

Determinação do comportamento carga-recalque em um solo residual fino

Lucas Serafim¹
Lucas Quiocca Zampieri²

Resumo

Muito difundido no Brasil, a utilização de métodos semi-empíricos baseados em ensaios de sondagem à percussão (SPT), não são capazes de fornecer ao profissional informações suficientes quanto ao comportamento de fundações superficiais. A realização de ensaios in situ com carregamento direto sobre placa, se configura como uma das melhores maneiras para determinar a capacidade de carga e previsão de recalque em um solo. Isso se deve ao fato deste ensaio reproduzir, em modelo reduzido, o comportamento real de uma fundação superficial. Esta pesquisa se propõe a analisar o comportamento carga-recalque de um solo residual fino, submetendo uma placa circular de 15 cm de diâmetro a uma prova de carga direta com diferentes velocidades de carregamento. Na etapa experimental, foram realizados quatro ensaios de placa com três tipos de carregamento: rápido, lento e cíclico lento. Na etapa analítica, foram gerados gráficos do comportamento tensão-recalque em cada ensaio, descritos os padrões de ruptura do solo, aplicados diferentes critérios para determinação da tensão admissível. Ao final, observou-se que a velocidade de carregamento influenciou diretamente na tensão admissível obtida, apresentando valores maiores para ensaios com carregamento rápido.

Palavras-chave: Ensaio de placa. Velocidade de carregamento. Tensão admissível.

Abstract

Widespread in Brazil, the use of semi-empirical methods based on standard penetration tests (SPT), are not able to provide the professional with sufficient information about the behavior of shallow foundations. Performing in situ tests with direct plate loading is one of the best ways to determine the load capacity and settlement prediction. This is because this test reproduces, in a reduced model, the actual behavior of a shallow foundation. This research aims to analyze the load-displacement behavior of a thin residual soil by subjecting a 15 cm diameter circular plate to a direct load test with different loading speeds. In the experimental stage, four plate load tests were performed with three loading types: fast, slow and slow cyclic. In the analytical stage, stress-displacement behavior graphs were generated in each test, the soil rupture patterns were described, different criteria were applied to determine the allowable. At the end, it was observed that the loading speed directly influenced the allowable stress obtained, presenting higher values for fast loading tests.

Keywords: Plate load test. Loading speed. Allowable stress.

¹ Graduando de Engenharia Civil na Universidade do Oeste de Santa Catarina; lucasserf@gmail.com

² Professor na Universidade do Oeste de Santa Catarina; lucas.zampieri@unoesc.edu.br

1 INTRODUÇÃO

Iniciar uma obra sem conhecimento prévio do terreno, é um dos maiores erros que podem ocorrer. Determinar a interação terreno-fundação-estrutura, sob fundamentação científica, previne situações que possam levar uma obra ao colapso. Para tanto, devem-se aplicar métodos de investigação geotécnica para exploração do subsolo, dentre esses: execução de sondagens e ensaios in loco (CAPUTO, 1988).

Segundo Russi (2007), para realizar o dimensionamento de fundações superficiais, é necessário definir a capacidade de carga e prever o comportamento do solo quanto a recalques, após submetido às cargas de uma estrutura.

Uma das maneiras de se obter resultados mais relevantes quanto ao comportamento carga-recalque de um solo, é realizando o ensaio de prova de carga direta sobre placas, normalizado pela Norma Brasileira 6489 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984), pois, através dele, será obtido o comportamento real do solo através de um modelo reduzido de sapata de fundação.

Devido as condições exigidas em norma para a realização do ensaio, obras de menor ou, até mesmo, maior porte, não o executam devido ao alto custo envolvido na mobilização de equipe e equipamentos compatíveis para montagem do sistema de reação.

Sendo assim, este trabalho se propõe a realizar o estudo do comportamento carga-recalque de um solo residual fino, adaptando características do ensaio de placa clássico, utilizando uma placa com diâmetro de 15 cm, com aplicação de carregamento rápido, lento e cíclico lento.

A utilização de placa de diâmetro inferior possibilita a aplicação de cargas menores, para obtenção de mesma tensão atuante no solo, conseqüentemente diminuindo a capacidade dos sistemas de transmissão e reação, tornando o ensaio financeiramente mais viável.

