

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO SUPERIOR EM ENGENHARIA CIVIL**

**ISMAEL SCHNEIDERS  
VITOR AGUIRRE CARDOSO**

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SUBSOLO DO PERÍMETRO  
URBANO DO MUNICÍPIO DE PATO BRANCO (PR) COM BASE EM  
GEOESTATÍSTICA**

**PATO BRANCO**

**2016**

ISMAEL SCHNEIDERS  
VITOR AGUIRRE CARDOSO

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SUBSOLO DO PERÍMETRO  
URBANO DO MUNICÍPIO DE PATO BRANCO (PR) COM BASE EM  
GEOESTATÍSTICA

Trabalho de Conclusão de Curso de  
graduação apresentado como requisito  
parcial à obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Civil, da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR) – *Câmpus* Pato Branco.  
Orientador: Prof. Dr. Ney Lyzandro  
Tabalipa.

PATO BRANCO

2016



---

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO  
SUBSOLO DO PERÍMETRO URBANO DO  
MUNICÍPIO DE PATO BRANCO (PR) COM BASE  
EM GEOESTATÍSTICA**

**ISMAEL SCHNEIDERS**  
**VITOR AGUIRRE CARDOSO**

No dia 23 de novembro de 2016, às 13h50min, na sala L106 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após argüição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº35-TCC/2016.

Orientador: Prof. Dr. NEY LYZANDRO TABALIPA (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof. Dr. VOLMIR SABBI (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Dr. MURILO CESAR LUCAS (DACOC/UTFPR-PB)

## **AGRADECIMENTOS**

Queremos aproveitar este espaço para apresentar nossos agradecimentos às pessoas e instituições que tornaram possível a realização do presente Trabalho Conclusão de Curso. Assim, um agradecimento:

Ao Pai Celeste, o Onipresente e Onisciente, pelos desafios e obstáculos encontrados no decorrer das nossas vidas que tanto propiciaram o nosso crescimento pessoal como profissional.

À família de Ismael Schneiders: pais Simão Schneiders e Salete Arnold Schneiders pela dedicação e amor incondicional, irmãos Samoel Schneiders e Isabel Schneiders pelo carinho e incentivo constante.

À família de Vitor Aguirre Cardoso: pais Alberto Cardoso e Iara Lúcia Ayres de Aguirre, e irmão Miguel Aguirre Cardoso pelo apoio e incentivo fundamentais durante o processo de aprendizado.

Ao nosso orientador Dr. Ney Lyzandro Tabalipa pela sugestão de tema e orientação sempre que necessário.

À Prof. Elizângela Marcelo Siliprandi pelo apoio e ajuda, principalmente no início dessa caminhada.

## RESUMO

O presente trabalho é o resultado da aplicação de técnicas geoestatísticas de análise da variabilidade espacial em dados de sondagem de simples reconhecimento com Standard Penetration Test (SPT) para a caracterização geotécnica de uma porção do perímetro urbano do Município de Pato Branco (PR), além da determinação dos valores de coesão e atrito do solo da mesma área aplicando fórmulas empíricas com base em dados de SPT. Para a caracterização geotécnica desta área fez-se a aplicação de técnicas geoestatísticas de krigagem ordinária local a fim de gerar modelos digitais de terreno, capazes de representar a profundidade do impenetrável ao amostrador SPT e os limites de penetração de alguns tipos de fundação no solo em função de seu N limite ao longo da região delimitada conforme distribuição de pontos obtidos através de relatórios de sondagens já existentes. Os dados foram tratados na extensão SAGA do programa QGIS em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Para a determinação dos dados de resistência ao cisalhamento foram utilizadas formulações já consagradas como de Hatanaka e Uchida(1996).

Palavras-chaves: Geoestatística. SPT. Coesão. Atrito.

## **ABSTRACT**

This work results from the application of geostatistics analysis of the spatial variability on survey of simple recognition data with Standard Penetration Test (SPT) for geotechnical description of a urban perimeter's portion in Pato Branco county (PR), and the determination of cohesion and friction values of the soil in the same area by applying empirical formulas to SPT data. The application of geostatistical techniques of local ordinary kriging was used for geotechnical description, in order to generate digital terrain models, capable of representing the depth of the impenetrable to the SPT sampler and the limits of penetration of some types of foundation in the soil in function of its N limit along the delimited region according to the distribution of points obtained through existing survey reports. The data were processed in the SAGA extension of the software QGIS in Geographic Information Systems. To determinate the shear strength data were used established formulations already, as Hatanaka and Uchida (1996).

Keywords: Geostatistic, SPT, Cohesion and Friction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema dos equipamentos de sondagem SPT. ....	16
Figura 2: Ensaio de Cisalhamento Direto .....	22
Figura 3: Gráfico de Coulomb - Cisalhamento Direto.....	23
Figura 4: Ensaio Triaxial.....	24
Figura 5: Envoltória de Mohr-Ensaio Triaxial.....	24
Figura 6: Superfície e grade regular .....	27
Figura 7: Superfície e malha triangular .....	28
Figura 8: Exemplos de triangulações diferentes sobre um mesmo conjunto ...	29
Figura 9 - Carta de relevo do sudoeste do Paraná.....	39
Figura 10: Delimitação da região de estudo. ....	42
Figura 11: Exemplo de banco de dados desenvolvido com base nos valores de N.....	43
Figura 12: Profundidade limite da estaca pré-moldada de diâmetro inferior a 30 cm. ....	45
Figura 13: Variância da krigagem ordinária da estaca pré-moldada inferior a 30 cm .....	46
Figura 14: Profundidade limite da estaca pré-moldada de diâmetro superior a 30 cm. ....	47
Figura 15: Profundidade limite da estaca Strauss. ....	49
Figura 16: Variância da krigagem ordinária da estaca Strauss. ....	50
Figura 17: Profundidade limite da estaca Franki. ....	51
Figura 18: Profundidade limite da estaca hélice contínua. ....	52
Figura 19: Profundidade do impenetrável. ....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tabela os estados de compacidade e consistência .....	18
Tabela 2: Valores limites de N para parada das estacas .....	20
Tabela 3: Modelo de tabela para determinação da coesão e atrito - Ponto 8 ..	55
Tabela 4 - Valores médios de coesão e atrito .....	55



## **LISTA DE SIGLAS, ACRÔNIMOS E SÍMBOLOS**

ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IPPUPB	Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Pato Branco
MDT	Modelo Digital de Terreno
MNT	Modelo Numérico de Terreno
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPT	Standard Penetration Test
TIN	Triangular Irregular Network
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UTM	Universal Transversa de Mercator

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS .....	12
1.1.1	Objetivo Geral .....	12
1.1.2	Objetivos Específicos .....	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1	SONDAGENS DE SIMPLES RECONHECIMENTO COM SPT.....	14
2.1.1	Considerações Iniciais .....	14
2.1.2	Equipamentos e Procedimentos de Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento.....	15
2.1.3	Aplicação do SPT na Engenharia de Fundações .....	18
2.2	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO .....	20
2.2.1	Coesão dos Solos .....	21
2.2.2	Ângulo de Atrito Interno.....	21
2.2.3	Ensaio de Cisalhamento do Solo .....	22
2.3	MODELO NUMÉRICO DE TERRENO .....	25
2.3.1	Considerações Gerais .....	25
2.3.2	Modelo de Grades Regulares .....	26
2.3.3	Modelos de Grade Irregular Triangular .....	27
2.4	GEOESTATÍSTICA.....	30
2.4.1	Variáveis Regionalizadas .....	31
2.5	PROCEDIMENTO DE ESTIMATIVA POR KRIGAGEM .....	32
2.5.1	Considerações Iniciais .....	32
2.5.2	Krigagem Ordinária .....	33
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
3.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	35
3.2	LEVANTAMENTO E MONTAGEM DO BANCO DE DADOS.....	35
3.3	TRATAMENTO DOS DADOS.....	36
3.4	RELACIONANDO CISALHAMENTO E SPT .....	36
3.5	DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS E REDAÇÃO FINAL .....	37

<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>38</b>
4.1	LOCALIZAÇÃO.....	38
4.2	CLIMA.....	38
4.3	ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS.....	38
4.4	ASPECTOS GEOLÓGICOS .....	39
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>41</b>
5.1	GEORREFERENCIAMENTO DE FUROS DO SPT E DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	41
5.2	PROFUNDIDADE LIMITE DE PARADA DAS ESTACAS.....	43
5.2.1	Considerações Gerais.....	43
5.2.2	Estaca pré-moldada de concreto com diâmetro inferior a 30cm .....	44
5.2.3	Estaca pré-moldada de concreto com diâmetro superior a 30 cm .....	47
5.2.4	Estaca Strauss .....	48
5.2.5	Estaca Franki .....	50
5.2.6	Estaca hélice contínua .....	52
5.2.7	Profundidade do impenetrável .....	53
5.3	COESÃO E ATRITO .....	54
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No processo de elaboração e execução de uma obra um dos primeiros e mais importantes passos é o reconhecimento do subsolo, pois será este o responsável por suportar os esforços advindos da edificação. Para o reconhecimento do solo, um dos processos mais utilizados no Brasil é a sondagem à percussão *Standard Penetration Test* (SPT). A sondagem do solo é fundamental no processo de elaboração dos projetos de fundação com segurança e qualidade. Em uma cidade como Pato Branco, cujo relevo se apresenta bastante acidentado e irregular, a importância de conhecer detalhadamente o solo é ainda maior.

Utilizando geoestatística podemos identificar, em uma posição não amostrada, as características aproximadas do subsolo, bem como obter medidas de erro e incertezas associadas. Publicações que utilizem geoestatística para tratamento do solo à partir de dados obtidos em sondagens são recentes e pouco numerosas. Um dos trabalhos mais relevantes a nível internacional foi de Mackean e Rosebaum (1990), que afirma que a análise geoestatística nesse caso (solo sedimentar) apontou sucesso nos resultados. A análise permitiu a apreciação da correlação entre regiões vizinhas.

Além da resistência e perfil estratigráfico do solo, determinados via SPT, para obras de engenharia como taludes e muros de arrimo, é necessário que se conheça ainda a coesão e ângulo de atrito do solo. A determinação destes fatores se dá através de ensaios laboratoriais utilizando amostras indeformadas. Os ensaios mais difundidos para este fim são de cisalhamento direto e compressão triaxial. Na cidade de Pato Branco poucos pontos apresentam valores de resistência ao cisalhamento conhecidos. Num local que apresenta muitos aclives, e por consequência são executadas muitas obras de contenção de massa de solo, esse é um dado preocupante.

A sondagem a percussão SPT, padronizada no Brasil pela ABNT NBR 6484:2001, tem um custo baixo e uma simplicidade de execução que a tornam muito popular. Em contraponto, os ensaios cisalhamento direto e compressão triaxial do solo possuem um custo relativo alto. Desta forma, a determinação das variáveis de coesão e atrito do solo através de métodos matemáticos que

os relacionem com variáveis obtidas por meio do SPT, diminuiria consideravelmente os custos.

Isto posto, como a aplicação de geoestatística em dados de sondagem SPT pode gerar informações auxiliares para obras de engenharia? Nesse trabalho são apresentados mapas que representam os resultados de análises quantitativas, feitas sobre amostras representativas, que compõe um conjunto de informações complementares que auxiliem na elaboração e execução de projetos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a aplicabilidade, em obras de engenharia, de técnicas geoestatísticas de dados obtidos em sondagens de simples reconhecimento com SPT no perímetro urbano do Município de Pato Branco-PR.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Construir um banco de dados georreferenciado dos valores das sondagens a percussão com SPT;
- Determinar, através de dados de sondagem SPT, parâmetros físicos de coesão e atrito do solo de maneira empírica;
- Aplicar os resultados obtidos com a geoestatística na construção de documentos cartográficos, nos quais seja possível identificar as características do subsolo;
- Identificar áreas favoráveis à utilização de determinados elementos estruturais de fundação, baseado na interpretação dos valores do SPT estimado;
- Elaborar mapeamentos que indiquem áreas favoráveis à utilização de determinados elementos estruturais de fundação.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Desde trabalhos como o de Mackean e Rosenbaum (1990), as sondagens vêm sendo utilizadas para a obtenção de informações do subsolo, com objetivo de elaboração de mapas cartográficos. Das sondagens podem-se extrair as mais diversas informações, tais como: composição textural dos solos (descrição tátil-visual), a profundidade da superfície freática e índice de resistência do solo.

Está claro que um levantamento geoestatístico, com base em determinado número de amostras, não substitui a sondagem do solo no ponto de interesse, visto que de acordo com a norma ABNT (2010), é necessário, para qualquer edificação, no mínimo sondagens a percussão com SPT como investigação geotécnica.

Porém, ressalta-se a importância desse trabalho como base de informação nos estudos preliminares da edificação, planejamento da obra e quando não se dispõe de informações mais detalhadas é possível fazer uso do mesmo.

A existência de trabalhos anteriores semelhantes, bem como a disponibilidade de relatórios de sondagens e a possibilidade de transformá-los em amostras para aplicação de técnicas geoestatísticas, demonstram que o presente trabalho é viável. O acesso a *softwares* e demais recursos necessários à realização do trabalho é garantido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Pode-se destacar ainda a originalidade deste trabalho visto que não há fonte de informação semelhante sobre o solo do perímetro urbano de Pato Branco.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SONDAGENS DE SIMPLES RECONHECIMENTO COM SPT

#### 2.1.1 Considerações Iniciais

A elaboração de projetos de fundação exige um conhecimento adequado dos solos, sendo necessário classificar as diversas camadas componentes do mesmo e identificar suas propriedades de engenharia. A sondagem a percussão associada ao SPT resulta em um procedimento que permite tanto a amostragem do solo, como a determinação de valores da resistência do solo. (QUARESMA *et al*, 1998)

O método do SPT é amplamente utilizado na prática de Engenharia de Fundações, por apresentar simplicidade do equipamento e baixo custo, sendo uma rotineira, popular e econômica ferramenta de investigação geotécnica. Fornecendo resultados que podem ser relacionados a regras empíricas de projeto. (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012)

Segundo Quaresma *et al* (1998), a sondagem do solo é realizada a fim de se conhecer o tipo de solo através de amostragem (exame táctil-visual), a resistência (N) oferecida pelo solo e a posição dos níveis d'água quando encontrados.

ABNT (2001) define N como o índice de resistência à penetração do SPT, determinado pelo número de golpes necessários à cravação dos 30 cm finais do amostrador padrão, conforme o procedimento descrito na mesma.

Segundo a ABNT (1986), que determina o procedimento da sondagem a trado, é necessário coletar amostras a cada metro perfurado no caso de solos homogêneos, ocorrendo mudanças da composição, deve ser coletada uma amostra para cada tipo de solo neste metro perfurado. Define ainda, que a perfuração deve ser interrompida ao se atingir o nível d'água para se anotar a profundidade a qual se encontra.

O procedimento de ensaio SPT dá-se através da cravação do amostrador padrão pela queda livre do martelo (peso de 65kgs) a uma altura de 75 cm. (QUARESMA *et al*, 1998)

Existe no mesmo local a possibilidade de duas sondagens realizadas gerarem resultados distintos, devido à técnica da escavação, ao equipamento e ao procedimento de ensaio. No Brasil, por existir uma normalização específica através da ABNT (2001), esses aspectos, capazes de influenciar os resultados, reduzidos e estudados no trabalho de Belincanta (1998). Destacam-se como influenciadores os equipamentos: martelo, energia transferida pelos diferentes mecanismos de levantamento e liberação de queda, peso e uso de cepo de madeira; hastes, peso e rigidez, comprimento e perda de energia nos acoplamentos; amostrador, integridade da sapata cortante e uso de válvula. Existem ainda os efeitos das condições do solo, onde ao ser perfurado ocorre a resistência por atrito interno e externo na base do amostrador. (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012)

#### 2.1.2 Equipamentos e Procedimentos de Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento

Como definido anteriormente, a NBR 6484:2001 é responsável por prescrever o método de execução do ensaio de sondagens de simples reconhecimento com SPT, o qual será relatado neste item.

Segundo ABNT (2001) e ABGE (2013), os equipamentos utilizados, para realização do ensaio, compõe-se de: torre com roldana, tubo de revestimento, composição de cravação (hastes), trado-concha e helicoidal, trépano de lavagem, amostrador padrão, cabeças de bateria, martelo de 65 kg, baldinho com válvula de pé, medidor de nível d'água, metro, recipientes herméticos, entre outros. Um esquema de montagem do equipamento de sondagem é representado na Figura 1.



