

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
DIEGO FERNANDO PEREIRA

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO: ESTUDO DAS PROPRIEDADES
GEOTÉCNICAS DO SOLO DE TOLEDO-PR**

CASCADEL - PR
2016

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

DIEGO FERNANDO PEREIRA

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO: ESTUDO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS
DO SOLO DE TOLEDO-PR**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Professor Orientador: Eng. Me. Maycon
André Almeida**

**CASCADEL - PR
2016**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
DIEGO FERNANDO PEREIRA**

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO: ESTUDO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS
DO SOLO DE TOLEDO -PR**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Professor (a) Maycon André Almeida.

BANCA EXAMINADORA

Orientador Professor. Msc. Maycon André Almeida
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil

Professor Msc. Guilherme Irineu Venson
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Engenheiro Civil

Professor Msc. Gustavo Savaris
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Engenheiro Civil

Cascavel, 28 de Outubro de 2016.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Florisvaldo Pereira e Sueli Pereira,
pelo apoio, amor e compreensão.

“Because nature is infinitely variable, the geological aspects of our profession assure us that there will never be two jobs exactly alike. Hence, we need never fear that our profession will become routine or dull. If it should, we can rest assured the we would not be practicing it properly.” (R. B. Peck)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela minha vida, minha saúde, e pelas oportunidades que tem me ofertado.

Ciente do grande número de pessoas que foram importantes nessa etapa de minha vida, possivelmente algumas não serão mencionadas, desde já peço desculpas a aquelas que não estão, mas podem estar certas do meu pensamento e gratidão pelo apoio.

Aos meus pais, Florisvaldo Pereira e Sueli Pereira, por todo o suporte, apoio ensinamentos e amor incondicional, que me deram durante toda a minha vida, sem eles seria muito mais difícil vencer esse desafio.

A equipe de colegiado do Centro Universitário Assis Gurgacz, funcionários e colaboradores que se fizeram presentes direta ou indiretamente durante minha graduação. Ao Professor Orientador Me. Maycon André Almeida, pelo profissionalismo, dedicação, orientação, paciência e sabedoria compartilhada nas dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

O conhecimento do meio físico de maneira integrada é imprescindível para o plano de desenvolvimento urbano das cidades. Um dos problemas principais encontra-se na dificuldade de identificar as características dos solos, os quais, juntamente com os elementos de fundação, constituem a infraestrutura de uma obra. Os solos fazem parte praticamente de todos os tipos de empreendimentos, seja como material de construção ou como suporte das cargas atuantes, fazendo com que o mesmo seja o material mais utilizado na Engenharia Civil. Por ser grande o número de situações que devem ser analisadas, exige-se uma ferramenta que seja polidirecional e multiobjetiva, contribuindo assim para a evolução dos mapas geotécnicos. O crescimento acelerado de Toledo nos campos econômico, infraestrutura e social tem atraído investimentos, que motivam uma busca por um melhor aproveitamento dos terrenos, intensificando assim a necessidade de um conhecimento prévio das características do solo que será usado como suporte para esses empreendimentos, objetivando optar-se pela melhor solução que viabilize o projeto. Dessa maneira, esse trabalho visou gerar mapas geotécnicos que apresentaram algumas propriedades geotécnicas do 1º ao 10º metro de profundidade, tais como: nível d'água e *NSPT*. Os mapas foram gerados com auxílio de um Sistema de Informações Geográficas, a partir de 248 furos de sondagem SPT, cedidos por empresas que colaboraram com a pesquisa. Esses dados foram reunidos, georreferenciados, tratados geoestatisticamente, possibilitando assim, realizar a interpolação para que se apresentassem valores em áreas não amostradas, resultando em mapas que apresentam a continuidade espacial de alguns parâmetros geotécnicos. Após a produção dos mapas, realizou-se uma análise dos resultados, identificando quais áreas são mais susceptíveis ao efeito da colapsibilidade, o que permitirá aos empreendedores, bem como, a comunidade técnica, analisar quais alternativas podem ser viáveis em determinadas áreas, dessa maneira, estabelecendo-se como uma importante ferramenta de apoio a sociedade.

Palavras-chave: Geotecnia, Sistema de Informações Geográfica, Geoestatística.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Horizontes do solo, Faure (1998).....	18
Figura 2: Arquitetura de um SIG, Câmara (1995).....	31
Figura 3: Exemplo de pontos de amostragem em determinada área de estudo, Landim <i>et al</i> (2002)	33
Figura 4: Fluxograma para processamento de dados, Sturaro & Landim (1996 <i>apud</i> Abel, 2002).....	35
Figura 5: Comparação entre métodos de interpolação, Landim <i>et al</i> (2002)	36
Figura 6: Exemplo Semivariograma, Orlovski (2013).....	39
Figura 7: Localização do município de Toledo, Revista Toledo (2015).....	42
Figura 8: Mapa Geológico e Geomorfológico do Paraná, Mineropar (2015)	43
Figura 9: Declividade do Paraná, Mineropar (2015).....	44
Figura 10: Perímetro Urbano e divisão dos bairros, Prefeitura Municipal (2007).....	46
Figura 11: Modelo de Boletim de sondagem SPT	47
Figura 12: Modelo da tabela do Banco de dados	48
Figura 13: Mapa do perímetro urbano de Toledo, com a localização dos furos de sondagem, georreferenciados com auxílio do <i>Surfer</i> 13	50
Figura 14: Mapa do nível d'água, Autor (2016)	55
Figura 15: Mapa do <i>NSPT</i> para o 1º metro, Autor (2016).....	56
Figura 16: Mapa do <i>NSPT</i> para o 2º metro, Autor (2016).....	57
Figura 17: Mapa do <i>NSPT</i> para o 3º metro, Autor (2016).....	58
Figura 18: Mapa do <i>NSPT</i> para o 4º metro, Autor (2016).....	59
Figura 19: Mapa do <i>NSPT</i> para o 5º metro, Autor (2016).....	60
Figura 20: Mapa do <i>NSPT</i> para o 6º metro, Autor (2016).....	61
Figura 21: Mapa do <i>NSPT</i> para o 7º metro, Autor (2016).....	62
Figura 22: Mapa do <i>NSPT</i> para o 8º metro, Autor (2016).....	63
Figura 23: Mapa do <i>NSPT</i> para o 9º metro, Autor (2016).....	64
Figura 24: Mapa do <i>NSPT</i> para o 10º metro, Autor (2016).....	65
Figura 25: Regiões com informações não confiáveis, Autor (2016).....	66
Figura 26: Região onde estão sendo implantados novos loteamentos, Autor (2016)	67
Figura 27: Região com susceptibilidade ao fenômeno da colapsibilidade, Autor (2016).....	68
Figura 28: Tipos de argilas encontradas nos boletins de sondagens coletados em Toledo, Autor (2016)	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação da classe de textura do solo, Reinert & Reichert (2006)	27
Quadro 2: Classificação do solo segundo a compacidade ou consistência de acordo com o <i>NSPT</i> , NBR 6484/2001	27
Quadro 3: Resumo das principais características das projeções, Silva (2008)	34
Quadro 4: Descrição do Boletim de Sondagem	48
Quadro 5: Análise exploratória dos dados de <i>NSPT</i>	53
Quadro 6: Análise exploratória dos dados de Nível d'água	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD – Computer Aided Design

CV – Coeficiente de Variação

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

NBR – Norma Brasileira

NSPT – Índice de Resistência a Penetração

S – Desvio Padrão

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SPT – Standard Penetration Test

UNESCO – Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura

UTM – Universo Transverso de Mercator

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	11
1.1 INTRODUÇÃO	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo Geral.....	12
1.2.2 Objetivos Específicos.....	13
1.3 JUSTIFICATIVA.....	13
1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	15
1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	15
CAPÍTULO 2	16
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1.1 O solo	16
2.1.1.1 Classificação Pedológica	17
2.1.1.2 Laterização.....	19
2.1.1.3 Latossolo.....	20
2.1.1.4 Capilaridade.....	21
2.1.1.5 Colapsibilidade	22
2.1.2 Investigação Geotécnica.....	23
2.1.2.1 Procedimentos de Ensaio de Sondagem SPT	24
2.1.2.2 Fatores que influenciam o Ensaio de Sondagem SPT	27
2.1.3 Mapeamento Geotécnico.....	28
2.1.3.1 O mapeamento como indicador econômico para construção civil.....	29
2.1.4 Geoprocessamento	30
2.1.4.1 Sistema de Informações Geográficas (SIG)	30
2.1.4.2 Arquitetura do sistema de geoprocessamento	30
2.1.4.3 <i>Software Surfer</i>	32
2.1.4.4 Sistema de Coordenadas.....	33
2.1.4.5 Sistema de Projeção.....	34
2.1.4.6 Sistema de Projeção UTM.....	35
2.1.5 Interpolação dos Dados	35
2.1.5.1 Krigagem	37
2.1.5.2 Krigagem Ordinária.....	37
2.1.5.3 Semivariograma.....	38

2.1.6 Banco de Dados.....	40
2.1.7 Análise Exploratória de Dados	40
CAPÍTULO 3.....	42
3.1 METODOLOGIA	42
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA.....	42
3.3 COLETA DE DADOS.....	46
3.4 MAPA DO MUNICÍPIO DE TOLEDO	46
3.5 ANÁLISES DOS DADOS.....	47
3.5.1 Georreferenciamento.....	48
3.6 IMPORTAÇÃO PELO <i>SURFER</i>	49
3.6.1 Criação de um mapa com a localização dos pontos	49
3.6.2 Estudo Variográfico	50
3.6.3 Interpolação dos Dados	51
3.6.4 Geração dos Mapas	52
3.6.4.1 Recorte das Áreas	52
3.6.4.2 Apresentação final dos Mapas	52
CAPÍTULO 4.....	53
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1.1 Análise Exploratória dos dados	53
4.1.2 Nível d'água	55
4.1.3 Resistência a Penetração (<i>NSPT</i>).....	56
4.1.4 Discussões	66
CAPÍTULO 5.....	70
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
CAPÍTULO 6.....	71
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
APÊNDICES	
APÊNDICE A - SEMIVARIOGRAMAS	76
ANEXOS	
ANEXO A - EQUIPAMENTOS DO ENSAIO SPT.....	78
ANEXO B - MODELO DE BOLETIM DE SONDAGEM.....	79
ANEXO C - EXEMPLOS ILUSTRATIVOS DE TIPO DE PROJEÇÃO.....	80

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

O conhecimento do meio físico de maneira integrada é imprescindível para o plano de desenvolvimento urbano das cidades. Pesquisas indicam a necessidade e a urgência desse conhecimento, visto que este pode ajudar a melhorar a qualidade de vida da população, a qual faria seus investimentos de acordo com as características físicas de sua região, sem superfaturar o empreendimento. Um dos problemas principais encontra-se na dificuldade de identificar as características dos solos, os quais juntamente com os elementos de fundação constituem a infraestrutura de uma obra.

Segundo Diemer *et al* (2008), o solo é o material mais utilizado na Engenharia Civil, fazendo parte praticamente de todos os empreendimentos, seja como material de construção ou como suporte das cargas atuantes. Dessa maneira, o conhecimento das suas propriedades geotécnicas é de fundamental importância para o desenvolvimento de projetos com segurança e economia.

Os autores ainda concluem que para esse conhecimento, é necessário, portanto, caracterizar adequadamente as suas propriedades geotécnicas. Essa caracterização se refere às investigações do solo que se pretende utilizar, a fim de determinar seu tipo, estratigrafia, composição e estrutura, de maneira a embasar os projetos de engenharia. Nesse trabalho a caracterização se deu através de dados contidos em boletins de sondagem SPT, utilizando o índice de resistência à penetração (*NSPT*) e nível de água.

Os autores citam que em algumas obras de engenharia, problemas envolvendo a infraestrutura, decorrentes do desconhecimento das propriedades do solo podem comprometer a utilização e desempenho do empreendimento, ou levar a gastos desnecessários com superdimensionamento da estrutura, levando a grandes prejuízos financeiros.

Ao longo da história da engenharia civil, principalmente no Brasil, o uso de sondagens a percussão para Ensaio de Penetração Padrão (SPT), consiste em um importante apoio nas investigações geotécnicas de projetos de fundações.

O conhecimento das condicionantes geotécnicas pode atenuar a interferência antrópica do ambiente geológico, decorrente do crescimento populacional e de suas necessidades, visando sua ocupação de uma maneira mais adequada e diminuindo os custos de implantação. Segundo Zuquette (1987 *apud* Maciel Filho, 1997), por ser grande o número

de situações que devem ser analisadas, exige-se uma ferramenta que seja polidirecional e multiobjetiva. Essa necessidade contribuiu para a evolução dos mapas geotécnicos, que se caracterizam como uma boa ferramenta para fazer uma análise global do meio físico.

Para Pejon e Rodrigues (1987 *apud* Maciel Filho, 1997), os estudos geotécnicos constituem ótimos instrumentos de análise do meio físico. A apresentação dos resultados desses estudos sob a forma cartográfica é ainda a melhor maneira de representação das informações e sugestões, pois facilitam o seu entendimento e uso.

Com base nessas informações, citadas anteriormente, esse trabalho de mapeamento geotécnico, visou fornecer subsídios sobre os aspectos geotécnicos da cidade de Toledo no oeste do Paraná, com intuito de contribuir nas atividades de planejamento urbano e gestão territorial, assim como, contribuir nas resoluções de problemas correntes na Engenharia.

Com o auxílio de um SIG (Sistema de Informações Geográficas) e da aplicação de técnicas geoestatísticas, os dados coletados foram reunidos e organizados, permitindo o mapeamento de unidades com diferentes comportamentos. Com a utilização dessas técnicas para extrapolação dos dados, foi possível a obtenção de cartas com o desvio padrão das diferentes variáveis analisadas, o que pode ser utilizado na determinação de áreas com poucas amostras e no planejamento de futuras campanhas de investigação.

Os resultados obtidos com esta caracterização permitiram a confecção de mapas orientativos, que poderão ser utilizados para o planejamento de futuras obras em Toledo, fornecendo informações sobre as principais unidades geotécnicas, e áreas com susceptibilidade ao colapso, permitindo ainda a identificação dessas possíveis áreas desfavoráveis, e para quais empreendimentos apresentariam maiores riscos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Produzir mapas geotécnicos que auxiliem nas discussões de planejamento urbano e estudos de viabilidade técnica de empreendimentos na cidade de Toledo, no oeste do estado do Paraná.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Coleta de dados, oriundos de laudos de sondagem SPT, realizados no perímetro urbano da cidade de Toledo;
- b) Análise dos laudos de sondagem SPT;
- c) Tratamento geoestatístico dos dados coletados;
- d) Gerar mapas geotécnicos que apresentem as características geotécnicas (*NSPT* e nível d'água do subsolo contidas em boletins de sondagem SPT, do 1º até o 10º metro de profundidade);
- e) Identificar áreas susceptíveis ao fenômeno da colapsibilidade.

1.3 JUSTIFICATIVA

A proposta do trabalho em conhecer o solo é de grande importância, tendo em vista sua possível heterogeneidade, o qual pode apresentar variações de suas características em curtas distâncias e pequenas profundidades. Nesse sentido, Aoki (2005) afirma que a verificação de confiabilidade de uma fundação, exige a determinação da probabilidade de ruína, através da análise de variabilidade da solicitação e da resistência do conjunto de elementos isolados que compõem a fundação, a qual é diretamente influenciada pela variabilidade geotécnica do solo.

Vale ressaltar que o conhecimento da distribuição espacial das características geotécnicas dos solos, visa fornecer as condições iniciais que podem, a princípio, orientar o tipo de fundação que deverá corresponder às condições de um determinado local, no entanto, sem eliminar a necessidade de estudos mais detalhados.

O mapeamento geotécnico é uma atividade que vem sendo aplicada nas cidades emergentes do estado paranaense, como Cascavel, Londrina, Curitiba, no entanto, os trabalhos realizados, por vezes, mostram uma abordagem diferenciada. Uma metodologia concisa pode trazer resultados positivos em termos de aplicabilidade, onde o conhecimento dos aspectos geotécnicos da área resultará em estruturas bem dimensionadas, gerando segurança e economia para a sociedade.

A caracterização geotécnica do solo para empreendedores com menos recursos financeiro, é ainda mais importante devido à racionalização dos recursos. Em decorrência disso, a realização de esforços por parte da comunidade técnica e das autoridades municipais,

no sentido de agilizar o processo de investigação, entendimento e planejamento urbano, é de suma importância para os municípios.

De acordo com Maciel Filho (1997), alguns métodos de dimensionamento de fundações rasas e profundas usam sistematicamente os resultados de *SPT* para seu dimensionamento, especialmente no Brasil. Observa-se que nos dias de hoje, apesar da baixa representatividade do custo deste tipo de ensaio (porcentagem em relação ao custo total da obra), várias fundações de edificações ainda são dimensionadas sem o conhecimento dos índices do solo daquela obra, ficando então, susceptíveis a problemas estruturais que poderão comprometer a estrutura, ou ainda, levar a um consumo exagerado de insumos nos elementos de fundações.

Caputo (1988) cita que a importância de estudos sobre o subsolo é tão grande e tão evidente, que compara o engenheiro que o omite, com um cirurgião que opera sem um prévio diagnóstico ou com advogado que defende uma causa sem um prévio entendimento com o seu cliente.

A NBR 14653-2 (2004), que trata da avaliação de bens imóveis urbanos, tem um de seus métodos avaliativos chamado de Método Comparativo Direto de dados de mercado, o qual necessita de um tratamento de dados por fatores, sejam fatores físicos (frente, área, formato), localização (bairro, esquina), econômicas (oferta, época) e outros atributos que se revelem importantes. Um dos fatores que pode ser aplicado é o fator de topografia. Tratando-se de localização com topografia acidentada, o terreno pode sofrer decréscimo de até 30% (fator 0,70) no valor em relação ao terreno plano situado ao lado. Idem se for passível de alagamento e o outro não. Com base nesse trabalho de mapeamento geotécnico, o fator geotécnico poderia ser também utilizado no tratamento de dados para o método comparativo nas avaliações de imóveis urbanos, devido à necessidade de aplicação de técnicas especiais para aproveitamento de terrenos que tenham solos desfavoráveis (por exemplo: baixa resistência; nível d'água pouco profundo.).

Segundo Câmara e Medeiros (1998 *apud* Abel, 2002), em países de dimensões continentais como o Brasil, com uma grande carência de informações adequadas para a tomada de decisões sobre os problemas urbanos, o geoprocessamento apresenta um enorme potencial, principalmente baseado em tecnologias de custo relativamente baixo, em que o conhecimento seja adquirido localmente.

1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

De acordo com a Revista Toledo (2015), o crescimento acelerado de Toledo nos campos econômico, infraestrutura e social tem atraído investimentos, que motivam uma busca por um melhor aproveitamento dos terrenos, na área central, com a verticalização das construções, assim como nos bairros o crescimento toma forma através de residências confortáveis e novos loteamentos.

Tais fatores intensificam a necessidade de um conhecimento prévio das características do solo que será usado como suporte para esses empreendimentos, para que se tenha uma adequada utilização e se opte pela melhor solução que viabilize o projeto.

Segundo Gutiérrez (2005), solos com presença significativa de argilas flocculadas, são de grande suscetibilidade a ocorrência da colapsibilidade, onde a não identificação dessas áreas podem oferecer riscos as edificações.

Sendo assim, algumas questões são levantadas: Quais as características do solo de Toledo? Como é a sua distribuição? Existem áreas susceptíveis ao fenômeno da colapsibilidade?

1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O trabalho foi limitado à investigação das condições geotécnicas do perfil de solo (1º ao 10º metro de profundidade) do perímetro urbano do município de Toledo, localizado no oeste do Paraná, através de dados contidos em boletins de sondagem SPT, cedido por empresas de engenharia que colaboraram com a pesquisa. Esses dados coletados, com o auxílio de um SIG (Sistema de Informações Geográficas), foram interpolados e apresentados sob a forma de mapas que apresentaram, metro a metro, os índices de resistência do solo (*NSPT*) e nível da água. Tais informações verificarão a heterogeneidade do solo, identificando possíveis áreas de risco, a fim de motivar o estudo da influência do meio ambiente sobre as obras de engenharia.

CAPÍTULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 O Solo

De acordo com Caputo (1988), os solos são materiais que resultam dos intemperismos das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química. Por desintegração mecânica, através de agentes como água, temperatura, vento, relevo, levando em conta o tempo de exposição da rocha à ação destes agentes. Por decomposição química, o principal agente é a água e os principais mecanismos de ataque são: oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos da vegetação. As argilas representam o último produto do processo de decomposição.

Para Silva (2008), os solos são provenientes da interação de processos intempéricos e pedogenéticos (podendo atuar juntos ou separadamente), que atuam sobre um dado substrato rochoso. Os processos pedogenéticos podem ser definidos como os processos no qual a camada mais superficial de solo sofre adição, perda, transformação e transporte de material.

Segundo Vaz (2003), os principais processos pedogenéticos são os de eluviação (perda) e iluviação (adição), lixiviação (remoção de sais solúveis), a podzolização (concentração de sílica) e laterização (concentração de ferro).

Reinert & Reichert (2006), citam textura e porosidade como as duas propriedades mais importantes do solo. Enquanto textura é definida pela distribuição de tamanho de partículas, a porosidade refere-se à estrutura do solo, definida pelo arranjo das partículas em agregados. A porosidade é responsável por um conjunto de fenômenos e desenvolve uma série de mecanismos de importância na física de solos, tais como retenção e fluxo de água e ar.

Os autores ainda afirmam que a textura do solo é definida pela proporção relativa das classes de tamanho de partículas de um solo. A Sociedade Brasileira de Ciência do Solo define quatro classes de tamanho de partículas menores do que 2 mm (Quadro 1), usadas para a definição da classe de textura dos solos:

Quadro 1 – Classificação da classe de textura do solo.

