XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP

Banco de Sondagens SPT Aplicado a Fundações Superficiais na Cidade de Teresina-PI

Andressa Eulálio Lages
Universidade Federal do Piauí, Teresina/PI, Brasil, andressaeulalio@hotmail.com

Higo Tavares Barbosa
Universidade Federal do Piauí, Teresina/PI, Brasil, higotb@hotmail.com

RESUMO: As sondagens SPT se configuram como o mais popular ensaio de investigação geológico-geotécnica e seus resultados, devidamente organizados, podem ser utilizados como embasamento para futuros projetos. Banhada por dois rios, Poty e Parnaíba, na cidade de Teresina-PI predominam depósitos de solos aluvionares (argilas e areias siltosas) e de solos residuais (areias e siltes arenosos); sendo, portanto, os rios e a drenagem natural importantes agentes pedogenéticos dos solos superficiais, nos quais se apoiam a maior parte das fundações de edificações da cidade. A partir da organização e elaboração de um banco de dados de sondagens SPT da cidade de Teresina-PI, o presente trabalho visa contribuir com a comunidade geotécnica local com a análise da variabilidade espacial dos comportamentos geotécnicos dos solos, por meio de análises úteis para o pré-projeto de fundações superficiais. Adotando-se um modelo de fundação superficial, calculou-se a tensão admissível em vários pontos da cidade de Teresina, a partir das informações obtidas em relatórios de sondagens SPT, utilizando-se, nessa estimativa, dos principais métodos semiempíricos da literatura. Os dados foram analisados e interpolados com o auxílio do software Qgis, com a geração de mapas da cidade com indicação de áreas de maior e menor capacidade de suporte. Os resultados foram analisados para cada zona da cidade, levando-se em consideração a quantidade de amostras disponíveis. Verificou-se que os resultados foram condizentes com o esperado, especialmente nas zonas com maior quantidade de dados, reafirmando os bancos de dados como ferramentas úteis na prática geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: Sondagem SPT, banco de dados, interpolação IDW, tensão admissível, fundações superficiais.

ABSTRACT: The Standard Penetration Test (SPT) is the most popular form of site investigation. The data obtained from this test, when properly organized, can be used as a foundation for future engineering projects. Drained by two rivers, Poty and Parnaíba, the soil of the city of Teresina-PI is mostly composed of alluvial soils (clays and silty sands) and residual soils (sands and sandy silts); therefore meaning that the rivers and the natural draining are important pedogenic agents of surface soils, on which most of the city's building foundations rest. Based on the organization and elaboration of a database of SPT surveys in the city of Teresina-PI, the present work aims to contribute to the local geotechnical community by analyzing the spatial variability of soil strata and their respective geotechnical behaviors, producing useful analysis for the pre-design of surface foundations. Adopting a surface foundation model, the permissible stress at various points in the city of Teresina was calculated, based on information obtained from SPT reports. In this estimate, the main semi-empirical methods in literature were used. Then, the data obtained were analyzed and interpolated with the aid of the Qgis software, with the generation of city maps indicating areas of greater and lesser bearing capacity. The results were analyzed for each area of the city, taking into account the number of samples available. It was found that the results were consistent with what was expected, especially in the areas with the largest amount of data, reaffirming the databases as useful tools in geotechnical practice.

KEYWORDS: SPT, database, interpolation IDW, permissible stress, surface foundations.

https://proceedings.science/p/149610?lang=pt-br

1 Introdução

As investigações geotécnicas são essenciais para o conhecimento do solo, podendo ser realizadas por meio de ensaios de campo ou análise laboratorial e fundamentam todo o projeto geotécnico, desde sua fase conceitual até a executiva. Dentre os vários tipos de ensaios de campo existentes, o *Standard Penetration Test* (SPT) se destaca como o ensaio mais executado na maioria dos países, incluindo o Brasil (QUARESMA, *et al*., 1998). A popularidade do ensaio de sondagem SPT é justificada pelo seu baixo custo e facilidade de operação do equipamento.

As fundações podem ser divididas em dois grupos: superficiais ou profundas. As fundações superficiais englobam as sapatas, radiers e blocos. Estas fundações se caracterizam por apresentar profundidade de assentamento menor que 3,0 metros ou menor que 2 vezes o maior lado de sua seção em planta. As fundações superficiais transmitem as cargas para o solo essencialmente através de sua base, sendo também denominadas de diretas. Dessa forma, o solo deve apresentar uma tensão admissível superior à tensão promovida pelas cargas da estrutura divididas pela área de base da fundação.