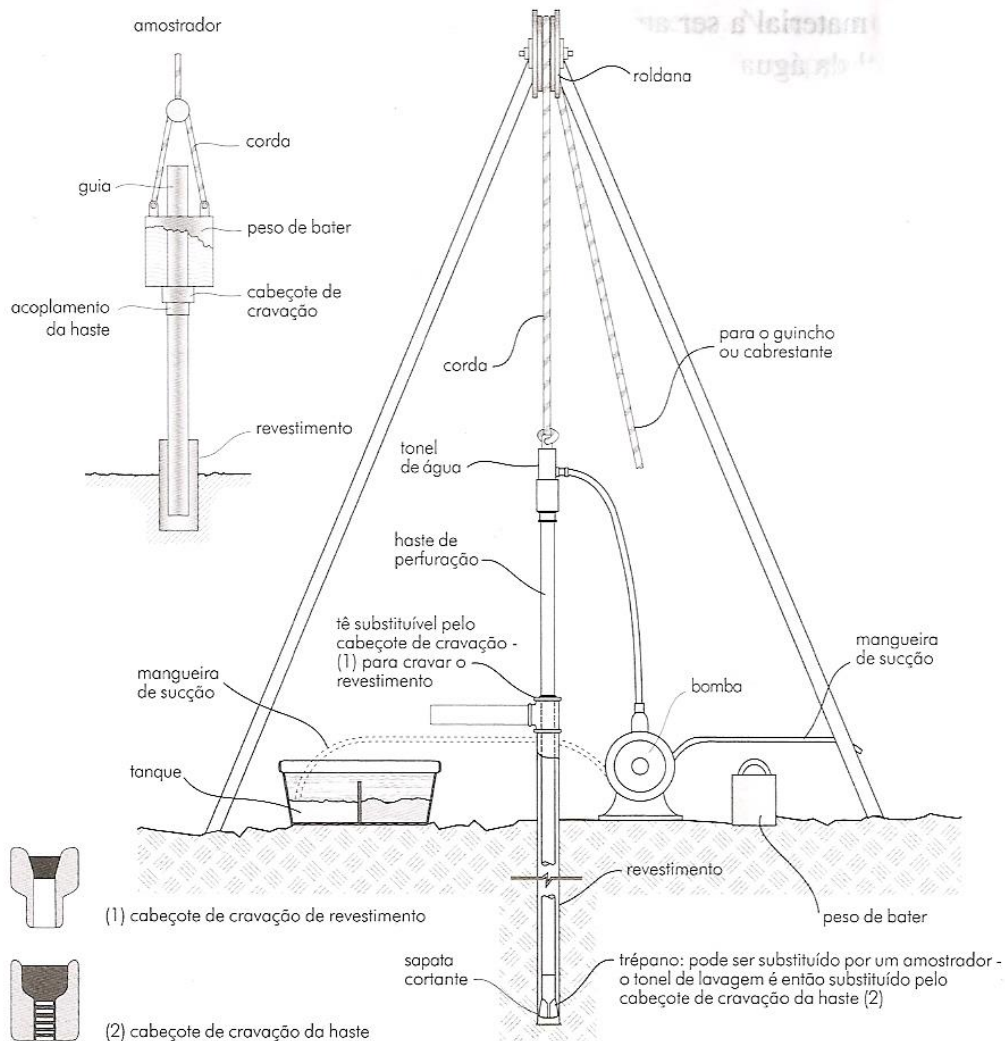


Figura 1: Esquema dos equipamentos de sondagem SPT.  
Fonte: Rebello, 2009.

O início da sondagem se dá com o emprego do trado-concha até atingir a profundidade de 1 m, instalando-se nesta profundidade o primeiro segmento do tubo de revestimento. Deve ser coletada amostra do solo nesta perfuração inicial com o trado concha, sendo as seguintes coletadas através do amostrador padrão. Nas operações seguintes de perfuração, intercaladas, sempre com as de ensaio a penetração, deve ser empregado o trado helicoidal.

O amostrador padrão é conectado às hastes e posicionado utilizando o tubo de revestimento como referência, marca-se nas hastes três segmentos de 15 cm. O martelo deve ser suavemente posicionado sobre a composição de cravação, e no caso de penetração no solo, deve ser registrado o comprimento no relatório de sondagem, este caso corresponde a zero golpes.

Prossegue então a cravação do amostrador através do impacto do martelo, que cai em queda livre a uma altura de 75 cm, é registrado então o número de golpes necessários à cravação de cada um dos trechos de 15 cm do amostrador no solo. Sendo o índice N de resistência do solo expresso como a soma dos últimos 30 cm da cravação.

Segundo ABGE (2013), em torno da haste guia, deve ser posicionado um coxim de madeira de lei, a fim de evitar o impacto entre aços do martelo e da composição de cravação, sendo o martelo erguido manualmente, com auxílio de corda e polia fixa na torre.

ABNT (2001) determina que a penetração do amostrador deve ser interrompida em três casos: quando em qualquer dos três segmentos (15 cm) o número de golpes ultrapassar 30; um total de 50 golpes for aplicado durante a cravação dos 45 cm; não for constatado avanço na penetração do amostrador em 5 golpes sucessivos do martelo.

O material é considerado impenetrável à percussão ainda, segundo a ABGE (2013), quando a penetração for inferior a 5 cm após dez golpes do martelo não se computando os primeiros cinco golpes do teste. É registrado o número de golpes e a penetração obtida.

Durante a perfuração, deve-se atentar a aumentos na umidade do solo, indicando a proximidade de lençol freático. Ao atravessar o nível d'água, a perfuração deve ser interrompida, e passa-se a observar a elevação do nível d'água no furo com leituras a cada 5 minutos durante pelo menos 15 minutos. A profundidade do lençol freático deve ser registrada.

A perfuração abaixo do nível do lençol freático é realizada com sistema de circulação de água, com bombeamento da água através das hastes até o fundo do furo. Para manter o furo aberto, pode-se optar pela utilização de tubo de revestimento ou estabilizante, como lama betonítica. (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012)

Quanto à coleta de amostras através do amostrador, as mesmas devem ser armazenadas em recipientes herméticos devidamente identificados, sendo conservadas pela empresa por pelo menos 60 dias após a apresentação do relatório. A classificação das amostras deve ser feita a fim de identificar granulometria, plasticidade, cor e origem.

Quanto à identificação das diferentes sondagens realizadas em um mesmo local, as mesmas são identificadas pelas letras SP seguidas de um número sempre crescente. (ABGE 2013)

### 2.1.3 Aplicação do SPT na Engenharia de Fundações

Para a escolha do tipo de fundação, dispõe-se de dados da edificação e dados do terreno, com base na análise destes casos é possível determinar as fundações tecnicamente viáveis, recaindo a escolha final sobre os fatores custo e prazo de execução. (CINTRA; AOKI, 2010)

Os dados da edificação são normalmente: tipo, porte, localização, valores das cargas de pilar, entre outras. E os dados de terreno são fornecidos pelas sondagens SPT ou obtidos através de seus resultados.

São muitas as aplicações dos resultados obtidos no ensaio de SPT, variando desde a identificação dos diferentes horizontes dos tipos de solo, correlação com outras propriedades geotécnicas e a previsão da tensão admissível das fundações diretas. Esses resultados podem ser analisados e interpretados por métodos indiretos e métodos diretos. (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012)

Schnaid e Odebrecht (2012) definem os métodos indiretos como aqueles onde os resultados servem na previsão de parâmetros constitutivos e representativos do comportamento do solo.

A exemplo de método indireto a NBR 6484/2001 em seu Anexo A apresenta um sistema de classificação do solo segundo o valor de N obtido no ensaio SPT, conforme representado na Tabela 1.

Tabela 1: Tabela os estados de compactidade e consistência

<b>Solo</b>	<b>Índice de resistência à penetração N</b>	<b>Designação</b>
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa (o)
	5 a 8	Pouco compacta (o)
	9 a 18	Medianamente compacta (o)
	19 a 40	Compacta (o)
	> 40	Muito compacta (o)

Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média (o)
	11 a 19	Rija (o)
	> 19	Dura (o)

Fonte: ABN, 2001

Quanto aos métodos diretos, Schnaid e Odebrecht (2012) os define como aqueles em que os resultados do SPT são utilizados na determinação da previsão de carga ou recalque de elementos de fundação.

Um método direto muito utilizado na Engenharia de Fundação é o cálculo da tensão admissível do solo, representado pela equação:  $\sigma_{adm} = kN_{SPT}$ , onde k depende do tipo de solo, geometria e sensibilidade da estrutura a recalques, dentre outros fatores. Já para o cálculo de recalque é preciso considerar procedimentos empíricos utilizando os resultados do ensaio SPT, sendo propostos alguns métodos, tais como: Shultze e Sherif (1973); Burland, Broms e De Mello (1977), Burland e Burbidge (1985) e Ruver e Consoli (2006). (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Segundo Shnaid e Odebrecht (2012), a carga de ruptura de um elemento de fundação pode ser calculada através da teoria clássica de capacidade de suporte. Porém, no Brasil, esta teoria é aplicada com maior frequência às fundações superficiais, sendo difundida como alternativa, para fundações profundas, o cálculo da capacidade de carga em relação ao N advindo do SPT.

O primeiro autor a apresentar fórmulas para o cálculo da capacidade de carga das fundações superficiais e profundas foi Terzaghi (1925). Posterior a ele merecem destaque os autores: Meyerhof (1951), Balla (1962), Vesic (1973, 1975), Hansen (1961, 1970) e De Beer (1970). (VELLOSO; LOPES, 2004)

Segundo Velloso e Lopes (2004), destacam-se como métodos semi-empíricos que utilizam o SPT: Meyerhof (1956), Aoki e Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978), Velloso (1981), Teixeira (1996), dentre outros.

Uma análise interessante sobre a relação entre o SPT e a escolha da fundação é que todo projeto de fundações por estacas compreende a previsão da cota de parada das estacas e a fixação da carga admissível. A definição

desta cota depende de dois fatores, sendo o primeiro deles referente às limitações do equipamento e o outro referente à falta de eficiência do equipamento com o aumento da resistência do solo, causando a parada da estaca. (CINTRA; AOKI, 2010)

Cintra e Aoki (2010) estabelecem que, para cada tipo de estaca, existe uma faixa de valores de N (Tabela 2) em que ocorre a parada da estaca, ou seja, seu limite máximo de penetrabilidade.

Tabela 2: Valores limites de N para parada das estacas

Tipo de estaca		N limite
Pré-moldada de concreto	$\varnothing < 30 \text{ cm}$	$15 < N < 25$ $\Sigma N = 80$
	$\varnothing \geq 30 \text{ cm}$	$25 < N \leq 35$
Perfil metálico		$25 < N \leq 55$
Tubada (oca, ponta fechada)		$20 < N \leq 40$
Strauss		$10 < N \leq 25$
Franki	em solos arenosos	$8 < N \leq 15$
	em solos argilosos	$20 < N \leq 40$
Estação e diafragma, com lama bentonítica		$30 < N \leq 80$
Hélice contínua		$20 < N \leq 45$
Ômega		$20 < N \leq 40$
Raiz		$N \geq 60$ (penetra na rocha sã)

Fonte: Cintra e Aoki, 2010

Conhecendo-se, portanto, as limitações do equipamento disponível, a capacidade de carga necessária e os limites máximos de penetrabilidade de cada tipo de estaca, é possíveis definir: o tipo, diâmetros ou dimensões da seção transversal e a profundidade da fundação a ser adotada no projeto.

## 2.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO

Inúmeros problemas de engenharia dependem da resistência ao cisalhamento do solo, tais como taludes, cortes, aterros, túneis e capacidade de carga de sapatas e estacas. Apesar de sua importância na engenharia, o

assunto não possui muitos estudos conclusivos que esclareçam o comportamento do solo.

Segundo CAPUTO (1988), a estabilidade do solo é influenciada pela resistência ao cisalhamento, e que toda a massa de solo se rompe quando esta é excedida. A resistência ao cisalhamento depende do atrito interno e coesão do solo de acordo com a equação de *Coulomb*:

$$\tau = c + \sigma * tg\varphi$$

Sabendo que a pressão efetiva apresenta uma parcela  $u$  denominada pressão neutra da água e de acordo com Hvorslev a coesão é função da umidade, podemos reescrever a equação da seguinte maneira:

$$\tau = f(h) + (\sigma - u) * tg\varphi$$

A pressão neutra da água é resultante da capilaridade da água no solo, que não mobiliza resistência ao cisalhamento (CAPUTO,1988).

Esse princípio foi demonstrado por Terzaghi utilizando um tanque com solo saturado e água. Aumentando o nível da água no tanque, a pressão total também aumenta no solo. Porém, não se observa qualquer diminuição de volume no solo, o que comprova que seu comportamento é totalmente independente das pressões totais (ORTIGÃO, 2007)

### 2.2.1 Coesão dos Solos

É a porção independente da tensão normal da resistência ao cisalhamento.

Para Borchardt (2005), é na coesão que os fatores físico-químicos da resistência ao cisalhamento se manifestam. Relaciona a coesão com as forças de Van Der Waals, que é a força que resulta das atrações intermoleculares. A presença de água tende a diminuir a coesão.

### 2.2.2 Ângulo de Atrito Interno

Caputo (1988) explica que atrito interno de um solo, inclui não só o atrito entre suas partículas, como o "atrito fictício" proveniente do entrosamento entre as partículas. Nos solos há uma infinidade de contatos pontuais, e não uma superfície nítida e única de contato.

### 2.2.3 Ensaio de Cisalhamento do Solo

Para a realização de ensaios de laboratório para determinação da resistência ao cisalhamento as amostras utilizadas deverão reproduzir as condições da obra quando deformadas, ou devem ser utilizadas amostras indeformadas.

O ensaio de resistência ao cisalhamento são detalhados pela BS 1377- partes 7 e 8. (BRITISH STANDARD, 1990).

As principais formas de determinação da resistência ao cisalhamento são cisalhamento direto e ensaio triaxial.

*Cisalhamento Direto:* É realizado por um instrumento denominado caixa de cisalhamento composto por duas partes, de alturas iguais, deslocáveis horizontalmente entre si. São colocadas pequenas placas porosas acima e abaixo da amostra, além de uma folga entra as partes superior e inferior da caixa, para permitir que a drenagem ocorra livremente em amostras saturadas.

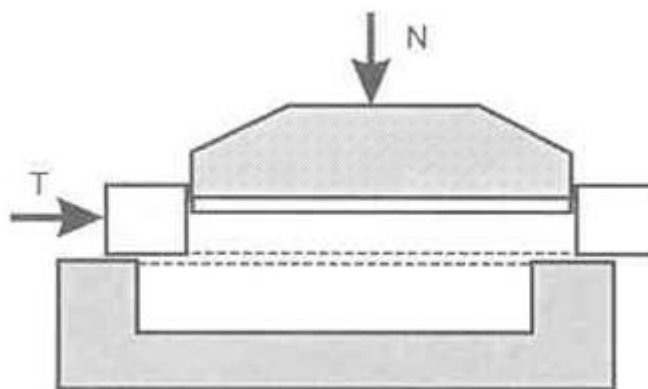


Figura 2: Ensaio de Cisalhamento Direto

Fonte: Pinto, 2006

São então aplicadas duas forças: uma horizontal  $N$  e a força cisalhante  $T$ , que é aplicada gradualmente (Figura 2). São medidos os deslocamentos  $\Delta l$  e as forças cisalhantes correspondentes, até a ruptura do corpo-de-prova. O experimento é repetido para várias tensões normais  $N$ .

Com o conjunto de pares de dados é plotado um gráfico semelhante ao apresentado na Figura 3. Pode-se então traçar uma linha de tendência e extrair os parâmetros de atrito (inclinação da reta) e coesão (componente constante).

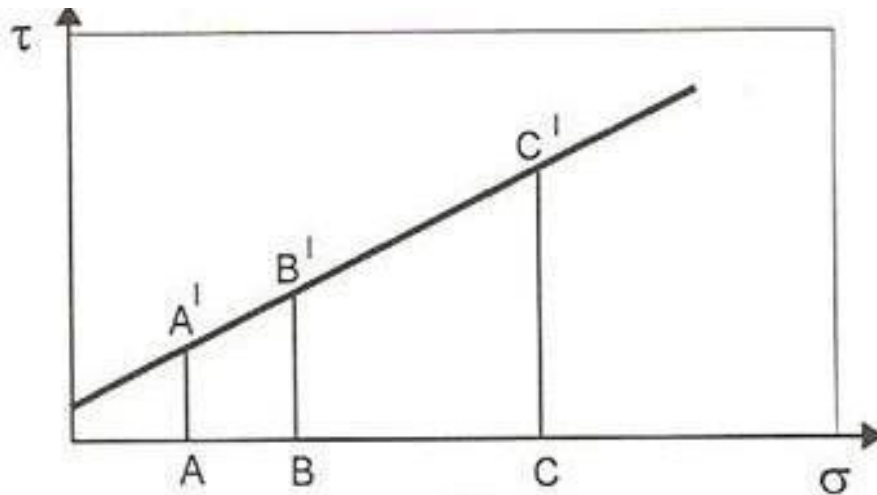


Figura 3: Gráfico de Coulomb - Cisalhamento Direto  
Fonte: Pinto, 2006

Craig (2007) cita como uma das principais desvantagens do ensaio por cisalhamento direto, a impossibilidade de medir a pressão neutra devido à dificuldade de controlar a drenagem. Desta forma, adota-se como a pressão efetiva a tensão normal aplicada. Além disso, como a ruptura acontece de maneira progressiva, a área sob as cargas verticais e horizontais não será constante, variando também a tensão. Craig cita como principal vantagem a facilidade da preparação da amostra.