Difundir a utilização do ensaio de placa, com valor acessível a todos, é importante no sentido de buscar soluções cada vez mais seguras e econômicas no dimensionamento de fundações superficiais. Dessa maneira, conforme a NBR 6122 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019), é possível adotar coeficientes de segurança menores, reduzindo custos e aumentando a eficiência.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão abordadas as principais bibliografias utilizadas para o desenvolvimento do estudo do comportamento carga-recalque do solo.

2.1 CAPACIDADE DE CARGA DO SOLO

Conforme Velloso e Lopes (2011), a capacidade de carga, em fundações superficiais, é definida como o valor crítico de carga aplicada a um solo, na qual acontecerão recalques contínuos até que ocorra a ruptura do solo sob as fundações.

A capacidade de carga do solo é utilizada para critérios de dimensionamento em projetos, como a tensão admissível do solo. Conforme a NBR 6122 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019), a tensão admissível é a tensão adotada em projeto que, aplicada ao terreno pela fundação superficial, atende com coeficientes de segurança predeterminados, aos estados-limites último (ruptura) e de serviço (recalques excessivos).

Ainda de acordo com a NBR 6122 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019), a tensão admissível em fundações superficiais pode ser obtida através dos seguintes métodos:

- a) Prova de carga sobre placa: ensaio realizado de acordo com a NBR 6489/1984, onde os resultados devem ser interpretados levando-se em consideração a relação entre placa e fundação real, bem como as camadas influenciadas de solo;
- b) Métodos teóricos: empregam-se teorias de capacidade de carga desenvolvidas em Mecânica dos Solos;
- c) Métodos semiempíricos: utilizam correlações obtidas a partir de resultados de ensaios de investigação geotécnica.

De acordo com Décourt e Quaresma (1996, apud KIRSCHNER, 2017), a determinação da tensão admissível através do ensaio de prova de carga sobre placa, é reconhecido como a melhor maneira de se avaliar o comportamento carga-recalque de uma fundação, devido ao fato de estar mais próximo a uma situação de carregamento real, trazendo maior confiabilidade ao dimensionamento das fundações. Além disso, proporcionará a adoção de fatores de segurança e coeficientes de minoração à compressão, mais favoráveis a economia, conforme Quadro 1.

Quadro 1 – Fatores de segurança e coeficientes de minoração de fundações superficiais

Método	Coeficiente de minoração	Fator de segurança
Semiempírico	2,15	3,00
Teórico	2,15	3,00
Teórico ou semiempírico acrescido de duas ou mais provas de carga	1,40	2,00

Fonte: adaptada da NBR 6122 (ABNT, 2019).

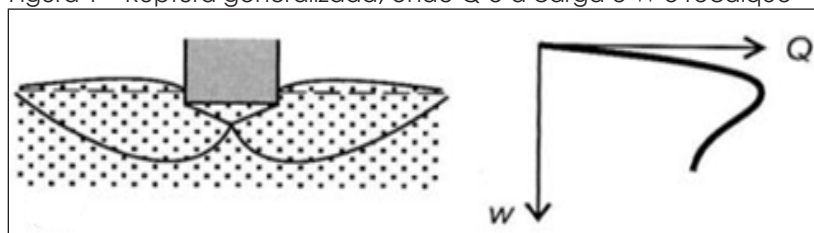
2.2 MECANISMOS DE RUPTURA DO SOLO

Segundo Caputo (1988), o comportamento de um material depende das tensões aplicadas a ele. Se aumentando as tensões, as deformações crescem proporcionalmente, o material está no estado elástico, continuando a aumentar as tensões e observando-se deformações apreciáveis, revela-se o estado plástico, em seguida, aparecerão fissuras locais e atinge-se o estado de ruptura (inelástico).

Velloso e Lopes (2011) determinaram três tipos característicos de ruptura no solo de uma fundação: a generalizada, a localizada e por puncionamento.

A ruptura generalizada caracteriza-se por uma ruptura brusca, bem definida, onde a superfície de deslizamento vai da borda da fundação até a superfície do terreno (Figura 1). A carga é bem definida, observa-se considerável elevação na superfície do terreno e ocorre em solos mais rígidos (VELLOSO E LOPES, 2011).

