

Mapeamento Geotécnico Tridimensional a Partir de Resultados de Sondagens SPT - Estudo de Caso: Campus da UFPA em Belém-PA

Rodrigo Souza de Freitas

Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, rodrigo_freitas@usp.br

Denilson José Ribeiro Sodré, DSc.

Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, dsodre@ufpa.br

Iago Monte Santos

Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, iagom_15@hotmail.com

RESUMO: A cidade de Belém do Pará encontra-se sobre um solo de origem sedimentar de transporte aluvionar com alta compressibilidade e baixa capacidade de carga. Isso reflete nas fundações de obras de engenharia, onerando-as com utilização de fundações profundas, somadas às carências na interpretação de dados geotécnicos agravam ainda mais esta condição. Este estudo tem como propósito mostrar a necessidade de se criar modelos em 3D de subsuperfícies, para evitar suposições dos projetistas de fundações em áreas do projeto que não possuem abrangência de sondagens, apoiando à solução de possíveis problemas vinculados a recalques e incidentes nas obras de fundação. O mapeamento geotécnico tridimensional foi realizado na Universidade Federal do Pará no campus do Guamá em Belém-PA, utilizando de Sondagens de simples reconhecimento com SPT (Standard Penetration Test), já realizados dentro do campus universitário. Utilizou-se o software ROCKWORKS, que através da modelagem digital do terreno e subsuperfícies é capaz de criar modelos tridimensionais volumétricos, utilizando de métodos de interpolação geoestatística. Através dos modelos elaborados foi possível realizar uma interpretação mais confiável da área e volumes das camadas de solos moles, camadas de resistência elevadas e variações do lençol freático, auxiliando as tomadas de decisões de engenharia de futuros empreendimentos na área. Comprovou-se a grande heterogeneidade e a baixa capacidade de suporte do subsolo da área da UFPA.

PALAVRAS CHAVES: Mapeamento Geotécnico, Modelagem Digital de Terreno, Sondagem SPT, Interpolação.

1 INTRODUÇÃO

Belém do Pará está situada na Baía do Guajará numa região de cobertura sedimentar cenozoica. A estratigrafia de seu subsolo é composta basicamente por sedimentos aluvionares recentes até uma profundidade de aproximadamente 150 metros, pertencentes ao período Quaternário e Terciário, depositados sobre rochas carbonáticas que não afloram na área da cidade (Sampaio Jr, 1995). Os solos da região metropolitana de Belém, devido sua formação geológica, apresentam a ocorrência de extensas camadas de solos moles além de uma grande heterogeneidade tanto no perfil de sua

estratigrafia quanto nos materiais constituintes de cada camada. Alguns estudos como Alencar Jr. et al. 1997, Alencar Jr. et al. 2002 e Sampaio Jr. 1995 apontam, que grande parte da região metropolitana de Belém está assente num perfil geológico caracterizado por solos moles com alta compressibilidade e estratigrafia bastante complexa.

Com o objetivo de minimizar as incertezas causadas por investigações pontuais, propõe-se a implantação de um mapeamento geotécnico utilizando técnicas de modelagens tridimensionais do subsolo. Elaborou-se um estudo de caso na Universidade Federal do Pará (UFPA), devido à disponibilidade dos dados de

sondagens para criação de um sistema de informações geográficas satisfatório, além da contribuição para futuros empreendimentos no campus.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização

A Universidade Federal do Pará (UFPA) encontra-se as margens da baía do Guarujá no delta do rio Amazonas disposta em uma região de baixada. A área estudada representa bem o contexto da estratigrafia de Belém, grandes extensões de solos moles com presença de camadas espessas resistentes, chegando em alguns casos a identificar solos estruturados. Delimitada pelas coordenadas geográficas: $1^{\circ}28'33,6''$ e $1^{\circ}27'45,8''$ S de latitude, $48^{\circ}27'34''$ e $48^{\circ}26'33,4''$ W de longitude. Tem sua área representada na Figura 1 de aproximadamente 3,33 km², correspondente a área territorial, e sua área edificada de aproximadamente 0,2 km².