*Ensaio Triaxial:* Ao contrário do ensaio de cisalhamento direto, no ensaio triaxial as condições de drenagem podem ser controladas, possibilitando ensaios em solos saturados (CRAIG, 2007).

Como mostra a Figura 4, o equipamento aplica uma carga vertical através de um pistão e uma pressão confinante sobre a superfície do corpo de prova, envolto em uma membrana.



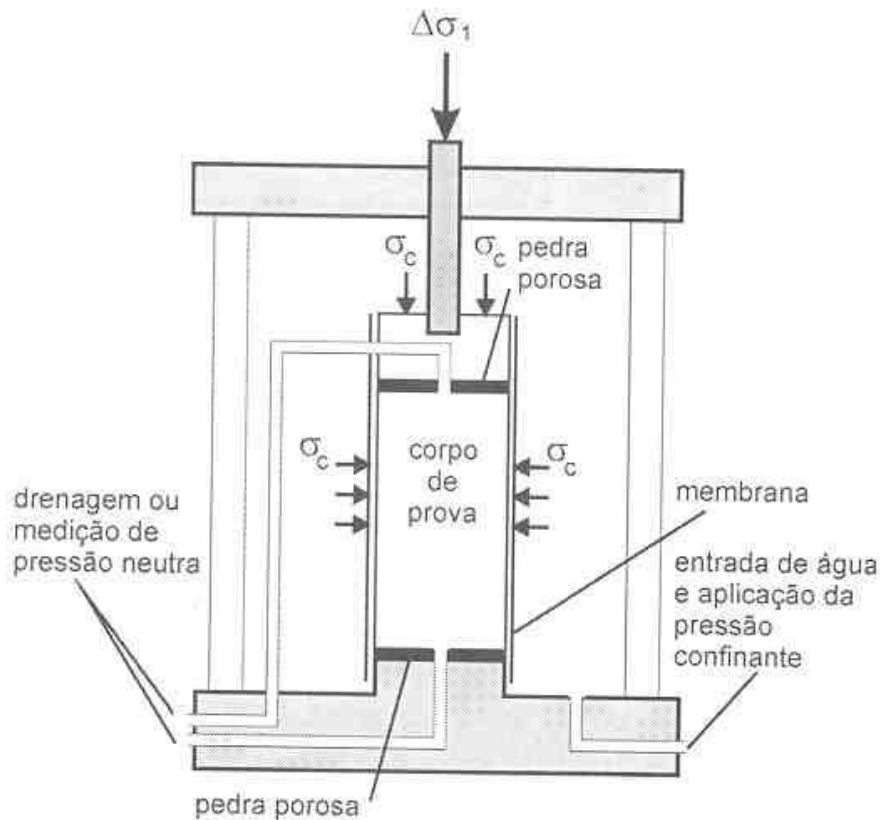


Figura 4: Ensaio Triaxial

Fonte: Pinto, 2006

Primeiramente é aplicada a pressão confinante, e depois, gradualmente, ocorre a aplicação da carga axial até a ruptura. O ensaio é realizado para várias pressões confinantes, e para cada par de tensões pode ser desenhado um círculo de Mohr, no qual a pressão confinante é a tensão principal menor e a soma da pressão confinante e carga axial é adotada como tensão principal maior. Por fim, é traçada a envoltória (Figura 5) dos círculos para determinação dos parâmetros de cisalhamento desse solo.

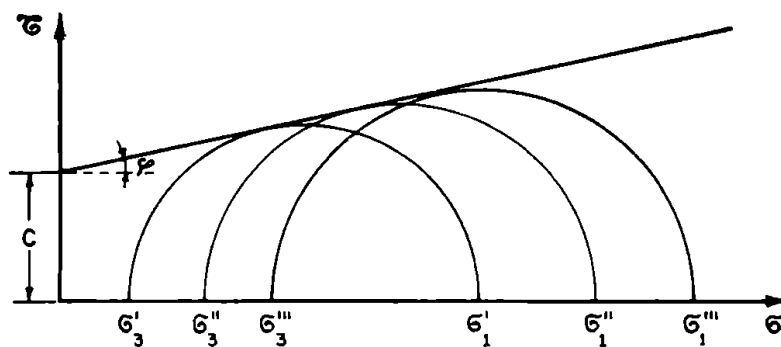


Figura 5: Envoltória de Mohr-Ensaio Triaxial

Fonte: Caputo, 1988

Craig (2007) explica que a pressão neutra pode ser medida por um transdutor eletrônico de pressão conectado com o corpo-de-prova por um tubo preenchido por água.

## 2.3 MODELO NUMÉRICO DE TERRENO

### 2.3.1 Considerações Gerais

Segundo Felgueiras (1998) um Modelo Numérico de Terreno (MNT) ou Modelo Digital de Terreno (MDT) é uma representação matemática computacional de um fenômeno espacial em uma região da superfície terrestre. Geralmente associado à altimetria, pode ser utilizado também na modelagem de informações geológicas, levantamentos de profundidade de rios ou mares, dados geofísicos e geoquímicos, dentre outras aplicações.

Ou seja, é a representação quantitativa de uma grandeza que varia continuamente no espaço. Procura reproduzir a superfície real a partir de algoritmos e de um agrupamento de amostras (x, y) com atributos (z) que descrevem o fenômeno estudado, em um referencial qualquer. (CÂMARA; MEDEIROS, 1998)

Essa representação computacional de uma superfície real só é possível através da criação de um modelo digital, baseado em equações analíticas ou uma grade de pontos. Através das grades é possível elaborar e implantar projetos de diversas naturezas, como cálculo de volumes, áreas, desenhos de perfis, geração de mapas de declividade e aspecto, imagens em níveis de cinza ou sombreada, dentre outros. (FELGUEIRAS, 1998)

Segundo Felgueiras (1998), a criação do MNT acontece em três etapas, sendo elas: amostragem (aquisição de amostras representativas), modelagem (criação de estruturas de dados e definição da superfície de ajuste) e aplicação (procedimentos de análise executados sobre os modelos digitais).

Namikawa et al, (2003) ressalta que os MDTs são utilizados em Sistema de Informações Geográficas (SIG) nas análises que os utilizam isoladamente ou integrados com outros tipos de dados.

Um SIG por sua vez é um conjunto de ferramentas utilizadas na coleta e tratamento de informações espaciais, culminando na geração de mapas, relatórios, arquivos digitais, dentre outros. Conta com recursos para armazenamento, gerenciamento, manipulação e análise de dados. (NAMIKAWA, 1995)

Segundo Felgueiras (1998) a modelagem é realizada de forma a possibilitar manipulação conveniente e análise eficiente pelos algoritmos contidos no SIG.

Alguns sistemas são mais abrangentes que o SIG, contemplando qualquer tipo de geoprocessamento de dados georeferenciados, como é o caso do SPRING, que contém ferramentas de um sistema de processamento de imagens de sensores remotos. O SPRING é, portanto, um sistema de Geoprocessamento. (NAMIKAWA, 1995)

Os modelos mais utilizados são os modelos de grade regular retangular e os modelos de grade irregular triangular.

### 2.3.2 Modelo de Grades Regulares

Medeiros (1998) define uma grade regular como uma representação matricial onde cada elemento da matriz está associado a um valor numérico. Um exemplo de grade regular é apresentado na Figura 6.

Segundo Felgueiras (1998) um modelo de grade regular pode ser gerado tanto para amostras regularmente espaçadas na superfície como para amostras irregularmente espaçadas.

Deve-se gerar, portanto, uma grade regular que represente o mais fielmente possível a superfície real, através das informações nas isolinhas e pontos amostrados. No caso de amostras irregularmente espaçadas é necessário determinar-se interpoladores matemáticos. (NAMIKAWA, 1995)

Os interpoladores possuem a função de estimar os valores para as células que não possuem valores definidos considerando-se a vizinhança de cada célula estimada. No caso de altimetria é comum o uso de funções de ponderação por inverso do quadrado da distância, por exemplo. Já no caso de grandezas geofísicas ou geoquímicas é preferível o uso de filtragem bidimensional ou geoestatística, como a krigagem. (MEDEIROS, 1998)

Em casos onde a quantidade de amostras é excessiva, é difícil definir uma função que satisfaça todas as variações espaciais, neste caso é utilizada uma interpolação onde o cálculo de cada elemento da grade é baseado em uma quantidade preestabelecida de amostras próximas a ele, conhecida como interpolação local. (FELGUEIRAS, 1998)

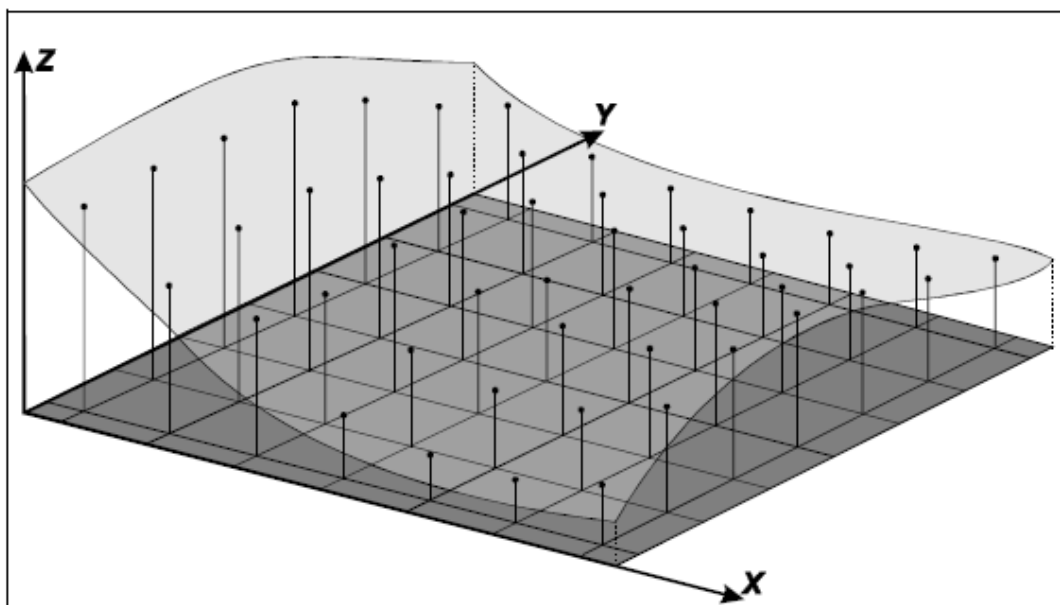


Figura 6: Superfície e grade regular  
Fonte: Namikawa, 1995

### 2.3.3 Modelos de Grade Irregular Triangular

A *Triangular Irregular Network* (TIN) é uma representação da superfície através de um conjunto de faces triangulares interligadas como mostrado na Figura 7. Cada vértice armazena as coordenadas  $(x, y)$  e um atributo  $(z)$  que pode ser a elevação ou altitude. A maioria dos SIGs ou sistemas de Geoprocessamento utilizam para a modelagem através de uma TIN a triangulação de Delaunay. (MEDEIROS, 1998)

Segundo Felgueiras (1998), diferente de uma grade retangular, nas grades triangulares, os vértices da mesma não precisam de estimação pois são representados pelos dados já amostrados.

Em uma grade triangular além de eliminar um fator de diminuição de confiabilidade ao evitar estimativas dos vértices da grade, também são eliminadas redundâncias, visto que a malha triangular pode ser fina em regiões

de variação intensa e alongadas em regiões de menor variação, portanto a qualidade do modelo não é influenciada pela seleção do espaçamento por parte do usuário. (NAMIKAYA et al, 2003)

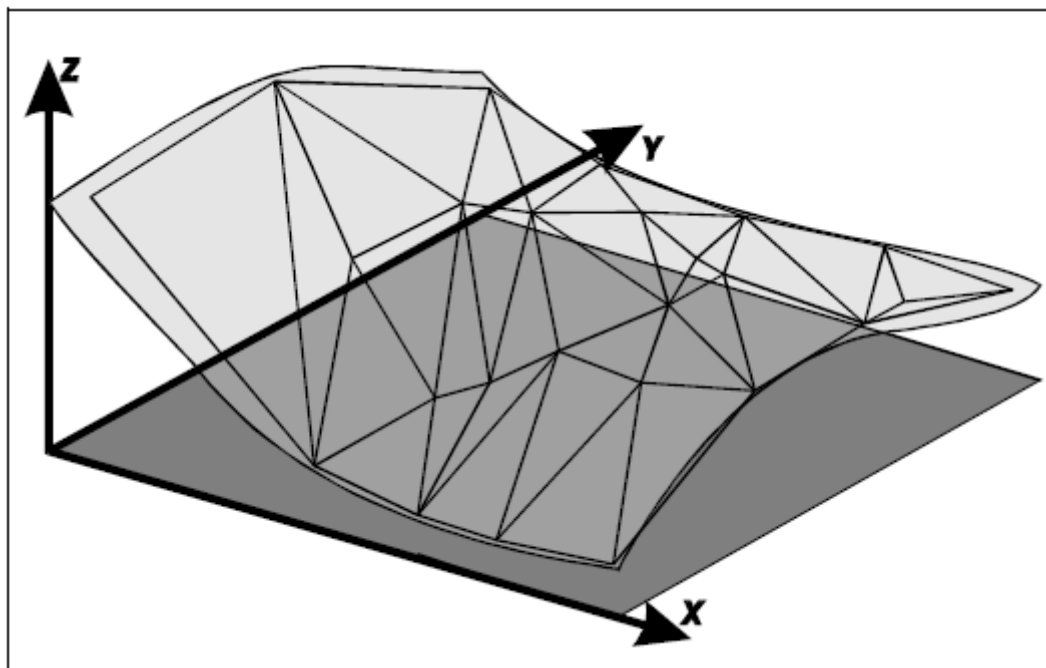


Figura 7: Superfície e malha triangular

Fonte: Namikawa, 1995

Medeiros (1998) ressalta que quanto mais equiláteros forem as faces dos triângulos formados pela grade, maior a exatidão da representação da superfície.

Namikawa et al (2003) reforça ainda que a consideração é baseada no fato de que a superfície interna destes triângulos deve depender apenas dos pontos mais próximos a ela, ou seja, as distâncias entre os pontos que formam os triângulos devem ser as menores possíveis.

Segundo Felgueiras (1998), é simples mostrar que dado um conjunto com mais de 4 amostras possibilita que sejam formadas mais de uma malha triangular, como mostrado na Figura 8.

A triangulação (a) é um exemplo de triangulação de Delaunay, enquanto (b) não representa triângulos de Delaunay.

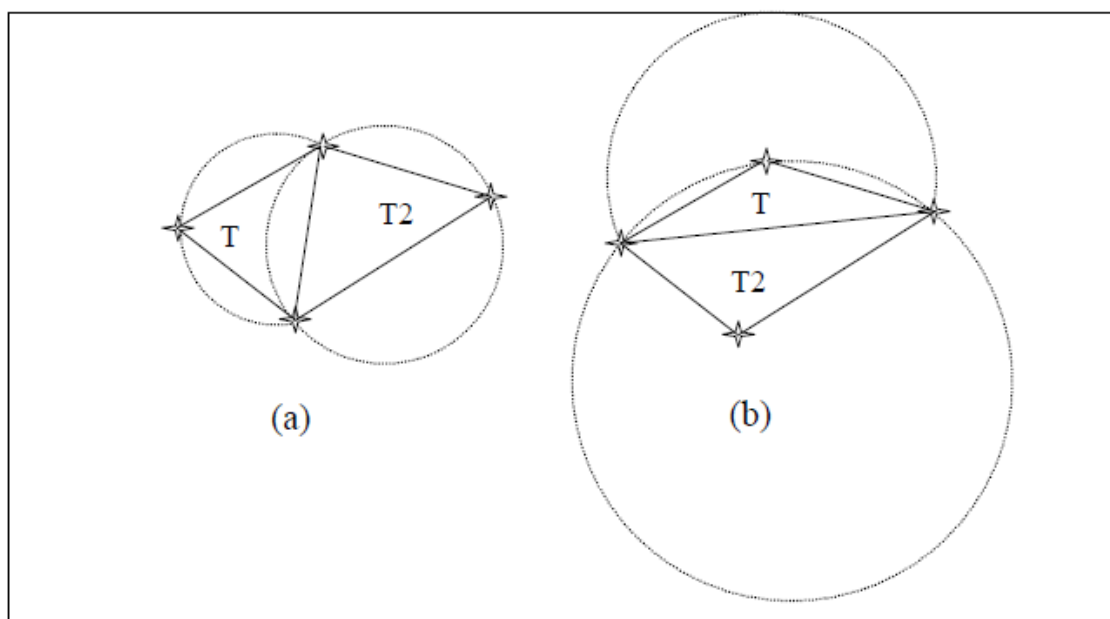


Figura 8: Exemplos de triangulações diferentes sobre um mesmo conjunto  
 Fonte: Medeiros, 1998

Segundo Namikawa et al (2003), a triangulação de Delaunay é a mais equilateral possível e apresenta a propriedade do circuncírculo, onde um círculo que passa pelos três vértices do triângulo não contém nenhum outro ponto do conjunto em seu interior.