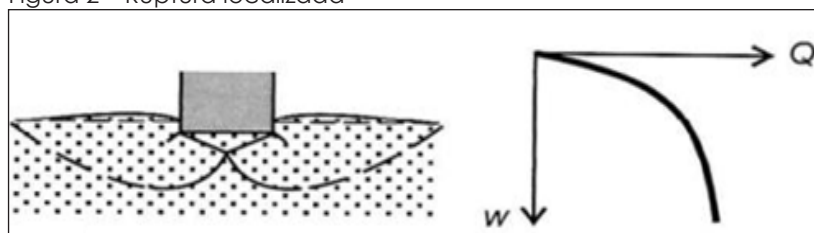
Figura 1 – Ruptura generalizada, onde Q é a carga e W o recalque



Fonte: Velloso e Lopes (2011).

A ruptura localizada é semelhante à generalizada, porém, possui uma curva mais abatida (Figura 2). A carga de ruptura não é tão pronunciada e ocorre em solos mais deformáveis (VELLOSO E LOPES, 2011).

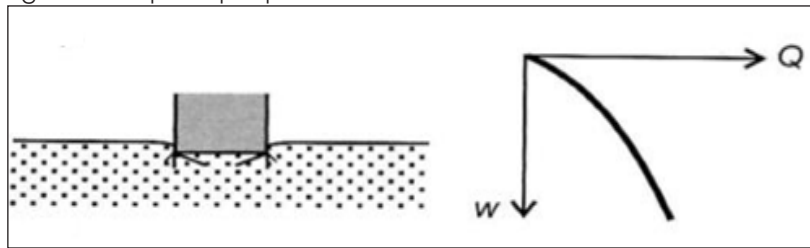
Figura 2 – Ruptura localizada



Fonte: Velloso e Lopes (2011).

Já a ruptura por puncionamento é de difícil observação, pois, à medida que a carga cresce, o movimento vertical da fundação é acompanhado pela compressão do solo imediatamente abaixo (Figura 3). A penetração da fundação é possibilitada pelo cisalhamento do solo em torno do perímetro da sua base. Praticamente não há movimentação de solo na superfície (VELLOSO E LOPES, 2011).

Figura 3 – Ruptura por punçãoamento

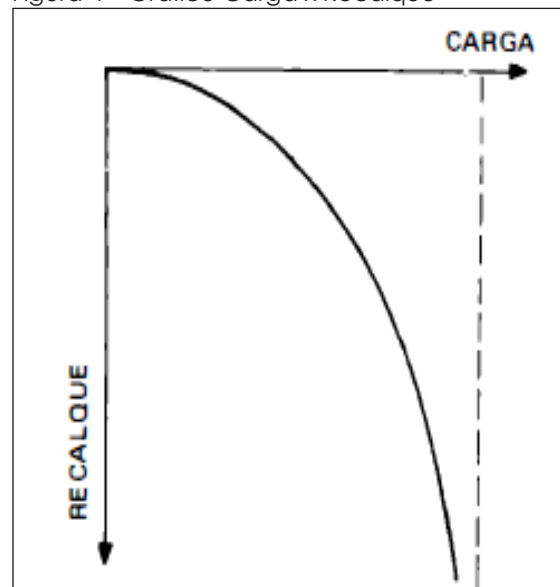


Fonte: Velloso e Lopes (2011).

2.3 ENSAIO DE PLACA

De acordo com Caputo (1988), as características de um solo submetido à compressão, podem ser observadas através da realização de provas de carga sobre o terreno de estudo. Esses ensaios têm por finalidade carregar o terreno, utilizando uma placa metálica de dimensões definidas, medindo seu recalque. Os resultados das leituras são transformados em um gráfico carga-recalque, como na Figura 4.

Figura 4 – Gráfico Carga x Recalque



Fonte: Caputo (1988).

As características geométricas da placa, o tipo de carga e o número de repetições de carga, podem influenciar consideravelmente sobre os resultados obtidos (CAPUTO, 1988).

Velloso e Lopes (2011) classificam os ensaios de placa conforme:

- localização: na superfície, em cavas ou em furos;
- tipo de placa: convencional ou placa parafuso;
- modo de carregamento: carga controlada ou deformação controlada.

No caso de carga controlada, é possível observar dois casos: carga incremental mantida por períodos de tempo preestabelecidos ou até estabilização e carga cíclica com diferentes padrões de ciclagem (VELLOSO E LOPES, 2011).