Nas últimas décadas, a Engenharia Geotécnica vem se utilizando dos bancos de dados para associar informações geológicas à localização geográfica da obtenção de dados. Coutinho, Oliveira e Oliveira (1998) produziram um importante banco de dados geotécnicos em Recife-PE, com milhares de dados cadastrados, já utilizado em diversos estudos geotécnicos (profissionais e acadêmicos). Antes da existência de um banco, essas informações estariam dispersas em diferentes entidades e seu uso seria bastante dispendioso. Com o auxílio de métodos estatísticos, as informações reunidas em bancos de dados podem ser muito úteis para o pré-projeto de obras geotécnicas.

Diante desse contexto que se faz presente na cidade de Teresina- Piauí, este trabalho se propõe a elaborar um banco de sondagens à percussão (SPT), com vistas a contribuir para a comunidade geotécnica local com experiências e análises úteis para o pré-projeto de obras como fundações, obras de contenção ou de estabilidade de taludes.

1.1 Prática de Fundações na cidade de Teresina

De acordo com Castro, Silva e Amancio (2016), a cidade de Teresina adota a solução de fundação superficial tipo sapata em aproximadamente 62% dos casos, de um universo amostral com 56 elementos. Desse total, 60% possuía mais de cinco pavimentos, o que foi considerado um indicativo de que o solo local já apresenta elevadas resistências a pequenas profundidades. Em contrapartida, as fundações profundas foram adotadas em apenas 22% do total de obras analisadas, sendo 15% tubulão e 8% para estacas.

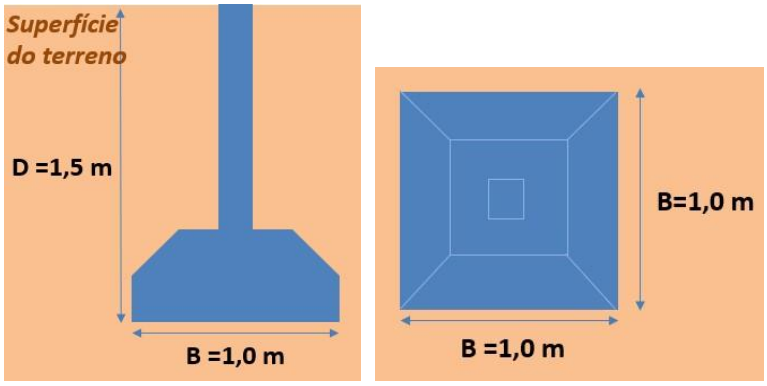
Para um determinado perfil geotécnico na cidade de Teresina, as sapatas se provaram a solução mais econômica em comparação a um tubulão a céu aberto em estudo realizado por Cunha (2016). Após o cálculo dos quantitativos e custos referentes à execução de ambas as soluções, o autor chegou à conclusão de que a escolha por fundação do tipo tubulão ocasiona um custo global duas vezes mais oneroso que o custo global da sapata. Essas experiências locais embasaram a escolha da sapata como modelo de fundação superficial para o cálculo da tensão admissível do presente estudo.

2 Metodologia

Relatórios de sondagens foram solicitados às empresas de investigação geotécnica e construtoras que atuam na cidade de Teresina. Cerca de 90 foram obtidos e submetidos a um cadastro inicial através da descriminação, em planilha, das principais informações do furo: logradouro, zona da cidade, descrição do local, tipo de obra, latitude, longitude, data final, tipo de sondagem (mista ou à percussão), profundidade máxima de investigação, impenetrável SPT e nível de água. Após a análise criteriosa das informações de todas as sondagens, alguns valores discrepantes (*outliers*) foram excluídos, resultando no número final de 82 relatórios de sondagens, incluindo 15 de sondagens mistas (SPT+rotativa), dispersas por todas as zonas da cidade (Centro-Norte, Sul, Leste e Sudeste).

https://proceedings.science/p/149610?lang=pt-br

Para o cálculo da tensão admissível de cada ponto de sondagem, adotou-se um modelo hipotético de fundação superficial de sapata isolada rígida, seção quadrada com lado de 100 cm, assentada a 1,5 m de profundidade (Figura 1).



