



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL EM ESCALA REDUZIDA DA CAPACIDADE DE
CARGA DE UMA SAPATA CIRCULAR SOBRE UM SOLO COESIVO**

CLAUDE DAVID NOEL

Foz do Iguaçu
2022



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL EM ESCALA REDUZIDA DA CAPACIDADE DE CARGA
DE UMA SAPATA CIRCULAR SOBRE UM SOLO COESIVO**

CLAUDE DAVID NOEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientador: Prof. M. Sc. Julio César Bizarreta

Foz do Iguaçu
2022

CLAUDE DAVID NOEL

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL EM ESCALA REDUZIDA DA CAPACIDADE DE CARGA
DE UMA SAPATA CIRCULAR SOBRE UM SOLO COESIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. M.Sc. Julio César Bizaretta
UNILA

Prof. Dr. Gisele Suhett Helmer
UNILA

Prof. Dr. Noé Villegas Flores César
UNILA

Foz do Iguaçu, 19 de dezembro de 2022.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Claude David Noel

Curso: Engenharia Civil de Infraestrutura

		Tipo de Documento
(X) graduação	(.....) artigo	
(.....) especialização	(.....) trabalho de conclusão de curso	
(.....) mestrado	(x..) monografia	
(.....) doutorado	(.....) dissertação	
	(.....) tese	
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais	
	(.....) _____	

Título do trabalho acadêmico: Avaliação experimental em escala reduzida da capacidade de carga de uma sapata circular sobre um solo coesivo.

Nome do orientador(a): Prof. M. Sc. Julio César Bizarreta Ortega

Data da Defesa: 19/12/2022.

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, _____ de _____ de _____.

Assinatura do Responsável

Dedico este trabalho ao meu pai e a minha mãe, que me ensinaram os fundamentos da vida para me tornar a pessoa que eu sou hoje.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que ELE tem feito na minha vida, pelo seu amor ágape, por iluminar a minha inteligência e me dar coragem para prosseguir até chegar na conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, que sacrificaram tudo para me criar, me educar adequadamente e pelo apoio incondicional.

Aos meus irmãos e irmãs, que sempre acreditam em mim, pelo carinho e pelo suporte nessa caminhada.

Aos prezados professores do curso que eu tenho tanta admiração, por ter me capacitado durante o período de estudos.

Aos alunos e técnicos dos laboratórios da UNILA: Rocio, Junior, Godzer, Ruth, Paul, Frazier, Woody, Jelais, Dalila, Paula e Eduardo, pela disposição e paciência em todos os momentos.

Ao meu orientador, Júlio César Bizaretta, pela sua colaboração na proposta do tema e também pela disposição e acompanhamento na realização do trabalho.

Aos Professores Marko Lopez e Mara Rubia Silva, que sempre estão dispostos a me ajudar durante a elaboração do trabalho.

Aos colegas de curso que sempre colaboraram, e pela experiência que tivemos durante essa caminhada.

*Os nossos pais amam-nos porque somos
seus filhos, é um fato inalterável. Nos momentos
de sucesso, isso pode parecer irrelevante,
mas nas ocasiões de fracasso,
oferecem um consolo e uma segurança
que não se encontram em qualquer outro lugar. **Bertrand
Russell***

NOEL, Claude David. **Avaliação experimental em escala reduzida da capacidade de carga de uma sapata circular sobre um solo coesivo**. 2022. 64 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

RESUMO

O estudo da capacidade de carga de solos coesivos é de extrema importância devido à grande quantidade de este tipo de solos no mundo e também um dos maiores desafios na geotecnia. Entretanto, existem poucos estudos experimentais sobre a relação da capacidade de carga com o embutimento da sapata e compactação em esse tipo de solos. Diante deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente em escala reduzida a capacidade de carga de uma sapata circular assentada em um solo coesivo compactado. A metodologia consiste em uma pesquisa experimental, iniciada com a caracterização do solo e seguida do experimento de carga-recalque da sapata circular assentada no solo compactado, variando a energia de compactação aplicada ao solo e a profundidade de embutimento. Os resultados mostraram que o aumento da energia de compactação aplicada ao solo gera um aumento substancial da capacidade de carga, que diminui conforme aumenta o embutimento. Também foi mostrado que a capacidade de carga aumenta razoavelmente com o embutimento da sapata, e que esse efeito é maior em solos pouco compactos. Concluiu-se que a energia de compactação do solo e o embutimento da sapata têm uma influência importante nos mecanismos da capacidade de carga.

Palavras-chave: Capacidade de carga. Solos coesivos. Sapata circular. Compactação. Embutimento.

NOEL, Claude David. **Small-scale experimental evaluation of the bearing capacity of a circular footing on a cohesive soil**. 2022. 64 pages. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

ABSTRACT

The study of bearing capacity of cohesive soils is of utmost importance due to the large number of cohesive soils in the world and also one of the biggest challenges in geotechnical engineering. However, there are few experimental studies on the relationship of bearing capacity with footing embedment and compaction in this type of soils. Given this context, the present work aims to experimentally evaluate the reduced scale to load bearing capacity of a circular footing embedded in a compacted cohesive soil. The methodology consists of experimental research, initiated with soil characterization and followed by the load-rebound experiment of the circular footing settled on the compacted soil, varying the compaction energy applied to the soil and the embedment depth. The results showed that increasing the compaction energy applied to the soil generates a substantial increase in the bearing capacity, which decreases as the embedment increases. It was also shown that the bearing capacity increases reasonably with the embedment of the footing, and that this effect is greater in lightly compacted soils. It was concluded that soil compaction energy and footing embedment have an important influence on the mechanisms of bearing capacity.

Key words: Bearing capacity. Cohesive soils. Circular footing. Compaction. Embedding.

NOEL, Claude David. **Evaluación experimental a escala reducida de la capacidad portante de una zapata circular sobre un suelo cohesivo**. 2022. 64 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

RESUMEN

El estudio de la capacidad portante de los suelos cohesivos es de extrema importancia debido a la gran cantidad de este tipo de suelos en el mundo y también uno de los mayores retos en geotecnia. Sin embargo, existen pocos estudios experimentales sobre la relación de la capacidad portante con el empotramiento de la zapata y la compactación en este tipo de suelos. En este contexto, el presente trabajo pretende evaluar experimentalmente a escala reducida la capacidad portante de una zapata circular embebida en un suelo cohesivo compactado. La metodología consiste en una investigación experimental, iniciada con la caracterización del suelo y seguida del experimento de carga-recarga de la zapata circular asentada en el suelo compactado, variando la energía de compactación aplicada al suelo y la profundidad de embutición. Los resultados mostraron que el aumento de la energía de compactación aplicada al suelo genera un incremento sustancial de la capacidad portante, que disminuye a medida que aumenta el empotramiento. También se demostró que la capacidad portante aumenta razonablemente con el empotramiento de la zapata, y que este efecto es mayor en suelos poco compactados. Se llegó a la conclusión de que la energía de compactación del suelo y el empotramiento de la zapata tienen una influencia importante en los mecanismos de capacidad portante.

Palabras clave: Capacidad de carga. Suelos cohesivos. Zapata circular. Compactación. Empotramiento.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Curva de carga versus recalque de uma sapata superficial	17
Figura 2. Representação esquemática da ruptura geral e a curva Carga x Recalque	18
Figura 3. Ruptura por puncionamento de uma areia compacta acima de uma argila mole.	20
Figura 4. Tipos de ruptura (b) localizada	21
Figura 5. Capacidade de carga em fundações superficiais	22
Figura 6. Fluxograma representativo da metodologia	26
Figura 7. Posição geográfica do ponto de amostragem.	27
Figura 8. Coleta da amostra. a) Retirada da amostra do solo. b) Grupo de geotecnia da UNILA.....	28
Figura 9. Preparação da amostra. (a) Amostra com torrões (b) Amostra peneirada.....	28
Figura 10. Ensaio de determinação do pH do solo.....	30
Figura 11. Ensaio de granulometria a laser. a) Materiais e solvente de silicato utilizado no ensaio de granulometria. b) Solução preparada com silicato de sódio + água destilada. c) Amostra preparada solo + solução de silicato de sódio. d) amostra em repouso por 24h. e) colocação da solução dentro do cilindro na máquina CILAS. f) Equipamento CILAS <i>particle size analyzer</i> 1090 manual para caracterizar do solo.	32
Figura 12. Ensaio de granulometria peneiramento.....	33
Figura 13. Etapas para determinar o ensaio de Limite de liquidez (LL). a) Instrumentação no ensaio do LL. b) umedecimento da amostra. c) Colocação e medição da altura da amostra no aparelho. d) Abertura de 13 mm aproximadamente da amostra. e) Coleta das amostras pesados e a sua colocação na estufa.	34
Figura 14. Ensaio de limite de plasticidade (LP). a) Aparelhagem para o ensaio LP. b) Preparação da amostra. c) Cilindro de solo feito com palma da mão. d) Pesagem da cápsula vazia. e) Pesagem da capsulo com amostra do solo. f) Colocação da amostra na estufa numa temperatura de 110° por 24h.	35
Figura 15. Ensaio da massa específica da amostra do solo. a) Aparelhagem para o ensaio da massa específica. b) Bomba de alto vácuo SL 62. c) Imersão previa das amostras por 12h. d) Aplicação de vácuo, bomba conectada e dessecador. e) Pesagem do conjunto picnômetro + amostra + água destilada. f) Pesagem da do conjunto picnômetro + água destilada.....	37
Figura 16. Ensaio da determinação da umidade ótima e a peso específico seco máximo (compactação normal). (a) Pesagem da amostra. (b) colocação de água dentro da amostra. (c) Mistura (homogeneizado) a amostra. (d) compactação da amostra por meio de soquete automático (compactação normal) (e) Nivelamento da superfície do corpo de prova com o topo do cilindro. g) Pesagem da amostra + cilindro. h) Extração da amostra para determinar a umidade	38
Figura 17. Detalhes da seção transversal. (a) Seção transversal do sistema molde, solo e sapata. (b) Planta baixa da base da sapata.....	39
Figura 18. Sapata circular a escala reduzida. (a) Altura da sapata. (b) Largura da sapata. (c) Sapata assentada sobre a amostra do solo compactado.....	40
Figura 19. Etapas do experimento a escala reduzida. a) Escavação e nivelamento. b) colocação da sapata. c) colocacao e ajuste da sapata com o marco de carga e instrumentação d) aplicacao da carga.....	42
Figura 20. Determinação da capacidade de carga com a sapata assentado	

superficialmente considerando 5 golpes.	42
Figura 21. Curva Granulométrica completa por peneiramento e granulometria a laser	43
Figura 22. Curva de compactação da amostra do solo	45
Figura 23. Influência da compactação no aumento da capacidade de carga.	46
Figura 24. Gráfico representativo para as amostras de solos pouco compactado. ..	47
Figura 25. Gráfico representativo das curvas considerando uma compactação S2 .	48
Figura 26. Gráfico representativo do comportamento das curvas considerando um embutimento de 0 (superficial).	49
.....	

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Official</i>
CBR	Índice de Suporte de California
Gs	Peso específico relativo de sólidos
ILATIT	Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos.
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana

Sumário

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
3.1 Capacidade de Carga	17
3.1.1 Tipos de ruptura do solo.....	18
3.1.1.1 Ruptura geral.....	18
3.1.1.2 Ruptura por puncionamento	19
3.1.1.3 Ruptura local.....	21
3.2 teorias de Capacidade de Carga.....	21
3.2.2 Teoria de Vesic.....	23
3.2.3 Equação Geral da Capacidade de Carga.....	23
3.3 Experimentos a escala reduzida de capacidade de carga	24
4 METODOLOGIA.....	26
4.1 Obtenção e preparo dos materiais	27
4.2 Caracterização dos Materiais	29
4.2.1 Ensaio de pH.....	29
4.2.2 Ensaio de granulometria	30
4.2.3. Limites de <i>Atterberg</i>	33
4.2.4 Ensaio da Massa especifica de sólidos.....	36
4.2.5 Ensaio de compactação pelo <i>Proctor</i> Normal	37
4.3. Experimento a escala reduzida de Capacidade de Carga de uma sapata circular apoiada em solo coesivo	39
4.3.1 Detalhes do experimento a escala reduzida	39
4.3.2 Detalhes da execução dos ensaios.....	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
5.1 Caracterização do Solo	43
5.2.1 - Influência da energia de compactação do solo na capacidade de carga da sapata	45
5.2.2 Influência do Embutimento na Capacidade de Carga	46
5.2.3 Análises do Comportamento do Solo	47
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	50

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS51

ANEXOS.....54

1 INTRODUÇÃO

De modo geral, todo tipo de obras em construção civil é composto de duas partes: a superestrutura e a infraestrutura (a fundação). A superestrutura (primeira parte) tem a finalidade de realizar o transporte horizontal das cargas provenientes dos elementos estruturais tais como viga, lajes, pilares entre outros. A segunda parte, por sua vez, conhecida como fundação (Blocos de coroamento, sapatas, estacas, entre outros), que é a parte mais baixa de uma estrutura, tem a função de transmitir a carga da superestrutura para o solo sobre o qual ela está apoiada (Das, 2018). Em outras palavras, ela é responsável pelo suporte/distribuição do carregamento, conforme preconizado pela NBR 6122 (ABNT, 2010). Segundo Knappett e Craig (2014) a fundação é aquela parte de uma estrutura que transmite cargas diretamente ao solo subjacente, um processo conhecido como **interação solo-estrutura** (KNAPPETT; CRAIG, p. 207).

A fundação deve ser projetada para atender os seguintes critérios principais a saber: a capacidade de carga ou resistência suficientes para suportar as cargas aplicadas de tal forma que não haja colapso da estrutura e para evitar deformações excessivas sob aplicação de cargas, o que pode danificar a estrutura suportada (KNAPPETT e CRAIG, (2014). A capacidade de carga em fundação rasas, fundação em que sua profundidade de assentamento é inferior a duas vezes sua menor dimensão, conforme descrito na NBR 6122 (ABNT, 2010), se relaciona ao modo de ruptura do solo (CINTRA e AOKI, 2011).

A avaliação da capacidade de carga de uma fundação rasa é um dos maiores problemas na engenharia geotécnica. Numerosos métodos foram desenvolvidos para o cálculo da capacidade de carga de uma fundação, assentado em solo horizontal; estes métodos têm uma aparência idêntica desde que seguem a sobreposição dos três termos introduzidos por (TERZAGHI, 1943 apud HAMIDI, 2020). Referente a esses três termos mencionados na teoria de Terzaghi, uma parcela da Coesão (c), ângulos de atrito (γ) e da sobrecarga (q) em que se relaciona também com as principais coeficientes e fatores (CAPUTO, 2014).

O estudo da capacidade de carga de solos coesivos é de suma importância, pelo fato da existência deste tipo de solos em grande quantidade no mundo e também representa um dos maiores desafios na geotecnia. Entretanto existem poucos estudos experimentais sobre a relação da capacidade de carga com o embutimento da sapata e compactação em esse tipo de solos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a capacidade de carga de uma sapata circular em escala reduzida assentada sobre um solo coesivo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral do presente trabalho, são apresentados os seguintes objetivos específicos:

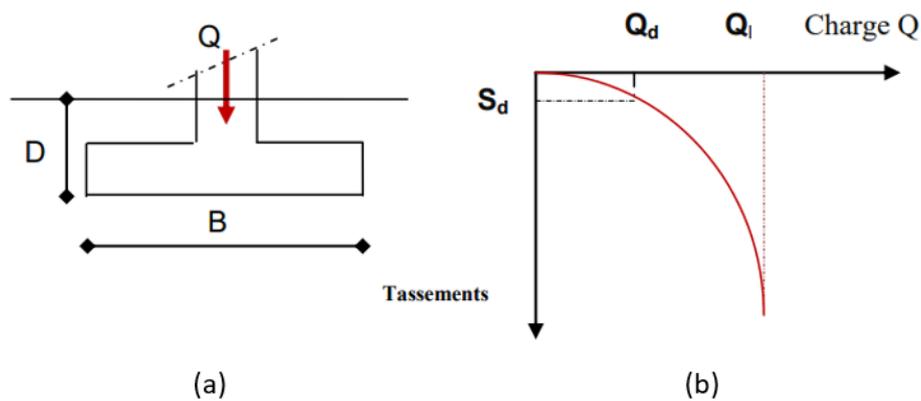
1. Analisar a influência da energia da compactação na capacidade de carga;
2. Computar a influência do embutimento na capacidade de carga;
3. Comparar os resultados obtidos de cada ensaio com a literatura.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CAPACIDADE DE CARGA

Os conceitos de capacidade de carga e assentamento ilustram na Figura 1a-b, com a obtenção de uma curva carga-assentamento (Figura 1b). No início do carregamento, o comportamento é linear, ou seja, a carga aplicada aumenta proporcionalmente com o assentamento. Quando esta relação já não é mais proporcional, ocorre a formação de uma zona plástica no solo. A carga Q_L , na Figura 1b, refere-se à capacidade de carga da fundação, também chamada como carga limite, carga de ruptura ou ainda carga última (HAMIDI, 2020). A capacidade de carga de um solo se refere ao modo de falha de cisalhamento na superfície de contato deste solo, ou seja, a tensão que causa a ruptura do solo maciço, em que a fundação está embutida ou apoiada (CINTRA; AOKI, 2011).

Figura 1. Curva de carga versus recalque de uma sapata superficial



Fonte: Ahmed Hamidi, 2020.

3.1.1 Tipos de ruptura do solo

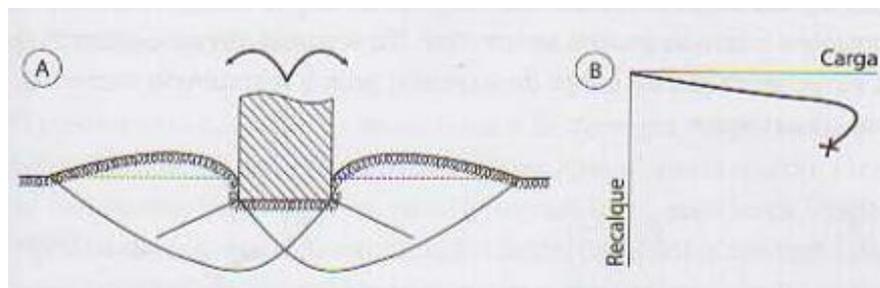
Segundo Cintra *et al.*, (2011), existem vários tipos de ruptura do solo e a capacidade de carga está relacionada a um processo de ruptura.

3.1.1.1 Ruptura geral

Entende-se por ruptura geral, quando se refere aos solos que apresentam elevada resistência ao cisalhamento, ou seja, que são menos deformáveis nos quais a parte superior da sapata está apoiada relativamente à altura da superfície do solo (CINTRA *et al.*, 2011). Neste caso, a ruptura se comporta de forma contínua estendendo desde a base da sapata na sua extremidade esquerda até a extremidade direita da sapata na superfície do terreno (assimétrica) (Figura 2a). Contrariamente, essa ruptura pode ser do tipo simétrico, uma vez, ela é distribuída de forma equivalente para as duas extremidades (margem esquerda ou direita da sapata) na superfície do terreno conforme mostrado na Figura 2b (CINTRA *et al.*, 2011).

Nessa perspectiva, a ruptura é considerada súbita e catastrófica, pois ocorre o desnivelamento da sapata bem como uma instabilidade significativa na superfície do terreno, e para tal, a capacidade de carga ou carga de ruptura é alcançada para valores relativamente pequenos de recalque e a Figura 2 abaixo apresenta esquematicamente a ruptura geral e o comportamento da curva representativa do processo respectivamente (CINTRA *et al.*, 2011).

Figura 2. Representação esquemática da ruptura geral e a curva Carga x Recalque



Fonte: CINTRA *et al.*, 2011

A Figura 3 a seguir ilustra o tombamento de várias torres em formato cilíndrico, feitos com concreto armado, de 15m de diâmetro e 23m de altura por ruptura em argila rija.

Figura 3. Imagem ilustrando o tombamento de silos em fundações por ruptura geral



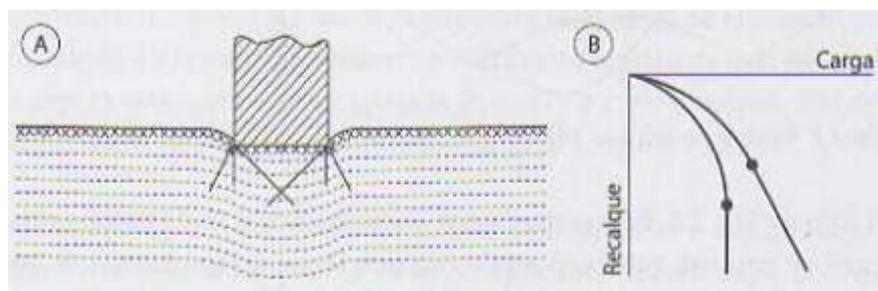
Fonte: CINTRA *et al.*, 2011

3.1.1.2 Ruptura por punção

A ruptura por punção, por sua vez, é identificada para os casos de solos menos resistentes (mais deformáveis). Este tipo de ruptura consiste na penetração contínua da sapata no interior do solo subjacente por compressão. Isto pode ser verificado observando o recalque da sapata (CINTRA *et al.*, 2011).

Assim, é possível afirmar que a carga de ruptura é obtida para valores recalques consideráveis. As Figuras 4a-b abaixo representam respectivamente a ruptura por punção e o comportamento da curva Carga x Recalque no processo (CINTRA *et al.*, 2011).

Figura 4. Representação esquemática da ruptura por punção e a curva Carga x Recalque



Fonte: CINTRA *et al.*, 2011.

A ruptura por punção sempre ocorre após a compressão ou

compactação do solo e em seguida, a sapata é apoiada a uma determinada profundidade no solo em relação à superfície do terreno (WAGNER *et al*, 2019). A Figura 5 abaixo representa o caso de ruptura por puncionamento.

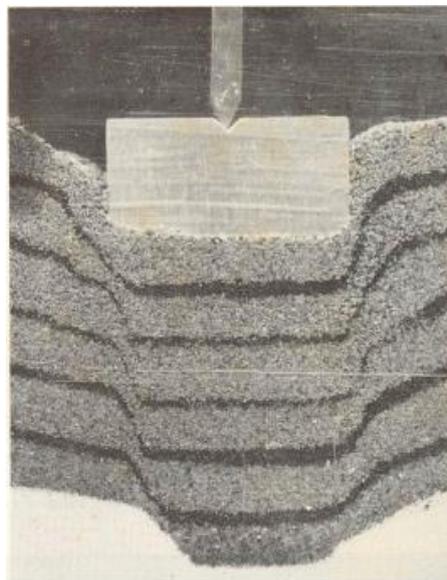
Figura 5. Imagem ilustrando a ruptura por puncionamento do solo utilizando sapata



Fonte: WAGNER *et al.*, 2019

Por exemplo, de acordo com a abordagem do Terzaghi (1943) apud Aguiar (2011), uma areia compactada, tem um modo de ruptura considerada de forma generalizada. Mas se esta camada de areia estiver sobre uma camada de argila de baixa consistência, o modo de falha seria por punção, como mostra a Figura 6 de um teste de placa reduzida (AGUIAR, 2011).

Figura 3. Ruptura por puncionamento de uma areia compacta acima de uma argila mole.



Fonte: AGUIAR, 2011.

3.1.1.3 Ruptura local

Vesic (1975) apud Aguiar (2015) também relatou que, além desses dois tipos principais de ruptura (geral e por punção) na geotecnia, existe um outro tipo, de caráter local, que pode ser identificado em solos de compactação média tais como argilas médias e areias semi-compactadas. A Ruptura localizada ilustrado na Figura 7b, é considerada como um modo de ruptura de transição entra a generalizada e a por punção. Existe a formação da cunha justamente abaixo do contato da sapata e a estrutura do solo Tal ruptura não apresentam todo um processo próprio, porém, constitui uma etapa intermediária dos dois tipos de ruptura citados acima (CAPUTO, 2014).

Figura 4. Tipos de ruptura (b) localizada



Fonte: Vesic (1963) apud Aguiar (2015).

3.2 TEORIAS DE CAPACIDADE DE CARGA

A seguir se apresentam as principais teorias de capacidade de carga.

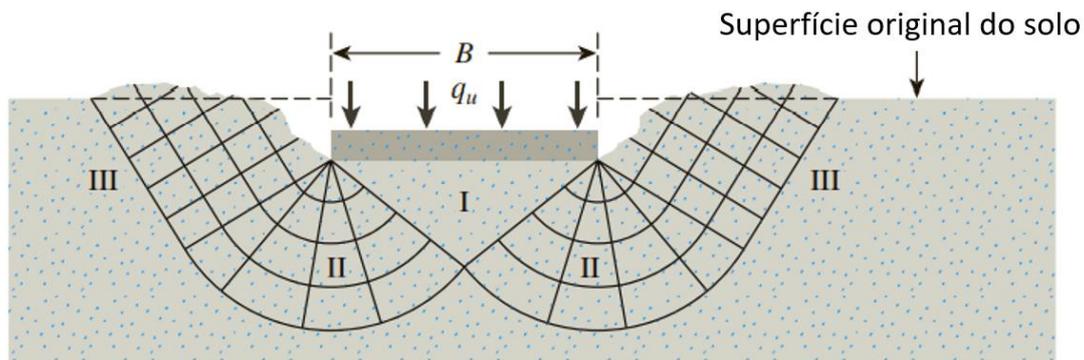
3.2.1 Teoria de Terzaghi

Encontra-se nas publicações de Prandtl em 1921 os resultados do estudo sobre a penetração de corpos duros tais como punções de metal em um material mais macio. Terzaghi (1943) Apud Das (2001) estendeu o plástico teoria de falha da Prandtl para avaliar a capacidade de sustentação de solos para fundações rasas. Terzaghi (1943) apud Das (2001), foi o pioneiro a apresentar uma teoria para a avaliação da capacidade de carga em fundações superficiais.

Segundo Das e Sobhan (2018), ao atingir a capacidade de carga, no solo se gera

uma falha de cisalhamento geral, esquematizado na Figura 8. Uma zona do solo apresenta uma forma de cunha triangular (marcada I), que empuxa para baixo e, por sua vez, pressiona as zonas marcadas como II e III de lado e depois para cima. O solo passa para um estado de equilíbrio plástico e a falha ocorre por deslizamento unindo-se os blocos I, II e III.

Figura 5. Capacidade de carga em fundações superficiais



Fonte: Das e Sobhan, 2018.

Terzaghi (1943) apud Das (2001), foi um dos pioneiros na proposta da expressão geral para avaliar a capacidade de carga das fundações superficiais

O estudo de Prandtl (1920) apud Budhu (2011) é baseado num meio rígido-perfeitamente plástico carregado por uma cunha rígida que é sujeita a cargas cêntricas. Segundo o mesmo autor Budhu (2011), Terzaghi aplicou a teoria de Prandtl a uma sapata com a suposição de que o solo é um material semi-infinito, homogêneo, isotrópico e rígido-plástico (TERZAGHI, 1943 apud BUDHI, 2011).

Esta expressão baseada na teoria da elasticidade relacionada em uma equação geral de capacidade de carga na ruptura geral (CINTRA *et al.*, 2011), é dada pela equação 01:

$$\sigma_R = c * N_c * S_c + q * N_q * S_q + 0,5 * \gamma * B * N_\gamma * S_\lambda \quad (01)$$

Sendo que:

- σ_R : Capacidade de carga;
- γ : peso específico do solo;
- C : coesão do solo;

- B: menor dimensão da sapata.
- S_c , S_q , S_γ : fatores de forma;
- N_c , N_q , N_γ : fatores de capacidade carga;

3.2.2 Teoria de Vesic

Segundo Caputo (2014) e Das (2009), a ruptura generalizada é caracterizada por um mecanismo de ruptura bem definido com uma superfície de ruptura que vai de um bordo da fundação à superfície do terreno. No caso de ruptura geral, que principalmente, ocorre em solos mais resistentes e menos deformáveis, a superfície [e continua, desde a borda esquerda da base até a superfície do terreno a direita, e por simetria. (GOMES *et al.*, 2020 apud CINTRA *et al.*, 2004)

O cálculo da capacidade de carga, no caso de ruptura geral Vesic (1975) apud Gomes et al., (2020), propõe a utilização da equação (02):

$$\sigma_r = c * N_c * S_c * d_c + q * N_q * S_q * d_q + \frac{1}{2} * \gamma * B * N_\gamma * S_\gamma * d_\gamma \quad (02)$$

Onde,

- C: coesão do solo;
- q, Sobrecarga;
- γ : peso específico do solo;
- B: menor dimensão da sapata.
- N_c , N_q , N_γ , fatores de capacidade de carga;
- S_c , S_q , S_γ , fatores de forma;
- d_c , d_q , d_γ , fatores de profundidade.

3.2.3 Equação Geral da Capacidade de Carga

Os fatores de capacidade de carga N_c e N_q não sofrem grandes alterações mostrados por diferentes soluções, isto foi o trabalho aprimorado por vários pesquisadores para resolver os outros formatos de fundações que apresentam dificuldades matemáticas

consideráveis, porém apenas as que são circulares foram tratados e resolvidos, mas ainda assim sem nenhum experimento verificável (AGUIAR, 2015).

Segundo Das (2009), a equação 03 modificada para o uso geral, diferente da Terzaghi mostrado a seguir:

$$q_u = C \cdot \lambda_{cs} \cdot \lambda_{cd} \cdot \lambda_{ci} \cdot N_c + q \cdot \lambda_{qs} \cdot \lambda_{qd} \cdot \lambda_{qi} \cdot N_q + 0,5 \cdot \lambda_{\gamma s} \cdot \lambda_{\gamma d} \cdot \lambda_{\gamma i} \cdot \gamma \cdot B N_{\gamma} \quad (03)$$

Onde,

- C: coesão do solo;
- q, Sobrecarga;
- γ : peso específico do solo;
- B: menor dimensão da sapata
- N_c, N_q, N_{γ} , fatores de capacidade de carga;
- $\lambda_{cs}, \lambda_{qs}, \lambda_{\gamma s}$, fatores de forma;
- $\lambda_{cd}, \lambda_{qd}, \lambda_{\gamma d}$, fatores de profundidade; e
- $\lambda_{ci}, \lambda_{qi}, \lambda_{\gamma i}$, fatores de inclinação.

3.3 EXPERIMENTOS A ESCALA REDUZIDA DE CAPACIDADE DE CARGA

O experimento em campo do Murat Ornek *et al.*, (2012), foi conduzida em duas séries. Série I consiste em testes com sete diâmetros de base diferentes (0,06, 0,09, 0,12, 0,30, 0,45, 0,60 e 0,90 m) na superfície do depósito de argila natural. A Série II, por sua vez, é semelhante à Série I, exceto que as sapatas foram colocadas sobre o preenchimento granular camadas assentadas sobre o depósito de argila natural. As camadas foram projetadas em três espessuras diferentes de acordo com os diâmetros dos pés (0,33D, 0,67D e 1,00D). Foi observado a partir dos resultados do teste do Ornek *et al.*, (2012) que a capacidade de carga aumentou com um aumento do tamanho das fundações (diâmetros). Foram obtidas as capacidades de suporte de aproximadamente 190 kN e 1,0 kN para diâmetros de 0,90 m e 0,06 m, respectivamente.

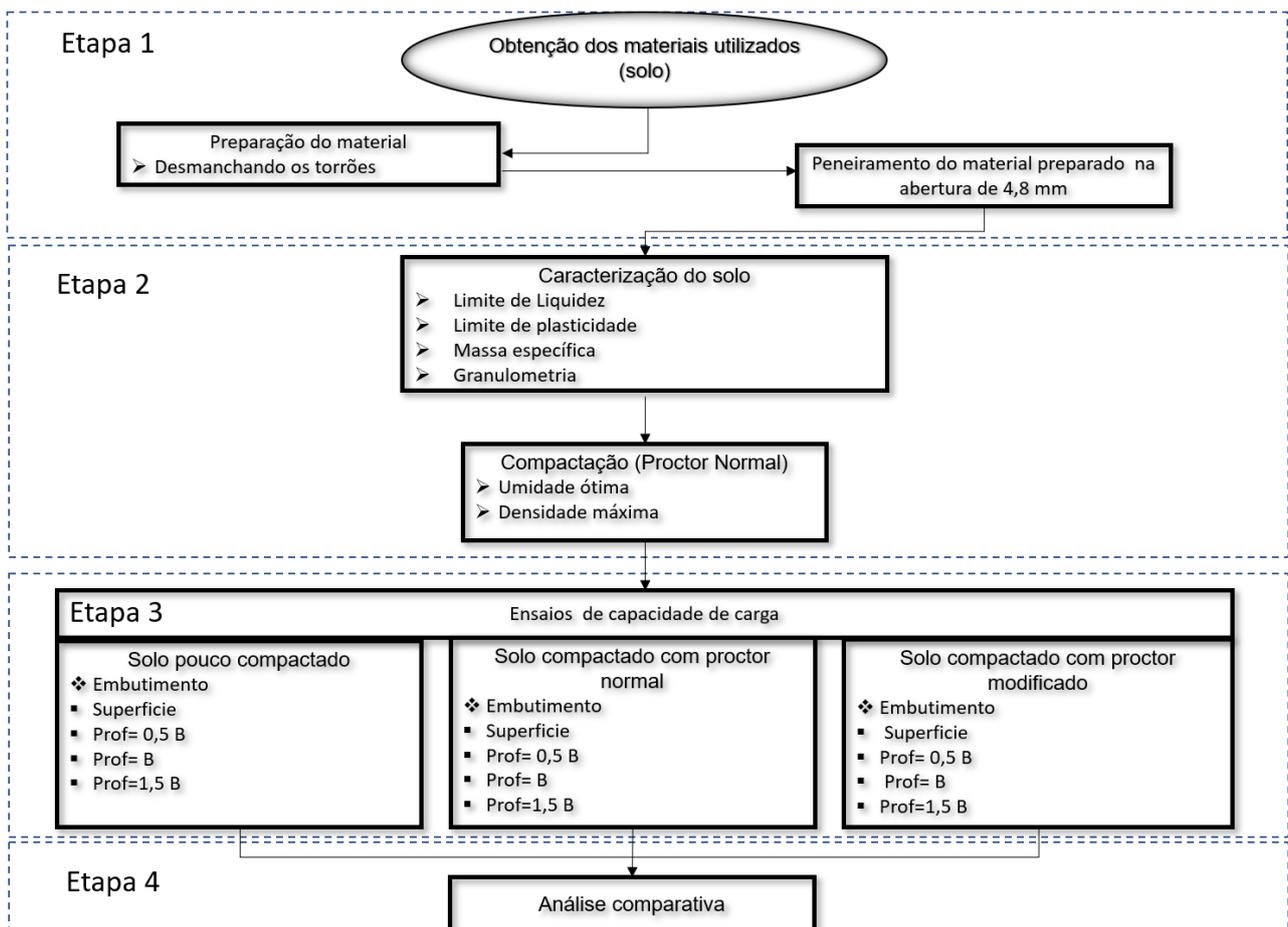
Por conseguinte, a investigação de Idris *et al.*, (2021), apresentou a sua aplicação em diferentes comprimentos de chapas de 0.5B, 0.75B, 1B, 1.25B, e 1.5B em que B é a largura da placa plana e os resultados mostraram que a capacidade de carga da placa dobrada era superior à da fundação plana. Além disso, um aumento no comprimento dobrado levou a uma maior carga final e menor assentamento, mas a carga final e assentamento foram observados como sendo quase constantes para o caso 1B. Isto

significa que a variação ótima onde o comprimento da chapa é igual à largura da fundação é de 1B. Também, pode-se observar um aumento de 129,52% utilizando o Método *Tangent* e 148,4 7% com o Método *Butler Hoy*. Entretanto, o método da tangente, o fator de assentamento mais baixo para a fundação em chapa dobrada foi de 0,22 com a maior capacidade de carga de 61,19 kN/m.

4 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho foi experimental, e está dividida em quatro etapas principais, conforme detalhado na Figura 9. A etapa 1 consiste na coleta, preparação e peneiramento do solo. A etapa 2 consiste na execução dos ensaios de caracterização e compactação do solo, a fim de determinar a umidade ótima e a densidade máxima. A etapa 3 consiste na realização do experimento de capacidade de carga em escala reduzida de uma sapata circular sobre uma argila. Finalmente, a etapa 4 consiste na análise comparativa dos resultados obtidos com a literatura.

Figura 6. Fluxograma representativo da metodologia



Fonte: Autoria própria, 2022.

4.1 OBTENÇÃO E PREPARO DOS MATERIAIS

A coleta da amostra de solo em estudo, foi realizada no Campo Experimental de Geotecnia da UNILA, localizada do lado oeste do Alojamento Estudantil da UNILA, a $25^{\circ}28'36,96''$ S e $54^{\circ}35'12,73''$ W, a poucos metros de distância da Avenida Tancredo Neves na cidade de Foz do Iguaçu, conforme se mostra na Figura 10. A amostragem foi realizada mediante a escavação de um poço de inspeção de 70 cm de profundidade (Figura 11a - b). Coletou-se aproximadamente sete sacos com amostra deformada do solo em estudo. As amostras foram conduzidas ao Laboratório de Geotecnia da UNILA.

Figura 7. Posição geográfica do ponto de amostragem.



Fonte: Google Earth modificado pelo autor, 2022

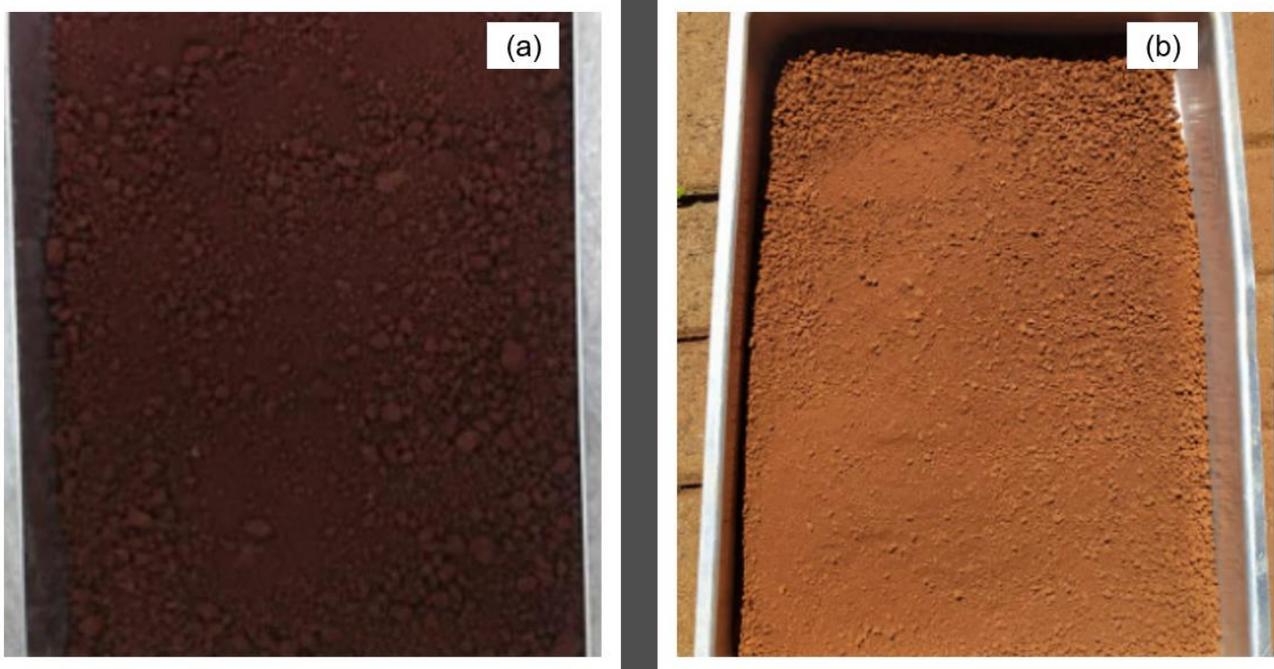
Para o processo de preparação da amostra do solo foi necessário desfazer os torrões de solo (Figura 12a) com uso de um alfombriz e de acordo com a NBR 7182/86, e em seguida, realizar o peneiramento *in loco* da amostra utilizando a peneira #4 com uma abertura de 4,8 mm (Figura 12b).

Figura 8. Coleta da amostra. a) Retirada da amostra do solo. b) Grupo de geotecnia da UNILA



Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 9. Preparação da amostra. (a) Amostra com torrões (b) Amostra peneirada.



Fonte: Autoria própria, 2022.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a caracterização dos materiais, foram seguidos os procedimentos normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e recomendações da literatura consultada. A preparação das amostras para ensaios de pH, massa específica dos grãos, granulometria, compactação, e limites de *Atterberg* foi realizada de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016).

4.2.1 Ensaio de pH

O ensaio de determinação de grau de acidez (pH) foi feito segundo a norma NBR 9252/2016. Inicialmente a amostra do solo foi preparada segundo os mesmos procedimentos descritos pela norma NBR 7181 (ABNT, 2016). O solo foi peneirado na peneira número 40, e seguidamente foi pesado uma quantidade de 10 gramas. Em seguida, foi colocado material preparado em 100 ml de água destilada, sob agitação em um corpo de dispersão durante 5 minutos. A amostra foi deixada em repouso por 24h ao ar livre e depois filtrada em um coador de pano. Após a filtragem, foi medido o pH utilizando o pHmetro (modelo DL-PH) digital de bancada. Vale ressaltar que o pHmetro deve ser ligado no mínimo uma hora antes de realizar a leitura. A próxima etapa consiste em fazer a calibragem do equipamento com os padrões estabelecidos e realizar a medição do pH do líquido resultante. Ao final, foi removido o eletrodo da solução de proteção, lavado com água destilada, secado com papel toalha e introduzido na amostra até a estabilização do leitor. Após a leitura, anotou-se o pH. Na figura 13 a seguir é ilustrado a determinação do pH do solo por meio do pHmetro.

Figura 10. Ensaio de determinação do pH do solo



Fonte: Autoria própria, 2022.

4.2.2 Ensaio de granulometria

Para determinar a distribuição do tamanho das partículas do solo, é necessário fazer a análise granulométrica das partículas do solo utilizando uma combinação a laser e peneiramento mecânico (ANAGUA, 2019; OCHOA AVEROS, 2019).

A granulometria das partículas finas (diâmetros inferiores a 0.075 mm), foi realizada pelo método de ensaio a laser utilizando o granulômetro da marca CILAS, modelo 1190 (Figura 14f) que possibilita determinar o diâmetro dos grãos finos baseando na normativa ISO 13220 (ISO, 2009). Na preparação da amostra para o ensaio, é preciso determinar o pH do solo. Segundo Bowles (1980), para solos alcalinos, ou seja, com pH maior que 7, usa-se o hexa-metafosfato de sódio, conhecido também como metafosfato (NaPO_3)_n; e para solos ácidos, menor que 7, é recomendado utilizar o silicato de sódio ou vidro líquido (Na_3SiO_3). Dado que o resultado do pH foi ácido, foi utilizado como agente dispersor, uma solução de silicato de sódio em duas proporções distintas (1ml/L e 2 ml/L) com a finalidade de obter resultados consistentes. Os instrumentos e solução que foram utilizados são mostrados na Figura 14a. Em seguida, foram feitos os seguintes passos para a realização do ensaio:

1º Passo: Verificação do pH da amostra de solo baseando minuciosamente sobre os procedimentos recomendados pelo NBR 9252/2016 (ABNT, 2016).

2º Passo: Preparo da Solução

- Aplicou-se na solução 0,5 ml de Silicato de Sódio utilizado geralmente para pH ácido numa proporção de 500 ml de água destilada ou deionizada (Figura 14b).

3º Passo: Preparo da amostra de solo com a solução de Silicato de Sódio

- Foi adicionada 12,5g da amostra de solo dentro de 32 ml de solução preparada no passo anterior (passo 2).
- Essa mistura (solução + amostra de solo) deve ser bem homogeneizada (Figura 14c) e deixada em repouso por 24 horas antes do ensaio de Granulometria (Figura 14d).

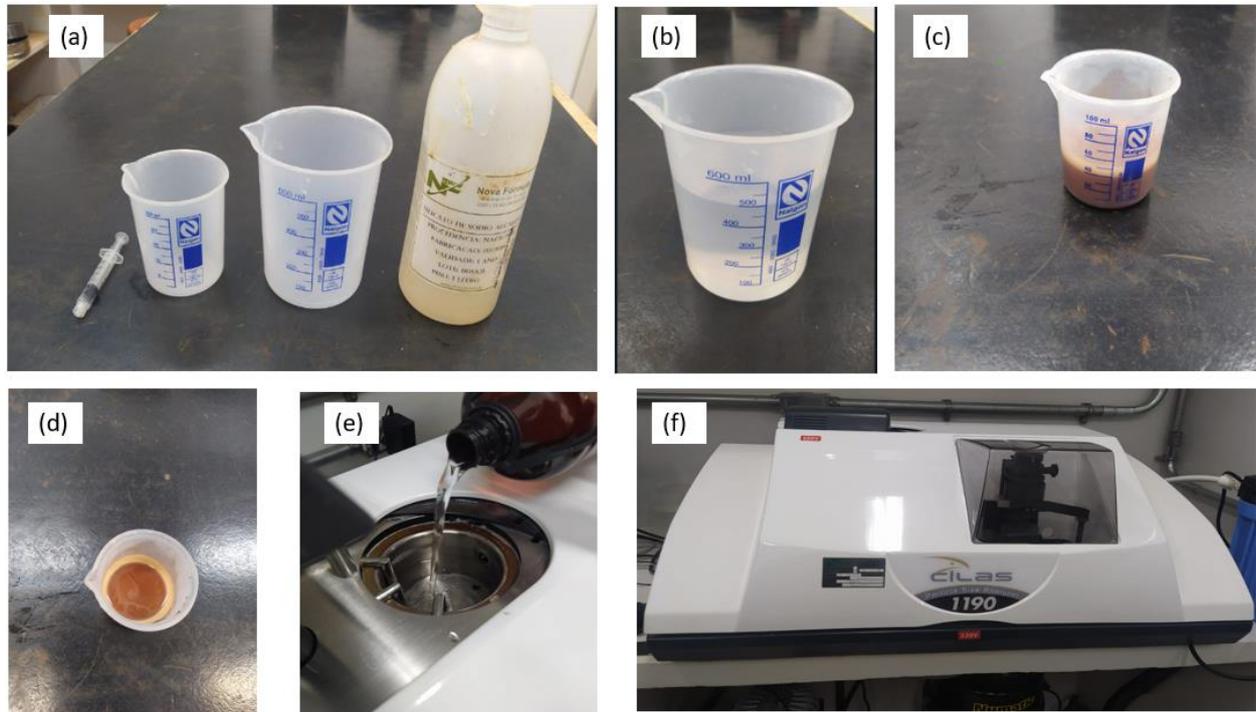
4º Passo: Na hora de realizar o ensaio de Granulometria o recipiente cilíndrico do Granulômetro deve ser esvaziado em uma solução com:

440 ml de água destilada e 60 ml de Silicato de Sódio como é mostrado na Figura 14e abaixo

A quantidade acima deve ser multiplicada por 5, para que ao final sejam obtidas pelo menos três curvas semelhantes, logo preparar:

- 2200 ml de água destilada e 300 ml de Silicato de Sódio.

Figura 11. Ensaio de granulometria a laser. a) Materiais e solvente de silicato utilizado no ensaio de granulometria. b) Solução preparada com silicato de sódio + água destilada. c) Amostra preparada solo + solução de silicato de sódio. d) amostra em repouso por 24h. e) colocação da solução dentro do cilindro na máquina CILAS. f) Equipamento CILAS *particle size analyzer* 1090 manual para caracterizar do solo.



Fonte: Autoria própria, 2022.

A granulometria das partículas maiores a 0,075 mm foi realizada por peneiramento, e de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 2016). A Figura 15 ilustra as etapas do ensaio de granulometria por peneiramento que foram realizadas no experimento. Essas etapas foram:

- Pesagem da amostra seca (cerca de 50 gramas de material seco ao ar livre), pois, trata-se de amostra de solo fino (Figura 15a);
- Em seguida, foi realizado o processo de lavagem da amostra representativa na peneira número 200, evitando a queda direta de água na amostra de solo como foi mostrado nas Figuras 15b-c;
- O material retido na peneira número 200 após a lavagem foi colocado na estufa a 105°/110° celsius por 24 horas (Figura 15d);
- Após passar 24 horas dentro da estufa, o material seco foi pesado e passado pelo conjunto de peneiras nesta respectiva ordem (2mm, 0,6mm, 0,42mm, 0,26mm, 0,15mm e 0,075mm) (Figura 15e).

Por fim, foi anotado as massas ou percentuais de material retido e passado em cada peneira.

- Observando-se a redução da abertura de 13 mm, foi retirado uma parte da amostra, pesou-se o conjunto capsula + amostra (Figura 16e) e logo depois foi levado na estufa durante 24 horas;
- Em seguida o experimento é repetido para obter 5 pontos variando de 15 a 35 golpes segundo a norma, e depois de obter a curva de teor de umidade versus o número de golpes.

O limite de liquidez é determinado pelo valor do teor da umidade que corresponde a 25 golpes.

Figura 13. Etapas para determinar o ensaio de Limite de liquidez (LL). a) Instrumentação no ensaio do LL. b) umedecimento da amostra. c) Colocação e medição da altura da amostra no aparelho. d) Abertura de 13 mm aproximadamente da amostra. e) Coleta das amostras pesados e a sua colocação na estufa.



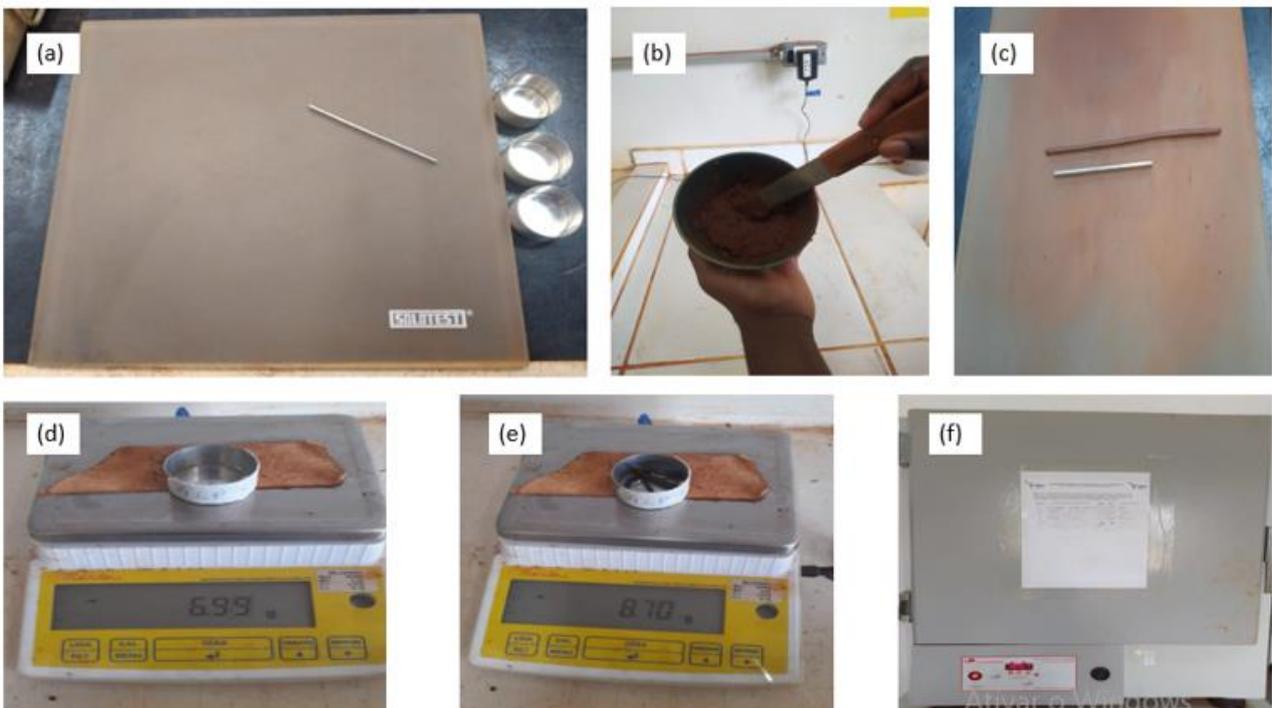
Fonte: Autoria própria, 2022.

O ensaio da determinação do limite de plasticidade foi desenvolvido pela NBR 7180, na qual se procede às seguintes etapas e os instrumentos utilizados estão ilustrados na Figura 17a:

- Peneiramento através de uma peneira de número 40, colocada em uma cápsula de porcelana, adicionando água destilada em pequenas quantidades até obter uma pasta homogênea de consistência plástica (Figura 17b).

- Preparação da amostra baseado na NBR 6457 (ABNT, 2016), umedecendo aos poucos com uma certa quantidade de água (Figura 17b).
- Depois de ser homogeneizada molhado, foi feito um cilindro com a palma da mão, com movimentos para frente e para trás e sobre uma placa de vidro, um cilindro (figura 17c).
- Quando a amostra começa a rachar (quando atinge as dimensões de 3mm de diâmetro e 10cm de comprimento diâmetro e 10cm de comprimento), é coletado e pesado na balança dentro de uma capsula (Figura 17d-e) e submetido ao forno para determinação do teor de umidade (Figura 17f).

Figura 14. Ensaio de limite de plasticidade (LP). a) Aparelhagem para o ensaio LP. b) Preparação da amostra. c) Cilindro de solo feito com palma da mão. d) Pesagem da cápsula vazia. e) Pesagem da capsula com amostra do solo. f) Colocação da amostra na estufa numa temperatura de 110° por 24h.



Fonte: Autoria própria, 2022.

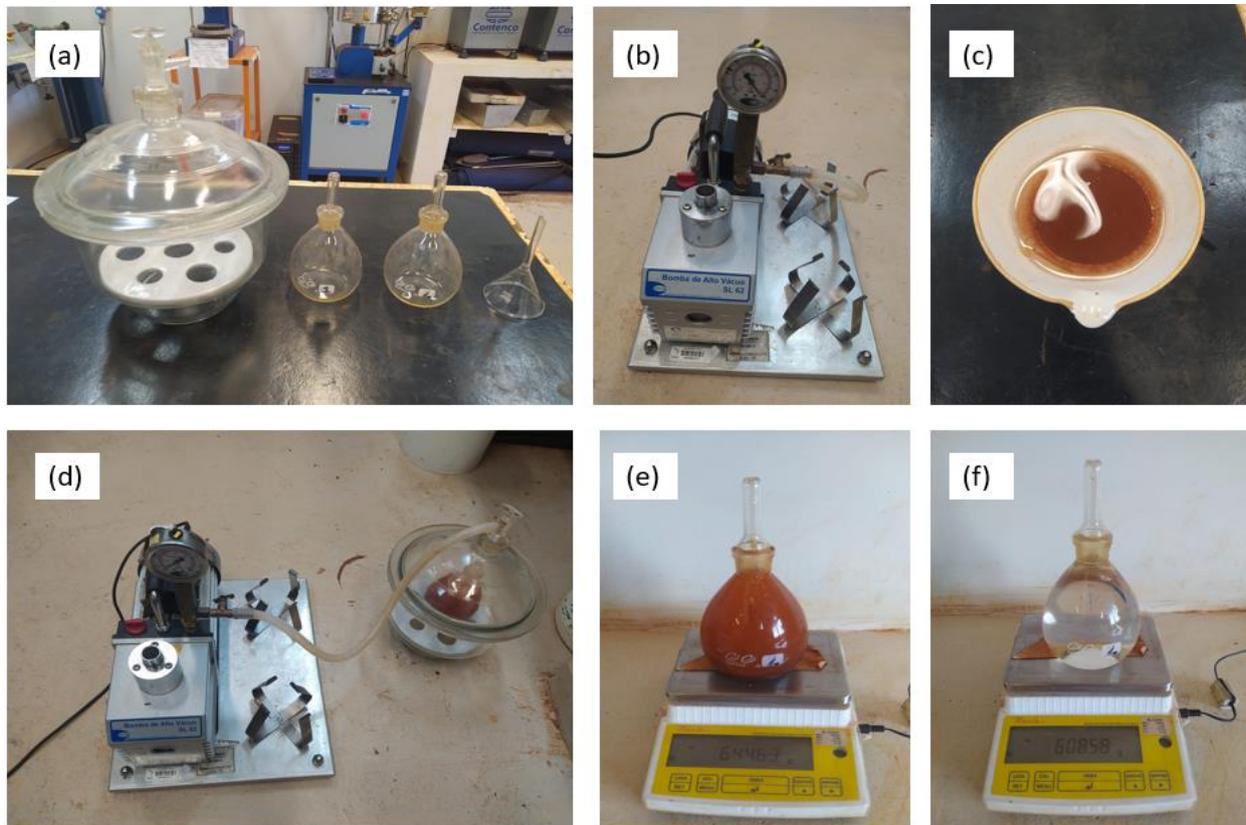
4.2.4 Ensaio da Massa específica de sólidos

Conforme recomendações da NBR 6508 (ABNT, 1984), utilizou-se o método do picnômetro com bomba de vácuo para a massa específica dos grãos com limitações na aparelhagem. Foi realizada a aplicação de vácuo em dessecador com o picnômetro armazenado no seu interior, tudo em três etapas, cada um em tempo definido de 15 min de intensidade entre 65 e 70 kPa.

Para cada material escolhida é realizado três (3) repetições de experimento de forma rigorosa visando resultados com variações menores que $0,02 \text{ g/cm}^3$ entre si. As etapas realizadas durante o ensaio da massa específica foram apresentadas nas ilustrações a seguir:

- Aparelhagem para a realização do ensaio (Picnômetro, dessecador, Bomba de vácuo) (Figura 18a-b)
- Imersão prévia da amostra por 12 horas (Figura 18c).
- Etapa de aplicação de vácuo, bomba conectada e dessecador (figura 18d).
- Pesagem do conjunto picnômetro + amostra + água e Picnômetro + água destilada (Figura 18e-f) respectivamente.

Figura 15. Ensaio da massa específica da amostra do solo. a) Aparelhagem para o ensaio da massa específica. b) Bomba de alto vácuo SL 62. c) Imersão previa das amostras por 12h. d) Aplicação de vácuo, bomba conectada e dessecador. e) Pesagem do conjunto picnômetro + amostra + água destilada. f) Pesagem da do conjunto picnômetro + água destilada



Fonte: Autoria própria, 2022.

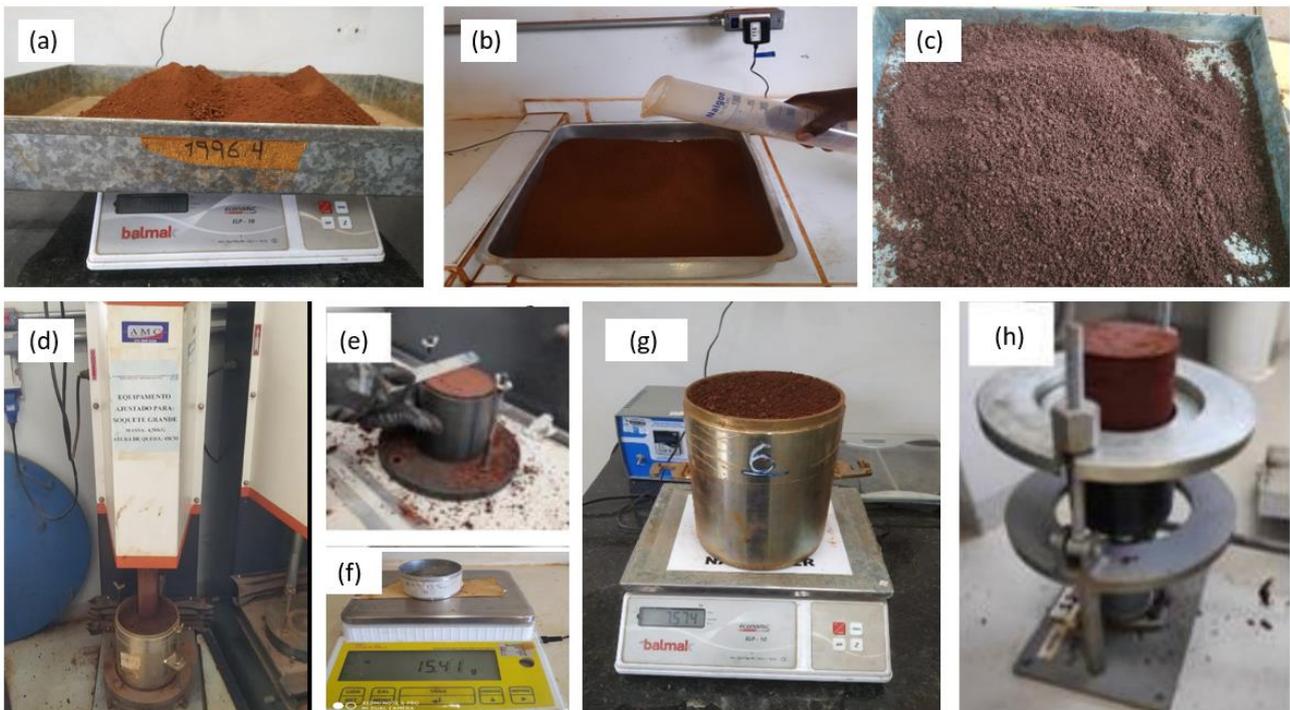
4.2.5 Ensaio de compactação pelo *Proctor* Normal

Este ensaio tem como finalidade a determinação da umidade ótima (w_{ot}) do solo, para uma dada energia de compactação e o peso específico e seco máximo ($\gamma_d \max$) de compactação associado à umidade ótima. De acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016), foi preparado 5 kg de solo, no qual o material foi pulverizado e peneirado (peneira de abertura de 4,8 mm) segundo a NBR 7182/86, e depois foi pesado (Figura 19a) e consecutivamente, foi adicionado 600 ml de água aos poucos numa bandeja metálica (Figura 19b). A mistura foi homogeneizada para obter um teor de umidade inicial de 12%. Vale ressaltar que, antes de iniciar o ensaio, foi preciso, além de pesar o cilindro em uma balança digital balmak (modelo ELP-10), medir a sua altura e o seu diâmetro para, posteriormente, determinar o seu volume.

Uma vez o solo homogeneizado (Figura 19c), foi colocado no interior do cilindro com auxílio de uma pá de pedreiro metálica, de tal forma que corresponde a um certo nível

até concluir 5 camadas com 12 golpes. Foi possível compactar o solo utilizando um soquete *proctor* automático grande (AMC) com formato cilíndrico, de 4,5 kg e com uma altura de queda de 45 cm (Figura 19-d). Cuidadosamente, foi retirada a coroa da base do cilindro e foi removido o excesso de solo para nivelá-lo com a base do cilindro (Figura 19e) que depois, foi pesar o conjunto (solo e cilindro) na balança digital balmak (modelo ELP-10) para determinar o peso úmido do solo compactado (Figura 19g). Por meio do extrator de amostra Marshall/CBR *Proctor* hidráulico manual o corpo de prova foi retirado do molde (Figura 19h). Foram coletadas duas amostras do solo em duas capsulas diferentes, foram pesados na balança e logo colocados na estufa por um período de 24 horas (Figura 19-f). O mesmo procedimento foi repetido para diferentes umidades tais: 15%, 18% e 21% até que a densidade do solo atinge o pico e até diminuir.

Figura 16. Ensaio da determinação da umidade ótima e a peso específico seco máximo (compactação normal). (a) Pesagem da amostra. (b) colocação de água dentro da amostra. (c) Mistura (homogeneizado) a amostra. (d) compactação da amostra por meio de soquete automático (compactação normal) (e) Nivelamento da superfície do corpo de prova com o topo do cilindro. g) Pesagem da amostra + cilindro. h) Extração da amostra para determinar a umidade



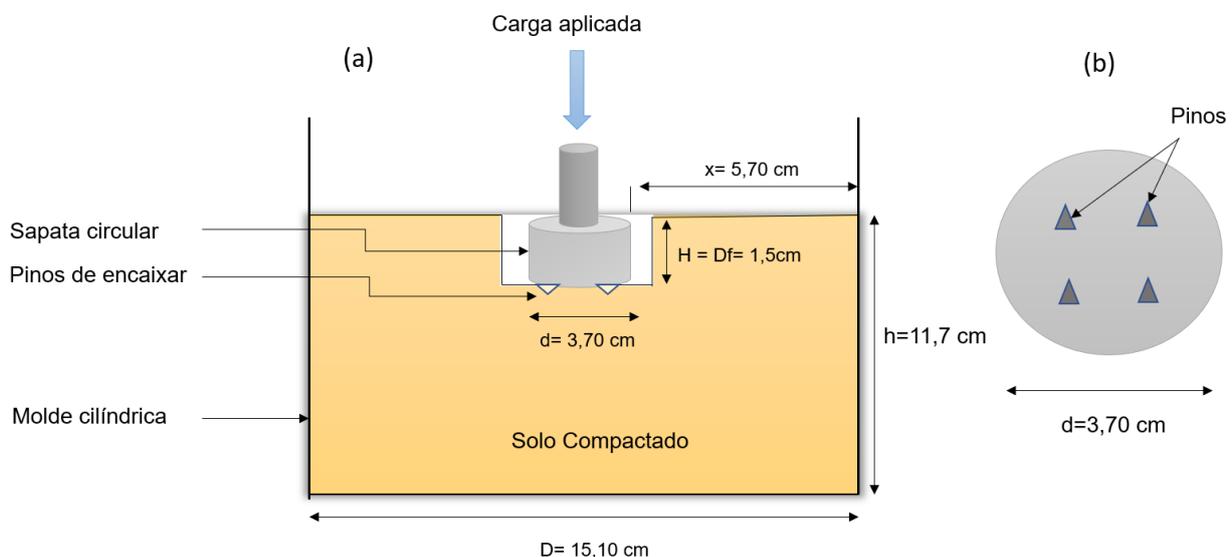
Fonte: Autoria própria, 2022.

4.3. EXPERIMENTO A ESCALA REDUZIDA DE CAPACIDADE DE CARGA DE UMA SAPATA CIRCULAR APOIADA EM SOLO COESIVO

4.3.1 Detalhes do experimento a escala reduzida

Para o experimento, utilizou-se uma sapata circular de liga de aço maduro. Detalhes das dimensões da sapata e solo de apoio se podem observar na Figura 20a, a base apresenta uma altura de 1,5 cm e um diâmetro de 3,7cm. A base da sapata contém quatro pinos que ajudam na fixação com o solo (Figura 20b), esta sapata está unida a um pilar de latão donde a carga é aplicada. O solo onde a sapata será assentada foi colocado em um cilindro metálico com diâmetro quase cinco vezes maior do que o diâmetro da sapata. O solo é compactado no molde de CBR com dimensões de 11,7 cm de altura e 15,10 cm de diâmetro.

Figura 17. Detalhes da seção transversal. (a) Seção transversal do sistema molde, solo e sapata. (b) Planta baixa da base da sapata.



Fonte: Autoria própria, 2022.

A representação da sapata circular em escala reduzida ilustrada acima, é mostrada em fotografias na próxima Figura 21. Na Figura 21a e 21b é apresentado a medição da altura e do diâmetro da sapata respectivamente e na Figura 21c se mostra a colocação e posicionamento em relação ao molde cilíndrico com o solo compactado.

Figura 18. Sapata circular a escala reduzida. (a) Altura da sapata. (b) Largura da sapata. (c) Sapata assentada sobre a amostra do solo compactado.



Fonte: Autoria própria, 2022.

4.3.2 Detalhes da execução dos ensaios

Os ensaios foram realizados com o solo compactado com uma umidade de 28 %, e três diferentes energias de compactação. Assim, foram classificados como S1, S2 e S3, de acordo ao nível de energia de compactação usada. Na Tabela 1 mostra-se o resumo do da energia específica de compactação calculada pela equação (04), bem como o índice de vazio de cada solo.

$$E = \frac{P \cdot h \cdot N \cdot n}{V} \quad (04)$$

E, Energia específica de compactação, por unidade de volume;

P, Peso do soquete (Kg);

h, Altura de queda do soquete (cm);

N, Número de golpes por camada;

n, Número de camadas;

V, Volume do solo compactado (cm³).

Tabela 1. Resumo dos tipos de energia de compactação aplicados ao solo.

	Nº de golpes	Nº de camadas	Energia de compactação (Kg.cm/cm ³)	Índice de vazios
S1	5	5	2,41	0,952
S2	12	5	5,80	0,836
S3	56	5	27,06	0,699

Fonte: Autoria própria, 2022.

Para cada solo foram realizados ensaios de carga – recalque variando a profundidade de embutimento. As profundidades variam desde zero (assentado na superfície), 0,5 vezes o diâmetro, 1 vez o diâmetro, e 1,5 vezes o diâmetro.

O processo de escavação para o embutimento foi realizado a com ajuda de uma espátula e uma concha metálica com uma abertura maior do que o diâmetro da sapata, conforme se mostra na Figura 22a e 22b. Posteriormente foi realizado uma nivelção e compactação manual da base da superfície escavada com uma base de um cilindro metálico de 1,5 cm de diâmetro aproximadamente e posteriormente é realizado a nivelção do solo compactado (Figura 22a). Imediatamente é colocado a sapata de forma manual e é aplicado uma certa pressão até que os 4 pinos de encaixe sejam cravados no solo a fim de evitar que não haja movimento ou deslocamento lateral da sapata, um exemplo se mostra na Figura 22b.

O sistema de carregamento consiste em uma prensa CBR/Marshall, onde foi o molde e a sapata foram centralizados, ajustando o sensor de deslocamento e a célula de carga (Figura 22c). Os ensaios foram executados com uma velocidade de avanço constante de 10⁻²cm.min, um detalhe do ensaio em execução é mostrado na Figura 22d. O ensaio é feito através de controles digitais, não havendo qualquer manipulação do operador.

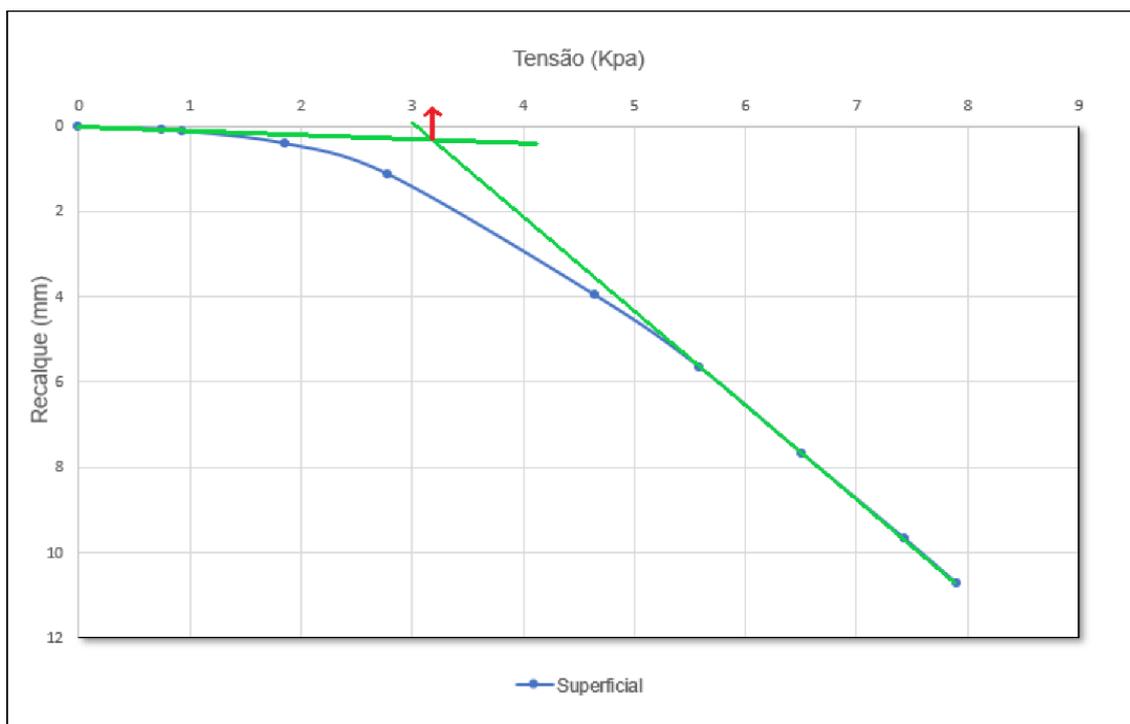
Figura 19. Etapas do experimento a escala reduzida. a) Escavação e nivelamento. b) colocação da sapata. c) colocação e ajuste da sapata com o marco de carga e instrumentação d) aplicação da carga



Fonte: Autoria própria, 2022.

Na Figura 23 abaixo é representado uma típica curva de carga versus recalque. Os eixos verticais e horizontais mostram as relações de carga e assentamento, respectivamente. A capacidade de carga da fundação foi determinada pelo método da tangente, ou seja, a intercepção da primeira tangente do início da curva com a tangente final da curva carga-assentamento (IDRIS *et al.*, 2021).

Figura 20. Determinação da capacidade de carga com a sapata assentado superficialmente considerando 5 golpes.



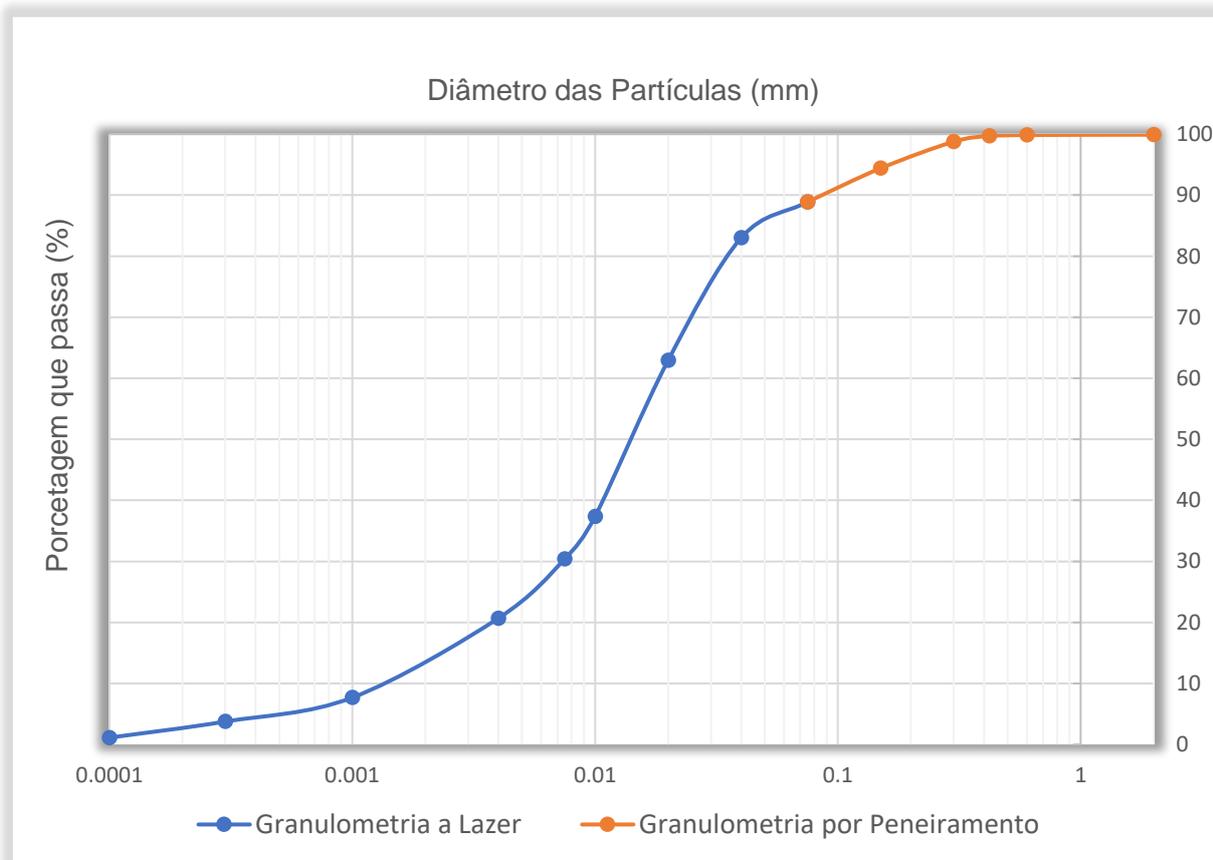
Fonte: Autoria própria, 2022.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Na Figura 24 apresenta-se a distribuição granulométrica completa do solo. Segundo o SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), o solo resultou ser um ML (silte de baixa plasticidade). Segundo a classificação da ABNT, o solo resultou ser um silte argilo-arenoso. A composição das frações de argila, silte e areia é mostrado na Tabela 2. Os resultados se mostraram similares a estudos anteriores do solo no mesmo local (ANAGUA COILA 2019, OCHOA AVEROS; BIZARRETA-ORTEGA 2021, OCHOA AVEROS; BIZARRETA-ORTEGA; CHICAIZA ORTIZ, 2022, CONDE MEJIA 2022, VIÑAN CELY 2022).

Figura 21. Curva Granulométrica completa por peneiramento e granulometria a laser



Fonte: Autora própria, 2022.

Tabela 23. Resultados da classificação da amostra do solo pela ABNT e SUCS

Solo	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
ABNT	17	71	12
SUCS	17	71,9	11,1

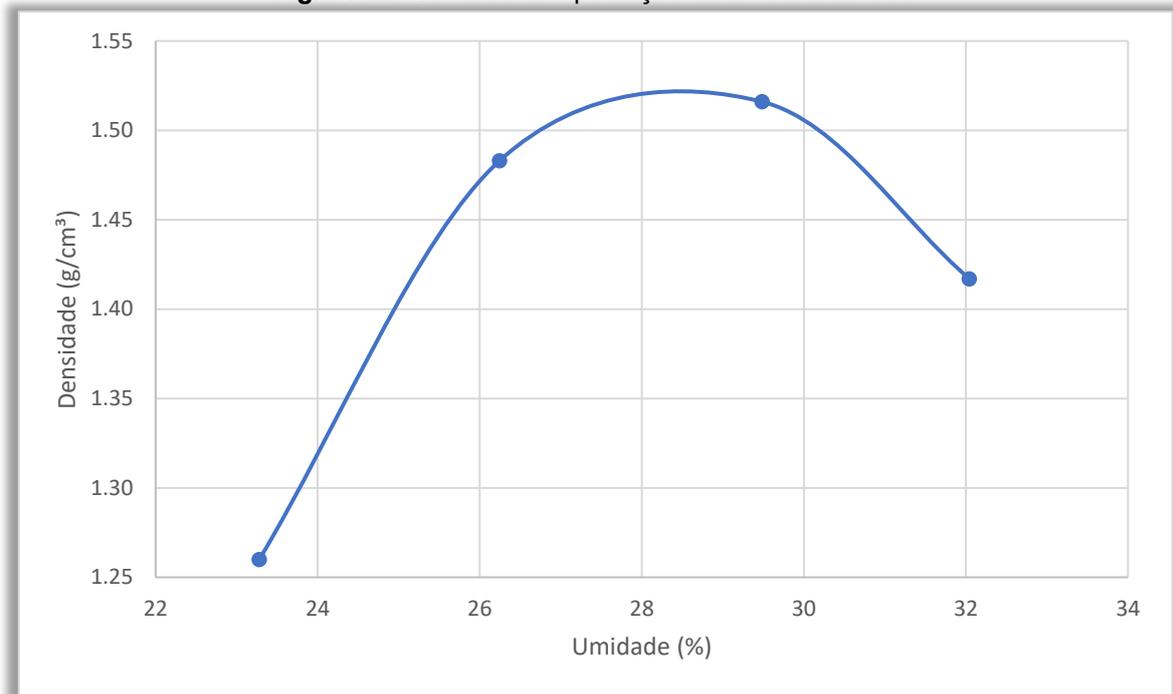
Na Tabela 3, se apresenta um resumo da caracterização física do solo. Observa-se que se trata de um solo ácido, parecido aos resultados obtidos por outras investigações na região (OCHOA AVEROS; BIZARRETA-ORTEGA 2021, OCHOA AVEROS; BIZARRETA-ORTEGA; CHICAIZA ORTIZ, 2022, CONDE MEJIA 2022), com predominantes materiais de silte, argila e areia, e de baixa plasticidade.

Tabela 4. Resumo da caracterização do solo

Descrição	Solo
pH	6,37
Limite de Plasticidade (%)	31,8
Limite de Liquidez (%)	41,5
Índice de Plasticidade (%)	9,7
Classificação SUCS	ML
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	2,72
Ótimo teor de umidade (%)	28
Peso específico seco máximo (g/cm ³)	1,52

Fonte: Autoria própria, 2022.

Na Figura 25 se mostra a curva da umidade de compactação versus peso específico seco, correspondente a energia de compactação do *Proctor* normal. A partir dessa curva, foi obtido um ótimo teor de umidade de 28%, e um peso específico seco máximo de 1,52 g/cm³. Semelhante a outros resultados de pesquisas realizadas na região da Moradia Estudantil (ANAGUA COILA 2019, OCHOA AVEROS; BIZARRETA-ORTEGA 2021, OCHOA AVEROS; BIZARRETA-ORTEGA; CHICAIZA ORTIZ, 2022, CONDE MEJIA 2022, VIÑAN CELY 2022).

Figura 22. Curva de compactação da amostra do solo

Fonte: Autoria própria, 2022.

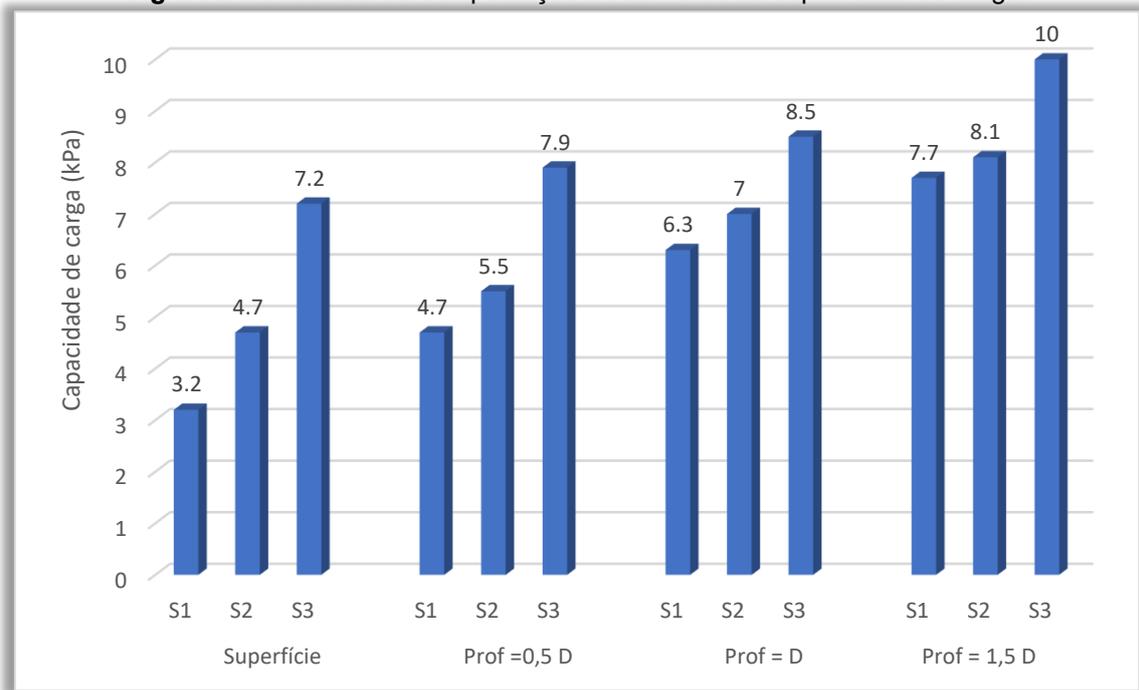
5.2 Experimento a escala reduzida de capacidade de CARGA

5.2.1 - Influência da energia de compactação do solo na capacidade de carga da sapata

A Figura 26 mostra a influência da energia de compactação do solo na capacidade de carga da sapata circular. Observou-se que a capacidade de carga cresce conforme o aumento da energia de compactação do solo. Um solo argiloso sometido a maiores energias de compactação melhora suas propriedades mecânicas, isso é aumenta sua resistência, e diminui sua compressibilidade (SOBREIRA *et al.*, 2018).

A análise das diferentes profundidades de embutimento com os seguintes valores adotados: 0; 0,5D; 1D e 1,5D (Sendo D o diâmetro da sapata) verifica-se que o efeito da energia de compactação da capacidade de carga é menor quando o coeficiente do embutimento aumenta. Por exemplo, quando a sapata está assentada na superfície, o aumento da capacidade de carga de um solo compactado com a menor energia de compactação (S1), e em comparação com o mesmo solo compactado com uma maior energia de compactação (S3) é de 125%, tal aumento é de 30% quando a sapata é assentada a uma profundidade de 1,5D.

Figura 23. Influência da compactação no aumento da capacidade de carga.



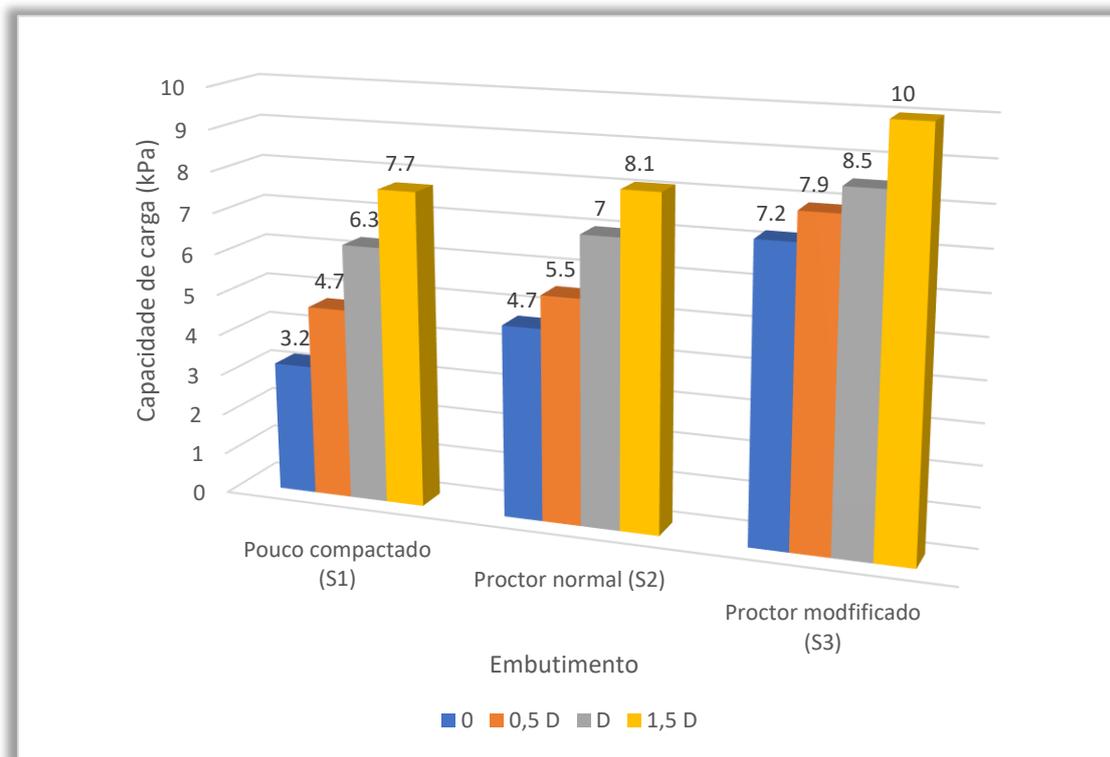
Fonte: Autoria própria, 2022.

5.2.2 Influência do Embutimento na Capacidade de Carga

Na Figura 27, observa-se a tendência de aumento na capacidade de carga da sapata circular conforme aumenta o embutimento. Essa tendência de aumento diminui nos solos com uma maior energia de compactação. Por exemplo, para a sapata circular assente no solo de menor energia de compactação (S1), a capacidade de carga aumenta em 140% quando é embutida passa de zero a 1,5D. Já para o solo de maior energia de compactação (S3), o aumento da capacidade de carga foi de 39%. A Equação Geral da capacidade de carga apresentada na nona edição do livro de Braja Das (2018), modificada pelo acréscimo de alguns fatores, tais que: fator de forma recomendado por Beer (1970), Factor de profundidade proposto por Hansen (1970) e fator de inclinação sugerido por Meyerhof (1963), entre outros. Cada um destes fatores influenciou proporcionalmente na determinação da capacidade de carga. Portanto, levando-se em conta a profundidade do embutimento considerando o fator de profundidade proposto pelo Hansen (1970), mostra claramente que a capacidade de carga aumenta ou diminua conforme a variação do embutimento. Em algumas análises contidas no trabalho experimental de Aguiar (p. 57), a

capacidade de carga para uma fundação circular de grandes diâmetros assentes em areais apresenta tendências semelhantes, e esse último é maior com o aumento da profundidade de assentamento da sapata (embutimento) (AGUIAR, 2015). Nas experimentações do Tani e Craig (1995) verifica-se também o aumento da influência de profundidade na capacidade de carga em fundações circulares sobre um solo argiloso mole.

Figura 24. Gráfico representativo para as amostras de solos pouco compactado.



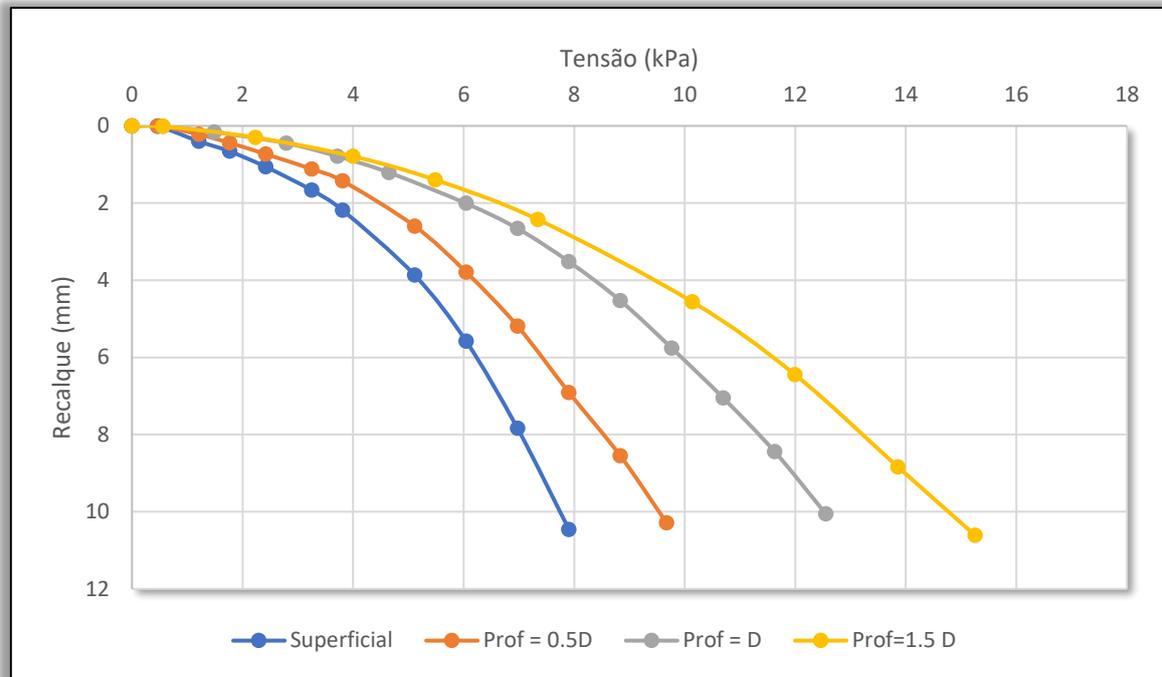
Fonte: Autoria própria, 2022.

5.2.3 Análises do Comportamento do Solo

Na figura 28 mostra-se o comportamento elasto-plástico das curvas de tensão *versus* recalque do silte-argiloso compactado com a energia de compactação do Proctor normal (S2), e para diferente embutimento. De acordo com o experimento realizado por IDRIS *et al.*, (2021), o comportamento tensão *versus* recalque em fundações de chapas planas e dobradas com ângulos e comprimentos de flanges em ambos os lados assentadas em solo argiloso obtive curvas de formas similares, ou seja, quando a sapata está mais

próxima à superfície (profundidades menores) ocorre ruptura por punção e nos casos em que a sapata está com uma maior profundidade de embutimento se dá a uma ruptura local.

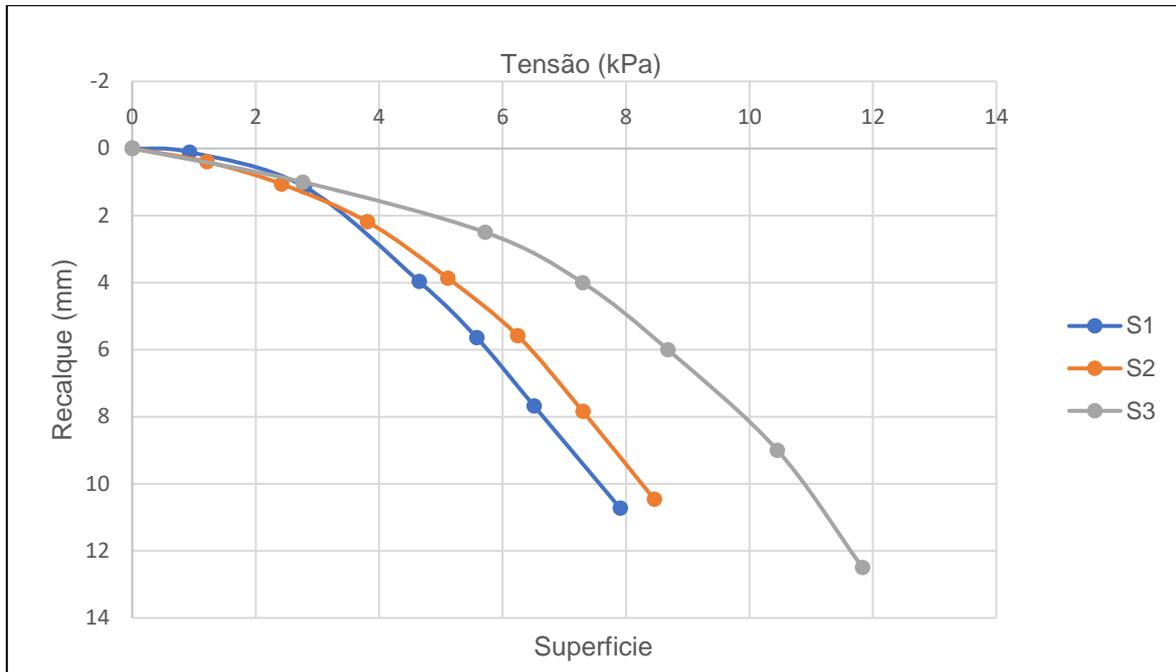
Figura 25. Gráfico representativo das curvas considerando uma compactação S2



Fonte: Autoria própria, 2022.

A Figura 29 ilustra o comportamento elasto-plástico do gráfico tensão-recalque da sapata assente sobre a superfície do solo, considerando diferente energia de compactação do solo. Observa-se ruptura local e por punção para os diferentes casos semelhantes ao trabalho de Idris *et al.* (2021) mencionadas anteriormente. Para as energias de compactação de 5 (S1), 12 golpes (S2) e 56 golpes (S3), deduziu-se que a ruptura que depende da compressibilidade do solo e da profundidade da fundação em relação à sua largura da base.

Figura 26. Gráfico representativo do comportamento das curvas considerando um embutimento de 0 (superficial).



Fonte: Autoria própria, 2022.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste presente trabalho, são apresentadas as análises experimentais realizadas em laboratórios (a escala reduzida) de uma sapata circular assentada sobre um solo coesivo compactado com diferentes embutimentos e diferentes níveis de energia de compactação. Vale ressaltar que as análises foram realizadas por meio de ensaios experimentais tais como: caracterização física do solo e experimento de carga-recalque da sapata circular assentada no solo compactado, variando a energia de compactação aplicada ao solo e a profundidade de embutimento. Com base nos resultados deste experimento, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- O efeito de aumento da capacidade de carga diminui em aumentar o embutimento da sapata, considerando um solo compactado de uma energia S1 (solo pouco compactado) a uma energia de compactação modificado S3.
- A energia de compactação do solo e o embutimento da sapata tiveram uma influência importante nos mecanismos de capacidade de carga. Pois este aumento foi de uma ordem de 2 a 3 vezes a mais.
- Conforme o aumento da compactação obtivemos uma diminuição dos índices de vazios, ou seja, quando maior for a compactação maior a resistência e menor o índice de vazio.

Este trabalho visa a contribuir aos futuros/eventuais estudos na avaliação experimental de sapata circular na área da engenharia civil, especificamente em geotecnia. Também, representa mais um esforço científico dentro da comunidade universitária local visando a enriquecer os diferentes acervos para facilitar, disponibilizar e estabelecer um ponto de partida de estudos relacionados a este tema.

Sendo um estudo a escala reduzida, isto causa uma limitação de definição de qualquer axioma com a validação de resultados. Precisa-se uma experimentação à escala real ou de grande escala para a aprovação destes resultados obtidos.

Para um trabalho futuro, recomenda-se uma análise numérica adimensional de uma sapata circular considerando os parâmetros do solo em estudo. Também uma análise experimental em grande escala para qualquer importante acréscimo de dados, assim, acabaremos contribuindo ao avanço em ambos as partes neste âmbito, ou seja, teórico e prático.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016. ABNT.

ABNT. NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016. ABNT.

ABNT. NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016

ABNT. NBR 6122: Projeção e execução de fundação. Rio de Janeiro, 2010.

AGUIAR, Ana Luiza Salgueiro de. **Capacidade de Carga de Fundação Superficial de Tanque de Armazenamento de Grande Diâmetro**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

ANAGUA COILA, Rolando. **Avaliação do comportamento carga-recalque em escala completa de sapatas sobre silte argiloso mole e silte argiloso reforçado por colunas de solo-cimento compactado**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em engenharia civil de infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Foz do Iguaçu, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122. **Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

BENMEBAREK, S. et al. Bearing Capacity of Shallow Foundation on Two Clay Layers by Numerical Approach. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 30, n. 4, p. 907-923, 2012.

BUDHU, M. **Soil Mechanics and Foundations**. United States of America: John Wiley & Sons, Inc, 2010.

BURD, Harvey; FRYDMAN, Sam. Bearing capacity of plane – Strain footings on layered soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 34, p. 241 – 253, 1997.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: mecânica das rochas – fundações – obras de terra**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

DE OLIVIERA, T. C. F. **Avaliação experimental de barreira capilar com RCD como camada de bloqueio para coberturas finais de ARSU**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em engenharia civil de infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Foz do Iguaçu, 2019.

DE BEER, E. E., 1965, **Bearing capacity and settlement of shallow foundations on sand, Bearing Capacity and Settlement of Foundations**. In: Proceedings of a Symposium, Duke University, Durham, pp. 15-34. González de Vallejo, L. I. et al. **Ingeniería Geológica**. Madrid: Pearson Educación, 2002.

HAMIDI, Ahmed. **Étude numérique du comportement des fondations superficielles**

soumises aux diferentes charges et reposant sur des sols en pente renforcée. 2020. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil) – Université Batna 2, Fesdis, 2020.

IDRIS, Y. et al. Bearing capacity of folded plate foundations in clay soil. **Journal Of Applied Engineering Science**, v. 19, n. 842, p. 681-687, 2021. KNAPPETT, J. A.; CRAIG, R. F. **Craig mecânica dos solos**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

MOREIRA, M. M. P. **Capacidade de Carga em Fundações Superficiais**. 2011. Dissertação (Mestre em engenharia civil) – Universidade da Beira Interior. Covilhã, 2011.

NAKASE, A. Bearing capacity of rectangular footings on clays of strength increasing linearly with depth. **Soils And Foundations**, v. 21, n. 4, 1981.

OCHOA AVEROS, Sara del Rocio. **Estudio experimental sobre la estabilización de una subrasante limo arcillosa con RCD-concreto fino (partículas < 2mm) para aplicación en pavimentos**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em engenharia civil de infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Foz do Iguaçu, 2019.

OCHOA AVEROS, S., BIZARRETA-ORTEGA, J. Experimental Study on Stabilization Subgrade Soil Soft with Fine Concrete Residue. **ESPOCH Congresses: The Ecuador in Journal of S.T.E.A.M.**, 1(1), p. 1044-1052, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.18502/espoch.v1i2.9530>

OCHOA AVEROS, S., BIZARRETA ORTEGA, J., & CHICAIZA ORTIZ, A. Reciclaje y reaprovechamiento de los residuos de concreto en pavimentos. *Green World Journal*, 5(1), 015, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.53313/gwj51015>

ORNECK, M. Prediction of bearing capacity of circular footings on soft clay stabilized with granular soil. **Soils And Foundations**, v. 52, p. 69-80, 2012.

SIVA REDDY, A., SRINIVASAN R. J. Bearing capacity of footings on clays. **Soils And Foundations**, v. 11, n. 3, 1971.

Sobreira, D. S. V., LUCENA, A. E. D. F. L., LUCENA, L. C. D. F. L., & de SOUSA, T. M. (2018). Estudo Comparativo entre os Métodos de Compactação de Solos por Impacto e Amassamento. *Geosciences= Geociências*, 37(3), 683-693.

TANI, K., CRAIG, W., H. Bearing capacity of circular foundations on soft clay of strength increasing with depth. **Soils And Foundations**, v. 35, n.4, p. 21-35, 1995.

TERZAGHI, K., **Mecânica teórica do solo**, John Wiley and Sons, Nova York, 1943.

TERZAGHI, K.; PECK, R. **Mecânica dos Solos na Prática da Engenharia**. 2da. Ed., John Wiley, Nova York, 1967.

VESIC, A. S. *Bearing Capacity of shallow foundations*, in: WHINTERKORN, H. F. e FANG, H. Y. (ed.) **Foundation Engineering Handbook**. New York: Van Nostrand Reinhold. Cap. 3, p. 121-147, 1975.

WAGNER, A. C.; FERNANDES, L.; JASKULSKI, F.; SILVA, T. K. da; **Capacidade de carga e recalque dos solos da região noroeste do Rio Grande do Sul através de ensaios de placa autores**. Disponível em: <[\(PDF\) CAPACIDADE DE CARGA E RECALQUE DOS SOLOS DA REGIÃO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL ATRAVÉS DE ENSAIOS DE PLACA AUTORES \(researchgate.net\)](#)>. Acesso em: 10/10/2022.

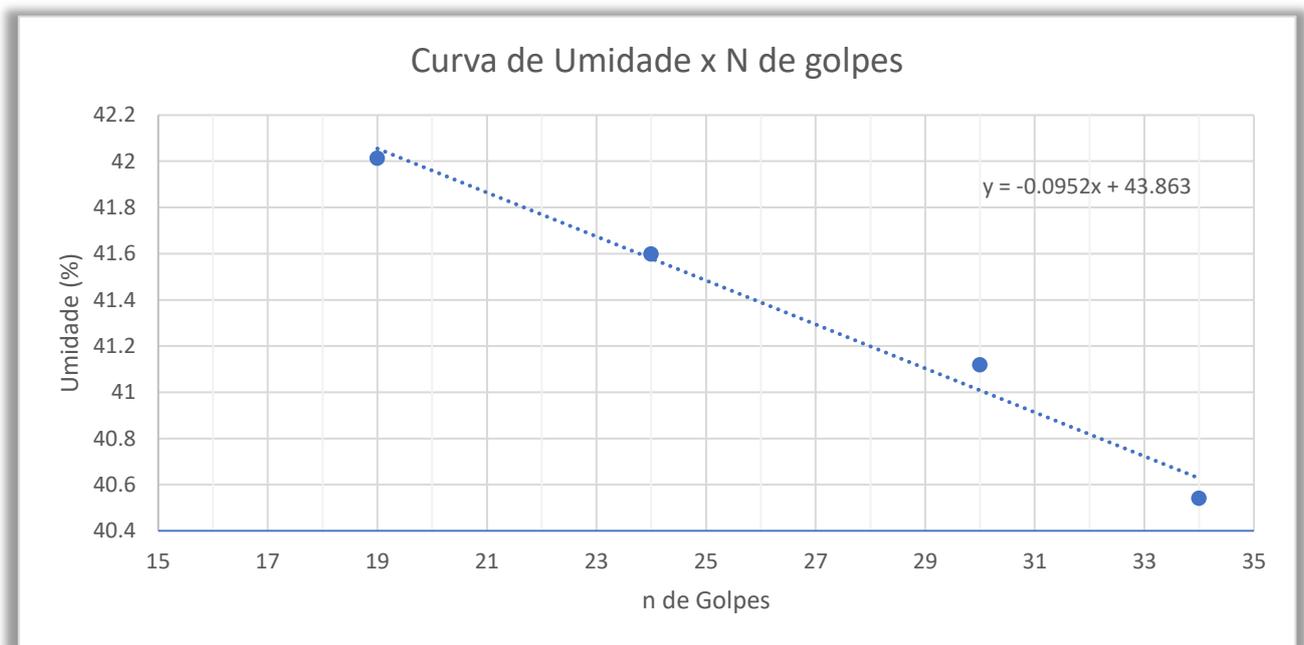
ANEXOS

i. Limite de Atterberg e Classificação SUCS

- Limite de Liquidez (LL)

Na figura 25 abaixo, está apresentando a curva do limite de liquidez do solo em que se relaciona a umidade correspondente ao valor de 25 golpes. Pode-se concluir que o teor de umidade que corresponde a 25 golpes a partir da equação obtida pela curva é 41,48 %.

Curva de Limite de Liquidez



- Limite de Plasticidade (LP)

O limite de plasticidade resultou de um valor de 31,8 %

A partir dos valores obtidos do Limite de Liquidez (LL) e do Limite de Plasticidade (LP), O índice de plasticidade (PI) se resultou de um valor de 9,7%. Tem em vista os resultados dos limites de Atterberg para o solo, de LL= 41,5%, LP=31,8% e IP= 9,7%, este pode ser classificado pelo SUCS como um solo de baixa compressibilidade (ML) pelo fato de que, o Limite de Liquidez é menor a 50% e também a partir do gráfico de plasticidade da carta casagrande encontrado no capítulo 5, na nona edição do Livro de Braja Das (2018) (p.138), a projeção do Limite de Liquidez e do Índice de plasticidade se encontra abaixo da linha A.

Resultados do limite de plasticidade do solo

Limite de Plasticidade					
Cápsula	1	2	3	4	5
Peso do solo úmido + cap (g)	9,26	9,87	9,12	10,41	9,84
Peso do solo seco + cap (g)	8,81	9,45	8,68	9,73	9,26
Peso da capsula	7,40	8,13	7,31	7,54	7,45
Peso da água (g)	0,45	0,42	0,44	0,68	0,58
Umidade (%)	31,91	31,82	32,12	31,05	32,04
LP= 31,8 %					
IP=LL-LP	IP= 41,5% – 31,8% = 9,7%				

Influência da compactação no aumento da capacidade de carga para a sapata assentada sobre a superfície.

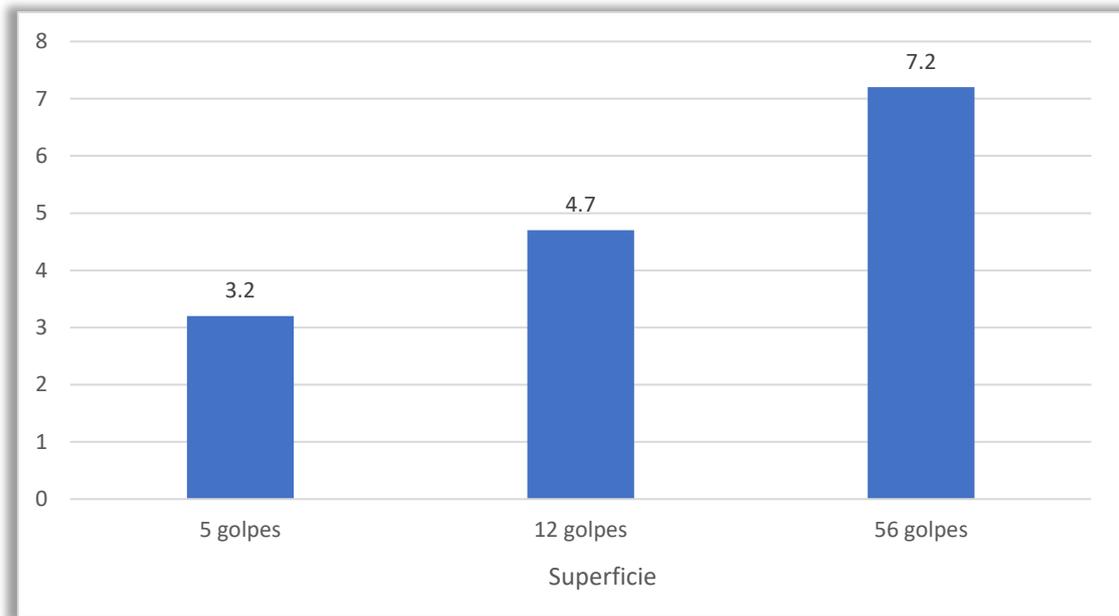


Gráfico representativo das curvas considerando uma compactação com 5 golpes.

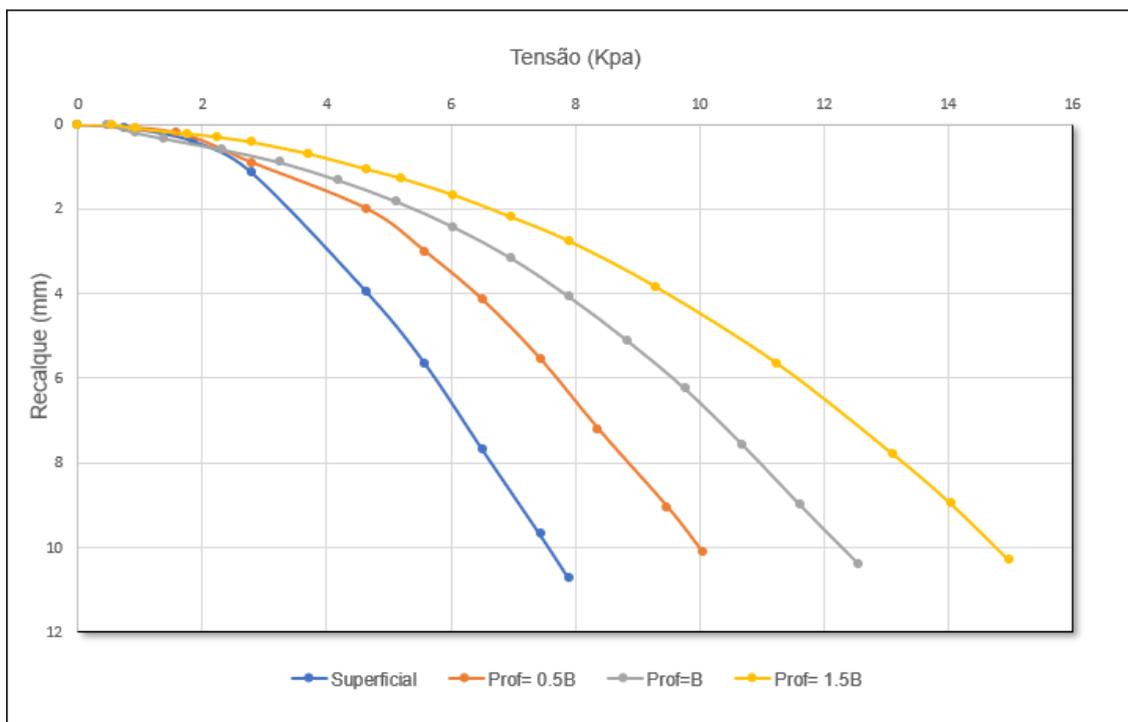


Gráfico representativo da determinação da capacidade de carga com a sapata assentado superficialmente considerando 5 golpes.

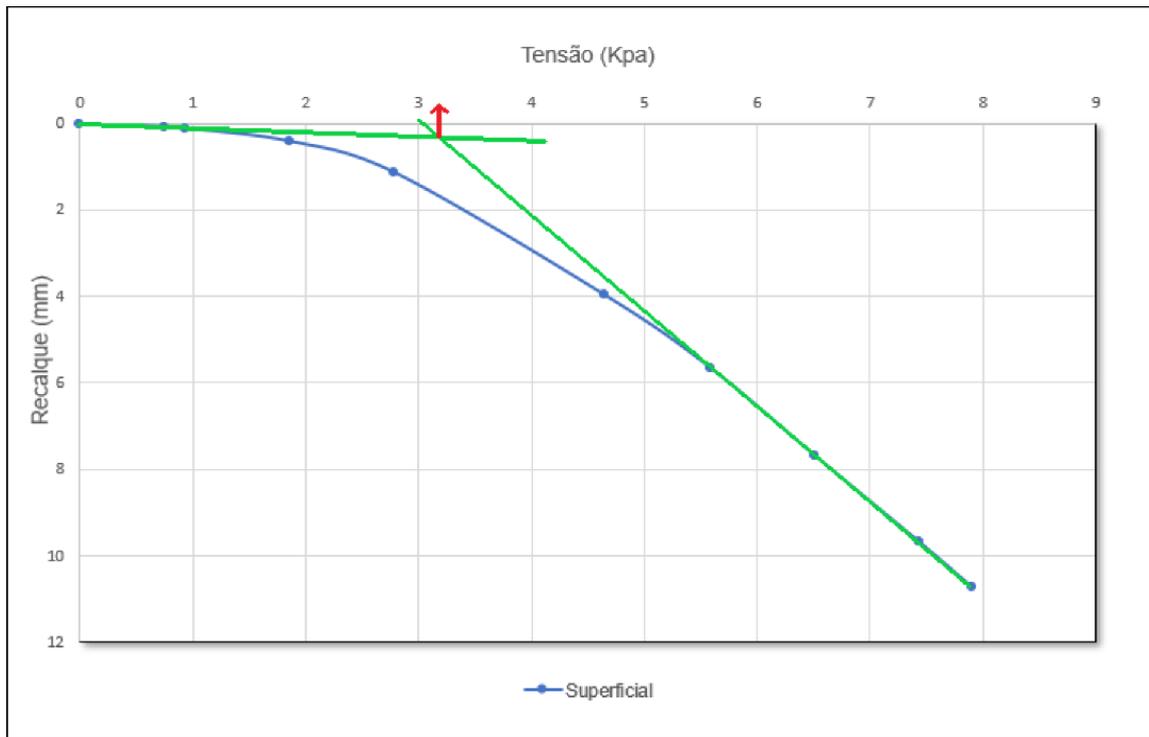


Gráfico representativo das curvas considerando uma compactação com 12 golpes

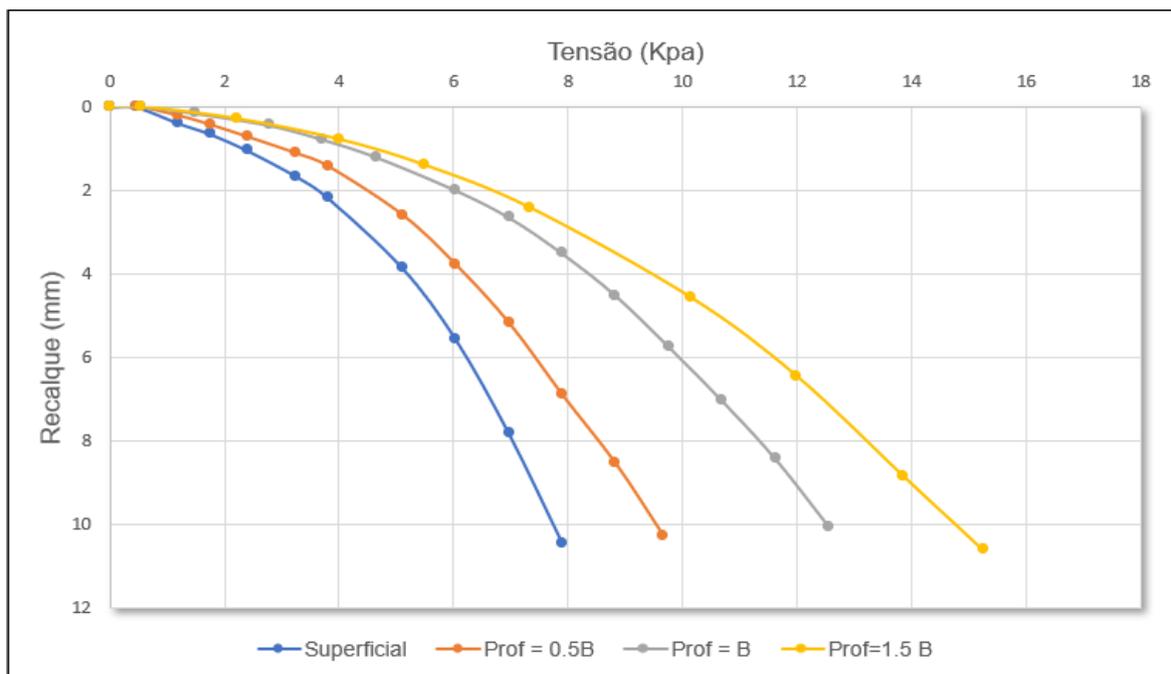


Gráfico representativo da determinação da capacidade de carga com a sapata assentado superficialmente considerando 12 golpes.

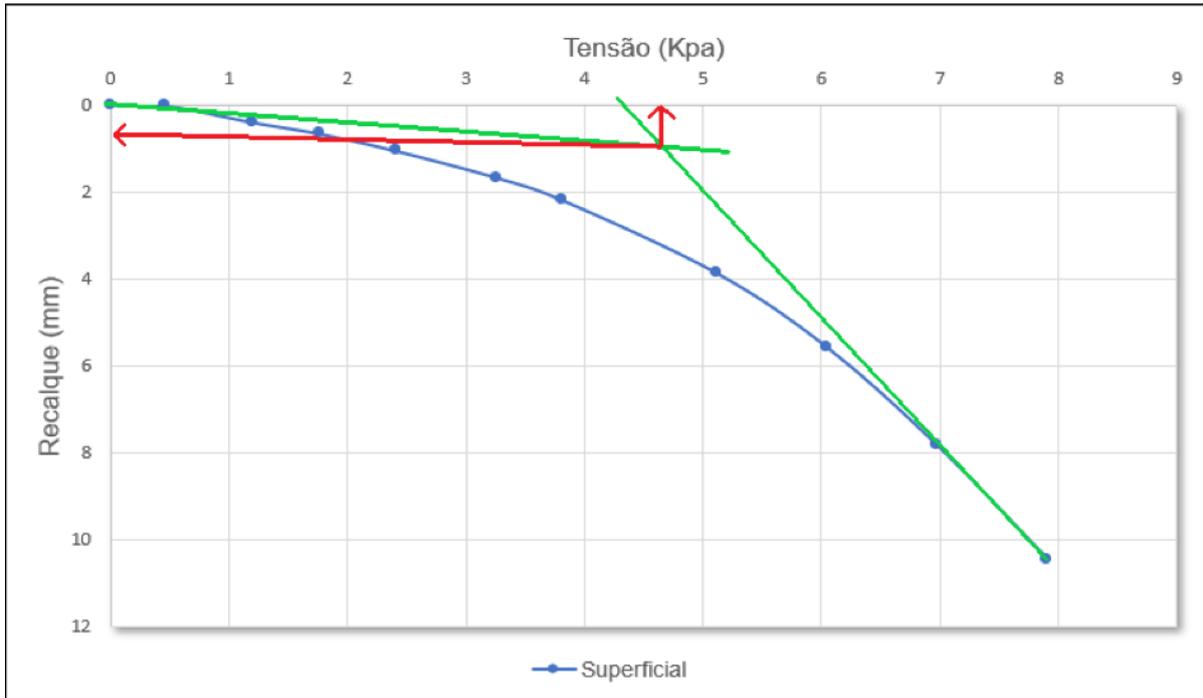


Gráfico representativo das curvas considerando uma compactação com 56 golpes

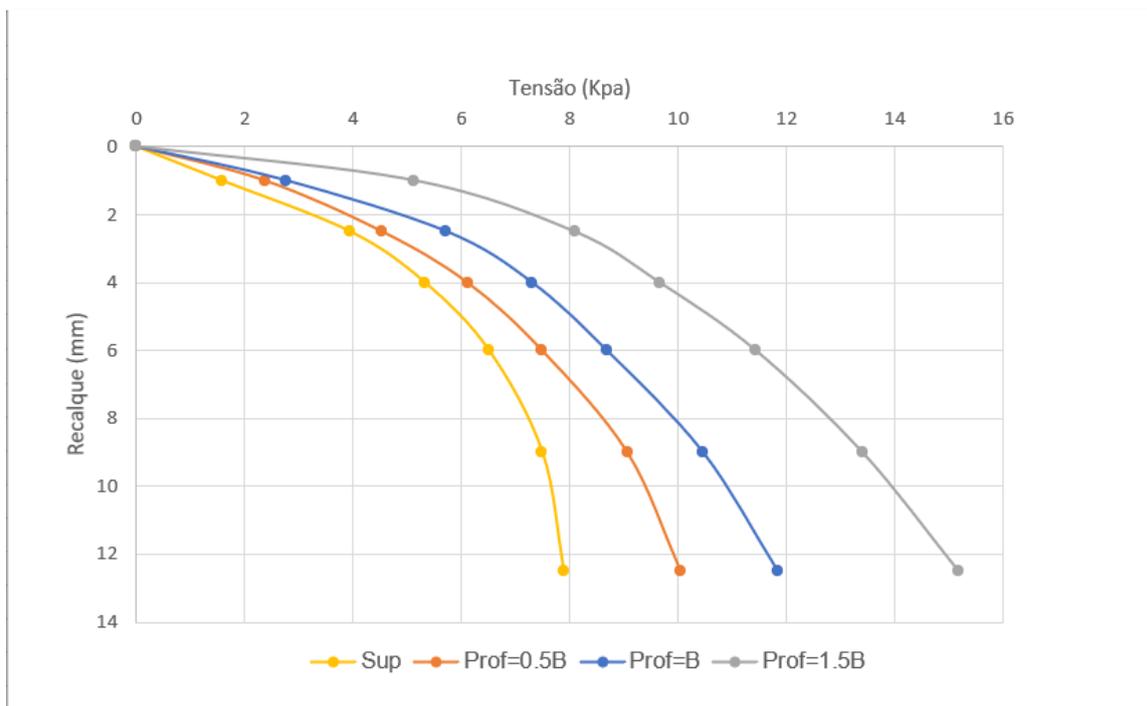
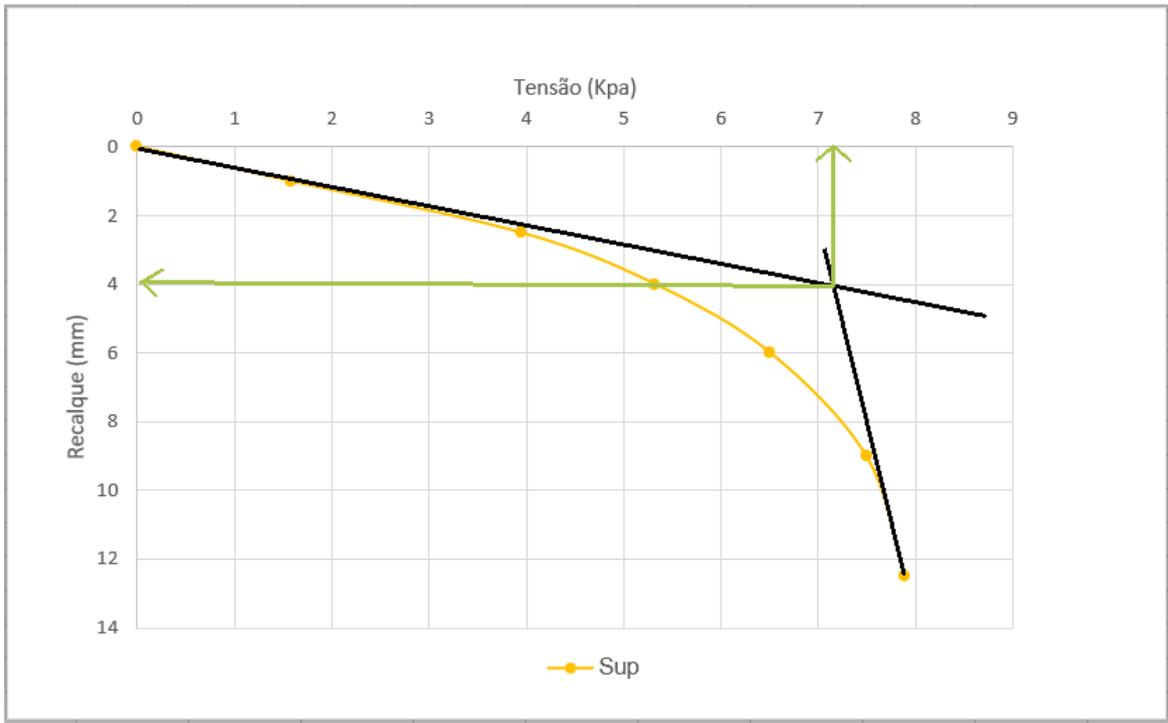


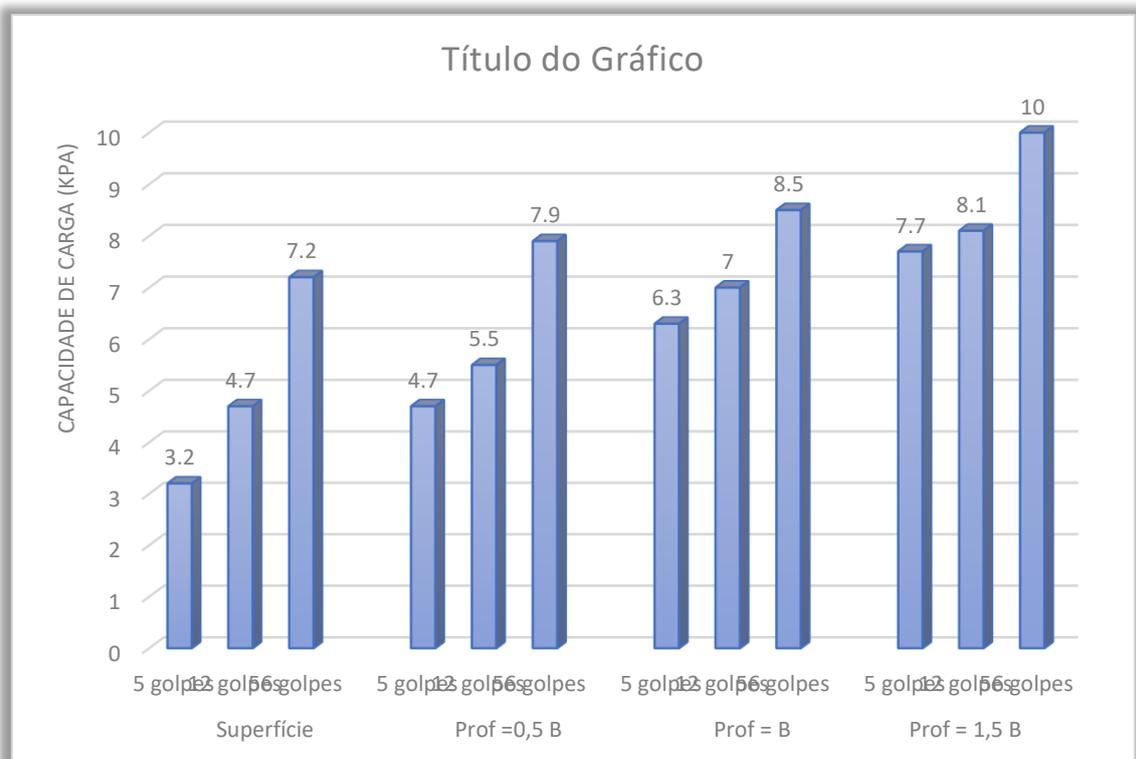
Gráfico representativo da determinação da capacidade de carga com a sapata assentado superficialmente

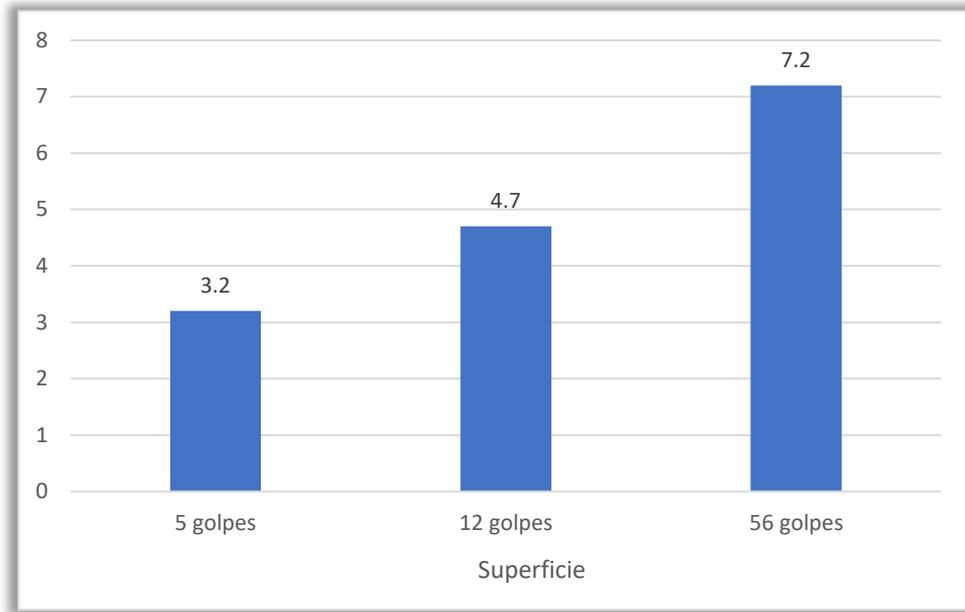
considerando 56 golpes.



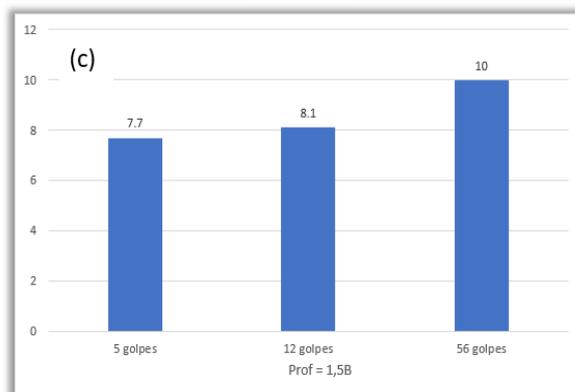
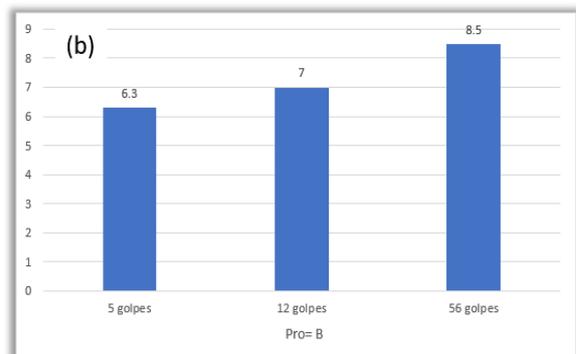
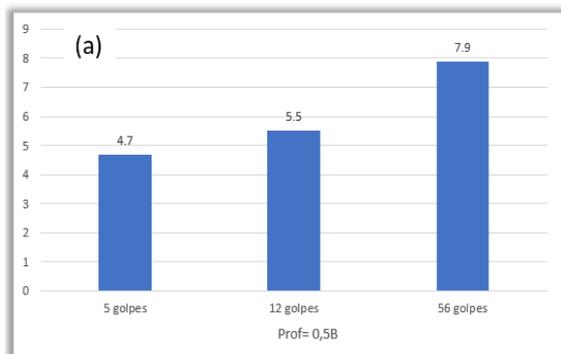
1 - INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO NA CAPACIDADE DE CARGA

Influência da compactação no aumento da capacidade de carga.





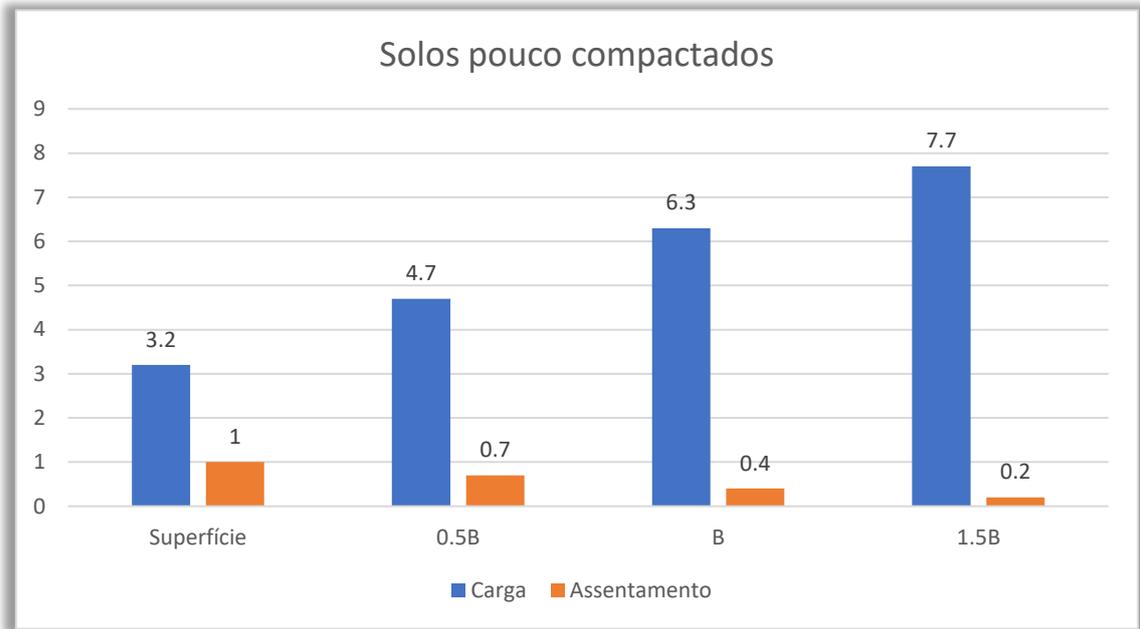
Influência da compactação no aumento da capacidade de carga. a) Profundidade = 0,5B; b) Profundidade = B; c) Profundidade = 1,5B.



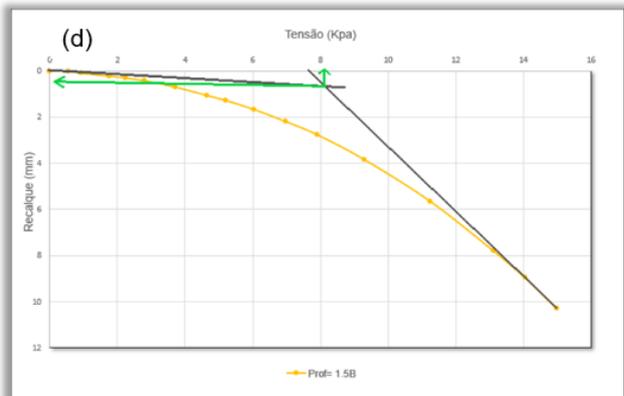
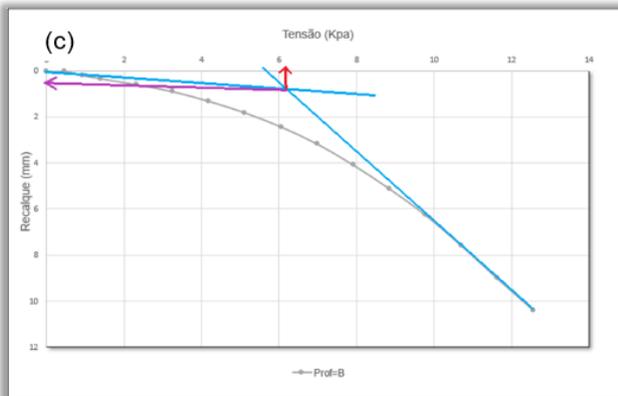
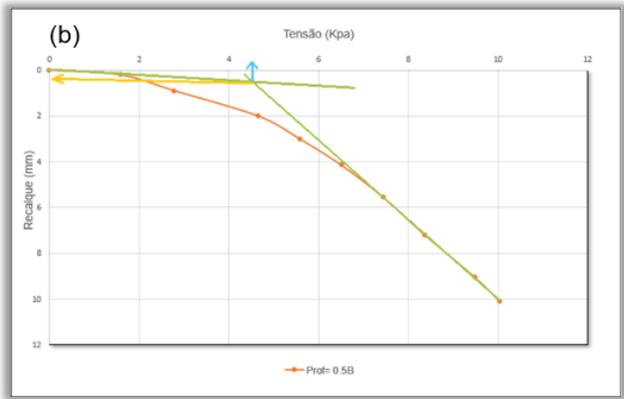
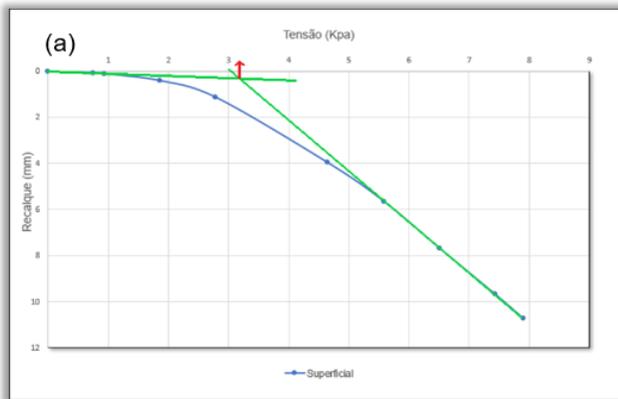
2 INFLUÊNCIA DE EMBUTIMENTO NA CAPACIDADE DE CARGA

B1- SOLOS POUCO COMPACTADOS

Gráfico representativo para as amostras de solos pouco compactados

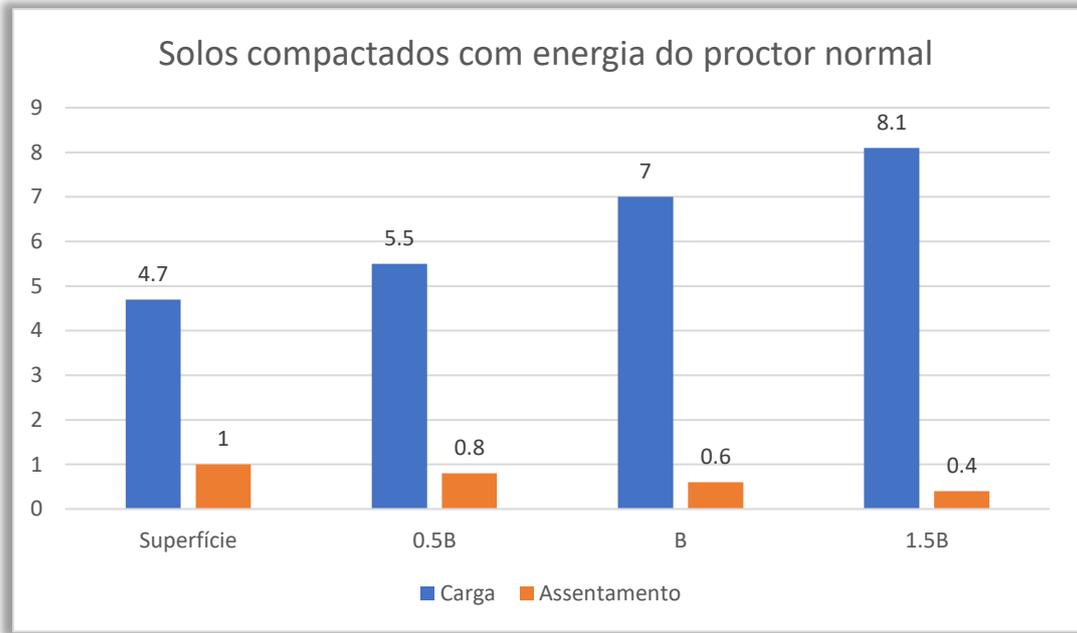


Capacidade de carga com diferentes embutimentos (profundidades) para solo pouco compactado. a) Sapata na superfície da amostra do solo; b) Profundidade = 0,5B; c) Profundidade = B; d) Profundidade = 1.5B.

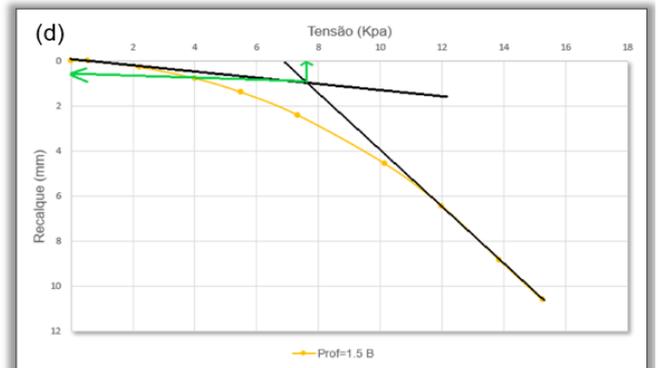
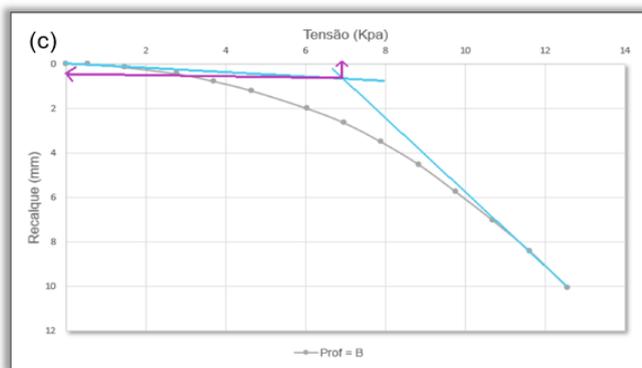
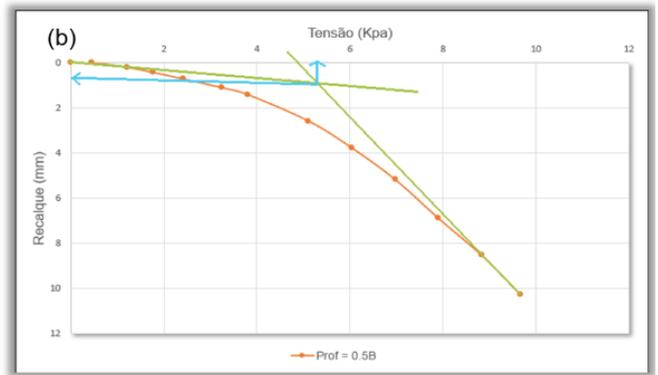
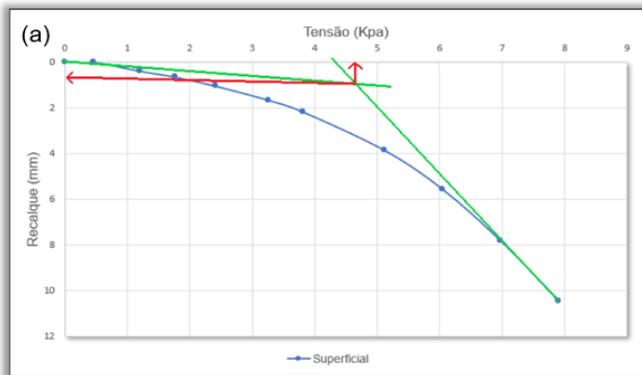


B2- SOLOS COMPACTADOS COM ENERGIA DO PROCTOR NORMAL

Gráfico representativo para solos compactado com energia do proctor normal

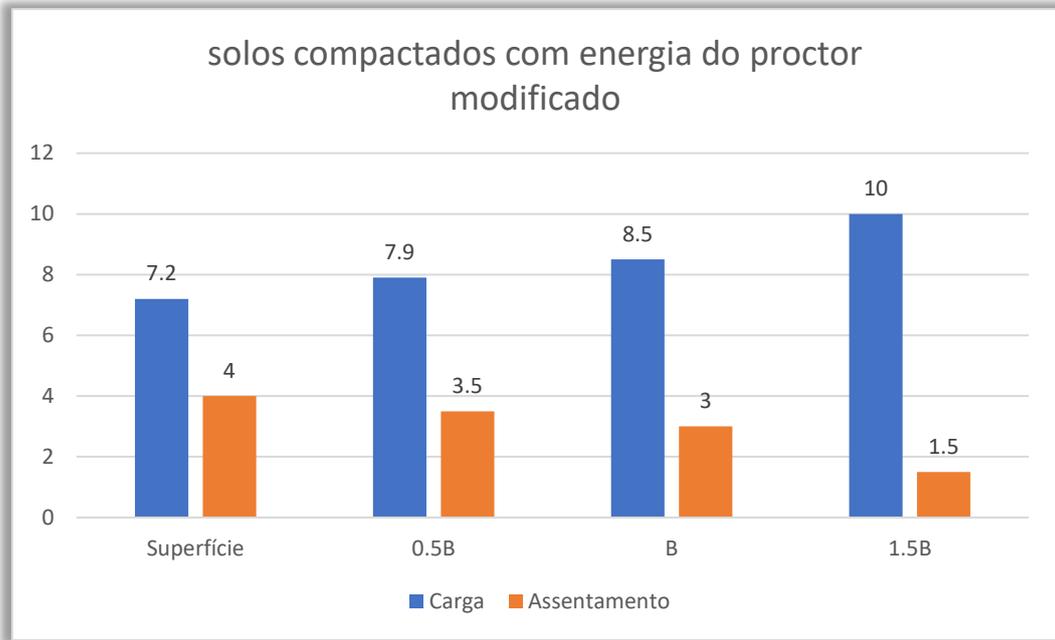


Capacidade de carga com diferentes embutimentos (profundidades) para a amostra de solo com energia do proctor normal. a) Sapata na superfície da amostra do solo; b) Profundidade = 0,5B; c) Profundidade = B; d) Profundidade = 1.5B.



B3- SOLOS COMPACTADOS COM ENERGIA DO PROCTOR MODIFICADO

Gráfico representativo para solos compactado com energia do proctor modificado



Capacidade de carga com diferentes embutimentos (profundidades) para a amostra de solo com energia do proctor modificado. a) Sapata na superfície da amostra do solo; b) Profundidade =0,5B; c) Profundidade = B; d) Profundidade =1.5B.