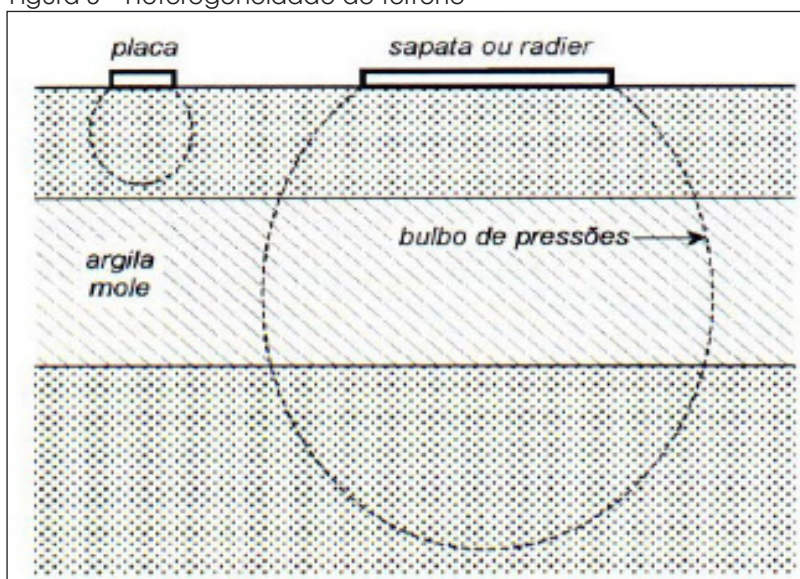
O ensaio de placa, normalizado pela NBR 6489 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984), consiste no carregamento vertical no centro de uma placa circular com área não inferior a 0,5 m², onde serão realizados incrementos de carga, mantidos até sua estabilização, medindo em cada estágio sua deformação. Os resultados desse ensaio deverão ser apresentados em um gráfico carga-recalque.

2.3.1 Cuidados na execução e interpretação

Velloso e Lopes (2011), salientam alguns cuidados importantes a serem tomados na execução e interpretação dos ensaios de placa, como:

- Heterogeneidade do terreno: caso haja estratificação do terreno, os resultados do ensaio poderão indicar muito pouco se comparados à fundação real (Figura 5);
- Presença de lençol d'água: onde o recalque de placas em areias submersas pode ser até duas vezes maior que em areias secas ou úmidas;
- Drenagem parcial: em solos argilosos pode estar ocorrendo adensamento e, assim, o recalque observado estará entre o instantâneo e o final ou drenado;
- Não linearidade da curva carga-recalque: pode haver não linearidade e mudança de comportamento quando o carregamento atingir a tensão de pré-adensamento.

Figura 5 – Heterogeneidade do terreno



Fonte: Velloso e Lopes (2011).

2.3.2 Tipos de carregamento

Conforme Velloso e Lopes (2011), dentre os ensaios de carga controlada, os mais comuns são os de carga incremental até estabilização (ensaio lento) e incrementos de carga mantidos por tempo preestabelecido (ensaio rápido). Esses tipos de ensaio são conhecidos pelas siglas inglesas SML (*slow maintained load*³) e QML (*quick maintained load*⁴). Ensaios de carga cíclica são considerados como casos especiais, em que o projetista prevê padrões de comportamento e especifica as características do ensaio.

As normas brasileiras determinam a utilização de diferentes tipos de carregamento durante a execução dos ensaios. A NBR 6489 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984) prevê para o ensaio de placa, somente o carregamento lento, enquanto a NBR 12131 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) prevê para a prova de carga estática em estacas, a utilização de carregamento rápido, lento e cíclico.

O ensaio lento, aproxima-se melhor do carregamento que uma fundação terá sob uma estrutura futura, onde, normalmente nos primeiros estágios de carga, a estabilização é alcançada rapidamente e à medida que o carregamento se aproxima da ruptura, necessita-se maiores tempos para estabilização. Assim sendo, estágios mais prolongados de carga conduzem as fundações a recalques maiores e a capacidade de carga menores (VELLOSO E LOPES, 2011).

2.4 RESULTADOS COM ENSAIO DE PLACA

Alguns estudos já realizados em provas de carga estática apontam que, a velocidade aplicada ao carregamento da placa afeta diretamente a capacidade de carga de um solo.

De acordo com Milititsky (1991, apud RUSSI 2007), altas velocidades de carregamento implicam no aumento da capacidade de carga, visto que fundações reais são submetidas a carregamentos de longa duração, enquanto no ensaio de placa busca-se alcançar a ruptura do solo em poucas horas.

Russi (2007), após ensaios de prova de carga realizados com placas de diferentes diâmetros, obteve resultados que demonstraram, para a placa de 15 cm, um aumento de 15,82 % na capacidade de carga ao aumentar a velocidade de carregamento, para a placa de 30 cm aumento de 18,29 % e para a placa de 50 cm aumento de 9,02 %.