Solo	Peneira
Pedregulho	>5mm
Areia Grossa	5mm - 2mm
Areia	2mm - 0,5mm
Areia fina	0,5mm - 0,05mm
Silte	0,05mm - 0,005mm
Argila	<0,005mm

Fonte: Reinert & Reichert (2006)

De acordo com Maciel Filho (1997), a composição do solo pode ser identificada pela definição do tamanho do grão;

- a) Cascalho: fragmentos de rocha;
- b) Pedrisco: minerais primários: quartzo, calcedônia, às vezes, feldspato no pedrisco (areião);
- c) Areia: minerais primários: quartzo principalmente, às vezes, feldspato; fragmentos de rocha de grão fino; agregados herdados: partículas constituídas por um mineral primário alterado e um mineral resultante da alteração; agregado de quartzo e argila: grãos de quartzo com argila aderida; agregados de argila: minerais de argila aglutinados por um cimento, (ex: ferro);
- d) Silte: minerais primários: quartzo; material ferruginoso e calcário; pseudo-agregados ou agregados de quartzo e argila ou só argila; partículas individuais de certos minerais de argila (ex: vermiculita);
- e) Argila: minerais de argila; óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio; minerais primárias (em pequena proporção); calcários; matéria orgânica.

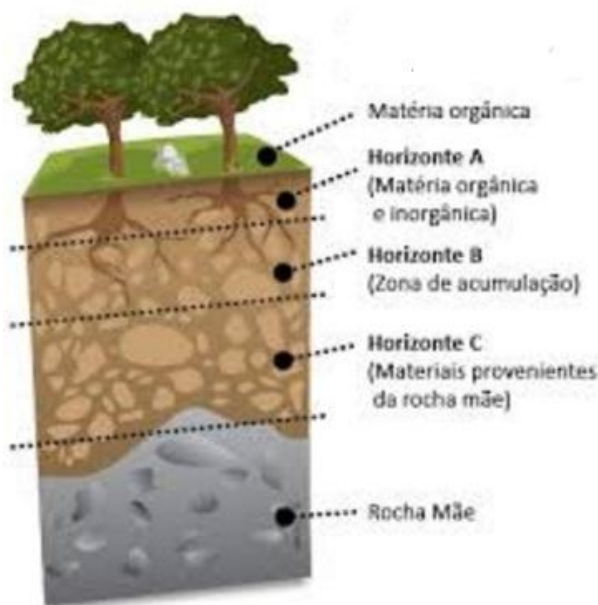
2.1.1.1 Classificação Pedológica

Para fins práticos, é interessante a classificação pedológica, pois ela indicará uma série de propriedades geotécnicas que se deve esperar, em função do comportamento de solos semelhantes em áreas geotecnicamente conhecidas. Um dos bons indicativos é a atividade da argila e a espessura do solo.

Para Silva (2008), a pedologia é a ciência que estuda e classifica o solo baseado nas características físicas e químicas do solo. Para a pedologia o perfil de solo é dividido em camadas ou horizontes, mais ou menos paralelos à superfície topográfica.

De acordo com Caputo (1988), as camadas que constituem um perfil são denominadas Horizontes (Figura 1) e designam-se pelas letras: A (camada superficial); B (subsolo) e C (camada profunda).

Figura 1 – Horizontes do solo



Fonte: Faure (1998).

Silva (2008) afirma que neste tipo de classificação, a camada que confere as principais características ao solo para sua classificação, está aproximadamente entre 0,10 m e 2,0 m. Esta camada é denominada de Horizonte B. Este horizonte é caracterizado, geralmente, por baixo teor de matéria orgânica e forte expressão de cor e estrutura. Sua espessura varia de acordo com a intensidade dos processos intempéricos/pedogenéticos que o solo/rocha sofreram. Algumas das características observadas neste horizonte para sua classificação é a presença de alumínio e ferro.

Vaz (2003) menciona o clima como principal responsável pela definição da espessura e o número de horizontes, ou camadas, do solo residual (não transportado).

2.1.1.2 Laterização

De acordo com Maciel Filho (1997), a laterização ocorre nas regiões tropicais e subtropicais úmidas onde o intemperismo é mais intenso. As bases solúveis (Ca, Mg, K, Na) são liberadas, o pH se aproxima de 7, aumentando a solubilidade da sílica e diminuindo a do alumínio. Se a drenagem é satisfatória, há intensa oxidação e fixação de ferro. O regolito (saprólito e solo saprolítico) atinge grande profundidade, e o horizonte B torna-se espesso.

Melfi (1997 *apud* Gonçalves, 2006), cita como um dos fatores de grande importância ao processo de intemperismo, a evolução da matéria orgânica, que nas regiões tropicais, devido às altas temperaturas, ocorre uma degradação muito rápida da matéria orgânica, tornando-a totalmente mineralizada, dando origem à água e gás carbônico (CO₂).

Ainda, segundo esses autores, essa presença do CO₂, confere às soluções das regiões tropicais características relativamente ácidas (pH entre 5,5 e 6,0). Nessas condições, o alumínio e o ferro são praticamente insolúveis e se acumulam na forma de óxidos ou hidróxidos, enquanto que os elementos alcalinos e alcalinos terrosos são totalmente lixiviados, assim como a sílica. Esta também é mobilizada, porém com velocidade menor que os alcalinos, possibilitando em algumas situações a recombinação entre a sílica e o alumínio, formando os argilominerais.

Para Melfi (1997 *apud* Gonçalves, 2006), a laterização é favorecida devido às condições climáticas de alta temperatura e umidade, típicas de regiões tropicais entre os paralelos 30° N e 30° S de latitude. O Brasil possui características tropicais (altas temperaturas e elevada pluviosidade), fatores propícios à ocorrência do processo de laterização.

Melfi (1997 *apud* Gonçalves, 2006), mencionam que nas formações lateríticas, mineralogicamente predominam os óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio (goethita, hematita, gibsitita e materiais amorfos) e argilo-minerais do grupo da caulinita, além do quartzo, que representa o mineral residual do intemperismo. Segundo Gonçalves (2006), no sul do Brasil a hematita é o principal constituinte técnico das formações lateríticas.

Segundo Silva (2008), a laterização é o fenômeno de concentração de moléculas contendo ferro no solo. Solos laterizados possuem em geral modificações em sua microestrutura, bem como o surgimento de cimentações (ação cimentante de óxidos e de hidróxidos de ferro que agrega as partículas mais finas), entre suas partículas, fenômenos estes, oriundos de processos intempéricos, fazendo com que na prática se comportem como siltes e até como areias finas (argila floculada).

O autor ainda conclui que as características dos solos lateríticos citadas anteriormente, como estrutura porosa, existência de agente cimentante e condição não-saturada, geralmente dão origem a um outro fenômeno denominado de colapso. Em suma, o solo colapsível apresenta uma estrutura instável, porém com uma rigidez temporária mantida pela tensão de sucção e/ou cimentação.

Para Vaz (2003), os solos lateríticos correspondem sempre à porção superficial de um solo, que geologicamente também é denominado de solo eluvial, que recebe este nome devido à perda de material.

De acordo com a Embrapa (1999 apud Zorzi, 2008), a denominação de lateríticos se incorporou na terminologia dos engenheiros civis, no entanto, nas classificações pedológicas atualmente utilizam o termo Latossolo.

2.1.1.3 Latossolo

Espíndola *et al* (2008), afirma que na Engenharia Civil a aplicação do termo solos lateríticos ainda é de uso corrente, enquanto que no campo da Ciência do Solo (que trata da gênese, morfologia e classificação) a Pedologia, instituiu a denominação “Latossolo” para aqueles solos profundos bem desenvolvidos.

Apesar do termo Latossolo ser comumente utilizado em classificações do solo por profissionais da Agronomia, a apresentação de sua definição e características são de grande importância dentro desse trabalho, tendo em vista que muitas bibliografias ainda utilizam esse termo em Engenharia Civil, e pelo fato da cidade de Toledo ter poucos estudos de seu solo voltados para Engenharia Civil, onde esses poucos estudos apresentam o termo Latossolo.

Para Maciel Filho (1997), latossolo é o termo aplicado a solos de regiões tropicais e equatoriais cujas características predominantes estão associadas com baixos coeficientes sílica/sesquióxidos das frações de argila, reduzida atividade de argila, reduzido teor dos componentes solúveis, elevado grau de estabilidade dos agregados, e talvez, certa cor vermelha.

De acordo com Silva (2008), o latossolo é um exemplo de classe pedológica, que por sua vez possui diversas classes, como por exemplo os latossolos amarelos ou vermelhos. Os vermelhos são provenientes de rochas máficas (não-ácidas, ou seja, com teor de sílica menor do que 65%).

Gonçalves (2006) cita que os latossolos recobrem cerca de 50% do território brasileiro, ocorrendo praticamente em todas as regiões do país, sobre diferentes tipos de rochas. São altamente evoluídos, laterizados, ricos em argilominerais e oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, estrutura altamente porosa e de espessas camadas superficiais, características encontradas no solo de Toledo.

Segundo Gutierrez (2005), no Paraná, os latossolos ocupam cerca de 30% do território e apresentam tanto textura predominantemente média (areia argilosa), oriundas do Arenito Caiuá, quanto argilosa a muito argilosa provenientes de rochas vulcânicas.

O autor ainda menciona que os latossolos são, de modo geral, considerados colapsíveis, pois as características estruturais apresentadas pelos latossolos apresentam predomínio de zonas microagregadas, especialmente nos horizontes mais superficiais, gerando uma porosidade estrutural importante e a presença de tubos e cavidades, resultantes de atividades biológicas, formando assim, as condições mais propícias ao desenvolvimento do colapso.

2.1.1.4 Capilaridade

Segundo Caputo (1988), nos solos, através da capilaridade, a água se eleva por entre os interstícios de pequenas dimensões deixados pelas partículas sólidas, além do nível do lençol freático, sendo a altura dessa elevação dependente da natureza do solo. O autor ainda afirma que essa altura é inversamente proporcional ao diâmetro dos poros, portanto em solos finos (siltosos e argilosos), os quais tem vazios de diâmetro reduzido, a altura capilar será maior do que nos solos grossos (pedregulhosos).

Para o autor, se o terreno de fundação é constituído por um solo siltoso e o nível freático está pouco profundo, já se fazem necessárias certas precauções.

De acordo com Soriano (2014), em solos colapsíveis que estão acima do nível freático, ocorrem pressões de poro negativas, se o balanço de entrada e saída de água permanece constante, os problemas de colapso não aparecerão. No entanto, se existirem alterações no conteúdo de umidade no solo, serão produzidas mudanças nas pressões de poros, ocasionando uma diminuição do volume nos solos colapsíveis.

Vilar (2004) menciona que a sucção matricial, que decorre das forças de capilaridade (gerando pressão neutra negativa) e de adsorção, forças essas originadas da interação entre a matriz de solo e água, é quem confere uma coesão adicional (coesão “aparente”) ao solo e,

portanto, aumenta significativamente a resistência ao cisalhamento do solo. Baixos valores do teor de umidade correspondem altos valores da sucção matricial.

2.1.1.5 Colapsibilidade

Gutierrez (2005) relata que, colapso é o fenômeno decorrente da perda de resistência ao cisalhamento de um solo poroso e não saturado, quando inundado e sob uma determinada tensão aplicada, ocasionando uma espécie de desmoronamento de sua estrutura. As causas de inundação do solo, dentre outras, podem ser devido à ruptura de condutos de água ou esgoto, infiltração de água de chuva ou ascensão do lençol freático.

A autora ainda menciona que, nas obras civis o colapso se manifesta com o surgimento de trincas e rachaduras nas construções, danos estruturais em pavimentos, deformações excessivas de maciços compactados durante enchimentos de reservatórios, colapso nas fundações e outros.

Gutierrez (2005) conclui que, existe a possibilidade de uma prévia identificação do solo colapsível em campo. Os padrões de identificação em campo provêm da comparação de boletins de sondagens e a confirmação laboratorial da colapsibilidade. Solos colapsíveis caracterizam-se por apresentar estruturas porosas (índice de vazios elevados, porosidade $\geq 40\%$), teor de umidade menor do que o necessário para a sua completa saturação (grau de saturação $\leq 60\%$), baixo peso específico seco e *NSPT* normalmente baixos (<4).

Ainda de acordo com a autora, as maiores partículas dos solos colapsíveis (em sua umidade natural) são mantidas em suas posições por meio de vínculos capazes de lhes conferir uma resistência adicional temporária, a qual é atribuída à sucção (forças capilares e de adsorção) e a presença de algum agente cimentante, como os óxidos de ferro e carbonatos, tornando-o uma estrutura porosa e instável. Vilar (2004), conclui que esta estrutura que confere ao solo uma resistência adicional pode ser quebrada por agentes externos, em geral a água, a qual provoca o enfraquecimento (ou destruição) da cimentação e a dissipação da sucção matricial, anulando a coesão “aparente” e, portanto, reduzindo significativamente a resistência ao cisalhamento, o que provoca o colapso da sua estrutura.

Carvalho *et al* (1981 *apud* Gutierrez, 2005), apresentou um estudo sobre a relação entre a micromorfologia dos solos lateríticos e o seu comportamento hídrico e mecânico. Dentre eles estava o solo “Latossolo Roxo” (atualmente denominado Latossolo Vermelho, encontrado também na cidade de Toledo), desenvolvido a partir de rochas basálticas da Bacia

do Paraná, constituindo um horizonte B, caracterizado frequentemente por espessas camadas, chegando a atingir 10 a 15 metros de espessura, de cor vermelha escura e de textura predominantemente argilosa (fração argila $\geq 60\%$).

Para os autores, esses comportamentos hídricos e mecânico do latossolo roxo revelados pelos resultados de testes e medidas físicas parecem ser mais dependentes de sua morfologia do que da natureza e da abundância dos seus constituintes argilosos, já que estes últimos se associam sob forma de microagregados estáveis, que reagem como areias sob esforços hídricos e mecânicos fracos.

De acordo com Cintra (1998 *apud* Gonçalves, 2006), fundações de edificações de pequeno porte, geralmente possuem estacas curtas (< 4 metros), as quais ficam embutidas por completo em camadas superficiais onde são mais susceptíveis ao colapso. Essas estacas, quando sujeitas ao colapso sofrem uma redução de cerca de 50% da capacidade de carga em seu estado umedecido.

2.1.2 Investigação Geotécnica

Conforme a NBR 6122/1996, a implantação de qualquer obra de Engenharia Civil exige a realização de investigações geotécnicas para orientação dos projetos e execução de fundações.

A importância de se conhecer o método a ser empregado no estudo do solo está ligada basicamente à avaliação do que ele pode fornecer. Dentre os métodos de prospecção geotécnica disponíveis, optou-se pelas Sondagens de simples reconhecimento do solo (*SPT*), por ser o mais comumente aplicado na região de oeste do Paraná, o qual é normatizado pela NBR 6484/2001.

A NBR 6484/2001 é quem descreve o método de execução de sondagens de simples reconhecimento de solos com *SPT*, cujas finalidades para aplicações em Engenharia Civil, são:

- a) a determinação dos tipos de solo em suas respectivas profundidades de ocorrência;
- b) a posição do nível-d'água;
- c) os índices de resistência à penetração (*N*) a cada metro.

De acordo com a norma, o número *N* refere-se ao índice de resistência à penetração do *SPT*, onde sua determinação é obtida pelo número de golpes correspondente à cravação de

30 cm do amostrador-padrão, após a cravação inicial de 15 cm, utilizando-se corda de sisal para levantamento do martelo padronizado.

2.1.2.1 Procedimentos de Ensaio de Sondagem *SPT* (*Standard Penetration Test*)

A NBR 8036/1993, define que as sondagens devem ser, no mínimo, de uma para cada 200 m² de área da projeção em planta do edifício, até 1200 m² de área. Entre 1200 m² e 2400 m² deve-se fazer uma sondagem para cada 400 m² que excederem de 1200 m². Acima de 2400 m² o número de sondagens fica a critério do responsável pelo plano particular da construção. Em quaisquer circunstâncias o número mínimo de sondagens deve ser:

- a) dois para área da projeção em planta do edifício até 200 m²;
- b) três para área entre 200 m² e 400 m².

Ainda de acordo com a norma, as locações dos furos das sondagens devem ser igualmente distribuídas em toda a área durante os estudos preliminares. Já na fase de projeto podem-se localizar as sondagens de acordo com critérios específicos que levem em conta pormenores estruturais (por exemplo: pilar mais carregado). Ela também cita que, quando o número de sondagens for superior a três, elas não devem ser distribuídas ao longo de um mesmo alinhamento.

A norma menciona que, a exploração deve atingir todas as camadas impróprias ou que sejam questionáveis como apoio de fundações, de tal forma que não venham a prejudicar a estabilidade e o comportamento estrutural ou funcional do futuro edifício.

Após a análise e definição dos furos, inicia-se sua locação, que segundo a NBR 6484/2001, cada furo de sondagem deve ser marcado com a cravação de um piquete de madeira ou material apropriado, o qual deve ter gravada a identificação do furo e estar suficientemente cravado no solo, servindo de referência de nível para a execução da sondagem e posterior determinação de cota através de nivelamento topográfico. Com os furos devidamente locados, procede-se a instalação do equipamento para iniciar o ensaio. Os equipamentos de ensaio do *SPT* (Anexo A) se constituem de um tripé com roldana, hastes de 1m a 2m de comprimento e diâmetro nominal de 25 mm, martelo com massa igual a 65kg, corda de sisal, tubo de revestimento, sistema de perfuração com circulação de água, cabeça de bater, haste-guia do martelo, fita métrica ou trena, trado concha, trado helicoidal e um amostrador padrão.

A NBR 6.484/2001 cita que o sistema de hastes seja de aço e que possua diâmetro interno igual a 23,4 mm $\pm$ 5 mm e diâmetro externo igual a 33,4 mm $\pm$ 2,5 mm, com peso de 32 N/m. O martelo de 65kg deve se constituir de um cilindro ou prisma de ferro, e na sua parte inferior um coxim de madeira dura, que segundo a norma pode ser peroba rosa ou uma outra equivalente.

Segundo a NBR 6484/2001, a sondagem deve ser iniciada utilizando o trado-concha ou cavadeira manual até a profundidade de 1 m, seguindo-se a instalação até essa profundidade, do primeiro segmento do tubo de revestimento dotado de sapata cortante. O ensaio *SPT* é realizado na base desse furo de sondagem, com dimensões e energia de cravação normatizadas (pilão com 65 kg de massa e altura de queda de 750 mm). Nas operações subseqüentes de perfuração, intercaladas às de ensaio e amostragem, deve ser utilizado trado helicoidal até se atingir o nível d'água freático. Quando o avanço da perfuração com emprego do trado helicoidal for inferior a 50 mm após 10 min de operação ou no caso de solo não aderente ao trado, passa-se ao método de perfuração por circulação de água, também chamado de lavagem.

Segundo a norma, o processo de perfuração por circulação de água, associado aos ensaios penetrométricos, deve ser utilizado até onde se obtiver, nesses ensaios, uma das seguintes condições:

- a) quando, em 3 m sucessivos, se obtiver 30 golpes para penetração dos 15 cm iniciais do amostrador-padrão;
- b) quando, em 4 m sucessivos, se obtiver 50 golpes para penetração dos 30 cm iniciais do amostrador-padrão;
- c) quando, em 5 m sucessivos, se obtiver 50 golpes para a penetração dos 45 cm do amostrador-padrão.

Ainda de acordo com a norma, a operação de perfuração por circulação de água é realizada com o auxílio de um trépano de lavagem como ferramenta de escavação. O material escavado é removido por meio de circulação de água, realizada pela bomba d'água motorizada, através da composição de perfuração. O procedimento consiste na elevação da composição de perfuração em cerca de 30 cm do fundo do furo e na sua queda, que deve ser acompanhada de movimentos de rotação alternados aplicados manualmente pelo operador. À medida que se alcança a cota de ensaio e amostragem, recomenda-se diminuir progressivamente essa altura. Ao se atingir a cota de ensaio e amostragem, a composição de perfuração deve ser suspensa a uma altura de 0,20 m do fundo do furo, mantendo-se a

circulação de água por tempo suficiente, até que todos os detritos da perfuração tenham sido removidos do interior do furo.

A NBR 6484/2001, cita que durante as operações de perfuração, caso a parede do furo se mostre instável, é obrigatória descida de tubo de revestimento até onde se fizer necessário, alternadamente com a operação de perfuração. A norma complementa que, deve-se ter cuidado para não descer o tubo de revestimento a uma profundidade além do comprimento perfurado, devendo o mesmo ficar a uma distância de no mínimo 50 cm do fundo do furo, quando da operação de ensaio e amostragem. Em casos de fluência do solo para o interior do furo, deve ser admitido deixá-lo à mesma profundidade do fundo do furo.

Ainda de acordo com a norma, durante a operação de perfuração, devem ser anotadas as profundidades das transições de camadas detectadas por exame tátil-visual e da mudança de coloração de materiais trazidos à boca do furo pelo trado helicoidal ou pela água de circulação. Deve ser coletada, para exame posterior, uma parte representativa do solo colhido pelo trado-concha durante a perfuração, até 1 m de profundidade. A cada metro de perfuração, a partir de 1 m de profundidade, devem ser colhidas amostras dos solos por meio do amostrador-padrão, com execução de *SPT*.

A NBR 6484/2001, conclui que quando a cravação atingir 45 cm, o índice de resistência à penetração N é expresso como a soma do número de golpes requeridos para a segunda e a terceira etapas de penetração de 15 cm, dotando-se os números obtidos nestas etapas mesmo quando a penetração não tiver sido de exatos 15 cm. A norma acrescenta que, após o encerramento da sondagem e a retirada do tubo de revestimento, decorridas no mínimo 12 h, e estando o furo desobstruído, deve ser medida a posição do nível d'água, bem como a profundidade até onde o furo permanece aberto.

Após esses procedimentos, é gerado um boletim que apresenta o índice de resistência à penetração, o nível da água, as profundidades e tipos de solos, conforme exemplo encontrado no Anexo B.

Segundo Velloso (2010), o ensaio *SPT* tem uma primeira utilidade na indicação da compactidade de solos granulares (areias e siltes arenosos) e da consistência de solos argilosos (argilas e siltes argilosos). No Quadro 2, apresenta-se essa classificação.

Quadro 2 – Classificação do solo segundo a compacidade ou consistência de acordo com N_{spt} .

