CENTRO UNIVERSITÁRIO FG - UNIFG

ENGENHARIA CIVIL

LETICIA FERREIRA CRUZ

RENATA XAVIER COUTO BOA SORTE

ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CARGA DE SAPATAS POR MEIO DA TEORIA DE TERZAGHI

Guanambi -Ba

2022

LETICIA FERREIRA CRUZ

RENATA XAVIER COUTO BOA SORTE

ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CARGAS DE SAPATAS POR MEIO DA TEORIA DE TERZAGHI

Artigo científico apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário FG – UNIFG, como requisito de avaliação da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II.

Orientador: Eng. Civil Matheus Figueiredo Teixeira, Esp.

Coorientador: Eng. Civil Gustavo Rodrigues Vieira.

Guanambi -Ba

2022

SUMÁRIO

RESUMO 4
ABSTRACT 5
INTRODUÇÃO 6
MATERIAL E MÉTODOS 7
LOCAL DE ESTUDO 7
CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO LOCAL DE ESTUDO. 7
ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CARGA DAS SAPATAS PELA TEORIA DE TERZAGHI 11
RESULTADOS E DISCUSSÃO 20
CONSIDERAÇÕES FINAIS 23
REFERÊNCIAS 24

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar, a Deus e nosso Senhor Jesus Cristo que me deu saúde, força e fez com que meus objetivos fossem alcançados durante todos os meus anos de estudos. Ao meu pai Sebastião e minha mãe Luseni (*in memorian*), por toda a educação, carinho, amor, força e dedicação que me fizeram crescer como pessoa e profissional. Ao meu esposo Rangel e minha filha Rayka, por toda a compreensão, ajuda, carinho, amor e apoio que me deram durante essa jornada. Aos meus irmãos Leilane e Kleber e minha sogra Iracema por todo apoio, carinho e cuidado que teve comigo sempre. Aos meus colegas de graduação, pelos momentos de estudos, alegria e descontração. Agradeço o Eng. Murilo, Eng. Luís, e os demais colegas da empresa, pela oportunidade de estágio e por todo o conhecimento que foi transmitido. Ao Prof. Matheus pela orientação, apontando o caminho a seguir para a elaboração desse trabalho. Ao Engenheiro Gustavo, por aceitar ser meu coorientador e contribuir bastante para a finalização do trabalho. Aos professores Mauricio, Otacisio, Humberto por todo o conhecimento transmitido ao longo desses anos.

Leticia.

Agradeço primeiramente a Deus, quem me deu a oportunidade, coragem e força de vontade para superar todos os obstáculos. Aos meus pais Secundo Farias do Couto e Irani Francisca Xavier (*in memoriam*), que sempre serviram de base e inspiração. Ao meu esposo Hugo Boa Sorte e aos meus filhos Micaelle C. Boa Sorte, Victor Hugo C. Boa Sorte e Pedro Luca C. Boa Sorte, por todo apoio e paciência obtidos nas horas ausentes. Aos meus familiares, em especial meus irmãos. Aos meus colegas de graduação, por todos momentos de estudos e conhecimentos compartilhados. Em especial a minha colega e amiga Leticia Ferreira, companheira e minha dupla de TCC, por todo apoio e companheirismo. Aos meus professores do curso que através dos seus ensinamentos me ajudaram a concluir esse trabalho. Aos professores Matheus Figueredo, Mauricio Prado, Humberto Laranjeiras e Otacísio Gomes, por estarem sempre presentes tirando nossas dúvidas. Por fim, quero agradecer a todos que de alguma forma direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

Renata.

ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CARGAS DE SAPATAS POR MEIO DA TEORIA DE TERZAGHI

Leticia Ferreira Cruz[1], Renata Xavier Couto Boa Sorte[2], Matheus Figueiredo Teixeira[3], Gustavo Rodrigues Vieira[4]

[1] Graduanda do curso de Engenharia Civil. Centro Universitário FG – UNIFG.
[2] Graduanda do curso de Engenharia Civil. Centro Universitário FG – UNIFG.
[3] Docente do curso de Engenharia Civil. Centro Universitário FG – UNIFG.
[4] Bacharel em Engenharia Civil.

RESUMO

Este trabalho constitui um estudo de caso da verificação da capacidade de carga para fundações superficiais de uma edificação comercial de pequeno porte que foram executadas. Os solos foram classificados como argila rija e argila dura a partir da sondagem SPT realizada no terreno. As capacidades de cargas foram calculadas através da Teoria de Terzaghi, e os parâmetros do solo foram obtidos através de correlações de teóricos com o Nspt da camada de assentamento da fundação e tabelas referenciadas com os respectivos valores. Através do fator de segurança global foi possível constatar se os elementos executados foram dimensionados corretamente. Desta forma observou-se a importância de ensaios para o reconhecimento do subsolo da edificação para o dimensionamento da fundação e a segurança das construções.

Palavras-chave: Capacidade. Carga. Fundações. Sapatas. Terzaghi.

Endereço para correspondência: Avenida Deolinda Martins, n° 934 – Bairro: Santo Antônio – Guanambi, Bahia. CEP: 46430-000
Endereço eletrônico: letyrayka@gmail.com

ABSTRACT

This work constitutes a case study of the verification of the load capacity for superficial foundations of a small commercial building that were executed. Soils were classified as hard clay and hard clay from the SPT survey carried out in the field. The load capacities were calculated using Terzaghi's Theory, and the soil parameters were obtained through theoretical correlations with the Nspt of the foundation layer and referenced tables with the respective values. Through the global safety factor, it was possible to verify if the executed elements were correctly dimensioned. In this way, it was observed the importance of tests for the recognition of the building's subsoil for the dimensioning of the foundation and the safety of the constructions.

Keywords: Capacity. Charge. Foundations. Shoes. Terzaghi

INTRODUÇÃO

A fundação é parte importante de uma edificação, sendo ela o alicerce que transmite as cargas ao solo de maneira que a estrutura se mantenha estável e livre de certas patologias ao longo dos anos. Fundações são elementos estruturais que recebem cargas transferidas das edificações e distribuem no solo, de uma forma que diminuam os riscos de recalque, não ocorra rompimento do solo, sejam seguras e economicamente viáveis (BOTELHO, 2015).

Segundo Alonso (1991), as fundações devem ser dimensionadas e executadas com a finalidade de garantir condições mínimas de segurança, funcionalidade e durabilidade, sendo que estas estão sob ações das cargas de serviços. Portanto o bom desempenho da fundação está baseado no correto dimensionamento, no controle e qualidade da execução do projeto. Na execução de obras de fundação é de extrema importância conhecer as características do solo em questão, bem como o seu comportamento antes e depois da construção da edificação (GOMES, ARAÚJO E AYRES, 2020, p. 2).

Segundo a NBR 6122 (ABNT, 2019, p. 5), fundação superficial é o “Elemento de fundação cuja base está assentada em profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação, recebendo aí as tensões distribuídas que equilibram a carga aplicada”. É necessário que ao se projetar uma fundação seja levado em consideração a profundidade de assentamento da base da fundação, os recalques admissíveis e a carga de ruptura, (AGUIAR, 2025, p. 3). A capacidade de carga de uma fundação superficial é a carga que aplicada sobre a fundação provoca a ruptura do solo. Karl Terzaghi foi o precursor no desenvolvimento da capacidade de carga em um sistema sapata-solo, ou seja, o comportamento da estrutura de fundação e do solo respectivamente, quando aplica-se uma carga.

