Voltar ao menú principal

MAPEAMENTO DO SUBSOLO UTILIZANDO TÉCNICAS DE MODELAGEM DIGITAL DE TERRENO DO CAMPUS DA UNICAMP – CAMPINAS - BRASIL

MAPPING SUBSOIL USING TECHNIQUES OF DIGITAL TERRAIN MODEL AT THE CAMPUS OF UNICAMP – CAMPINAS - BRASIL

Ochi, Vanessa Tieme, *UNICAMP*, Campinas, Brasil, *vtochi@yahoo.com.br*
Françoso, Maria Teresa, *UNICAMP*, Campinas, Brasil, *mteresa@fec.unicamp.br*
Albuquerque, Paulo José Rocha de, *UNICAMP*, Campinas, Brasil, *pjra@fec.unicamp.br*

RESUMO

Esta pesquisa explorou as técnicas de modelagem digital de terrenos na representação conjunta da superfície e subsolo. Como estudo de caso, empregaram-se as sondagens disponíveis em todo o Campus da Universidade Estadual de Campinas - Unicamp (São Paulo, Brasil) e do Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações existente nesta instituição. Os modelos digitais da superfície provêm das curvas de nível da base cartográfica digital georeferenciada e o modelo digital do subsolo das informações obtidas das sondagens. Para o Campo Experimental, foram geradas superfícies com os valores de Nspt. As avaliações da precisão e exatidão dos modelos digitais utilizaram os conceitos da estatística e o Padrão de Exatidão Cartográfica do Decreto Lei n° 89.817 de junho de 1984. Pode-se concluir que as superfícies digitais possibilitaram análises quanto às disposições e localizações das camadas de solo do campus, devido à facilidade de geração de perfis longitudinais ou transversais de qualquer região da malha triangular.

ABSTRACT

This research explored the techniques of digital terrain modeling representing surface and subsoil together. As a study of case, soundings of data at the campus of State University of Campinas - Unicamp (Sao Paulo, Brazil) and Experimental Field of Soil Mechanics and Foundations, were used. The digital surface models come from the contour curves of the georeferenced digital cartographic base and the digital subsoil model was created from the soundings information. For the Experimental Field, surfaces with the values of Nspt were generated. The evaluation of the precision and exactness of the digital models were verified applying concepts of statistics and Cartographic Exactness Standard of Decree Law n° 89,817 of June 1984. One can conclude that the digital surfaces made it is possible to analyses the position and localization of the soil layers at the campus, due to the facility in generating longitudinal or transversal profiles of any region of the triangular mesh.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico tem automatizado muito o estudo da topografia. Em função disso e com o advento da computação gráfica, a modelagem digital de terrenos recebeu uma grande importância na representação tridimensional da superfície. Fazendo-se uma analogia desta técnica, onde as cotas altimétricas obtidas da superfície do terreno são empregadas na representação do relevo, procurou-se representar cada camada de solo utilizando os dados de sondagens, pois existe uma grande dificuldade entre os profissionais da área de geotecnia em representar tridimensionalmente o subsolo. Normalmente, não se conhecem as coordenadas dos

pontos de sondagens e representam-se os perfis do subsolo com as informações isoladas, onde estas são extrapoladas para todo o terreno. Além disso, conhecer a variação do SPT de acordo com as coordenadas x, y e z do terreno pode auxiliar na escolha adequada da fundação, determinação das pressões admissíveis no terreno e das cotas de assentamento das fundações.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Modelo digital do terreno

A modelagem digital do terreno constitui-se na representação gráfica da variação de uma determinada característica do terreno (Cintra et al,1991). No presente trabalho esta característica está baseada na altimetria e no estudo dos perfis de sondagens. A geração dos modelos digitais está, basicamente, dividida em três etapas:

a) *Aquisição das amostras ou amostragens:* Corresponde a coleta de pontos da superfície da região onde se irá trabalhar. Este processo pode ser realizado por levantamento de campo, digitalização de mapas, dados adquiridos por sistema de posicionamento por satélite – GPS, sensoriamento remoto, produtos obtidos por levantamento aerofotogramétricos – Restituição digital etc.

b) *Geração do modelo:* A geração dos modelos pode utilizar vários métodos de interpolação: global que gera um modelo digital único com todas as informações da região estudada; local, na qual se divide o terreno em setores de modo a cobrir toda área mapeada e pontual (Cintra, 1988).

c) *Utilização ou aplicação do modelo digital:* Pode ser utilizado para construções de curvas de nível, perfis longitudinais e seções transversais, cálculo de volume etc.