SOLO	N	Compacidade/ Consistência
Areias e siltes arenosos	< 4	Fofa (o)
	5 – 8	Pouco compacta (o)
	9 – 18	Medianamente compacta(o)
	19 – 40	Compacta (o)
	>40	Muito compacta (o)
Argilas e siltes argilosos	< 2	Muito mole
	3 – 5	Mole
	6 – 10	Média (o)
	11 – 19	Rija (o)
	>19	Dura (o)

Fonte: NBR 6484/2001.

De acordo com a NBR 6484/2001, a compacidade e consistência são classificadas de acordo com a deformabilidade e resistência do solo (quantidade de golpes) obtida pelo ensaio de sondagem *SPT*.

2.1.2.2 Fatores que Influenciam o Ensaio de Sondagem *SPT*

Aguiar (2014) afirma que, devida a falta de padronização e a existência de enormes dúvidas sobre a confiabilidade dos resultados apresentados pelas empresas que executam os serviços de sondagem, parte dos projetistas estruturais subavaliavam as condições do terreno e superdimensionam as fundações, levando a possíveis prejuízos financeiros.

Segundo Belicanta e Cintra (1998 *apud* Belicanta e Ferraz, 2000), os resultados das comparações de eficiência com fatores como: método de avanço da perfuração; energia existente no martelo no instante do impacto, bem como, sua transferência às hastes e esta até o amostrador, tipos de martelo, tipos de cordas ou cabos de aço, uso ou não do coxim de madeira, possível excentricidade (quando a haste guia não se encontra bem fixada), manutenção inadequada de equipamento ou mesmo a falta de treinamento e habilitação das equipes responsáveis pela organização, execução e controle das atividades de campo e de elaboração dos relatórios definitivos que contêm os resultados das sondagens/ensaios, podem ser expressos em porcentagem de eficiência, deixando claros os problemas (influências) do ensaio *SPT*.

Neste contexto, os autores ainda mencionam que, quanto menor for o montante da energia contida em cada golpe do martelo, maior será o número de golpes necessário à cravação dos 300mm finais. Considerando a linearidade de comportamento, que é válida dentro de determinados limites, pode-se admitir que N é inversamente proporcional à energia que efetivamente alcança o amostrador em cada golpe do martelo.

Também é válido salientar que a profundidade do nível d'água encontrada, pode não se referir ao nível do lençol freático, mas a porções de água que caracterizam um aquífero suspenso, de caráter intermitente, represada sobre camadas menos permeáveis, ou ainda se referir a elevação do nível d'água decorrente do efeito da capilaridade (para solos argilosos).

No entanto, tais efeitos não serão considerados no presente trabalho, assim como a época da realização das sondagens, as quais poderiam apresentar variação do nível d'água se realizadas após períodos chuvosos, onde segundo Soares (2011), estações com mais secas apresentam menores (mais profundas) valores de cota que o de estações de chuva.

2.1.3 Mapeamento Geotécnico

Segundo Coelho (1980 *apud* Maciel Filho, 1997), as primeiras tentativas de representações cartográficas das condições geotécnicas surgiram 1913, na exposição técnica de Leipzig. Gwinner, em 1954 e 1956, realizou a primeira tentativa de integrar os dados relativos às propriedades físicas e ao comportamento mecânico dos solos num contexto geológico. O maior desenvolvimento do mapeamento geotécnico se deu nos países da Europa Oriental, a partir da década de 50.

De acordo com Zuquette e Gandolfi (1987 *apud* Maciel Filho, 1997), o mapeamento geotécnico tem sido usado nos mais diferentes países, como uma ferramenta que ajuda a definir e fiscalizar a ocupação territorial das regiões de uma maneira ajustada tecnicamente e respeitando as áreas de interesse ambiental e as condições necessárias para que a população desfrute-as sem alterar as suas condições básicas de vida.

A UNESCO (1976 *apud* Maciel Filho 1997) define mapa geotécnico, como um tipo de mapa geológico que fornece uma representação geral de todos aqueles componentes de um ambiente geológico de significância para o planejamento do solo e para projetos, construções e manutenções quando aplicados à engenharia civil e de minas.

Para Abel (2002), os princípios gerais do mapeamento geotécnico devem ser aplicados aos mapas de todos os tipos de escalas. Possui a finalidade de fornecer informações

do ambiente geológico, da variação das condições geotécnicas, seus componentes individuais e suas inter-relações, de forma a auxiliar na mitigação de problemas em curso e na prevenção de problemas futuros. Estas informações devem ser apresentadas de tal modo que não somente os dados da natureza, mas também os dados de significado em engenharia possam ser entendidos e completamente analisados.

Segundo Zuquette (1987 *apud* Abel, 2002), o mapa geotécnico deve mostrar as relações espaciais e dinâmicas dos domínios geoambientais, possibilitando o conhecimento prévio das relações do meio diante de qualquer tipo de intervenção natural ou antrópica.

De acordo com os autores, a representação espacial de uma superfície, deve ser obtida através da realização de investigações, estudos e correlações de dados diversos. O mapa deve ter finalidade, uso, aplicação, precisão, funcionalidade e clareza, tendo uma linguagem que atinja os usuários não especializados.

2.1.3.1 O mapeamento geotécnico como indicador para planejamento e construção civil

Maciel Filho (1997) afirma que, um dos objetivos dos mapas geotécnicos é fornecer diretrizes, seja ela durante a fase de implantação de obras civis ou para os processos de planejamento da ocupação urbana, de uma determinada região, não dispensando, entretanto, a investigação própria para cada obra que for construída nessas áreas mapeadas. Obras que ocupam ou influenciam grandes áreas como estradas, barragens, também encontram um subsídio importante nos mapas geotécnicos.

Para Abel (2002), pela forma de ocupar uma determinada região racionalmente, subentende-se que a ocupação está sendo realizada sob um planejamento adequado, respeitando principalmente os recursos naturais, as vulnerabilidades e outras condições que definem as situações de ocupação.

O autor conclui que os documentos elaborados a partir do mapeamento geotécnico poderão ser utilizados pelos órgãos públicos para fiscalizar as ações dos usuários que tem interesse ao meio físico. Para que os dados contidos nos documentos sejam utilizados, é necessário que a apresentação seja simples, que retratem as condições de adequabilidade de cada unidade e que possibilitem analisar a interferência de uma determinada ocupação.

2.1.4 Geoprocessamento

Segundo Abel (2002), o geoprocessamento é constituído por um conjunto de técnicas (técnicas matemáticas e computacionais) ligadas à informação espacial, tornando assim possível armazenar e representar as informações de distribuição geográfica de recursos minerais, de características geotécnicas e outras de interesse. A ferramenta computacional para geoprocessamento, permite realizar análises complexas, integrar dados de diversas fontes e criar banco de dados georreferenciados, tornando possível a automação e a produção de documentos cartográficos.

2.1.4.1 Sistema de Informações Geográficas (SIG)

O Sistema de Informações Geográficas (SIG), de acordo com Burrough e Mcdonnell (1998 *apud* Coelho, 2009), constitui o tipo de estrutura mais importante em termos de viabilização do geoprocessamento. O SIG difere dos demais sistemas computacionais, pela sua capacidade de estabelecer relações espaciais entre elementos gráficos, sendo mais adequado para análise e tratamento de dados geográficos.

Coelho (2009), conclui que os dados espaciais são caracterizados por qualquer tipo de informação ou dados que possuem localização no espaço e estão relacionados a um sistema de coordenadas sobre a Terra de latitude “X” e longitude “Y”, e o atributo “Z” representado por uma base de dados espaciais (*NSPT*, nível d’água).

De acordo com Esri (1992 *apud* Rizzo, 2013), SIG pode ser definido como um conjunto organizado de hardware, software, dados geográficos e pessoal, com o objetivo de armazenar, atualizar, manipular, analisar e exibir todas as formas de informações georreferenciadas.

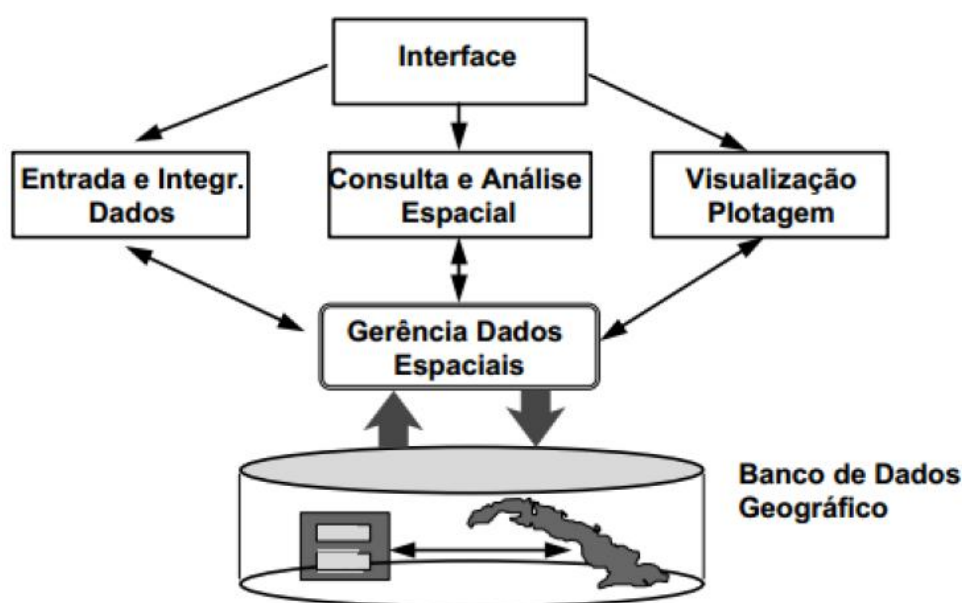
2.1.4.2 Arquitetura do Sistema de Informações Geográficas

Segundo Câmara (1995), de um modo geral, pode-se indicar que um SIG tem cinco componentes (Figura 2), os quais foram adaptados e definidos por Hara (1997) da seguinte maneira:

- Interface com usuário: define como o sistema é operado e controlado;
- Entrada e integração de dados: converte dados capturados em forma digital compatível;

- Funções de processamento gráfico e de imagens (transformação, consulta e análise espacial): provê métodos para processamento de imagens e técnicas para consulta e análise espacial;
- Visualização e plotagem: apresenta resultados em uma variedade de formas como mapas, imagens e tabelas;
- Gerência de dados espaciais: armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de um banco de dados geográficos).

Figura 2 – Arquitetura de um Sistema de Informações Geográficas



Fonte: Câmara (1995)

Para o autor, a característica básica e geral de um SIG é sua capacidade de tratar as relações espaciais entre os objetos geográficos. Os mapas correspondem às informações espaciais georreferenciadas, planos de informações, temas ou *layers*.

Segundo Silva (2008), os sistemas de informação geográfica consistem da união e análise de várias informações, como: bancos de dados; vetores; matrizes; *raster*.

De acordo com Rodrigues (2008), o dado vetorial é a representação gráfica do mundo real através de coordenadas (X,Y), assim ele expressa onde determinado fenômeno ocorre, localizando todos os objetos. Para Silva (2008), os vetores (objetos geográficos) podem ser do tipo ponto, linha ou polígono. Os pontos são comumente utilizados para representar informações pontuais, como por exemplo, localização de sondagens. Linhas

representam as divisas entre regiões, rios, arruamentos, entre outros elementos. Os polígonos podem representar informações contidas dentro de áreas delimitadas.

O autor ainda conclui que o dado *raster* ou matricial refere-se à representação gráfica do mundo real através de *pixels* (*picture element*) ou células, com forma poligonal regular, geralmente quadradas ou definidas pelas suas posições em relação às linhas ou colunas de uma malha, representando o que ocorre em todos os locais do terreno. O *pixel* é a menor unidade dentro do sistema.

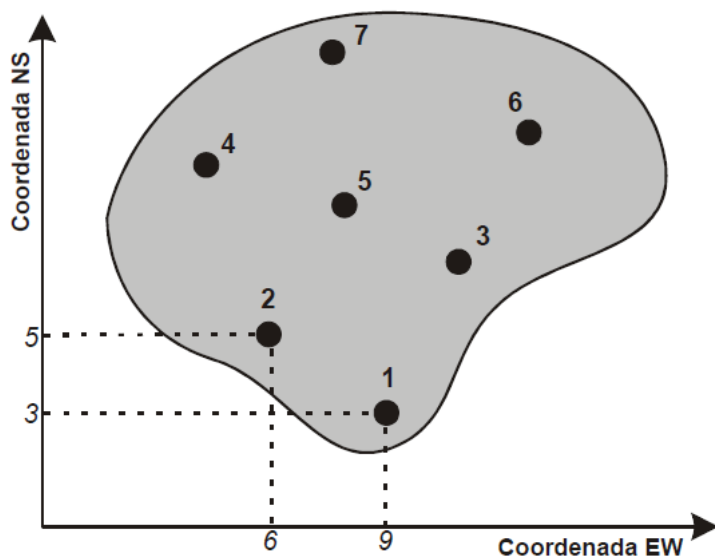
Para Pons (2006), a automatização e melhoria no processo de mapeamento geotécnico, podem ser obtidas pela utilização de SIG, por ser uma ferramenta potencial, na normalização dos dados, na manipulação das informações e combinações de mapas.

2.1.4.3 Software Surfer

Landim *et al* (2002), define o *Surfer* como um pacote de programas gráficos que pode ser usado para cálculo e confecção de mapas de variáveis, o qual aborda alguns aspectos de análise espacial como amostragem e interpolação de dados. Os dados (x,y,z) devem estar dispostos em uma malha regular, caso estejam em uma malha irregular, os mesmos deverão ser regularizados segundo os diversos algoritmos que constam dos programas a serem utilizados.

Na Figura 3, observa-se uma área cinza representando uma unidade espacial qualquer. Os pontos em preto representam pontos de amostragem. O número sobre cada ponto é a sua identificação, e os números dos eixos das ordenadas e abscissas são suas coordenadas geográficas. Nesses pontos são medidas as variáveis em estudo, no caso do presente trabalho: *NSPT* e nível d'água.

Figura 3 – Exemplo de pontos de amostragem em determinada área de estudo.



Fonte: Landim *et al* (2002)

A partir das coordenadas do ponto e dos valores assumidos pela variável nesses pontos, pode-se obter um mapa de distribuição espacial para cada variável, utilizando-se um algoritmo de interpolação. As coordenadas para cada ponto devem ser obtidas no mesmo sistema de referência, no caso do presente trabalho *Universal Transversa de Mercator* (UTM), em metros ou quilômetros, utilizando o mesmo *datum* do mapa base.

2.1.4.4 Sistema de Coordenadas

Segundo Silva (2008), os sistemas de coordenadas são dispositivos numéricos que determinam a localização de certo ponto ou local na superfície terrestre. Dentre os sistemas de coordenadas mais comuns, destaca-se:

- Sistema de coordenadas planas ou cartesianas;
- Sistema de coordenadas geográficas ou latitude e longitude.

O autor conclui que, o sistema de coordenadas planas consiste na fixação de um sistema de eixos cartesianos de referência, de modo a obter, para cada ponto, suas coordenadas X e Y. A fixação da origem deste sistema cartesiano pode ser a partir da linha de determinado fuso, linha do equador ou outro qualquer. As coordenadas neste sistema geralmente são métricas.

2.1.4.5 Sistema de Projeção

Segundo Firkowski *et al* (2004), dentre os vários métodos ou sistemas de projeção existentes, algumas particularidades tornam um ou outro método mais indicado a determinadas representações da superfície terrestre. No Anexo C, encontram-se alguns exemplos ilustrativos de projeção do tipo plana, cônica e cilíndrica.

Uma das divergências, entre uma e outra projeção, é a forma geométrica de como se projeta a superfície terrestre. Por exemplo, nas projeções planas, a superfície da Terra é projetada como se ela estivesse sendo vista ao espelho, enquanto que, nas projeções cônicas e cilíndricas, consistem em se envolver o planeta em um cone ou cilindro, respectivamente, e então “abri-lo”.

De acordo com Silva (2008), os sistemas de projeção atualmente existentes, conseguem representar somente de maneira parcial as características geométricas da Terra. As principais características encontradas nas projeções podem ser verificadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Resumo das principais características das projeções.

Quanto ao sólido de projeção	Quanto à intersecção do plano	Característica	O que preserva	O que distorce
Plana/ Cônica/ Cilíndrica	Secante ou tangente	Equivalente	Área	Distância, formato, direções.
		Equidistante	Distância	Área, formato, direções.
		Afilática	-	Todas as propriedades
		Conforme	Formato	Distância, área, direções.

Fonte: Silva (2008)

2.1.4.6 Sistema de Projeção UTM

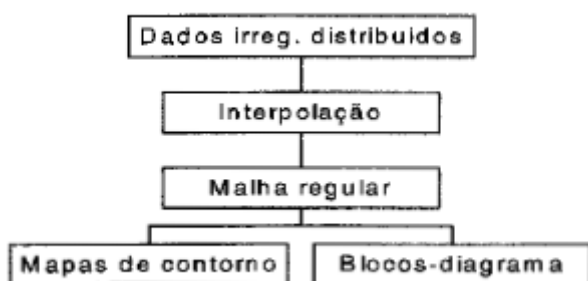
Dentre os tipos de projeção disponíveis, optou-se pelo UTM (*Universal Transverse Mercator* ou *Universo Transverso de Mercator*), o qual, segundo Camara *et al* (1996), é classificado como cilíndrico conforme, sendo aplicado em mapeamento básico em médias e grandes escalas, cartas topográficas, apresentando características que preservam ângulos, e apresentam distorções em termos de área de no máximo 0,5%. Segundo Silva (2008), este sistema faz a utilização de fusos associados a um sistema cartesiano métrico de referência e a utilização de coordenadas para ao longo do equador e para o hemisfério sul e norte do meridiano central, eliminando a possibilidade de valores negativos de coordenadas.

2.1.5 Interpolação dos Dados

Landim *et al* (2002), cita que interpolar é predizer (ou estimar) o valor da variável sob estudo num ponto não amostrado, utilizando para tal pontos já conhecidos.

Sturaro & Landim (1996 *apud* Abel, 2002), apontam que a interpolação é muito importante na obtenção automática de representações gráficas, seja para regularizar a malha de amostragem irregular, como também para traçado suave das curvas de contorno. A Figura 4 ilustra um fluxograma para o processamento de dados para a obtenção de mapas e blocos-diagrama em computador.

Figura 4 – Fluxuograma para o processamento de dados.



Fonte: Sturaro & Landim (1996 *apud* Abel, 2002)

Segundo Landim (1998), no estudo espacial, às variáveis que assumem valores definidos para cada ponto no espaço, tanto quanto aquelas dependentes do tempo, exibem

comportamento demasiadamente complexo para serem analisado pelos métodos estatísticos clássicos (aquela que utiliza parâmetros médios e desvio padrão para representar um fenômeno). Quando se utiliza a chamada estatística clássica para representar as propriedades dos valores amostrais, presume-se que estes sejam realizações de uma variável casual, as posições relativas das amostras são ignoradas e presume-se que todos os valores amostrais tenham a mesma probabilidade de serem escolhidos, apresentando assim simplesmente um teor médio desses valores amostrais e uma distribuição de valores em torno dessa média, limitando a representação da variabilidade espacial, por que não considera a anisotropia e a continuidade do fenômeno que se quer observar.

Yamamoto (1988 *apud* Abel, 2002) cita que os diversos métodos de interpolação podem ser agrupados em duas categorias:

- a) Funções globais – procuram considerar todos os valores amostrados, interpolando-os em qualquer ponto dentro da malha de domínio dos dados originais. São enquadradas como interpoladores globais os seguintes: funções polinômios e equações multiquádricas.
- b) Funções locais – São definidas para pequenas porções do mapa e assim sucessivamente até cobrir toda a área do mapa. Os interpoladores enquadrados nessa categoria são: ponderação pelo inverso da distância, interpolação em redes de triângulos irregulares e a krigagem.

Krajewski & Gibbs (1996 *apud* Landim, 2002), realizaram uma comparação entre alguns métodos disponíveis de interpolação, conforme Figura 5:

Figura 5 – Comparação entre métodos de interpolação.

Algoritmo	Fidelidade aos dados originais	Suavidade das curvas	Velocidade de computação	Precisão geral
Triangulação	1	5	1	5
Inverso da Distância	3	4	2	4
Superfície/ Tendência	5	1	3	2
Mínima Curvatura	4	2	4	3
Krigagem	2	3	5	1

1 = melhor 5 = pior

Fonte: Landim *et al* (2002)

Para Sturaro (1995 *apud* Abel, 2002), dentre os métodos de estimativas, comumente empregados, o método geoestatístico da krigagem ordinária pode ser considerado o melhor estimador linear por ser considerado mais consistente, confiável e preciso.

2.1.5.1 Krigagem

De acordo com Silva (2008), do sobrenome do engenheiro sul-africano Daniel G. Krige, surgiu o termo utilizado para denominar o método de interpolação utilizado na geoestatística, *kriging* (inglês) ou krigagem (português). Daniel G. Krige foi o pioneiro a introduzir o uso das médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas de mineração. Na comunidade estatística, a krigagem também é conhecida como “Processo Gaussiano de Regressão”.

Segundo Landim (1998), krigagem pode ser entendida como uma série de técnicas de análises de regressão que procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio que leva em conta a dependência estatística entre os dados distribuídos no espaço.

Para Abel (2002), o método da krigagem se diferencia dos demais métodos por atribuir pesos diferentes as amostras, determinando-os a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental (a análise variográfica será realizada dentro do *software Surfer*, onde o seu resultado servirá de base para interpretação da estrutura de correlação espacial a ser utilizada nos procedimentos de inferências da krigagem), fornecendo geralmente estimativas não tendenciosas e com variância mínima.

O autor conclui que a krigagem engloba um conjunto de métodos de estimação, como por exemplo: krigagem simples; krigagem ordinária; krigagem universal; co-krigagem e krigagem disjuntiva. Nesse trabalho, optou-se pela krigagem ordinária, pois ela considera a média flutuante ou móvel por toda a área. De acordo com Salgado (2013), ela é indicada para modelar fenômenos onde não possui total conhecimento das variáveis envolvidas e seus comportamentos.

2.1.5.2 Krigagem Ordinária

Segundo Abel (2002), o método geostático da krigagem ordinária pode ser considerado o melhor estimador devido:

- as estimativas são feitas através uma combinação linear dos dados;
- o método procura calcular que o erro residual seja igual zero;
- tem como objetivo minimizar a variância de erros.

A krigagem ordinária baseia-se em um método probabilístico, cujo erro residual médio como a variância de erros podem ser estimados. Desta forma, pode-se atribuir peso às amostras utilizadas nas estimativas de tal modo que o erro médio seja zero e a variância dos erros seja mínima. Segundo Silva (2008), as amostras que estão mais próximas do ponto a ser estimado terão maior peso, à medida que a distância aumenta, o peso ou influência diminui.

2.1.5.3 Semivariograma

Segundo Huijbregts (1975 *apud* Leite da Silva, 2007), o semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem (necessária para a organização do sistema de equações da krigagem), que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço, calculando os valores da variância, para uma dada distância.

Landim (2006) afirma que, a interpretação do variograma permite obter parâmetros que descrevem o comportamento espacial das variáveis regionalizadas e mostram segundo o autor:

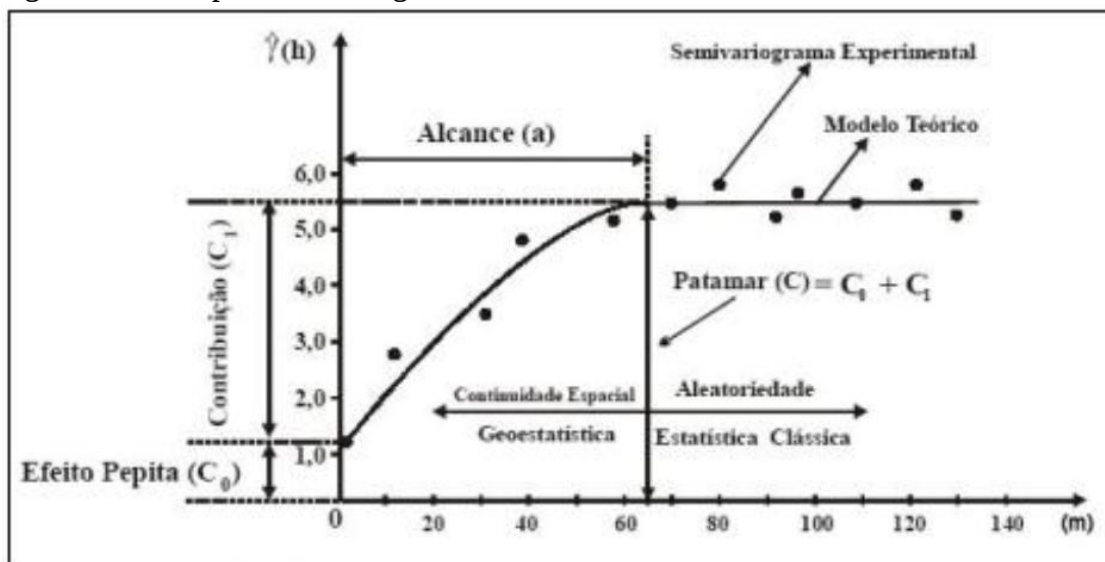
a) o tamanho da zona de influência em torno de uma amostra, pois toda amostra cuja distância ao ponto a ser estimado for menor ou igual ao alcance, fornece informações sobre o ponto;

b) a anisotropia, quando os variogramas mostram diferentes comportamentos para diferentes direções de linhas de amostragem e de estudo da variável, sendo geométrica quando o alcance varia de acordo com as diversas direções consideradas, mantendo constante a soleira, ou zonal quando o alcance permanece constante e a soleira varia conforme for modificada a direção.

De acordo com Landim (2006), o semivariograma mostra a medida do grau de dependência espacial entre os valores e é uma medida de variabilidade em relação a distância. A krigagem usa essas informações para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar o ponto. Ainda segundo o autor, em suma, a variância da krigagem é independente dos valores dos pontos usados para obter os estimadores Z_i , e mede somente a configuração espacial dos dados.

Segundo Huijbregts (1975 *apud* Leite da Silva, 2007), no semivariograma experimental (Figura 6) observam-se os seguintes componentes:

Figura 6 – Exemplo Semivariograma.



Fonte: Orlovski (2013).

- Alcance (a): distância que as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente. O alcance também é utilizado para definir o raio de ação ("*range*") máximo de interpolação por krigagem, onde os pesos utilizados na ponderação podem afetar os valores estimados;

- Patamar (C): valor do semivariograma correspondente ao alcance. Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras;

- Efeito pepita (C_0): valor de y quando $h=0$, revela a descontinuidade do semivariograma. Quanto maior o efeito pepita, mais fraca é a dependência espacial do atributo em estudo.

Orlovski (2013) considera que, os dados encontrados fora do alcance não possuem mais dependência espacial, passando a serem analisados pela estatística clássica, ainda encontra-se o modelo teórico representado pela linha e o semivariograma experimental representado pelos pontos. Ainda, segundo a autora, o Alcance (a), reflete o grau de homogeneização entre as amostras (quanto maior seu valor, mais homogêneo será o processo estudado).

De acordo com Landim (2006), de posse do semivariograma experimental, é necessário ajustá-lo a um modelo teórico, ou seja, a uma função que definirá os parâmetros do semivariograma, "efeito pepita", "alcance" e "patamar".

Soares (2011), cita que é importante que o modelo ajustado represente a tendência de $y(h)$ em relação a h . Deste modo, as estimativas obtidas a partir da posterior krigagem serão mais exatas (mais confiáveis). O procedimento de ajuste não é direto e automático, como no caso de uma regressão, mas interativo, pois nesse processo o intérprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico. Dependendo do ajuste obtido, pode-se ou não redefinir o modelo, até obter um que seja considerado satisfatório.

Para ajustar o variograma experimental a um modelo variográfico teórico, podem ser utilizadas técnicas de ajustamento automático (critério do *variowin*) ou pode ser realizado um ajustamento manual (método aplicado no presente trabalho).

2.1.6 Banco de Dados

Segundo Silva (2008), os bancos de dados constituem o armazenamento de forma organizada, possibilitando a recuperação de informações quando necessárias, realizando buscas lógicas e sua representação visual através de plantas, cartas e mapas. Os dados formadores de tais bancos podem ser dos mais variados tipos e origens, no caso do presente trabalho, informam características geotécnicas do subsolo, obtidas através de boletins de sondagens *SPT*.

2.1.7 Análise Exploratória de Dados

Nas considerações de Orlovski (2013), utiliza-se da estatística clássica para realização de uma análise geral do comportamento dos dados, a qual se baseia na hipótese que não a comportamento espacial entre as amostras.

Para Silva (2008), devido a grande variabilidade dos parâmetros do solo, a análise de informações de dados provenientes da natureza, necessita primeiramente de um tratamento estatístico básico, utilizando ferramentas como: média e mediana para medidas de localização; desvio padrão para medidas de dispersão; coeficiente de curtose e coeficiente de assimetria para medidas de forma. Definem-se essas ferramentas como:

- Média: Valor médio obtido dentre a população total. A média indica somente uma tendência dentro da amostra ou população, já que a variabilidade dos dados pode ser muito grande, o que não é indicada pelas ferramentas de estatística clássica.

- Mediana: Valor central dentro da população. É coincidente com o segundo quartil.
- Desvio Padrão (S): a divisão do desvio-padrão pela média fornece um percentual de dispersão em relação à média chamado coeficiente de variação.
- Coeficiente de curtose: Este coeficiente avalia o grau de achatamento de uma distribuição.
- Coeficiente de assimetria (*Skewness*): Representa o grau de assimetria na distribuição de frequência.
- 1º e 3º quartil: o primeiro quartil corresponde à separação dos primeiros 25% de elementos da série. Já o terceiro quartil, corresponde à separação dos últimos 25% de elementos da série, ou seja, os 75% dos elementos da série.

Essa análise preliminar permite verificar possíveis problemas, como a falta de dados em alguma variável ou presença de valores discrepantes em outras variáveis, além de outros tipos de problemas com os dados. Com esses recursos visuais pode-se obter uma descrição das características da variável estudada, onde se pode visualizar se o tipo de distribuição que ocorre é assimétrica ou não entre outras características.

No presente trabalho, as informações utilizadas para análise exploratória de dados, são retiradas de relatórios emitidos pelo *software Surfer 13*.

CAPÍTULO 3

3.1 METODOLOGIA

Para que o trabalho se desenvolvesse com sucesso, foi necessária uma metodologia concisa e organizada. Para isso, dividiu-se a metodologia nas seguintes etapas:

- Caracterização da amostra;
- Coleta dos boletins de sondagem *SPT*;
- Definição do mapa base;
- Elaboração de um banco de dados com os parâmetros em estudo;
- Georreferenciamento dos furos de sondagem;
- Análise variográfica;
- Krigagem (Interpolação);
- Geração dos mapas.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

A Figura 7 apresenta o perímetro urbano da cidade de Toledo.

Figura 7 – Localização do município de Toledo.

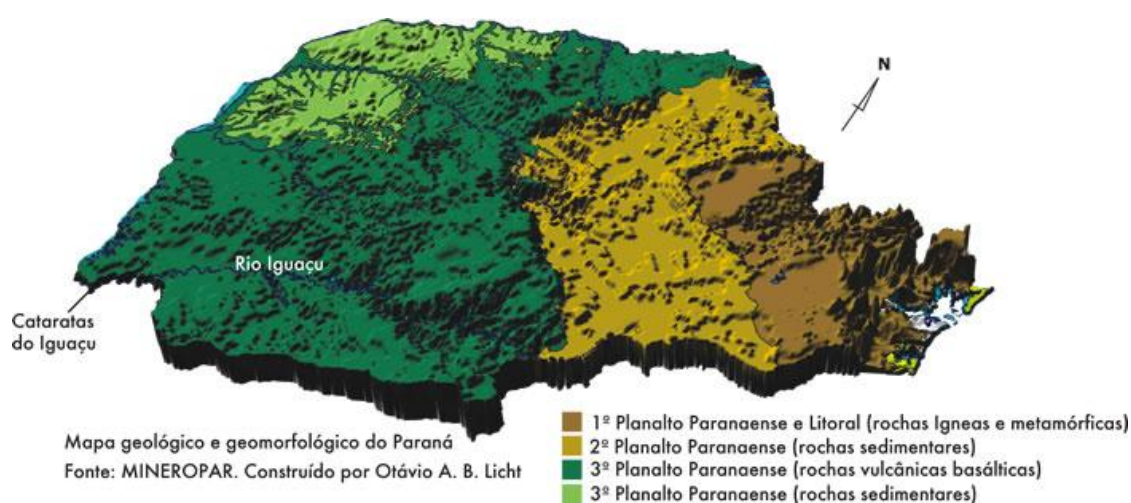


Fonte: Revista Toledo (2015).

Localizada na região oeste do Paraná, a cidade de Toledo, segundo o censo de 2010 possuía uma população de 119.313 habitantes, com uma estimativa, fornecida pelo IBGE para 2015, de 132.077 habitantes.

Conforme dados do IBGE, o município de Toledo tem uma área de 1.196,999 km², com coordenadas aproximadas de latitude sul 24°42'49" e longitude oeste 53°44'35", com uma altitude média de 560 metros acima do nível do mar, situando-se no Terceiro Planalto do estado, também chamado de Planalto de Guarapuava, conforme Figura 8.

Figura 8 – Mapa Geológico e Geomorfológico do Paraná.



Fonte: Mineropar (2015).

De acordo com Maack (1968 apud Gutierrez, 2005), o Terceiro Planalto ocupa 68% do estado, com área aproximada de 135.000 km². O substrato geológico do Terceiro Planalto é constituído por rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, preferencialmente basaltos e andesitos.

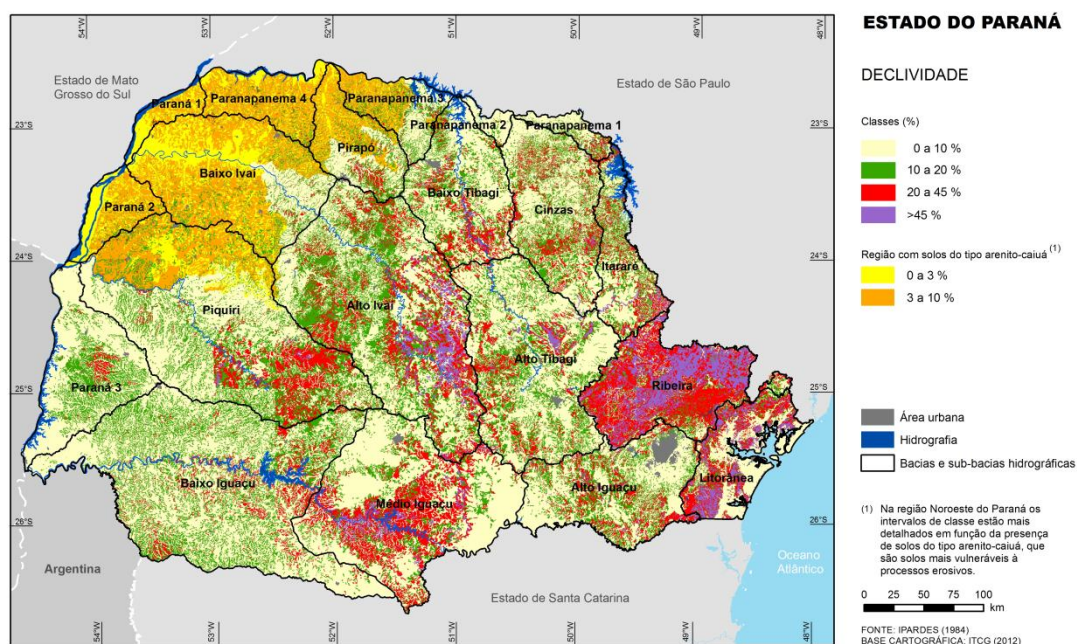
Segundo a Prefeitura Municipal, a cidade de Toledo situa-se sobre um dos extensos derrames de basalto que ocupam quase toda a região oeste do Estado do Paraná, portanto seu solo é de origem vulcânica, sobreposto de cascalho e basalto. O solo do Município é do tipo latossolo roxo distrófico (LRd6), rico em óxido de ferro. De acordo com a Embrapa, são solos bem desenvolvidos e profundos, com boa capacidade de retenção de água e ventilação (aeração), a acidez alcança em PH os índices de 5,6 até 8,0.

Para Silva (2008), a grande espessura (profundidade) dos latossolos é evidência de que eles estão altamente expostos a agentes intempéricos.

Conforme dados da Prefeitura, desde Guarapuava até as barrancas do rio Paraná, num declive de 1.200 para 200 metros de altitude entre os rios Iguaçu e Piquiri, justamente onde Toledo está situado, o planalto apresenta-se revestido de uma camada de arenitos, mas a microrregião de Toledo é caracterizada pelas rochas eruptivas e pelos tipos de solos a elas correspondentes.

Cabe destacar, segundo a Prefeitura, que o município apresenta um relevo ligeiramente ondulado, quase plano no centro, Norte e Leste, e um pouco acidentado no Nordeste e Sudoeste, com vertentes curtas e declives que variam entre 8 a 15 % (Figura 9), com altitudes que variam de 500 a 800 m. A ondulação do relevo de Toledo é quase simétrica, assinalada pela existência de quatro espigões paralelos, ou semiparalelos, que funcionam como divisores de água. Todos esses espigões situam-se na direção Oeste-Leste, canalizando as águas na grande bacia do Paraná.

Figura 9 – Declividade do Paraná.



Fonte: Mineropar (2015).

De acordo com a Prefeitura Municipal, e com base na classificação climática do climatólogo Wladimir Köppen, de 1993, pode-se dizer que o clima de Toledo é subtropical úmido mesotérmico (úmido brando), com verões quentes e geadas pouco frequentes, com tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, sem estação seca definida.

Apresenta precipitação média anual de 1.800 mm, com evapotranspiração potencial anual de 950 mm. A temperatura média anual é de 19° C, com umidade relativa do ar oscilando entre 70 a 75 %.

Silva (2008) afirma que, a classificação climática de Köppen serve como indicativo das condições de atuação do intemperismo.

Conforme material consultado da Prefeitura Municipal, o planalto basáltico, onde situa-se o município de Toledo, era coberto originalmente por enormes extensões de pinheirais interrompidas por eventuais manchas no campo, vegetação rala conhecida como campina. Nas menores altitudes, predominava a vegetação de mata latifoliada subtropical. No entanto, nos dias atuais, devida a grande exploração ocorrida, a mata nativa não chega a 5%, segundo dados da Secretaria de Meio Ambiente de 2004.

Decorrente dos processos intempéricos que ocorreram no solo de Toledo, pode-se dizer que a sua camada superficial é composta por argilas finas laterizadas, onde devido ao fato da rocha mãe ser o basalto, os cátions básicos são lixiviados, com consequente concentração residual de óxidos de ferro, que dentre outras características, atua como agente cimentante, fazendo com que a argila se comporte como uma areia fina (argila floculada). Algumas características comuns aos solos lateríticos, que podem ser observadas na camada mais superficial do solo de Toledo são a elevada porosidade e coloração avermelhada (em decorrência da presença do óxido de ferro). Como citado na revisão bibliográfica, os solos lateríticos são bem drenados, apresentando elevado volume de vazios devido à estrutura macroporosa e microagregada, além de uma baixa massa específica aparente.

A partir de uma pesquisa realizada em uma cidade vizinha de Toledo, por Ghindin *et al* (2006), pode-se atribuir o alto grau de floclulação, à baixa quantidade de CO nas propriedades do solo. Os autores ainda concluíram que Horizontes mais argilosos apresentam maior percentagem de macroporos e porosidade total. Os minerais da fração argila são importantes para manter as partículas do solo floculadas, além de dar maior estabilidade aos agregados.

3.3 COLETA DE DADOS

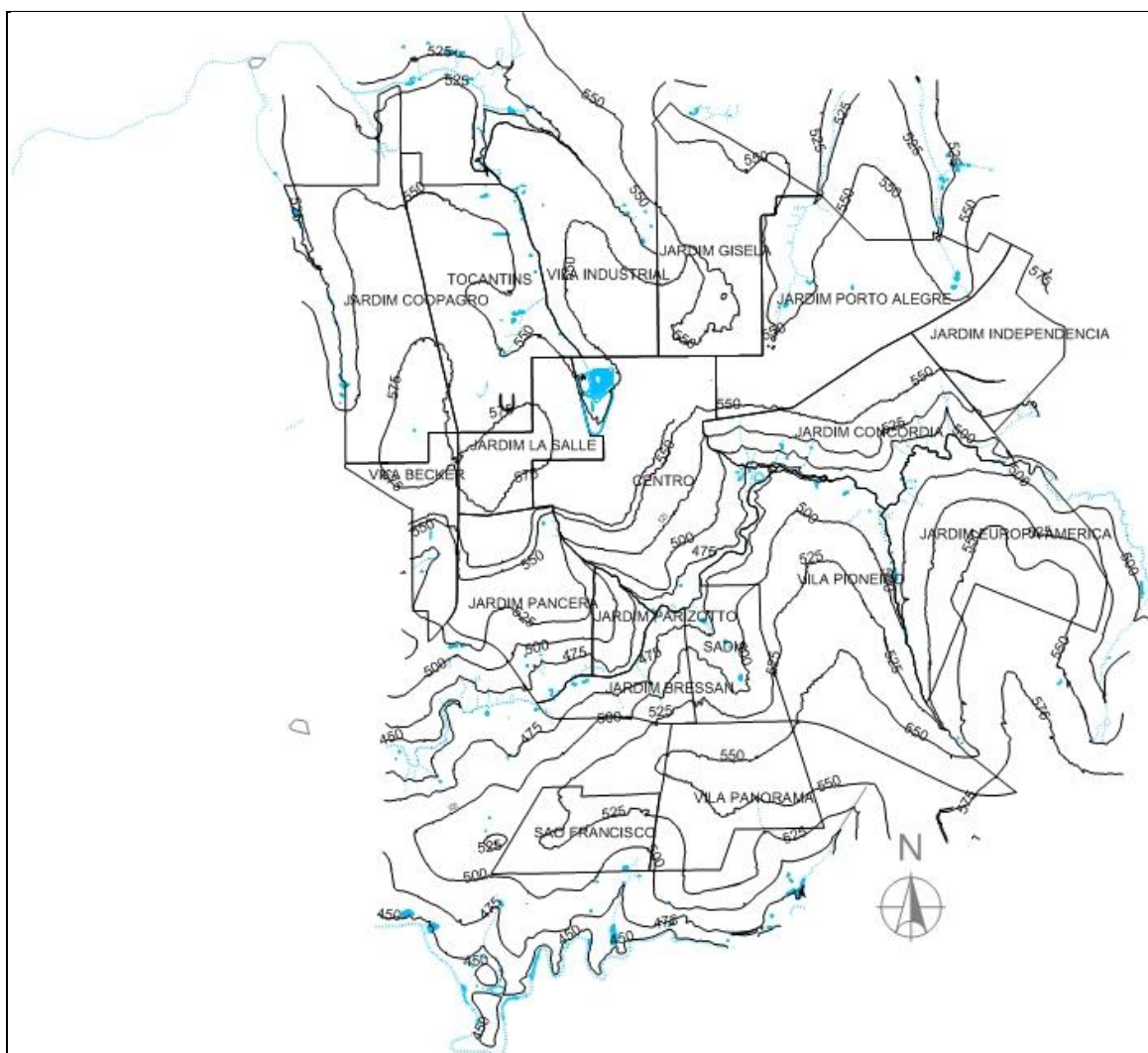
Foram utilizados 73 boletins de sondagens *SPT* (248 furos), executados dentro do perímetro urbano da cidade de Toledo, os quais foram cedidos por empresas do ramo da

construção civil que apoiaram a pesquisa. Pelo fato do espaçamento ser irregular, as amostras passaram por um ajuste da malha de distribuição com auxílio do *software Surfer*.