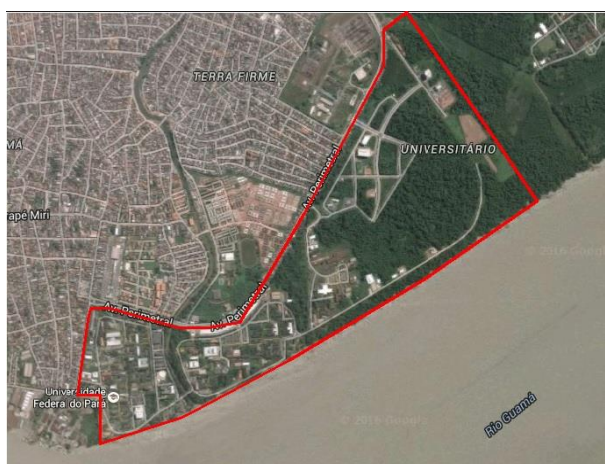


Figura 1. Localização da área de estudo.

2.2 Características Geotécnicas, Geológicas e Pedológicas

O campus universitário do Guamá possui solos de formação sedimentar por transporte aluvionar, com profundidades por volta de 130 metros. Oriundos da era Cenozoica, períodos Terciário e Quaternário. Segundo Costa 2001, a geologia da região metropolitana de Belém pode ser dividida em três unidades litológicas,

discriminadas do topo a base em: sedimentos recentes; sedimentos barreiras/pós barreiras e formação de Pirabas. Como já é observado Santos Filho e Wandemir, 1993 a estratigrafia do terreno está diretamente relacionada com a cota referente ao nível do mar em que se encontra. Sendo a região de estudo uma área de baixada (cota de até 3m acima do nível do mar) observou-se as características típicas dessa área, composta de uma camada de argila orgânica de consistência mole a muito mole e nível de água na superfície ou muito próximo a ela. A espessura dessa camada varia muito podendo chegar até 60 metros. Possui uma coloração cinza escura e baixíssima capacidade de carga. Com comportamento normalmente adensado, configura-se como uma camada de alta compressibilidade. Alencar et al. 2002, apontam parâmetros de resistência, por ensaios de palheta, com valores entre 10 e 30kPa, sem tendência de variação com a profundidade. Subjacente à argila orgânica verifica-se na maioria dos casos uma camada de solo resistente com espessura de 1 a 4 metros de argila muito rija ou dura, coloração em tons de cinza claro, vermelho e amarelo ou areias siltosas de cor branca ou em tons de róseo, vermelho ou amarelo, medianamente compactas a compactas. Abaixo a primeira camada resistente tem-se frequentemente uma argila cinza semelhante à camada superficial porém de consistência mole à media, com espessura de 4 a 8 metros. As camadas mais profundas são intercalações de argila rija à dura e areias medianamente compactas a compactas até o limite das sondagens.

3 METODOLOGIA

3.1 Dados de Sondagem

A sondagem de simples reconhecimento com SPT, é uma técnica de exploração e reconhecimento do solo, usada normalmente em solos granulares, solos coesivos e rochas, no Brasil este ensaio é regido pela norma NBR 6484 (ABNT, 2001).

Para viabilizar a elaboração do modelo 3D do subsolo do campus da UFPA, foi necessário reunir um número de sondagens suficiente que caracterize toda a área da UFPA. Os dados de

sondagens foram cedidos pelo Departamento de Arquitetura da Prefeitura do Campus. Foram coletados 123 laudos de sondagem de simples reconhecimento com SPT, dispostas por toda a área de estudo.

3.2 Locação Sondagens e Delimitação da Área para a Modelagem Tridimensional

Foram utilizados no estudo apenas laudos de sondagem que puderam ser localizados na base cartográfica georreferenciada do campus. A Figura 2 mostra os furos de SPT, juntamente com a área total da UFPA em Belém, e a área a ser considerada pelo estudo. A delimitação da área para modelagem (roxo), foi feita segundo a abrangência de perfis de sondagens obtidos, minimizando assim as imprecisões deste tipo de modelagem.