2.2 Prospecção do subsolo

Para a elaboração de projetos de engenharia o reconhecimento do subsolo é extremamente importante, pois orienta a escolha da solução ou tratamento a ser adotado, permitindo a escolha da fundação mais adequada, a determinação das pressões admissíveis no terreno e das cotas de assentamento das fundações profundas.

O subsolo da região estudada é formado por magmatitos básicos, ocorrendo rochas intrusivas básicas (Diabásios) da Formação Serra Geral, que faz parte do Grupo São Bento. Tem-se que a camada superficial é formada por um solo maduro o qual sofreu intenso processo de intemperização, onde o fenômeno da lixiviação pode explicar a porosidade, devido ao carreamento dos finos para o horizonte mais profundo. A segunda camada é formada por um solo residual jovem, que conserva características herdadas da rocha de origem.

2.3 Exatidão dos modelos digitais e bases cartográficas

Sabe-se que um modelo digital absolutamente preciso não existe, pois este depende de várias considerações durante sua elaboração, dados de entrada empregados e o processo matemático utilizado na geração das superfícies. Muitos estudos sobre modelagem digital de terrenos são desenvolvidos para atingir a precisão desejada de acordo com sua necessidade de aplicação, principalmente, na Engenharia Civil.

A estatística de dispersão pode ser utilizada para avaliar a qualidade dos modelos digitais gerados. Segundo Petrie e Kennie (1991), a acurácia dos modelos digitais pode ser alcançada comparando as alturas derivadas dos modelos digitais com as respectivas alturas do terreno obtidas tanto por levantamento de campo como aerofotogramétrico.

A exatidão da cartografia digital, segundo Siqueira (2003), é função de vários fatores como: câmara aerofotogramétrica, filme utilizado no aerolevantamento, processo de revelação e digitalização do produto, apoio terrestre e restituição. Como a modelagem digital da superfície do terreno do campus provém da restituição digital obtida a partir do aerolevantamento realizado em 2001, utilizou-se o Decreto Lei n° 89.817 de junho de 1984 – "Normas Técnicas da Cartografia Nacional" para estimar a exatidão dos mesmos, a saber:

Art. 8° Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC - Altimétrico - estabelecido.

§1º Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos.
§2º A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão - PEC = 1,6449 EP.
§3º O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.
§4º Para efeito das presentes Instruções, consideram-se equivalentes às expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático.

Art.9º As cartas, segundo sua exatidão, são classificadas nas Classes A, B e C, segundo os seguintes critérios:

Classe A – Padrão de Exatidão Cartográfica – Altimétrico: metade da eqüidistância entre as curvas de nível, sendo de um terço desta eqüidistância o Erro-Padrão correspondente.
Classe B – Padrão de Exatidão Cartográfica – Altimétrico: três quintos da eqüidistância entre as curvas de nível, sendo de dois quintos o Erro-Padrão correspondente.
Classe C – Padrão de Exatidão Cartográfica – Altimétrico: três quartos da eqüidistância entre as curvas de nível, sendo de metade desta eqüidistância o Erro-Padrão correspondente.

3. ESTUDO DE CASO – CAMPUS DA UNICAMP

Como estudo de caso, utilizaram-se os dados de sondagens fornecidos pela prefeitura do campus e do Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Unicamp. Para o desenvolvimento desta pesquisa utilizou-se o programa Autodesk Land Desktop, o qual oferece recursos e funcionalidades especiais para a topografia, engenharia civil e planejamento urbano.

A pesquisa consistiu em modelar e verificar a precisão e exatidão da superfície do terreno, localizar os perfis de sondagens na base cartográfica digital georeferenciada utilizando as altitudes do modelo digital da superfície, modelar e verificar a precisão das localizações das camadas de solos do campus. Posteriormente, para os perfis de sondagens do Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações foram geradas superfícies com os valores de SPT, já que esta região é bem caracterizada geotecnicamente, conforme a figura 1.

Para facilitar a análise dos dados optou-se em dividir a área do campus em 11 setores (setores de **A** a **K**), representados na figura 2.