3.4 MAPA DO MUNICÍPIO DE TOLEDO

O mapa utilizado no presente trabalho, foi o com traçado do perímetro urbano do município de Toledo, o qual foi cedido pela prefeitura municipal no formato *.DWG*. O mesmo passou por alguns ajustes para que a apresentação final fique clara, deixando visível o contorno dos bairros, perímetro urbano do município, curvas de nível e principais rios, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Perímetro Urbano e divisão dos bairros de Toledo

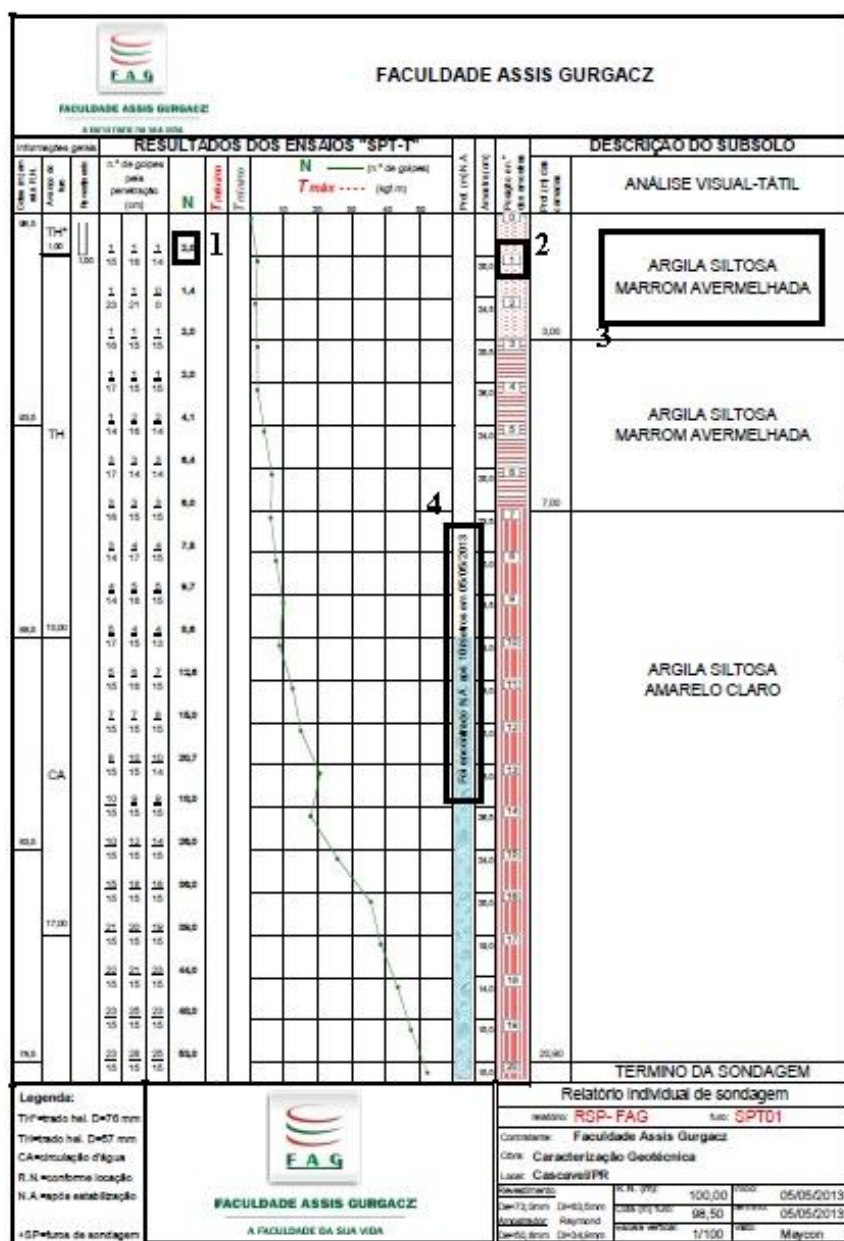


Fonte: Prefeitura Municipal de Toledo (2007).

3.5 ANÁLISE DE DADOS

A partir dos 248 furos de sondagens coletados na cidade de Toledo, elaborou-se um banco de dados com informações tais como: nome do furo de sondagem, coordenadas geográficas, tipo de solo (do 1º ao 10º metro), valores de *NSPT* (do 1º ao 10º metro) e profundidade do nível d'água. Tal banco de dados foi organizado em uma planilha utilizando o *Microsoft Office Excel 2010*, para posterior importação pelo *software Surfer 13*, formando assim, o banco de dados do programa. No Quadro 4 e na Figura 11, apresenta-se um modelo de boletim de sondagem, e quais informações foram coletadas dos mesmos.

Figura 11 – Modelo de Boletim de Sondagem *SPT*.



Quadro 4 – Descrição do Boletim de Sondagem SPT

Campo	Descrição
1	Índice de resistência do solo
2	Profundidade do solo
3	Classificação do tipo de solo
4	Nível d'água

Fonte: Autor (2016).

3.5.1 Georreferenciamento

De posse dos boletins de sondagem, com croquis de locação de cada furo de sondagem e através do mapa da área urbana de Toledo, coletaram-se as coordenadas geográficas dos furos com o auxílio do *Google Earth*. Os dados cartográficos utilizados são os seguintes:

- *Datum* : WGS-84;
- *Projeção*: *Universo Transverso de Mercator*;
- *Sistema de Coordenadas*: Métricas.

3.6 IMPORTAÇÃO PELO *SURFER 13*

Após análise dos boletins de sondagem e georreferenciamento dos furos, a planilha do banco de dados (Figura 12) pode ser preenchida para posterior importação pelo *Surfer 13*, onde foram feitos os tratamentos de dados e interpolação.

Figura 12 – Modelo da tabela de Banco de dados.

FURO	ZONA	X	Y	NSPT	N.A.	CONSISTÊNCIA
Pancera SPT1	22J	221657	7261242	2	9,87	MUITO MOLE A MEDIA
Pancera SPT2	22J	221666	7261246	2	10,8	MUITO MOLE A MEDIA
Pancera SPT3	22J	221672	7261238	2	11	MUITO MOLE A MEDIA
Centro SPT1	22J	223494	7261751	2	12,6	MUITO MOLE A MOLE
Centro SPT2	22J	223493	7261734	2	12,2	MUITO MOLE A MEDIA
Centro SPT3	22J	223479	7261743	2	12,68	MUITO MOLE A MEDIA
Lot. Basso-SPT1	22J	219631	7264586	6	10,5	MÉDIA A RIJA
Lot. Basso-SPT2	22J	219615	7264592	6	10,1	MÉDIA A RIJA
Lot. Basso-SPT3	22J	219639	7264592	6	10	MÉDIA A RIJA
Panorama-SPT1	22J	223398	7259018	3	14	MOLE

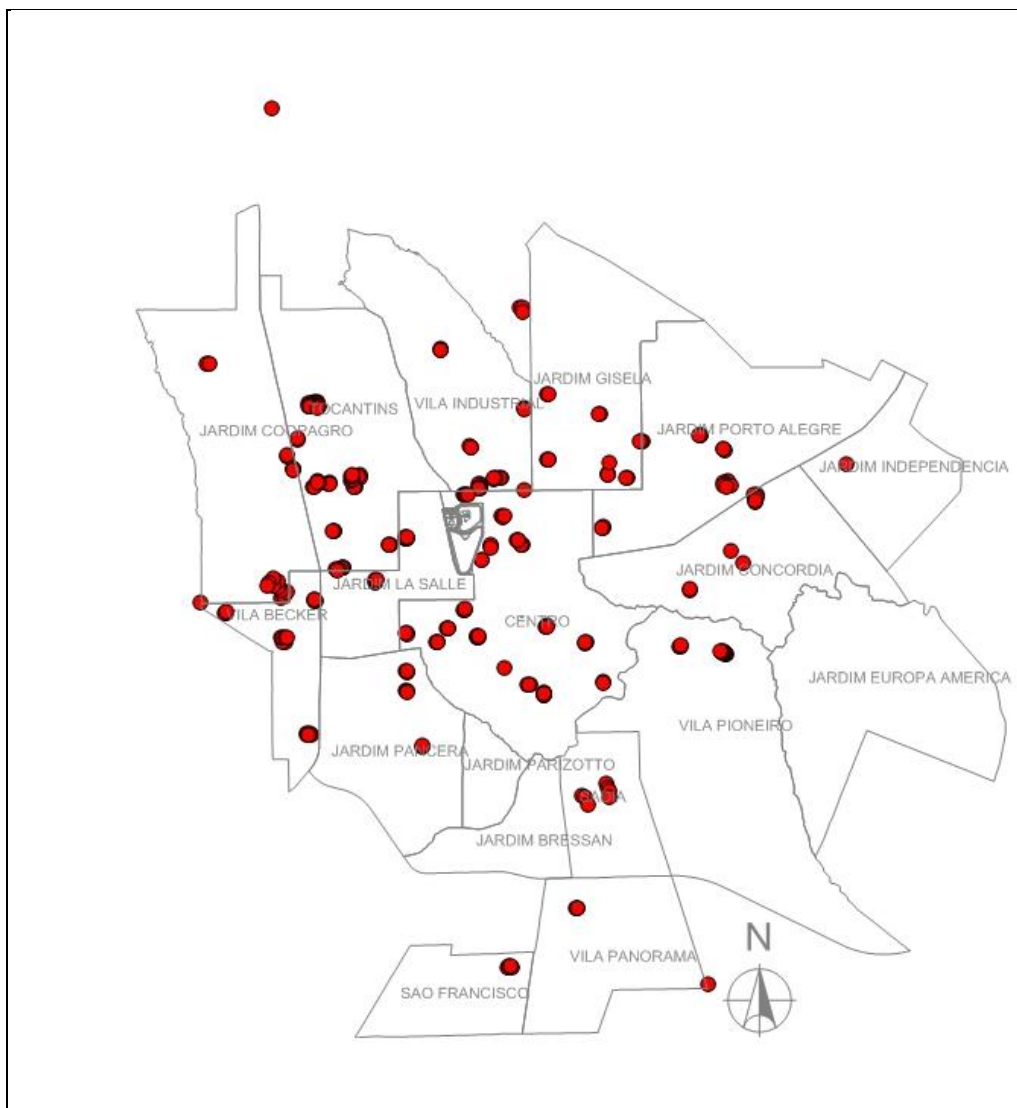
Fonte: Autor (2016).

O *Surfer 13* trabalha com coordenadas X, Y e Z. Sendo X e Y as coordenadas do ponto e Z a representação atribuída a cada resistência à penetração e nível d'água. O *software* possui técnicas de interpolação que transformam os dados X, Y, Z em uma superfície em grades, que serão utilizadas para gerar os mapas.

3.6.1 Criação de um Mapa com a Localização dos Pontos

Com as coordenadas geográficas devidamente lançadas na planilha do banco de dados e com o auxílio do *software Surfer 13*, gerou-se um mapa locando todos os furos de sondagens cedidas pelas empresas (Figura 12). O mapa base utilizado como pano de fundo (da locação dos pontos e futuro mapa interpolado) é o mapa com contorno do perímetro urbano de Toledo, devidamente editado e convertido para extensão *.DXF*. Para inserir um mapa base basta pressionar o menu *MAP/ BASE MAP* e selecionar o arquivo no formato e diretório desejados. Já para o mapa com a locação dos pontos se consegue pelo menu *MAP/ NEW POST MAP*, o qual indica a posição espacial das amostras na área.

Figura 13 - Mapa do perímetro urbano de Toledo, com a localização dos furos de sondagem, georreferenciados com auxílio do *Surfer 13*.



Fonte: Autor (2016).

3.6.2 Estudo Variográfico

O passo inicial para a interpolação dos dados foi a construção de um semivariograma experimental, no qual em abcissa estão os valores de distância e em ordenada os correspondentes semivariograma. O estudo variográfico foi realizado dentro do próprio *software Surfer 13*. O estudo variográfico foi obtido pelos comandos *GRID/ VARIOGRAM/ NEW VARIOGRAM*. A partir disso foram feitas as verificações e ajustes do variograma (modelo teórico), para posterior interpolação pelo método da krigagem.

3.6.3 Interpolação dos Dados

Com o modelo variográfico devidamente ajustado ao semivariograma da variável, e havendo dependência espacial entre as amostras, podem-se interpolar valores em qualquer posição no campo de estudo, sem tendência e com variância mínima.

Segundo Silva (2008), a krigagem quando proveniente de uma análise estrutural correta é classificada com a abreviação inglesa *BLUE* (*Best, Linear, Unbiased, Estimate*), ou seja, o melhor estimador linear e não tendencioso (erro residual médio igual a zero).

A krigagem foi o processo de interpolação utilizado, conforme justificado durante a revisão bibliográfica. Para a realização da interpolação por krigagem, deve-se selecionar o menu *GRID/ DATA*. Esse procedimento gerou um arquivo do tipo *.grd*, o qual foi utilizado pelo software para gerar os mapas.

Na caixa de diálogo subsequente foi especificado as coordenadas X,Y e da variável Z, para qual o semivariograma foi ajustado, o método de interpolação (krigagem) e a pasta onde foi criado o arquivo Y1.grd. Na opção *ADVANCED OPTIONS*, permitiu a seleção dos parâmetros do variograma ajustado pelo comando *GET VARIOGRAM*. Após a seleção do variograma ajustado foi selecionado o comando *CROSS VALIDATE*, o qual validou o modelo ajustado e gerou um relatório com as estatísticas do procedimento. Os dados gerados nesse relatório foram utilizados na análise exploratória de dados, que permitem uma melhor compreensão das características das amostras.

Resumidamente, o procedimento de *CROSS VALIDATE* (validação cruzada), envolve a estimativa de cada ponto medido como se ele não existesse, utilizando todos os demais dados disponíveis na sua estimativa. Se a krigagem for mesmo representativa do processo espacial real, e se as hipóteses assumidas forem verdadeiras, então um valor estimado utilizando a validação cruzada dever ser razoavelmente próximo do valor amostrado em uma mesma localização.

3.6.4 Geração dos Mapas

O próximo passo foi gerar os mapas, através do comando no menu *MAP/ NEW/ CONTOUR MAP*. Depois de gerados, os mesmos podem ter editadas suas propriedades para

melhor visualização, assim como também foi feito no mapa de pontos, pode ser sobreposto um mapa base com o contorno do perímetro urbano de Toledo.

3.6.4.1 Recorte das Áreas

Como os dados são provindos de áreas não regulares, mesmo que a interpolação produza dados em locais onde existem amostras, essas estimativas não são confiáveis e devem ser retiradas do mapa final. Para esse procedimento foi acessado o menu *MAP/ POST MAP/ NEW POST MAP*. Com o mapa selecionado deve ser utilizado o comando *MAP/ DIGITALIZE*, com esse comando, cada ponto que o usuário selecionar dará uma coordenada, foi feito então um polígono em volta dos pontos de sondagem (seguindo sempre a mesma direção), as coordenadas geradas aparecerão em uma janela (*Digit.bln*), podendo serem salvas no formato do bloco de notas. O próximo passo foi criar o arquivo recortado a partir do arquivo já criado normalmente, através do caminho *GRID/ BLANK*, selecionou-se o arquivo criado normalmente/seleção do arquivo *BLANK (.bln)*, então salvou-se o arquivo criado (arquivo de saída).

3.6.4.2 Apresentação final dos Mapas

Após essa delimitação da área interpolada, foi executada a geração final dos mapas, através dos comandos *NEW POST MAP*, *NEW COUNTOUR MAP*, *NEW 1-GRID VECTOR MAP OU NEW 3D WIREFRAME*, dessa maneira pode-se iniciar a análise dos resultados e discussões.

CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1.1 Análise exploratória dos dados

Através do *Surfer 13*, foi possível emitir relatórios com análise estatística clássica, a qual permite verificar a falta de dados em alguma variável ou presença de valores discrepantes em outras variáveis, permitindo compreender algumas características dos dados coletados.

Nos Quadros 5 e 6, apresentaram-se uma análise estatística dos dados utilizados em cada parâmetro, representando:

- O número de amostras;
- O número mínimo e máximo obtido para cada profundidade;
- A média dos valores obtidos;
- O desvio padrão;
- A Skewness (medida da assimetria de uma determinada distribuição de frequência);
- A Curtose (medida de dispersão que caracteriza o pico ou "achatamento" da curva da função de distribuição de probabilidade);
- O Quartil 1, 3;
- A Mediana;
- O Alcance.

Quadro 5 – Análise exploratória dos dados de *NSPT*.

RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO											
H	Nº	Mín.	Máx	Média	S	Skewness	Curtose	Q1	Mediana	Q3	Alcance
1	248	1	10	3,23	1,9056	1,4424	4,2128	2	2	4	9
2	248	1	13	4,05	2,21328	1,2534	4,3945	2	4	5	12
3	238	1	13	5,38	2,1581	0,7764	3,5755	4	5	6	12
4	234	2	16	6,62	2,7738	1,0749	4,2801	4	6	8	14
5	228	2	20	7,62	3,5931	1,4686	5,7652	5	6	9	18
6	232	2	30	9,21	5,3571	2,1487	8,7499	5	8	10	28
7	223	2	28	10,11	5,2836	1,4502	5,1693	6	8	11	26
8	211	2	34	16	6,7065	1,5468	5,5348	7	9	13	32
9	204	2	37	13,08	7,6289	1,4905	5,0475	7	11	15	35
10	200	2	36	14,71	7,4105	0,848	3,1062	8	17	12	34

Fonte: Autor (2016).

Observa-se no Quadro 5, que os três primeiros metros, tem como mínimo o número de um golpe aplicado e como máximo, treze golpes aplicados. Do quarto até o décimo metro, tem como mínimo, dois golpes aplicados e como máximos têm de dezesseis a trinta e sete golpes aplicados. O aumento da diferença entre mínimos e máximos, pode ser verificado no item alcance apresentado na tabela. Vê-se também que com o aumento do alcance e com a diminuição do número de amostras utilizado no parâmetro em análise, aumenta-se o desvio padrão (S).

Percebe-se que o número de amostras utilizadas varia de 248 a 200. Essa variação da quantidade de amostras deve-se ao fato de que alguns boletins de sondagem não alcançaram o décimo metro de ensaio, devido a critérios de paralisação estipulados pela NBR 6484/2001, ou, pelo fato de que alguns furos apresentavam *NSPT* discrepantes, que não representavam a tendência encontrada nos outros boletins de sondagem do mesmo terreno, na mesma camada. Esses dados discrepantes foram eliminados da análise para não prejudicar a análise estática, pois poderiam ser oriundos de erros de execução por parte dos operadores, ou fragmentos de rochas isoladas.

Os dados de Skewness expressam uma medida de assimetria das amostras, onde valores mais próximos a zero referem-se uma maior homogeneidade na distribuição espacial das amostras. Já com a Curtose, pode-se proceder a análise de como o pico de uma distribuição difere da distribuição normal, onde que os dados mais próximos de zero, tem uma distribuição normal. Analisando este dois itens constata-se a variabilidade da distribuição espacial das amostras, bem como de suas propriedades, onde tal análise serve de parâmetro para uma compreensão inicial dos dados utilizados, a qual deve ser complementada com uma análise dos mapas gerados.

Quadro 6 – Análise exploratória de dados de Nível d'água.

NÍVEL D'ÁGUA										
Nº	Mín.	Máx.	Média	S	Skewness	Curtose	Q1	Mediana	Q3	Alcance
220	1	17,7	8,76	4,3839	0,0515	2,0217	5,225	8,7	12,325	16,7

Fonte: Autor (2016).

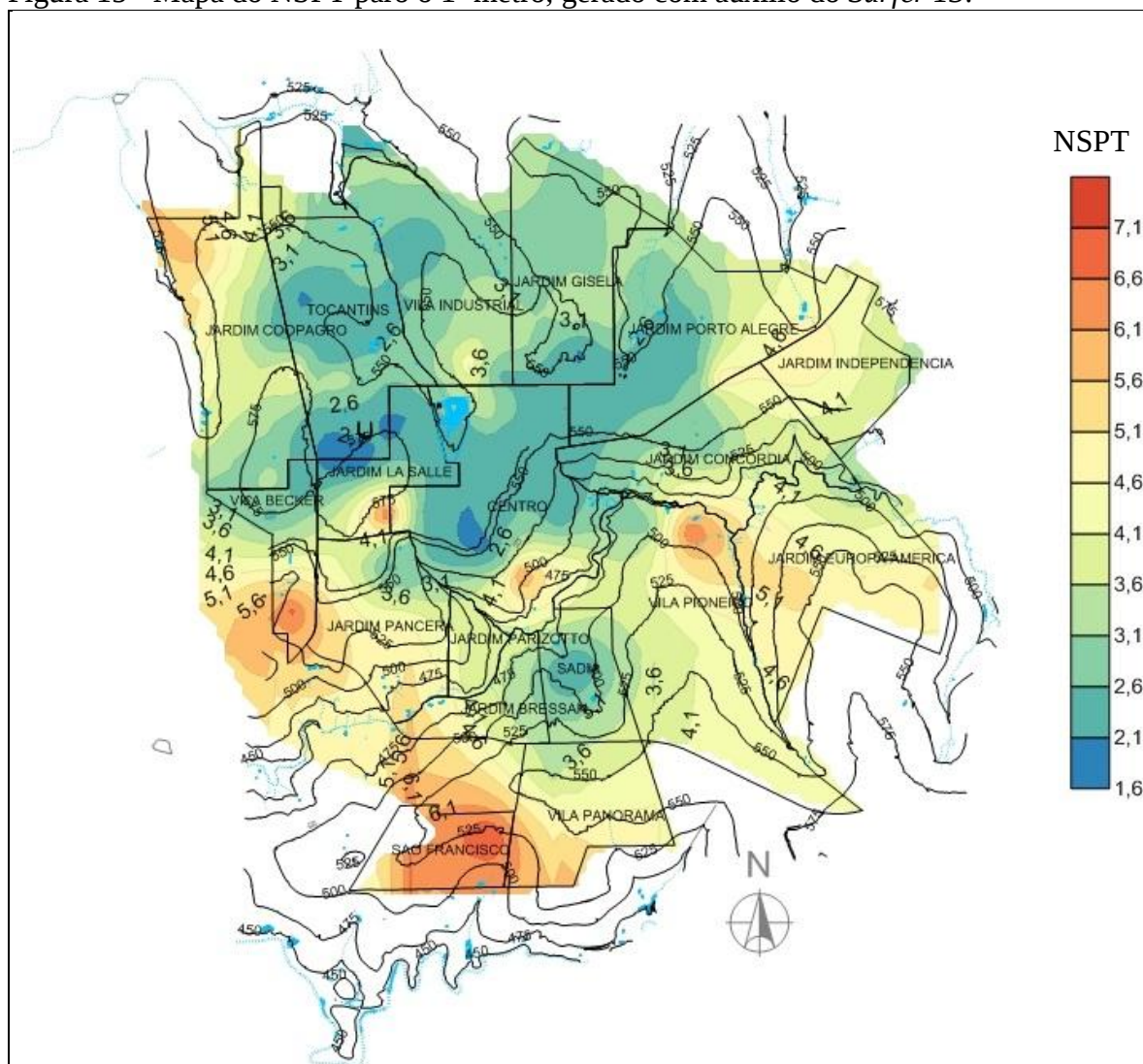
Através da análise do Quadro 6, percebeu-se que em média o nível d'água encontra-se com 8,76 metros de profundidade. A menor profundidade encontrada foi com 1 metro e a maior com 17,7 metros. Foram utilizados 220 de 248 furos coletados, pois em muitos ensaios, não foram encontrados os níveis d'água.