Moreira (2014), realizou ensaios com placas de 48 e 80 cm de diâmetros que obtiveram considerável diferença no comportamento carga-recalque e destacou o efeito do bulbo de tensões neste tipo de ensaio. Para um recalque de 4,75 mm a placa de 48 cm teve uma tensão aplicada de 130 kPa, enquanto a placa de 80 cm uma tensão aplicada de 210 kPa. O autor do ensaio considera que esta diferença se deve ao maior alcance do bulbo de tensões na placa de 80 cm, que pode ter sido influenciado pela presença de maciço rochoso.

³ Traduzido como "carga de manutenção lenta" (VELLOSO e LOPES, 2011, tradução do autor).

⁴ Traduzido como "carga de manutenção rápida" (VELLOSO e LOPES, 2011, tradução do autor).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida em terreno de propriedade particular, localizado no município de Piratuba, Santa Catarina, nas coordenadas 51°47'6,28" longitude oeste e 27°25'14,40" latitude sul (Figura 6). Este terreno possui um corte de aproximadamente 50 cm de profundidade em quase sua totalidade de área de planta, para remoção de vegetação mais densa na camada superficial.

Figura 6 – Localização do terreno em Piratuba/SC



Fonte: adaptado do Google Earth (2019).

Buscou-se realizar o ensaio na condição mais natural possível do solo, utilizando-se para isso, equipamentos manuais para supressão da vegetação rasteira que se desenvolveu após a remoção da vegetação mais densa, alcançando a profundidade de 10 cm abaixo do nível atual do terreno.

Dessa maneira, conforme classificação apresentada anteriormente por Velloso e Lopes (2011), o ensaio de placa enquadrou-se como localizado em superfície.

Na continuação deste capítulo, serão apresentadas informações específicas, organizados por assuntos, sobre os procedimentos adotados tanto na etapa experimental quanto na etapa analítica da pesquisa.

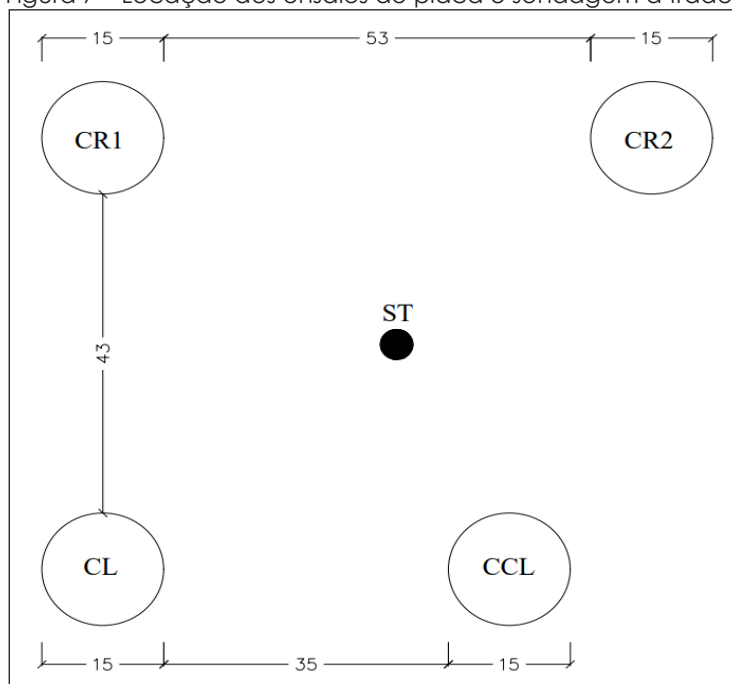
3.1 ENSAIO DE PLACA

Foram executados, ao todo, quatro ensaios de prova de carga direta em placa sobre o terreno. Para esses ensaios foram utilizados três tipos de carregamento:

- a) Carregamento rápido: executado duas vezes, nos ensaios denominados Carregamento Rápido 1 (CR1) e Carregamento Rápido 2 (CR2), conforme prescrições da NBR 12131 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006);
- b) Carregamento lento: executado uma vez, no ensaio denominado Carregamento Lento (CL), conforme prescrição da NBR 6489 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984); e
- c) Carregamento cíclico lento: executado uma vez, no ensaio denominado Carregamento Cíclico Lento (CCL), conforme prescrição da NBR 12131 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006).