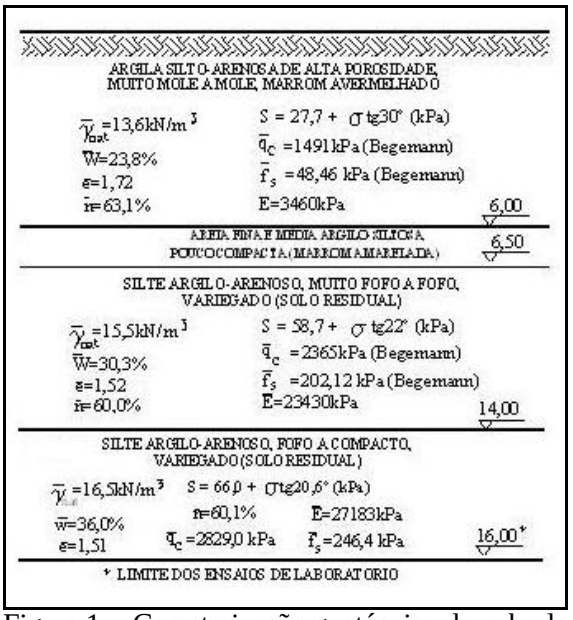


Figura 1 – Caracterização geotécnica do subsolo

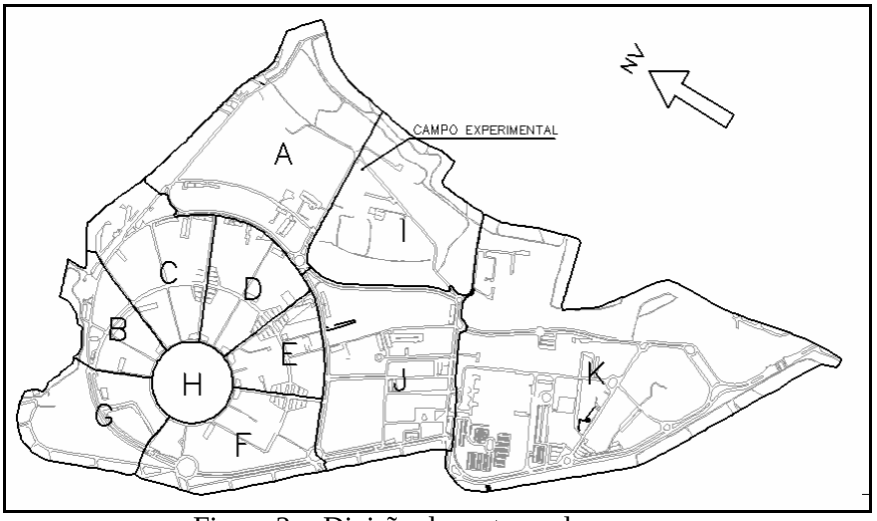


Figura 2 – Divisão dos setores do campus

3.1 Elaboração dos modelos digitais

3.1.1 Superfície

Os dados da superfície foram adquiridos da restituição do levantamento aerofotogramétrico realizado em 2002 no campus da Unicamp. Da base cartográfica digital foram extraídas as curvas de nível, pontos de controle com as altitudes e os meio-fios das vias.

Na geração dos modelos digitais da superfície do terreno foram utilizadas curvas de nível. Optou-se pela utilização de interpolações locais de cada setor, pois o software estava gerando uma malha global distorcida, isto é, arestas muito desiguais e ângulos agudos. Este problema ocorreu porque a triangulação foi traçada a partir das curvas de nível e não pontos notáveis, onde estas não estavam igualmente espaçadas. Assim, limitando-se a região modela, foi possível modificar os parâmetros dos dados de entrada de acordo com a necessidade de cada setor.

3.1.2 Subsolo

Os dados amostrais do subsolo foram obtidos dos perfis de sondagem disponíveis na prefeitura do campus. As sondagens foram organizadas por áreas numeradas que identificam a localização e o número de cada furo. Por exemplo, a área 101-01 corresponde ao setor do Instituto de Computação e ao perfil 01. Atualmente, o campus possui 109 setores e, aproximadamente, 500 perfis de sondagens.

Estes dados foram organizados e classificados de acordo com:

a) Setor de localização e número do furo de sondagem;
b) Planta de localização dos furos de sondagens;
c) Localização da referência de nível e
d) Apresentação das cotas das camadas de solos.

O ideal para esta fase do trabalho seria a criação de um banco de dados associado à base cartográfica digital onde as informações sobre as sondagens pudessem ser constantemente atualizadas utilizando um Sistema de Informações Geográficas – SIG.

Os perfis de sondagens foram localizados na planta georeferenciada do campus da Unicamp (Figura 3). As cotas das sondagens na superfície do terreno foram obtidas dos modelos digitais da superfície.

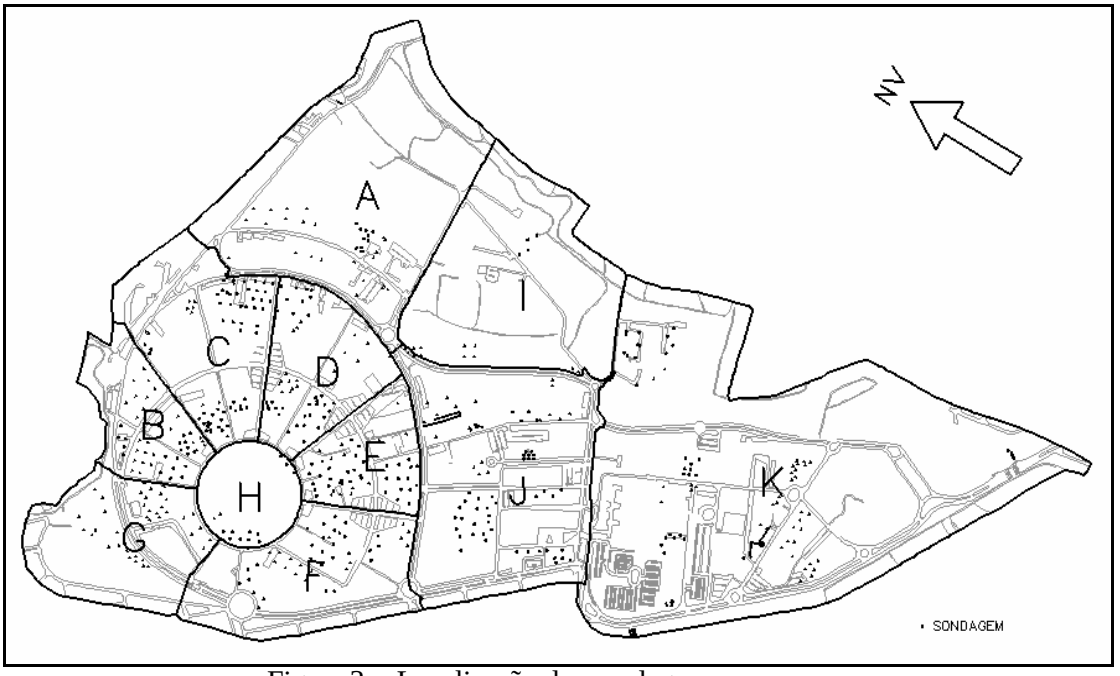


Figura 3 – Localização das sondagens no campus

O subsolo do campus pode ser divido em duas camadas principais: argila siltosa e silte argiloso. A cota da base da primeira foi utilizada como topo da seguinte camada. Por exemplo, a cota da base da camada de argila siltosa foi empregada como cota do topo da camada de silte argiloso. A figura 4 mostra, além do limite de prospecção, a interface entre as duas camadas.

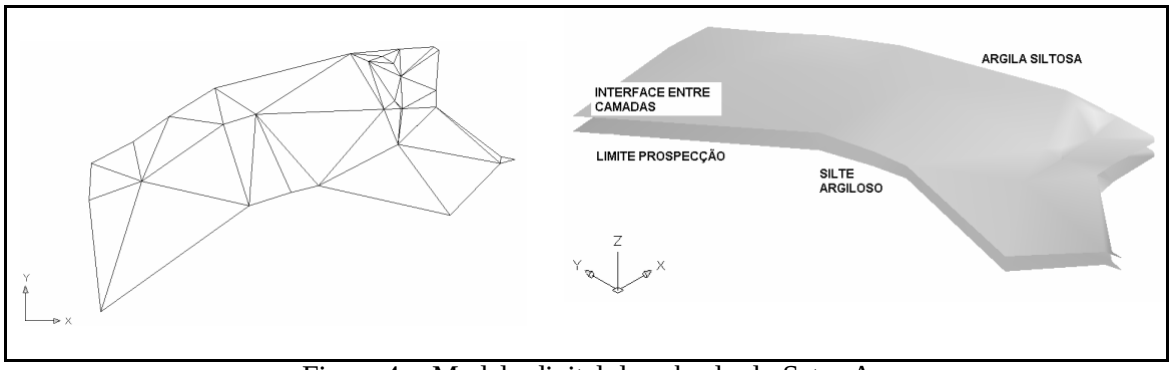


Figura 4 – Modelo digital do subsolo do Setor A

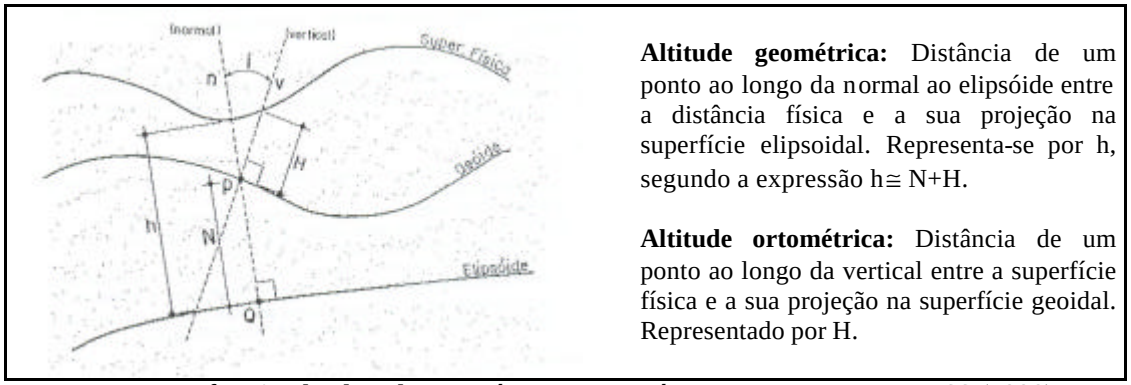
Durante a digitalização dos dados das sondagens foram encontradas dificuldades ligadas à falta de padronização e georeferenciação. Nesta etapa foram necessárias várias aproximações para que o estudo pudesse prosseguir. A qualidade final das possíveis divisões das camadas de solos depende das informações transferidas dos relatórios para o formato digital. Como destacado por Silva et al. (2000), os grandes inconvenientes e fontes de erros verificados nesta etapa foram georeferenciação, descrição dos solos, ensaios complementares e representação gráfica e padronização.

3.2 Verificação dos modelos digitais

3.2.1 Superfície

Para estimar a exatidão dos modelos digitais da superfície utilizou-se o Decreto Lei n° 89.817 de junho de 1984 - Normas Técnicas da Cartografia Nacional, mesmo sabendo que este precisa ser reavaliado, como afirmaram Sato (2003) e Siqueira (2003).

Compararam-se as altitudes do modelo digital com um levantamento de campo realizado pelo método clássico com Estação Total. Porém, primeiramente, foi necessária a realização de um nivelamento geométrico para a obtenção das altitudes ortométricas dos marcos da rede de referencia cadastral do campus da Unicamp, já que estes estavam referenciados com altitudes geométricas (Figura 5). Esta atividade foi realizada na região próxima a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – FEC.



Altitude geométrica: Distância de um ponto ao longo da normal ao elipsóide entre a distância física e a sua projeção na superfície elipsoidal. Representa-se por h, segundo a expressão h≅ N+H.

Altitude ortométrica: Distância de um ponto ao longo da vertical entre a superfície física e a sua projeção na superfície geoidal. Representado por H.

Figura 5 – Definição da altitude geométrica e ortométrica - Fonte: NBR 14.166 (1998)

A tabela 1 apresenta a comparação entre as altitudes ortométricas levantadas em campo com as do modelo digital da superfície. Dos 12 pontos analisados, um deles apresentou erro maior que o erro padrão. Assim, 92% das altitudes analisadas enquadram-se na classe A do PEC.

Tabela 1 – Comparação da altitude do levantamento de campo com o modelo digital

Ponto	Altitude Ortométrica (m)		Erro (m)	Ponto	Altitude Ortométrica		Erro (m)
	Levantamento de campo	Modelo digital da superfície			Levantamento de campo	Modelo digital da superfície	
1	611.888	611.572	0.316	7	610.594	610.682	-0.088
2	610.075	609.940	0.135	8	610.641	610.674	-0.033
3	615.972	616.000	-0.028	9	612.490	612.410	0.080
4	614.228	614.039	0.189	10	612.409	612.616	-0.207
5	616.733	616.631	0.102	11	619.079	619.068	0.011
6	616.762	617.000	-0.238	12	617.628	617.357	0.271

Média do Erro (m)	**0.042**
Desvio Padrão do Erro (m)	**0.174**
Variância do Erro (m)	**0.030**
Intervalo de confiança do Erro (m)	**0.082**

Por não se conhecer as altitudes ortométricas do campus, utilizou-se 30% dos pontos de apoio da restituição digital de cada setor como ponto controle para o estudo estatístico. Verificou-se que os modelos digitais da superfície do terreno de todos os setores respeitam o PEC.

3.2.2 Subsolo

A exatidão do modelo digital do subsolo foi avaliada utilizando a mesma metodologia da superfície, bem como o método dos mínimos quadrados. Foram deixados 10% do número de sondagens de cada setor como pontos de controle para comparação das cotas das camadas de solo. Pelo diagrama de dispersão foi possível visualizar que as altitudes comparadas aproximam-se de uma reta. Verificou-se pelo método dos mínimos quadrados, que a reta que representa a distribuição das altitudes da primeira camada de solo é dada pela equação y(x) = 1.x-0,002, sendo $\underline{x}$ as altitudes obtidas da geração do modelo digital e $\underline{y}$ as altitudes obtidas das sondagens. Assim, para analisar a exatidão do modelo digital do subsolo comparou-se a altitude dada pela equação com as das sondagens. A verificação apresentou média igual a zero, desvio padrão igual a 1,724 m e variância igual 2,972 m. A figura 6 apresenta um exemplo de seção do modelo digital do subsolo.

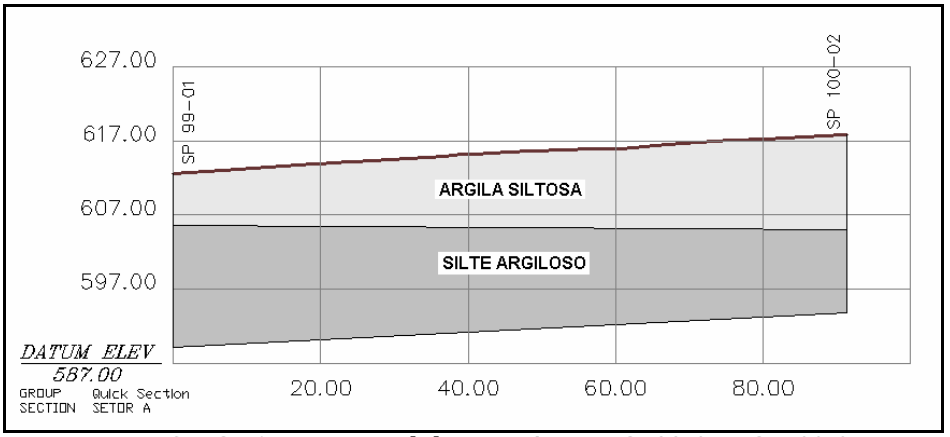


Figura 6 – Seção transversal do setor A entre SP99-01 e SP100-02

3.3 Modelo digital utilizando valores de Nspt

Como estudo de caso, utilizaram-se 19 sondagens do tipo SPT em uma área de 800 m² do Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Unicamp. O Nspt foi realizado a cada metro. Optou-se por gerar superfícies digitais com os valores médios de Nspt a cada 3m com a profundidade variando de 0 a 18m, cujos valores estão apresentados na tabela 2. A figura 7 apresenta a superfície do Nspt-médio referente à profundidade de 15 a 18 m. Concluída as superfícies dos Nspt, fez-se um corte transversal no terreno para representar a variação dos Nspt com a distância horizontal para cada profundidade (Figura 8).

Tabela 2– Valores médios de SPT de acordo com a profundidade

Perfil	Profundidade (m)					
	0 a 3	3 a 6	6 a 9	9 a 12	12 a 15	15 a 18
SP01	3.33	6.00	9.00	8.67	7.00	6.00
SP02	2.97	6.67	8.67	9.00	7.33	16.00
SP03	2.40	7.33	13.33	12.00	18.00	54.00
SP04	3.13	7.67	17.00	7.67	16.33	28.67
SP05	2.67	4.67	8.33	9.33	11.00	13.33
SP06	2.50	5.00	6.67	9.00	9.33	9.00
SP07	1.40	4.00	6.00	9.33	9.67	7.33
SP08	1.47	5.00	5.67	8.67	8.00	29.00
SP09	1.97	5.30	7.33	10.70	8.27	19.13
SP10	2.83	4.47	5.97	8.80	8.47	15.83
SP11	3.17	5.63	4.83	7.17	6.87	11.13
SP12	2.93	4.87	6.17	6.97	6.77	29.57
SP13	2.40	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SP14	2.43	4.67	6.83	8.80	12.23	0.00
SP15	2.67	4.33	5.67	8.33	9.33	10.33
SP16	2.67	4.33	4.33	7.00	8.00	6.33
SP17	2.00	4.67	5.33	7.67	10.33	7.33
SP19	4.23	6.50	3.73	7.40	5.27	7.57

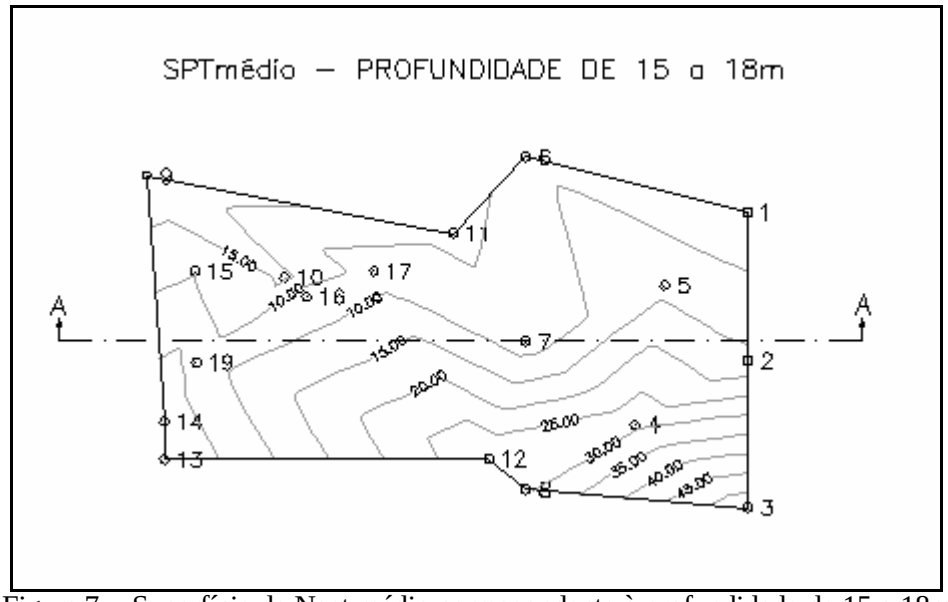


Figura 7 – Superfície de Nspt médio correspondente à profundidade de 15 a 18m

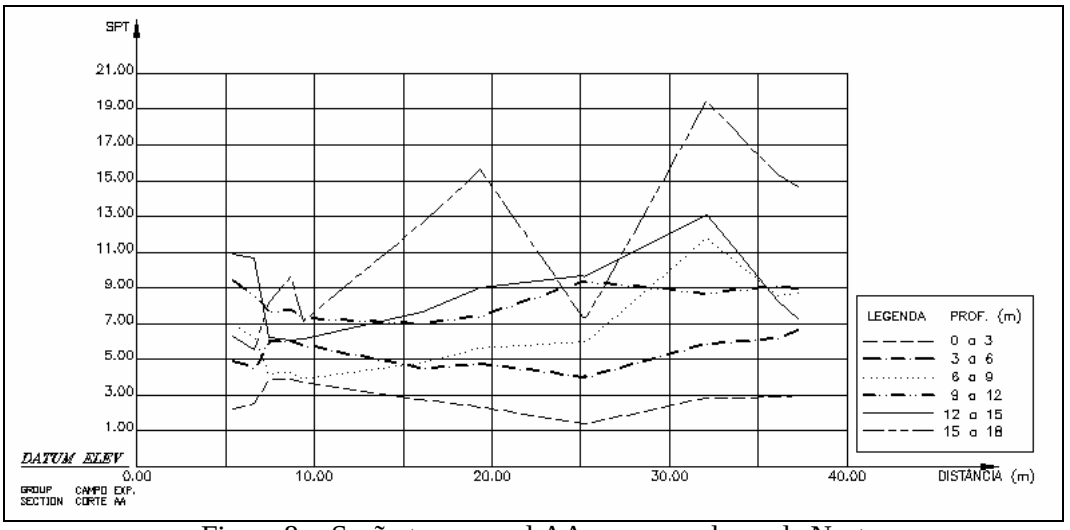


Figura 8 – Seção transversal AA para os valores de Nspt

4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

A falta de levantamento planialtimétrico com a estação total de todos os setores do campus gerou muitas incertezas na análise global da superfície. Por isso, os pontos de controle da restituição digital foram empregados como amostragem da população das altitudes da superfície. Verificou-se que os modelos digitais da superfície do terreno de todos os setores estão dentro do PEC. Cabe salientar que para análises realizadas neste trabalho, o PEC é suficiente para a precisão requerida.