(a) (b)

Figura 1. Modelo de fundação adotado. (a) Vista em corte; (b) Vista em planta. Fonte: Autores (2019).

Admitindo-se que o bulbo de tensões atingiria uma profundidade de 2,0 metros (2B) abaixo da cota de assentamento da fundação, os valores de N_{SPT} utilizados para cálculo da tensão admissível foram a média dos valores dos índices N entre 1,5 e 3,5 m da superfície do terreno, denominado $N_{SPT\text{-}m}$.

A tensão admissível para cada um dos pontos de sondagem foi calculada a partir de cinco métodos empíricos e semiempíricos da literatura, cujas equações serão apresentadas a seguir.

A equação de Terzaghi e Peck (1967) calcula a tensão admissível em sapatas a partir do índice N_{SPT}:

$$\sigma_{adm}=440\left(\frac{N_{SPT-m}-3}{10}\right)\left(\frac{B+1}{2B}\right) \text{ (MPa)} \quad (1)$$

onde $N_{SPT\text{-}m}$ = valor médio do índice N no bulbo de tensões e B = comprimento do menor lado da sapata, em metros.

O método de Bowles (1996) foi originalmente desenvolvido por Meyerhof em 1965 e melhorado por Bowles ao acrescentar um fator de profundidade, denominado Kd:

$$\sigma_{adm}=\left(\frac{N_{SPT\text{-}m}}{0{,}05}\right)Kd \text{ (MPa)} \quad (2)$$

onde D = profundidade de assentamento, em metros; $Kd=1+0{,}33\left(\frac{D}{B}\right) \leq 1{,}33$.

Usado na prática profissional, o método de Mello (1975) não faz distinção de solo:

$$\sigma_{adm}= 0{,}1\left(\sqrt{N_{SPT\text{-}m}}-1\right) \text{ (MPa) com } 4 \leq N_{SPT\text{-}m} \leq 16 \quad (3)$$

O método de Teixeira (1996, apud CINTRA,AOKI e ALBIERO,2011) considera sapatas quadradas, apoiadas a 1,5 m de profundidade, em areia com peso específico de 18 kN/m³ e com fator de segurança 3 para calcular a tensão admissível:

$$\sigma_{adm}= 0{,}05 + (1+0{,}4B)\frac{N_{SPT-m}}{100} \text{ (MPa)} \quad (4)$$

Para a condição particular de sapatas retangulares apoiadas na superfície de terrenos puramente argilosos, o autor propõe a seguinte equação:

$$\sigma_{adm}=\frac{N_{SPT}}{50} \text{ (MPa)} \quad (5)$$

Teixeira (1997) desenvolveu, a partir de experimentos (provas de carga) realizados em solos residuais de gnaisses para a região sul de Minas, a seguinte formulação:

$$\sigma_{adm} = 44 + 15(N_{SPT-m}) \text{ (MPa) com } 4 \leq N_{SPT\text{-}m} \leq 10 \quad (6)$$

Para cada método de tensão admissível foi realizada uma análise por meio de estatística descritiva, com os cálculos de média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose, valor mínimo, valor máximo, quartil inferior, mediana e quartil superior.

Os valores de $N_{SPT\text{-}m}$, profundidade do impenetrável SPT e tensão admissível para cada sondagem foram interpoladas com o auxílio do software QGis, através de uma ferramenta do programa que realiza a interpolação pelo método IDW. Este caracteriza-se por predizer um valor para algum local sem dados utilizando-se os valores amostrados à sua volta, cujos pesos serão maiores do que os valores mais distantes, de modo que a influência de cada ponto é proporcional ao inverso da distância do nó da malha. Por fim, foram gerados mapas que permitem a visualização do comportamento dessas variáveis pelo território da cidade.

3 Resultados

Georreferenciados, os pontos foram plotados no mapa da cidade de Teresina, com o auxílio do software Qgis (Figura 2). Realizadas entre os anos de 2010 a 2019, 31 sondagens ocorreram na Zona Leste da cidade, 27 na Zona Centro-Norte, 17 na Zona Sudeste e 07 na Zona Sul. A maior ocorrência de sondagens em duas zonas (Leste e Centro-Norte) pode ser justificada pela maior quantidade de construções/reformas de empreendimentos de porte realizada na última década, as quais exigiram uma maior quantidade de investigações geotécnicas.