Portanto, o critério utilizado nesta triangulação consiste na maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo, ou seja, evita-se a criação de triângulos com ângulos internos agudos. (FELGUEIRAS, 1998)

Na construção de um modelo é importante que as características topográficas sejam preservadas, adotando-se restrições aos modelos gerados, ou seja, primeiro são consideradas as características da superfície e depois o critério do circuncírculo. Os elementos que caracterizam a região são chamados elementos característicos ou linhas características, podem ser linhas de vale, crista ou pontos de sela. (NAMIKAWA et al, 2003)

Segundo Felgueiras (1998), um método para gerar uma triangulação com restrições é gerar uma triangulação de Delaunay pura e depois transformar o modelo considerando-se as linhas características.

## 2.4 GEOESTATÍSTICA

Segundo Landim (2006), a Geologia era considerada uma ciência qualitativa, porém, nos últimos 40 anos, têm ocorrido uma mudança notável para um foco quantitativo, baseada em três fatores: introdução de modelos matemáticos para explicação de fenômenos geológicos, integração dos diversos fenômenos geológicos através da Teoria da Deriva Continental e a facilidade de acesso a computadores digitais.

A utilização do termo Geoestatística teve seu início nos anos 1960, através de G. Matheron, na França, após a realização de tratamento formal da técnica de estimativa para o cálculo de reservas minerais, desenvolvida empiricamente por Daniel G. Krige e H. S. Sichel, na África do Sul anos antes. Foi dado o nome de Geoestatística para o estudo das variáveis regionalizadas. (LANDIM, 2006)

Segundo Yamamoto e Landim (2013), inicialmente a aplicação era apenas em Geologia Mineira na lavra e prospecção, passando a ter ampla aplicação a partir da década de 1980. Atualmente, a Geologia se estende para outros campos como Agricultura de Precisão, Análise Espacial de Crimes, Cartografia, Climatologia, Ecologia da Paisagem, Engenharia Florestal, Epidemiologia, Geologia Ambiental, Geologia do Petróleo, Geotecnia, Hidrogeologia e Pedologia.

Atualmente o termo Geoestatística é consagrado como um tópico especial da estatística aplicada que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, as quais têm um comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e as totalmente determinísticas. (LANDIM, 2006)

O estudo geoestatístico parte de uma amostra, constituída por um conjunto de observações, utilizada para inferir as propriedades do fenômeno espacial estudado, sendo este fenômeno a população da qual foi extraída a amostra. Portanto, a finalidade da Geoestatística é a de caracterizar espacialmente uma variável de interesse através do estudo de sua distribuição e variabilidade. (YAMAMOTO; LANDIM, 2013)

Segundo Yamamoto e Landim (2013), a reprodução das características do fenômeno espacial estudado é chamada de interpolação ou estimativa.

Sendo esta interpolação realizada através do ajuste de funções matemáticas locais ou globais, estando a qualidade da inferência dessas características atrelada ao tamanho da amostra e da distribuição espacial dos pontos amostrais.

Os métodos estimadores podem ser divididos em modelos determinísticos e modelos estocásticos, sendo o primeiro baseado em critérios puramente geométricos, e o segundo têm os valores interpretados como provenientes de processos aleatórios. Os modelos geoestatísticos são modelos estocásticos de estimativa. (YAMAMOTO; LANDIM, 2013)

Após entender a sequência de fenômenos geológicos, é evidente a necessidade de estabelecer equações matemáticas representativas, a fim de que o tratamento matemático das observações através de um processo de atribuição de valores traga melhoria em diversos campos da Geologia, como a amostragem, comprovação de hipóteses e na previsão quantitativa. (LANDIM, 2006)

Neste sentido, a metodologia geoestatística se destaca pois é capaz de quantificar a incerteza associada à estimativa e ao estimador empregado, em detrimento dos métodos determinísticos que não compreendem esta possibilidade.

#### 2.4.1 Variáveis Regionalizadas

Ao serem analisadas amostras, estas apresentarão valores diferentes, porém, é provável que sejam encontrados resultados semelhantes nas proximidades da amostra, caso exista correlação espacial no fenômeno estudado.

Segundo Landim (2006), o valor de cada ponto relaciona-se com valores obtidos de pontos a certa distância, sendo o grau de influência inversamente proporcional à distância entre os pontos.

Cada ponto no espaço não apresenta um único valor, mas sim uma distribuição de probabilidade de ocorrência deste valor. Uma variável regionalizada é, portanto, uma única realização de uma função numérica que possui dependência espacial, descrevendo melhor o padrão do fenômeno estudado, visto que apresenta continuidade. (YAMAMOTO; LANDIM, 2013)



## 2.5 PROCEDIMENTO DE ESTIMATIVA POR KRIGAGEM

### 2.5.1 Considerações Iniciais

Segundo Landim (2006), são duas as ferramentas fundamentais dos métodos geoestatísticos: o semivariograma e a krigagem.

O semivariograma é a ferramenta que permite modelar a dependência espacial de uma variável, ou seja, corresponde à variação geológica do fenômeno em relação às distâncias entre as amostras obtidas. (GUIMARÃES, 2004)

Mostra o grau de dependência espacial entre estas amostras e para sua construção é utilizado a diferença do quadrado dos valores obtidos. (LANDIM, 2006)

Segundo Landim (2006), a construção de um semivariograma depende de um conjunto de valores em um mesmo suporte geométrico, dispostos ao longo de uma linha ou uma série de linhas paralela, onde será responsável por expressar o comportamento espacial de uma variável regionalizada.

Uma aplicação imediata dos semivariogramas é a interpolação dos dados e mapeamento da variável estudada. Ao interpolador dá-se o nome de krigagem, advindo do engenheiro sul-africano D. G. Krige. (GUIMARÃES, 2004)

Segundo Jakob e Young (2006), a Geoestatística permite o cálculo das distâncias entre as observações, dadas as informações espaciais das amostras, o que permite a modelagem da autocorrelação entre elas como uma função da distância. A mais comum destas funções é o semivariograma, do qual depende a krigagem.

Krigagem é um processo de estimativa a partir de valores considerados interdependentes pelo semivariograma, baseado na estimativa por médias móveis. (LANDIM, 2006)

A ideia básica é estimar um valor desconhecido de uma variável estudada com base em uma série de valores já conhecidos, quando os valores

conhecidos correspondem ao mesmo atributo que o valor estimado, chama-se krigagem, quando corresponde a atributos diferentes chama-se cokrigagem. (JOURNEL, 1989)

A diferença da krigagem para os outros métodos de interpolação reside na construção de uma matriz de covariância espacial capaz de determinar pesos diferentes para cada amostra, tratamento de redundância dos dados, consideração da vizinhança na inferência e erro associado ao valor estimado. (CAMARGO, 1998)

Ou seja, se existe dependência espacial, o peso de cada valor estimado varia de acordo com a distância entre ele e os valores envolvidos nas estimativas. (GUIMARÃES, 2004)

Segundo Landim (2006), a krigagem é utilizada para: previsão do valor pontual de uma variável regionalizada, servindo de base para cartografia automática por computador; cálculo médio de uma variável regionalizada para um volume maior que o suporte geométrico.

Existem diversos tipos de krigagem, sendo as mais comuns, a krigagem simples, a ordinária, a universal, de indicadores, de probabilidade e a disjuntiva. (JAKOB; YOUNG, 2006)

Pelo fato de que na krigagem simples a média deve ser conhecida e constante, sendo a média geral difícil de se conhecer em função da tendência dos dados (JAKOB; YOUNG, 2006), e os demais tipos não se mostrarem aplicáveis ao objetivo do trabalho, serão tratadas apenas a krigagem ordinária e cokrigagem.

### 2.5.2 Krigagem Ordinária

Segundo Jakob e Young (2006), a krigagem ordinária assume um modelo onde a média é constante, porém desconhecida.

Assim como na krigagem simples, o valor da variável pode ser estimado através de combinação linear, como por exemplo, ponderação pelo inverso das distâncias. O erro associado às combinações lineares pode ser minimizado se forem feitas diversas estimativas, aproximando desta forma, o erro à zero, configurando um estimador de confiança. (LANDIM, 2006)

Burrough (1998 *apud* CAMARGO, 1998) afirma que a krigagem ordinária é um interpolador exato, pois os valores estimados irão coincidir com os valores amostrados.

As formulações da krigagem ordinária podem ser encontradas nos trabalhos de Journel (1989), Landim (2006), Camargo (1997) e Camargo (1998), dentre outros.

### 3 METODOLOGIA

Para a realização do presente trabalho de análise quantitativa, seguiu-se um conjunto de etapas, descritas a seguir:

#### 3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta etapa foi realizada no decorrer de todo o trabalho, atualizando sempre que necessário o capítulo 2. Consistiu da leitura e compilação de livros, periódicos, dissertações e teses, entre outros, que tratam da mecânica dos solos, fundações e geoprocessamento de dados.

#### 3.2 LEVANTAMENTO E MONTAGEM DO BANCO DE DADOS

Relatórios de sondagem do perímetro em estudo forneceram os dados geotécnicos. De posse dos dados, foi utilizado o aplicativo *Microsoft Excel 2013* para *Windows da Microsoft® Corporation. 2013*, para compilação, organização e estruturação das informações em forma de um banco de dados. Foram organizados em uma planilha todos os dados relevantes para a pesquisa encontrados nos relatórios de sondagens. Posterior a esta etapa de geração de banco de dados geral, foram compilados em planilhas separadas, apenas os dados relevantes para cada um dos objetivos propostos, gerando-se, portanto, bancos de dados distintos para cada operação realizada futuramente.

Foi utilizada base cartográfica digital para análise dos dados e elaboração dos documentos cartográficos. O mapa utilizado (mapa base de Pato Branco – PR) estava no formato *\*.dwg.* e continha informações acerca do arruamento e principais rios. O mapa foi fornecido pelo IPPUPB.

Para tratamento do mapa digital e locação dos pontos foi utilizado o *software AutoCAD 2014* (versão para estudantes) para *Windows*, desenvolvido pela *Autodesk Inc.*

### 3.3 TRATAMENTO DOS DADOS

Nesta etapa, foram realizadas as análises estatísticas, geoestatísticas e aplicação de algoritmos de interpolação para o tratamento de dados de N dos SPTs.

Para interpolação dos dados foi utilizado o programa *SAGA* (*System for Automated Geoestatistic Analyses*) na versão 2.1.2 para *Windows*, permitindo as análises estatísticas e geoestatísticas (krigagem ordinária).

Nesta etapa foi utilizado como software auxiliar o *QGIS*, versão 2.16.2, programa gratuito e de código aberto, visto que o *software SAGA* pode ser utilizado como um complemento ou extensão dentro do *QGIS*, facilitando a utilização e desenvolvimento das respectivas interpolações.

### 3.4 RELACIONANDO CISALHAMENTO E SPT

Foi determinada a resistência ao cisalhamento do solo por meio matemático, usando valores de N e profundidade do SPT. Para tanto, o primeiro passo foi determinar o valor de N1 (N corrigido para tensão de referência de 100kN) utilizando-se das equações de Liao e Withman (1986):

$$\sigma_v = z * \gamma_{nat}$$

$$CN = \sqrt{\frac{100}{\sigma_v}}$$

$$N1 = CN * N$$

Onde:

$\sigma_v$  – Tensão vertical efetiva;

Z – Profundidade;

$\gamma_{nat}$  – Peso específico do solo natural;

CN – Coeficiente de correção;

N – Número de golpes SPT;

N1 – Valor corrigido de N.

Em seguida N foi corrigido para um valor normalizado  $N_{60}$ , com base na norma americana:

$$N_{60} = \frac{N * Energia aplicada}{0,6}$$

Para Schnaid (2000) energia aplicada é de 0,66.

Para a determinação do ângulo de atrito foi utilizada a formulação de Hatanaka e Uchida (1996):

$$\varphi = 20 + \sqrt{15,4 * N1_{60}}$$

Pode-se então determinar a tensão de cisalhamento:

$$\tau = \sigma_v * tg\varphi_{(N1)60}$$

Por fim, fixando  $\varphi$  como o menor valor obtido no ponto estudado, é calculada a sua coesão  $c'$ :

$$c' = \tau - \sigma_v tg\varphi$$

### 3.5 DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS E REDAÇÃO FINAL

Etapa na qual os resultados do tratamento dos dados foram utilizados na elaboração de mapas cartográficos. Para tal foi utilizado o SAGA, juntamente com o QGIS na elaboração dos mapas temáticos de limites de parada das estacas e profundidade do impenetrável, realizando posterior sobreposição com o mapa base de Pato Branco através do AutoCAD.

Terminada a preparação dos documentos cartográficos, procedeu-se a redação da discussão dos resultados e conclusão, aonde são apresentados os resultados do trabalho.

## 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Nesse capítulo será apresentada a área de estudo, com suas características de localização, clima, aspectos geomorfológicos e geológicos.

### 4.1 LOCALIZAÇÃO

Pato Branco localiza-se no sudoeste do Paraná, com população estimada de 79.869 habitantes.

A agricultura representa a maior fatia da economia do município. A cidade também se destaca na microrregião como um centro de serviços com ênfase nos setores da saúde e da educação, além de dispor de um pequeno centro tecnológico devido à incentivos fiscais a empresas dos setores de informática e eletroeletrônico.

É drenado pela bacia do Rio Chopim, sub-bacia do Rio Iguçu.

### 4.2 CLIMA

O clima de Pato Branco é o mesotérmico, caracterizado por temperaturas médias no mês mais frio inferiores a 18 °C e temperaturas médias no mês mais quente acima de 22 °C, com verões relativamente quentes, geadas frequentes e chuvas bem distribuídas ao ano. (TABALIPA, 2008)

Pato Branco está sujeito a nevascas ocasionais, como nos anos de 1994, 2000 e 2013. Trata-se de um clima tipicamente subtropical úmido. A continentalidade e a altitude moderada da região também caracterizam o clima da cidade.

O volume de chuva média anual do município é superior a 2100mm uniformemente distribuídas nas quatro estações, também bem definidas e sensíveis.

### 4.3 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

A altitude do local varia de uma mínima de 600m a uma máxima de 1000m. O relevo é formado pela sobreposição de basáltica e de ácidos. O relevo dessa área é marcado pelo predomínio de feições planas, suave-onduladas e onduladas de declividade de 0 a 20%. No entanto há presença também de regiões fortemente onduladas (20-50%). A cobertura vegetal está preservada somente nos pontos mais acidentados pela dificuldade de ocupação urbana. (TABALIPA, 2008)

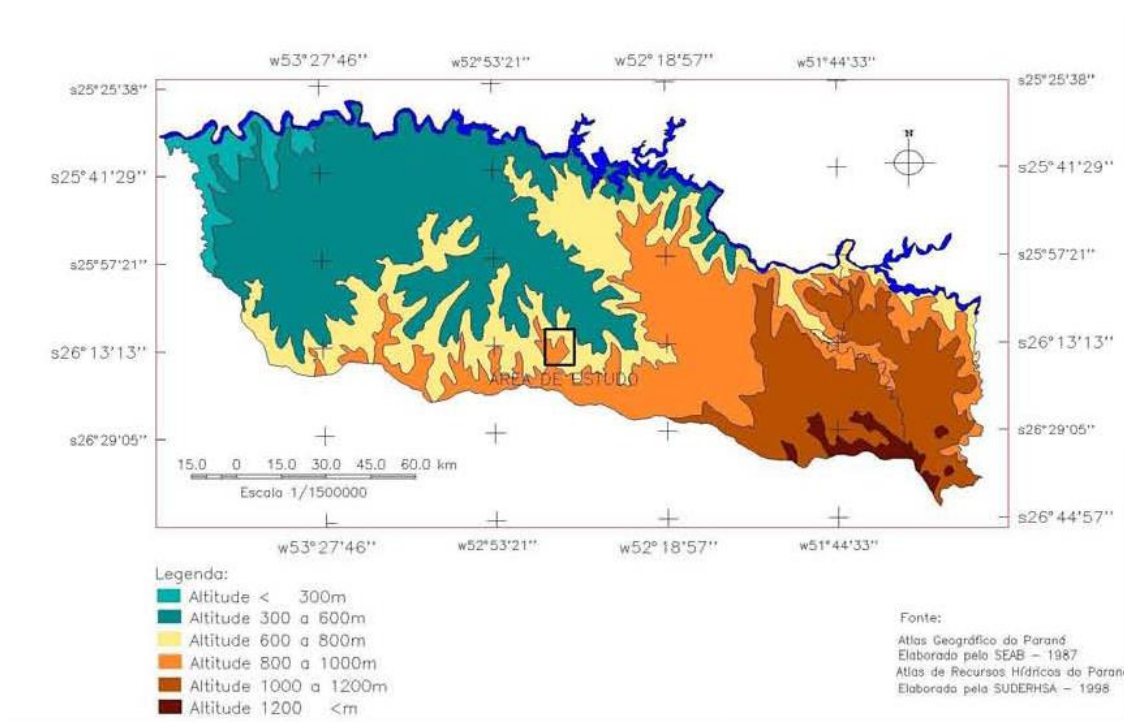


Figura 9 - Carta de relevo do sudoeste do Paraná.  
Fonte: Suderhsa (1998) in Tabalipa (2008).