Na Figura 7, está representado um esquemático com a localização dos ensaios realizados, bem como o local aproximado da sondagem a trado (ST), onde foi extraída amostra de solo para caracterização geotécnica. As cotas do esquema representativo estão em centímetros.

Figura 7 – Localização dos ensaios de placa e sondagem a trado



Fonte: os autores.

3.1.1 Equipamentos

Para a realização dos ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos: 1 Placa metálica circular com 15 cm de diâmetro e 8,2 mm de espessura, 1 relógio comparador sensível a 0,01 mm e medição máxima de 30 mm e 1 relógio comparador sensível a 0,01 mm

e medição máxima de 100 mm, 2 suportes magnéticos articulados para relógio comparador, 1 régua metálica com 1,90 m de comprimento, 1 macaco hidráulico de 25 t acionado por uma bomba hidráulica com capacidade para 700 bar e manômetro com variação de leitura de 5 bar. Como sistema de reação foi utilizado um caminhão basculante completamente carregado, proporcionando uma carga estática de reação estimada em 30 toneladas.

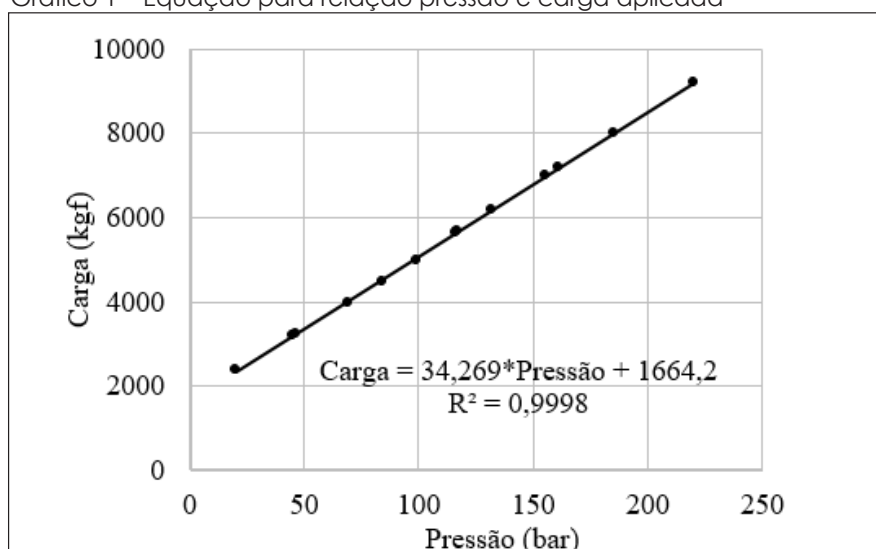
A aferição do manômetro da bomba hidráulica foi realizada utilizando-se a célula de carga da prensa hidráulica do laboratório de concreto da Unoesc, em Joaçaba/SC (Figura 8). Dessa maneira, foi possível criar uma relação direta entre a leitura do manômetro em bar e a carga aplicada em kgf, conforme o Gráfico 1.

Figura 8 – Aferição da bomba hidráulica em laboratório



Fonte: os autores.

Gráfico 1 – Equação para relação pressão e carga aplicada



Fonte: os autores.

3.1.2 Execução

Na Figura 9 é possível observar como foi realizada a montagem do sistema para execução do ensaio. Em 1 está posicionada a bomba hidráulica com manômetro, em 2 encontra-se a placa metálica circular e sobre ela o macaco hidráulico e os 2 relógios comparadores, em 3 a régua metálica onde estão apoiadas as duas bases magnéticas que sustentam os relógios comparadores e, em 4, o para-choque do caminhão basculante utilizado como reação do macaco hidráulico.

Figura 9 – Identificação dos equipamentos



Fonte: os autores.

Foram obedecidas as prescrições constantes na NBR 6489 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984) quanto ao nivelamento do terreno e influência de cargas e trepidações nos dispositivos de referência para medidas de recalques.

A régua metálica, utilizada para suporte dos medidores de recalque, foi bi apoiada. Seus apoios foram posicionados a uma distância de, no mínimo, 1,5 vezes o diâmetro da placa, medida a partir do seu centro. Já os relógios comparadores foram instalados em dois pontos diametralmente opostos da placa.

Foi utilizada régua com nível de precisão garantindo a planeza da superfície para apoio da placa metálica (Figura 10).

Figura 10 – