

APLICAÇÃO DA GEOESTATÍSTICA NA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA UNITÁRIA DE PONTA E LATERAL PARA ORIENTAÇÃO DE PROJETOS DE FUNDAÇÕES PROFUNDAS

Application of geostatistics to estimate the unit points and skin resistances as guidelines in deep foundation projects

Rodolfo Moreda Mendes*

Reinaldo Lorandi**

RESUMO - Utilizando-se a metodologia geoestatística de *krigeagem* ordinária realizou-se a estimativa dos valores de resistência e caracterização textural de um solo residual de arenito, com o intuito de obter mapas em diversas profundidades das resistências unitárias de ponta e lateral conforme método proposto por Aoki e Velloso . O mapeamento geoestatístico foi realizado com base em 241 relatórios de sondagens SPT da área estudada obtendo-se como produto final mapas das resistências unitárias de ponta e lateral a diversas profundidades.

Os resultados gerais obtidos mostram que em 82,3% da área estudada (40,5 km²) ocorrem maciços de solos apresentando resistências unitárias de ponta inferiores a 15,0 MPa e 86,2% (42,4 km²) com resistências unitárias lateral inferiores a 0,4 MPa, em média, até 8,5 metros de profundidade. Analisando os mapas produzidos, verificou-se uma distribuição espacial dos maciços de solos mais favorável à implantação de fundações profundas em profundidades superiores a 11,0 metros. Espera-se com esse trabalho indicar, através das estimativas probabilísticas das resistências de ponta e lateral dos maciços de solos, áreas do meio físico urbano que atendam às condições mínimas de projeto de fundações, que possibilitem a previsão da capacidade de carga última de fundações profundas, principalmente como instrumento preliminar de orientação da variabilidade geométrica da superfície de apoio dessas fundações.

SYNOPSIS - The *kriging* ordinary geostatistical methodology was used to estimate the values of strength and grain-size distribution of a sandstone residual soil, with the intention to obtain maps in various depth of the unit points and skin resistances according to the method proposed by Aoki and Velloso. The geostatistical mapping was prepared using 241 SPT boreholes of the studied area, where some maps of the unit point and skin resistances in depth were obtained. In general, the results, showed that 82,3% of studied area (40,5 km²) occur aggregate soil formed for unit point resistance inferior to 15,0 MPa and 86,2% (42,4 km²) with unit skin resistance inferior to 0,4 MPa, on average, until 8,5 meters of depth. Analyzing all the maps, a spatial distribution of the aggregate soil more favorable to introduction of deep foundations in depth above 11,0 meters was verified.

Therefore, using the maps obtained by probabilistic estimations of the unit point and skin resistances of the soil aggregate, intended to indicate areas of the urban territory integrated, it is expect they met the necessary conditions of the foundation projects, mainly as preliminary implement to guide the geometric variability of the support surface of deep foundations.

* Professor M.Sc., Faculdades D. Pedro II – Brasil; e-mail: rmm2002@ig.com.br

** Professor Doutor, DECiv/UFSCar – Brasil; e-mail: lorandi@power.ufscar.br

1 - INTRODUÇÃO

A previsão da capacidade de carga última de fundações profundas sem a realização de provas de carga, estáticas ou dinâmicas, tem sido uma preocupação constante de profissionais especializados em engenharia de fundações. São inúmeras as teorias existentes para a previsão da capacidade de carga última de fundações profundas.

A capacidade de carga última de fundações profundas pode ser estimada através de métodos estáticos teóricos como os de Meyerhof (1976), Vésic (1967), Berezantzev & Yaroshenko (1957) e Poulos & Davis (1980), ou com uso de métodos estáticos semi-empíricos que utilizam ensaios de campo tipo SPT, SPT-T e CPT como os propostos por Aoki & Velloso (1975), Décourt & Quaresma (1978) e Velloso (1991).

Os métodos teóricos-experimentais e os ensaios laboratoriais são fundamentais para estabelecer a influência relativa de todos os parâmetros envolvidos nos cálculos de capacidade de carga. Apesar disso, sua utilização na prática da engenharia de fundações é muitíssimo restrita visto que a maioria dos parâmetros do solo necessários a essas análises é de difícil ou mesmo de quase impossível obtenção.

Correlações com boas probabilidades de acerto podem ser obtidas de forma semi-empírica. No Brasil, os dois métodos mais utilizados para a previsão da capacidade de carga última de fundações profundas são os métodos de Aoki & Velloso (1975) e Décourt & Quaresma (1978).

Autores como Teixeira (1997), Stephan et al (1998) e Silva (1996) mencionam várias fórmulas para avaliação das resistências lateral e de ponta de estacas e concluem que as fórmulas semi-empíricas fornecem resultados mais realistas que as fórmulas teóricas, especialmente a de Aoki & Velloso (1975).

Aoki & Velloso (1975) apresentaram seu método no V Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, onde as resistências últimas de ponta e de atrito lateral são avaliadas em função da resistência de ponta " q_c " do ensaio de penetração do cone (CPT). A maior dificuldade para a correta aplicação desse método é a necessidade da perfeita caracterização do tipo de solo envolvido.

Métodos semi-empíricos que utilizam resultados de ensaios de penetração contínua ou de sondagens de simples reconhecimento têm sido utilizados com satisfatória aproximação em algumas circunstâncias. Porém, tais métodos foram desenvolvidos com base em resultados de prova de carga realizadas em regiões com características geológicas e geotécnicas próprias. Logo, a generalização desses métodos para outras regiões pode levar a resultados muito distantes do valor real.

No presente trabalho optou-se pela utilização da metodologia semi-empírica proposta por Aoki & Velloso (1975), devido principalmente à sua comprovada eficácia na previsão da capacidade de carga última de fundações profundas verificada em diversos estudos de obras situadas em regiões compostas por maciços de solos similares aos encontrados na área estudada em questão.

As sondagens de simples reconhecimento a percussão (ensaio SPT) constituem atualmente o método mais difundido e utilizado no Brasil para obtenção de informações pontuais sobre os maciços de solos, apesar de diversos questionamentos à credibilidade e eficiência dessa técnica. Embora as sondagens, amostragens e ensaios desse tipo estejam normatizados (NBR-7250/80 e NBR-6484/79 da ABNT), os resultados podem ainda estar sujeitos aos erros sistemáticos entre laboratórios e operadores diferentes.

Quando se faz um mapeamento geoestatístico utilizando-se sondagens e ensaios geotécnicos já executados na área estudada, são utilizados, também, para interpretação, as informações, observações e eventuais erros da fase de levantamento de campo.

O ensaio SPT é utilizado para identificar e caracterizar as diversas camadas do subsolo, além de proporcionar a obtenção do índice de resistência à penetração (N_{SPT}) posteriormente empregado em projetos de fundações para o cálculo da capacidade de carga última através dos diversos métodos semi-empíricos.

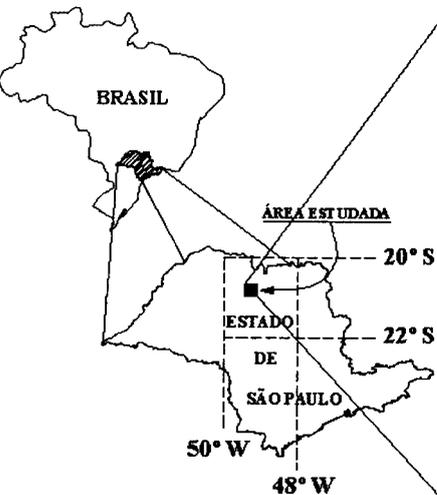
Contudo, considera-se relevante, na fase de projeto, a previsão da capacidade de carga última de fundações profundas em diversas obras de engenharia através de métodos consagrados que utilizam, em grande parte, dados pontuais de resistência do solo provenientes de sondagens de simples reconhecimento. Nesse contexto, realizou-se no presente trabalho o mapeamento das resistências unitárias de ponta e lateral, conforme proposto por Aoki & Velloso (1975), utilizando-se a metodologia geostatística da *krigeagem* ordinária para estimar os valores do índice de resistência à penetração (N_{SPT}) e da porcentagem de cada fração do solo (areia, silte e argila) em locais não amostrados.

Utilizando essa metodologia espera-se classificar o maciço de solo urbano em áreas que possam indicar, em profundidade, a distribuição geométrica das resistências unitárias de ponta e lateral. Tais informações poderão ser posteriormente utilizadas como mapas indicativos de ocupação do meio físico urbano, indicando as condições mínimas para projeto de fundações profundas. Esses mapas podem constituir um instrumento preliminar de orientação para a escolha da cota de apoio de elementos estruturais de fundação.

2 ASPECTOS GERAIS DA ÁREA ESTUDADA

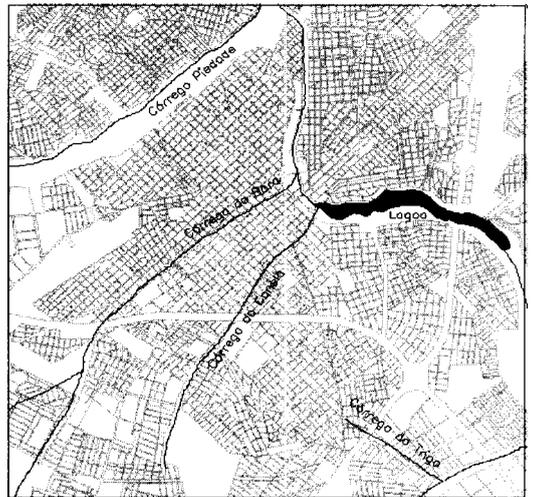
A região estudada constitui a área urbana central da cidade de São José do Rio Preto (Brasil), situada na Região Ocidental do Estado de São Paulo, com área aproximada de 49,2 km², delimitada pelos paralelos 20°46'47'' e 20°50'47'' de Latitude Sul e pelos meridianos 49°20'51'' e 49°24'51'' de Longitude Oeste (Figura 1).

LOCALIZAÇÃO NO BRASIL E ESTADO DE SÃO PAULO



DETALHE DA ÁREA ESTUDADA

UTM (E=665.000; N=7.701.000)



UTM (E= 672.000; N=7.694.000)

Fig. 1 - Localização da área estudada.

A cobertura vegetal natural das terras da região é caracterizada como cerrado, cerradinho e capoeira e depende da fertilidade do solo e do abastecimento hídrico. Na topografia, encontra-se o predomínio de relevo formado por colinas amplas a médias, com amplitudes inferiores a 100 metros e apresentando declividades menores que 15%.

Na área predominam formações pedológicas evoluídas, com solos espessos, representados por latossolos de cor vermelha, amarela e vermelha escura. Nas vertentes dos vales principais e no extremo nordeste da área, ocorrem manchas de latossolos podzolizados, representando um nível intermediário de evolução pedológica. Os solos hidromórficos, distribuídos ao longo dos vales das linhas de drenagem principais, podem ser associados a condicionantes geotécnicos específicos, como níveis de argilas orgânicas de baixa resistência e nível freático raso (Augusto Filho et al, 1999). Entre os principais cursos d'água destacam-se os Córregos: Piedade, do Borá, da Canela e do Trigo, além da Lagoa que serve como fonte de abastecimento de água para uma parte da população urbana.

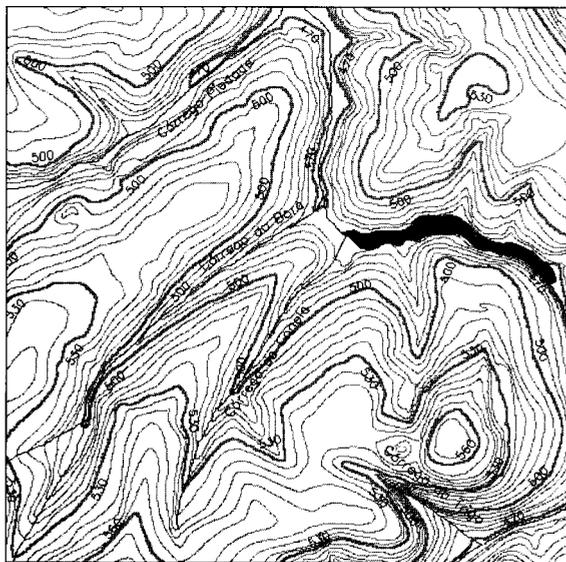
2.1 - Aspectos geomorfológicos

A área estudada está inserida na unidade geomorfológica denominada de *Planalto Centro Ocidental*, que se caracteriza pelo predomínio de formas de relevo denudacionais.

