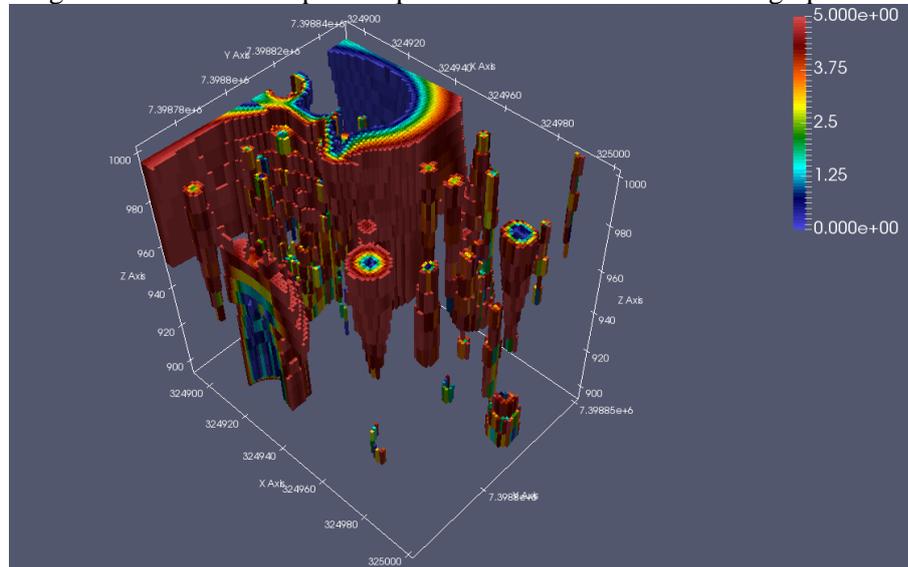
O *software* ParaView apresenta diversos recursos que podem auxiliar na análise do sólido gerado. É possível, por exemplo, a apresentação do sólido em cortes (*clips*), como mostra a Imagem 60, a qual representa dois cortes, um feito na coordenada X e outro na coordenada Y apresentados simultaneamente.

Imagem 60 - Cortes na coordenada X e Y



Fonte: Próprio autor (2016)

Outra ferramenta disponível no ParaView é o *threshold*, a qual permite visualizar o subsolo por faixa de valores de resistência à penetração, como mostra a Imagem 61.

Imagem 61 - *Threshold* aplicado para a faixa de valores de 0 a 5 golpes/30 cm

Fonte: Próprio autor (2016)

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O aplicativo QGIS, utilizado para georreferenciamento do terreno objeto deste estudo, apresentou resultados satisfatórios nos valores obtidos para as coordenadas (X;Y), bem como na geração do mapa georreferenciado, com a respectivas identificações dos pontos sondagem.

O Sistema de Informações Geográficas GRASS apresentou facilidade na importação e utilização dos dados, coordenadas (X;Y) e valores de NSPT, obtidas no QGIS. O GRASS possui mais métodos de interpolação em relação ao QGIS, entre os quais se destaca o RST, que neste software é o único que possibilita a interpolação volumétrica.

Apesar dos recursos disponíveis no GRASS, o software não permite a visualização do subsolo em 3D, realizada neste estudo por meio do ParaView, que importa dados interpolados do GRASS e apresenta o sólido como um todo, além das opções *clips* (cortes), *slices* (fatias) e *thresholds*.

Abordando especificamente o tópico interpolação, o método IDW, feito para as interpolações em 2.5D no GRASS, é influenciado por um único parâmetro, a potência (*power*). Verificou-se no presente estudo que, quanto maior o peso, maior é a influência dos pontos em relação à superfície, conclusão verificada sobretudo nos picos da superfície do fundo da sondagem. Se usados valores de parâmetro muito baixos, contudo, os pontos ficam dispersos em relação à superfície gerada.

Para a escolha do peso adequado, foram utilizadas análises visuais, método de validação cruzada e desvios feitos manualmente, por meio dos quais se obteve como resultado o parâmetro 2,0, valor padrão do programa.

O outro método de interpolação estudado, tanto para gerar superfícies em 2.5D quanto para proceder com a interpolação volumétrica, foi o RST no GRASS. Os parâmetros analisados neste estudo foram *tension* e *smooth*, pois são os de maior influência na geração da superfície.

A influência de *tension* na interpolação da superfície em 2.5D se observa à medida que, quanto mais se diminui o valor deste parâmetro, mais irregular a superfície se torna. Por outro lado, se usado um valor de *tension* muito alto, a superfície se apresenta plana.

Já o parâmetro *smooth*, quanto mais próximo de 0, torna mais próximos à superfície os pontos interpolados; quanto mais próximos de 1 os valores de *smooth*, mais distantes os pontos se localizam.

Para a escolha do conjunto de *tension* e *smooth* que representasse a superfície em 2.5D (boca e fundo da sondagem) adequada, este estudo utilizou análises visuais,

validação cruzada e desvios, disponíveis no método RST, por meio dos quais se chegou aos valores  $tension = 100$  e  $smooth = 0$ .

Comparando-se os resultados dos dois métodos de interpolação estudados, o método RST se mostrou mais eficaz e coerente com a realidade da superfície de boca e fundo da sondagem que o método IDW, pois, além de apresentar uma superfície mais uniforme visualmente, os erros são substancialmente menores.

As imagens 3D facilitam de sobre maneira a análise do subsolo dada sua característica espacial, sobretudo na comparação ou validação dos parâmetros testados

Uma das dificuldades consideráveis a este estudo foi a falta de softwares gratuitos com suporte para a interpolação volumétrica. O GRASS é um dos únicos disponíveis e apresentou duas limitações: a primeira é que somente o método RST tem capacidade de realizar as interpolações volumétricas, e por isso foi utilizado este no presente estudo; a outra é que este *software* não permite a visualização do sólido tridimensional, finalidade para a qual se empregou o *software* ParaView.

A influência de  $tension$  na interpolação volumétrica, observada por meio de testes visuais, deu-se à medida que, quando usado o valor padrão fornecido pelo programa, 40, os valores de baixa resistência, aproximadamente 0 golpes/30 cm, expandiram-se tanto na porção superior quanto inferior da fatia estudada.

Além disso, conforme se aumenta o valor de  $tension$  na faixa entre 50 e 60, delineia-se de maneira coerente com a realidade das sondagens do terreno estudado a linha divisória entre os solos mais frágeis e os solos mais resistentes. Quando utilizado o valor de 70, no entanto, os valores de resistência à penetração acima de 15 golpes/30 cm se expandem para a parte superior da fatia estudada, o que não condiz com a realidade do terreno. Para a definição exata do parâmetro  $tension$ , foram feitos testes excluindo uma sondagem, nos quais o resultado mais adequado encontrado foi  $tension = 50$ .

Em relação ao parâmetro  $smooth$ , este foi adotado igual a 0, pois os testes feitos em 2,5D mostraram que, com este valor, os pontos recaem exatamente sobre a superfície interpolada, culminando na representação mais adequada do subsolo.

Os testes executados em 3D no *software* ParaView demonstraram que o modelo do subsolo gerado é um modelo aproximado. Isso se deve ao fato de que o presente estudo procedeu com testes visuais ao invés da validação cruzada automática, já que a validação cruzada para interpolações volumétricas exclui somente um ponto de resistência à penetração por vez, e não a sondagem em sua totalidade. A execução de uma validação

cruzada feita de forma manual mostrou-se inviável devido à quantidade de pontos de interpolação em 3D.

Levando em conta que o subsolo do terreno não é uniforme em seu todo, este estudo não recomenda, neste modelo aproximado, a diminuição do número de sondagens do terreno ao mínimo previsto em norma.

## 6 CONCLUSÃO

O trabalho foi iniciado com o estudo dos conceitos básicos de Geoprocessamento, Sistemas de Informações Geográficas e visualizadores 3D. Este estudo permitiu a seleção dos softwares QGIS e GRASS para a geração do modelo computacional e o ParaView para visualizar os resultados.

O passo seguinte foi a organização dos dados de sondagem para a geração do modelo 3D. O software QGIS foi escolhido para esta etapa pela sua facilidade de uso. Foi criada no QGIS uma camada vetorial com a localização dos pontos de sondagem e, em sua tabela de atributos, foram inseridas as informações referentes à cada furo de sondagem (profundidades e valores de  $N_{SPT}$ ).

Posteriormente, os dados organizados no QGIS foram importados para o GRASS para que fossem feitas as interpolações das superfícies da boca e do fundo das sondagens através dos métodos IDW e RST em 2D e 2.5D. As interpolações volumétricas, por sua vez, foram executadas somente por meio do método RST, devido a uma limitação do *software*. Por fim, visualizou-se através do ParaView o modelo computacional em três dimensões.

Foram testados dois métodos de interpolação, o IDW e o RST, para a criação de superfícies. Concluiu-se, assim, que, para esta finalidade, se comparado ao método IDW, o método RST se mostrou mais eficaz e coerente com a realidade da superfície da boca e do fundo das sondagens.

Para a criação do modelo tridimensional, este estudo utilizou o método RST para a interpolação volumétrica. A visualização em 3D, conforme supracitado, foi possível por meio do *software* ParaView.

Verificou-se que o modelo computacional tridimensional obtido é aproximado. Isso se deve ao caráter do método de validação empregado por este estudo ter sido visual e à não uniformidade do solo em relação aos valores de resistência à penetração. Portanto, a diminuição do número mínimo de sondagens do terreno ao mínimo previsto em norma não é recomendada.