#### 4.4 ASPECTOS GEOLÓGICOS

Sobre a geologia do local pode-se dizer que se enquadra no Grupo São Bento de rochas basálticas, da Formação Serra Geral. As rochas são efusivas básicas toleíticas com basaltos maciços e amigdaloides, além de intercalações de arenito e rochas vulcânicas ácidas. (TABALIPA, 2008)

Pode-se observar a afloração do basalto, que é a rocha predominante, em cortes de estradas, na forma de matacões e blocos. Os basaltos predominantes são os da Formação Serra Geral. Suas principais



características, segundo Tabalipa (2008), são a coloração cinza média ou preta e textura variando de fanerítica média a afanítica.

O latossolo, predominante na região, é resultado da alteração das rochas basálticas sob influência do clima.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 GEORREFERENCIAMENTO DE FUROS DO SPT E DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A necessidade de se conhecer a exata localização geográfica dos furos de sondagens utilizados se dá quando o futuro tratamento e manipulação dos dados serão feitos por meio de interpolações, nas quais um atributo de grande importância é a distância relativa entre os pontos.

Para tal foram inseridos os pontos, correspondentes a todos os furos das sondagens disponíveis para estudo, no mapa base de Pato Branco-PR, fornecido pelo IPPUPB em formato dwg, através das informações fornecidas nos respectivos relatórios de sondagens (rua, quadra, lote e locação dos pontos nos terrenos).

Estando o mapa base já georreferenciado, foi possível obter a localização (x,y) de cada furo em coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) através do próprio mapa base disponível.

Para delimitação da região efetiva de estudo dentro do perímetro urbano de Pato Branco, procurou-se compreender a maior quantidade de furos de sondagem possível, excluindo-se apenas aqueles fora do perímetro urbano ou que se apresentassem relativamente distantes dos demais. Desta forma delimitou-se como distância máxima entre os pontos o equivalente a 1000 m, sendo descartadas as sondagens que estivessem a uma distância superior.

A região foi então selecionada e demarcada conforme a figura 10. Contempla uma área de 7,52 km<sup>2</sup> dentro do perímetro urbano e abrange um total de 111 furos de sondagens distintos, compreendidos em 34 relatórios de sondagens.



Figura 10: Delimitação da região de estudo.

Fonte: Elaborado pelos autores

A área delimitada compreende, portanto, uma densidade de pontos de aproximadamente 0,222 km<sup>2</sup> por sondagem, resultado este que está longe do ideal como será possível verificar nas interpolações a seguir, onde a quantidade de dados pode-se mostrar insuficiente na análise de certos atributos em determinadas áreas, não representando com fidelidade a realidade do solo estudado.

Porém, constitui uma amostragem grande o suficiente para realização das pesquisas e estudos pré-determinados e suas conseqüentes interpretações e discussões, conforme objetivos estabelecidos anteriormente.

## 5.2 PROFUNDIDADE LIMITE DE PARADA DAS ESTACAS

### 5.2.1 Considerações Gerais

A caracterização geotécnica do solo se deu através da determinação das profundidades limites de parada de determinados tipos de estacas conforme os dados fornecidos pelos relatórios de sondagens englobados na região de estudo determinada preliminarmente.

Estes limites foram embasados na tabela 2, de Cintra e Aoki (2010), a qual fornece o N limite de parada de 11 tipos distintos de estacas. No presente trabalho foram escolhidos apenas os tipos mais usuais e conhecidos na região, sendo eles: estaca pré-moldada de concreto com diâmetro menor que 30cm, pré-moldada de concreto com diâmetro maior ou igual a 30cm, Strauss, Franki para solos argilosos e hélice contínua.

Em seguida foram coletadas as profundidades de cada furo onde o N atingido era igual ou superior a 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e também a profundidade do impenetrável em cada caso, bem como a profundidade correspondente ao somatório de N igual a 80 ou superior. Estes dados foram dispostos no banco de dados em forma de planilha, juntamente com a localização geográfica dos furos, conforme exemplo na figura 11, onde são representados as sondagens classificadas como 1 e 2 e seus 3 respectivos furos. Os limites de N não atingidos nos respectivos relatórios de sondagens tiveram os valores preenchidos com “#####” na falta de valores numéricos a fim de destaca-los.

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
ÍNDICE	FUROS	X	Y	15	20	25	30	35	40	45	$\Sigma = 80$	IMPENETRÁVEL
1	SP1	331759,22	7094032,48	5,00	6,00	6,00	6,00	7,45	7,45	#####	#####	7,45
1	SP2	331751,79	7094024,27	3,00	6,45	6,45	6,45	6,45	#####	#####	#####	6,45
1	SP3	331741,88	7094029,26	5,00	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	5,89
2	SP1	333082,54	7098982,77	12,00	13,00	13,00	13,00	#####	#####	#####	#####	13,00
2	SP2	333061,81	7098988,19	10,00	10,00	11,00	11,00	#####	#####	#####	#####	11,00
2	SP3	333048,63	7098975,75	10,00	11,00	11,00	11,00	11,00	#####	#####	#####	11,00

Figura 11: Exemplo de banco de dados desenvolvido com base nos valores de N.

Fonte: Elaborado pelos autores

Posterior a esta etapa, o banco de dados foi desmembrado em sub planilhas contemplando cada uma apenas os dados relevantes para cada tipo

de estaca escolhida. Cada qual foi utilizada para interpolação por meio de krigagem ordinária gerando diferentes resultados, os quais serão apresentados nos itens que se seguem, juntamente com suas respectivas discussões.

### 5.2.2 Estaca pré-moldada de concreto com diâmetro inferior a 30 cm

Temos com base, na tabela 2, que o N limite de parada da estaca em questão se dá entre 15 e 25, bem como quando o somatório de N ao longo da perfuração é igual ou superior a 80. Interpreta-se ainda, que caso estes valores não sejam atingidos na sondagem a profundidade de parada deve ser considerada como a profundidade do impenetrável, visto que, com exceção da estaca raiz, os demais tipos de estaca contemplados não são capazes de penetrar na rocha.

Portanto a profundidade limite de parada da estaca foi estabelecida como sendo o menor dentre estas condições para todos os furos.

Dada a proximidade elevada entre os furos de um mesmo relatório de sondagem, optou-se por, através de média simples, estabelecer um único ponto que represente todos os furos de um mesmo relatório, tanto geograficamente, como de seus atributos, no caso a profundidade limite de penetração da estaca no solo.

A região de estudo passa a abranger, portanto, 34 pontos de interesse, utilizados na interpolação, através de krigagem ordinária, com correção do variograma. O resultado da interpolação pode ser visualizado na figura 12, já apresentando o mapa base da região escolhida, sobreposto ao modelo gerado pela krigagem, facilitando a identificação da localização das áreas estimadas para cada profundidade limite de parada, em metros, conforme legenda à direita do mapa.

Tal método de interpolação foi escolhido com base nos resultados de FONTELES (2003), onde foram comparados diversos tipos distintos de interpolação, entre eles: triangulação com interpolação linear, inverso do quadrado da distância, curvatura mínima, e krigagem ordinária. Sendo considerado a krigagem aquele que obteve os melhores resultados para representação de características geotécnicas do solo.

Isto se deve, pois a krigagem oferece variância mínima entre os valores estimados e os valores reais, ou seja, o resultado da estimativa nos pontos utilizados como base para interpolação representa o valor real deste ponto, ao contrário do que ocorre nos diferentes tipos de interpolação citados.

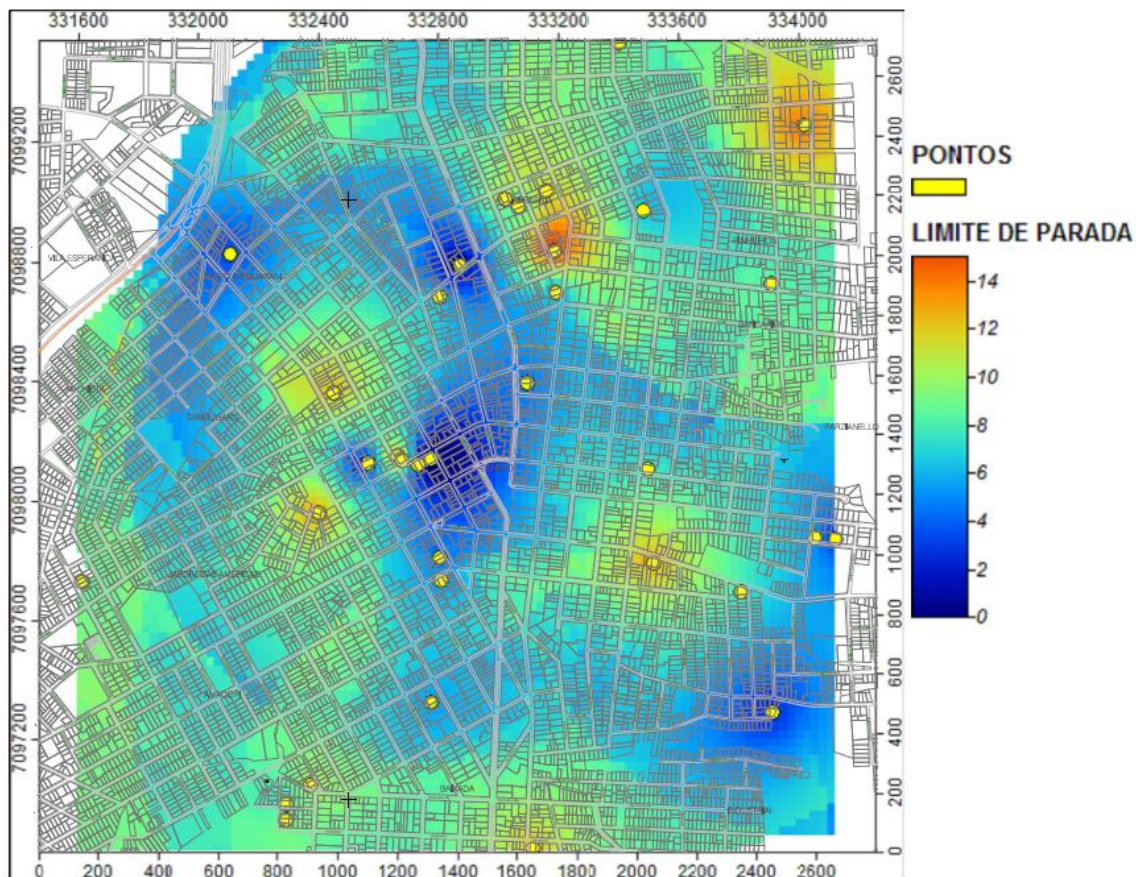


Figura 12: Profundidade limite da estaca pré-moldada de diâmetro inferior a 30 cm.

Fonte: Elaborado pelos autores

Na figura acima é possível notar em algumas áreas, linhas de mudança brusca na profundidade. Como auxílio na interpretação destes resultados é utilizado o gráfico de variância da amostragem realizado pela krigagem ordinária, conforme figura 13, onde as regiões claras representam áreas onde a variância é menor, ou seja, a eficiência da interpolação tende a ser maior, representando uma estimativa com maior exatidão.

Já as regiões escuras representam áreas de pouca efetividade, ou seja, regiões onde a variável estudada não foi amostrada, apresentando grandes desvios em seus valores, é possível ainda, notar que as áreas escuras coincidem com as áreas onde ocorre ruptura brusca no mapa de profundidade

limite (figura 12), explicando, portanto, a ocorrência das mesmas em virtude da falta de dados e má distribuição das amostras na região.

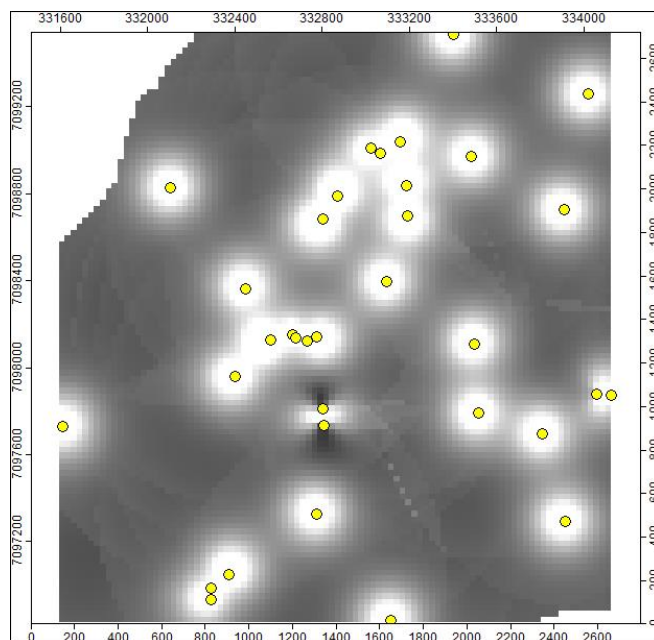


Figura 13: Variância da krigagem ordinária da estaca pré-moldada inferior a 30 cm.

Fonte: Elaborado pelos autores

Estas regiões podem ser entendidas como aquelas onde é necessária uma coleta de informações futuras para melhorar os resultados obtidos nesta etapa, são as áreas onde devem ser concentrados os esforços e as realizações de novas sondagens a fim de averiguar e acrescentar veracidade às interpolações já realizadas.

Na figura 12 é possível perceber que grande parte da região é hachurada em tonalidades que representam profundidades limites de parada entre 4 m e 12 m, caracterizando um bom aproveitamento das estacas, que dificilmente apresentam comprimentos superiores a 12 m, ou seja, a estaca pré-moldada com diâmetro inferior a 30 cm é uma boa alternativa a ser utilizada em todo o território para empreendimentos de pequeno e médio porte.

A única ressalva quanto à utilização deste tipo de fundação ocorre nas áreas hachuradas em azul, que representam profundidades limites de parada inferiores a 4 m, ou seja, inviabilizam a utilização deste tipo de fundação profunda, sendo necessário o estudo de diferentes tipos de estacas mais resistentes, ou ainda a utilização de fundações diretas, não contempladas neste estudo.

A metodologia e procedimentos apresentados nesta seção foram os mesmos utilizados para os demais tipos de estacas, assim como para a profundidade do impenetrável, os resultados são descritos nos itens a seguir.

### 5.2.3 Estaca pré-moldada de concreto com diâmetro superior a 30 cm

O N limite de parada estabelecido pela tabela 2, para o caso de estacas pré-moldadas de concreto com diâmetros iguais ou superiores a 30 cm ocorre entre 25 e 35. Desta forma o banco de dados foi formado pelas profundidades onde são atingidos estes valores e também pela profundidade do impenetrável de cada furo de sondagem. Sendo a profundidade efetiva utilizada como a menor dentre estes valores.

O resultado da krigagem ordinária realizada sobre os 34 pontos amostrados é apresentada na figura 14, a profundidade máxima de penetração da estaca é expressa em metros conforme legenda à direita do mapa.

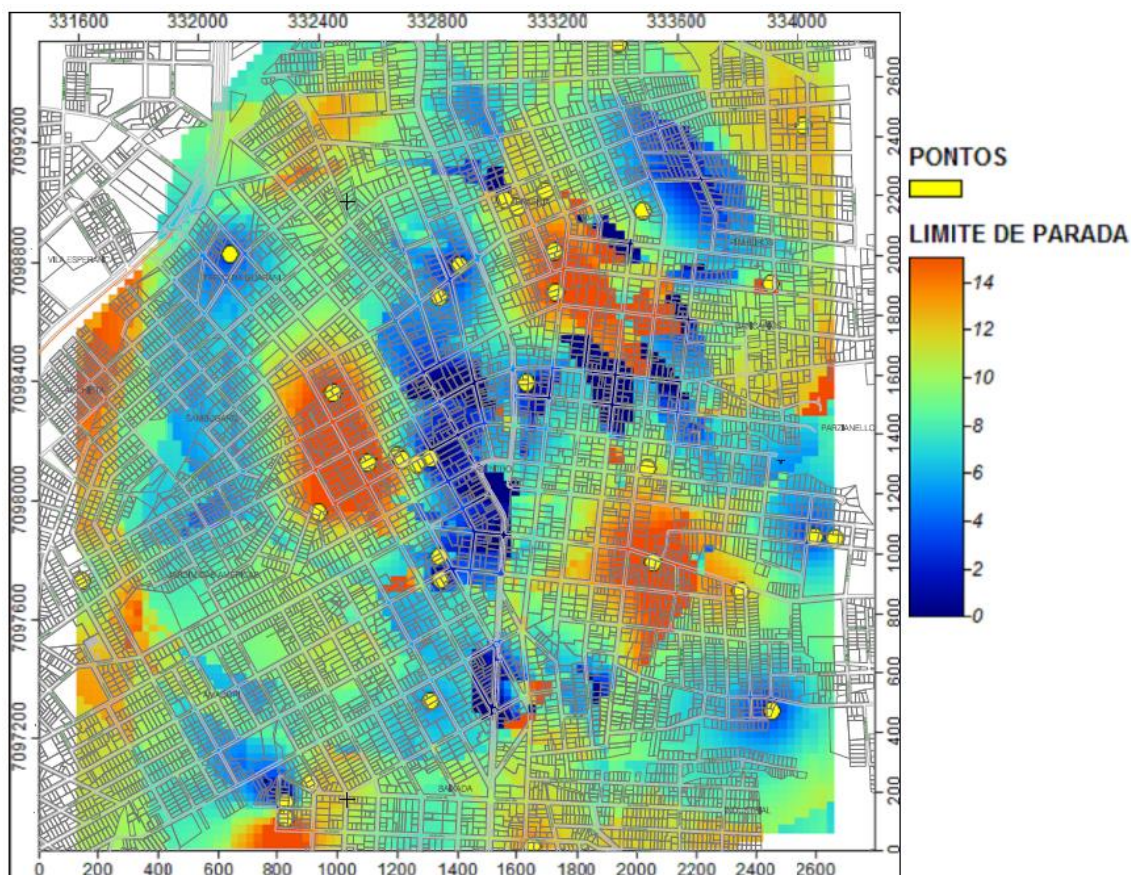


Figura 14: Profundidade limite da estaca pré-moldada de diâmetro superior a 30 cm.

Fonte: Elaborado pelos autores



A krigagem ordinária realizada apresenta as mesmas falhas de continuidade encontradas nas estacas com diâmetros inferiores a 30 cm, pois foi utilizada a mesma configuração de amostragem, apresentando, portanto, regiões de pouca efetividade e exatidão na estimativa das profundidades, e regiões de melhor representação. Esta constatação repete-se em todas as interpolações realizadas neste estudo.

Grande parte da região é compreendida por profundidades superiores a 4 m, fato que caracteriza um bom aproveitamento deste tipo de fundação em grande parte do território estudado. Levando em consideração que existe grande presença de pontos onde a profundidade máxima excede os 14 m, pode-se concluir que não existem grandes ressalvas à utilização desta fundação, apresentando uma gama de possibilidades quanto a sua aplicação ainda superior às estacas com diâmetro inferior a 30 cm, com exceção das parcelas hachuradas em azul, que compreendem as profundidades inferiores a 4 m, onde não a utilização de fundações profundas é limitada, dada a proximidade do impenetrável à superfície.

#### 5.2.4 Estaca Strauss

Este tipo de fundação apresenta um N limite muito semelhante à estaca pré-moldada de concreto com diâmetro inferior a 30 cm, variando de 10 a 25. Da mesma forma que tratado nas modelagens anteriores, a profundidade selecionada para interpolação é também a profundidade onde o N limite é atingido ou a profundidade do impenetrável, caso não atingido o limite.

A amostragem é também constituída pelos mesmos 34 pontos distribuídos da mesma forma que as anteriores, conforme a posição geográfica de cada relatório de sondagem.

O resultado da interpolação é apresentado na figura 15 onde estão hachuradas em diferentes cores as profundidades em metros estimadas para o limite de parada da estaca tipo Strauss, conforme a legenda à direita do mapa.

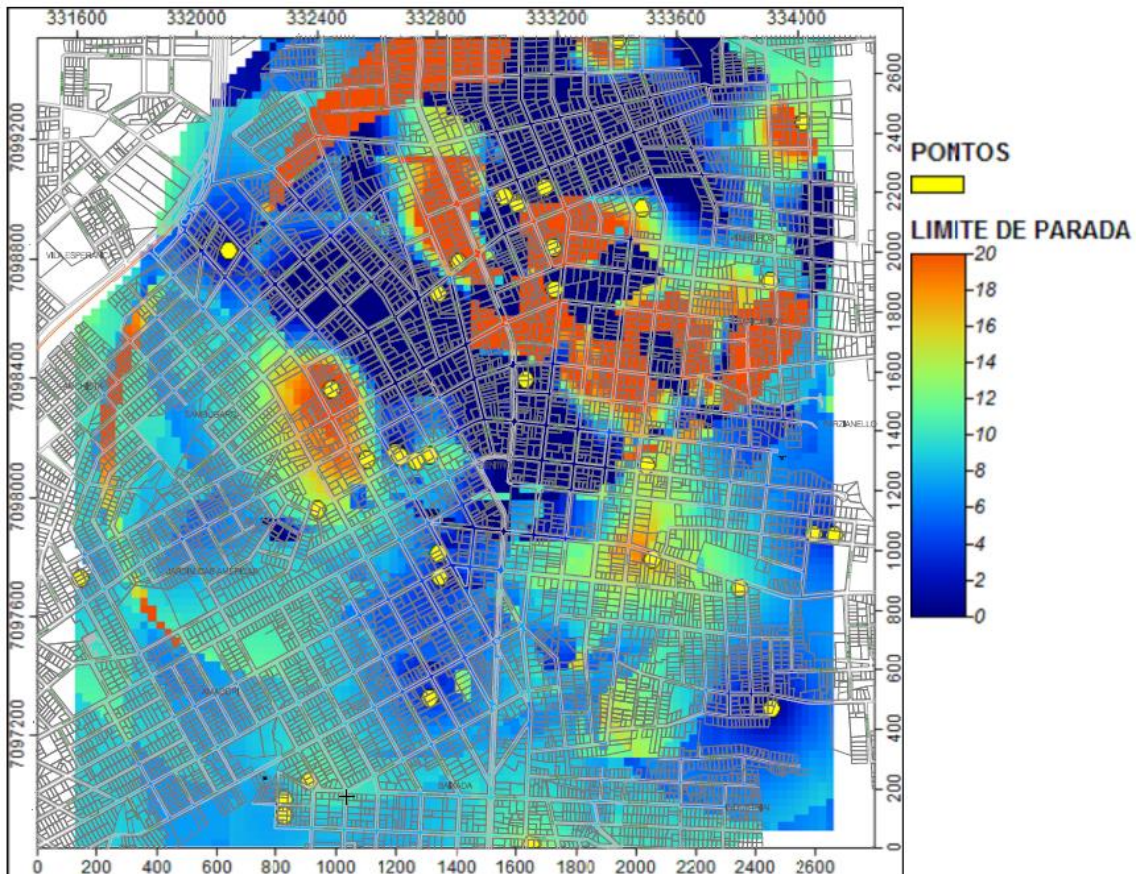


Figura 15: Profundidade limite da estaca Strauss.

Fonte: Elaborado pelos autores

Neste caso apresentaram-se muitas regiões com falta de continuidade na interpolação e com profundidades superiores aos 20 m, o que não condiz com as características da estaca, que apresenta um N limite inferior à estaca pré-moldada de concreto com diâmetro superior a 30 cm, devendo apresentar, portanto, limites de parada também inferiores ou semelhantes.

A interpolação em questão não apresentou resultados satisfatórios para suas estimativas, apresentando valores de profundidades muito superiores aos esperados em certas áreas, além de apresentar um mapa com diversas regiões de pouca amostragem, como é percebido no mapa de variância apresentado na figura 16, onde as áreas escuras representam uma grande variação nos valores, representando, teoricamente, regiões de pouca exatidão das estimativas.

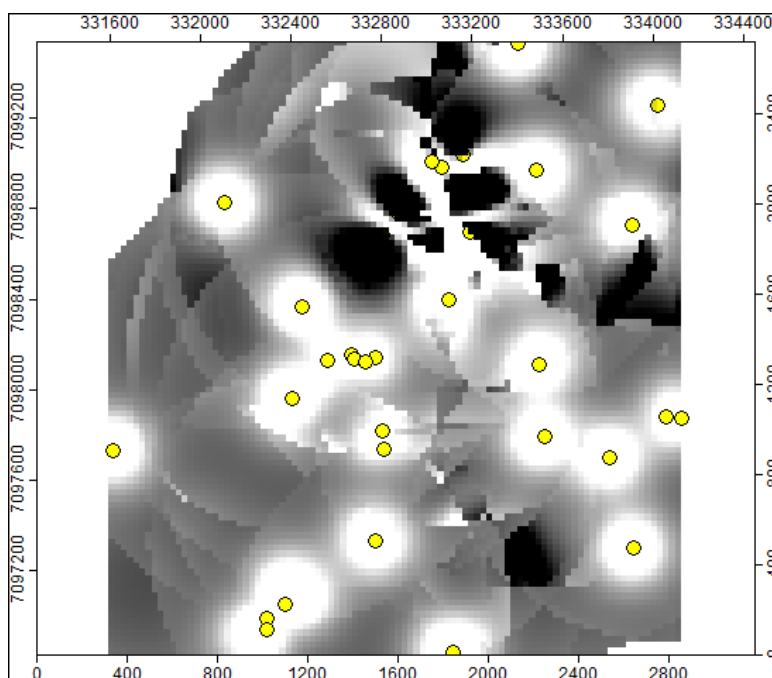


Figura 16: Variância da krigagem ordinária da estaca Strauss.

Fonte: Elaborado pelos autores

Se comparada à figura 13 notamos que esta representação da variância apresenta uma maior dominância de regiões escuras, espalhadas por toda a área, explicando deste modo a fuga dos resultados quanto ao esperado no desenvolvimento da pesquisa.

As manchas escuras na região norte do mapa de variância é explicado pela grande discrepância das profundidades amostradas em pontos relativamente próximos, que possuem pesos semelhantes no processo de interpolação por apresentarem distâncias entre si também semelhantes, causando essa grande variação nas estimativas, se tornando inexecutável um resultado satisfatório sem que haja novas amostragens nestas áreas específicas.

#### 5.2.5 Estaca Franki

Conhecendo-se o solo da região de pato branco como argiloso, conforme definido na caracterização da área de estudo, através da tabela 2, define-se o N limite de parada da estaca entre 20 e 40. A profundidade limite de parada é definida da mesma forma, sendo ela a profundidade na qual o

limite de N é atingido ou caso não ocorra, é adotada a profundidade do impenetrável.

O resultado do processo de krigagem ordinária é apresentado na figura 17 juntamente com a legenda, representando a profundidade limite de penetração da estaca no solo, em metros.

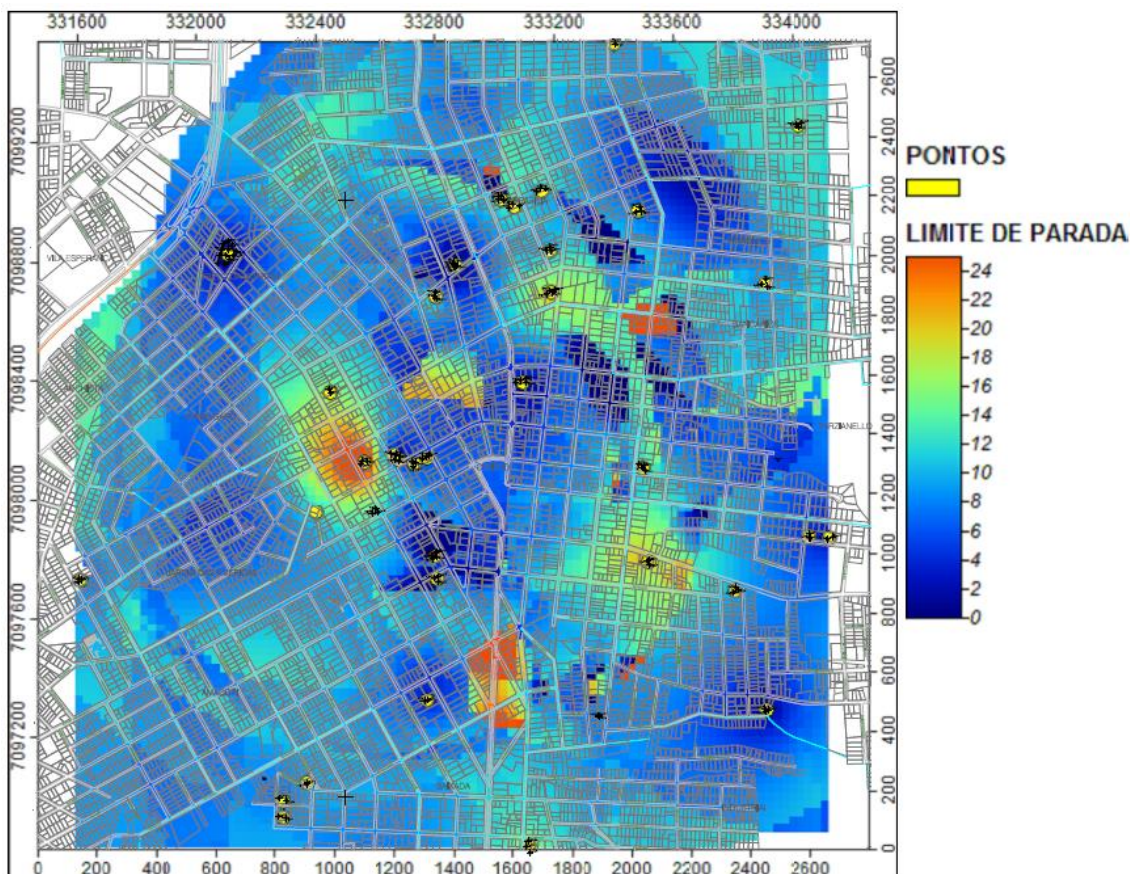


Figura 17: Profundidade limite da estaca Franki.

Fonte: Elaborado pelos autores

Como esperado, para um tipo de estaca que apresenta um N limite superior às demais já estudadas, o mapa de profundidade de parada apresenta uma predominância de profundidades entre 6 m e 16 m, o que representa uma maior versatilidade quanto à utilização da estaca nesta região, bem como pequena limitação, visto que existem regiões onde a estaca pode chegar a profundidades superiores aos 20 m, segundo as estimativas realizadas.

O grande limitador deste tipo de fundação passa ser então apenas a profundidade mínima, visto que, assim como nos demais casos, existem áreas onde o impenetrável é muito próximo ao solo, impossibilitando a utilização das estacas Franki.

Nota-se também a presença de rupturas bruscas na representação gráfica apresentada, devido à grande variância dos dados e má distribuição geográfica dos pontos, como já abordado nos itens anteriores.

### 5.2.6 Estaca hélice contínua

Segundo a tabela 2, a estaca hélice contínua é aquela que apresenta os maiores limites dentro todas as abordadas neste estudo, com N limite variando entre 20 e 45, e quando não possível, a profundidade escolhida segue sendo a profundidade do impenetrável no ponto em questão.

Os resultados da interpolação são apresentados na figura 18 onde a profundidade é apresentada em metros conforme a legenda à direita do mapa.