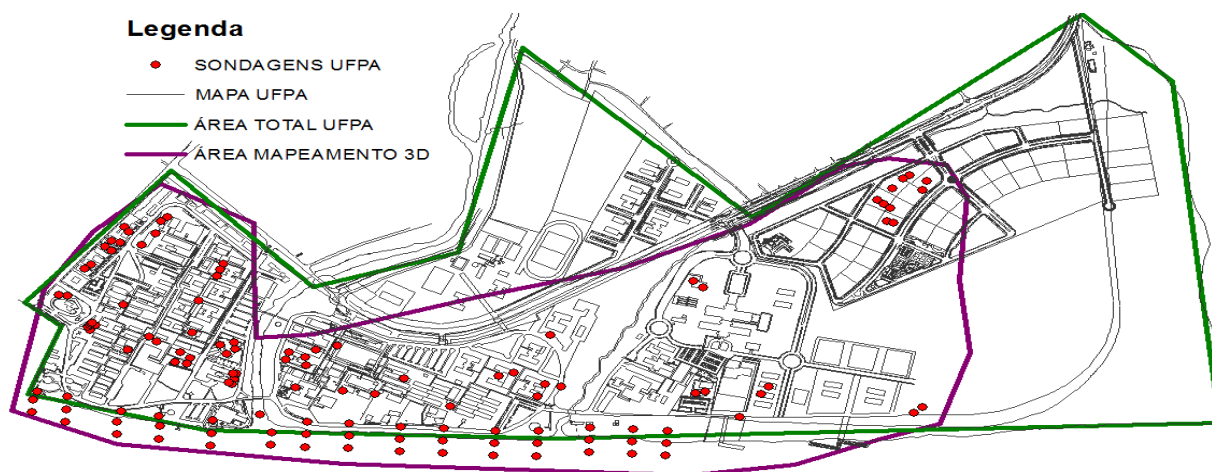


Figura 2. Mapa de locação das sondagens

3.3 Modelagem Tridimensional de Dados Geotécnicos

O mapeamento geotécnico tridimensional, tem como objetivo elaborar modelos computacionais, que melhor interprete dados de investigações geotécnicas, utilizando para isso softwares específicos. Neste estudo foi utilizado o software Rockworks. O programa gera modelos volumétricos, através do método de “voxel”, onde o sólido é criado a partir da extrapolação volumétrica em vários pontos ao longo de uma reta. Outro tipo de modelagem de subsuperfícies que o software utiliza é a modelagem geoestatística, utilizando da triangulação de Delaunay e interpolação pelo método da Krigagem. (Rockworks, 2008).

3.3.1 Modelos Estratigráficos, Litológicos, Nspt, Níveis de Maré e Diagramas de Cercas

O programa Rockworks, gera estratigráfica como deposição de estratos, em que uma determinada camada não pode se repetir em um

mesmo furo de sondagem, e também não pode variar na ordem colocada no furo de sondagem.

A litologia diferentemente da estratigrafia, é possível ocorrer na mesma sondagem, duas ou mais repetições de um mesmo tipo de solo.

A entrada de pontos dentro do Rockworks é realizada pelo comando “I dada”, neste estudo este modelo representará os valores pontuais a cada metro do N do SPT.

Os modelos de níveis de lençóis freáticos gerados pelo Rockworks foram realizados de acordo com as anotações do mesmo em cada sondagem. Neste estudo este modelo representará a variância de marés, encontradas nos perfis de sondagens.

A geração dos modelos de cercas (fence) seguiram 3 passos: marcar os locais de cada secção, escolher uma escala vertical e escolher pares de secção das fácies e relações estratigráficas. Esses parâmetros foram definidos de acordo com o espaçamento dos laudos de sondagens, buscando sempre as secções que mais se aproximavam dos laudos. Foram feitos diagramas em fence para estratigrafia e níveis de Nspt.

4 RESULTADOS E ANALISES

4.1 Modelo Litológico

A Figura 3 mostra o modelo litológico elaborado dentro do software Rockworks, através de modelagem volumétrica de sólidos (voxel), onde são considerados a repetição de um solo, na mesma sondagem.