Pode-se perceber que a metodologia empregada na geração dos modelos digitais da superfície precisa ser melhorada, pois a acurácia em locais de áreas mortas (grande densidade de edificações e vegetações) compromete a geração do modelo. Durante a interpolação das curvas de nível, o processo não identifica a existência de planos devido às cotas das edificações.

Os modelos digitais do subsolo apresentaram dificuldades na verificação da sua exatidão, pois as cotas das camadas de solos não foram facilmente amostradas como na superfície e nas regiões de vazios (áreas não edificadas) não existem informações. Além disso, como as sondagens não eram georeferenciadas, durante a digitalização das mesmas foram realizadas várias estimações da localização dos perfis.

Apesar destas dificuldades, foi possível verificar a distribuição espacial das camadas de solo da Unicamp. Pode-se perceber que o campus é composto, basicamente, por uma camada de argila siltosa seguida de silte argiloso.

A geração das superfícies com os valores dos Nspt possibilitaram verificar a variação do mesmo de acordo com as coordenadas x, y e z, pois o modelo permite gerar seções transversais de qualquer região da malha triangular com todas as superfícies a cada 3 m.

5. CONCLUSÕES

Os modelos digitais compostos pela superfície e subsolo possibilitam análises globais do terreno quanto às disposições e localizações das camadas de solo, devido à facilidade de geração de perfis longitudinais ou transversais de qualquer região da malha triangular. Nesta pesquisa,

porém, não se conseguiu um controle muito rigoroso da exatidão dos modelos digitais do subsolo, pois cotas das "bocas" dos furos das sondagens foram lançadas a partir da superfície digital do terreno. Além disso, a amostragem dos modelos digitais do subsolo carrega muitas incertezas devido às modificações dos locais de execução realizadas ao longo do tempo, quantidade e a qualidade das informações transferidas para o formato digital. Diante disso, recomenda-se que as sondagens sejam georeferenciadas.

A análise estatística dos modelos digitais da superfície do terreno foi muito importante, pois conferiu mais segurança para prosseguir nos estudos de modelagem digital do subsolo, mesmo não conseguindo uma amostragem muito significativa nos levantamentos de campo. Cabe destacar que, em geral, o número de sondagens é pequeno e raramente estão distribuídas de maneira homogênea em toda área do terreno.

Para melhorar a organização das informações das sondagens recomenda-se a criação de um banco de dados associados à base cartográfica digital onde as informações sobre as mesmas pudessem ser constantemente atualizadas, ou seja, utilizando um Sistema de Informações Geográficas.

O conhecimento do Nspt e sua distribuição ao longo da profundidade são importantes, pois estas informações auxiliarão na escolha adequada da fundação, bem como as cotas de assentamento e na determinação das tensões admissíveis.

6. REFERÊNCIAS

[1] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 1998. NBR 14.166. Rede de Referência Cadastral Municipal, 36 páginas.

[2] BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20 de Junho de 1984. Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Disponível em <http://www.concar.ibge.gov.br/CCA32.htm>. Acesso em 26/04/2004.

[3] Cintra, J. P., 1988. Modelagem digital de terrenos – (Automação da Topografia). In Apostila PTR-286 - Técnicas Topográficas e Cartográficas. São Paulo, 50 páginas.

[4] Cintra, J. P.; M. T. Françoso; P. S. L. Segantine e S. C. Lopes, 1991. Experiência de aplicação do programa SURFER em – Modelagem Digital de Terreno. In XV Congresso Brasileiro de Cartografia. São Paulo, pp. 381-393.

[5] Petrie, G. e T.J.M. Kennie, 1991. The accuracy of digital terrain models, In Terrain modeling in Surveying and Civil Engineering (ed) Mc. Graw-Hill, New York, pp. 317-336.

[6] Sato, S. S., 2003. Sistema de controle de qualidade de processos fotogramétricos digitais para produção de dados espaciais. Tese (Doutorado em Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos da USP, São Carlos, 229 páginas.

[7] Silva, A. P. e J. A. Rodrigues-Carvalho, 2000. Informação Geográfica e Registro de Sondagens – A Necessidade de Normalização em Portugal. In Anais do VII Congresso Nacional de Geotecnia, Potugal, pp 341-344.

[8] Siqueira, R. M., 2003. Estudo sobre a exatidão de bases cartográficas digitais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp. Campinas, 136 páginas.