Conclui-se, entretanto, que é possível gerar um modelo tridimensional do subsolo utilizando os valores de resistência à penetração. Ainda se pode aperfeiçoar o modelo em 3D através da análise de outros parâmetros existentes no método RST, ou outros métodos de interpolação volumétrica, ou *softwares* mais específicos, o que já sugere temas para futuros trabalhos.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução-RE nº 899, de 29 de maio de 2003**: Diário Oficial da União. 2003. Diretoria Colegiada da Agência Nacional de Vigilância Sanitária, Agência Nacional de Vigilância Sanitário, Brasília, 2003. Disponível em:  
<[http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/4983b0004745975da005f43fbc4c6735/RE\\_899\\_2003\\_Determina+a+publicação+do+Guia+para+validação+de+métodos+analíticos+e+bioanalíticos.pdf?MOD=AJPERES](http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/4983b0004745975da005f43fbc4c6735/RE_899_2003_Determina+a+publicação+do+Guia+para+validação+de+métodos+analíticos+e+bioanalíticos.pdf?MOD=AJPERES)>. Acesso em: 14 out. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR **6484**: solo - sondagens de simples reconhecimento com SPT - método de ensaio. Rio de Janeiro 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR **8036**: programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios. Rio de Janeiro, 1983.
- BALDISSEROTTO, Carolina. **Técnicas de aprendizagem de máquina para previsão de sucesso em implantes dentários**. 2005. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Computação, Departamento de Sistemas Computacionais, Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, 2005. Cap. 2. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/10973496-Tecnicas-de-aprendizagem-de-maquina-para-previsao-de-sucesso-em-implantes-dentarios.html>>. Acesso em: 24 set. 2015.
- BERBERIAN, Dickran. **O chão exige muito cuidado**. 2011. Escrito por Daniel Guerra. Disponível em: <[http://www.cristianepoleto.com.br/mostra\\_noticias.php?id=200](http://www.cristianepoleto.com.br/mostra_noticias.php?id=200)>. Acesso em: 12 abr. 2015.
- BITAR, Omar Yazbek; IYOMASA, Wilson Shoji; CABRAL, Marsis. **Geotecnologia Tendências e Desafios**, São Paulo. Revista São Paulo em Perspectiva, São Paulo, SP, v. 14, n. 3, julho/setembro 2000. Disponível em [www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-88392000000300013](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-88392000000300013). Acesso em: 11/10/2014.
- CANELLO, Vivian Athaydes. **Estudo Baseado na Interpolação 3D dos Valores de RQD: Barragem de Itaipu**. 2011. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em:  
<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-25042012-112855/pt-br.php>>. Acesso em: 27 mar. 2016.
- CINTRA, José Carlos A. **Problemas em Fundações e SPT**. 2013. Disponível em:  
<<https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/ofitexto.arquivos/Degustacao-FUNDACOES.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2015.

CONSTANCIO, Lucas Amarante. **2011 e o SPT**

Americana: HELIX, 2011, p.3. Disponível em: <<http://www.helix.eng.br/downloads/artigo-lucas.pdf>>. Acesso em 11/10/2014.

CREPANI, Edison; DUARTE, Valdete; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; FIDALGO, Elaine Cristina Cardoso. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento no mapeamento regional da cobertura e uso atual da terra. Geografia**, Rio Claro, v. 27, n. 1, p.119-135, abr. 2002. Mensal.

D'ALGE, Júlio César Lima. **Cartografia para Geoprocessamento**. 2001. Disponível em: <[http://www.georeferencial.com.br/old/material\\_didatico/cap6-cartografia-e-geoprocessamento-INPE.pdf](http://www.georeferencial.com.br/old/material_didatico/cap6-cartografia-e-geoprocessamento-INPE.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2016.

DUARTE, Felipe Teixeira; PEIXOTO, Rodrigo dos Santos. **Estudo da Influência dos Processos Sedimentológicos do Canal do Mangue no Porto do Rio de Janeiro com Auxílio da Modelagem Computacional**. 2012. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005786.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2015.

ESRI. **An overview of map projections**. 2009. Esri, Arcgis Desktop, 2009. Disponível em: <[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=An\\_overview\\_of\\_map\\_projections](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=An_overview_of_map_projections)>. Acesso em: 7 fev. 2016.

EVEN CONSTRUTORA E INCORPORADORA S/A. **Planta de locação de sondagens - Projetos Bosques da Lapa e Parques da Lapa**. São Paulo: Peacock Even Empreendimentos Imobiliários, 2012a.

EVEN CONSTRUTORA E INCORPORADORA S/A. **Perfis individuais de sondagens à percussão - Projetos Bosques da Lapa e Parques da Lapa**. São Paulo: Peacock Even Empreendimentos Imobiliários, 2012b.

FELGUEIRAS, C.A.; CÂMARA, G. Modelagem Numérica de Terreno. In: CÂMARA, G.; DAVIS JR, C.A.; MONTEIRO, A.M.V. (org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. Cap. 7**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2014

FIGUEIREDO, Marlon. **Investigação do Subsolo**. 2013. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAG2sAF/aula-4-solos-fundacoes#>>. Acesso em: 02 fev. 2016.

FIRKOWSKI, Henrique. **Generalização cartográfica de grades retangulares regulares baseada na teoria matemática da comunicação**. 2002. 171 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Geodésicas, Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002. Disponível em: <<http://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/34998>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

FONTELES, Helano Regis da Nóbrega. **Caracterização Geotécnica do Subsolo da Porção Nordeste do Município de Fortaleza (CE) com Base em Geoestatística**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2003.

FRANCISCO, W.C. **Projeções Cartográficas**. Disponível em: <<http://www.mundoeducacao.com/geografia/projecoes-cartograficas.htm>>. Acesso em: 08 dez. 2014.

GANDOLFO, Otávio Coaracy Brasil. **Ensaio geofísicos**. 2012, IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Disponível em: <[http://www.ipt.br/ipt\\_na\\_midia/313-ensaios\\_geofisicos.htm](http://www.ipt.br/ipt_na_midia/313-ensaios_geofisicos.htm)>. Acesso em: 25 jul. 2015.

GUERRA, Daniel. O chão exige muito cuidado. **Jornal da Comunidade**. Brasília. 23 jul. 2011. Disponível em: <<http://comunidade.maiscomunidade.com/conteudo/2011-07-23/imoveis/6183/O-CH%C3%83%C6%92O-EXIGE-MUITO-CUIDADO.pnhtml>>. Acesso em: 24 out. 2014.

LEITE, Eugênio Pacelli Fernandes, CAMPOS Juliana Cláudia Bezerra. **Interpolação para volumes de atributos da água utilizando o algoritmo *spline* regularizada com tensão**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0009.pdf>>. Acesso em: 5 fev. 2016.

LOPES, E. S. S. **Tutorial 10 aulas Spring 5.1. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/manuais.html>>. Acesso em: 10 jul. 2013.

MADEIRA, Daniel. **O Sistema de Coordenadas UTM. Sorocaba, 2013**. Disponível em: <<http://dan-scientia.blogspot.com.br/2013/04/o-sistema-de-coordenadas-utm.html>>. Acesso em: 08 dez. 2014.

OLIVEIRA, Willian Abreu de. **A Superfície Física da Terra, 2015**. Portal Agrimensura. Disponível em: <<http://empresa.portalagrimensura.com/artigo/20/a-superficie-fisica-da-terra>>. Acesso em: 23 dez. 2015.

OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION. **Análise Espacial (Interpolação)**: Ponderação pelo Inverso a Distância (IDW). 2016. Disponível em: <[http://docs.qgis.org/2.6/pt\\_BR/docs/gentle\\_gis\\_introduction/spatial\\_analysis\\_interpolation.html](http://docs.qgis.org/2.6/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html)>. Acesso em: 15 abr. 2016.

OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION. **GRASS GIS manual: v.surf.rst**. OSGEO. Disponível em: <<https://grass.osgeo.org/grass64/manuals/v.surf.rst.html>>. Acesso em: 4 dez. 2015a.

OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION, QGIS. **Análise Espacial (Interpolação)**. QGIS TRADEMARK. Disponível em: <[http://docs.qgis.org/2.8/pt\\_BR/docs/gentle\\_gis\\_introduction/spatial\\_analysis\\_interpolation.html](http://docs.qgis.org/2.8/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html)>. Acesso em: 05 out. 2015b.

PENIDO, Daniel. **Tópicos da disciplina de geoestatística**. Prezi, 2013. Disponível em: <<https://prezi.com/g2vk9o0ew7j3/topicos-da-disciplina-de-geoestatistica/>>. Acesso em: 08 abr. 2016.

ROSA, Roberto. **Geotecnologias na Geografia Aplicada**, São Paulo. Revista do Departamento de Geografia, São Paulo, SP, v. 16, p. 81-90, 2005. Disponível em [www.geografia.fflch.usp.br/publicacoes/RDG/RDG\\_16/Roberto\\_Rosa.pdf](http://www.geografia.fflch.usp.br/publicacoes/RDG/RDG_16/Roberto_Rosa.pdf). Acesso em: 11/10/2014.

SILVA, Jaqueline de Carvalho, MONTEIRO, Gabriela Oliveira e PAMBOUKIAN, Sergio Vicente Denser. **Sistemas de Informações Geográficas (SIG)**. 2014, Congresso Alice Brasil – Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2014.

SIMÃO, Carlos Alberto. **Brocas Manuais**. 2014. Disponível em: <<http://engcarlos.com.br/brocas-manuais/>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

TINOCO, Estiverson. **Solos e Fundações**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgG2sAF/aula-4-solos-fundacoes>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

TRIOLA, Mario F. Introdução à Estatística. LTC, 1999, 410.

VIEIRA, Sonia. **Estatística Para a Qualidade**: como Avaliar Com Precisão a Qualidade em Produtos e Serviços. 1999. 216 f. Editora Campus, São Paulo, 1999.

## ANEXO A - DOCUMENTO DE CONSENTIMENTO

### TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO - INSTITUIÇÃO

Gostaríamos de convidar a sua Instituição a participar do projeto de pesquisa "Reconhecimento do subsolo: Interpretação dos resultados de ensaios e análise investigativa para a escolha de fundações" que se propõe a melhorar a visualização do engenheiro e facilitar a escolha do tipo de fundação, através de métodos diretos aliados à modelagem do subsolo em 3D.

Os dados para o estudo, que estão sendo solicitados a Empresa PEACOCK EVEN Empreendimentos Imobiliários Ltda., são: As plantas de locação de sondagens e os perfis individuais das sondagens à percussão dos projetos Bosque da Lapa e Parques da Lapa.

A coleta dos dados será realizada pelos pesquisadores e tanto a coleta de dados quanto o contato interpessoal não oferecem riscos previsíveis aos participantes.