Esse modelado é formado basicamente por colinas amplas e baixas, com topos convexos, dimensões interfluviais médias entre 1.750 e 3.750 metros, altimetria entre 400 e 700 metros acima do nível do mar e predominando declividades médias entre 2 e 10%.

Na área de estudo há predomínio de topografia suave, com relevo ondulado, relativamente uniforme, com amplos e baixos espigões. São pequenas as diferenças de nível apresentadas pelas mais altas e mais baixas cotas topográficas, que variam de 470 a 570 metros (Figura 2). Não se registra qualquer acidente mais notável senão extensos espigões em forma de longas e estreitas faixas, divisores das principais bacias hidrográficas da região (Barcha, 1980).

UTM (E=665.000; N= 7.701.000)



UTM (E= 672.000; N= 7.694.000)

Fig. 2 - Altimetria com isolinhas e principais cursos d'água da área estudada.

2.2 - Aspectos geológicos

Geologicamente a área de estudo é representada exclusivamente pelo Grupo Bauru (Cretáceo Superior). Predominam afloramentos da Formação Adamantina com estrato da Formação Santo Anastácio sotoposto.

Localmente a Formação Adamantina é mais expressiva, com espessuras variando de 58 até 140 metros, cuja principal característica é a presença de bancos de arenitos de granulação fina a muito fina, cor de róseo a castanho. As maiores espessuras da Formação Adamantina ocorrem geralmente nas porções ocidentais dos espigões entre os grandes rios (Barcha, 1980).

Os arenitos da Formação Santo Anastácio geralmente afloram em áreas que acompanham as cotas topográficas mais baixas dos vales dos córregos e rios. A litologia mais característica dessa formação é representada por arenitos castanho avermelhados, de granulação fina a média, seleção geralmente regular a ruim. O substrato rochoso na região é relativamente homogêneo, sendo constituído de arenitos finos, correlacionáveis à Formação Adamantina. Os afloramentos rochosos são relativamente raros, ocorrendo principalmente nas linhas de drenagem.

2.3 - Comportamento vertical do grupo Bauru

A partir de alguns perfis de poços tubulares perfurados na região (Figura 3), procura-se mostrar o comportamento vertical do Grupo Bauru na área estudada, levando-se em consideração sua cota topográfica.

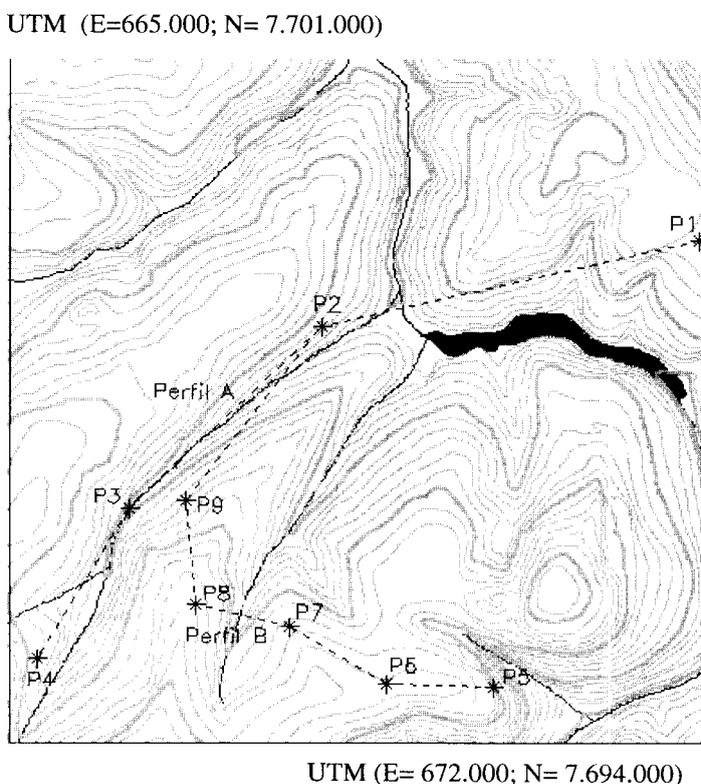


Fig. 3 - Localização em planta dos perfis de poços tubulares da área estudada.

Esses perfis mostram que a seqüência vertical do Grupo Bauru é constituída por arenitos de granulação variada, desde grosseira a muito fina, predominando os termos finos e médios. Lentes de siltitos e argilitos de pequena espessura não chegam a assumir expressão quantitativa considerável nos perfis estudados (Figura 4). A cor predominante é do grupo do vermelho, sendo comuns as cores bege, castanho-claro, vermelho-claro e vermelho-escuro. Cores cinza e cinza-bege são relativamente abundantes, embora menos freqüentes.

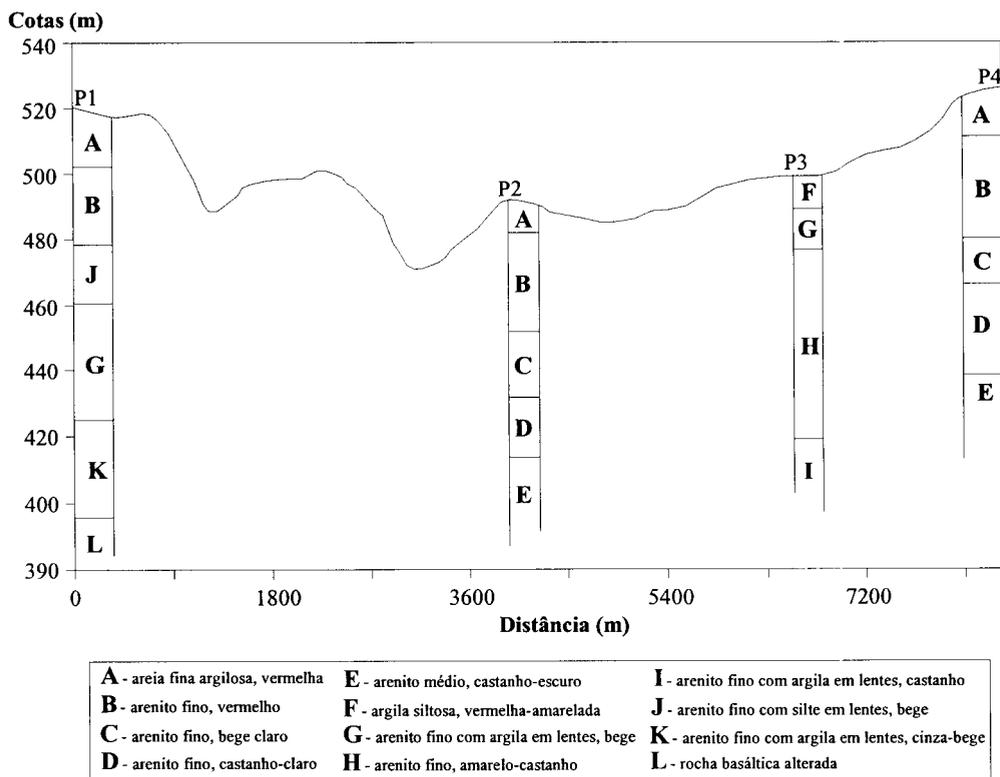


Fig. 4 - "Perfil A" - comportamento vertical do Grupo Bauru na área estudada.

Próximo ao substrato basáltico e sobre ele, a cor é invariavelmente o vermelho ou vermelho escuro. À medida que se aproxima da soleira basáltica, a litologia muda para arenito vermelho, vermelho-escuro, maciço, poroso, rico em concreções calcárias, com espessura variável.

O cimento calcário está sempre presente sem, contudo, manifestar preferência por quaisquer níveis no perfil vertical. As concreções calcárias também são abundantes, mas parecem ser mais freqüentes nos corpos litológicos de textura mais grosseira bem como na base do pacote sedimentar, próximo ao contato com o basalto.

Ao longo dos espigões predominam clásticos arenosos, do grupo do vermelho, apresentando predominância do bege ao róseo, entre os termos arenosos e silticos e castanho-escuro para o argilito (Figura 5). Predomina, de modo geral e absoluto, a fração arenosa sobre as frações mais finas (siltes e argilas), sendo comum a presença de conglomerados de seixos de argilito.

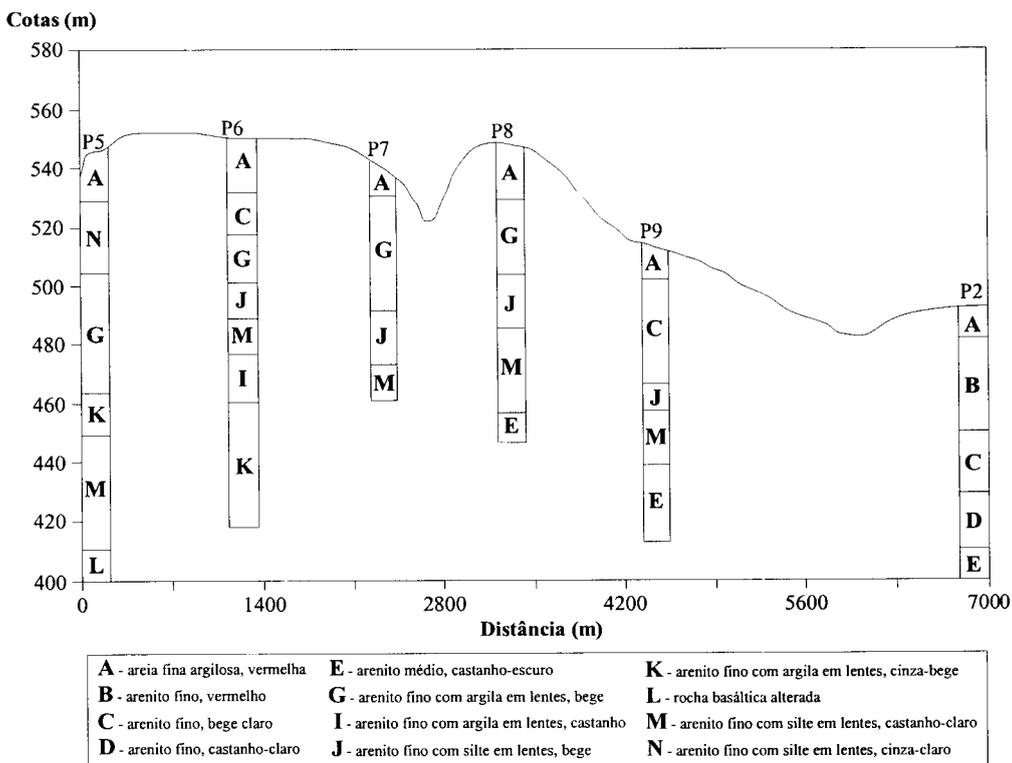


Fig. 5 - "Perfil B" - comportamento vertical do Grupo Bauru na área estudada.

De um modo geral, todas as características sedimentológicas de superfície são também observadas ao longo da profundidade, não havendo diferenças muito significativas entre a superfície e níveis mais profundos no tocante às porcentagens das frações do solo (areia, silte e argila), à cor, à porosidade e à permeabilidade.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Análise dos ensaios SPT e elaboração do banco de dados

Foram analisados 1238 relatórios de sondagens de simples reconhecimento executadas no período de 1991 a 2000 na área de estudo, para obras civis em geral. Esses relatórios foram obtidos por Mendes (2001) junto às empresas que realizaram sondagens na região.