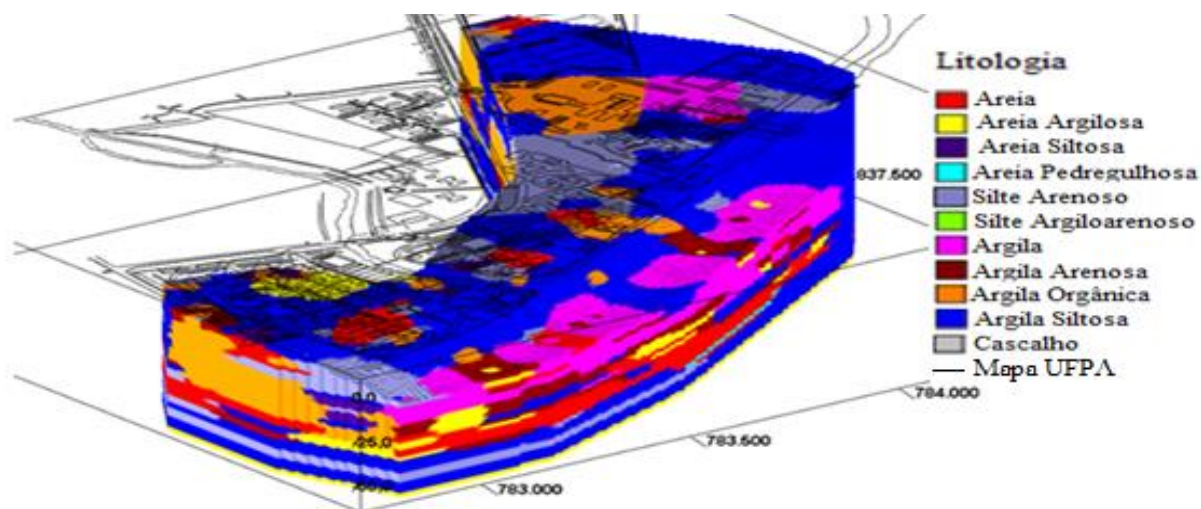


Figura 3. Modelo Litológico Universidade Federal do Pará, com escala vertical exagerada em 5 vezes

Analisando o modelo litológico percebemos a grande heterogeneidade da região, sendo encontrados na superfície e no subsolo da UFPA 11 diferentes tipos de solos. Foi verificado a predominância de dois tipos, argila siltosa (azul) e argila orgânica (laranja), em termos de volume, foram 42x106 e 16x106 metros cúbicos, respectivamente para os dois solos. A argila (rosa) teve sua predominância de ocorrência na região da orla, com profundidades em torno de 20 metros e baixa resistência.

4.3 Modelo Estratigráfico

O modelo estratigráfico elaborado dentro do Rockworks, reflete a estratificação considerada pelo operador do programa, ou seja, as prioridades entre as várias camadas encontradas nas sondagens são controladas conforme a maneira de inserção de dados pelo operador. Para elaboração do modelo estratigráfico foram levadas em consideração os 11 tipos de solos encontrados na litologia e a deposição dos estratos de baixo para cima. Devido à grande heterogeneidade do subsolo, o modelo estratigráfico apresentou no total 50 estratos diferentes.

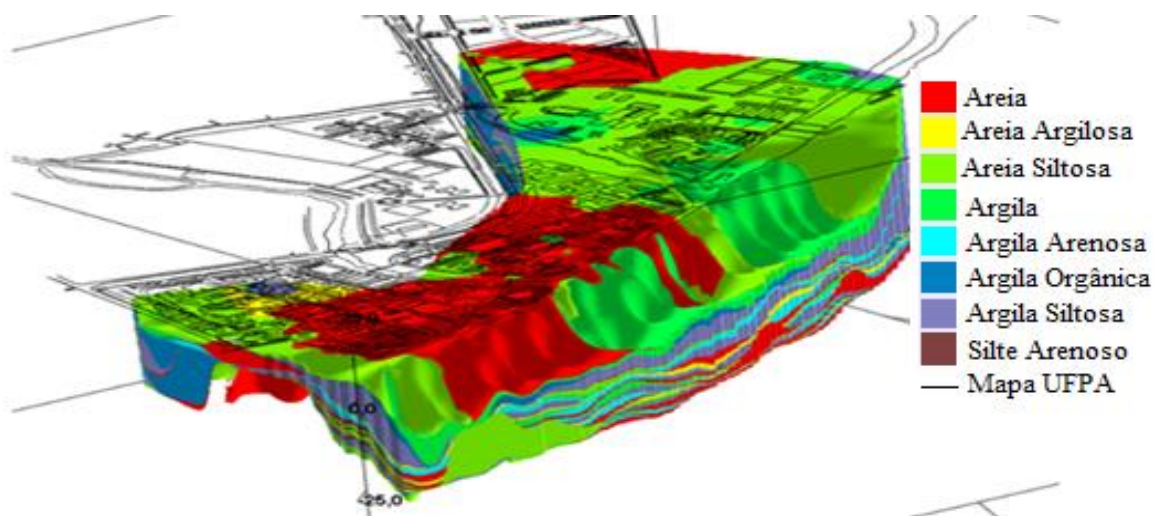


Figura 4. Modelo Estratigráfico Subsolo Universidade Federal do Pará, com escala vertical exagerada em 3 vezes

Observa-se então a extrema dificuldade de se executar obras de fundações nessa região, pois, a estratigrafia é muito complexa variando tanto sua estrutura como o tipo de material e espessura das camadas em um pequeno intervalo de espaço.