Em qualquer etapa do estudo a Instituição terá acesso ao Pesquisador Responsável para o esclarecimento de eventuais dúvidas (no endereço abaixo), e terá o direito de retirar-se do estudo a qualquer momento, sem qualquer penalidade ou prejuízo. Ressaltamos que será identificado no trabalho o local onde foram realizadas as sondagens porém o nome da instituição que realizou as mesmas será resguardado.

Caso a Instituição tenha alguma consideração ou dúvida sobre os aspectos éticos da pesquisa, poderá entrar em contato com a coordenadora da **Comissão de Ética em Pesquisa da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie**, Raquel Cymrot, na Rua da Consolação, 896 – prédio 6 – sala 117 ou pelo e-mail [raquel.cymrot@mackenzie.br](mailto:raquel.cymrot@mackenzie.br)

Desde já agradecemos a sua colaboração.

Declaro que li e entendi os objetivos deste estudo, e que as dúvidas que tive foram esclarecidas pelos pesquisadores. Estou ciente que a participação da Instituição é voluntária, e que, a qualquer momento esta tem o direito de obter outros esclarecimentos sobre a pesquisa e de retirar-se da mesma, sem qualquer penalidade ou prejuízo.

Nome do Representante Legal da Instituição: Jumanda Custina M. Bogaselli

Assinatura do Representante Legal da Instituição: Jumanda Bogaselli

Declaro que expliquei ao Responsável pela Instituição os procedimentos a serem realizados neste estudo, seus eventuais riscos/desconfortos, possibilidade de retirar-se da pesquisa sem qualquer penalidade ou prejuízo, assim como esclareci as dúvidas apresentadas.

São Paulo, 01 de junho de 2015.

Damaral  
Daniela Villibor Amaral  
[dvilliboramara@gmail.com](mailto:dvilliboramara@gmail.com)

Joseane Batista Feitosa  
Joseane Batista Feitosa  
[joseanebfeitosa@hotmail.com](mailto:joseanebfeitosa@hotmail.com)

Michelle Andrade Mongiat  
Michelle Andrade Mongiat  
[michelleamongiat@hotmail.com](mailto:michelleamongiat@hotmail.com)

Sergio V.D. Pamboukian  
Orientador: Sergio Vicente Denser Pamboukian  
[sergio.pamboukian@gmail.com](mailto:sergio.pamboukian@gmail.com)

## ANEXO B - BOLETIM FINAL DE SONDAAGEM

## SONDAGEM SP 02

CLIENTE: PEACOCK EVEN EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA  $\varnothing=2\ 1/2''$   
 OBRA: AV RAIMUNDO PEREIRA MAGALHÃES X R CAMPOS VERGUEIRO – SÃO PAULO – SP  
 COTA DO TERRENO = ( 99,86 )

COTAS	NÍVEL D'ÁGUA	ÍNDICE S.P.T.	CAMADAS DO SOLO	
			CONVENÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
				0,20 PISO
		2	[1]	ATERRO DE SILTE E ARGILA, VERMELHO VARIEGADO
		$\frac{1}{46}$	[2]	
		3	[3]	
		4	[4]	ATERRO DE ARGILA E ARGILA ORGÂNICA, AMARELA E CINZA ESCURO
95		3	[5]	
		22	[6]	AREIA DE GRANULAÇÃO VARIADA, SILTOSA, PCO ARGILOSA, com pedregulhos variados, e matéria orgânica, COMPACTA, CINZA MÉDIO E PRETO
		15	[7]	
		23	[8]	SILTE ARENO ARGILOSO, com fragmentos de rocha, MED. COMPACTO A COMPACTO, AMARELO E CINZA (SOLO RESIDUAL)
90		$\frac{22}{15}$	[9]	
			(*)	
				(*) – IMPENETRÁVEL A FERRAMENTA DE PERCUSSÃO
85				
80				

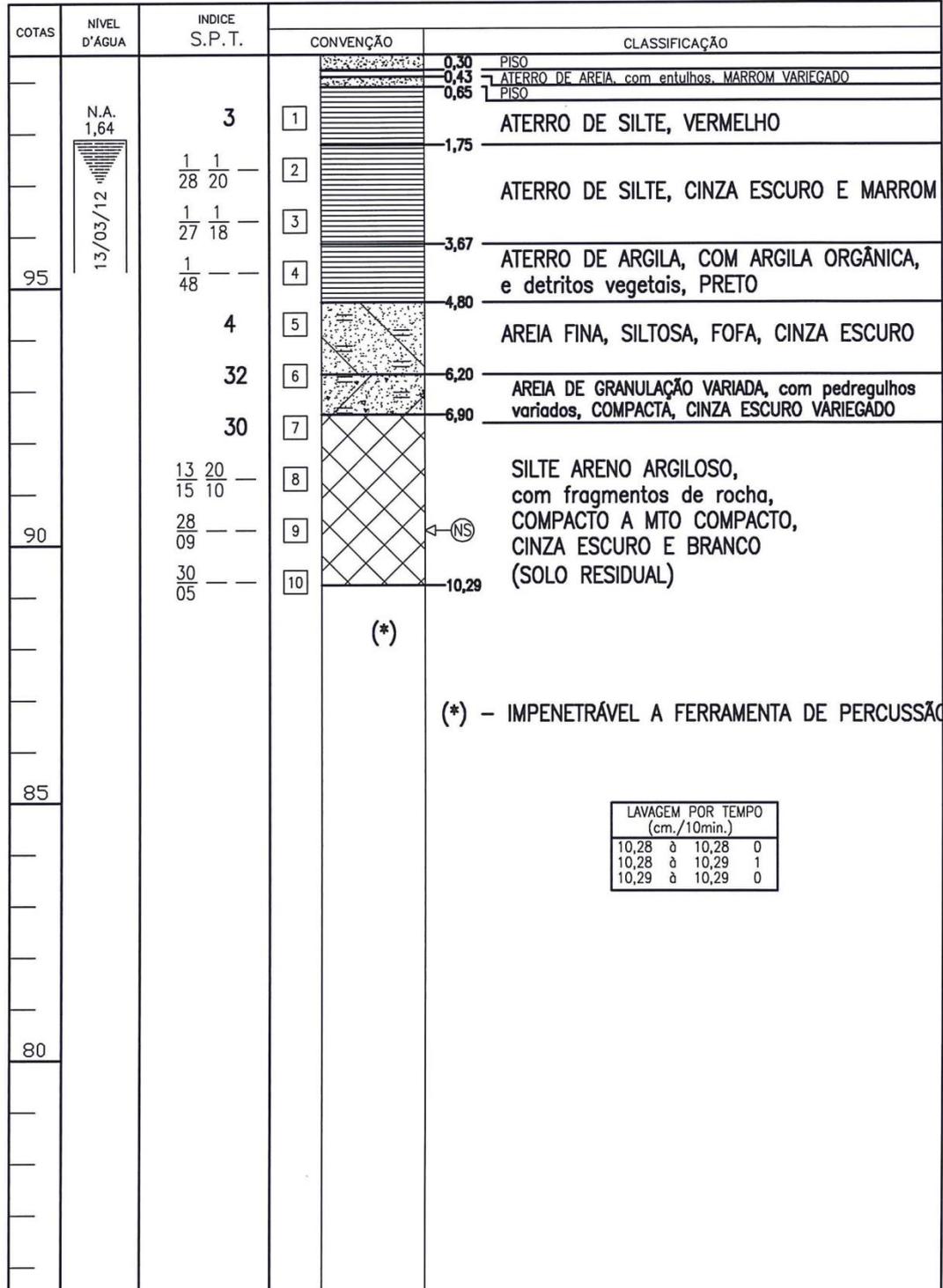
N.A. 3,08

20/12/10

LAVAGEM POR TEMPO (cm./10min.)		
9,45	à	9,46 1
9,46	à	9,47 1
9,47	à	9,47 0

SONDAGEM SP 11A

CLIENTE: PEACOCK EVEN EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS LTDA Ø=2 1/2"  
 OBRA: AV RAIMUNDO PEREIRA MAGALHÃES X R CAMPOS VERGUEIRO – SÃO PAULO – SP  
 COTA DO TERRENO = ( 99,52 )



## APÊNDICE A - LISTA DE SONDAgens

ID	Sondagem	ID	Sondagem
1	SP 01	45	SP 11B
2	SP 02	46	SP 11C
3	SP 03	47	SP 12(O)
4	SP 03A	48	SP 13(O)
5	SP 04	49	SP 14(O)
6	SP 04A	50	SP 14
7	SP 04B	51	SP 14A
8	SP 04C	52	SP 14B
9	SP 05(O)	53	SP 14C
10	SP 05A(O)	54	SP 14D
11	SP 05B(O)	55	SP 15
12	SP 05C(O)	56	SP 15A
13	SP 06(O)	57	SP 15B
14	SP 06A(O)	58	SP 15C
15	SP 06B(O)	59	SP 16
16	SP 06C(O)	60	SP 16A
17	SP 06D(O)	61	SP 16B
18	SP 07(O)	62	SP 16C
19	SP 07A(O)	63	SP 17
20	SP 07B(O)	64	SP 17A
21	SP 07C(O)	65	SP 17B
22	SP 07D(O)	66	SP 17C
23	SP 08*	67	SP 17D
24	SP 08(O)	68	SP 18
25	SP 08	69	SP 18A
26	SP 08A*	70	SP 18B
27	SP 08A	71	SP 18C
28	SP 08B	72	SP 18D
29	SP 08C	73	SP 19
30	SP 08D	74	SP 19A
31	SP 09(O)	75	SP 19B
32	SP 09	76	SP 19C
33	SP 09A	77	SP 19D
34	SP 09B	78	SP 20
35	SP 09C	79	SP 20A
36	SP 10*	80	SP 20B
37	SP 10(O)	81	SP 20C
38	SP 10A(O)	82	SP 20D
39	SP 10B(O)	83	SP 21
40	SP 10C(O)	84	SP 21A
41	SP 10D(O)	85	SP 21B
42	SP 11(O)	86	SP 21C
43	SP 11	87	SP 21D
44	SP 11A		

## APÊNDICE B - TABELA DE ATRIBUTOS DO QGIS

ID	Sondagem	Profundidade da Sondagem										
		1ºm	2ºm	3ºm	4ºm	5ºm	6ºm	7ºm	8ºm	9ºm	10ºm	11ºm
1	SP 01	3	0	4	4	3	2	21	12	46	0	0
2	SP 02	2	0	3	4	3	22	15	23	44	0	0
3	SP 03	4	0	4	2	2	30	7	14	23	44	0
4	SP 03A	3	2	3	3	0	0	23	22	18	52	0
5	SP 04	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	SP 04A	5	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0
7	SP 04B	5	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0
8	SP 04C	5	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0
9	SP 05(O)	1	0	1	1	1	6	10	60	100	0	0
10	SP 05A(O)	1	1	1	2	1	26	14	115	112	0	0
11	SP 05B(O)	1	1	2	1	1	13	11	100	64	0	0
12	SP 05C(O)	1	2	1	1	1	13	27	60	62	0	0
13	SP 06(O)	1	0	1	1	0	21	48	93	120	0	0
14	SP 06A(O)	2	1	2	1	0	27	25	52	300	0	0
15	SP 06B(O)	2	2	2	2	0	29	27	120	0	0	0
16	SP 06C(O)	2	2	3	4	1	31	30	100	180	0	0
17	SP 06D(O)	2	2	2	1	10	24	84	60	112	0	0
18	SP 07(O)	1	2	2	1	1	1	12	27	60	0	0
19	SP 07A(O)	1	2	2	1	1	5	10	62	112	0	0
20	SP 07B(O)	1	1	2	1	1	5	16	37	150	0	0
21	SP 07C(O)	2	1	1	1	1	12	40	60	128	0	0
22	SP 07D(O)	1	1	1	1	1	12	27	105	112	0	0
23	SP 08*	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	SP 08(O)	2	1	1	0	0	30	26	23	31	150	0
25	SP 08	2	0	1	1	2	8	17	18	52	0	0
26	SP 08A*	7	7	6	2	5	28	41	60	75	50	0
27	SP 08A	2	0	1	0	1	4	22	3	64	0	0
28	SP 08B	1	0	0	1	2	12	20	15	52	0	0
29	SP 08C	2	0	0	1	1	23	18	12	75	0	0
30	SP 08D	1	0	0	1	2	33	20	14	58	0	0

ID	Sondagem	Profundidade da Sondagem											
		1ºm	2ºm	3ºm	4ºm	5ºm	6ºm	7ºm	8ºm	9ºm	10ºm	11ºm	
31	SP 09(O)	2	3	4	1	1	12	24	0	0	0	0	0
32	SP 09	2	1	1	6	2	2	56	0	0	0	0	0
33	SP 09A	2	1	1	1	1	2	120	0	0	0	0	0
34	SP 09B	2	1	1	3	0	100	0	0	0	0	0	0
35	SP 09C	5	0	0	1	2	2	50	0	0	0	0	0
36	SP 10*	3	0	0	0	1	9	100	42	75	0	0	0
37	SP 10(O)	4	10	1	1	0	120	0	0	0	0	0	0
38	SP 10A(O)	2	1	2	4	0	76	0	0	0	0	0	0
39	SP 10B(O)	6	4	2	3	1	150	0	0	0	0	0	0
40	SP 10C(O)	3	3	2	2	0	46	0	0	0	0	0	0
41	SP 10D(O)	2	1	4	5	0	42	0	0	0	0	0	0
42	SP 11(O)	2	3	2	4	2	43	17	31	150	0	0	0
43	SP 11	2	2	2	1	3	31	21	28	54	107	0	0
44	SP 11A	3	1	1	0	4	32	30	60	93	180	0	0
45	SP 11B	0	1	2	4	7	23	88	85	90	150	0	0
46	SP 11C	4	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	SP 12(O)	1	2	1	2	2	1	5	32	150	0	0	0
48	SP 13(O)	5	1	1	0	5	32	7	300	0	0	0	0
49	SP 14(O)	4	2	2	3	3	27	20	22	15	0	0	0
50	SP 14	1	0	2	0	0	24	10	64	0	0	0	0
51	SP 14A	0	2	1	0	0	1	12	64	0	0	0	0
52	SP 14B	1	0	1	1	1	26	14	68	0	0	0	0
53	SP 14C	0	0	1	1	2	21	13	62	0	0	0	0
54	SP 14D	0	0	1	0	0	21	17	70	0	0	0	0
55	SP 15	3	1	0	1	1	12	9	36	18	0	0	0
56	SP 15A	1	0	0	0	1	16	27	34	150	0	0	0
57	SP 15B	3	0	3	3	2	23	79	150	300	0	0	0
58	SP 15C	4	2	1	2	2	14	24	68	74	225	0	0
59	SP 16	1	0	0	3	1	4	34	37	0	0	0	0
60	SP 16A	1	1	0	3	1	1	33	72	0	0	0	0

ID	Sondagem	Profundidade da Sondagem										
		1ºm	2ºm	3ºm	4ºm	5ºm	6ºm	7ºm	8ºm	9ºm	10ºm	11ºm
61	SP 16B	3	0	0	3	4	20	32	81	300	0	0
62	SP 16C	1	0	0	2	3	31	38	225	0	0	0
63	SP 17	1	0	0	1	1	20	4	13	36	225	0
64	SP 17A	0	0	1	0	0	23	12	15	23	90	0
65	SP 17B	4	0	1	1	1	28	20	35	76	225	0
66	SP 17C	1	1	1	1	1	23	11	11	9	122	375
67	SP 17D	1	4	1	0	0	23	10	20	34	90	0
68	SP 18	1	0	3	3	0	10	12	81	0	0	0
69	SP 18A	1	1	3	1	0	4	12	112	0	0	0
70	SP 18B	5	0	1	1	0	3	10	90	0	0	0
71	SP 18C	3	0	1	1	0	6	14	100	0	0	0
72	SP 18D	1	0	3	1	0	6	15	150	0	0	0
73	SP 19	1	1	2	0	0	2	12	225	0	0	0
74	SP 19A	3	1	0	0	0	5	28	0	0	0	0
75	SP 19B	3	0	3	0	3	24	80	0	0	0	0
76	SP 19C	3	1	2	0	3	17	40	320	0	0	0
77	SP 19D	3	0	3	0	2	24	84	0	0	0	0
78	SP 20	2	0	1	1	1	1	9	32	225	450	0
79	SP 20A	3	0	2	0	0	2	8	3	340	0	0
80	SP 20B	2	0	2	0	3	2	7	62	0	0	0
81	SP 20C	2	1	2	1	1	35	8	68	240	0	0
82	SP 20D	2	1	2	1	2	40	12	66	300	0	0
83	SP 21	3	0	2	1	1	16	23	180	250	0	0
84	SP 21A	1	0	1	0	1	16	7	68	192	300	0
85	SP 21B	3	0	1	2	1	14	11	300	0	0	0
86	SP 21C	6	0	0	0	0	8	10	29	250	0	0
87	SP 21D	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### APÊNDICE C - SONDAGENS COM COORDENADAS UTM

ID	Sondagem	Coordenada X	Coordenada Y	Cota Boca	Cota Fundo
1	SP-01	324.994,31	7.398.816,87	99,87	90,29
2	SP-02	324.989,59	7.398.799,92	99,86	90,39
4	SP-03A	324.967,56	7.398.819,70	99,88	89,31
8	SP-04C	324958,883	7398791,111	99,65	95,98
10	SP-05A (O)	324.987,90	7.398.850,98	100,08	90,72
13	SP-06 (O)	324974,548	7398828,324	100,06	90,97
20	SP-07B	324.969,96	7.398.781,88	99,55	90,30
26	SP-08A*	324942,443	7398785,859	100,39	89,58
33	SP-09A	324.920,27	7.398.828,86	99,67	92,48
36	SP-10*	324922,523	7398815,991	100,12	90,88
39	SP-10B	324.937,54	7.398.770,11	99,53	93,15
42	SP-11 (O)	324908,083	7398796,413	99,49	90,24
44	SP-11A	324.901,26	7.398.796,65	99,52	89,23
47	SP-12 (O)	324912,268	7398767,474	99,72	90,10
48	SP-13 (O)	324.893,73	7.398.821,39	99,4	91,30
49	SP-14 (O)	324917,995	7398812,233	99,4	90,20
54	SP-14D	324.904,46	7.398.808,27	99,4	91,00
58	SP-15C	325000,266	7398799,805	99,3	89,00
61	SP-16B	324.991,75	7.398.832,25	99,5	90,40
66	SP-17C	324977,780	7398797,492	99,5	88,40
69	SP-18A	324.960,30	7.398.840,88	99,9	91,60
76	SP-19C	324955,688	7398821,452	99,5	91,20
78	SP-20	324.928,92	7.398.809,61	99,4	89,40
84	SP-21A	324.914,32	7.398.790,41	99,5	89,40

### APÊNDICE D - PONTOS DE SONDAAGEM COM N<sub>SPT</sub> DETALHADO

Nº do Ponto	ID	Sondagem	Cota do Ponto	N <sub>SPT</sub>
1	1	SP-01	99,87	3
2	1	SP-01	98,87	3
3	1	SP-01	97,87	0
4	1	SP-01	96,87	4
5	1	SP-01	95,87	4
6	1	SP-01	94,87	3
7	1	SP-01	93,87	2
8	1	SP-01	92,87	21
9	1	SP-01	91,87	12
10	1	SP-01	90,87	46
11	1	SP-01	90,29	46
12	2	SP-02	99,86	2
13	2	SP-02	98,86	2
14	2	SP-02	97,86	0
15	2	SP-02	96,86	3
16	2	SP-02	95,86	4
17	2	SP-02	94,86	3
18	2	SP-02	93,86	22
19	2	SP-02	92,86	15
20	2	SP-02	91,86	23
21	2	SP-02	90,86	44
22	2	SP-02	90,39	44
23	4	SP-03A	99,88	3
24	4	SP-03A	98,88	3
25	4	SP-03A	97,88	2
26	4	SP-03A	96,88	3
27	4	SP-03A	95,88	3
28	4	SP-03A	94,88	0
29	4	SP-03A	93,88	0
30	4	SP-03A	92,88	23
31	4	SP-03A	91,88	22
32	4	SP-03A	90,88	18
33	4	SP-03A	89,88	52
34	4	SP-03A	89,31	52
35	8	SP-04C	99,65	5
36	8	SP-04C	98,65	5
37	8	SP-04C	97,65	4
38	8	SP-04C	96,65	5
39	8	SP-04C	95,98	5