Desse universo de amostras foram selecionadas as 241 sondagens a percussão que representativas do perfil do terreno estudado. Para isso, realizou-se uma análise simultânea das condições topográficas e geológicas locais, a partir de dados provenientes de 9 poços tubulares profundos (Figuras 4 e 5).

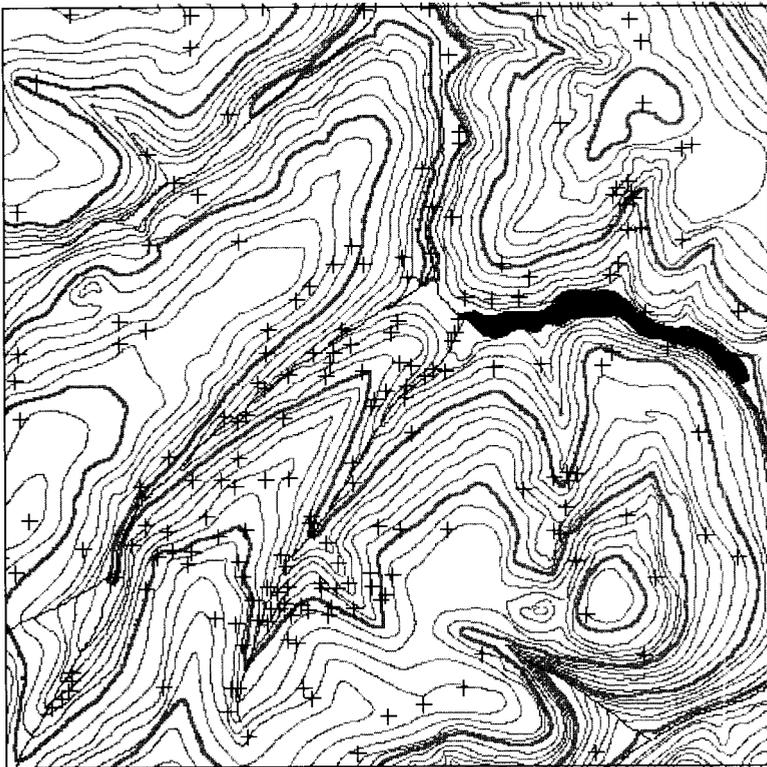
Verificou-se que as condicionantes geológico-topográficas da área estudada apresentaram poucas variações verticais para distâncias relativamente altas (acima de 500 metros). Como as distâncias entre as sondagens analisadas na etapa de seleção não foram superiores a essa distância, acredita-se que as condicionantes geológico-topográficas mais relevantes estejam

bem representadas espacialmente. Considera-se a densidade média de amostras envolvida no presente trabalho relativamente expressiva (5,0 sondagens/km²), tendo em vista que em trabalhos similares, utilizando a metodologia geoestatística, as densidades de amostras foram de aproximadamente 1,2 amostras/km² (Sturaro & Landim, 1996) e 0,9 amostras/km² (Sturaro et al, 2000).

Dos relatórios das 241 sondagens selecionadas foram extraídas informações sobre o índice de resistência à penetração ($N_{SPT} \leq 60$ golpes) e as porcentagens de cada fração do solo (areia, silte e argila) nas profundidades 6,0, 8,5, 11,0 e 13,5 metros.

Para a elaboração do banco de dados, todas essas informações foram cadastradas e armazenadas em uma planilha eletrônica do aplicativo Excel da *Microsoft Office*[®]. Posteriormente esses dados foram inseridos no ambiente do SIG-Spring-3.5 (BRASIL-INPE, 1999) e georreferenciados em coordenadas do Sistema UTM (*Universal Transverso de Mercator*). Na Figura 6 encontra-se, juntamente com as isolinhas de altimetria, a distribuição espacial dos perfis das sondagens de simples reconhecimento (SPT) utilizadas no presente trabalho.

UTM (E= 665.000; N= 7.701.000)



UTM (E=672.000; N=7.694.000)

Fig. 6 - Distribuição das sondagens de simples reconhecimento (SPT).

3.2 - Metodologia geoestatística

3.2.1 - Fundamentação teórica

A teoria das variáveis regionalizadas está fundamentada nos modelos probabilísticos, onde as variáveis são consideradas como a realização única de uma determinada função aleatória (Matheron, 1971).

A metodologia geoestatística concentra-se basicamente na estimativa da variável regionalizada em uma, duas ou três dimensões. Entende-se por variável regionalizada aquela cujo comportamento espacial apresenta características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente casuais e as completamente determinísticas.

Em outras palavras, uma variável pode ser considerada regionalizada se apresentar, numa distribuição espacial, um determinado grau de correlação que permita ser representada por funções numéricas ordinárias que assumem valores definidos a cada ponto no espaço e que matematicamente descrevem fenômenos naturais.

Na estatística convencional, esse conhecimento pode ser baseado tanto num bom modelo teórico como numa análise empírica baseada numa amostragem relativamente expressiva.

O principal objetivo da metodologia geoestatística é avaliar as características estruturais das variáveis regionalizadas efetuando-se estimativas que atendam a determinados projetos de engenharia.

Ultimamente os métodos geoestatísticos têm sido aplicados em diversas áreas de pesquisa tais como: geologia e geotecnia ambiental, engenharia de fundações, planejamento urbano, entre outros, objetivando efetuar estimativas e (ou) simulações de variáveis em locais desprovidos de amostragens específicas.

Para isso é necessário conhecer previamente as características do fenômeno aleatório em que a variável está compreendida. Essas características podem ser obtidas a partir de coletas de amostras e de algumas suposições de estacionaridade do processo aleatório.

A avaliação da continuidade espacial de uma determinada variável está fundamentada nos princípios de regressão linear empregados na estatística clássica para analisar a dependência entre duas variáveis (Journel, 1989). Na metodologia geoestatística essa análise é feita para avaliar a dependência de uma variável com ela mesma, mas separadas por um vetor “h”.

Através desse procedimento, o grau de dependência entre uma variável qualquer para com ela mesma separada por um vetor “h” pode ser captado pelo coeficiente de correlação, covariância e, ainda, pelo cálculo do momento de inércia para várias distâncias “h”, denominado em geoestatística de variograma experimental.

3.2.2 - Parâmetros do variograma

O variograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de *krigeagem* que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço. Em geral, o variograma é uma função de incremento com a distância “h”, visto que, quanto mais afastadas forem as amostras mais seus valores, em média, deverão ser diferentes (Huijbregts, 1975).

O primeiro passo em uma estimativa geoestatística é a construção do variograma experimental onde são situados os valores da distância “h” em abscissa e em ordenada os correspondentes valores da função variograma “ $\gamma(h)$ ”. Esses gráficos expressam o comportamento espacial da variável regionalizada e mostram as dimensões da zona de influência, além de eventuais aspectos anisotrópicos.

Espera-se que observações (dados, amostragens) mais próximas geograficamente tenham um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias. Assim, é esperado que os valores de “ $\gamma(h)$ ” aumentem com a distância “ h ”. A Figura 7 ilustra um variograma experimental com características muito próximas do ideal.

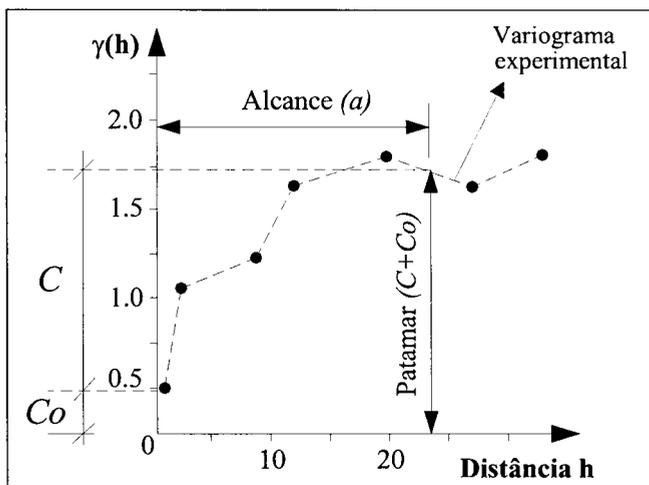


Fig. 7 - Exemplo de variograma experimental.

Os parâmetros do variograma podem ser observados diretamente da Figura 7:

- *Alcance (a)*: indica a distância a partir da qual as amostras passam a não possuir correlação espacial e a relação entre elas torna-se aleatória; toda amostra cuja distância ao ponto a ser estimado for menor ou igual ao *alcance (a)*, fornece informações sobre o ponto;
- *Patamar ($C+C_0$)*: é o valor do variograma correspondente ao seu *alcance (a)*; desse ponto em diante considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras torna-se invariante com a distância;
- *Efeito Pepita (C_0)*: descreve o comportamento imprevisível da variável modelada para distâncias excessivamente curtas entre as amostras; o efeito pepita pode ser atribuído a erros de amostragem, erros de medidas ou ao fato de que os dados não foram coletados em intervalos suficientemente pequenos para mostrar o comportamento espacial da variável estudada.

3.2.3 - Modelos teóricos de ajuste

Após a etapa de elaboração dos variogramas experimentais para diversas direções, deve-se posteriormente ajustar um modelo matemático global que possa representar da melhor forma possível o comportamento espacial da variável em estudo. É importante que o modelo matemático a ser ajustado represente a tendência do variograma “ $\gamma(h)$ ” em relação à distância “ h ”. Desse modo, as estimativas obtidas a partir da *krigeagem* poderão ser mais exatas e, portanto, mais confiáveis. Na metodologia geoestatística encontram-se vários modelos teóricos

para ajustes de variogramas, destacando-se, porém, os modelos exponencial, esférico e gaussiano (Figura 8).

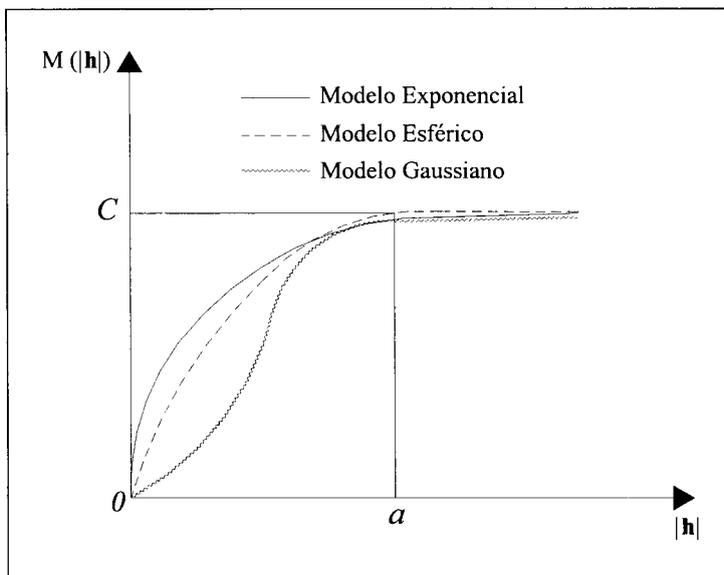


Fig. 8 - Exemplos de modelos de ajuste.

O procedimento de ajuste não é direto nem automático como no caso de uma regressão, por exemplo, mas sim iterativo, pois nesse processo o intérprete (usuário) faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico.

Dependendo do ajuste obtido, pode ou não redefinir-se o modelo matemático até obter um modelo que seja considerado satisfatório. Na prática, os variogramas experimentais possuem valores de efeito pepita (C_0) maior que zero e valores de patamar ($C + C_0$) maiores que a unidade.

Embora o modelo esférico (Sph) seja um dos modelos mais utilizados, no presente trabalho o modelo que melhor representou a variabilidade espacial das amostras estudadas foi exclusivamente o modelo exponencial (Exp), cuja equação é dada por:

$$\gamma(h) = 0 \quad \text{para } h = 0 \quad (1)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad \text{para } h \neq 0 \quad (2)$$

sendo “ C_0 ”, “ C ” e “ a ” os parâmetros básicos dos modelos de ajuste. Esse modelo matemático atinge o patamar assintoticamente com o alcance prático definido como a distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar.

3.2.4 - Estimativas pela *Krigeagem* ordinária

Uma necessidade constante na área de Geociências, principalmente em sua cartografia, é a estimativa de valores em locais onde não foram feitas amostragens. Essa fase constitui-se num passo importante, pois a grade de pontos estimada será responsável pela qualidade dos mapas a serem gerados.

Os pontos dessa grade devem ser estimados por métodos ou técnicas consistentes, para gerarem mapas confiáveis, os quais servirão de auxílio para elaboração de diversos projetos no âmbito da Geotecnia que requerem estimativas com determinada precisão.

Dentre os métodos de estimativas usualmente empregados, o método geoestatístico da *krigeagem* pode ser considerado como o melhor estimador linear. A *krigeagem* utiliza informações provenientes do variograma experimental para encontrar os melhores pesos a serem associados às amostras com valores conhecidos que, posteriormente, irão estimar os pontos desconhecidos.

O método da *krigeagem* pode fornecer, inclusive, o erro residual associado a tal estimação dos pontos sem amostragens, o que o distingue dos demais métodos ou técnicas à disposição. Além disso, o método tem como objetivo minimizar a variância dos erros residuais existentes entre os valores estimados e observados (verdadeiros) para o mesmo ponto.

Assim, mapas e (ou) cartas geotécnicas provenientes de métodos de interpolação geoestatísticas, como a *krigeagem*, podem proporcionar resultados mais verossímeis e com valores menos discrepantes quando comparados com os valores verdadeiros (reais).

4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 - Análise dos parâmetros estatísticos básicos

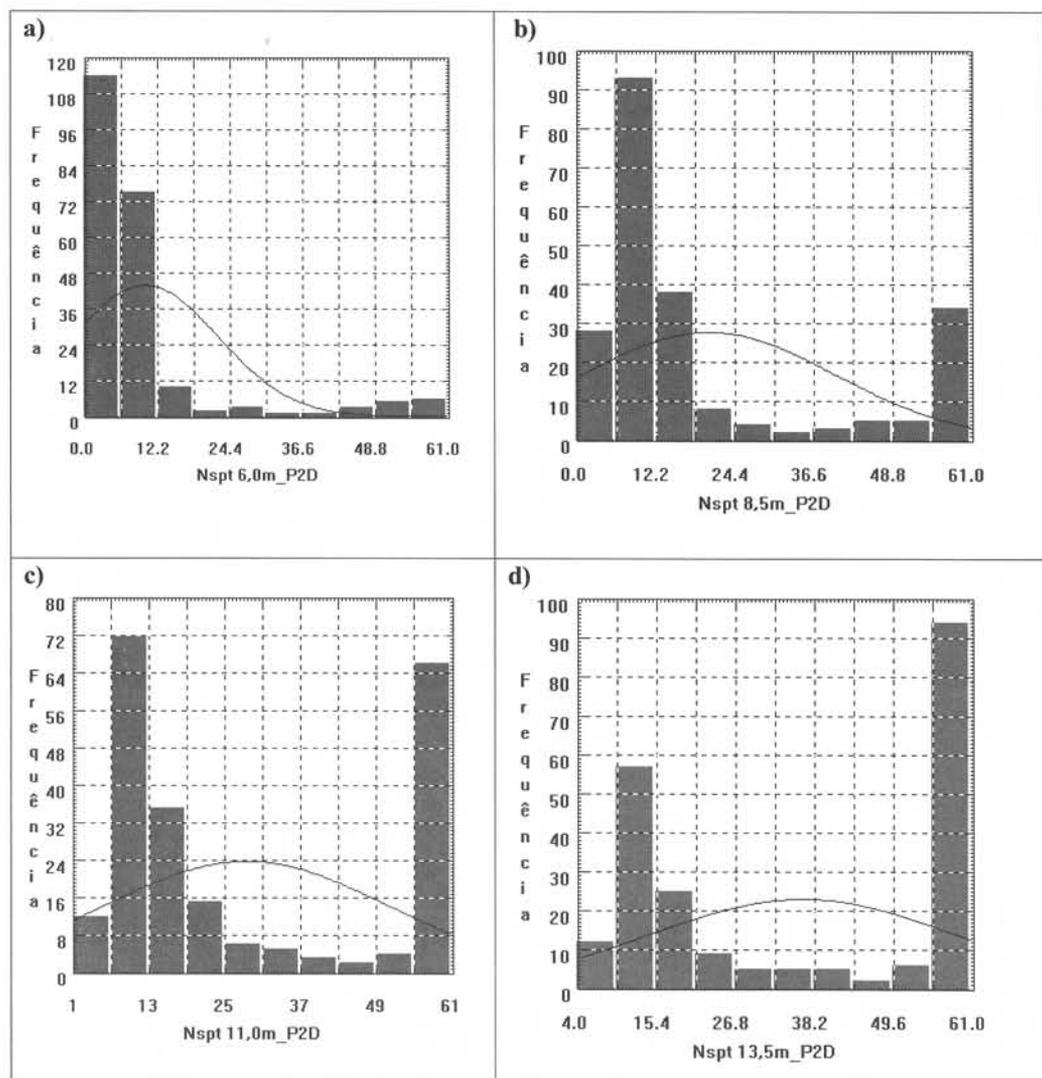
A análise iniciou-se com um estudo dos parâmetros estatísticos básicos para todas as sondagens SPT cadastradas no banco de dados, referentes ao índice de resistência à penetração (N_{SPT}). O objetivo era analisar uma eventual relação espacial global do índice de resistência à penetração do maciço de solos com a profundidade na área estudada.

A Tabela 1 e a Figura 9 mostram, respectivamente, os parâmetros estatísticos básicos e a distribuição de frequência relativa para todas as amostras do N_{SPT} , nas profundidades 6,0, 8,5, 11,0 e 13,5 metros, utilizados na análise global preliminar.

Tabela 1 - Parâmetros estatísticos básicos das amostras do índice de resistência à penetração (N_{SPT}).

Estatísticas Básicas	$N_{SPT} / 6,0m$	$N_{SPT} / 8,5m$	$N_{SPT} / 11,0m$	$N_{SPT} / 13,5m$
Número de amostras	241	241	241	241
Média	10,2	20,5	28,5	36,6
Desvio Padrão	12,3	19,5	22,3	21,9
Coefficiente de Variação	1,23	0,95	0,78	0,60
Valor Mínimo	2,0	2,0	3,0	6,0
Quartil Inferior	5,0	7,0	10,0	15,0
Mediana	6,0	10,5	15,0	35,0
Quartil Superior	9,0	21,5	50,0	60,0
Valor Máximo	60,0	60,0	60,0	60,0

Observando-se simultaneamente os dados da Tabela 1 com a distribuição de frequência da Figura 9, verifica-se uma certa assimetria na distribuição para as amostras mais superficiais (6,0 e 8,5 metros de profundidade). Nessas profundidades, as maiores concentrações dos valores N_{SPT} estão situadas nas classes de 2 a 12 e de 6 a 18, respectivamente.



na profundidade de 11,0 metros e de 35,0 (mediana) a 36,6 (média) na profundidade de 13,5 metros.

As amostras do N_{SPT} nas profundidades 11,0 e 13,5 metros apresentaram dispersões relativamente altas indicadas pelos coeficientes de variação, com os valores de 78 e 60%, respectivamente.

No entanto, quando se compara tais valores com os coeficientes de variação das demais amostras verifica-se que as amostras mais profundas (11,0 e 13,5 metros) possuem os menores valores para o coeficiente de variação.

Analisando todos os coeficientes de variação, observa-se uma certa tendência de diminuição desses valores a partir do aumento progressivo da profundidade das amostras do N_{SPT} . Associando essa tendência com o perfil de alteração do maciço de solos da área estudada, pode-se dizer que as camadas mais superficiais apresentam uma maior variabilidade geométrica espacial em relação aos perfis de solos mais profundos.

Além disso, nota-se um contínuo e progressivo aumento para os valores médios do índice de resistência relacionados diretamente com o aumento da profundidade analisada. Desta forma, espera-se que as camadas mais superficiais do solo tendam a apresentar uma resistência mais baixa em relação aos perfis mais profundos, que representam as camadas mais resistentes.

4.2 Análise variográfica

Após a realização da etapa de análise dos parâmetros estatísticos básicos, foram elaborados diversos variogramas experimentais para os valores do índice de resistência à penetração (N_{SPT}) e para as porcentagens de cada fração do solo (areia, silte e argila), tendo sido necessário realizar, preliminarmente, uma adequação quantitativa da classificação textural encontrada nos relatórios de sondagens, transformando-as em valores percentuais de cada fração do solo.

Para essa etapa de transformação utilizou-se a terminologia dos solos normalizada pela ABNT (NBR-7250/80, NBR-6484/79 e NBR-7181/84) e o Diagrama Triangular de Feret (Bueno & Vilar, 1995).

Na etapa de análise variográfica, foram efetuados estudos da variabilidade espacial nas direções 0°, 45°, 90°, e 135° para todas as amostras, obtendo-se desta forma seus respectivos variogramas experimentais. Verificou-se, também, a possibilidade de detectar visualmente os eixos de anisotropia das amostras analisadas a partir da análise variográfica de superfície. No entanto, em nenhuma profundidade se constatou comportamento anisotrópico para as amostras analisadas.

Consequentemente foram efetuados os ajustes desses variogramas experimentais através de modelos matemáticos de ajuste disponíveis no SIG-Spring-3.5. Na etapa de ajuste dos variogramas experimentais, o modelo mais adequado e, portanto, utilizado para todas as amostras analisadas foi o modelo do tipo exponencial com uma única estrutura.

Os parâmetros obtidos a partir dos modelos exponenciais ajustados para as amostras de N_{SPT} encontram-se na Tabela 2. Cabe ressaltar que as direções variográficas apresentadas na Tabela 2 e na Figura 10 representam as melhores direções utilizadas na análise espacial global das respectivas amostras, o que permitiu obter melhores ajustes para os variogramas experimentais. Além disso, todos os variogramas analisados apresentaram um bom comportamento isotrópico.

Tabela 2 - Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados.

Amostras	Direção variográfica	Efeito pepita	Patamar	Alcance (m)
N_{SPT} (6,0m)	90°	0,9	210	1355
N_{SPT} (8,5m)	45°	9,7	410	956
N_{SPT} (11,0m)	0°	318,8	190	606
N_{SPT} (13,5m)	0°	276,8	180	863

Na Fig. 10 são mostrados os variogramas experimentais das amostras do N_{SPT} e seus respectivos modelos matemáticos teóricos utilizados no processo de ajuste.

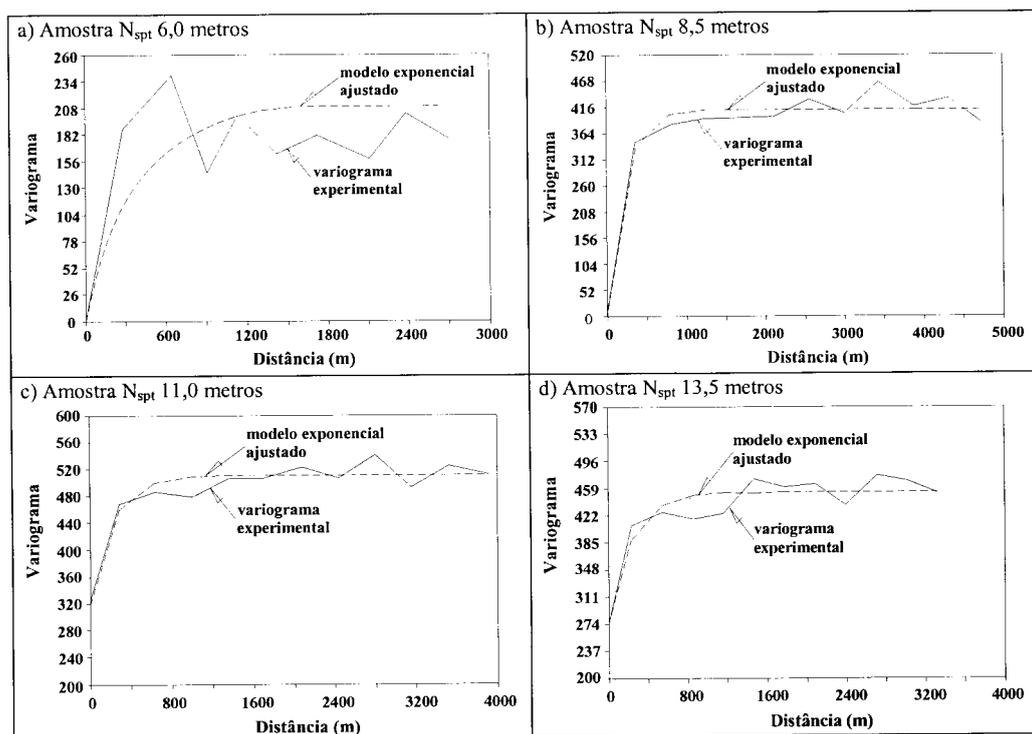


Figura 10: Variogramas experimentais para as amostras do N_{SPT} .