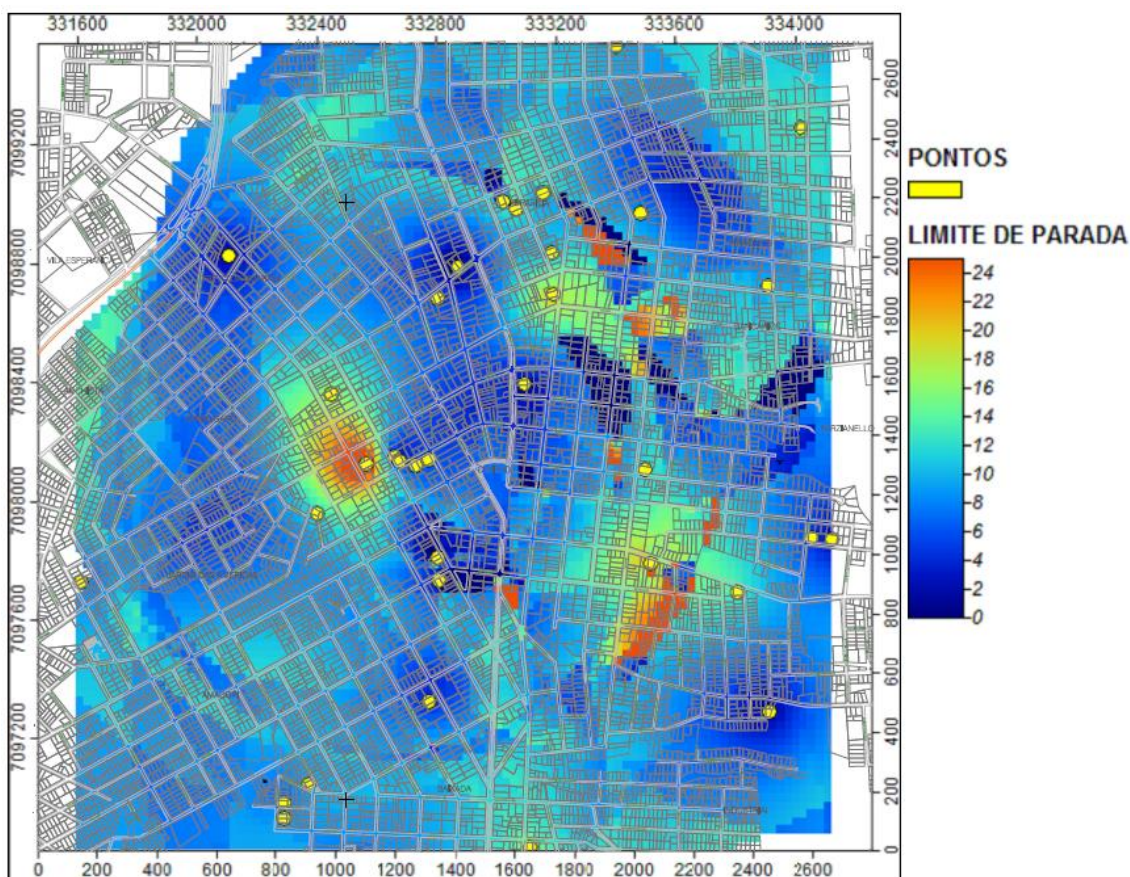


Figura 18: Profundidade limite da estaca hélice contínua.

Fonte: Elaborado pelos autores

Os resultados obtidos nessa interpolação foram muito próximos aos obtidos na interpolação realizada para a estaca Franki, visto que os limites são

também muito semelhantes, tomando-se as mesmas conclusões para ambos os casos.

A diferença aparente entre elas fica por conta das profundidades máximas encontradas, onde no caso da hélice contínua percebe-se uma predominância um pouco maior de áreas onde as profundidades máximas estimadas variam entre 20 e 25 m, principalmente nas regiões sudeste e nordeste do mapa.

### 5.2.7 Profundidade do impenetrável

Uma das informações mais importantes a respeito do solo é a profundidade do impenetrável, visto que esta informação oferece dados de extrema importância na elaboração dos projetos de fundação bem como na execução das edificações.

A krigagem ordinária realizada sobre este atributo é representado na figura 19, onde a profundidade em metros é representada conforme a legenda ao lado do mapa.

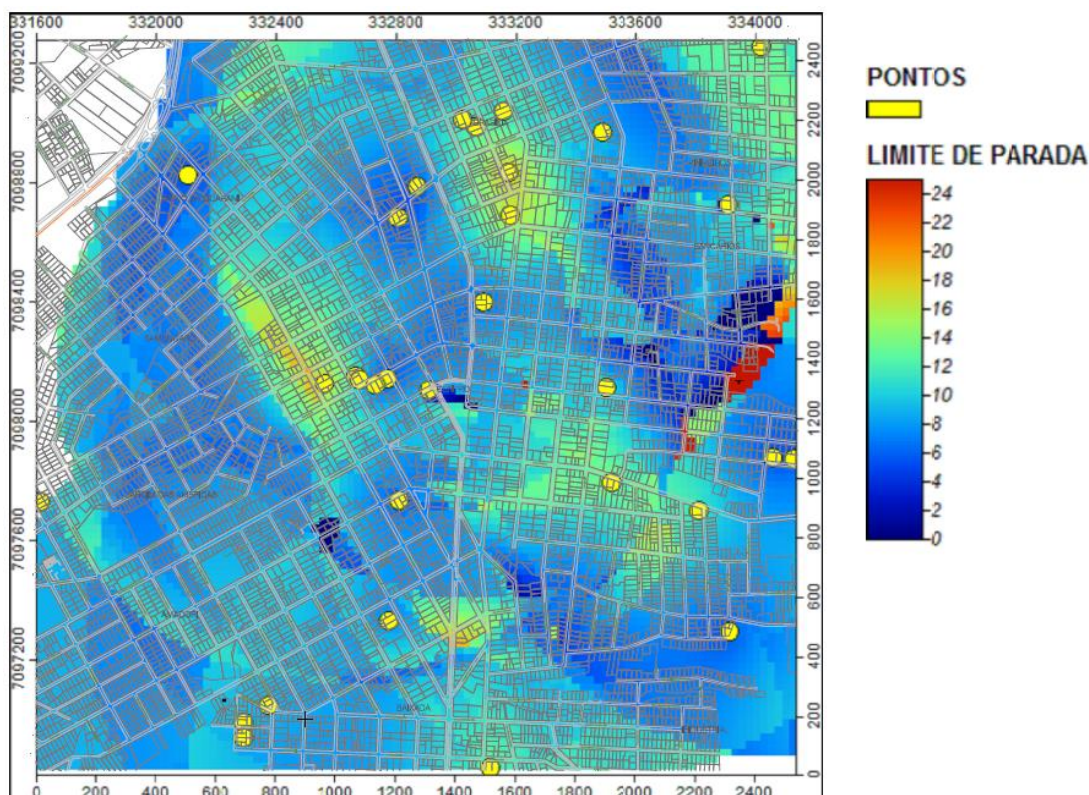


Figura 19: Profundidade do impenetrável.

Fonte: Elaborado pelos autores

A grande maioria da região é marcada por estimativas que preveem uma profundidade de impenetrável entre 6 m e 16 m, o que é um valor aceitável e esperado, com base nas sondagens disponíveis.

Porém nota-se que são raras as regiões com profundidades acima dos 16 m, o que vai contra as estimativas encontradas para alguns tipos de fundações estudados, como hélice contínua e estaca Franki. Por se tratar de estimativas baseadas numa má distribuição geográfica dos pontos bem como na falta de amostragens em determinadas regiões, constata-se que estas discrepâncias e incoerências são esperadas e aceitáveis, podendo ser corrigidas com novas medições de campo, a fim de enriquecer o banco de dados disponível.

É importante ressaltar que as maiores profundidades de impenetrável estimadas coincidem com as maiores profundidades encontradas para as estacas citadas acima, o que minimiza os efeitos desta diferença para fins de estudo, visto que estes pontos continuam sendo pontos críticos que necessitam de atenção *in loco*, em todos os casos apresentados.

Áreas com hachuras predominantemente azuis, contemplando profundidades entre 0 m e 4 m, também necessitam de atenção de projetistas e executores de fundações, visto que são áreas onde o impenetrável, teoricamente, aproxima-se significativamente da superfície, impossibilitando a utilização de fundações profundas usuais, sendo necessário recorrer a outros métodos de fundações não abordados neste estudo.

### 5.3 COESÃO E ATRITO

Para o cálculo dos valores de coesão e atrito do solo utilizou-se de planilhas eletrônicas como no exemplo da Tabela 3 que apresenta os valores correspondentes ao ponto 8, localizado na Rua Vicente Machado (Lote 14, Quadra 463).

Tabela 3: Modelo de tabela para determinação da coesão e atrito - Ponto 8

Furo (Posição)	Z(m)	Nspt	Ynat	$\sigma'_v$ (kPa)	CN	N1	N60	(N1)60	$\phi$ (°)	$\tau$ (kPa)	$\phi$ '(°)	c'(kPa)
<b>SP1</b> x=331605,13 y=7097722,04	1	5	18	18	2,36	11,79	5,50	12,96	34,13	12,20	30,35	1,97
	2	5	18	36	1,67	8,33	5,50	9,17	31,88	22,39	30,35	1,93
	3	6	18	54	1,36	8,16	6,60	8,98	31,76	33,43	30,35	2,74
	4	7	18	72	1,18	8,25	7,70	9,07	31,82	44,68	30,35	3,76
	5	6	18	90	1,05	6,32	6,60	6,96	30,35	52,70	30,35	1,55
	6	14	18	108	0,96	13,47	15,40	14,82	35,11	75,92	30,35	14,55
	7	18	18	126	0,89	16,04	19,80	17,64	36,48	93,17	30,35	21,57
	8	23	18	144	0,83	19,17	25,30	21,08	38,02	112,58	30,35	30,75
	9	23	18	162	0,79	18,07	25,30	19,88	37,50	124,29	30,35	32,23
<b>SP2</b> x=331607,86 y=7097732,29	1	4	18	18	2,36	9,43	4,40	10,37	32,64	11,53	30,74	1,14
	2	6	18	36	1,67	10,00	6,60	11,00	33,02	23,39	30,74	2,62
	3	5	18	54	1,36	6,80	5,50	7,48	30,74	32,11	30,74	0,95
	4	6	18	72	1,18	7,07	6,60	7,78	30,94	43,17	30,74	1,62
	5	8	18	90	1,05	8,43	8,80	9,28	31,95	56,13	30,74	4,20
	6	12	18	108	0,96	11,55	13,20	12,70	33,99	72,81	30,74	10,49
	7	14	18	126	0,89	12,47	15,40	13,72	34,54	86,71	30,74	14,00
	8	22	18	144	0,83	18,33	24,20	20,17	37,62	110,99	30,74	27,89
<b>SP3</b> x=331618,31 y=7097729,10	1	4	18	18	2,36	9,43	4,40	10,37	32,64	11,53	29,20	1,76
	2	3	18	36	1,67	5,00	3,30	5,50	29,20	20,12	29,20	0,59
	3	6	18	54	1,36	8,16	6,60	8,98	31,76	33,43	29,20	4,14
	4	7	18	72	1,18	8,25	7,70	9,07	31,82	44,68	29,20	5,62
	5	8	18	90	1,05	8,43	8,80	9,28	31,95	56,13	29,20	7,31
	6	8	18	108	0,96	7,70	8,80	8,47	31,42	65,97	29,20	7,39
	7	9	18	126	0,89	8,02	9,90	8,82	31,65	77,68	29,20	9,33
	8	18	18	144	0,83	15,00	19,80	16,50	35,94	104,39	29,20	26,28

Fonte: Elaborado pelos autores

Para facilitar a elaboração de projetos estruturais é interessante conhecer os valores de resistência do solo por faixas. Por isso foi calculado o valor médio de coesão e atrito a cada cinco metros de profundidade, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Valores médios de coesão e atrito

ÍNDICE	FUROS	LOCALIZAÇÃO		1-5m		6-10m		11-15m		15- m	
		X	Y	$\phi$ (°)	c(kPa)	$\phi$ (°)	c(kPa)	$\phi$ (°)	c(kPa)	$\phi$ (°)	c(kPa)
1	SP1	331759,22	7094032,48	34,98	6,41	43,94	42,90	-	-	-	-
	SP2	331751,79	7094024,27	32,11	4,83	44,22	47,17	-	-	-	-
	SP3	331741,88	7094029,26	35,00	7,16	-	-	-	-	-	-
2	SP1	333082,54	7098982,77	28,13	2,23	29,75	15,67	33,49	39,21	-	-
	SP2	333061,81	7098988,19	34,97	6,82	32,39	13,22	40,23	58,34	-	-



	SP3	333048,63	7098975,75	30,38	2,74	33,21	20,06	40,53	65,73	-	-
3	SP1	333142,63	7099030,00	32,44	3,31	33,28	11,44	38,08	42,95	-	-
	SP2	333151,25	7099041,71	31,17	3,65	31,61	11,58	41,11	65,35	-	-
	SP3	333170,55	7099038,59	30,42	3,52	34,36	22,39	38,69	56,06	-	-
4	SP1	333483,05	7098116,23	36,15	11,33	32,57	15,40	33,35	33,76	-	-
	SP2	333502,32	7098112,09	37,11	8,23	34,44	12,89	42,22	61,72	-	-
	SP3	333495,04	7098105,35	38,87	5,97	38,56	19,36	-	-	-	-
	SP4	333505,47	7098094,92	36,20	5,35	39,28	25,29	-	-	-	-
5	SP1	334058,09	7097869,04	29,37	1,90	-	-	-	-	-	-
	SP1A	334055,11	7097869,37	30,79	4,41	-	-	-	-	-	-
	SP2	334055,57	7097882,90	31,58	1,53	-	-	-	-	-	-
6	SP1	333014,51	7099015,72	34,72	7,09	34,64	14,73	36,66	36,72	-	-
	SP2	333022,01	7099014,52	35,56	8,27	34,31	14,54	36,14	33,85	-	-
	SP3	333013,88	7099003,27	37,05	4,98	35,39	5,64	-	-	-	-
	SP4	333030,07	7098999,97	34,26	4,94	36,16	20,34	-	-	-	-
7	SP1	332765,13	7097324,47	31,77	1,98	-	-	-	-	-	-
	SP2	332777,59	7097326,38	31,36	2,30	-	-	-	-	-	-
8	SP1	331605,41	7097722,04	31,99	2,39	36,78	24,78	-	-	-	-
	SP2	331607,86	7097732,29	31,86	2,10	35,31	17,46	-	-	-	-
	SP3	331618,31	7097729,10	31,48	3,89	33,00	14,33	-	-	-	-
9	SP1	332654,62	7098150,72	30,82	3,82	34,29	22,21	35,33	41,30	-	-
	SP2	332669,30	7098150,32	31,54	5,35	35,70	25,61	36,14	44,11	-	-
10	SP1	332779,89	7098145,38	34,82	0,70	-	-	-	-	-	-
	SP2	332758,72	7098134,58	34,76	5,73	-	-	-	-	-	-
	SP3	332771,33	7098141,84	29,37	2,87	-	-	-	-	-	-
11	SP1	332135,84	7098829,04	27,39	1,29	-	-	-	-	-	-
	SP2	332119,38	7098847,91	30,54	0,70	-	-	-	-	-	-
	SP3	332106,48	7098862,70	29,72	0,70	-	-	-	-	-	-
	SP4	332090,87	7098853,59	31,50	2,66	-	-	-	-	-	-
	SP5	332086,11	7098834,75	36,14	1,21	-	-	-	-	-	-
	SP7	332073,07	7098789,13	27,75	1,02	-	-	-	-	-	-
	SP8	332096,78	7098785,61	27,39	2,23	-	-	-	-	-	-
	SP9	332112,59	7098802,09	27,49	2,37	-	-	-	-	-	-
	SP10	332124,27	7098815,60	28,66	5,10	-	-	-	-	-	-
	SP11	332106,86	7098835,28	29,06	2,07	-	-	-	-	-	-
	SP12	332100,45	7098816,28	29,64	2,73	-	-	-	-	-	-
	12	SP1	332390,68	7097955,26	30,84	3,83	37,68	34,55	35,56	41,51	-
SP2		332398,23	7097967,88	28,67	3,59	32,00	19,56	33,49	40,78	-	-
SP3		332410,32	7097952,92	35,12	5,07	35,39	13,04	35,48	21,26	-	-
13	SP1	332809,17	7097740,24	28,15	3,29	-	-	-	-	-	-
	SP2	332798,88	7097734,29	30,83	7,49	-	-	-	-	-	-
	SP3	332812,00	7097723,40	26,94	2,31	-	-	-	-	-	-
14	SP1	332803,78	7098692,94	32,18	3,58	-	-	-	-	-	-
	SP2	332798,25	7098678,51	33,92	5,21	-	-	-	-	-	-
	SP3	332805,44	7098671,32	32,21	1,58	-	-	-	-	-	-
15	SP1	332444,33	7098368,37	30,20	3,08	31,86	13,83	33,41	31,81	-	-

	SP2	332451,23	7098354,71	31,28	4,38	33,40	20,06	33,64	24,03	-	-
16	SP1	333894,53	7098719,26	34,05	3,05	35,34	10,18	-	-	-	-
	SP2	333914,22	7098712,32	34,50	6,25	34,94	21,49	-	-	-	-
	SP3	333908,25	7098735,91	31,73	5,38	37,66	35,24	-	-	-	-
17	SP1	333069,99	7098390,03	33,01	3,37	-	-	-	-	-	-
	SP2	333086,82	7098396,86	36,60	3,39	-	-	-	-	-	-
	SP3	333104,99	7098390,72	35,71	1,22	-	-	-	-	-	-
	SP4	333104,66	7098403,29	38,61	3,43	-	-	-	-	-	-
18	SP1	334115,32	7097864,86	33,97	5,28	-	-	-	-	-	-
	SP2	334133,32	7097872,76	35,64	3,55	-	-	-	-	-	-
19	SP1	334025,93	7099259,61	28,63	2,39	30,22	11,17	32,69	29,29	-	-
	SP2	334017,07	7099246,41	27,89	2,06	30,61	14,58	35,91	48,48	-	-
	SP3	334010,87	7099253,59	28,51	3,23	31,09	17,49	35,52	44,30	-	-
20	SP1	333816,47	7097695,26	36,48	6,93	35,42	11,34	41,67	49,55	-	-
	SP2	333806,89	7097702,32	34,07	8,06	35,90	21,99	30,41	3,43	-	-
	SP3	333801,47	7097687,06	33,34	5,10	32,60	9,03	39,34	52,49	-	-
21	SP1	333519,76	7097779,78	31,96	3,55	31,99	9,57	32,86	20,99	30,43	9,90
	SP2	333518,53	7097795,66	29,83	2,50	31,39	12,25	30,93	18,62	38,69	80,06
	SP3	333511,99	7097792,43	31,15	2,79	31,24	8,23	33,90	29,29	-	-
22	SP1	332302,28	7096989,46	27,11	2,30	28,21	2,23	-	-	-	-
	SP2	332277,56	7096981,26	25,40	1,82	31,66	27,03	-	-	-	-
23	SP1	333474,21	7098961,57	30,06	2,58	35,72	26,64	-	-	-	-
	SP2	333490,61	7098964,15	33,08	3,39	-	-	-	-	-	-
	SP3	333485,27	7098977,09	29,62	4,25	36,33	30,47	-	-	-	-
24	SP1	332299,77	7096929,76	27,11	1,55	27,38	5,36	-	-	-	-
	SP2	332277,00	7096936,77	25,99	2,01	33,01	1,42	-	-	-	-
25	SP1	332551,09	7098116,34	33,06	4,56	37,09	24,77	35,21	27,99	35,23	28,92
	SP2	332557,68	7098127,73	32,61	5,15	34,59	20,29	33,49	25,15	37,08	55,35
	SP3	332571,74	7098126,72	33,90	5,31	36,34	21,93	35,63	30,26	38,69	60,91
26	SP1	332681,81	7098144,75	38,90	2,39	-	-	-	-	-	-
	SP2	332679,75	7098127,66	38,75	4,87	-	-	-	-	-	-
	SP3	332666,30	7098132,83	39,46	6,98	-	-	-	-	-	-
27	SP1	333118,20	7096814,75	25,38	1,65	31,25	24,55	34,37	56,86	36,65	93,40
	SP2	333106,93	7096836,35	25,03	1,25	33,08	33,31	34,20	56,09	-	-
	SP3	333112,47	7096853,67	25,38	1,65	30,07	17,92	-	-	-	-
28	SP1	332868,72	7098775,37	45,19	6,85	-	-	-	-	-	-
	SP2	332865,46	7098791,57	32,64	0,34	-	-	-	-	-	-
	SP3	332865,23	7098783,37	31,99	2,34	-	-	-	-	-	-
	SP4	332874,10	7098780,69	28,71	4,54	-	-	-	-	-	-
	SP5	332861,13	7098787,17	28,71	4,54	-	-	-	-	-	-
29	SP1	332723,85	7098126,48	39,35	10,80	38,65	6,44	-	-	-	-
	SP2	332734,14	7098121,90	31,67	4,85	42,93	45,77	-	-	-	-
	SP3	332727,40	7098106,72	30,99	7,64	-	-	-	-	-	-
30	SP1	333906,51	7097297,42	29,06	2,07	-	-	-	-	-	-
	SP2	333917,35	7097293,30	29,40	2,51	-	-	-	-	-	-
	SP3	333909,21	7097288,51	27,70	1,02	-	-	-	-	-	-

31	SP1	333203,23	7098700,28	33,34	8,17	33,67	20,38	30,27	14,12	31,80	32,86
	SP2	333194,81	7098691,01	33,35	6,47	33,63	15,14	31,71	15,70	33,58	36,87
	SP3	333185,90	7098698,08	33,08	11,24	34,80	31,64	32,99	36,28	33,83	67,38
	SP4	333174,93	7098687,28	33,40	7,01	29,68	6,26	33,75	35,83	39,21	68,30
32	SP1	333173,75	7098832,51	29,85	5,81	34,16	27,20	35,20	50,16	33,34	53,32
	SP2	333189,47	7098831,08	31,42	2,24	33,43	12,39	32,98	14,73	-	-
	SP3	333185,50	7098843,40	30,14	2,50	31,55	11,10	32,98	22,26	-	-
33	SP1	333404,86	7099524,61	33,52	2,32	40,45	16,04	-	-	-	-
	SP2	333394,84	7099533,85	31,72	2,84	36,08	29,89	36,44	22,65	-	-
34	SP1	332804,72	7097805,15	29,36	6,24	-	-	-	-	-	-
	SP2	332793,78	7097800,15	28,69	1,86	-	-	-	-	-	-
	SP3	332808,47	7097821,12	30,52	2,17	-	-	-	-	-	-
	SP4	332800,60	7097816,77	29,33	3,20	32,11	16,71	-	-	-	-
	SP5	332789,14	7097810,62	28,69	2,15	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelos autores

Podemos observar que na faixa superficial que compreende o solo até uma profundidade de cinco metros, o ângulo de atrito médio é de 31,85 graus. Já a coesão média nessa mesma faixa é de 3,93 kPa. A coesão máxima de 11,33 Kpa foi obtida no SP1 do ponto 4, e o ângulo de atrito máximo no SP1 do ponto 28 foi de 45,19 graus. Os mínimos foram de 0,34 kPa de coesão para o SP2 do ponto 28 e 25,03 graus de ângulo de atrito no SP1 do ponto 27.

Na segunda faixa a coesão média é de 18,46 kPa e um ângulo de atrito médio de 34,32 graus. A coesão máxima foi registrada no SP2 do ponto 1 (47,17 kPa) e mínima no SP2 do ponto 24 (1,42 graus). O ângulo de atrito apresentou valor máximo no SP2 do ponto 1 (44,22 graus) e mínimo de 27,38 graus no SP1 do ponto 24.

Do décimo primeiro ao décimo quinto metro, a coesão média é de 37,00 kPa e um ângulo de atrito médio de 35,28 graus. A coesão máxima foi registrada no SP3 do ponto 2 (65,73 kPa) e mínima no SP2 do ponto 20 (3,43 kPa). O ângulo de atrito apresentou valor máximo no SP2 do ponto 4 (42,22 graus) e mínimo de 30,27 graus no SP1 do ponto 21.

Na faixa de solo mais profunda os máximos foram: 39,21 graus no SP4 do ponto 31 e 93,40 kPa no SP1 do ponto 27. Já os mínimos foram: 39,21 graus no SP4 do ponto 31 e 9,90 kPa no SP1 do ponto 21. A coesão média é de 53,39kPa, e o ângulo de atrito médio de 35,32 graus.

É possível observar que em pontos onde o impenetrável ocorre numa cota muito baixa, os valores tendem a ser extremos e muito variáveis e entre os

furos do mesmo ponto, o que indica baixa confiabilidade desses valores, possivelmente devido aos valores de N obtidos no último metro penetrado, muitas vezes com características de solo bem distintas do restante do perfil.

## 6 CONCLUSÃO

Na etapa de interpolação dos dados advindos dos relatórios de sondagens a fim de estimar as profundidades limites de parada de cada tipo de estaca, ficou evidente a falta de amostragem de um número maior de pontos, ou então uma distribuição uniforme dos pontos disponíveis, a evidência ocorreu tanto no modelo gerado pela interpolação quanto no mapa de variância da mesma, onde a falta de continuidade do modelo em algumas regiões coincide com os pontos de alta variância.

Outra solução para melhorar os resultados obtidos consiste em delimitar uma distância máxima inferior a mil metros, a fim de eliminar os pontos isolados, concentrando a interpolação em uma área ainda menor da cidade. A presente solução não foi adotada, pois o estudo visou abranger a maior área possível do perímetro urbano da cidade de Pato Branco – PR, em detrimento da exatidão e confiabilidade dos resultados.

Porém, os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, tendo em vista o objetivo de ilustrar o potencial de utilização de alguns tipos de fundação no perímetro urbano de Pato Branco. Conhecendo e em plena consciência das limitações e possíveis falhas do processo, os modelos gerados para cada tipo de estaca se mostraram ferramentas úteis no que diz respeito à análise quanto à utilização de cada estaca nas diferentes áreas da região de estudo.

Os mapas gerados são de fácil leitura e simples utilização, consistindo de base para estudos a respeito do solo e ao uso de fundações profundas, passível de melhorias constantes, apresentando forte potencial quanto à exatidão e fidelidade das estimativas quanto ao comportamento real do solo.

A geração de um modelo de representatividade do nível de profundidade do lençol freático foi impossibilitada pela pequena quantidade de dados na região de estudo, bem como a alta variância entre eles, gerando uma interpolação de baixo grau de confiabilidade e, portanto seus resultados não foram levados em consideração no decorrer da pesquisa.

O cálculo dos valores de coesão e atrito do solo por meio do método matemática proposto geraram resultados satisfatórios e dentro do esperado,

conforme objetivo proposto, visto que não são apresentadas limitações quanto à sua utilização em todos os pontos disponíveis.

Coesão e atrito do solo são variáveis de extrema importância na caracterização do solo, principalmente em regiões de relevo acidentado, onde as práticas de movimentação de terra e obras de contenção fazem parte da cultura construtiva da região, como é o caso da cidade de Pato Branco – PR. Tal fator comprova a utilidade e importância do estudo, visto que obras estruturais e de fundação dependem destas variáveis para serem executadas com segurança.

A divisão da resistência do solo em faixas de profundidade mostrou-se uma forma de amostragem de simples formulação e capaz de descrever as características de resistência do solo ao longo de toda a profundidade atingida nas sondagens com clareza e de forma objetiva. Fornecem desta forma, dados de extrema valia e fácil aplicação conforme os objetivos desejados por aqueles que se valerem destes resultados.

O estudo também possui grande potencial de melhoria, conforme se aumenta o número de relatórios disponíveis e as comprovações do método matemático, bem como suas possíveis correções sejam desenvolvidas em trabalhos futuros.

## 7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O estudo prévio de todos os processos que envolvem uma edificação, desde sua fundação até conclusão dos acabamentos finais, tem se tornado uma prática constante e de importância irrefutável na prática da Engenharia Civil. Baseado nisso, o estudo do solo é de fundamental importância na etapa de planejamento e concepção do projeto e execução de qualquer edificação.

Em função disto são apresentadas sugestões de trabalhos futuros que tenham como objetivo fornecer resultado como base para planejamento e estudo:

- Aplicação de métodos de interpolação diferentes do adotado no presente trabalho, a fim de avaliar a aplicabilidade de cada método e fornecer parâmetros de comparação entre os mesmos, buscando a melhor solução possível para os problemas propostos.
- Expandir a caracterização do solo para outras variáveis não abordadas nesta pesquisa, como estimativas de capacidade de carga, modelagens de perfis geológicos, dentre outras, a fim de enriquecer os resultados e processos já desenvolvidos.
- Comprovação da modelagem matemática utilizada no cálculo de coesão e atrito do solo, através de ensaios de laboratório com base em amostras advindas de possíveis ensaios de sondagens realizados.
- Execução de trabalhos futuros que tenham em vista a otimização do processo de alimentação do banco de dados somado à modelagem geoestatística em um único ambiente SIG, a fim de evitar eventuais faltas de interatividade entre softwares, propiciando uma manipulação adequada dos dados e pontos utilizados.
- Aplicação da metodologia adotada ou outras de interesse do pesquisador em diferentes municípios contribuindo desta forma com o cenário da construção civil e pesquisa de outras regiões.

## REFERÊNCIAS

- ABGE. **Manual de Sondagens**. Boletim nº 3. 5 ed. São Paulo, 2013.
- ABNT. NBR 6122. **Projeto e Execução de Fundações**. Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT. NBR 6484 **Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2001.
- ABNT. NBR 9603. **Sondagem a Trado – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1986.
- BELINCANTA, A. **Avaliação dos Fatores Intervenientes no Índice de Resistência à Penetração do SPT**. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.
- BORCHARDT, N. **Diagnóstico Geológico Geotécnico na Estabilidade de Vertentes do Alto e Médio Curso da Bacia do Rio Sagrado, PR**. Dissertação (mestrado) Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Geologia. Curitiba, 2005.
- BRITISH STANDARD 1377. **Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes**. Londres: British Standards Institution, 1990.
- CÂMARA, G., MEDEIROS, J.S. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Modelagem de Dados em Geoprocessamento**. In: CÂMARA, G., MEDEIROS, J.S. **Geoprocessamento para Projetos Ambientais**. 2. ed. São Paulo: São José dos Campos, 1998.
- CAMARGO, E.C.G. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (Krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING)**. São Paulo. São José dos Campos, 1997.
- CAMARGO, E.C.G. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Geoestatística: Fundamentos e Aplicações**. In: CÂMARA, G., MEDEIROS, J.S. **Geoprocessamento para Projetos Ambientais**. 2. ed. São Paulo: São José dos Campos, 1998.
- CAPUTO, H.P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988
- CINTRA, J.C.A.; AOKI, N. **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- CINTRA, J.C.A.; AOKI, N.; ALBIERO, J.H. **Fundações diretas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- CRAIG, R.F. **Mecânica dos Solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. Tradução de: Amir Kurban.



FELGUEIRAS, C.A. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Modelagem Numérica de Terreno**. In: CÂMARA, G., MEDEIROS, J.S. **Geoprocessamento para Projetos Ambientais**. 2. ed. São Paulo: São José dos Campos, 1998.

FONTELES, H. R. N. Escola de Engenharia de São Carlos. **Caracterização Geotécnica do Subsolo da Porção Nordeste o Município de Fortaleza (CE) Com Base em Geoestatística**. Dissertação. São Carlos. 2003.

GUIMARÃES, E.C. Universidade Federal de Uberlândia. **Geoestatística Básica e Aplicada**. Uberlândia, 2004.

HATANAKA, M.; UCHIDA, A. **Soils and Foundations**. *Japanese Geotechnical Society*. Vol. 36, n. 4, 1-9, Dez, 1996.

JAKOB, A.A.E.; YOUNG, A.F.. **O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas**. In: XV ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS, 2006, Caxambu.

JOURNEL, A. G. **Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons**. American Geophysical Union. California, 1989.

LANDIM - Landim P.M.B. 2006. Sobre Geoestatística e mapas. *Terra e Didática*, 2(1):19-33. <<http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>>

LIAO, S. S. C.; WITHMAN, R. V. **Overburden Correction Factors for SPT in Sand**. In *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 112, n. 3.

MACKEAN, R.A.N.; ROSENBAUM, M. S. **Geostatistical characterisation of the SPT**. In: 6th International Congress. International Association of Engineering Geology (IAEG). Rotterdam, Balkema, 1990.

NAMIKAWA, L.M. **Um método de ajuste de superfície para grades triangulares considerando linhas características**. 1995. Dissertação de Mestrado - Curso de Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo: São José dos Campos, 1995.

NAMIKAWA, L.M.; et al. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Modelagem Numérica de Terreno e Aplicações**. São Paulo: São José dos Campos, 2003.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3ª. Ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

QUARESMA, A.R., *et al.* **Investigações Geotécnicas**. In: HACHICH, W. et al. **Fundações: Teoria e Prática**. Cap.3. São Paulo: PINI, 1998.

REBELLO, Y.C.P. **Fundações**: Guia Prático de Projeto, Execução e Dimensionamento. 2. ed. São Paulo: Zigurate, 2009.

SCHNAID, F. **Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações**. 2 ed. São Paulo, Ed. Oficina de Textos, 2012.

TABALIPA, Ney Lyzandro. **Estudo de Estabilidade de Taludes da Bacia do Rio Ligeiro, Pato Branco, Paraná**. Tese de Doutorado – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008

VAZ, A.P.M.S. **Estudo de Áreas Suscetíveis a Escorregamentos em Sub-bacia do Rio São João, BR 376 entre os km 665 e 668**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação e Geologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

VELLOSO, D.A.; LOPES, F.R. **Fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 2 v.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística**: Conceitos e Aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.