Através do mapa de nível d'água, notou-se que o Jardim Gisela e parte da Industrial, são as regiões que tendem a apresentar nível d'água mais alto. A Vila Becker e parte do Jardim Coopagro apresentam os níveis d'água mais profundos.

4.1.3 Resistência a Penetração (NSPT)

As figuras 14 a 23 apresentam os mapas com os índices de resistência a penetração do solo (NSPT) com base nos dados coletados, limitados a zona de influência das amostras.

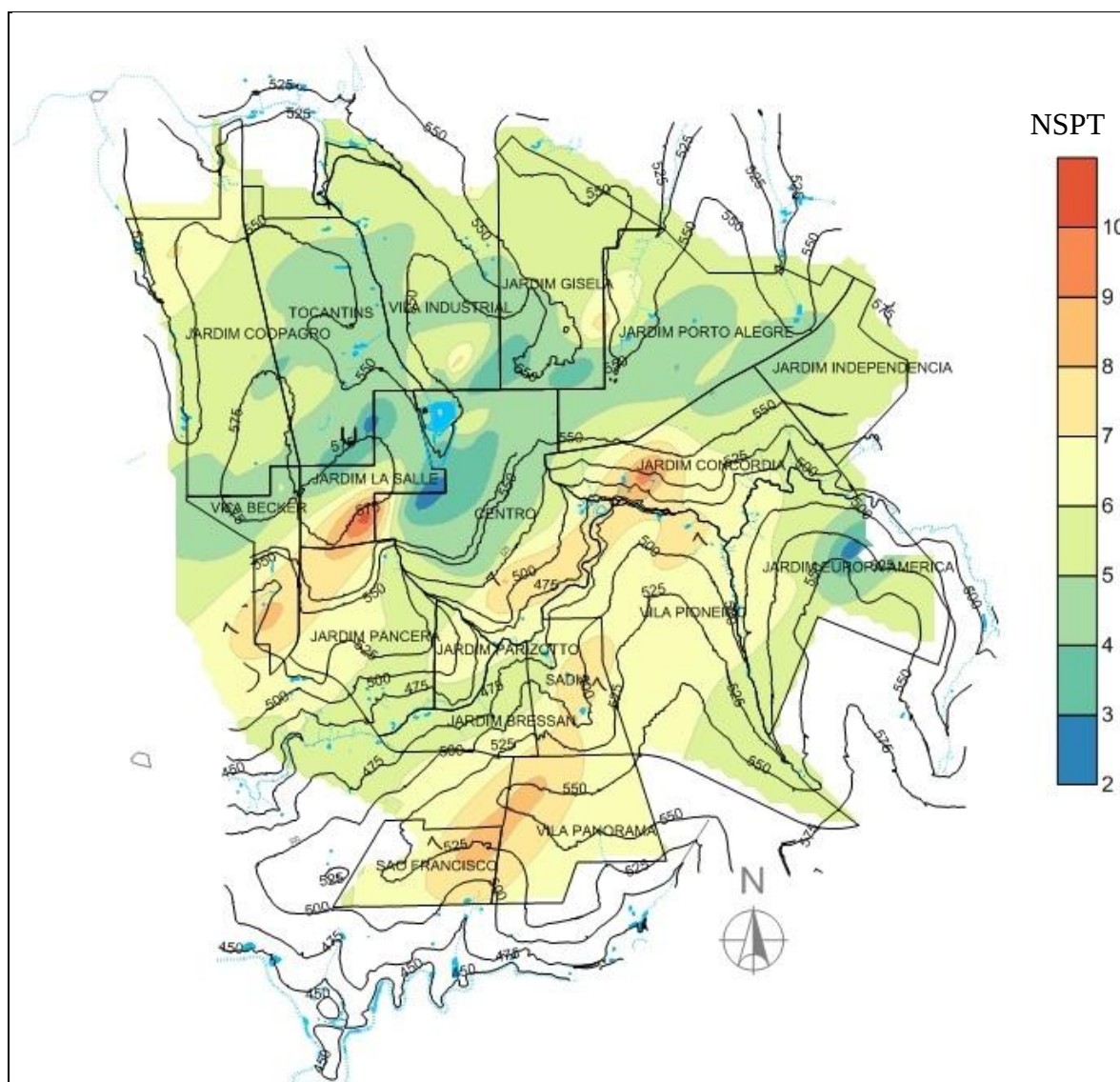
Figura 15 - Mapa do NSPT para o 1º metro, gerado com auxílio do *Surfer 13*.



Fonte: Autor (2016).

No primeiro metro os índices de resistência a penetração tendem a ser menores nas regiões central e norte da cidade. Os maiores índices foram encontrados no Jardim Pancera e São Francisco.

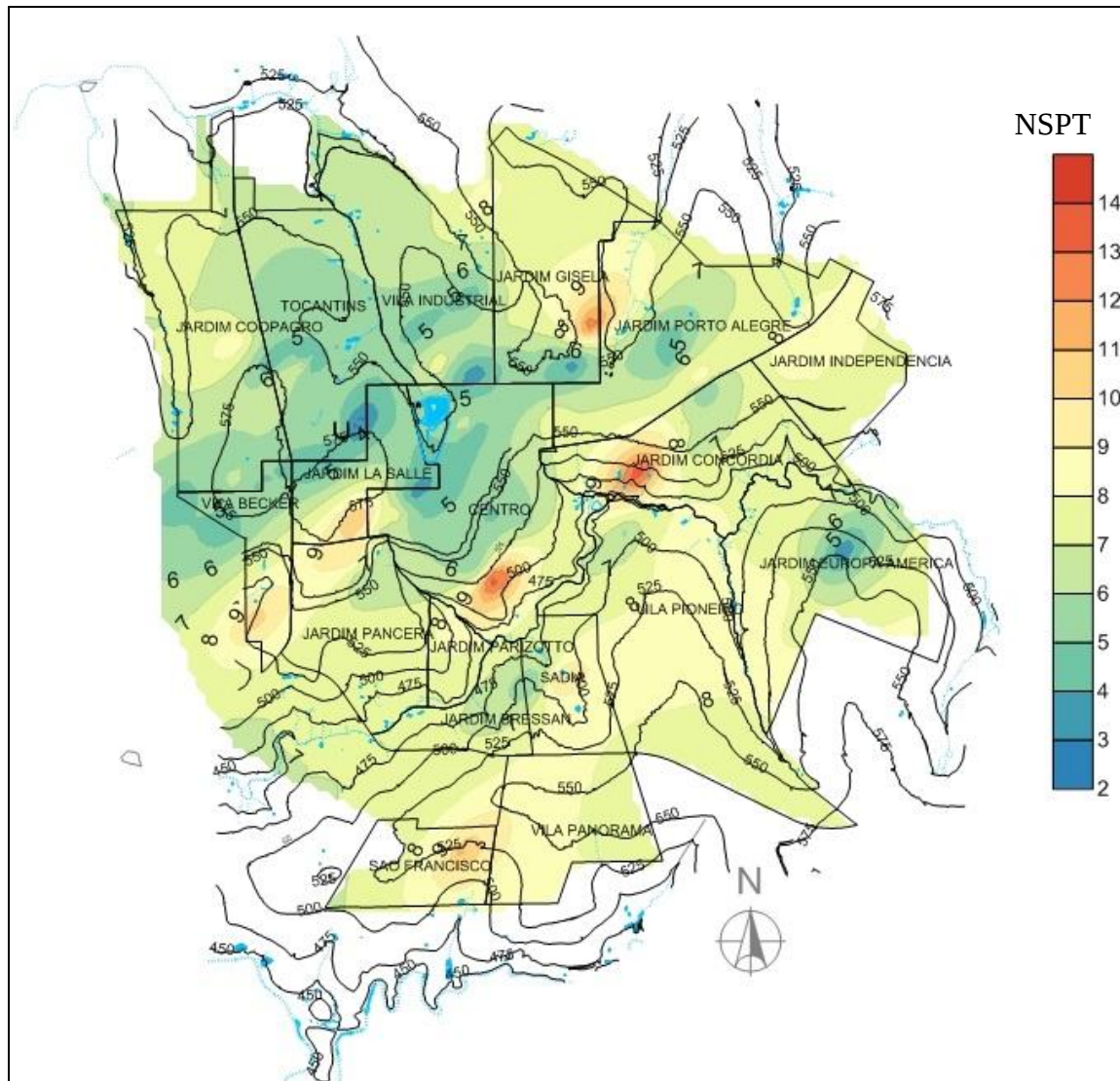
Figura 17 - Mapa do NSPT para o 3º metro, gerado com auxílio do *Surfer 13*.



Fonte: Autor (2016).

No terceiro metro algumas partes da região central e norte ainda continuam com baixos índices de resistência, regiões as quais deve-se ter especial atenção na hora de projetar edificações de pequeno porte, que teoricamente teriam fundações mais curtas, ficando totalmente embutidas nessas camadas de baixa resistência.

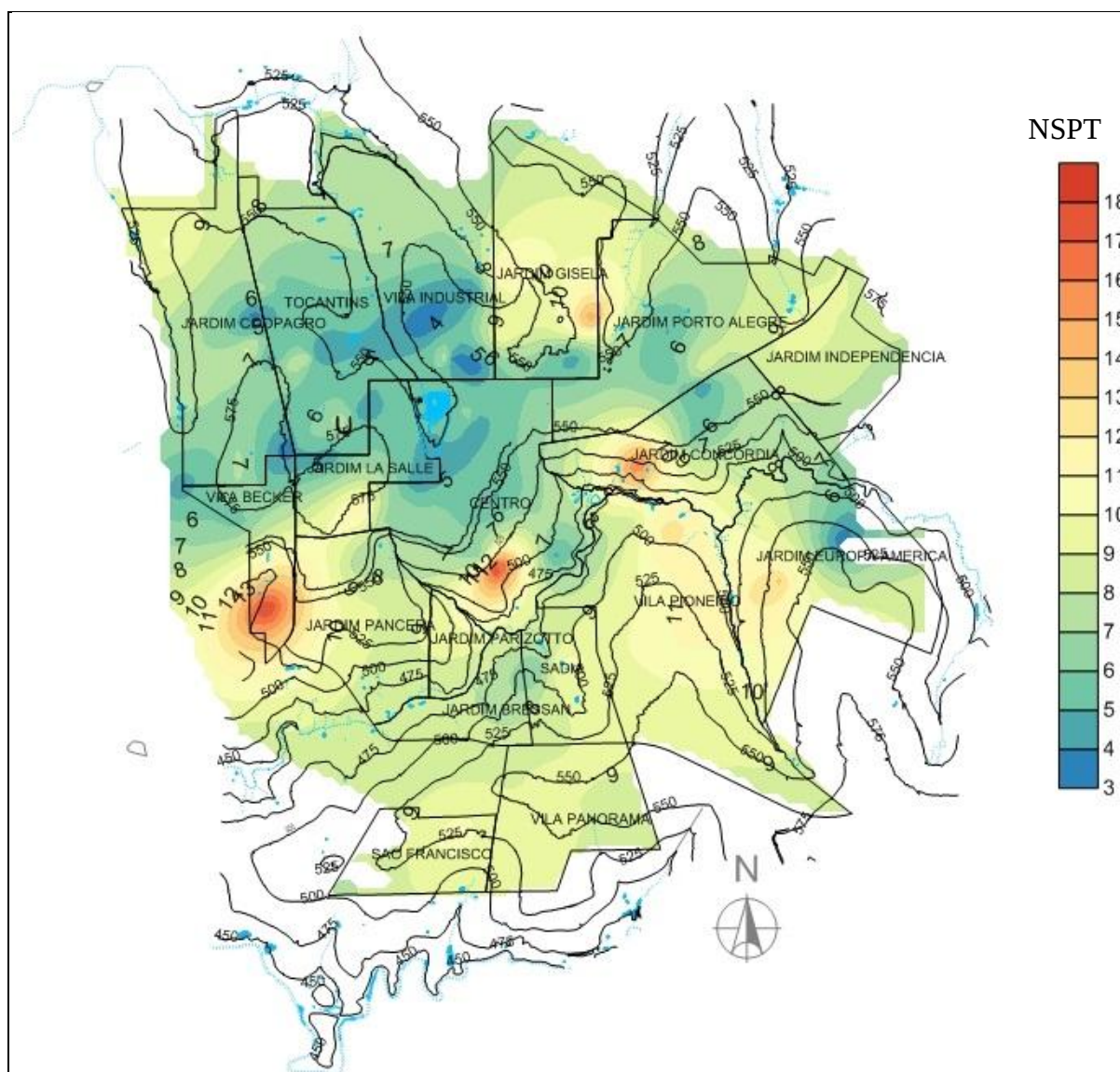
Figura 18 - Mapa do NSPT para o 4º metro, gerado com auxílio do Surfer 13.



Fonte: Autor (2016).

A partir do quarto metro, a região norte apresenta bons índices na divisa entre o Jardim Gisela e Jardim Porto Alegre. No entanto parte do Jardim Gisela, Industrial e Tocantins, apresentam ainda *NSPT* menores que 5.

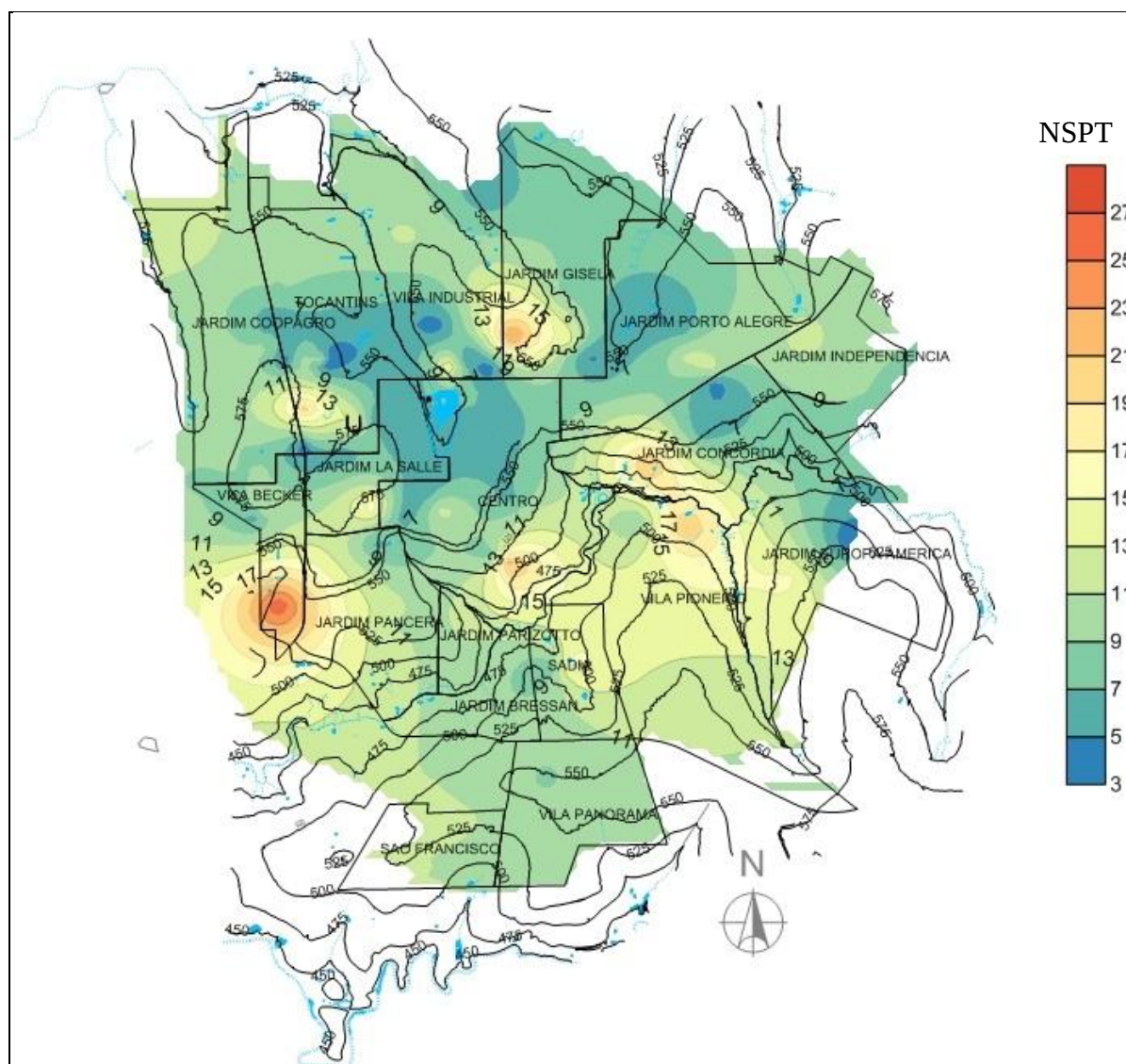
Figura 19 - Mapa do NSPT para o 5º metro, gerado com auxílio do Surfer 13.



Fonte: Autor (2016).

A partir do quinto metro a maior parte do Jardim Gisela começa a ter bons índices de resistência. As regiões centrais e noroeste ainda apresentam pontos com *NSPT* menores que 4. As regiões sul da Vila Becker e Centro, parte do Jardim Pancera, destacam-se por apresentar *NSPT* superiores a 15.

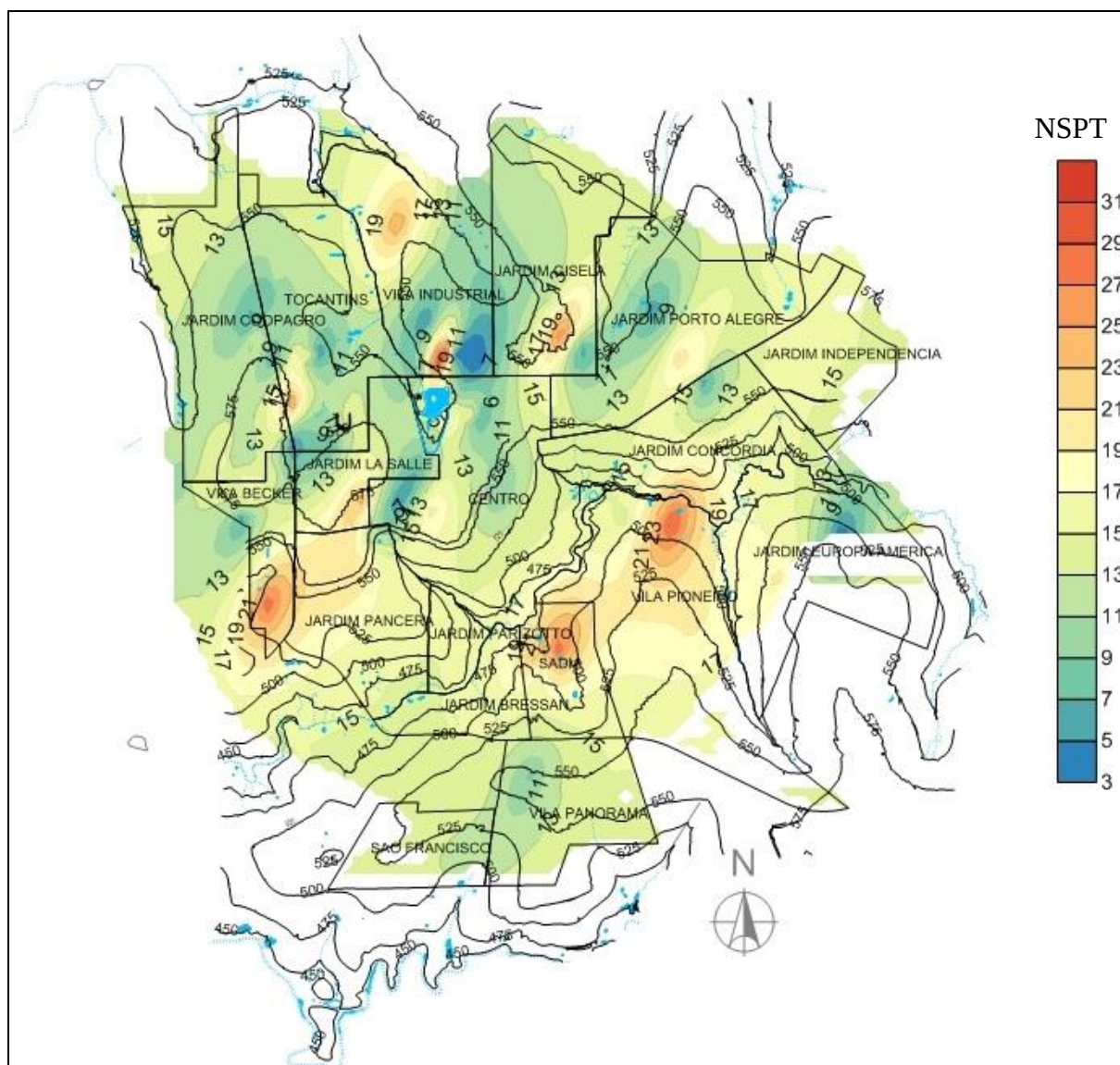
Figura 21 - Mapa do NSPT para o 7º metro, gerado com auxílio do Surfer 13.