Observa-se que os variogramas experimentais das amostras do N_{SPT} nas profundidades 11,0 e 13,5 metros apresentaram maiores valores do efeito pepita em comparação com as amostras do N_{SPT} nas profundidades 6,0 e 8,5 metros. Porém, os variogramas experimentais das amostras do N_{SPT} nas profundidades 11,0 e 13,5 metros foram melhores ajustados pelos modelos exponenciais.

Para as demais amostras analisadas (porcentagem das frações areia, silte e argila do solo), utilizou-se o mesmo modelo matemático de ajuste, ou seja, o modelo exponencial. A Figura 11 mostra os principais variogramas experimentais das amostras da fração areia presente no maciço de solos, nas profundidades 6,0, 8,5, 11,0 e 13,5 metros, bem como seus respectivos modelos matemáticos teóricos utilizados no processo de ajuste.

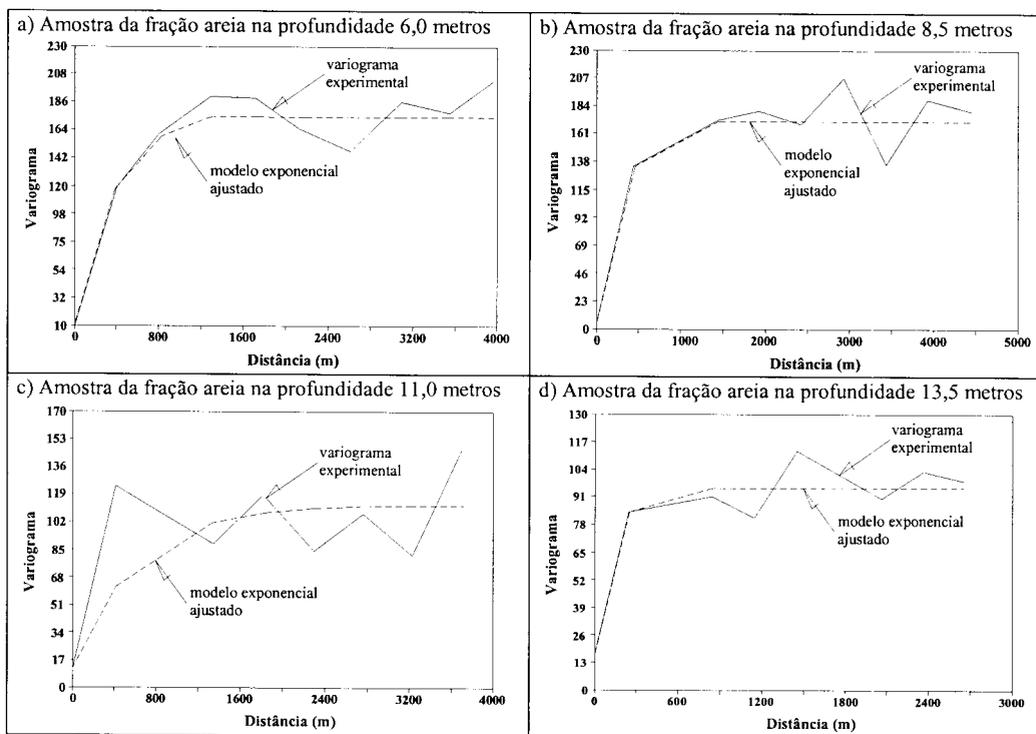


Figura 11 - Variogramas experimentais para as amostras da fração areia presente no solo.

Os parâmetros obtidos a partir dos modelos exponenciais ajustados, para as amostras da fração areia e demais frações de solos (silte + argila) presentes na área estudada, encontram-se na Tabela 3. As direções variográficas indicadas representam as melhores direções verificadas na análise espacial global dessas amostras, permitindo obter, conseqüentemente, os melhores ajustes para os variogramas experimentais analisados.

Tabela 3: Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados.

Amostras	Direção variográfica	Efeito pepita	Patamar	Alcance (m)
%Areia (6,0m)	90°	10,2	175	1207
%Areia (8,5m)	135°	6,4	171	1486
%Areia (11,0m)	135°	12,5	112	2224
%Areia (13,5m)	0°	16,7	95	848
%Silte (6,0m)	45°	0,7	118	1215
%Silte (8,5m)	45°	0,6	112	1090
%Silte (11,0m)	90°	0,9	94	990
%Silte (13,5m)	90°	1,2	78	965
%Argila (6,0m)	90°	0,9	189	1200
%Argila (8,5m)	45°	1,3	162	910
%Argila (11,0m)	90°	1,7	114	1315
%Argila (13,5m)	45°	2,1	70	1190

4.3 - Estimativas geoestatísticas

Após a etapa de ajuste de todos os variogramas experimentais utilizando-se modelos matemáticos, foram realizadas as estimativas geoestatísticas para todas as amostras envolvidas no estudo. Para as estimativas dos locais não amostrados, utilizou-se a *krigeagem* ordinária para interpolação (Deutsch & Journel, 1992), obtendo-se diversas grades numéricas regulares com resolução de saída de 10 x 10 metros, distribuídas em uma área de aproximadamente 49,2 km².

As grades numéricas de saída das amostras do índice de resistência à penetração (N_{SPT}) apresentaram seus valores variando de 5 a 60. As grades numéricas das amostras de solos referentes à porcentagem das frações areia, silte e argila tiveram seus valores variando em porcentagem de cada fração conforme critério adotado (NBRs da ABNT e Bueno & Vilar, 1995).

A eficiência e o grau de confiabilidade dos valores estimados pela técnica geoestatística da *krigeagem* ordinária foram verificados através de análise comparativa entre os valores medidos e estimados de algumas sondagens escolhidas aleatoriamente, com o objetivo de proporcionar uma avaliação quantitativa do erro residual associado aos valores estimados e medidos (verdadeiros), para os locais desprovidos de amostragem.

Analisando a Tabela 4, verifica-se que os erros residuais, representados pela diferença entre as amostras estimadas e medidas do N_{SPT} nas profundidades analisadas, são relativamente baixos.

Tabela 4 - Dados dos valores estimados e medidos das amostras nas profundidades 6,0 e 8,5 metros.

Amostras do N_{SPT} na profundidade de 6,0m					Amostras do N_{SPT} na profundidade de 8,5m				
Coord. Sistema UTM		Amostra	Amostra	Erro	Coord. Sistema UTM		Amostra	Amostra	Erro
E (m)	N (m)	Medida	Estimada	Residual	E (m)	N (m)	Medida	Estimada	Residual
667926	7696056	3,00	3,16	0,16	666707	7695990	7,00	7,57	0,57
667549	7695508	5,00	4,96	-0,04	671708	7698192	14,00	14,42	0,42
669887	7700908	7,00	6,74	-0,26	667492	7695613	45,00	44,07	-0,93
668480	7695582	5,00	4,59	-0,41	670235	7696693	10,00	11,30	1,30
672258	7698093	7,00	7,73	0,73	665515	7693760	10,00	8,42	-1,58
667128	7697192	5,00	5,05	0,05	667139	7695887	15,00	13,18	-1,82
667764	7695446	5,00	4,30	-0,70	670721	7700888	13,00	14,28	1,28
668175	7696794	9,00	8,57	-0,43	671062	7697868	5,00	6,11	1,11
671403	7696117	8,00	7,42	-0,58	665714	7696010	30,00	30,54	0,54
666327	7698818	5,00	5,91	0,91	667157	7693801	7,00	6,21	-0,79
663471	7697166	50,00	49,52	-0,48	668810	7694565	8,00	7,44	-0,56
667579	7695171	6,00	5,53	-0,47	668973	7702755	8,00	7,83	-0,17
667384	7701006	6,00	5,40	-0,60	670837	7700687	12,00	10,91	-1,09
668333	7695792	6,00	6,28	0,28	668538	7698005	8,00	9,24	1,24
667796	7696314	5,00	5,41	0,41	667672	7698303	12,00	11,19	-0,81

Comparando-se as amostras estimadas da Tabela 4 na profundidade de 6,0 metros, nota-se que os maiores erros residuais foram de +0,91 e de -0,70, ambos associados ao valor medido de 5,0 golpes.

Esses erros residuais, provenientes do processo de estimativa geostatística, proporcionaram a obtenção de amostras com valores super e subestimados da ordem de +18 e -14%, respectivamente.

Para as amostras estimadas do N_{SPT} na profundidade de 8,5 metros, obteve-se erros residuais mais elevados, da ordem de +1,30 e -1,82. No entanto, observa-se que os erros residuais para essas amostras estão relacionados com valores medidos do N_{SPT} de 10 e 15 golpes, respectivamente. Os erros residuais originados dessa estimativa proporcionaram a obtenção de amostras com valores super e subestimados da ordem de +13 e -12%, respectivamente.

Na Tabela 5 são mostrados os erros residuais das amostras estimadas nas profundidades de 11,0 e 13,5 metros. Nota-se nessa tabela que os maiores erros residuais provenientes da estimativa das amostras na profundidade de 11,0 metros foram de +3,07 e -3,02; ambos relacionados com valores medidos do N_{SPT} de 20 golpes, obtendo-se valores super e subestimados da ordem de $\pm 15\%$.

Tabela 5 - Dados dos valores estimados e medidos das amostras nas profundidades 11,0 e 13,5 metros.

Amostras do N_{SPT} na profundidade de 11,0m					Amostras do N_{SPT} na profundidade de 13,5m				
Coord. Sistema UTM		Amostra	Amostra	Erro	Coord. Sistema UTM		Amostra	Amostra	Erro
E (m)	N (m)	Medida	Estimada	Residual	E (m)	N (m)	Medida	Estimada	Residual
670254	7701050	19,00	19,56	0,56	667600	7696660	25,00	26,53	1,53
668185	7696618	18,00	16,56	-1,44	668722	7697690	60,00	58,54	-1,46
668353	7695663	25,00	25,29	0,29	669150	7698121	60,00	56,94	-3,06
670678	7696308	13,00	13,73	0,73	670427	7702279	45,00	45,93	0,93
670706	7699386	20,00	20,30	0,30	665568	7694712	60,00	55,98	-4,02
670839	7695012	20,00	16,98	-3,02	667199	7703416	25,00	26,20	1,20
670235	7696693	15,00	13,45	-1,55	669048	7696184	17,00	19,79	2,79
670129	7696384	10,00	10,98	0,98	667212	7697248	40,00	39,04	-0,96
668129	7702355	23,00	23,98	0,98	668833	7701043	50,00	54,18	4,18
670837	7700687	18,00	19,41	1,41	665514	7694629	60,00	57,92	-2,08
670222	7695897	12,00	12,14	0,14	668688	7698513	60,00	56,18	-3,82
666941	7696120	20,00	23,07	3,07	668973	7702755	50,00	49,84	-0,16
671688	7695918	15,00	18,00	3,00	668128	7702355	50,00	47,24	-2,76
666492	7696166	23,00	24,97	1,97	668538	7698004	60,00	58,94	-1,06
665102	7697564	18,00	19,62	1,62	666442	7694734	39,00	42,85	3,85

Os maiores erros residuais provenientes da estimativa das amostras na profundidade de 13,5 metros foram de +4,18 e -4,02; relacionados com valores medidos do N_{SPT} de 50 e 60 golpes, obtendo-se valores super e subestimados da ordem de +8 e -7%, respectivamente.