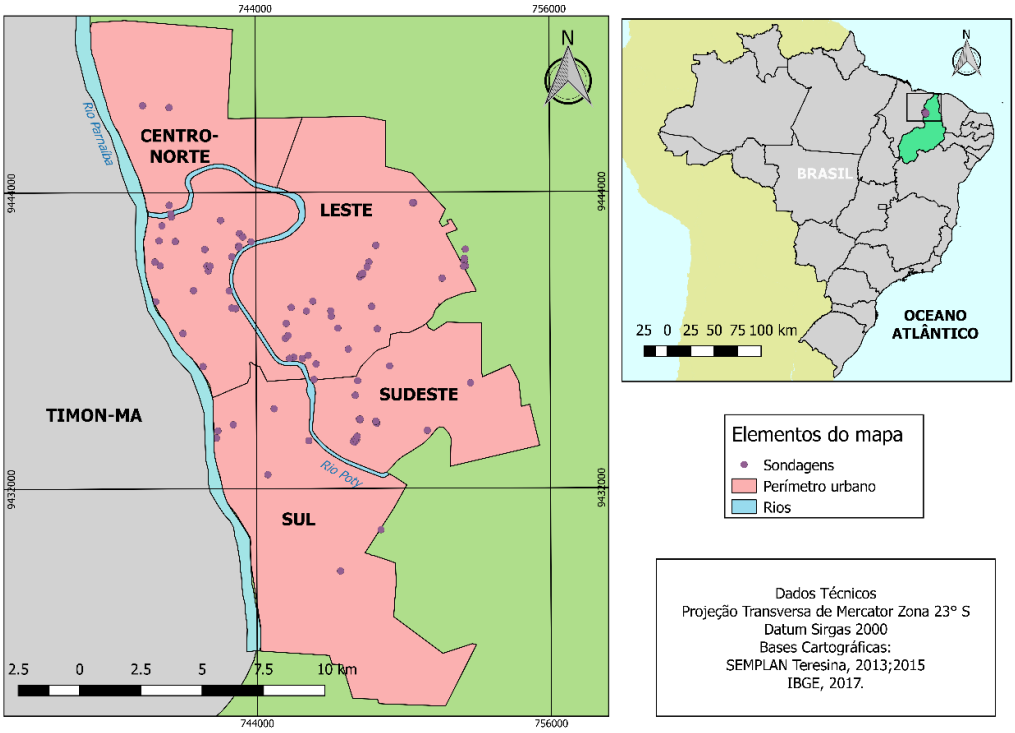


Figura 2. Localização das sondagens na cidade de Teresina-PI. Fonte: Autores (2020).

A partir da análise estatístico-descritiva, o $N_{SPT\text{-}m}$ variou de 4,33 a 29 golpes/30 cm, apresentando média de 9,33, mediana de 7,67 e desvio padrão de 5,11 golpes/30 cm. Esse valor médio pode classificar os solos arenosos como medianamente compactos e os argilosos como de média consistência. A profundidade do impenetrável variou de 1,86 a 28,60 m, com média de 9,33 m, mediana de 7,90 m e desvio padrão de 5,37 m. O índice $N_{SPT\text{-}m}$ e a profundidade do impenetrável SPT apresentaram coeficientes de variação medianamente

altos, pouco acima de 50%, porém ressalta-se a proximidade de suas medidas de tendência central (9,33 e 7,67 e 9,33 e 7,90, respectivamente).

É importante destacar a cautela a despeito da profundidade do impenetrável SPT, visto que pode provocar muitos erros de análise no projeto de obras de engenharia. Através dos relatórios das sondagens mistas (Figura 3), foi possível constatar a ocorrência de uma camada de fragmentos de arenito silicificado, matacões a blocos de rocha, com a sua espessura variando de 1,5 a 4,0 metros, graus de recuperação de 15% a 77,5%, sendo classificados como excessivamente a levemente fraturado. Tal camada pode confundir o projetista de fundações pela consideração que o impenetrável corresponde ao maciço rochoso, o que na verdade para o contexto de Teresina pode representar apenas uma camada de fragmentos de rocha, seguida de solo. Tal característica possui maior relevância para obras de grande porte, as quais possam exigir fundações profundas.