O modelo estratigráfico mostra a predominância de solo argiloso (verde, azul e lilás), seja na superfície ou a grandes profundidades e com grandes espessuras. Camadas de areia (vermelho) podem ser observadas na superfície em estado fofo, e no subsolo com altos índices de compactidade, sendo em muitos casos critério de parada das sondagens. Visualizando a Figura 4 fica mais claro a forma como estes solos se depositam, e a sua alternância com outros tipos de solos, características já esperadas devido a formação sedimentar do subsolo da UFPA. Em termos de volume, fica claro que o subsolo da UFPA é

composto de material argiloso, de um total de volume de sólidos gerados 73,6% é argila, 19,1% é areia e 7,3% é silte.

Entretanto, cuidados devem ser tomados quanto a confiança total no modelo elaborado: grande heterogeneidade encontrada no subsolo da UFPA, critério de escolha das camadas que pode não ser o ideal, espessuras muito finas das camadas, áreas não assistidas por furo de sondagem, método de interpolação utilizado, etc. Pois, tais fatores podem acarretar em falhas na elaboração do modelo, portanto, interpretações equivocadas.

4.4 Modelo N do SPT

A Figura 5 mostra os níveis de N do SPT gerados com base nas anotações feitas no ensaio, sendo cada cor representa um determinado valor de N do SPT.

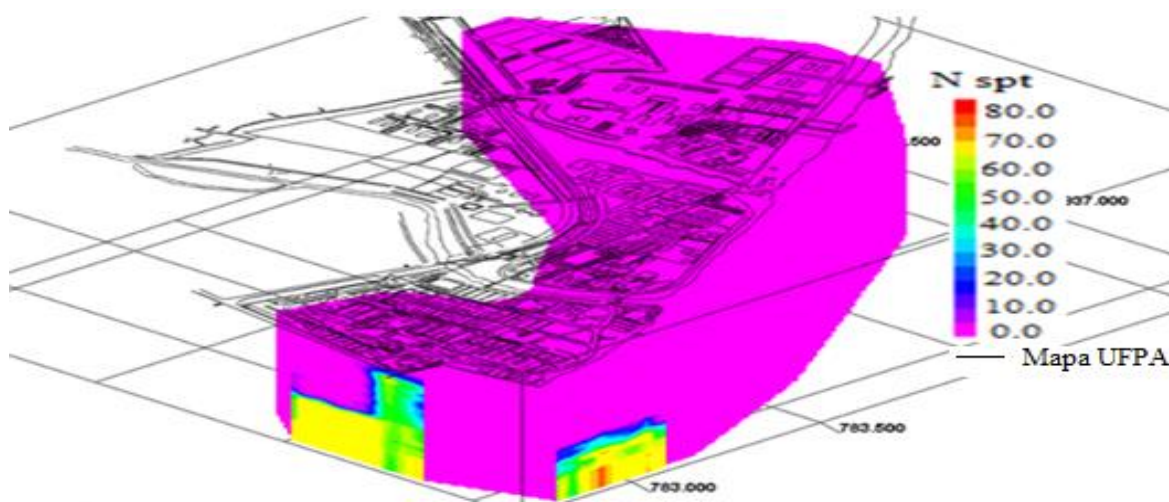


Figura 5. Modelo 3D do NSPT da Universidade Federal do Pará, com escala vertical exagerada em 5 vezes

O modelo expressa bem a ocorrência de extensas camadas de solos moles das regiões de baixada da região Metropolitana de Belém. Observamos que solos que compõe a superfície da área estudada são moles com N do SPT variando entre 0 e 5, podendo chegar em muitos casos à uma profundidade de 40 metros. Outras observações são realizadas quanto a profundidades em que as sondagens encontram uma camada mais compacta, que pode variar entre 20 a 50 metros, a única exceção é a área onde encontra-se o prédio da Prefeitura. Estas características torna o recalque na maioria dos casos o fator determinante nos projetos de

fundação. Justificado em trabalhos de Salame, A.M. 2002, e Sampaio Jr. 1995, no qual apresenta grandes dificuldades dos projetistas geotécnicos em lidar com as características da estratigrafia e da compressibilidade dos solos em Belém.

4.5 Níveis de Maré

O modelo do nível do lençol freático na Figura 6 foi gerado de acordo com as anotações do mesmo nos laudos de sondagens. É importante ressaltar que as sondagens foram realizadas em diferentes épocas do ano, fator que pode variar

os níveis de cheias e vazantes na região. Sendo representado a maré alta pela cor vermelha e maré baixa pela cor azul no modelo é quase que imperceptível a diferença, isso só acontece devido a área ser muito plana e a pouca variação das marés apontados pelos laudos de sondagens. Como é característico de regiões de baixadas o nível de água muito superficial, o nível do lençol freático mesmo na maré baixa ficou em torno de

2,5m de profundidade, e em maré alta cerca de 1m ou na superfície do terreno.

O nível do lençol Freático influencia diretamente no comportamento das fundações pois como observado pela Figura 6 o nível d'água se encontra muito próximo a superfície e somada ao fenômeno da capilaridade faz com que o subsolo esteja em muitos casos saturado no nível do terreno, caracterizando a condição mais desfavorável para obras de fundação.

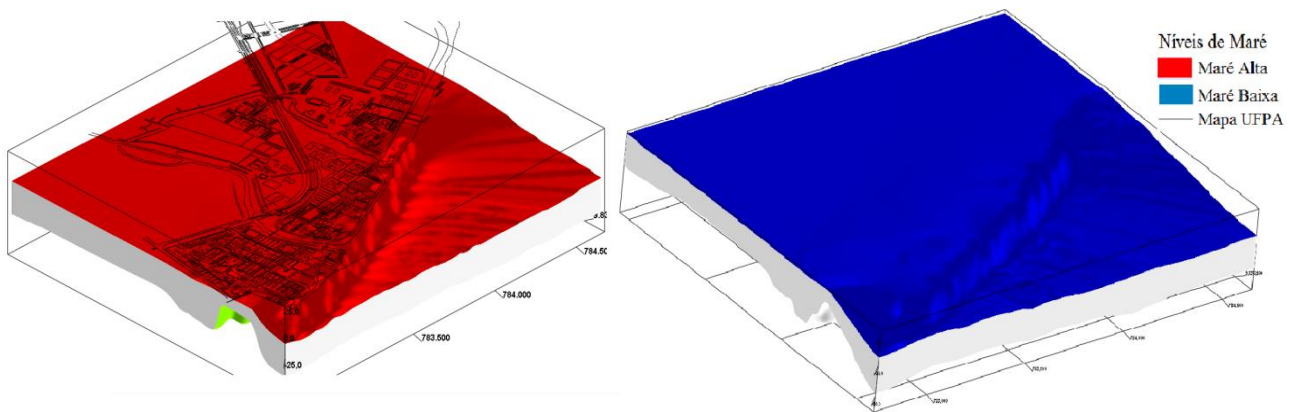


Figura 6. Modelo dos Níveis de Maré.

4.6 Diagrama de Cercas (fence 3D)

Os diagramas de fence são bastante usados para representação de estratigrafia em três dimensões. É semelhante às secções transversais, sendo caracterizada pela interpolação entre as secções

estratigráficas ou núcleos perfurados da subsuperfície ao invés de interpolar as subsuperfícies geológicas de um mapa. Abaixo temos a representação em fence da estratigrafia e dos níveis de N do SPT gerada do campus universitário.

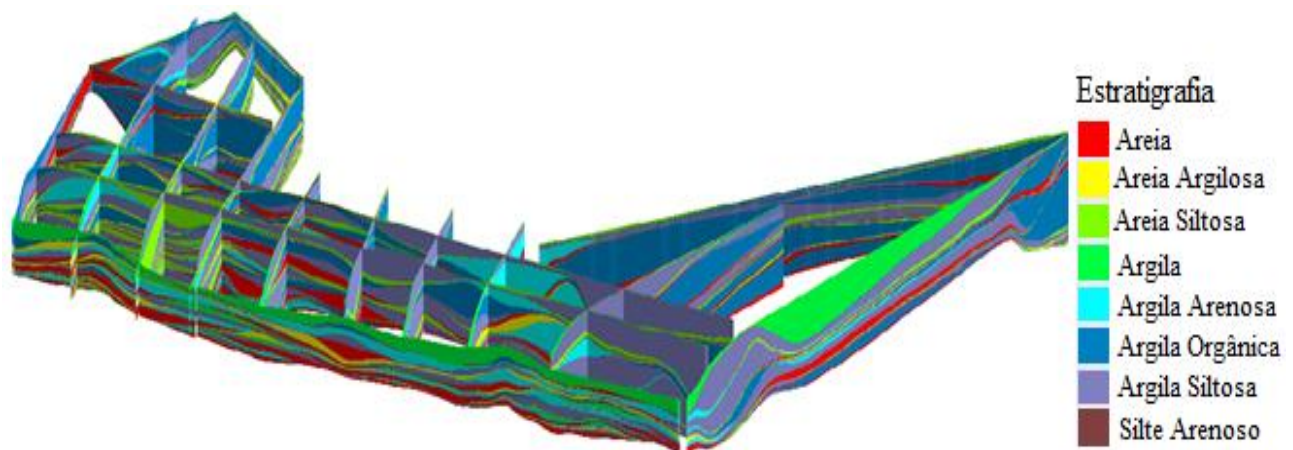


Figura 7. Digrama de cercas estratigrafia da Universidade Federal do Pará, com escala vertical exagerada em 3 vezes.

Analisando o diagrama de cercas da estratigrafia, observamos com clareza a variação de comportamento das camadas no interior do mesmo. Assim como o modelo tridimensional da estratigrafia, verificamos a grande

heterogeneidade do subsolo com variações da espessura e profundidades das camadas, e também pequenas espessuras de algumas camadas de solo ao longo de toda área estudada.

É importante ressaltar a predominância de camadas de argila siltosa (lilás), intercalado com lentes de areia (vermelho), confirmando as características da estratigrafia mostrada em estudos anteriores. Essas camadas de argilas são muito compressíveis, e somada a presença considerável de areia torna os recalques dessa região relativamente rápidos, sendo relatados

patologias com fissuras graves na estrutura de edifícios com 3 meses de obra concluída.

Os recalques responsáveis pelas patologias do Campus Universitário são comumente relatados por conta das extensas camadas de solos moles na região, o diagrama de cercas abaixo mostra o comportamento da resistência com base nos níveis de N do SPT.

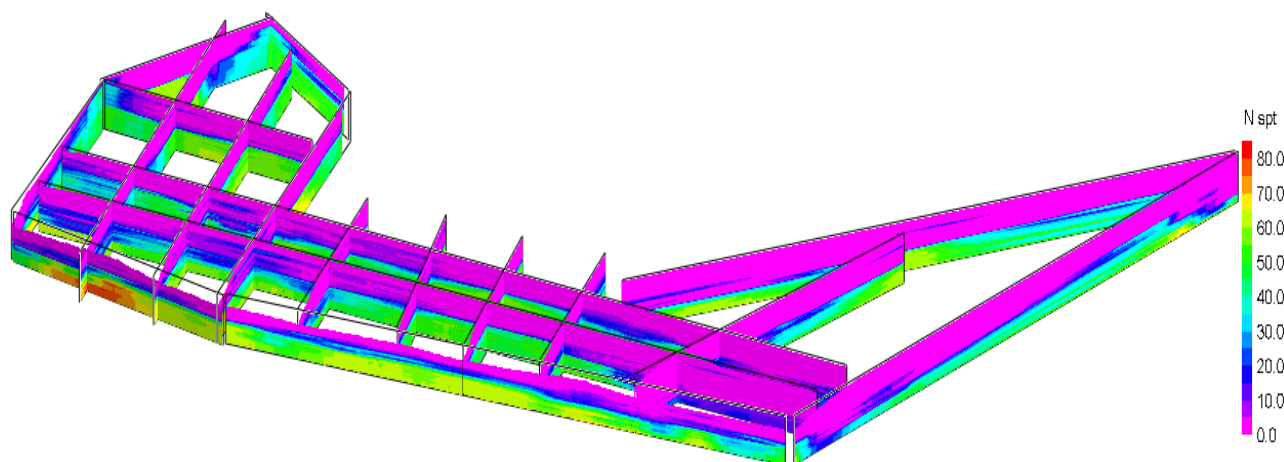


Figura 8. Diagrama de cercas Nspt da Universidade federal do Pará.

Na figura acima fica clara a baixa capacidade de suporte do subsolo da UFPA na superfície, sendo composta por níveis de Nspt variando entre 0 e 5 (rosa).

Na região onde se encontra o prédio da Prefeitura (canto superior esquerdo) foi a única a apresentar expressiva resistência mais próximo a superfície com Nspt variando entre 30 e 40 golpes aos 10 metros de profundidade.

As primeiras camadas resistentes são normalmente encontradas após 20 metros de profundidade (azul), normalmente são camadas pouco espessas de areia ou argila muito dura. Devido a esta condição é usual a utilização de fundações profundas nas edificações da UFPA, com estacas assentadas normalmente em torno de 30 a 45 metros de profundidade, onde os níveis de Nspt são da ordem de 30 golpes.