Sabe-se que a quantidade de sondagens utilizadas na avaliação dos valores medidos e estimados é relativamente pequena, aproximadamente 7% do universo total de amostras utilizadas na etapa de estimativa geostatística. Não obstante, espera-se que essa avaliação

possa contribuir para esclarecer algumas dúvidas quanto à eficiência do uso da *krigeagem* ordinária para interpolação na geoestatística.

No geral, as amostras estimadas pela técnica da *krigeagem* ordinária apresentaram: erro residual médio da ordem de 0,42 para um valor médio medido de 6,0 golpes (profundidade 6,0 metros); erro residual médio da ordem de 0,92 para um valor médio medido de 13,0 golpes (profundidade 8,5 metros); erro residual médio da ordem de 1,25 para um valor médio medido de 18,0 golpes (profundidade 11,0 metros) e erro residual médio da ordem de 2,41 para um valor médio medido de 34,0 golpes (profundidade 13,5 metros).

Pelo exposto, verifica-se que os valores dos erros residuais médios das amostras estimadas pela técnica da *krigeagem* ordinária são relativamente pequenos quando comparados com os valores reais médios dessas amostras.

4.4 - Elaboração dos mapas de resistências

Na elaboração dos mapas de resistências unitárias de ponta e lateral, foram utilizadas todas as grades numéricas obtidas pelo processo de estimativa geoestatística, conforme segue: a partir das grades numéricas de cada fração do solo (areia, silte, e argila), em porcentagem, foi realizada uma classificação textural em termos de nomenclatura segundo o critério adotado. Para isso, utilizou-se uma linguagem espacial de geoprocessamento algébrico implantada no SIG-Spring-3.5 (BRASIL-INPE, 2002). Utilizando-se essa linguagem espacial editou-se um programa em “operações Booleanas” no próprio ambiente Spring-3.5, gerado no formato ASCII. O programa permitiu transformar as grades numéricas de cada fração do solo (areia, silte e argila) em um único mapa temático de classificação textural do solo, em suas respectivas profundidades analisadas (Figura 12). As classificações texturais de solo obtidas na área estudada concentraram-se nos seguintes termos: areia silto-argilosa, areia argilosa, areia siltosa e, secundariamente, argila arenosa.

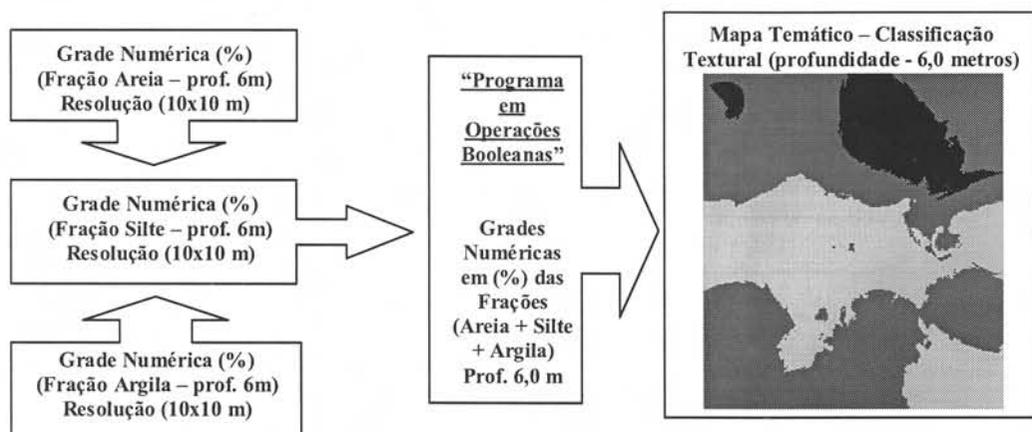


Figura 12 - Fluxograma utilizado para a obtenção do mapa de classificação textural.

Posteriormente, realizou-se uma atribuição de valores numéricos nos mapas temáticos de classificação textural do solo obtidos na etapa anterior, utilizando-se os valores dos coeficientes K e α propostos por Aoki & Velloso (1975). Os valores K e α dependem basicamente do tipo de solo (Tabela 6), podendo ser diretamente correlacionados a partir dos valores da resistência de ponta “ q_c ” de ensaios CPT e do índice de resistência à penetração

“ N_{SPT} ” de ensaios SPT. Dessa forma, obteve-se novas grades numéricas com os respectivos valores dos coeficientes K e α . Esses valores foram atribuídos pelo Spring-3.5 de maneira correspondente ao tipo de solo encontrado no mapa de classificação textural (por exemplo: areia siltosa – $K = 0,8$ e $\alpha = 2,0$).

Tabela 6 - Valores dos coeficientes K e α (Aoki & Velloso, 1975).

Tipo de solo	K (MPa)	α (%)
Areia	1,00	1,4
Areia siltosa	0,80	2,0
Areia silto-argilosa	0,70	2,4
Areia argilosa	0,60	3,0
Areia argilo-siltosa	0,50	2,8
Silte	0,40	3,0
Silte arenoso	0,55	2,2
Silte areno-argiloso	0,45	2,8
Silte argiloso	0,23	3,4
Silte argilo-arenoso	0,25	3,0
Argila	0,20	6,0
Argila arenosa	0,35	2,4
Argila areno-siltosa	0,30	2,8
Argila siltosa	0,22	4,0
Argila silto-arenosa	0,33	3,0

As grades numéricas contendo os valores K e α obtidas anteriormente, juntamente com as grades numéricas dos valores N_{SPT} , foram combinadas a partir da edição de um programa em operações matemáticas simples, disponível no ambiente Spring-3.5. A integração criteriosa dessas grades possibilitou a geração de novas grades numéricas, cujos valores de saída representaram as resistências unitárias de ponta e lateral. As operações matemáticas utilizadas na edição do programa para obtenção dos valores das grades numéricas de saída são fundamentadas nas fórmulas semi-empíricas propostas por Aoki & Velloso (1975), para as resistências unitárias de ponta (R_p) e lateral (R_L):

$$R_p = (K * N_{spt}) + F_1 \quad \text{e} \quad R_L = (K * \alpha * N_{spt}) + F_2 \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

Os valores F_1 e F_2 da equação 3 são coeficientes de minoração das resistências, devido principalmente às diferenças de comportamento das resistências entre os diversos tipos de estacas existentes. Esses valores são mostrados, a título informativo, na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores dos coeficientes F_1 e F_2 (Aoki & Velloso, 1975).

Tipo de estaca utilizada	F_1	F_2
Franki	2,50	5,00
Pré-moldada	1,75	3,50
Escavadas em geral	3,00	6,00
Escavadas (tubulão a céu aberto)*	4,50*	4,5 ou 5,0*

* Valores sugeridos por Aoki.

Deve-se ressaltar que tais coeficientes não foram levados em consideração para a geração das grades numéricas de saída, com o intuito de tornar possível a obtenção dos mapas das resistências unitárias para qualquer tipo de fundação profunda. No entanto, sabe-se que o emprego desses coeficientes proporciona uma certa limitação nos valores das resistências unitárias de ponta e lateral em aproximadamente 15MPa e 0,25MPa, respectivamente, conforme Vésic (1975), Décourt (1982), Coyle & Castello (1981) e Gomez et al (1988). Desta maneira, as grades numéricas de saída das resistências unitárias de ponta (R_p) e lateral (R_L) foram respectivamente obtidas a partir da multiplicação simples ou produto das grades numéricas contendo os valores K e N_{SPT} e os valores K , α e N_{SPT} .

Após a obtenção das grades numéricas das resistências de ponta (R_p) e lateral (R_L) unitárias, foram elaborados os respectivos mapas de resistências a partir do fatiamento dessas grades em intervalos de valores previamente definidos, denominados “classes temáticas” ou “fatias”. Essas fatias foram definidas conforme variação encontrada para os valores máximos e mínimos das grades numéricas das resistências. Os valores das classes temáticas ou fatias foram estabelecidos em intervalos de 0,1 MPa para os mapas temáticos da resistência lateral e em passos de 5 MPa para os mapas temáticos da resistência de ponta.

4.5 - Análise e discussão dos mapas de resistências

Analisando a Tabela 8 verifica-se, para a resistência lateral unitária, a ocorrência da classe 0,1 a 0,2 MPa (75,7% da área estudada) na profundidade 6,0 metros, das classes 0,2 a 0,4 MPa (64,7% da área estudada) na profundidade 8,5 metros, das classes 0,3 a 0,6 MPa (63,4% da área estudada) na profundidade 11,0 metros e das classes 0,4 a 0,7 MPa (69,0% da área estudada) relacionadas com a profundidade 13,5 metros.

Tabela 8 - Distribuição das classes dos mapas da resistência lateral unitária.

Classes (MPa)	R_L 6,0m Área (km ²)	R_L 8,5m Área (km ²)	R_L 11,0m Área (km ²)	R_L 13,5m Área (km ²)
0,0 - 0,1	3,03	0,11	0,00	0,00
0,1 - 0,2	37,24	4,79	1,23	0,00
0,2 - 0,3	5,98	16,02	5,75	0,46
0,3 - 0,4	1,88	15,80	11,34	3,97
0,4 - 0,5	0,67	6,86	12,07	11,62
0,5 - 0,6	0,27	2,74	7,80	13,47
0,6 - 0,7	0,11	1,50	7,74	8,85
0,7 - 0,8	0,02	0,80	2,66	5,95
0,8 - 0,9	0,00	0,40	0,61	4,24
0,9 - 1,0	0,00	0,18	0,00	0,64
Total	49,20	49,20	49,20	49,20

Tomando-se os valores situados entre 0,4 a 0,5 MPa como uma média das classes atribuídas à resistência lateral unitária, têm-se para essa classe a ocorrência de 1,4% da área estudada relativa à profundidade 6,0 metros, 13,9% da área relativa à profundidade 8,5 metros, 24,5% da área relacionada com a profundidade 11,0 metros e 23,6% da área pertencente à

profundidade de 13,5 metros, evidenciando desta forma a maior ocorrência desses valores nas profundidades 11,0 e 13,5 metros.

Esse comportamento pode ser mais bem visualizado através de uma análise da distribuição espacial dos mapas da resistência lateral unitária, conforme mostrado na Figura 13 para as profundidades de 6,0, 8,5, 11,0 e 13,5 metros.

Na Figura 13a (6,0 metros) as ocorrências das maiores resistências estão situadas principalmente nas regiões sudoeste e nordeste, ocorrendo a mesma distribuição para o mapa da Fig. 13b (8,5 metros). As ocorrências das maiores resistências nos mapas das Figuras 13c e 13d (11,0 e 13,5 metros, respectivamente), estão localizadas predominantemente nas regiões norte, leste e centro-norte e, secundariamente, nas porções sudoeste da área estudada.