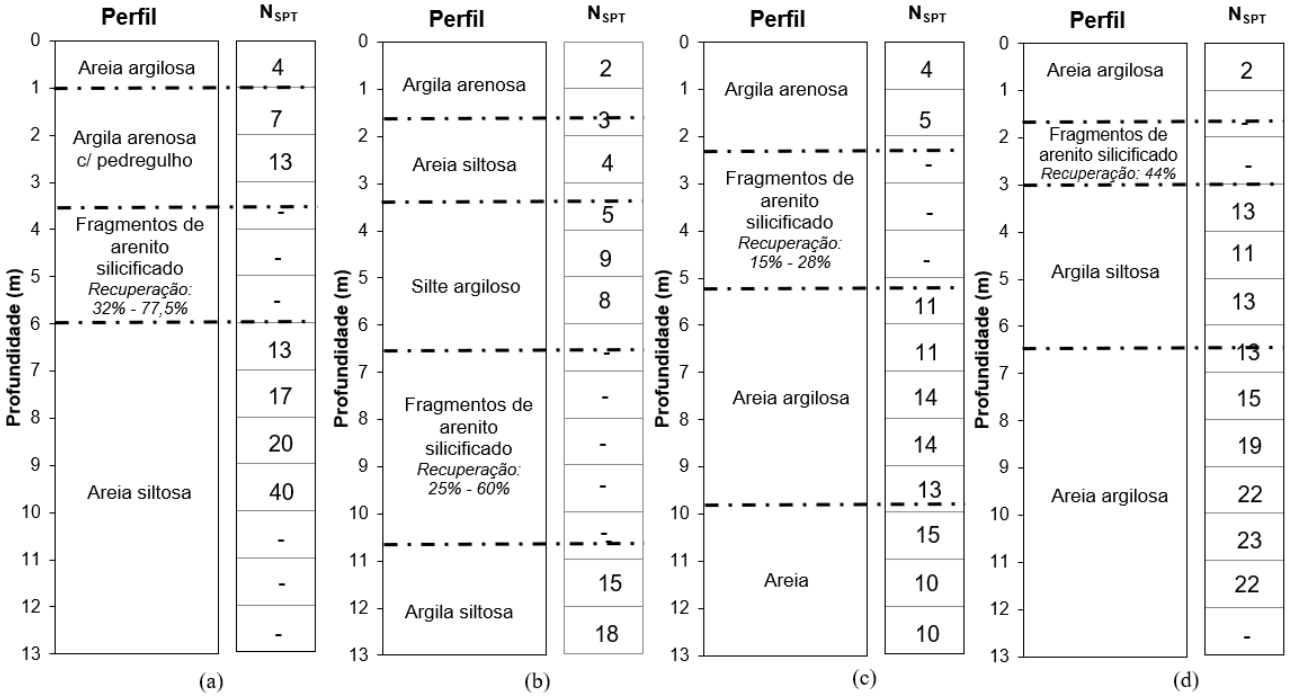


Figura 3. Exemplos de perfis geotécnicos das sondagens mistas, por zonas: (a) Leste; (b) Centro-Norte; (c) Sudeste; (d) Sul. Fonte: Autores (2020).

O método de cálculo da tensão admissível de Terzaghi e Peck (1967) apresentou variação de 58,67 a 1144 kPa, com média de 278,58 kPa, mediana de 205,33 kPa e desvio padrão de 224,98 kPa. Quanto ao método de Bowles (1996), o valor médio obtido foi de 248,21 kPa, abrangendo valores de 115,27 a 771,40 kPa, com média de 248,21 kPa, mediana de 203,93 kPa e desvio padrão de 136,01 kPa.

No método de Mello (1975), foram obtidos valores entre 100 e 300 kPa, com média de 190,36 kPa e mediana de 176,82 kPa; o desvio padrão obtido foi de 67,01 kPa. O método de Teixeira (1996) abrangiu valores de 100 a 456 kPa, com valor médio de 183,03 kPa, mediana igual a 156,33 kPa e desvio padrão de 81,04 kPa. Teixeira (1997) apresentou média de 157,42 kPa, com valores entre 104 e 194 kPa, mediana de 165,50 e desvio padrão de 36,86 kPa. Destaca-se que tais métodos apresentaram valores médios e desvios padrões menores para o modelo de análise adotado, em relação aos de Terzaghi e Peck (1967) e Bowles (1996).