Fonte: Autor (2016).

No sétimo metro diminuem os pontos da região central e noroeste com baixos índices de resistência.

Figura 24 - Mapa do NSPT para o 10º metro, gerado com auxílio do Surfer 13.



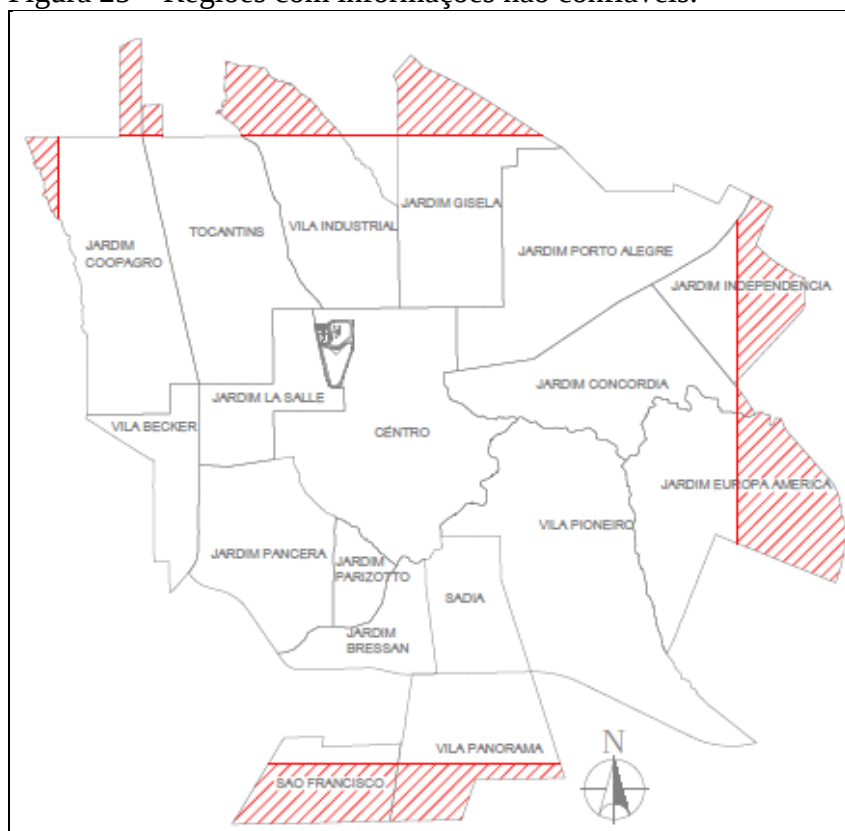
Fonte: Autor (2016).

No último metro analisado pelo presente trabalho (Décimo metro), concretiza-se o comportamento apresentado em metros anteriores, onde a tendência para os maiores índices encontra-se na região sul, com partes da região norte apresentando ainda baixos índices de resistência à penetração.

4.1.4 Discussões

Com a apresentação dos mapas, o presente trabalho atingiu seu objetivo proposto, o qual era apresentar a continuidade espacial dos parâmetros geotécnicos em estudo (nível d'água e índice *NSPT*). Vale ressaltar que, devido à distribuição espacial dos dados coletados, as zonas periféricas da cidade, aonde não foram encontrados dados, apesar de ter sido apresentado a continuidade espacial, essas informações não são confiáveis, no entanto, nas áreas onde foram encontrados dados, os resultados mostram-se satisfatórios. Na Figura 25 destacam-se as regiões com informações não confiáveis devido à falta de dados.

Figura 25 – Regiões com informações não confiáveis.



Fonte: Autor (2016).

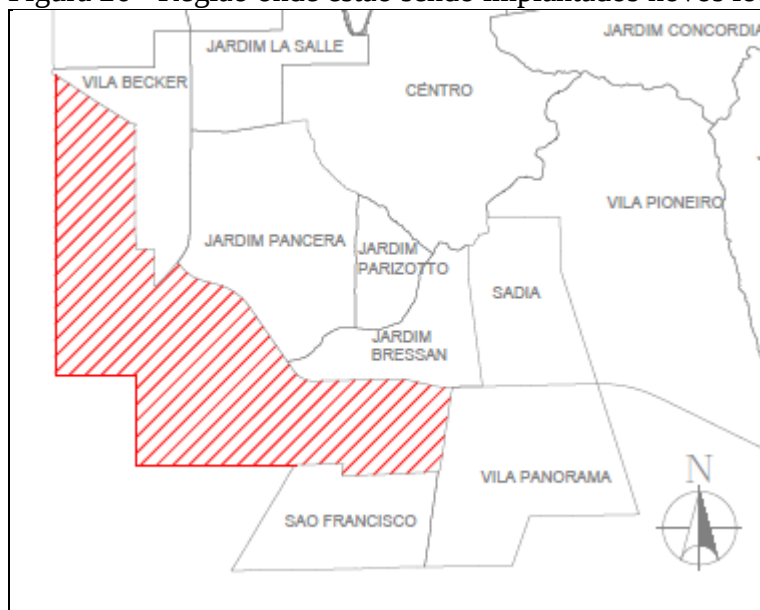
Como a interpolação é limitada à zona de influência de cada amostra, algumas regiões onde não foram coletados dados ou os ensaios não alcançaram todas as camadas de solo propostas para análise, essas regiões não tiveram sua representação produzida, resultando em áreas sem informações (em branco).

Essas zonas periféricas onde não foram encontrados dados, são em decorrência da dificuldade em encontrar empreendimentos em determinadas áreas por se tratarem de zonas

menos atrativas para investimentos de maior porte, seja pelo afastamento da região central da cidade ou pelo zoneamento estipulado pelo plano diretor.

A região destacada na Figura 26, teve sua interpolação apresentada por se tratar de uma região onde recentemente foram implantados novos loteamentos, os quais ainda não estavam atualizados no mapa base utilizado, fazendo com que na apresentação dos mapas, tivessem informações fora do contorno do perímetro urbano.

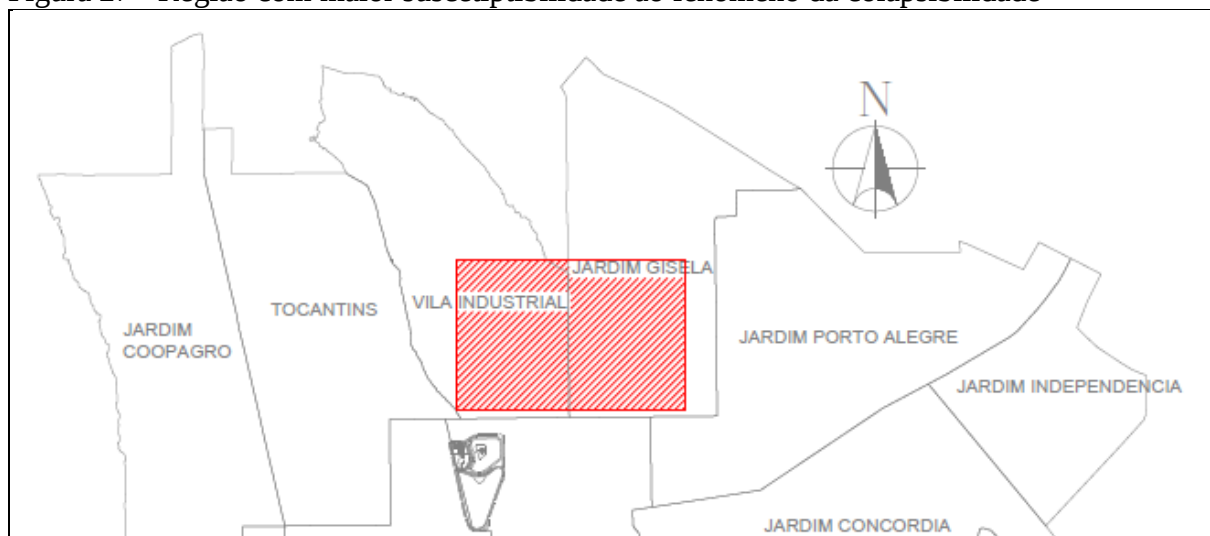
Figura 26 - Região onde estão sendo implantados novos loteamentos.



Fonte: Autor (2016).

Pode-se perceber uma tendência da região norte da cidade em apresentar nível d'água mais alto (< 3 metros). Em especial a região compreendida pelos bairros Gisela e parte da Industrial, assim como também a região do lago municipal. Essa informação, juntamente com o baixo *NSPT* apresentado (< 4) para os primeiros metros, faz com que edificações de pequeno porte (com estacas curtas) se apoiem nessa camada de solo instável, reduzindo assim a capacidade de carga de suas fundações, deixando o empreendimento susceptível a recalques e patologias. A Figura 27 destaca a região com maior susceptibilidade de ocorrência do fenômeno da colapsibilidade.

Figura 27 - Região com maior suscetibilidade ao fenômeno da colapsibilidade



Fonte: Autor (2016).

A região sudoeste foi a que apresentou nível d'água mais profundo (> 10 metros em geral), destaca-se a Vila Becker e Pancera, onde com bons índices *NSPT*, constitui-se um solo com possível boa capacidade de carga. A região a sul também merece destaque pela sua boa capacidade de carga, em especial a região compreendida por parte do Panorama e São Francisco.

Conforme a caracterização do solo de Toledo e com base na análise dos boletins de sondagem coletados, os quais apresentaram apenas variações das frações de argila, conclui-se que o solo da cidade trata-se de um solo argiloso, apresentando uma grande quantidade de finos, elevada porosidade e coloração avermelhada.

O objetivo inicial do presente trabalho era de se gerar mapas para o tipo de solo, no entanto, no decorrer da pesquisa foi constatado que o solo apresentava apenas variações das frações de argila (Figura 28), sendo que para a confecção de mapas pelo *Surfer 13*, seriam necessárias atribuições de valores para os tipos de argila (tendo em vista que o *software* somente realiza interpolações com valores numéricos), fazendo com que os valores numéricos resultantes da interpolação não expressassem corretamente a continuidade espacial referente ao tipo de argila. Por exemplo, se para a Argila Siltosa Marrom Avermelhada fosse atribuído valor 1, e para um ponto dentro do alcance da amostra fosse atribuído um valor 6 para Argila Marrom, o resultado da interpolação seria um valor entre 1 e 6, o qual não representa corretamente a continuidade espacial entre essas amostras.

Figura 28 - Tipos de argilas encontradas nos boletins de sondagens coletados

TIPO DE SOLO
Argila Siltosa Marrom Avermelhada
Argila Roxa
Argila Marrom Avermelhada
Argila Avermelhada
Argila
Argila Marrom Escura
Argila Amarelada
Argila Roxa Escura
Argila Marrom
Argila Mesclada
Argila Siltosa Roxa
Argila Acizentada

Fonte: Autor (2016).

Por fim, analisando os mapas gerados, pode-se constatar a variabilidade das propriedades do solo em curtas distâncias, fazendo com que a execução de fundações sem o conhecimento prévio do solo, apresente riscos a estabilidade das edificações.

CAPÍTULO 5

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com as técnicas geoestatísticas e auxílio do *software Surfer 13*, foi possível representar a continuidade espacial dos parâmetros geotécnicos em estudo, os apresentados através de mapas que fornecem um conhecimento prévio das características do solo de Toledo, o qual pode servir de base para: discussões de planejamento urbano; investigações de patologias; desenvolvimento de campanhas de investigação em áreas pouco amostradas; identificação de áreas susceptíveis a colapsibilidade. Dessa maneira, podem-se atenuar possíveis riscos relacionados a problemas de fundações.

Vale salientar, que a qualidade final dos mapas, está diretamente ligada ao banco de dados criado, o qual se caracteriza por apresentar grande dinâmica na inserção dos dados de campo, e desta forma, carece de uma atualização constante de seu conteúdo, para que a estruturação do banco de dados fique cada vez mais significativa com um volume maior de dados, e conseqüentemente maior confiabilidade dos mapas gerados.

Devida a falta de padronização e a existência de dúvidas sobre a confiabilidade dos resultados, por se tratar de dados oriundos de diferentes empresas que executaram os serviços de sondagem (seis empresas), os resultados das sondagens são susceptíveis a variações devido a fatores apresentados no Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica). No entanto, tais efeitos não foram considerados no presente trabalho.

Com base em informações levantadas e na bibliografia pesquisada, alguns pontos de Toledo apresentam as condicionantes para se classificarem como solo colapsível, o qual apresenta algumas características peculiares, devido à sua formação, alta porosidade, presença de agentes cimentantes (óxidos de ferro) e condição não saturada. Dessa forma, tem elevada susceptibilidade ao recalque quando saturado e, portanto, riscos à estrutura e a sociedade. Vale ressaltar que, esses solos devem passar por confirmação laboratorial da colapsibilidade.

Os agrupamentos de solos de comportamentos semelhantes realizado nesse trabalho, permitirão que em futuros estudos sejam ensaiadas amostras que representem todos os solos que possuam o mesmo índice classificatório. A classificação também deve permitir que, através da classe do solo, o engenheiro possa correlacionar comportamento do material em questão com o de outros solos já conhecidos podendo, desta maneira, prever o comportamento do solo na obra.

CAPÍTULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas propostas em continuidade e complementação da pesquisa, para que se tenha um conhecimento maior do comportamento e características do solo de Toledo, referem-se a:

- Analisar os mapas gerados e as implicações no dimensionamento e escolha de tipo de fundações;
- Novos estudos do solo de Toledo que complementem essa pesquisa, como Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Teor de umidade (w_0);
- Por se encontrarem na condição não saturada, os solos colapsíveis devem ser avaliados quanto à sua compressibilidade através de ensaios edométricos. Esses ensaios quantificam as deformações do solo em função das cargas aplicadas, do teor de umidade e de saturação do solo para cada nível de tensões;
- Resistência ao cisalhamento (diretamente relacionada às tensões efetivas atuantes no solo), utilizando o critério de Mohr-Coulomb e aplicando o princípio das tensões efetivas de Terzaghi;
- Determinação da condutividade hidráulica através de ensaios de campo de infiltração;
- Verificação da eficiência de sondagens a percussão do tipo SPT através de provas de carga estática (pelo fato de terem sido utilizados boletins de sondagens de diferentes empresas). A medição da eficiência do ensaio representa uma maneira de levar em consideração as influências nos resultados de uma sondagem SPT.
- Desenvolvimento de campanhas de sondagem em áreas pouco amostradas, com o objetivo de aumentar o número de amostras para alimentar o banco de dados da pesquisa.
- Levantamento patológico de edificações nas áreas identificadas com susceptibilidade ao fenômeno da colapsibilidade, analisando a interferência do tipo de solo nas patologias levantadas.
- Confirmação laboratorial da colapsibilidade através de ensaios como: Ensaio SPT-T; Ensaio Pressiométrico Duplo; Ensaios de Colapso “in-situ” – Placas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEL, L. S. **Caracterização Geológica-Geotécnica do solo de Laulane para fundações de edifícios**. 2002. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília/DF.
- ABREU, A. E. S. **Mapeamento Geotécnico para gestão municipal – abordagem combinando três métodos distintos e sua aplicação em Analândia – SP**. 2006. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos/SP.
- AGUIAR, J. A. C. **Caracterização do solo da cidade de Santarém – PA com base no SPT**. 2014. Dissertação (Mestrado Profissional em Processos Construtivos e Saneamento Urbano) – UFP, Belém/PA.
- AOKI, N. **Segurança e Confiabilidade de Fundações Profundas**. Congresso de Pontes e Estruturas – Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e Execução de Fundações, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: Solo – Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8036**: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14653-2**: Avaliação de Bens parte 2: Imóveis Urbanos, 2004.
- BELINCANTA, A.; CINTRA, J. C. A. Fatores intervenientes em variantes do método ABNT para execução do SPT. **Revista Solos e Rochas**, ABMS, v. 21, n. 3, p. 119-133, 1998.
- BELINCANTA, A.; FERRAZ. R. L.. Contribuição da Universidade de Maringá no entendimento da sondagem de Simples Reconhecimento com SPT. **Acta Scientiarum**, UEM, Maringá-Pr, 2000.
- BIANCHI, H. L.; RAMOS, M. S. **Correlações com parâmetros de colapsibilidade de um solo na região de Campinas / SP**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba /PR.
- CÂMARA, G. **Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos**. 1995. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos/SP.
- CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 6.ed., 1988.
- COELHO, A. L. N. **Sistema de Informações Geográficas (SIG) como suporte na elaboração de planos diretores municipais**. 2009. Dissertação (Pós-graduação em Geografia) - UFU, Uberlândia/MG.

DIEMER, F.; RAMBO, D.; SPECHT, L. P.; POZZOBON, C. E. **Teoria e Prática na Engenharia Civil: Propriedades Geotécnicas do solo residual de Basalto da região de Ijuí/RS**. 12.ed. Ijuí: UNIJUÍ, 2008.

ESPINDOLA, C. R.; DANIEL, L.A. **Lateritas e Solos Lateríticos no Brasil**. Tese (Pós-Graduação em Geografia) – FATEC, São Paulo / SP.

FAURE, C.J. **Principles and applications of Geochemistry**. Disponível em < <http://geociencias2.webnode.com/news/solos/>> Acesso em: 5 de Abril de 2015.

FIRKOWSKI, H.; BERUTTI, A. J. V.; SLUTER, C. R.; DELAZARI, L. S. **Cartografia**. Curitiba: UFPR – Departamento de Geotemática, 2004.

GONÇALVES, R. L. **Estudo do comportamento de estacas apiloadas em solo colapsível da região de Londrina/Pr**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina/PR.

GUTIÉRREZ, N.H.M. **Influência de aspectos estruturais no colapso de solos do Norte do Paraná**. 2005. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos/ USP, São Carlos/SP.

GHINDIN, A. A.; MELO, V.F.; LIMA, V.C.; JONASSON, J.C.L. **Topossequências de Latossolos Originados de Rochas Basálticas no Paraná. II – Relação entre Mineralogia da Fração de Argila e Propriedades Físicas do Solo**. 2006. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR.

HARA, T. L. **Técnicas de Apresentação de Dados em Geoprocessamento**. 1997 Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos/SP.

IBGE. **Informações sobre os municípios brasileiros**. Disponível em < <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=412770> > Acesso em 6, de maio de 2016.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo/SP: Fundação Editora da Unesp, 1998.

LANDIM, P. M. B.; MONTEIRO, R. C.; CORSI, A.C. **Introdução à confecção de mapas pelo software Surfer**. DGA, IGCE, UNESP/ Rio Claro, Lab. de Geotemática, Texto Didático 8, 21 pp. 2002.

LANDIM, P. M. B. **Sobre Geostatística e Mapas**. Rio Claro: Terrae Didática, 2006.

LEITA DA SILVA, C. P. **Cartografia Geotécnica de grande escala: Estudo de caso Brasília – Área tombada pela Unesco**. 2007. Tese (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília/DF.

MACIEL FILHO, C. L. **Introdução a Geologia de Engenharia**. Santa Maria: Editora UFSM, 2ed., 1997.

ORLOVSKI, R. **Avaliação de espaçamentos das coletas de solo para a modelagem de granulometria com aplicação na agricultura de precisão.** 2013. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – UEPG, Ponta Grossa/PR.

Plano Municipal de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Toledo-Pr. - 1º ed. – Toledo, 2007.

PONS, N. A. D. **Levantamento e diagnóstico geológico/geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos-SP, com auxílio de geoprocessamento.** 2006. Tese (Doutorado em Geotecnia) – USP, São Carlos/SP.

REINERT, J. D.; REICHERT, M. J. **Propriedades física do solo.** 2006. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS.

Revista Institucional Online Toledo. - 2ª ed. – Toledo, 8 de fev. 2015.

RIZZO, B. S. **Utilização de SIG na Geração de Mapa Geotécnico na cidade de Cascavel-PR.** 2013. Trabalho (Conclusão de Curso) - Universidade Estadual Oeste do Paraná, Cascavel/PR.

RODRIGUES, V. L. **Mapeamento Geotécnico como base para o planejamento urbano e ambiental do município de Jaú/SP.** 2008. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos/SP.

SALGADO, S. **Uso de sondagem com ensaio SPT para desenvolvimento de mapeamento geotécnico tridimensional para a cidade de Cascavel-PR.** 2013. Trabalho (Conclusão de Curso) - Faculdade Assis Gurgacz, Cascavel/PR.

SILVA, DANIEL FERMINO DA. **Mapeamento Geoestatístico dos Parâmetros NSPT e Torque Máximo de Solos em Parte da Bacia do Ribeirão Cambezinho em Londrina/Pr.** 2008. Tese (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina/Pr.

SOARES, W. C. **Banco de dados Geológico – Geotécnico com base em Sondagens à Percussão e uso de SIG: Análise espacial da profundidade do Lençol Freático e do NSPT para obras de fundação em João Pessoa – PB.** 2011. Tese (Doutor em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos/SP.

SORIANO, C. Y. C. **Percolação e adensamento nos solos.** 2014. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ.

Toledo. Lei Municipal Nº 1.885. Promulgada em 21 de Dezembro de 2004. A qual dispõe sobre o Plano Municipal de Educação de Toledo.

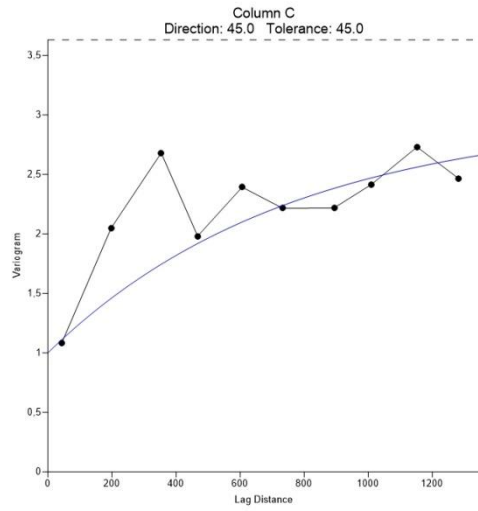
VAZ, L. F. **Origem e Tipos de Solos.** Instituto de Geologia/Universidade de Campinas, 2003.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: Critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas.** São Paulo: Oficina de textos, 2010.

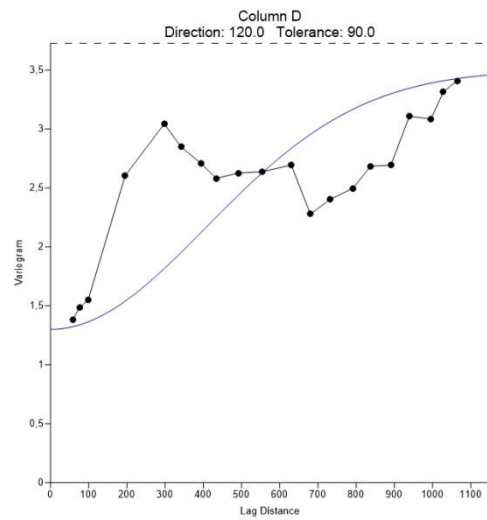
VILAR, O. M. **Solos não Saturados**. Vol.2. 5º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados – São Carlos/SP, 2004.

ZORZI, C. **Caracterização dos Solos Tropicais Lateríticos para reforço de Pavimentos**. 2008. Trabalho (Conclusão de Curso de Engenharia Civil) – Universidade São Francisco, Itatiba / SP.

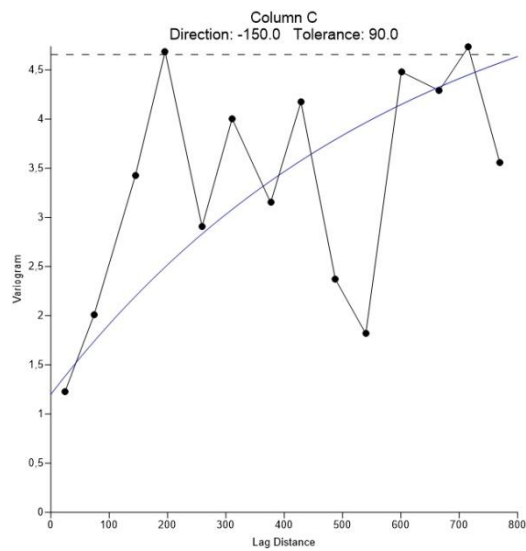
APÊNDICE A – SEMIVARIOGRAMAS



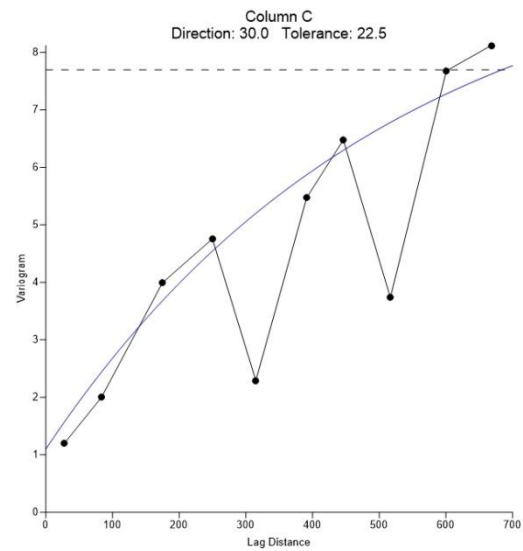
Semivariograma 1º metro (NSPT)



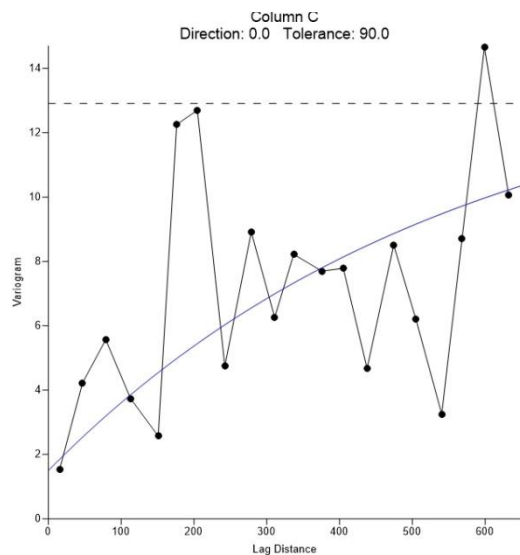
Semivariograma 2º metro (NSPT)



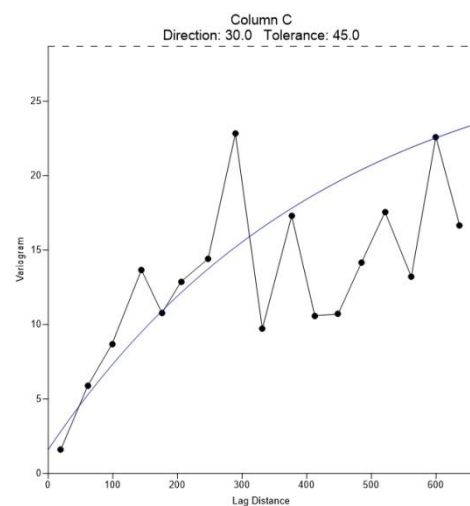
Semivariograma 3º metro (NSPT)



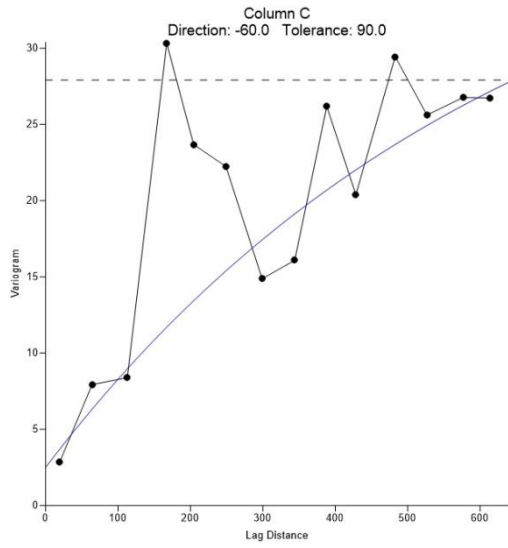
Semivariograma 4º metro (NSPT)



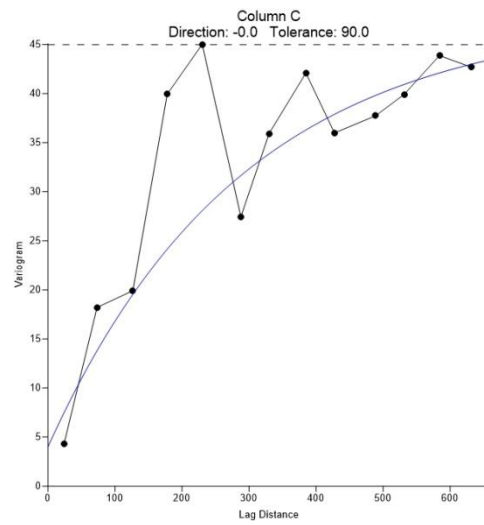
Semivariograma 5º metro (NSPT)



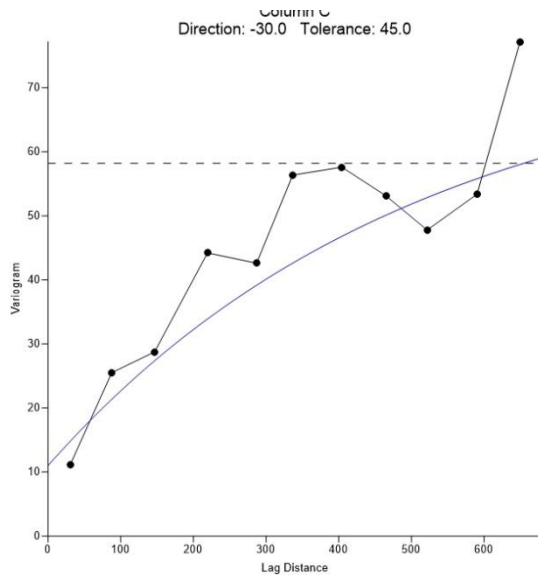
Semivariograma 6º metro (NSPT)



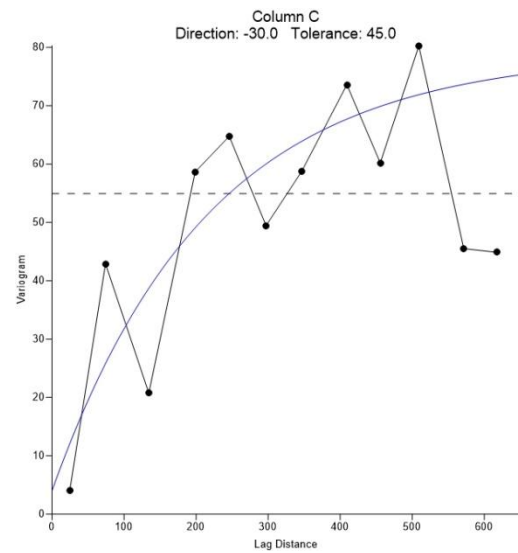
Semivariograma 7º metro (NSPT)



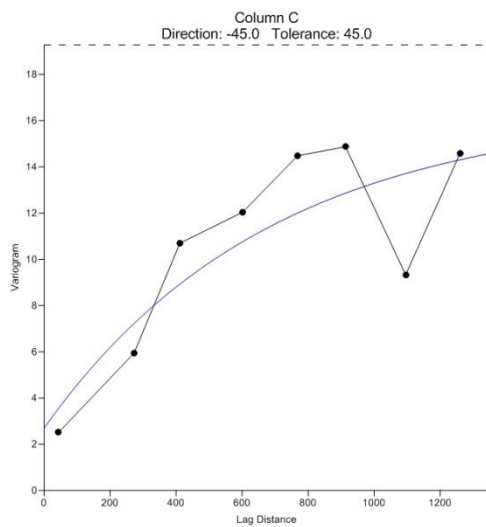
Semivariograma 8º metro (NSPT)



Semivariograma 9º metro (NSPT)

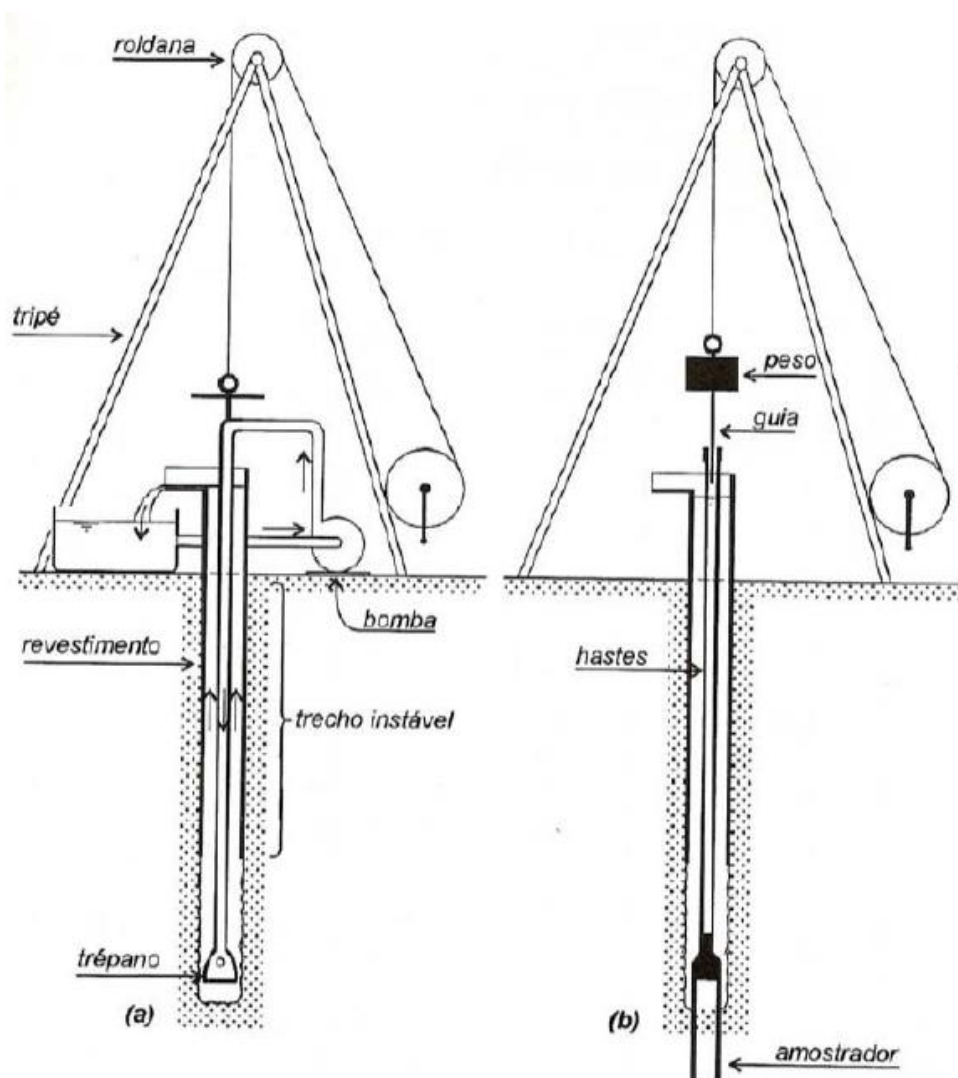


Semivariograma 10º metro (NSPT)



Semivariograma nível d'água

ANEXO A – EQUIPAMENTOS DE ENSAIO SPT – NBR 6484/2001

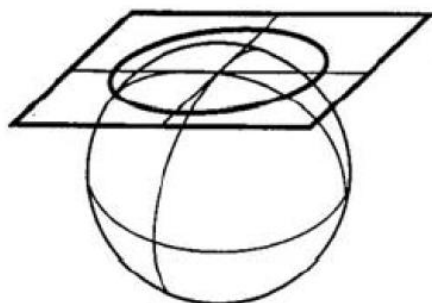


Equipamentos utilizados em ensaio SPT
Fonte: Batista (2002 apud Salgado, 2013)

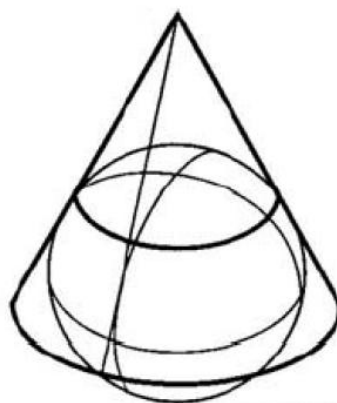
ANEXO B – MODELO BOLETIM DE SONDAGEM SPT

 FACULDADE ASSIS GURGACZ A FACULDADE DA SUA VIDA											
Informações gerais		RESULTADOS DOS ENSAIOS "SPT-T"						DESCRIÇÃO DO SUBSOLO			
Coro (cm)	Área de SPT (cm²)	N.º de golpes para penetração (cm)	N	T _{max}	T _{min}	T _{med}	T _{med} (kgf/cm²)	Prof. (cm)	Prof. (m)	Prof. (m)	Prof. (m)
0,0	TH	1	1	1	2,0			0,0	0,0		
		15	15	1,4				0,1	0,1		
		23	23	0	1,4			0,2	0,2		
		1	1	1	2,0			0,3	0,3		
		15	15	1,4				0,4	0,4		
		17	17	1,4				0,5	0,5		
3,0	TH	1	1	1	4,1			0,6	0,6		
		14	14	1,4				0,7	0,7		
		17	17	1,4				0,8	0,8		
		18	18	1,4				0,9	0,9		
		2	2	2	7,8			1,0	1,0		
		14	14	1,4				1,1	1,1		
		4	4	4	9,7			1,2	1,2		
		14	14	1,4				1,3	1,3		
6,0		1	1	1	9,8			1,4	1,4		
		17	17	1,4				1,5	1,5		
		2	2	2	12,8			1,6	1,6		
		15	15	1,4				1,7	1,7		
		2	2	2	18,0			1,8	1,8		
		15	15	1,4				1,9	1,9		
		2	2	2	20,7			2,0	2,0		
		15	15	1,4				2,1	2,1		
		10	10	1,4				2,2	2,2		
		15	15	1,4				2,3	2,3		
		15	15	1,4				2,4	2,4		
		15	15	1,4				2,5	2,5		
		15	15	1,4				2,6	2,6		
		15	15	1,4				2,7	2,7		
		15	15	1,4				2,8	2,8		
		15	15	1,4				2,9	2,9		
		15	15	1,4				3,0	3,0		
		15	15	1,4				3,1	3,1		
		15	15	1,4				3,2	3,2		
		15	15	1,4				3,3	3,3		
		15	15	1,4				3,4	3,4		
		15	15	1,4				3,5	3,5		
		15	15	1,4				3,6	3,6		
		15	15	1,4				3,7	3,7		
		15	15	1,4				3,8	3,8		
		15	15	1,4				3,9	3,9		
		15	15	1,4				4,0	4,0		
		15	15	1,4				4,1	4,1		
		15	15	1,4				4,2	4,2		
		15	15	1,4				4,3	4,3		
		15	15	1,4				4,4	4,4		
		15	15	1,4				4,5	4,5		
		15	15	1,4				4,6	4,6		
		15	15	1,4				4,7	4,7		
		15	15	1,4				4,8	4,8		
		15	15	1,4				4,9	4,9		
		15	15	1,4				5,0	5,0		
		15	15	1,4				5,1	5,1		
		15	15	1,4				5,2	5,2		
		15	15	1,4				5,3	5,3		
		15	15	1,4				5,4	5,4		
		15	15	1,4				5,5	5,5		
		15	15	1,4				5,6	5,6		
		15	15	1,4				5,7	5,7		
		15	15	1,4				5,8	5,8		
		15	15	1,4				5,9	5,9		
		15	15	1,4				6,0	6,0		
		15	15	1,4				6,1	6,1		
		15	15	1,4				6,2	6,2		
		15	15	1,4				6,3	6,3		
		15	15	1,4				6,4	6,4		
		15	15	1,4				6,5	6,5		
		15	15	1,4				6,6	6,6		
		15	15	1,4				6,7	6,7		
		15	15	1,4				6,8	6,8		
		15	15	1,4				6,9	6,9		
		15	15	1,4				7,0	7,0		
		15	15	1,4				7,1	7,1		
		15	15	1,4				7,2	7,2		
		15	15	1,4				7,3	7,3		
		15	15	1,4				7,4	7,4		
		15	15	1,4				7,5	7,5		
		15	15	1,4				7,6	7,6		
		15	15	1,4				7,7	7,7		
		15	15	1,4				7,8	7,8		
		15	15	1,4				7,9	7,9		
		15	15	1,4				8,0	8,0		
		15	15	1,4				8,1	8,1		
		15	15	1,4				8,2	8,2		
		15	15	1,4				8,3	8,3		
		15	15	1,4				8,4	8,4		
		15	15	1,4				8,5	8,5		
		15	15	1,4				8,6	8,6		
		15	15	1,4				8,7	8,7		
		15	15	1,4				8,8	8,8		
		15	15	1,4				8,9	8,9		
		15	15	1,4				9,0	9,0		
		15	15	1,4				9,1	9,1		
		15	15	1,4				9,2	9,2		
		15	15	1,4				9,3	9,3		
		15	15	1,4				9,4	9,4		
		15	15	1,4				9,5	9,5		
		15	15	1,4				9,6	9,6		
		15	15	1,4				9,7	9,7		
		15	15	1,4				9,8	9,8		
		15	15	1,4				9,9	9,9		
		15	15	1,4				10,0	10,0		
		15	15	1,4				10,1	10,1		
		15	15	1,4				10,2	10,2		
		15	15	1,4				10,3	10,3		
		15	15	1,4				10,4	10,4		
		15	15	1,4				10,5	10,5		
		15	15	1,4				10,6	10,6		
		15	15	1,4				10,7	10,7		
		15	15	1,4				10,8	10,8		
		15	15	1,4				10,9	10,9		
		15	15	1,4				11,0	11,0		
		15	15	1,4				11,1	11,1		
		15	15	1,4				11,2	11,2		
		15	15	1,4				11,3	11,3		
		15	15	1,4				11,4	11,4		
		15	15	1,4				11,5	11,5		
		15	15	1,4				11,6	11,6		
		15	15	1,4				11,7	11,7		
		15	15	1,4				11,8	11,8		
		15	15	1,4				11,9	11,9		
		15	15	1,4				12,0	12,0		
		15	15	1,4				12,1	12,1		
		15	15	1,4				12,2	12,2		
		15	15	1,4				12,3	12,3		
		15	15	1,4				12,4	12,4		
		15	15	1,4				12,5	12,5		
		15	15	1,4				12,6	12,6		
		15	15	1,4				12,7	12,7		
		15	15	1,4				12,8	12,8		
		15	15	1,4				12,9	12,9		
		15	15	1,4				13,0	13,0		
		15	15	1,4				13,1	13,1		
		15	15	1,4				13,2	13,2		
		15	15	1,4				13,3	13,3		
		15	15	1,4				13,4	13,4		
		15	15	1,4				13,5	13,5		
		15	15	1,4				13,6	13,6		
		15	15	1,4				13,7	13,7		
		15	15	1,4				13,8	13,8		
		15	15	1,4				13,9	13,9</		

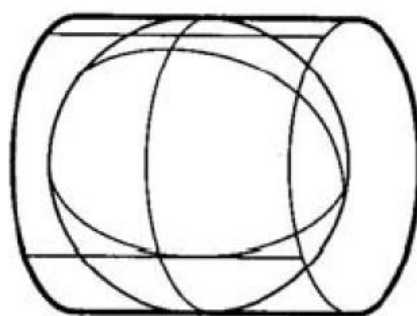
ANEXO C – EXEMPLOS ILUSTRATIVOS DE PROJEÇÃO TIPO PLANA, CÔNICA E CILINDRICA RESPECTIVAMENTE



Exemplo de projeção plana
Fonte: Firkowski *et al* (2004)



Exemplo de projeção cônica
Fonte: Firkowski *et al* (2004)



Exemplo de projeção cilíndrica
Fonte: Firkowski *et al* (2004)