As principais causas de patologias relatadas no Campus são causadas por estacas assentadas em finas camadas resistentes, porem com presença de solos moles posteriormente a elas. Com isso os bulbos de pressão acabam dissipando acréscimos de pressão aos solos moles e ocasionando recalques não previstos. Essa condição é visualizada na figura 8 onde em algumas áreas ocorrem finas lentes de solos

resistentes (azul) e posteriormente solos moles (rosa), evidenciando a dificuldade de se projetar e executar obras na região.

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi elaborar modelos tridimensionais de dados geotécnicos extraídos de sondagens com SPT, e assim melhorar a visualização e interpretação destes dados geotécnicos. Com isso são feitas algumas observações quanto as incertezas e resultados encontrados.

Cuidados devem ser levados em consideração na avaliação destes modelos: quanto a área ser muito grande para poucos dados de sondagens, quanto a complexidade da estratigrafia do subsolo analisado, espessuras mínimas consideradas, potencialidades e limitações do programa utilizado, origens dos dados geotécnicos (data, empresa, etc.), todos os fatores mencionados acima geram imprecisões nos modelos tridimensionais de subsuperfícies, por este motivo estes estudos devem ser realizados por pessoas com experiência geotécnica na região. Propõe-se então uma

atualização do banco de dados de acordo com a realização de novos furos de sondagens para que assim possa-se representar maiores extensões do Campus com maiores precisões.

Analisando os modelos do ponto de vista geotécnico, vimos que a estratigrafia do subsolo da UFPA é bastante complexa, com grandes variações do tipo de solo e espessura das camadas. O que já era esperado de acordo com estudos realizados anteriormente por outros autores.

Quanto as litologias foram encontradas nos laudos de sondagem em um total de 11 tipos de solos, e o modelo nos mostrou a predominância de solo argiloso.

Quanto a resistência do solo (N do SPT), vimos que toda superfície é composta por solos moles, com presença de solos resistentes normalmente aos 20 metros de profundidade. Sendo apontado a grande heterogeneidade da estratigrafia somada a grandes ocorrências de solos moles uma das principais causas para as patologias relatadas na região.

Quanto aos níveis do lençol freático verificamos que este varia entre 2,5 metros e 1 metro de profundidade. Porém com o fenômeno da capilaridade toda área estudada encontra-se na maioria dos casos no estado saturado ao nível do terreno.

A utilização de ferramentas computacionais para geração de modelos tridimensionais do terreno se mostrou uma solução viável e eficaz no âmbito de se diminuir as incertezas que métodos pontuais normalmente ocasionam. Os resultados obtidos referentes ao estudo de caso foram satisfatórios porém não substituem a necessidade de sondagens no local de futuras obras.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos profundamente ao Departamento de Arquitetura da Prefeitura da Universidade Federal do Pará por fornecer os laudos de sondagens no qual tornou-se viável esse artigo.

REFERENCIAS

Alencar Jr, J.A. et al. (2002). Características Geotécnicas de Algumas Argilas Moles a Média na Cidade de

Belém do Pará. 11º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.

Alencar Jr, J.A. et al. (1997). Geotechnical Characterization of Soft Organic Clay in Belém-Pará-Brazil in the Amazon Region, Conference on Recent Advances in Soft Soil Engineering, Sarawak. Conference On Recent Advances in Soft Soil Engineering, v. 1. p. 10-2.

Costa, T.C.D. (2001). Análise crítica das metodologias gerais de mapeamento geotécnico visando formulação de diretrizes para a cartografia geotécnica no trópico úmido e aplicação na região metropolitana de Belém, escala 1:50.000, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém. 2v.

Salame, A.M. (2002). Mapeamento das Fundações mais Usadas na cidade de Belém – PA. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-RJ.

Sampaio Jr, J.L.C. (1995). Estudo da Compressibilidade de um solo argiloso da região metropolitana de Belém-Pa. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil PUC-RJ.

Santos, F. e Wandemir, M. (1993) Mapa Geotécnico de Belém – Uma Proposta Inicial, Belém, Universidade Federal do Pará, Departamento de Construção Civil / CT, Trabalho desenvolvido para obtenção parcial de grau no curso de engenharia civil.

Manual rockworks (2008) 2221 East St., Suite 101 Golden, CO 80401 USA. 312 p. Disponível em www.rockware.com.

ABNT (2001). Norma Técnica NBR 6484. Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio, ABNT, Rio de Janeiro, RJ. 12 p.