Levando-se em consideração os parâmetros estatístico-descritivos, os métodos de cálculo da tensão admissível mais adequados para a discussão dos dados do presente estudo foram os de Mello (1975) e Teixeira (1997), por apresentarem coeficientes de assimetria próximos a zero, indicativo de distribuições relativamente simétricas, denotando baixa ocorrência de valores *outliers*. A variância, caracterizada por medir a dispersão dos dados em torno da média, pode ser um indicador da aplicabilidade dos métodos de tensão admissível para os dados do presente estudo, pois quanto menor seu valor mais os dados estão próximos da média, tornando-se mais adequada ao universo analisado. Além de apresentarem as menores variâncias e, consequentemente, os menores desvios-padrão, esses métodos também apresentaram os menores valores de coeficientes de

variação (35,20% e 23,41%, respectivamente), ambos abaixo de 50%, e valores próximos das medidas de tendência central – média e mediana- e que estão na metade entre os valores mínimo e máximo, demonstrando a tendência de não apresentar grande variabilidade em torno da média. A Tabela 1 apresenta os parâmetros estatístico-descritivos para as variáveis estudadas.

Tabela 1. Análise estatístico-descritiva. Fonte: Autores (2020).

Parâmetro	N_{SPT-m} (golpes/30cm)	Prof. Impenetrável SPT (m)	Tensão admissível (kPa)				
			Terzaghi e Peck (1967)	Bowles (1996)	Mello (1975)	Teixeira (1996)	Teixeira (1997)
Média	9,33	9,33	278,58	248,21	190,36	183,03	157,42
Variância	26,14	28,82	50614,72	18498,42	4490,10	6567,62	1358,42
Desvio padrão	5,11	5,37	224,98	136,01	67,01	81,04	36,86
Coeficiente de variação	54,80	57,51	80,76	54,80	35,20	44,28	23,41
Coeficiente de assimetria	1,30	1,46	1,30	1,30	0,46	1,16	-0,33
Coeficiente de curtose	1,65	2,49	1,65	1,65	-1,32	0,84	-1,57
Valor mínimo	4,33	1,86	58,67	115,27	100,00	100,00	104,00
Quartil inferior	5,00	5,65	88,00	133,00	123,61	120,00	119,00
Mediana	7,67	7,90	205,33	203,93	176,82	156,33	165,50
Quartil superior	12,00	12,05	396,00	319,20	246,41	238,33	194,00
Valor máximo	29,00	28,60	1144,00	771,40	300,00	456,00	194,00

Para a elaboração dos mapas de interpolação, adotou-se o método de Teixeira (1997). A escolha deste em detrimento ao de Mello (1975) foi motivada pelo fato da equação de Teixeira ter sido desenvolvida a partir de experimentos realizados em solos residuais, tornando-se mais adequada ao emprego para cálculo da tensão admissível do solo teresinense.

Analisando a Zona Leste da cidade, cujos valores são mais confiáveis devido à maior quantidade de dados, verifica-se que os valores de tensão admissível variaram entre 165 e 194 kPa (Figura 5), o que se justifica pelo valor do impenetrável (7,1 e 13 m, na maior parte da região, de acordo com a Figura 4b) e pelo consequente valor do índice N_{SPT-m} (entre 10 e 19,9 golpes/30 cm, como mostrado na Figura 4a).

Na Zona Centro-Norte, os valores de tensão admissível variaram entre 104 e 194 kPa com a faixa de 165 a 179 kPa abrangendo a maior parte dessa zona. Os valores do impenetrável na maior parte da região variam entre 2 e 7,1 m, configurando aparente incongruência. No entanto, o valor do índice N_{SPT-m} se mostra condizente com os valores de tensão encontrados (variando de 8,1 a 16,9 golpes/30 cm na maior parte da região). A Zona Centro-Norte possui boa confiabilidade, com quantidade de dados inferior apenas à Zona Leste.

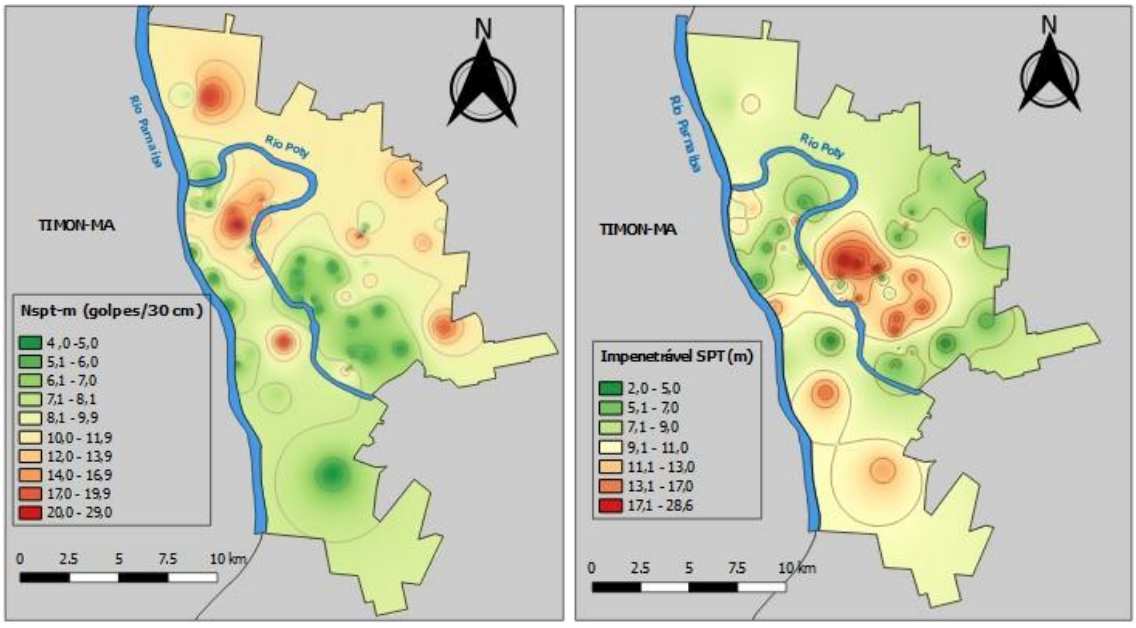
A Zona Sudeste apresentou valores de 120 a 150 kPa na maior parte de sua extensão, embora também seja possível encontrar pontos apresentando os valores extremos de 104 e 194 kPa. O impenetrável apresenta-se pouco profundo na maior parte da região (5,1 a 7 m), e o N_{SPT-m} variou de 4 a 10 golpes/30 cm. Há certa incongruência nos resultados, o que se justifica pela baixa quantidade de amostras obtidas para a região, diminuindo a confiabilidade dos resultados.

Analisando a Zona Sul da cidade, que possuía a menor quantidade de dados entre as 4, encontram-se baixos valores de tensão admissível em geral (134 a 164 kPa, na grande maioria de sua extensão), valores endossados pelos baixos índices N_{SPT-m} (entre 4 e 8,1 golpes/30 cm, em geral). O impenetrável variou entre 2 e 11 m na maior parte da Zona, com picos de 17 m.

Ao longo do curso dos rios, observou-se a predominância de baixos valores de N_{SPT-m} (entre 4 e 7 golpes/30 cm, com exceção de trecho do Rio Poty na divisa entre as zonas Centro-Norte e Leste, que apresenta um Nspt de 16,9 golpes/30 cm), o que é refletido nas baixas tensões admissíveis encontradas na maior parte

https://proceedings.science/p/149610?lang=pt-br

do entorno dos corpos d'água (variando de 104 a 149 kPa). Isso acontece devido ao fato de que tais solos são aluvionares, ocorrendo desde areias siltosas a argilas arenosas, com baixos valores de $N_{SPT\text{-}m}$ e menor capacidade de suporte em relação às outras áreas.



(a) (b)

Figura 4. Variabilidade espacial dos parâmetros das sondagens na cidade de Teresina-PI: (a) $N_{SPT\text{-}m}$; (b) Impenetrável SPT. Fonte: Autores (2020).

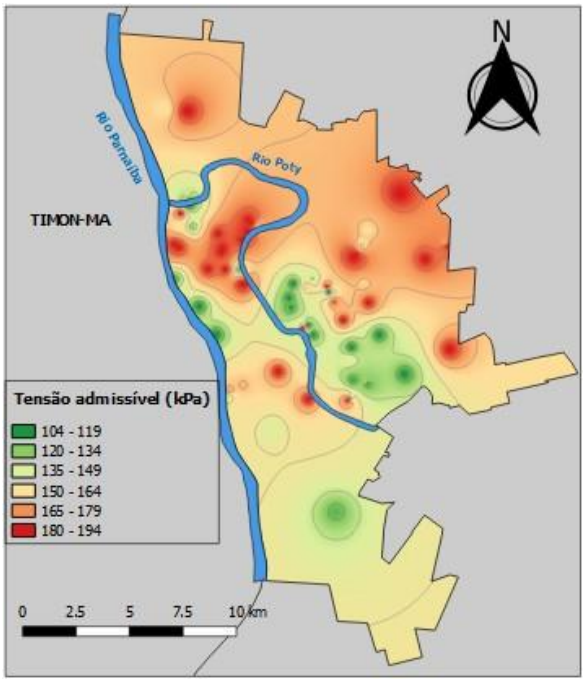


Figura 5. Variabilidade espacial da tensão admissível na cidade de Teresina-PI. Fonte: Autores (2020).

4 Conclusão

Foi possível verificar que, no geral, a cidade de Teresina possui solos com boa capacidade de suporte em pequenas profundidades (1,5m), exceto ao longo do curso dos rios, devido aos solos aluvionares, fato que justifica a grande ocorrência das fundações superficiais já analisada pela comunidade geotécnica local. Destaque para a camada de fragmentos de arenito silicificado que ocorre em várias áreas da cidade, a qual pode afetar no projeto de obras. A Zona Centro-Norte apresentou valores de tensão admissível maiores que as demais.

Os mapas geotécnicos gerados que relacionam a tensão admissível em diversas áreas da cidade para um modelo de sapata específico podem ser úteis na prática da engenharia como base para verificação de autenticidade da tensão admissível calculada, análise de laudos de sondagens realizadas e estudos de viabilidade, por fornecer uma noção quantitativa do comportamento geotécnico dos solos. É importante ressaltar que, apesar de a interpolação IDW, utilizada para gerar os mapas, obter valores onde não há dados isso não elimina a necessidade de realização de investigações geotécnicas antes da realização de um empreendimento, sendo indispensável a realização da sondagem SPT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bowles, Joseph E.. *Foundation Analysis and Design.* Cingapura: Mcgrawn-hill, 1996.

Castro, Petrus Tabatinga; Silva, Sarah Costa; Amancio, Luciana Barbosa. Mapeamento dos Tipos de Fundações de Edificações Executadas na Cidade de Teresina-PI. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18., 2016, Belo Horizonte. *Anais...* . Belo Horizonte: Abms, 2016. p. 1 - 7.

Coutinho, R. Q.; Oliveira, J. T. R. e Oliveira, A. T. J. (1998). Geotechnical Site Characterization of Recife Soft Clays. In: ISC'98 - I International Symposium on Site Characterization, Atlanta, v. 2. p. 1001-1006.

Cintra, José Carlos A.; Aoki, Nelson; Albiero, José Henrique. *Fundações diretas - projeto geotécnico.* São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

Cunha, Leonardo do Nascimento. Análise Comparativa de Fundação Tipo Sapata e Tubulão em um mesmo Perfil Geotécnico na Cidade de Teresina. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18., 2016, Belo Horizonte. *Anais...* . Belo Horizonte: Abms, 2016. p. 1 - 8.

Quaresma, Arthur Rodrigues et al. Investigações Geotécnicas. In: Hachich, Waldemar et al. *Fundações: Teoria e Prática.* 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. Cap. 3, p. 119,120,121.

Mello, V.F.B. Deformações como base fundamental de escolha de fundação. *Geotecnia,* SPG, nº 12, fev-mar, p.55-75,1975.

Teixeira, Cornélio Zampier. *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.* 1997. 272 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

Terzaghi, K.; Peck, R. B. *Soil mechanics in engineering practice.* 2nd ed. New York, J. Wiley, 1967.

https://proceedings.science/p/149610?lang=pt-br