Nº do Ponto	ID	Sondagem	Cota do Ponto	N <sub>SPT</sub>
40	10	SP-05A (O)	100,08	1
41	10	SP-05A (O)	99,08	1
42	10	SP-05A (O)	98,08	1
43	10	SP-05A (O)	97,08	1
44	10	SP-05A (O)	96,08	2
45	10	SP-05A (O)	95,08	1
46	10	SP-05A (O)	94,08	26
47	10	SP-05A (O)	93,08	14
48	10	SP-05A (O)	92,08	65
49	10	SP-05A (O)	91,08	65
50	10	SP-05A (O)	90,72	65
51	13	SP-06 (O)	100,06	1
52	13	SP-06 (O)	99,06	1
53	13	SP-06 (O)	98,06	0
54	13	SP-06 (O)	97,06	1
55	13	SP-06 (O)	96,06	1
56	13	SP-06 (O)	95,06	0
57	13	SP-06 (O)	94,06	21
58	13	SP-06 (O)	93,06	48
59	13	SP-06 (O)	92,06	65
60	13	SP-06 (O)	91,06	65
61	13	SP-06 (O)	90,97	65
62	20	SP-07B	99,55	1
63	20	SP-07B	98,55	1
64	20	SP-07B	97,55	1
65	20	SP-07B	96,55	2
66	20	SP-07B	95,55	1
67	20	SP-07B	94,55	1
68	20	SP-07B	93,55	5
69	20	SP-07B	92,55	16
70	20	SP-07B	91,55	37
71	20	SP-07B	90,55	65
72	20	SP-07B	90,30	65
73	26	SP-08A*	100,39	7
74	26	SP-08A*	99,39	7
75	26	SP-08A*	98,39	7
76	26	SP-08A*	97,39	6
77	26	SP-08A*	96,39	2
78	26	SP-08A*	95,39	5
79	26	SP-08A*	94,39	28
80	26	SP-08A*	93,39	41
81	26	SP-08A*	92,39	60
82	26	SP-08A*	91,39	65
83	26	SP-08A*	90,39	50
84	26	SP-08A*	89,58	50

Nº do Ponto	ID	Sondagem	Cota do Ponto	N <sub>SPT</sub>
85	33	SP-09A	99,67	2
86	33	SP-09A	98,67	2
87	33	SP-09A	97,67	1
88	33	SP-09A	96,67	1
89	33	SP-09A	95,67	1
90	33	SP-09A	94,67	1
91	33	SP-09A	93,67	2
92	33	SP-09A	92,67	65
93	33	SP-09A	92,48	65
94	36	SP-10*	100,12	3
95	36	SP-10*	99,12	3
96	36	SP-10*	98,12	0
97	36	SP-10*	97,12	0
98	36	SP-10*	96,12	1
99	36	SP-10*	95,12	1
100	36	SP-10*	94,12	9
101	36	SP-10*	93,12	65
102	36	SP-10*	92,12	42
103	36	SP-10*	91,12	65
104	36	SP-10*	90,88	65
105	39	SP-10B	99,53	6
106	39	SP-10B	98,53	6
107	39	SP-10B	97,53	4
108	39	SP-10B	96,53	2
109	39	SP-10B	95,53	3
110	39	SP-10B	94,53	1
111	39	SP-10B	93,53	65
112	39	SP-10B	93,15	65
113	42	SP-11 (O)	99,49	2
114	42	SP-11 (O)	98,49	2
115	42	SP-11 (O)	97,49	3
116	42	SP-11 (O)	96,49	2
117	42	SP-11 (O)	95,49	4
118	42	SP-11 (O)	94,49	2
119	42	SP-11 (O)	93,49	43
120	42	SP-11 (O)	92,49	17
121	42	SP-11 (O)	91,49	31
122	42	SP-11 (O)	90,49	65
123	42	SP-11 (O)	90,24	65

Nº do Ponto	ID	Sondagem	Cota do Ponto	N <sub>SPT</sub>
124	44	SP-11A	99,52	3
125	44	SP-11A	98,52	3
126	44	SP-11A	97,52	1
127	44	SP-11A	96,52	1
128	44	SP-11A	95,52	0
129	44	SP-11A	94,52	4
130	44	SP-11A	93,52	32
131	44	SP-11A	92,52	30
132	44	SP-11A	91,52	60
133	44	SP-11A	90,52	65
134	44	SP-11A	89,52	65
135	44	SP-11A	89,23	65
136	47	SP-12 (O)	99,72	1
137	47	SP-12 (O)	98,72	1
138	47	SP-12 (O)	97,72	2
139	47	SP-12 (O)	96,72	1
140	47	SP-12 (O)	95,72	2
141	47	SP-12 (O)	94,72	2
142	47	SP-12 (O)	93,72	1
143	47	SP-12 (O)	92,72	5
144	47	SP-12 (O)	91,72	32
145	47	SP-12 (O)	90,72	65
146	47	SP-12 (O)	90,10	65
147	48	SP-13 (O)	99,40	5
148	48	SP-13 (O)	98,40	5
149	48	SP-13 (O)	97,40	1
150	48	SP-13 (O)	96,40	1
151	48	SP-13 (O)	95,40	1
152	48	SP-13 (O)	94,40	5
153	48	SP-13 (O)	93,40	32
154	48	SP-13 (O)	92,40	7
155	48	SP-13 (O)	91,40	65
156	48	SP-13 (O)	91,30	65
157	49	SP-14 (O)	99,40	4
158	49	SP-14 (O)	98,40	4
159	49	SP-14 (O)	97,40	2
160	49	SP-14 (O)	96,40	2
161	49	SP-14 (O)	95,40	3
162	49	SP-14 (O)	94,40	3
163	49	SP-14 (O)	93,40	27
164	49	SP-14 (O)	92,40	20
165	49	SP-14 (O)	91,40	22
166	49	SP-14 (O)	90,40	15
167	49	SP-14 (O)	90,20	15

N° do Ponto	ID	Sondagem	Cota do Ponto	N <sub>SPT</sub>
168	54	SP-14D	99,40	1
169	54	SP-14D	98,40	1
170	54	SP-14D	97,40	0
171	54	SP-14D	96,40	1
172	54	SP-14D	95,40	0
173	54	SP-14D	94,40	0
174	54	SP-14D	93,40	21
175	54	SP-14D	92,40	17
176	54	SP-14D	91,40	65
177	54	SP-14D	91,00	65
178	58	SP-15C	99,30	4
179	58	SP-15C	98,30	4
180	58	SP-15C	97,30	2
181	58	SP-15C	96,30	1
182	58	SP-15C	95,30	2
183	58	SP-15C	94,30	2
184	58	SP-15C	93,30	14
185	58	SP-15C	92,30	24
186	58	SP-15C	91,30	65
187	58	SP-15C	90,30	65
188	58	SP-15C	89,30	65
189	58	SP-15C	89,00	65
190	61	SP-16B	99,50	3
191	61	SP-16B	98,50	3
192	61	SP-16B	97,50	1
193	61	SP-16B	96,50	1
194	61	SP-16B	95,50	3
195	61	SP-16B	94,50	4
196	61	SP-16B	93,50	20
197	61	SP-16B	92,50	32
198	61	SP-16B	91,50	65
199	61	SP-16B	90,50	65
200	61	SP-16B	90,40	65

Nº do Ponto	ID	Sondagem	Cota do Ponto	N <sub>SPT</sub>
201	66	SP-17C	99,50	1
202	66	SP-17C	98,50	1
203	66	SP-17C	97,50	1
204	66	SP-17C	96,50	1
205	66	SP-17C	95,50	1
206	66	SP-17C	94,50	1
207	66	SP-17C	93,50	23
208	66	SP-17C	92,50	11
209	66	SP-17C	91,50	11
210	66	SP-17C	90,50	9
211	66	SP-17C	89,50	65
212	66	SP-17C	88,50	65
213	66	SP-17C	88,40	65
214	69	SP-18A	99,90	1
215	69	SP-18A	98,90	1
216	69	SP-18A	97,90	1
217	69	SP-18A	96,90	3
218	69	SP-18A	95,90	1
219	69	SP-18A	94,90	0
220	69	SP-18A	93,90	4
221	69	SP-18A	92,90	12
222	69	SP-18A	91,90	65
223	69	SP-18A	91,60	65
224	76	SP-19C	99,50	3
225	76	SP-19C	98,50	3
226	76	SP-19C	97,50	1
227	76	SP-19C	96,50	2
228	76	SP-19C	95,50	0
229	76	SP-19C	94,50	3
230	76	SP-19C	93,50	17
231	76	SP-19C	92,50	40
232	76	SP-19C	91,50	65
233	76	SP-19C	91,20	65

N° do Ponto	ID	Sondagem	Cota do Ponto	N <sub>SPT</sub>
234	78	SP-20	99,40	2
235	78	SP-20	98,40	2
236	78	SP-20	97,40	0
237	78	SP-20	96,40	1
238	78	SP-20	95,40	1
239	78	SP-20	94,40	1
240	78	SP-20	93,40	1
241	78	SP-20	92,40	9
242	78	SP-20	91,40	32
243	78	SP-20	90,40	65
244	78	SP-20	89,40	65
245	78	SP-20	89,40	65
246	84	SP-21A	99,50	1
247	84	SP-21A	98,50	1
248	84	SP-21A	97,50	0
249	84	SP-21A	96,50	1
250	84	SP-21A	95,50	0
251	84	SP-21A	94,50	1
252	84	SP-21A	93,50	16
253	84	SP-21A	92,50	7
254	84	SP-21A	91,50	65
255	84	SP-21A	90,50	65
256	84	SP-21A	89,50	65
257	84	SP-21A	89,40	65

### APÊNDICE E - TESTES MÉTODO IDW BOCA

PARÂMETRO = 0.2							
ID	Sondagem	Ponto retirado	Cota do Terreno (m)	Diferença de Cotas		Desvio	
				Cota Interpolada (m)	Erro - Diferença de Cotas (m)	Cota Interpolada (m)	Erro - Desvio (m)
1	SP-01	1	99,87	99,69	0,18	99,73	0,14
2	SP-02	2	99,86	99,68	0,18	99,72	0,14
4	SP-03A	4	99,88	99,69	0,19	99,75	0,13
8	SP-04C	8	99,65	99,70	0,05	99,75	0,10
10	SP-05A (O	10	100,08	99,68	0,40	99,69	0,39
13	SP-06 (O)	13	100,06	99,69	0,37	99,77	0,29
20	SP-07B	20	99,55	99,70	0,15	99,80	0,25
26	SP-08A*	26	100,39	99,66	0,73	99,68	0,71
33	SP-09A	33	99,67	99,69	0,02	99,68	0,01
36	SP-10*	36	100,12	99,66	0,46	99,73	0,39
39	SP-10B	39	99,53	99,70	0,17	99,67	0,14
42	SP-11 (O)	42	99,49	99,69	0,20	99,64	0,15
44	SP-11A	44	99,52	99,68	0,16	99,63	0,11
47	SP-12 (O)	47	99,72	99,68	0,04	99,69	0,03
48	SP-13 (O)	48	99,40	99,70	0,30	99,61	0,21
49	SP-14 (O)	49	99,42	99,70	0,28	99,65	0,23
54	SP-14D	54	99,40	99,69	0,29	99,61	0,21
58	SP-15C	58	99,35	99,72	0,37	99,64	0,29
61	SP-16B	61	99,59	99,71	0,12	99,70	0,11
66	SP-17C	66	99,56	99,70	0,14	99,67	0,11
69	SP-18A	69	99,91	99,69	0,22	99,74	0,17
76	SP-19C	76	99,56	99,71	0,15	99,68	0,12
78	SP-20	78	99,47	99,70	0,23	99,66	0,19
84	SP-21A	84	99,58	99,69	0,11	99,65	0,07
Média					0,23		0,19
Desvio Padrão					0,16		0,15

PARÂMETRO = 2.0							
ID	Sondagem	Ponto retirado	Cota do Terreno (m)	Diferença de Cotas		Desvio	
				Cota Interpolada (m)	Erro - Diferença de Cotas (m)	Cota Interpolada (m)	Erro - Desvio (m)
1	SP-01	1	99,87	99,66	0,21	99,87	0,00
2	SP-02	2	99,86	99,48	0,38	99,86	0,00
4	SP-03A	4	99,88	99,83	0,05	99,88	0,00
8	SP-04C	8	99,65	99,79	0,14	99,65	0,00
10	SP-05A (O	10	100,08	99,73	0,35	100,08	0,00
13	SP-06 (O)	13	100,06	99,83	0,23	100,06	0,00
20	SP-07B	20	99,55	99,67	0,12	99,55	0,00
26	SP-08A*	26	100,39	99,59	0,80	100,39	0,00
33	SP-09A	33	99,67	99,85	0,18	99,67	0,00
36	SP-10*	36	100,12	99,43	0,69	100,12	0,00
39	SP-10B	39	99,53	100,12	0,59	99,53	0,00
42	SP-11 (O)	42	99,49	99,53	0,04	99,49	0,00
44	SP-11A	44	99,52	99,49	0,03	99,52	0,00
47	SP-12 (O)	47	99,72	99,60	0,12	99,72	0,00
48	SP-13 (O)	48	99,40	99,50	0,10	99,40	0,00
49	SP-14 (O)	49	99,42	100,03	0,61	99,42	0,00
54	SP-14D	54	99,40	99,52	0,12	99,40	0,00
58	SP-15C	58	99,35	99,80	0,45	99,35	0,00
61	SP-16B	61	99,59	99,94	0,35	99,59	0,00
66	SP-17C	66	99,56	99,77	0,21	99,56	0,00
69	SP-18A	69	99,91	99,84	0,07	99,91	0,00
76	SP-19C	76	99,56	99,88	0,32	99,56	0,00
78	SP-20	78	99,47	99,88	0,41	99,47	0,00
84	SP-21A	84	99,58	99,51	0,07	99,58	0,00
			Média		0,28		0,00
			Desvio Padrão		0,22		0,00

PARÂMETRO = 3.0							
ID	Sondagem	Ponto retirado	Cota do Terreno (m)	Diferença de Cotas		Desvio	
				Cota Interpolada (m)	Erro - Diferença de Cotas (m)	Cota Interpolada (m)	Erro - Desvio (m)
1	SP-01	1	99,87	99,68	0,19	99,87	0,00
2	SP-02	2	99,86	99,54	0,32	99,86	0,00
4	SP-03A	4	99,88	99,83	0,05	99,88	0,00
8	SP-04C	8	99,65	99,78	0,13	99,65	0,00
10	SP-05A (O	10	100,08	99,75	0,33	100,08	0,00
13	SP-06 (O)	13	100,06	99,81	0,25	100,06	0,00
20	SP-07B	20	99,55	99,68	0,13	99,55	0,00
26	SP-08A*	26	100,39	99,60	0,79	100,39	0,00
33	SP-09A	33	99,67	99,76	0,09	99,67	0,00
36	SP-10*	36	100,12	99,46	0,66	100,12	0,00
39	SP-10B	39	99,53	99,98	0,45	99,53	0,00
42	SP-11 (O)	42	99,49	99,53	0,04	99,49	0,00
44	SP-11A	44	99,52	99,50	0,02	99,52	0,00
47	SP-12 (O)	47	99,72	99,62	0,10	99,72	0,00
48	SP-13 (O)	48	99,40	99,54	0,14	99,40	0,00
49	SP-14 (O)	49	99,42	99,99	0,57	99,42	0,00
54	SP-14D	54	99,40	99,54	0,14	99,40	0,00
58	SP-15C	58	99,35	99,83	0,48	99,35	0,00
61	SP-16B	61	99,59	99,92	0,33	99,59	0,00
66	SP-17C	66	99,56	99,75	0,19	99,56	0,00
69	SP-18A	69	99,91	99,81	0,10	99,91	0,00
76	SP-19C	76	99,56	99,85	0,29	99,56	0,00
78	SP-20	78	99,47	99,83	0,36	99,47	0,00
84	SP-21A	84	99,58	99,53	0,05	99,58	0,00
Média					0,26		0,00
Desvio Padrão					0,21		0,00

PARÂMETRO = 6.0							
ID	Sondagem	Ponto retirado	Cota do Terreno (m)	Diferença de Cotas		Desvio	
				Cota Interpolada (m)	Erro - Diferença de Cotas (m)	Cota Interpolada (m)	Erro - Desvio (m)
1	SP-01	1	99,87	99,63	0,24	99,87	0,00
2	SP-02	2	99,86	99,44	0,42	99,86	0,00
4	SP-03A	4	99,88	99,85	0,03	99,88	0,00
8	SP-04C	8	99,65	99,68	0,03	99,65	0,00
10	SP-05A (O)	10	100,08	99,68	0,40	100,08	0,00
13	SP-06 (O)	13	100,06	99,86	0,20	100,06	0,00
20	SP-07B	20	99,55	99,65	0,10	99,55	0,00
26	SP-08A*	26	100,39	99,58	0,81	100,39	0,00
33	SP-09A	33	99,67	99,96	0,29	99,67	0,00
36	SP-10*	36	100,12	99,42	0,70	100,12	0,00
39	SP-10B	39	99,53	100,30	0,77	99,53	0,00
42	SP-11 (O)	42	99,49	99,53	0,04	99,49	0,00
44	SP-11A	44	99,52	99,49	0,03	99,52	0,00
47	SP-12 (O)	47	99,72	99,58	0,14	99,72	0,00
48	SP-13 (O)	48	99,40	99,45	0,05	99,40	0,00
49	SP-14 (O)	49	99,42	100,10	0,68	99,42	0,00
54	SP-14D	54	99,40	99,50	0,10	99,40	0,00
58	SP-15C	58	99,35	99,86	0,51	99,35	0,00
61	SP-16B	61	99,59	99,94	0,35	99,59	0,00
66	SP-17C	66	99,56	99,81	0,25	99,56	0,00
69	SP-18A	69	99,91	99,86	0,05	99,91	0,00
76	SP-19C	76	99,56	99,88	0,32	99,56	0,00
78	SP-20	78	99,47	99,96	0,49	99,47	0,00
84	SP-21A	84	99,58	99,49	0,09	99,58	0,00
Média					0,30		0,00
Desvio Padrão					0,25		0,00

### APÊNDICE F - TESTES MÉTODO IDW FUNDO

PARÂMETRO = 0.25							
ID	Sondagem	Ponto retirado	Cota do Terreno (m)	Diferença de Cotas		Desvio	
				Cota Interpolada (m)	Erro - Diferença de Cotas (m)	Cota Interpolada (m)	Erro - Desvio (m)
1	SP-01	1	99,87	90,64	9,23	90,50	9,37
2	SP-02	2	99,86	90,62	9,24	90,50	9,36
4	SP-03A	4	99,88	90,74	9,14	90,24	9,64
8	SP-04C	8	99,65	90,40	9,25	91,86	7,79
10	SP-05A (O	10	100,08	90,65	9,43	90,67	9,41
13	SP-06 (O)	13	100,06	90,63	9,43	90,75	9,31
20	SP-07B	20	99,55	90,72	8,83	90,65	8,90
26	SP-08A*	26	100,39	90,78	9,61	90,46	9,93
33	SP-09A	33	99,67	90,58	9,09	91,02	8,65
36	SP-10*	36	100,12	90,65	9,47	90,70	9,42
39	SP-10B	39	99,53	90,55	8,98	91,38	8,15
42	SP-11 (O)	42	99,49	90,64	8,85	90,48	9,01
44	SP-11A	44	99,52	90,72	8,80	90,20	9,32
47	SP-12 (O)	47	99,72	90,69	9,03	90,46	9,26
48	SP-13 (O)	48	99,40	90,63	8,77	90,91	8,49
49	SP-14 (O)	49	99,42	90,69	8,73	90,58	8,84
54	SP-14D	54	99,40	90,62	8,78	90,75	8,65
58	SP-15C	58	99,35	90,71	8,64	90,13	9,22
61	SP-16B	61	99,59	90,66	8,93	90,58	9,01
66	SP-17C	66	99,56	90,77	8,79	90,01	9,55
69	SP-18A	69	99,91	90,62	9,29	90,89	9,02
76	SP-19C	76	99,56	90,64	8,92	90,86	8,70
78	SP-20	78	99,47	90,74	8,73	90,49	8,98
84	SP-21A	84	99,58	90,70	8,88	90,23	9,35
Média					9,04	9,06	
Desvio Padrão					0,28	0,48	

PARÂMETRO = 0.5							
ID	Sondagem	Ponto retirado	Cota do Terreno (m)	Diferença de Cotas		Desvio	
				Cota Interpolada (m)	Erro - Diferença de Cotas (m)	Cota Interpolada (m)	Erro - Desvio (m)
1	SP-01	1	99,87	90,48	9,39	90,34	9,53
2	SP-02	2	99,86	90,30	9,56	90,37	9,49
4	SP-03A	4	99,88	90,81	9,07	89,50	10,38
8	SP-04C	8	99,65	90,29	9,36	94,18	5,47
10	SP-05A (O	10	100,08	90,64	9,44	90,70	9,38
13	SP-06 (O)	13	100,06	90,54	9,52	90,92	9,14
20	SP-07B	20	99,55	90,97	8,58	90,47	9,08
26	SP-08A*	26	100,39	91,08	9,31	90,00	10,39
33	SP-09A	33	99,67	90,57	9,10	92,09	7,58
36	SP-10*	36	100,12	90,60	9,52	90,79	9,33
39	SP-10B	39	99,53	90,53	9,00	92,71	6,83
42	SP-11 (O)	42	99,49	90,37	9,12	90,27	9,22
44	SP-11A	44	99,52	90,62	8,90	89,46	10,06
47	SP-12 (O)	47	99,72	90,70	9,02	90,16	9,56
48	SP-13 (O)	48	99,40	90,63	8,77	91,27	8,13
49	SP-14 (O)	49	99,42	90,67	8,75	90,38	9,04
54	SP-14D	54	99,40	90,50	8,90	90,97	8,43
58	SP-15C	58	99,35	90,58	8,77	89,27	10,08
61	SP-16B	61	99,59	90,59	9,00	90,44	9,15
66	SP-17C	66	99,56	90,84	8,72	89,22	10,34
69	SP-18A	69	99,91	90,63	9,28	91,35	8,56
76	SP-19C	76	99,56	90,62	8,94	91,16	8,40
78	SP-20	78	99,47	90,76	8,71	89,83	9,64
84	SP-21A	84	99,58	90,59	8,99	89,61	9,97
Média					9,07		9,05
Desvio Padrão					0,29		1,16

PARÂMETRO = 1.0							
ID	Sondagem	Ponto retirado	Cota do Terreno (m)	Diferença de Cotas		Desvio	
				Cota Interpolada (m)	Erro - Diferença de Cotas (m)	Cota Interpolada (m)	Erro - Desvio (m)
1	SP-01	1	99,87	90,24	9,63	90,29	9,58
2	SP-02	2	99,86	89,71	10,15	90,39	9,47
4	SP-03A	4	99,88	90,92	8,96	89,31	10,57
8	SP-04C	8	99,65	90,15	9,50	95,98	3,67
10	SP-05A (O)	10	100,08	90,62	9,46	90,72	9,36
13	SP-06 (O)	13	100,06	90,33	9,73	90,97	9,09
20	SP-07B	20	99,55	90,97	8,58	90,30	9,25
26	SP-08A*	26	100,39	91,08	9,31	89,58	10,81
33	SP-09A	33	99,67	90,57	9,10	92,48	7,19
36	SP-10*	36	100,12	90,59	9,53	90,88	9,24
39	SP-10B	39	99,53	90,53	9,00	93,14	6,39
42	SP-11 (O)	42	99,49	90,34	9,15	90,24	9,25
44	SP-11A	44	99,52	90,62	8,90	89,23	10,29
47	SP-12 (O)	47	99,72	90,70	9,02	90,10	9,62
48	SP-13 (O)	48	99,40	90,63	8,77	91,35	8,05
49	SP-14 (O)	49	99,42	90,69	8,73	90,24	9,18
54	SP-14D	54	99,40	90,50	8,90	91,05	8,35
58	SP-15C	58	99,35	90,59	8,76	89,01	10,34
61	SP-16B	61	99,59	90,59	9,00	90,41	9,18
66	SP-17C	66	99,56	90,83	8,73	88,48	11,08
69	SP-18A	69	99,91	91,16	8,75	91,60	8,31
76	SP-19C	76	99,56	90,62	8,94	91,23	8,33
78	SP-20	78	99,47	90,78	8,69	89,42	10,05
84	SP-21A	84	99,58	90,59	8,99	89,47	10,11
Média					9,10		9,03
Desvio Padrão					0,39		1,59

PARÂMETRO = 2.0							
ID	Sondagem	Ponto retirado	Cota do Terreno (m)	Diferença de Cotas		Desvio	
				Cota Interpolada (m)	Erro - Diferença de Cotas (m)	Cota Interpolada (m)	Erro - Desvio (m)
1	SP-01	1	99,87	90,05	9,82	90,29	9,58
2	SP-02	2	99,86	89,02	10,84	90,39	9,47
4	SP-03A	4	99,88	91,04	8,84	89,31	10,57
8	SP-04C	8	99,65	89,98	9,67	95,98	3,67
10	SP-05A (O	10	100,08	90,60	9,48	90,72	9,36
13	SP-06 (O)	13	100,06	89,84	10,22	90,97	9,09
20	SP-07B	20	99,55	93,22	6,33	90,30	9,25
26	SP-08A*	26	100,39	93,15	7,24	89,58	10,81
33	SP-09A	33	99,67	90,61	9,06	92,48	7,19
36	SP-10*	36	100,12	90,23	9,89	90,88	9,24
39	SP-10B	39	99,53	90,07	9,46	93,15	6,38
42	SP-11 (O)	42	99,49	89,39	10,10	90,24	9,25
44	SP-11A	44	99,52	90,31	9,21	89,23	10,29
47	SP-12 (O)	47	99,72	90,63	9,09	90,10	9,62
48	SP-13 (O)	48	99,40	90,76	8,64	91,35	8,05
49	SP-14 (O)	49	99,42	90,80	8,62	90,24	9,18
54	SP-14D	54	99,40	90,05	9,35	91,05	8,35
58	SP-15C	58	99,35	90,32	9,03	89,01	10,34
61	SP-16B	61	99,59	90,53	9,06	90,41	9,18
66	SP-17C	66	99,56	90,79	8,77	88,48	11,08
69	SP-18A	69	99,91	90,69	9,22	91,60	8,31
76	SP-19C	76	99,56	89,89	9,67	91,23	8,33
78	SP-20	78	99,47	90,71	8,76	89,42	10,05
84	SP-21A	84	99,58	90,18	9,40	89,47	10,11
Média					9,16		9,03
Desvio Padrão					0,92		1,59

PARÂMETRO = 4.0							
ID	Sondagem	Ponto retirado	Cota do Terreno (m)	Diferença de Cotas		Desvio	
				Cota Interpolada (m)	Erro - Diferença de Cotas (m)	Cota Interpolada (m)	Erro - Desvio (m)
1	SP-01	1	99,87	90,23	9,64	90,29	9,58
2	SP-02	2	99,86	88,86	11,00	90,39	9,47
4	SP-03A	4	99,88	91,07	8,81	89,31	10,57
8	SP-04C	8	99,65	90,07	9,58	95,98	3,67
10	SP-05A (O)	10	100,08	90,48	9,60	90,72	9,36
13	SP-06 (O)	13	100,06	89,39	10,67	90,97	9,09
20	SP-07B	20	99,55	94,89	4,66	90,30	9,25
26	SP-08A*	26	100,39	94,06	6,33	89,58	10,81
33	SP-09A	33	99,67	90,79	8,88	92,48	7,19
36	SP-10*	36	100,12	90,22	9,90	90,88	9,24
39	SP-10B	39	99,53	89,64	9,89	93,15	6,38
42	SP-11 (O)	42	99,49	89,25	10,24	90,24	9,25
44	SP-11A	44	99,52	90,25	9,27	89,23	10,29
47	SP-12 (O)	47	99,72	90,36	9,36	90,10	9,62
48	SP-13 (O)	48	99,40	90,98	8,42	91,35	8,05
49	SP-14 (O)	49	99,42	90,86	8,56	90,24	9,18
54	SP-14D	54	99,40	89,84	9,56	91,05	8,35
58	SP-15C	58	99,35	90,38	8,97	89,01	10,34
61	SP-16B	61	99,59	90,53	9,06	90,41	9,18
66	SP-17C	66	99,56	90,49	9,07	88,48	11,08
69	SP-18A	69	99,91	90,82	9,09	91,60	8,31
76	SP-19C	76	99,56	89,39	10,17	91,23	8,33
78	SP-20	78	99,47	90,78	8,69	89,42	10,05
84	SP-21A	84	99,58	90,23	9,35	89,47	10,11
Média					9,12		9,03
Desvio Padrão					1,31		1,59

## APÊNDICE G - TESTES MÉTODO RST FUNDO

VALIDAÇÃO CRUZADA - Smooth = 0												
ID	Sondagem	Parâmetros		TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3	TESTE 4	TESTE 5	TESTE 6	TESTE 7		
		Tension	Smooth	40	50	60	70	80	90	100	Erro	Erro
			Cota do Fundo	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	SP-01	99,87		0,28	0,08	0,22	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
2	SP-02	99,86		2,61	2,32	2,12	1,96	1,82	1,71	1,61	1,61	1,61
4	SP-03A	99,88		1,21	1,53	1,65	1,70	1,72	1,73	1,73	1,73	1,73
8	SP-04C	99,65		7,48	7,04	6,74	6,54	6,41	6,32	6,26	6,26	6,26
10	SP-05A (O)	100,08		0,08	0,01	0,06	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
13	SP-06 (O)	100,06		1,29	1,35	1,29	1,20	1,11	1,04	0,98	0,98	0,98
20	SP-07B	99,55		3,88	3,23	2,86	2,61	2,42	2,27	2,15	2,15	2,15
26	SP-08A*	100,39		5,44	4,93	4,47	4,11	3,85	3,65	3,50	3,50	3,50
33	SP-09A	99,67		0,53	0,12	0,29	0,62	0,86	1,03	1,16	1,16	1,16
36	SP-10*	100,12		0,57	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,49	0,49	0,49
39	SP-10B	99,53		5,48	4,58	4,06	3,73	3,51	3,36	3,25	3,25	3,25
42	SP-11 (O)	99,49		0,68	0,82	0,87	0,89	0,89	0,88	0,86	0,86	0,86
44	SP-11A	99,52		1,60	1,61	1,56	1,51	1,46	1,43	1,40	1,40	1,40
47	SP-12 (O)	99,72		0,63	0,38	0,42	0,49	0,56	0,61	0,65	0,65	0,65
48	SP-13 (O)	99,40		0,33	0,32	0,30	0,29	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31
49	SP-14 (O)	99,40		0,79	0,78	0,73	0,68	0,63	0,60	0,58	0,58	0,58
54	SP-14D	99,40		0,86	0,81	0,79	0,78	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76
58	SP-15C	99,30		3,44	2,65	2,23	1,98	1,82	1,70	1,63	1,63	1,63
61	SP-16B	99,50		0,43	0,47	0,41	0,35	0,30	0,27	0,24	0,24	0,24
66	SP-17C	99,50		3,29	3,11	2,98	2,89	2,82	2,77	2,74	2,74	2,74
69	SP-18A	99,90		0,74	0,37	0,05	0,16	0,30	0,40	0,46	0,46	0,46
76	SP-19C	99,50		0,82	1,09	1,08	1,00	0,92	0,85	0,80	0,80	0,80
78	SP-20	99,40		0,61	0,90	1,05	1,15	1,21	1,26	1,30	1,30	1,30
84	SP-21A	99,50		0,50	0,74	0,84	0,87	0,88	0,88	0,87	0,87	0,87
			Média	1,82	1,66	1,57	1,52	1,48	1,45	1,42	1,42	1,42
			Desvio Padrão	1,96	1,75	1,61	1,50	1,43	1,38	1,35	1,35	1,35



VALIDAÇÃO CRUZADA - Smooth = 0.1																
ID	Sondagem	Parâmetros	TESTE 1		TESTE 2		TESTE 3		TESTE 4		TESTE 5		TESTE 6		TESTE 7	
			40	Erro	50	Erro	60	Erro	70	Erro	80	Erro	90	Erro	100	Erro
		<b>Tension</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		<b>Smooth</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Cota do Fundo	Erro	Erro												
1	SP-01	99,87	0,12	0,19	0,25	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
2	SP-02	99,86	2,40	2,20	2,02	1,88	1,76	1,65	1,56	1,46	1,37	1,28	1,19	1,10	1,01	0,92
4	SP-03A	99,88	1,68	1,66	1,69	1,71	1,72	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73
8	SP-04C	99,65	7,12	6,87	6,64	6,48	6,37	6,29	6,23	6,17	6,11	6,05	5,99	5,93	5,87	5,81
10	SP-05A (O)	100,08	0,12	0,08	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
13	SP-06 (O)	100,06	1,39	1,29	1,22	1,14	1,06	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
20	SP-07B	99,55	3,63	3,11	2,76	2,53	2,35	2,21	2,10	2,00	1,90	1,80	1,70	1,60	1,50	1,40
26	SP-08A*	100,39	5,33	4,84	4,38	4,03	3,77	3,59	3,44	3,30	3,17	3,04	2,91	2,79	2,67	2,55
33	SP-09A	99,67	0,85	0,77	0,80	0,91	1,04	1,15	1,24	1,33	1,42	1,51	1,60	1,69	1,78	1,87
36	SP-10*	100,12	0,32	0,42	0,47	0,48	0,48	0,48	0,47	0,47	0,48	0,48	0,48	0,48	0,47	0,47
39	SP-10B	99,53	4,73	4,26	3,87	3,61	3,43	3,30	3,21	3,12	3,03	2,94	2,85	2,76	2,67	2,58
42	SP-11 (O)	99,49	0,67	0,76	0,82	0,85	0,85	0,85	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
44	SP-11A	99,52	1,48	1,47	1,46	1,44	1,42	1,40	1,38	1,36	1,34	1,32	1,30	1,28	1,26	1,24
47	SP-12 (O)	99,72	1,36	0,90	0,70	0,64	0,65	0,66	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75
48	SP-13 (O)	99,40	0,17	0,01	0,14	0,22	0,26	0,29	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38
49	SP-14 (O)	99,40	0,59	0,62	0,62	0,61	0,59	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53	0,52	0,51	0,50	0,49
54	SP-14D	99,40	0,69	0,71	0,73	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
58	SP-15C	99,30	2,38	2,23	2,02	1,86	1,74	1,65	1,59	1,53	1,47	1,41	1,35	1,29	1,23	1,17
61	SP-16B	99,50	0,45	0,41	0,37	0,32	0,28	0,25	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
66	SP-17C	99,50	3,20	3,04	2,93	2,85	2,79	2,75	2,72	2,69	2,66	2,63	2,60	2,57	2,54	2,51
69	SP-18A	99,90	0,24	0,09	0,10	0,25	0,36	0,44	0,49	0,53	0,57	0,61	0,65	0,69	0,73	0,77
76	SP-19C	99,50	0,97	1,02	1,00	0,94	0,88	0,82	0,77	0,72	0,67	0,62	0,57	0,52	0,47	0,42
78	SP-20	99,40	0,55	0,79	0,99	1,12	1,21	1,26	1,30	1,34	1,38	1,42	1,46	1,50	1,54	1,58
84	SP-21A	99,50	0,00	0,41	0,64	0,75	0,80	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
		Média	1,69	1,59	1,53	1,49	1,46	1,43	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41
		Desvio Padrão	1,83	1,69	1,56	1,47	1,41	1,37	1,34	1,31	1,28	1,25	1,22	1,19	1,16	1,13



VALIDAÇÃO CRUZADA - Smooth = 0.2																
ID	Sondagem	Parâmetros	TESTE 1		TESTE 2		TESTE 3		TESTE 4		TESTE 5		TESTE 6		TESTE 7	
			40	Erro	50	Erro	60	Erro	70	Erro	80	Erro	90	Erro	100	Erro
		<b>Tension</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		<b>Smooth</b>														
		Cota do Fundo														
1	SP-01	99,87	0,24	0,25	0,27	0,28	0,28	0,29	0,28	0,29	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
2	SP-02	99,86	2,18	2,08	1,94	1,81	1,81	1,70	1,81	1,70	1,60	1,60	1,60	1,60	1,52	1,52
4	SP-03A	99,88	1,75	1,71	1,71	1,72	1,72	1,73	1,72	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73
8	SP-04C	99,65	6,88	6,73	6,56	6,42	6,42	6,33	6,42	6,33	6,26	6,26	6,26	6,26	6,20	6,20
10	SP-05A (O)	100,08	0,19	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11
13	SP-06 (O)	100,06	1,25	1,20	1,15	1,09	1,09	1,02	1,09	1,02	0,97	0,97	0,97	0,97	0,92	0,92
20	SP-07B	99,55	3,30	2,95	2,66	2,45	2,45	2,28	2,45	2,28	2,15	2,15	2,15	2,05	2,05	2,05
26	SP-08A*	100,39	4,93	4,62	4,25	3,93	3,93	3,40	3,93	3,40	3,52	3,52	3,52	3,38	3,38	3,38
33	SP-09A	99,67	1,06	1,01	1,02	1,07	1,07	1,15	1,07	1,15	1,23	1,23	1,23	1,30	1,30	1,30
36	SP-10*	100,12	0,28	0,37	0,42	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
39	SP-10B	99,53	4,22	4,00	3,72	3,51	3,51	3,36	3,51	3,36	3,25	3,25	3,25	3,17	3,17	3,17
42	SP-11 (O)	99,49	0,69	0,74	0,79	0,81	0,81	0,82	0,81	0,82	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81
44	SP-11A	99,52	1,39	1,40	1,40	1,39	1,39	1,38	1,39	1,38	1,37	1,37	1,37	1,36	1,36	1,36
47	SP-12 (O)	99,72	1,23	0,95	0,78	0,71	0,71	0,69	0,71	0,69	0,69	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70
48	SP-13 (O)	99,40	0,18	0,02	0,11	0,19	0,19	0,25	0,19	0,25	0,28	0,28	0,28	0,31	0,31	0,31
49	SP-14 (O)	99,40	0,51	0,55	0,56	0,56	0,56	0,55	0,56	0,55	0,55	0,55	0,55	0,54	0,54	0,54
54	SP-14D	99,40	0,69	0,70	0,71	0,72	0,72	0,73	0,72	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
58	SP-15C	99,30	1,90	1,97	1,87	1,77	1,77	1,68	1,77	1,68	1,61	1,61	1,61	1,56	1,56	1,56
61	SP-16B	99,50	0,38	0,36	0,33	0,29	0,29	0,26	0,29	0,26	0,24	0,24	0,24	0,22	0,22	0,22
66	SP-17C	99,50	3,07	2,97	2,88	2,82	2,82	2,77	2,82	2,77	2,73	2,73	2,73	2,70	2,70	2,70
69	SP-18A	99,90	0,06	0,09	0,21	0,32	0,32	0,40	0,32	0,40	0,47	0,47	0,47	0,52	0,52	0,52
76	SP-19C	99,50	0,84	0,93	0,93	0,89	0,89	0,84	0,89	0,84	0,79	0,79	0,79	0,75	0,75	0,75
78	SP-20	99,40	0,74	0,87	1,02	1,13	1,13	1,21	1,13	1,21	1,27	1,27	1,27	1,31	1,31	1,31
84	SP-21A	99,50	0,00	0,33	0,56	0,68	0,68	0,75	0,68	0,75	0,79	0,79	0,79	0,81	0,81	0,81
		Média	1,58	1,54	1,50	1,46	1,46	1,42	1,46	1,42	1,41	1,41	1,41	1,39	1,39	1,39
		Desvio Padrão	1,71	1,62	1,52	1,45	1,45	1,37	1,45	1,37	1,36	1,36	1,36	1,33	1,33	1,33