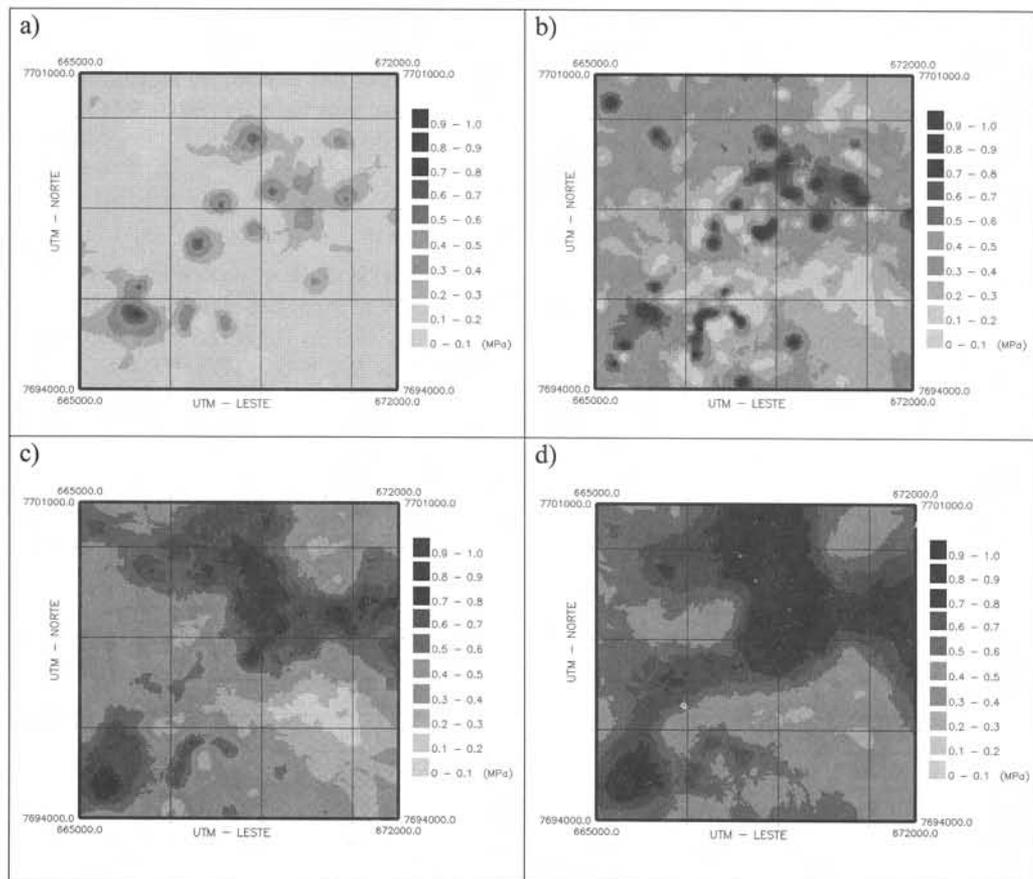


Figura 13: Mapas das resistências unitárias laterais estimadas pela krigagem ordinária nas profundidades: 6,0 metros (a); 8,5 metros (b); 11,0 metros (c) e 13,5 metros (d).

A Tabela 9 mostra a distribuição das classes de resistência unitária de ponta, predominando a ocorrência da classe 0 a 10 MPa (90,6% da área estudada) relacionada com a profundidade 6,0 metros, das classes 5 a 15 MPa (66,2% da área estudada) relacionadas com a profundidade 8,5 metros, das classes 10 a 25 MPa (64,9% da área estudada) relativas à profundidade 11,0 metros e das classes 15 a 30 MPa (61,1% da área estudada) relacionadas com a profundidade 13,5 metros.

Tabela 9 - Distribuição das classes dos mapas da resistência unitária de ponta.

Classes (MPa)	Rp 6,0m Área (km²)	Rp 8,5m Área (km²)	Rp 11,0m Área (km²)	Rp 13,5m Área (km²)
0 - 5	18,45	0,46	0,00	0,00
5 - 10	26,10	13,60	1,96	0,00
10 - 15	3,41	18,95	9,36	0,87
15 - 20	0,86	9,84	11,43	6,46
20 - 25	0,23	3,36	11,15	11,30
25 - 30	0,10	1,73	8,00	12,28
30 - 35	0,05	0,82	4,97	8,80
35 - 40	0,00	0,39	1,82	5,15
40 - 45	0,00	0,05	0,51	3,68
> 45	0,00	0,00	0,00	0,66
Total	49,20	49,20	49,20	49,20

Considerando-se os valores entre 20 a 25 MPa como uma média das classes atribuídas à resistência unitária de ponta, verifica-se para essa classe a ocorrência de 0,5% da área estudada correspondente à profundidade 6,0 metros, 6,8% da área relativa à profundidade 8,5 metros, 22,7% da área relacionada com a profundidade 11,0 metros e 23,0% da área pertencente à profundidade 13,5 metros, evidenciando a predominância desses valores nas profundidades 11,0 e 13,5 metros.

Analisando o comportamento da distribuição espacial dos mapas da resistência unitária de ponta através da Figura. 14 nas profundidades 6,0, 8,5, 11,0 e 13,5 metros, pode-se observar a localização espacial das diversas classes de resistência.

Nas Figuras. 14a e 14b (6,0 e 8,5 metros, respectivamente) as ocorrências das maiores resistências estão situadas principalmente nas regiões sudoeste e nordeste, seguindo praticamente a mesma distribuição espacial da resistência unitária lateral, embora com uma ocorrência inferior à observada naqueles mapas. As ocorrências das maiores resistências no mapa da Figura 14c (11,0 metros), estão situadas, predominantemente, na região centro-norte e, secundariamente, nas porções leste e sudoeste.

No mapa da Figura 14d (13,5 metros), as maiores resistências surgem principalmente nas porções norte, centro-norte e leste e, secundariamente, na porção sudoeste da área estudada.

Analisando simultaneamente os mapas das resistências unitárias de ponta e lateral, nas profundidades 6,0 e 8,5 metros, verifica-se a ocorrência de maciços de solos com elevadas capacidades resistentes, predominando principalmente na região centro-norte e, secundariamente, na região sudoeste da área estudada.

Realizando essa mesma análise nas profundidades 11,0 e 13,5 metros, nota-se a ocorrência das maiores capacidades resistentes nas porções centro-norte, leste e sudoeste nos primeiros 11,0 metros de profundidade, e nas porções norte, centro-norte, leste e sudoeste na profundidade de 13,5 metros.

Contudo, observa-se um expressivo aumento de regiões com ocorrências de resistências elevadas a partir de 11, 0 metros de profundidade, tanto para a resistência de ponta como para a resistência lateral unitária, estendendo-se até a profundidade de 13,5 metros.

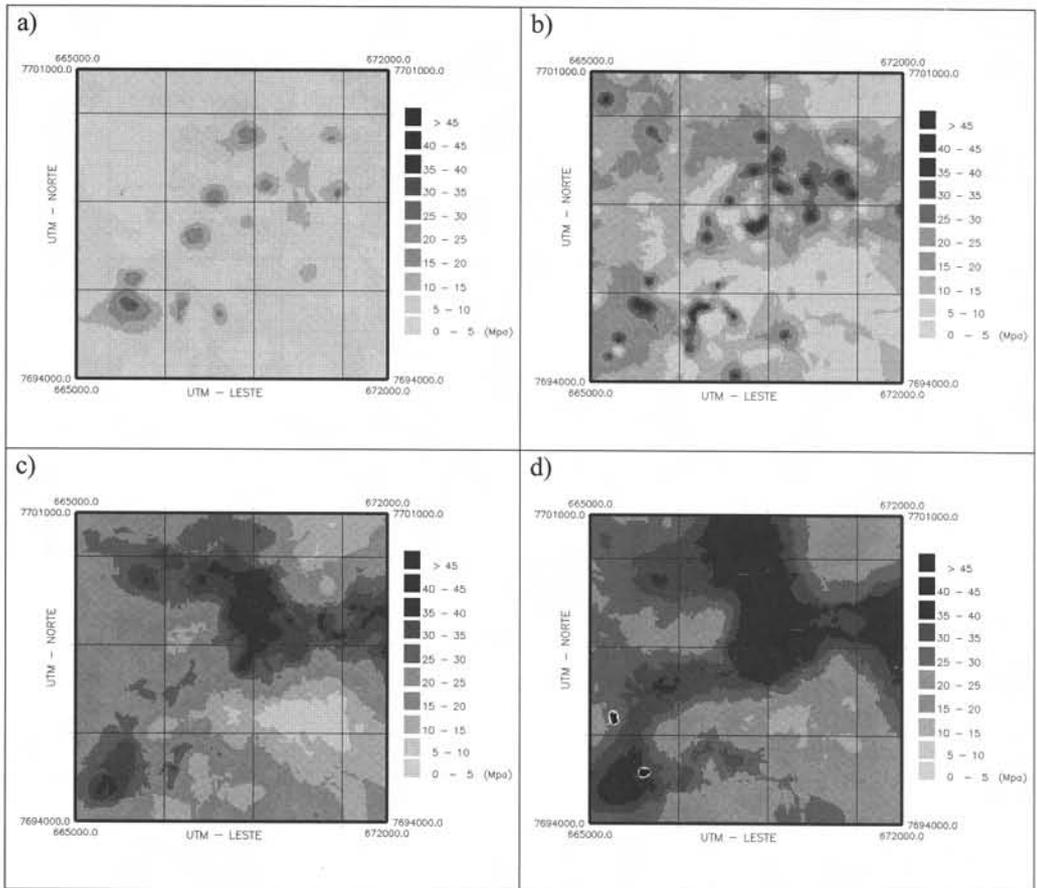


Figura 14 - Mapas da resistência unitária de ponta estimados pela krigeagem ordinária nas profundidades 6,0 metros (a); 8,5 metros (b); 11,0 metros (c) e 13,5 metros (d).

Com o propósito de indicar algumas regiões da área estudada que possam atender às necessidades preliminares de projetos de fundações profundas, principalmente como instrumento de orientação da variabilidade espacial geométrica da superfície de apoio dessas fundações, mostra-se nas Figuras 15a e 15b, respectivamente, a foto aérea e o mapa da resistência lateral unitária.

Observa-se na Figura 15b a ocorrência de elevada resistência lateral representada pelas classes de 0,4 a 0,8 MPa (tonalidades de cinza mais escuro) nas porções centro-sul e norte e a ocorrência de baixa resistência lateral unitária, representado pelas classes de 0,1 a 0,4 MPa (tonalidades de cinza claro), difundida nos setores norte, noroeste, sul, sudoeste e nordeste.

Nessa região da área estudada está indicada a ocorrência de alta resistência lateral na profundidade 6,0 metros, que pode conferir uma elevada parcela de carga por atrito lateral ao longo do fuste em projetos de fundações profundas elaborados para essa região, dependendo do tipo de elemento estrutural de fundação considerado.

A ocorrência de elevada resistência lateral nas porções descritas anteriormente, coincide com setores próximos a essas regiões (porção centro-oeste e sul), constituídos por baixa taxa de ocupação do solo (Figura 15a) mas estando sujeitos, posteriormente, à implantação de novas construções.

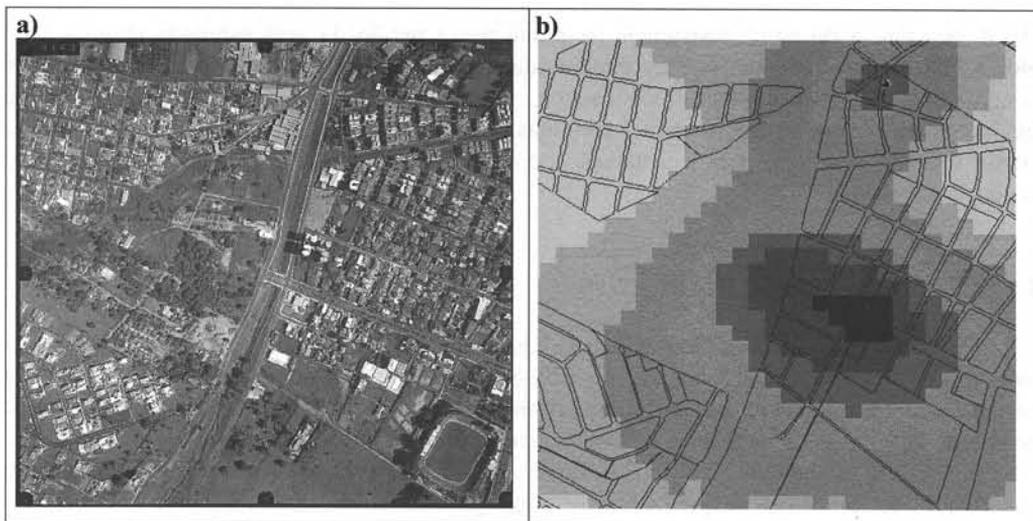


Figura 15 - (a) Foto aérea (BASE, 2001) de algumas regiões da área estudada; (b) Mapa da resistência unitária lateral na profundidade 6,0m.