Neste trabalho aborda-se o cálculo da capacidade de cargas de sapatas já executadas em uma edificação de pequeno porte, associando a teoria de Terzaghi com resultados de sondagens a percussão executadas no terreno, avaliando através do fator de segurança global se os elementos executados foram dimensionados corretamente e contextualizando a importância do reconhecimento do solo ao se projetar um elemento estrutural.

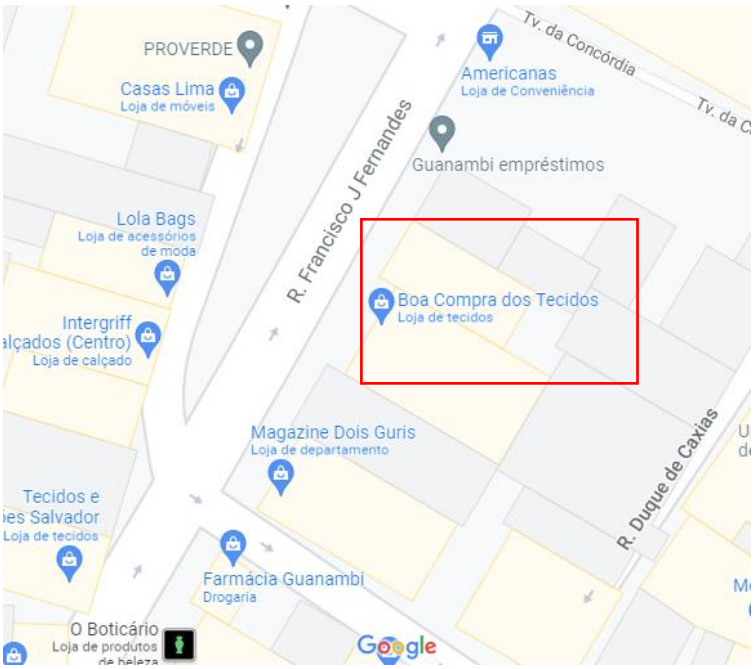
MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia presente neste trabalho fundamenta-se na utilização de dados das características de determinado solo da cidade de Guanambi – Ba, através do perfil geológico do solo caracterizado a partir da Sondagem SPT, aplicando a teoria de Terzaghi para a capacidade de carga de sapatas

LOCAL DE ESTUDO

A edificação estudada se localiza na cidade de Guanambi situada no sudoeste do estado da Bahia. Trata-se de uma edificação comercial que possui dois pavimentos, sendo que o 1º pavimento (térreo) é um local de acesso dos clientes aos produtos e o 2° pavimento (1° andar) é um mezanino que será utilizado para deposito, com acesso somente para funcionários. A área de estudo está localizada no bairro centro do município e está representado na figura 1.

Figura 1 – Localização do estudo – bairro Centro



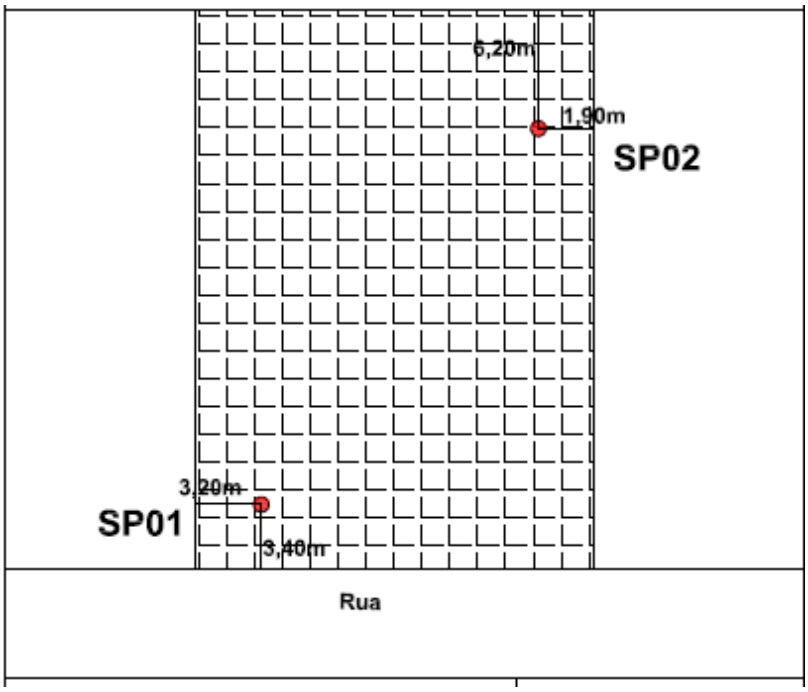
Fonte: Adaptado do Google Maps, 2022.

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO LOCAL DE ESTUDO.

Os dados do local da obra e das características do solo foram fornecidos pela empresa essa que foi responsável pela sondagem SPT realizada no terreno. O terreno

possui uma área total de 270 m², onde foram locados e realizados dois furos de sondagem SP01 e SP02. O croqui de locação dos furos SP01 e SP02 é apresentado a seguir na figura 2.

Figura 2 – Croqui de locação esquemática dos furos.

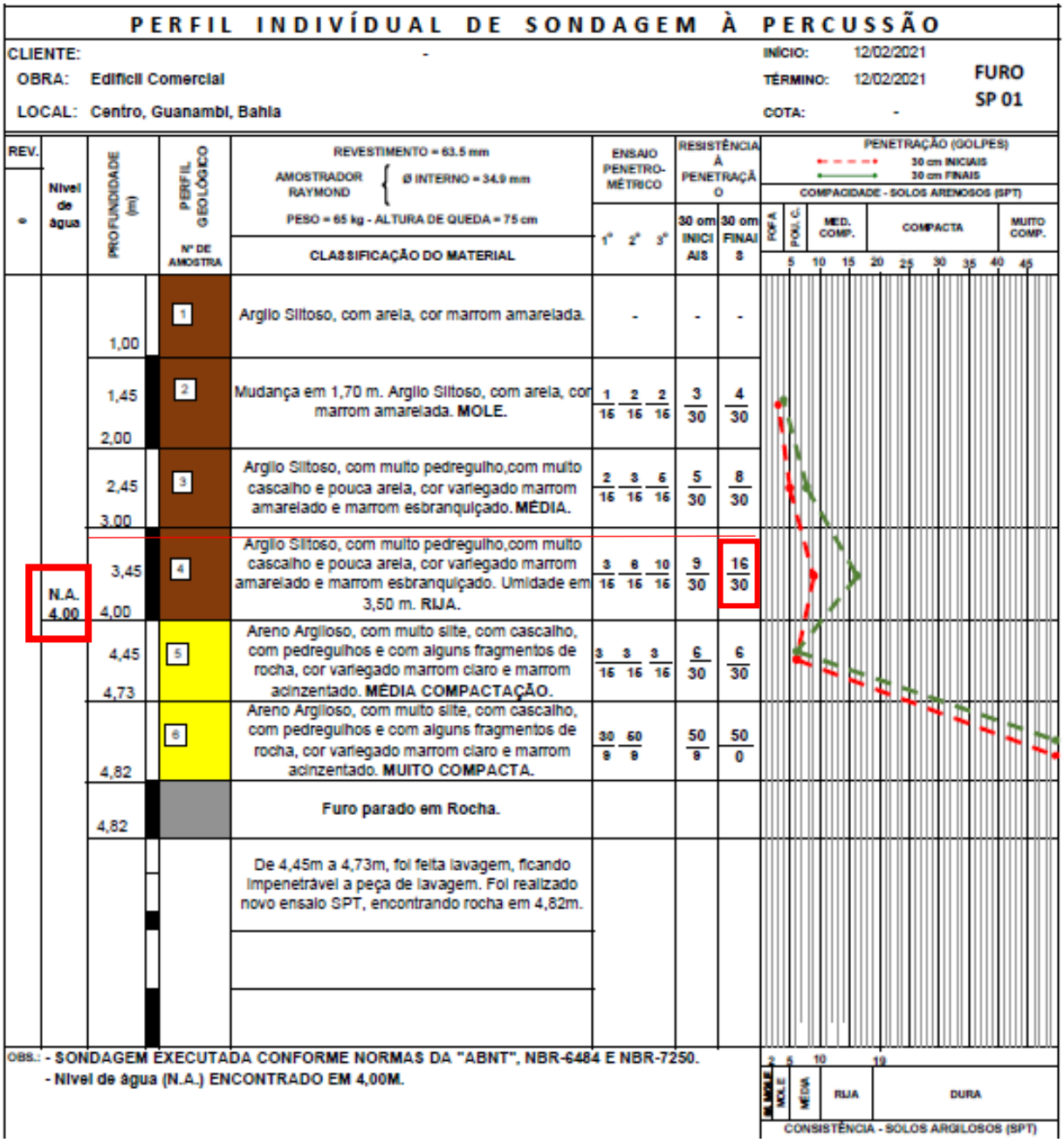


Fonte: Geo Geologia e Engenharia, 2021.

A realização da sondagem SPT é regulamentada pela ABNT NBR 8036: 1983 – Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios, ABNT NBR 6484: 2020 – Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio, ABNT NBR 7250: 1982 – Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos.

As amostras de solos retiradas dos furos foram caracterizadas e descritas no perfil de sondagem individual a percussão. A figura 3 ilustra o ensaio SPT referente ao SP01 localizado na frente do terreno.

Figura 3 - SPT do furo SP01



PERFIL INDIVÍDUAL DE SONDAGEM À PERCUSSÃO

CLIENTE: -
OBRA: Edificil Comercial
LOCAL: Centro, Guanambi, Bahia
INÍCIO: 12/02/2021
TÉRMINO: 12/02/2021
COTA: -
FURO SP 01

REVESTIMENTO = 63.5 mm
AMOSTRADOR RAYMOND { Ø INTERNO = 34.9 mm
PESO = 65 kg - ALTURA DE QUEDA = 75 cm

REV.	Nível de água	PROFUNDIDADE (m)	PERFIL GEOLÓGICO / Nº DE AMOSTRA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL	ENSAIO PENETRO-MÉTRICO 1º	2º	3º	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO 30 cm INICIAIS	30 cm FINAIS
		1,00	1	Argilo Siltoso, com areia, cor marrom amarelada.	-			-	-
		1,45 / 2,00	2	Mudança em 1,70 m. Argilo Siltoso, com areia, cor marrom amarelada. **MOLE.**	1/15	2/15	2/15	3/30	4/30
		2,45 / 3,00	3	Argilo Siltoso, com muito pedregulho,com muito cascalho e pouca areia, cor variegado marrom amarelado e marrom esbranquiçado. **MÉDIA.**	2/15	3/15	6/15	5/30	8/30
	N.A. 4,00	3,45 / 4,00	4	Argilo Siltoso, com muito pedregulho,com muito cascalho e pouca areia, cor variegado marrom amarelado e marrom esbranquiçado. Umidade em 3,50 m. **RIJA.**	3/15	8/15	10/15	9/30	16/30
		4,45 / 4,73	5	Areno Argiloso, com muito silte, com cascalho, com pedregulhos e com alguns fragmentos de rocha, cor variegado marrom claro e marrom acinzentado. **MÉDIA COMPACTAÇÃO.**	3/15	3/15	3/15	6/30	6/30
		4,82	6	Areno Argiloso, com muito silte, com cascalho, com pedregulhos e com alguns fragmentos de rocha, cor variegado marrom claro e marrom acinzentado. **MUITO COMPACTA.**	30/9	60/9		50/9	50/0
		4,82		**Furo parado em Rocha.**					
				De 4,45m a 4,73m, foi feita lavagem, ficando impenetrável a peça de lavagem. Foi realizado novo ensaio SPT, encontrando rocha em 4,82m.					

PENETRAÇÃO (GOLPES): 30 cm INICIAIS; 30 cm FINAIS
COMPACIDADE - SOLOS ARENOSOS (SPT): FOFA; POU. C.; MED. COMP.; COMPACTA; MUITO COMP.
5 10 15 20 25 30 35 40 45

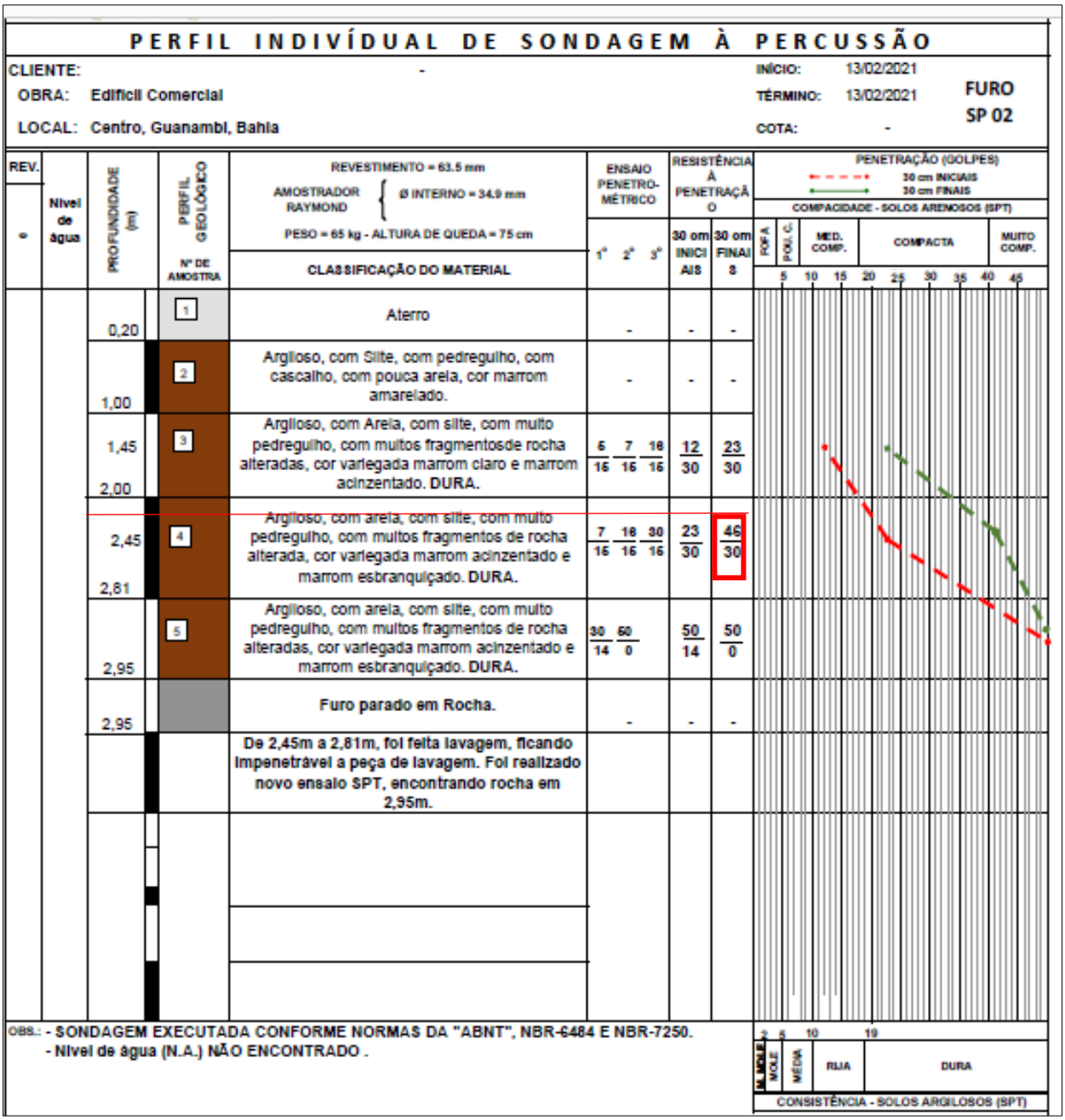
OBS.: - SONDAGEM EXECUTADA CONFORME NORMAS DA "ABNT", NBR-6484 E NBR-7250.
- Nível de água (N.A.) ENCONTRADO EM 4,00M.

2 5 10 19
MUITO MOLE; MOLE; MÉDIA; RIJA; DURA
CONSISTÊNCIA - SOLOS ARGILOSOS (SPT)

Fonte: Geo Geologia e Engenharia, 2021.

A Figura 4 apresenta o perfil de sondagem do ensaio de SPT referente ao furo SP02 localizado ao fundo do terreno.

Figura 4 – SPT do furo SP02



PERFIL INDIVÍDUAL DE SONDAGEM À PERCUSSÃO

CLIENTE: -
OBRA: Edificil Comercial
LOCAL: Centro, Guanambi, Bahia

INÍCIO: 13/02/2021
TÉRMINO: 13/02/2021
COTA: -

FURO SP 02

REVESTIMENTO = 63.5 mm
AMOSTRADOR RAYMOND { Ø INTERNO = 34.9 mm
PESO = 65 kg - ALTURA DE QUEDA = 75 cm

REV.	Nível de água	PROFUNDIDADE (m)	PERFIL GEOLÓGICO / Nº DE AMOSTRA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL	ENSAIO PENETRO-MÉTRICO 1°	2°	3°	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO 30 cm INICIAIS	30 cm FINAIS
		0,20	1	Aterro	-			-	-
		1,00	2	Argiloso, com Silte, com pedregulho, com cascalho, com pouca areia, cor marrom amarelado.	-			-	-
		1,45 / 2,00	3	Argiloso, com Areia, com silte, com muito pedregulho, com muitos fragmentosde rocha alteradas, cor variegada marrom claro e marrom acinzentado. DURA.	5/15	7/15	18/15	12/30	23/30
		2,45 / 2,81	4	Argiloso, com areia, com silte, com muito pedregulho, com muitos fragmentos de rocha alterada, cor variegada marrom acinzentado e marrom esbranquiçado. DURA.	7/15	18/15	30/15	23/30	46/30
		2,95	5	Argiloso, com areia, com silte, com muito pedregulho, com muitos fragmentos de rocha alteradas, cor variegada marrom acinzentado e marrom esbranquiçado. DURA.	30/14	50/0		50/14	50/0
		2,95		Furo parado em Rocha.	-			-	-
				De 2,45m a 2,81m, foi feita lavagem, ficando impenetrável a peça de lavagem. Foi realizado novo ensaio SPT, encontrando rocha em 2,95m.					

PENETRAÇÃO (GOLPES): 30 cm INICIAIS; 30 cm FINAIS
COMPACIDADE - SOLOS ARENOSOS (SPT): FOFA, POU. C., MED. COMP., COMPACTA, MUITO COMP.
5 10 15 20 25 30 35 40 45

OBS.: - SONDAGEM EXECUTADA CONFORME NORMAS DA "ABNT", NBR-6484 E NBR-7250.
- Nível de água (N.A.) NÃO ENCONTRADO .

2 5 10 19
MOLE, MOLE, MÉDIA, RIJA, DURA
CONSISTÊNCIA - SOLOS ARGILOSOS (SPT)

Fonte: Geo Geologia e Engenharia, 2021.

As amostras foram coletadas e imediatamente acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados. E foram posteriormente descritos pelo geólogo, usando o item 5.2.7.1 da NBR 6484/2020 - Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Usando como referência a NBR 6502/95 - Rochas e solos, e NBR 7250/82 - Identificação e descrição de amostras de solo obtidas em sondagem de simples reconhecimento dos solos.

ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CARGA DAS SAPATAS PELA TEORIA DE TERZAGHI

Existem muitas fórmulas teóricas para se determinar a capacidade de carga de uma fundação superficial, ou seja, sua tensão de ruptura. Por ser uma forma simples e muito divulgada a capacidade de carga foi estimada através do método teórico do consagrado pai da mecânica dos solos e da engenharia geotécnica Karl Von Terzaghi (1943). A teoria de Terzaghi considera que a capacidade de carga do solo depende da resistência e do tipo do solo, da fundação e de sua profundidade de assentamento.

Segundo Velloso e Lopes (2011, p. 59) Terzaghi define como fundação superficial:

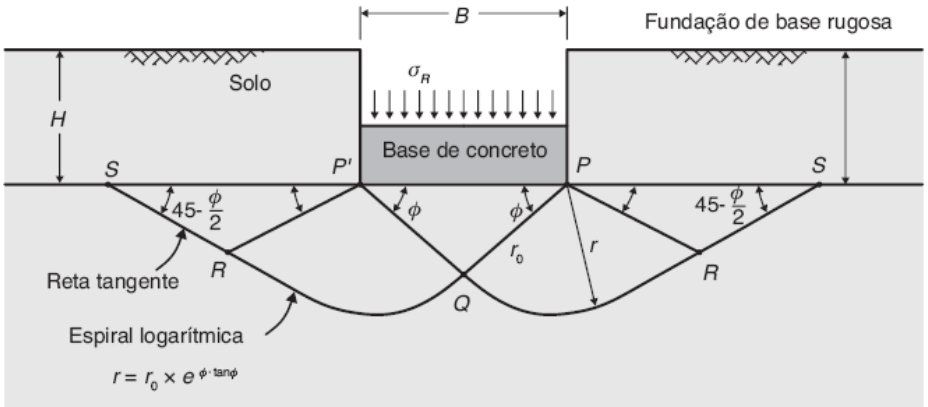
> Para Terzaghi (1943), uma fundação superficial é aquela cuja largura 2b é igual ou maior que a profundidade D da base da fundação. Satisfeita essa condição, pode-se desprezar a resistência o cisalhamento do solo acima do nível da base da fundação, substituindo-o por uma sobrecarga q = y D. Com isso, o problema passa a ser o de uma faixa (sapata corrida) de largura 2b, carregada uniformemente, localizada na superfície horizontal de um maciço semi-infinito.

Terzaghi propôs sua hipótese baseada em três regiões.

- *PQP'* – Zona em equilíbrio (solidária à base da fundação);
- *PQR* – Zona no estado plástico;
- *PRS* – Zona no estado elástico.

Essas três fases são representadas pela figura 05 a seguir.

Figura 5 - Hipótese de Terzaghi



Fonte: Albuquerque e Garcia, (2020).

A equação da capacidade de carga de Terzaghi é apresentada na Equação (1) a seguir:

$$\boldsymbol{\sigma_r = c.N_c + \gamma.D.N_q + \gamma.\frac{B}{2}.N_\gamma} \qquad \boldsymbol{Eq.(1)}$$

Onde,

c → coesão do solo;

B→ menor dimensão da fundação;

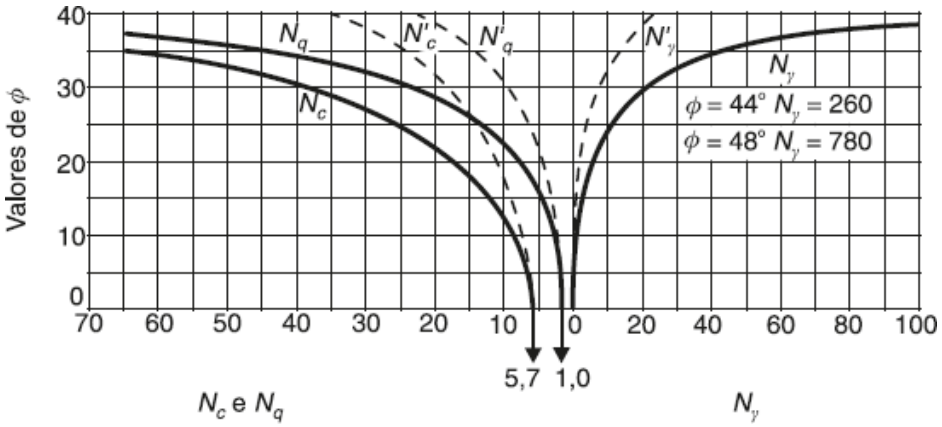
γ→ peso especifico efetivo do solo;

D→ profundidade de assentamento da fundação;

Nc, Nq e Nγ→ fatores de capacidade de carga, que em sequência são as contribuições da coesão, capacidade de carga e peso específico do solo (bulbo de tensões) para a capacidade de carga última.

A figura 6 a seguir apresenta o ábaco para a determinação dos fatores de capacidade de carga Nc, Nq e Nγ, para a determinação da capacidade de carga dos solos pelo método de Terzaghi. O ábaco é utilizado para solos de ruptura generalizada (areias compactas, argilas rijas e duras), representado pelos valores de linhas contínuas. Para solos de ruptura local (areias fofas, argilas médias e moles), utilizar os valores representados pelas linhas tracejadas.

Figura 6 - Fatores de capacidade de carga (Terzaghi, 1943)



Fonte: Albuquerque e Garcia, (2022)

Os valores de capacidade de carga também podem ser obtidos através da tabela que foi formulada a partir do ábaco de Terzaghi (1943). Os coeficientes de capacidade de carga dependem do ângulo de atrito (∅) do solo e são apresentados na Tabela 1a seguir:

Tabela 1 – Coeficientes de capacidade de carga para ruptura geral - Terzaghi

$\emptyset^{(°)}$	N_c	N_q	N_γ	$\emptyset^{(°)}$	N_c	N_q	N_γ
0	5,70	1,00	0,00	26	27,09	14,21	9,84
1	6,00	1,10	0,01	27	29,24	15,90	11,60
2	6,30	1,22	0,04	28	31,61	17,81	13,70
3	6,62	1,35	0,06	29	34,24	19,98	16,18
4	6,97	1,49	0,10	30	37,16	22,46	19,13
5	7,34	1,64	0,14	31	40,41	25,28	22,65
6	7,73	1,81	0,20	32	44,04	28,52	26,87
7	8,15	2,00	0,27	33	48,09	32,23	31,94
8	8,60	2,21	0,35	34	52,64	36,50	38,04
9	9,09	2,44	0,44	35	57,75	41,44	45,41
10	9,61	2,69	0,56	36	63,53	47,16	54,36
11	10,16	2,98	0,69	37	70,01	53,80	65,27
12	10,76	3,29	0,85	38	77,50	61,55	78,61
13	11,41	3,63	1,04	39	85,97	70,61	95,03
14	12,11	4,02	1,26	40	95,66	81,27	115,31
15	12,86	4,45	1,52	41	106,81	93,85	140,51
16	13,68	4,92	1,82	42	119,67	108,75	171,99
17	14,60	5,45	2,18	43	134,58	126,50	211,56
18	15,12	6,04	2,59	44	151,95	147,74	261,60
20	17,69	7,44	3,64	46	196,22	204,19	407,11
21	18,92	8,26	4,31	47	224,55	241,80	512,84
22	20,27	9,19	5,09	48	258,28	287,85	650,67
23	21,75	10,23	6,00	49	298,71	344,63	831,99
24	23,76	11,40	7,08	50	347,50	415,14	1072,80
25	25,13	12,72	8,34				

Fonte: Adaptada de Albuquerque e Garcia, 2020.

A partir dos resultados da sondagem SPT do furo SP01 e SP02, o solo foi classificado como argila rija e argila dura. Assim sendo o solo em questão apresenta um mecanismo de ruptura geral ou generalizada, onde é caracterizado por um mecanismo de ruptura bem definido em que a superfície de deslizamento vai de um bordo da fundação

à superfície do terreno. (Velloso e Lopes, 2011, p. 56). Para a realização dos cálculos foram utilizados os coeficientes de capacidade de carga para ruptura geral.

Posteriormente a Teoria de Terzaghi foi também adaptada para outros tipos geométricos de fundações, sapatas quadradas, sapatas retangulares e sapatas circulares apoiadas também a uma baixa profundidade do solo ($H < B$). Para o cálculo desses elementos isolados, deve-se acrescentar os fatores de forma à expressão representada pela Equação (2).

$$\boldsymbol{\sigma_r = S_c . c . N_c + S_q . \gamma . D . N_q + S_\gamma . \gamma . \frac{B}{2} . N_\gamma} \qquad \boldsymbol{Eq.(2)}$$

Onde,

Sc, Sq e Sγ→ Fatores de forma.

Para os cálculos realizados foram utilizadas as equações com os fatores de forma para as sapatas em formatos quadrados e retangulares.

Os fatores de forma utilizados nas equações acima são apresentados a seguir na Tabela 2.

Tabela 2 – Fatores de forma

Forma da sapata	**Fatores de forma**		
	$\boldsymbol{S_c}$	$\boldsymbol{S_q}$	$\boldsymbol{S_\gamma}$
Corrida	1,0	1,0	1,0
Quadrada	1,3		0,8
Circular	1,3		0,6
Retangulares (L>B e L< 5B)	1,1		0,9

Fonte: Adaptada Albuquerque e Garcia, 2020.

A sapata quadrada foi calculada a partir da Equação (3) a seguir, já com os respectivos valores de fatores de forma:

$$\boldsymbol{\sigma_r = 1,3 . c . N_c + \gamma . D . N_q + 0,8 . \gamma . \frac{B}{2} . N_\gamma} \qquad \boldsymbol{Eq.(3)}$$

A sapata retangular foi calculada a partir da Equação (4) a seguir, já com os respectivos valores de fatores de forma:

$$\boldsymbol{\sigma_r = 1,1 . c . N_c + \gamma . D . N_q + 0,9 . \gamma . \frac{B}{2} . N_\gamma} \qquad \boldsymbol{Eq.(4)}$$

De acordo com Gomes, Araújo e Ayres (2020 p. 2) “Em projetos de fundações superficiais é frequente a estimativa de recalques e tensão admissível do solo a partir do Nspt (Índice de resistência a penetração) de sondagens a percussão (Sondagem SPT)”. Quando não é possível ter acesso aos resultados de ensaio de laboratório é possível determinar alguns parâmetros a partir das seguintes correlações.

A determinação da coesão do solo foi realizada a partir da relação apresentada por Teixeira e Godoy (1996), que sugerem a seguinte relação com o Nspt, representada na equação 5 a seguir.

$$\boldsymbol{c = 10.N_{spt} \quad (Kpa)} \qquad \boldsymbol{Eq.(5)}$$

Para determinar o ângulo de atrito do solo foi utilizado as equações apresentadas por CINTRA, AOKI E ALBIERO, 2011, p. 45, que correlaciona o ângulo de atrito não drenado com o índice de resistência penetração do SPT.

$$\boldsymbol{de\ Godoy\ (1983) \rightarrow \emptyset = 28° + 0,4.N_{spt}} \qquad \boldsymbol{Eq.(6)}$$

$$\boldsymbol{de\ Teixeira\ (1996) \rightarrow \emptyset = \sqrt{20.N_{spt}} + 15°} \qquad \boldsymbol{Eq.(7)}$$

O ângulo de atrito do solo pode ser obtido através de tabelas que correlaciona a descrição do solo, a compacidade / consistência. A tabela 3 a seguir apresenta esses valores referentes aos solos argilosos.

Tabela 3 – Ângulo de Atrito interno solos argilosos

Descrição do Solo	Compacidade / Consistência	Ângulo de Atrito (°)
Argila	Mole (SPT ≤ 5)	17,5°
Argila	Média (5<SPT≤10)	20º
Argila	Rija (10<SPT≤10)	25º
Argila	Dura (19< SPT)	30º
Argila	Conforme SPT	-

Fonte: Adaptada, TQS Docs, 2022.

O cálculo da tensão admissível foi realizado a partir do resultado da sondagem SPT do furo SP01, através do Nspt das camadas do solo aplicado na equação 8 a seguir:

$$\boldsymbol{\sigma_{adm} = 0,02.N \quad (MPa)} \qquad \boldsymbol{Eq.(8)}$$

Válido para solos $5 \leq N \leq 20$.

Para a estimativa da tensão admissível do solo caracterizado no furo SP02, foram adotadas cargas características para serem aplicadas na fundação, relacionadas com a dimensão da sapata.

Em seu livro Prospecção Geotécnica do Subsolo (1979) Maria José C. Porto A. de Lima publicou tabelas que relaciona o índice de resistência a penetração (SPT) com taxas admissíveis para solos argilosos e solos arenosos. A tabela 4 a seguir apresenta a relação para solos argilosos.

Tabela 4 – Relações entre índice de Resistencia a Penetração SPT com as Taxas Admissíveis para solos argilosos.

Argila	**N° de Golpes SPT**	**Tensões Admissíveis (Kg / cm²)**	
		Sapata Quadrada	**Sapata Contínua**
Muito Mole	≤ 2	< 0,30	< 0,20
Mole	3 - 4	0,33 – 0,60	0,22 – 0,45
Média	5 - 8	0,60 – 1,20	0,45 – 0,90
Rija	9 - 15	1,20 – 2,40	0,90 – 1,80
Muito Rija	16 - 10	2,40 – 4,80	1,60 – 3,60
Dura	> 30	> 4,80	> 3,60

Fonte: Adaptada Lima, 1979.

Para a estimativa do peso específico do solo (γ), foi utilizado a tabela 2.4 de Godoy (1972) que apresenta valores aproximados e relacionados com o Nspt para solos argilosos.

Tabela 5 – Peso específico de solos argilosos

N_{spt}	**Consistência**	**Peso específico (kN/m³)**
≤ 2	Muito Mole	13
3 – 5	Mole	15
6 – 10	Média	17
11 – 19	Rija	19

Continuação da Tabela 5 – Peso específico dos solos argilosos		
≥ 20	Dura	21

Fonte: Adaptada Godoy, 1972 apud Cintra, Aoki e Albiero, 2011.

Segundo a NBR 6122 (2019) a segurança da fundação pode ser realizada com valores característicos e fator de segurança global ou com valores de cálculo, obtidos pela aplicação de coeficientes de ponderação aos valores característicos. Para cada sapata da edificação foi calculado um fator de segurança e a partir dele foi verificado se o mesmo está de acordo com a norma. A seguir na Tabela 6 é representado os fatores de segurança globais mínimos de acordo com a NBR 6122 (2019):

Tabela 6 – Fatores de segurança globais mínimos

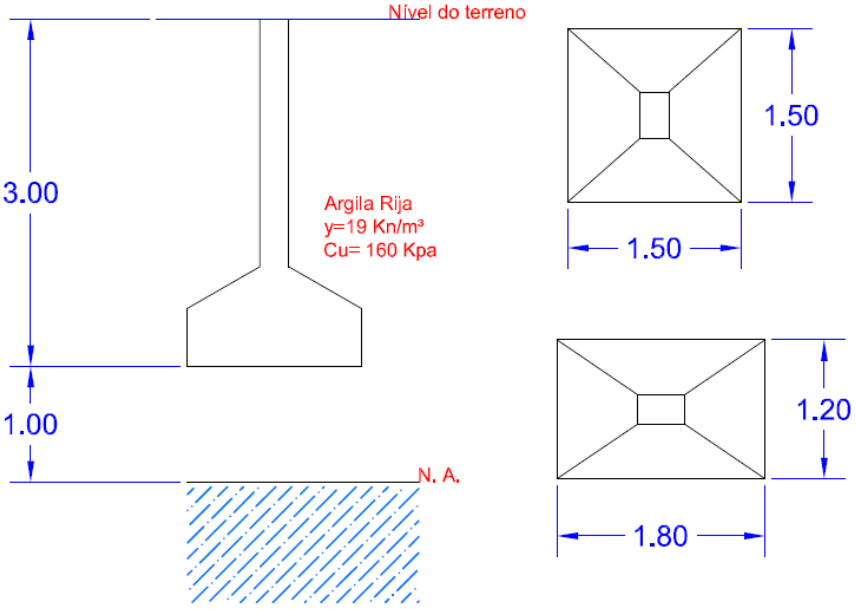
Tipo de fundação	Método de obtenção da resistência	FS
Superficial	Método analítico	3,0
	Método semiempírico	3,0
	Método analítico ou semiempírico com duas ou mais provas de carga	2,0
Profundas	Método analítico	2,0
	Método semiempírico	2,0
	Provas de carga	1,6

Fonte: Adaptada NBR 6122 (2019)

A partir dos resultados da sondagem SPT, o Engenheiro responsável pela obra dimensionou as fundações. Para a realização do presente trabalho a partir da caracterização do furo SP01 classificado como uma argila rija, foram escolhidas três sapatas quadradas e três sapatas retangulares com cota de assentamento de 3 metros. Para o furo SP02 forma escolhidas três sapatas quadradas e três sapatas retangulares com cota de assentamento de 2 metros.

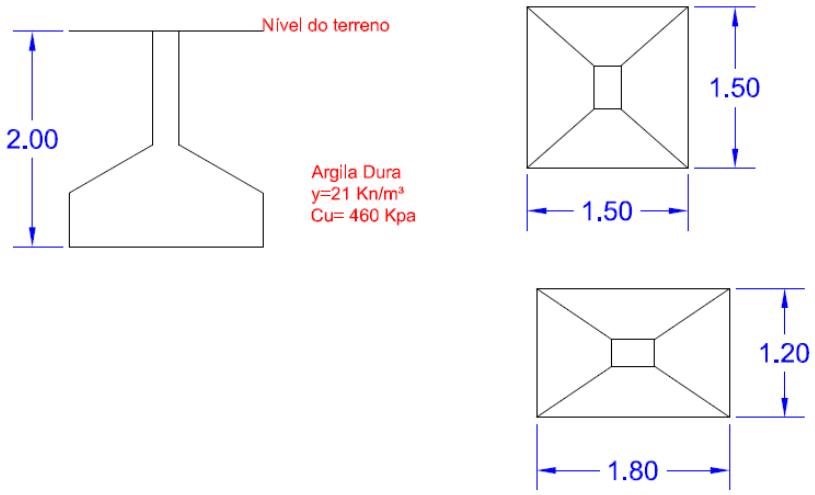
O esquema das sapatas com suas e respectivas cotas de assentamento foram realizadas no software AutoCAD 2022 e estão representadas respectivamente nas figuras 7 e 8 apresentadas a seguir. A unidade de medida das dimensões e cota de assentamento estão em metros (m).

Figura 7 - Perfil e vista em planta das sapatas referente ao SP01.



Fonte: Os autores, 2022.

Figura 8 – Perfil e vista em planta das sapatas referentes ao SP02.



Fonte: Os autores, 2022.

Para a realização dos cálculos da capacidade de carga pelo Método de Terzaghi (1943), foi utilizado um fator de segurança global (FS=3). A NBR 6122 (2019) estabelece que para os cálculos através de métodos semiempíricos é adotado um valor de fator de segurança de no mínimo 3. Referente ao furo SP01, para a realização dos cálculos da tensão admissível foram utilizados valores de cargas características e também foi utilizado o NSPT igual a 16, valor este que representa a cota de assentamento da base da

sapata. O cálculo da tensão admissível foi feito a partir da Equação (8) já apresentada anteriormente.

Para efeitos de cálculo foram adotadas cargas características da estrutura. Apresenta-se a seguir a tabela com as dimensões das sapatas e as cargas aplicadas nas mesmas.

Tabela 7 – Dimensões das sapatas e as cargas aplicadas – SP01

Pilar	Carga (kN)	Sapata	Dimensões (m)
P1	900	S1	1,50 x 1,50
P2	900	S2	1,50 x 1,50
P3	900	S3	1,50 x 1,50
P4	900	S4	1,80 x 1,20
P5	900	S5	1,80 x 1,20
P6	900	S6	1,80 x 1,20

Fonte: Os autores, 2022.

A partir do resultado do Nspt igual a 16, referente a camada de assentamento da base da sapata, foram calculados alguns parâmetros de resistência do solo em questão. A coesão do solo foi estimada em 80 kPa, o ângulo de atrito foi calculado a partir da Equação (7) e o peso específico do solo foi adotado através da Tabela 5 presente neste artigo Adaptada de Godoy (1972). A partir do ângulo de atrito foi retirado da Tabela 1 os coeficientes de capacidade de carga Nc, Nq e Nγ.

A Tabela 8 a seguir apresenta os valores dos parâmetros do solo utilizados para o cálculo da capacidade de carga pela Teoria de Terzaghi.

Tabela 8 – Parâmetros dos solos utilizados para os cálculos – SP01

Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Peso Especifico (kN/m³)	Nc	Nq	Nγ
80	32,88°	19	47,60	31,87	31,33

Fonte: Os autores, 2022.

Referente ao furo SP02, para a realização dos cálculos da tensão admissível foram utilizados valores de carga aplicadas através dos pilares. Apresenta-se a seguir a tabela com as dimensões das sapatas e as cargas aplicadas nas mesmas.

Tabela 9 – Dimensões das sapatas e as cargas aplicadas – SP02

Pilar	Carga (kN)	Sapata	Dimensões (m)
P7	900	S7	1,50 x 1,50
P8	900	S8	1,50 x 1,50
P9	900	S9	1,50 x 1,50
P10	1000	S10	1,80 x 1,20
P11	1000	S11	1,80 x 1,20
P12	1000	S12	1,80 x 1,20

Os autores, 2022.

A partir do resultado do Nspt igual a 46, referente a camada de assentamento da base da sapata, foram calculados alguns parâmetros de resistência do solo em questão. A coesão do solo foi estimada em 320 kPa, e o peso específico do solo foi adotado através da Tabela 3 presente neste artigo Adaptada de Godoy (1972). Para o cálculo de ângulo de atrito foi adotado o valor de referência da Tabela 3 já apresentada anteriormente.

A Tabela 10 a seguir apresenta os valores dos parâmetros do solo utilizados para o cálculo da capacidade de carga pela Teoria de Terzaghi.

Tabela 10 – Parâmetros dos solos utilizados para os cálculos – SP02

Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Peso Especifico (kN/m³)	Nc	Nq	Nγ
320	30°	21	37,16	22,46	19,13

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicando o método proposto por Terzaghi (1943), a partir das Equações 3 e 4, obteve-se os seguintes resultados referentes ao solo representado pelo SP01 que estão expostos na Tabela 11 a seguir. Nessa tabela estão apresentados os valores de tensões admissíveis, tensão de ruptura e fator de segurança da sapata calculados a partir da carga de 900 kN.

Tabela 11 – Resultados a partir da Teoria de Terzaghi – Cargas aplicadas na fundação.

Pilar	σ_{rup} (kPa)	σ_{adm} (kPa)	Sapata	Dimensões (m)	FS ≥ 3,0
P1	6998,83	400	S1	1,50 x 1,50	17
P2	6998,83	400	S2	1,50 x 1,50	17
P3	6998,83	400	S3	1,50 x 1,50	17
P4	6106,9	416,67	S4	1,80 x 1,20	15
P5	6106,9	416,67	S5	1,80 x 1,20	15
P6	6106,9	416,67	S6	1,80 x 1,20	15

Fonte: Os autores, 2022.

Para os resultados obtidos percebe-se que para as sapatas quadradas S1, S2 e S3 o fator de segurança foi FS =17 atendendo assim o critério de segurança. Para as sapatas retangulares S4, S5 e S6 o fator de segurança foi FS =15 atendendo o fator de segurança global.

Na Tabela 12 estão apresentados os valores de tensões admissíveis, tensão de ruptura e fator de segurança da sapata calculados a partir da carga do valor de Nspt do furo SP01.

Tabela 12 - Resultados a partir da Teoria de Terzaghi – a partir do Nspt

Pilar	σ_{rup} (kPa)	σ_{adm} (kPa)	Sapata	Dimensões (m)	FS ≥ 3,0
P1	6998,83	320	S1	1,50 x 1,50	21,8
P2	6998,83	320	S2	1,50 x 1,50	21,8
P3	6998,83	320	S3	1,50 x 1,50	21,8
P4	6106,9	320	S4	1,80 x 1,20	19
P5	6106,9	320	S5	1,80 x 1,20	19
P6	6106,9	320	S6	1,80 x 1,20	19

Fonte: Os autores, 2022.

Para os resultados obtidos percebe-se que para as sapatas quadradas S1, S2 e S3 o fator de segurança foi Fs =21,8 atendendo assim o critério de segurança. Para as sapatas retangulares S4, S5 e S6 o fator de segurança foi FS =19 atendendo também o fator de segurança global adotado.

Aplicando as Equações 3 e 4, obteve-se os seguintes resultados referentes ao solo representado pelo SP02 que estão expostos na Tabela 13 a seguir. Nessa tabela estão

apresentados os valores de tensões admissíveis, tensão de ruptura e fator de segurança da sapata calculados a partir da carga de 900 kN para sapatas quadradas e de 1000kN para sapatas retangulares.

Tabela 13 - Resultados a partir da Teoria de Terzaghi – aplicação de cargas

Pilar	σ_{rup} (kPa)	σ_{adm} (kPa)	Sapata	Dimensões (m)	FS ≥ 3,0
P7	12295,2	400	S7	1,50 x 1,50	30
P8	12295,2	400	S8	1,50 x 1,50	30
P9	12295,2	400	S9	1,50 x 1,50	30
P10	10541,07	444,44	S10	1,80 x 1,20	23,7
P11	10541,07	444,44	S11	1,80 x 1,20	23,7
P12	10541,07	444,44	S12	1,80 x 1,20	23,7

Fonte: Os autores, 2022.

Na Tabela 14 estão apresentados os valores de tensões admissíveis, tensão de ruptura e fator de segurança da sapata calculados a partir da carga do valor de Nspt do furo SP02.

Tabela 14 - Resultados a partir da Teoria de Terzaghi – a partir do Nspt

Pilar	σ_{rup} (kPa)	σ_{adm} (kPa)	Sapata	Dimensões (m)	FS ≥ 3,0
P7	12295,2	920	S7	1,50 x 1,50	13,36
P8	12295,2	920	S8	1,50 x 1,50	13,36
P9	12295,2	920	S9	1,50 x 1,50	13,36
P10	10541,07	920	S10	1,80 x 1,20	11,4
P11	10541,07	920	S11	1,80 x 1,20	11,4
P12	10541,07	920	S12	1,80 x 1,20	11,4

Fonte: Os autores, 2022.

Comparando os valores da capacidade de carga, tensão admissível e fator de segurança das sapatas referentes ao furo de sondagem SP01, percebe-se uma notória diferença entre esses parâmetros. Os cálculos realizados com aplicação de carga obtiveram valor de tensão admissível de 400 kPa para sapatas quadradas e 416,67 kPa para sapatas retangulares. Os fatores de segurança de ambos foram atendidos sendo eles

respectivamente FS=17 e FS=15. Já para os cálculos realizados a partir do Nspt teve como resultado tensão admissível igual a 320 kPa tanto para as sapatas quadradas quanto para sapatas retangulares. Os valores do fator de segurança ficaram entre FS= 21,8 e FS= 19.

Analisando os mesmos parâmetros citados acima para furo de sondagem SP02, nota-se que para a carga de 900kN aplicada sobre as sapatas quadradas obteve-se uma tensão admissível de 400 kPa e um FS= 30. Para as sapatas retangulares foi aplicada uma carga de 1000kN, tendo como resultado uma tensão admissível de 444,44 kPa e um FS=23,7. Já para os cálculos realizados a partir do Nspt teve como resultado tensão admissível igual a 920 kPa tanto para as sapatas quadradas quanto para sapatas retangulares. Os valores do fator de segurança ficaram entre FS= 13,46 e FS= 11,4. Sendo assim todas as sapatas atenderam o fator de segurança global adotado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como finalidade demonstrar o estudo da capacidade de carga de fundações superficiais através do Método de Terzaghi (1943), associado com o método semiempírico através do perfil geológico do solo realizado na sondagem SPT. Através dos cálculos realizados, a partir da Teoria de Terzaghi, pode-se observar que tanto as sapatas quadradas, quanto as sapatas retangulares, atenderam ao fator de segurança global FS $\geq$ 3.

Referente ao furo SP01 as sapatas quadradas obtiveram um fator de segurança FS= 21,8, sendo esse valor 7,27 vezes maior que o fator de segurança global mínimo adotado. As sapatas retangulares tiveram resultado de fator de segurança FS= 19, sendo esse valor 6,33 vezes maior que o fator de segurança global mínimo adotado. Referente ao furo SP02 as sapatas quadradas obtiveram um fator de segurança FS= 13,36, sendo assim 4,45 vezes maior que o fator de segurança global mínimo adotado. As sapatas retangulares tiveram fator de segurança FS= 11,40, sendo assim 3,8 vezes maior que o fator de segurança global mínimo adotado. Comparando esses resultados percebe-se que as fundações foram superdimensionadas para as tensões calculadas.

Conhecer as características do subsolo é de fundamental importância para o dimensionamento de uma fundação. O dimensionamento de uma fundação é parte essencial na construção de uma edificação, por isso é necessário que o mesmo seja realizado de forma correta e que o projetista considere também a interação do solo com a estrutura de fundação, através de investigações geotécnicas para reconhecer a composição do solo e estimar todos os parâmetros necessários para o correto dimensionamento.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P.J.R. de; GARCIA, J.R.; **Engenharia de fundações**. 1 – ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

ALONSO, U. R. **Previsão e controle das fundações: uma introdução ao controle de qualidade em fundações.** São Paulo: Bluncher, 1991, 142 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR **6122**. Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR **8036**: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR **6484**: 2020 – Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

BOTELHO, M. H. C. **Princípios da Mecânica dos Solos e Fundações para a Construção Civil.** São Paulo: Blucher, 2015.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N. **Mecânica dos solos: obras de terra e fundações.** atualização Paulo José Rocha de Albuquerque, Jean Rodrigo Garcia. - 8. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2022.

CINTRA, J.C.A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações diretas projeto geotécnico.** São Paulo: Oficina de textos, 2011. Disponível em: https://www.academia.edu/27136004/Funda%C3%A7%C3%B5es_Diretas_Projeto_Geot%C3%A9cnico_Jos%C3%A9_Carlos_A_Cintra_Nelson_Aoki_e_Jos%C3%A9_Henrique_1_. Acesso em: 20 mar. 2022.

GOMES, J. K. P,; ARAÚJO, C. B. C. de.; AYRES, T. M. da C. **Análise da Capacidade de Carga de Fundações Superficiais por Diferentes Metodologias.** RCT – Revista de Ciência e Tecnologia, 2020. Disponível em: https://revista.ufrr.br/rct/article/view/5477. Acesso em: 19 mar. 2022.

LIMA, M. J. C. P. A. de. **Prospecção Geotécnica do Subsolo.** Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora **S.A.,** 1983.

MINOZZO, M. *et al.* **A importância da investigação do subsolo no dimensionamento de fundações.** Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Paraná, n. 73, Setembro. 2016. Disponível em: https://www.confea.org.br/sites/default/files/uploads-imce/contecc2016/civil/a%20import%C3%A2ncia%20da%20investiga%C3%A7%C3%A3o%20do%20subsolo%20no%20dimensionamento%20de%20funda%C3%A7%C3%B5es.pdf. Acesso em: 17 mar. 2022.

TQS DOCS. **Capacidade de carga – Sapatas.** Disponível em:https://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=3826&language=pt-br. Acesso em: 22 mai. 2022.

VELLOSO, D. de A.; LOPES, F. de R.; **Fundações:** critérios de projeto, investigação de subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. São Paulo – SP: Oficina de textos, 2011, pdf. Disponível em: https://www.academia.edu/11289563/Funda%C3%A7%C3%B5es_Volume_Completo. Acesso em: 22 mar. 2022.