Nas Figuras 16a e 16b são mostrados, respectivamente, a foto aérea e o mapa da resistência unitária de ponta na profundidade 13,5 metros de uma região da área estudada.

A Figura 16b indica a ocorrência de baixa resistência unitária de ponta, representada pelas classes de 10 a 15 MPa (tonalidades de cinza claro), concentrada na porção central, enquanto que a ocorrência de resistência de ponta ligeiramente superior, representada pelas classes de 15 a 20 MPa (tonalidades de cinza mais escuro), surge nas demais regiões da respectiva figura.

Nessa região está indicada a ocorrência de baixa resistência de ponta na profundidade 13,5 metros, que pode proporcionar uma baixa parcela de capacidade de carga sob a ponta das fundações profundas, em projetos elaborados para essa região, dependendo do tipo de elemento estrutural de fundação considerado.

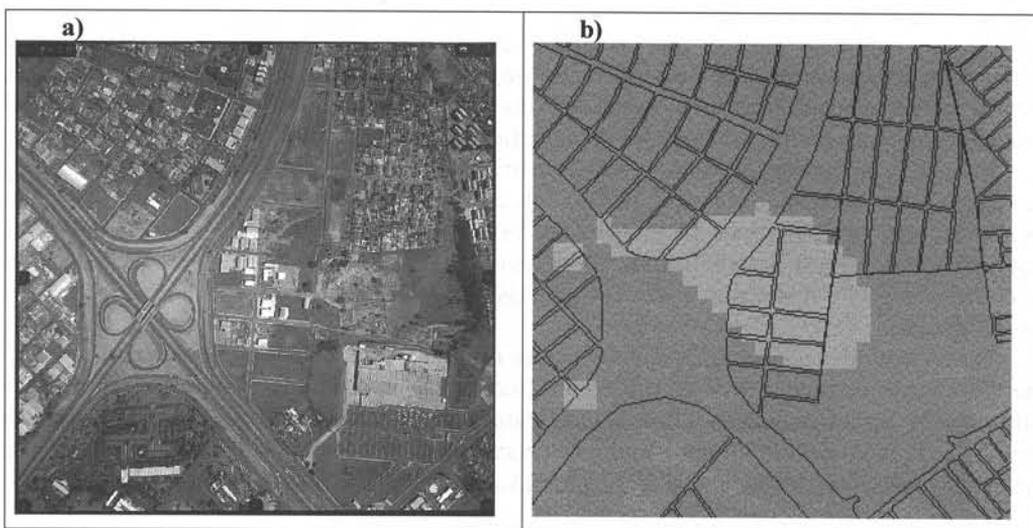


Figura 16 - (a) Foto aérea (BASE, 2001) de algumas regiões da área estudada; (b) Mapa da resistência unitária de ponta na profundidade 13,5m.

A ocorrência de baixa resistência de ponta nessa região da área estudada (Figura 16a) indica, probabilisticamente, regiões constituídas por maciço de solos de baixa resistência de ponta acima da profundidade 13,5 metros, prevendo a necessidade de implantação de fundações em cotas de apoio mais profundas. Observa-se, também, que a referida região possui um alto potencial para a instalação de novas construções, devido sua baixa taxa de ocupação do solo.

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) providos de recursos geoestatísticos, como o módulo de geoestatística implantado no SIG-Spring-3.5, constituem-se em uma ferramenta bastante poderosa, uma vez que permitem estimar diversos tipos de variáveis no espaço a partir de interpolação baseada na técnica da *krigeagem* ordinária.

No entanto, dependendo do tipo da variável a ser estimada, do seu arranjo espacial e da quantidade de amostras disponíveis, métodos geoestatísticos lineares, como *krigeagem* ordinária, devem ser utilizados criteriosamente para que não forneçam valores discrepantes.

As análises variográficas realizadas para as amostras do N_{SPT} constataram valores elevados do efeito pepita nas profundidades 11,0 e 13,5 metros. Esses valores elevados podem estar, de certa forma, associados a prováveis erros de amostragem ou de medida, possibilitando mostrar a casualidade dos resultados do ensaio de penetração dinâmica (SPT). Para as demais amostras analisadas (porcentagem das frações areia, silte e argila do solo), os valores do efeito de pepita mantiveram-se relativamente baixos durante todo o processo de análise variográfica.

A avaliação quantitativa das grades numéricas geradas pela técnica da *krigeagem* ordinária, associadas aos valores estimados do N_{SPT} , permitiu constatar que os erros residuais médios foram pequenos, da ordem de 7% em relação aos seus valores médios reais (medidos), apesar da reduzida quantidade de amostras utilizadas na referida avaliação.

As pequenas diferenças existentes entre os valores medidos e os estimados (erros), conferem aos mapas gerados uma boa qualidade sob os aspectos da eficiência do interpolador, permitindo fornecer informações confiáveis do meio físico urbano, principalmente com relação aos projetos de fundações profundas.

Neste sentido, acredita-se que os mapas das resistências unitárias de ponta e lateral, elaborados no presente trabalho a partir da *krigeagem* ordinária, possibilitem aos engenheiros e projetistas geotécnicos analisarem a ocupação do maciço de solos da área estudada, utilizando-os como indicador preliminar da provável superfície de apoio de fundações profundas.

Em certas circunstâncias, podem servir de orientação na etapa de escolha e indicar regiões do meio físico urbano que atendam, ou não, aos critérios inerentes à implantação de fundações profundas nos diversos tipos de construções civis. Para esse fim pode ser realizada uma estimativa, em termos probabilísticos, da capacidade de carga de alguns tipos de fundações profundas a partir dos valores das resistências unitárias de ponta e lateral em diversas profundidades.

No entanto, deve-se ressaltar que os mapas resultantes da metodologia geoestatística têm por finalidade orientar a investigação geotécnica local, procurando diminuir o número de situações a serem estudadas. Em alguns casos, tais mapas podem eliminar passos na investigação local devido à impossibilidade de se adotar, em determinadas regiões, fundações profundas apoiadas em camada de solos que não atendam às condições mínimas de projetos.

6 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da Bolsa de Mestrado ao primeiro autor.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. (1979). *Sondagens de simples reconhecimento dos solos*. NBR-6484 (antiga MB-1211), Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT. (1980). *Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento*. NBR-7250 (antiga MB-617), Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT. (1984). *Solo – Análise granulométrica*. NBR-7181 (antiga MB-32), Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Aoki, N. & Velloso, D.A. (1975). *An approximate method to estimate the bearing capacity of piles*. In: Proc. of 5th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires, vol.1, pp. 367-376.
- Augusto Filho, O.; Ridente Jr., J.L. & Alves, C.F.C. (1999). *Compartimentação geotécnica da área urbana do município de São José do Rio Preto (SP) com base na generalização espacial de dados de sondagens a percussão*. In: Anais do 9^o Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Águas de São Pedro: ABGE, pp.1-14.
- Barcha, S. F. (1980). Aspectos Geológicos e Províncias Hidrogeológicas da Formação Bauru na Região Norte-ocidental do Estado de São Paulo. (Tese de Livre Docência), 212p., Departamento de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, São José do Rio Preto.
- BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, (2001). *Fotografias aéreas (escala original 1:20.000)*. São José do Rio Preto (São Paulo): BASE, n.º 3 CD.
- Berezantzev, V.G. & Yaroshenko, V.A., (1957). *The bearing capacity of sands under deep foundations*. In: Proc. of 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engng., London, vol.1, pp. 283-286.
- BRASIL – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / INPE, (1999). *Curso de introdução ao SPRING-3.5*. São José dos Campos: Divisão de Processamento de Imagem/INPE (Brasil), 176p. Apostila.
- BRASIL – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / INPE (2002). *Curso de Análise Espacial – Linguagem Espacial de Geoprocessamento Algébrico (LEGAL): operações de análise geográfica*. URL: <http://www.dpi.inpe.br/spring/cursos>. Consultado em 15/05/2002.
- Bueno, B.S. & Vilar, O.M., 1995. *Mecânica dos Solos*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – USP, vol. 1, 131p.
- Coyle, H.M. & Castello, R.R. (1981). *New design correlations for piles*. Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol.107, n.º GT7, pp. 965-986.
- Décourt, L. & Quaresma, A.R. (1978). *Capacidade de estacas a partir de valores de SPT*. In: Anais do 6^o Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 6^o, Rio de Janeiro, pp. 45-53.
- Décourt, L. (1982). *Prediction of the bearing capacity of piles based exclusively on N values of the SPT*. In: Proc. of 2nd ESOPT, Amsterdam, pp. 19-34.
- Deutsch, C. V. & Journel, A. G. (1992). *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York, pp. 339.

- Gomez, O.I.; Compagnucci, D.J. e Garcia, H.D.,(1988). *Pilotes cortos hincados en grava*. In: Anais do 10º Congresso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, La Plata, vol.2, pp. 186-200.
- Huijbregts, C.J. (1975). *Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data*. In: Display and analysis of spatial data. Edited by Davis, J.C., Mc. Cullagh, M. J. John Wiley, New York.
- Journel, A. (1989). *Fundamentals of geostatistics in five lessons*, vol. 8, Short Course in Geology, American Geophysical Union, Washington, D.C.
- Matheron, G. (1971). *The Theory of Regionalized Variables and its Applications*. Paris, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique de Fontainebleu, 211p.
- Mendes, R. M. (2001). *Mapeamento Geotécnico da Área Central Urbana de São José do Rio Preto (SP) na Escala 1:10.000 como Subsídio ao Planejamento Urbano*. Dissertação de Mestrado, 245p., Departamento de Engenharia Civil – UFSCar, São Carlos.
- Meyerhof, G.G. (1976). *Bearing capacity and settlements of pile foundations*. Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol.102, n.º GT3, pp. 195-228.
- Poulos, H.G. & Davis, E.H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*. John Wiley and Sons.
- Silva, P.A.B.A. (1996). *Capacidade de Carga de Grupos de Estacas Escavadas de Pequeno Diâmetro*. Dissertação de Mestrado, 123p., Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos.
- Stephan, A.M.; Minette, E.; Lopes, G.S. & Bueno, B.S. (1998). *Prova de carga estática em estacas: comparação com os métodos de previsão de capacidade de carga*. In: Anais do 11º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília, vol.3, pp. 1423-1430.
- Sturaro, J.R.; Landim, P.M.B. (1996). *Mapeamento geoestatístico de ensaios de penetração padronizada (SPT)*. In: Revista solos e rochas. São Paulo: ABMS/ABGE, vol.19 (1), pp.03-14.
- Sturaro, J.R.; Landim, P.M.B.; Riedel, P.S. (2000). *O emprego da técnica geoestatística da krigeagem indicativa em geotecnia ambiental*. In: Revista solos e rochas. São Paulo: ABMS/ABGE, vol.23 (3), pp.157-164.
- Teixeira, C.Z. (1997). *Capacidade de Carga de Sapatas, Estacas de Pequeno Diâmetro e Tubulões Curtos em Função do SPT: um Estudo em Solos Residuais de Gnaisses para a Região Sul de Minas Gerais*. Tese de Doutorado, 272p., Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos.
- Velloso, D.A. (1991). *Capacidade de carga por meio do SPT*. In: Anais do Seminário de Engenharia de Fundações Especiais, 2º, São Paulo, vol.2, pp. 293-312.
- Vésic, A.S. (1967). *A study of bearing capacity of deep foundations*. Final Report, Project B-189, Georgia Institute of Technology, pp. 16 and 164, Atlanta, Georgia.
- Vesic, A. S. (1975). *Ultimate loads and settlements of deep foundations in sand*. Proc. of International Symposium on Bearing Capacity and Settlements of Foundations, pp. 53-68, Duke University, Durham, North Carolina.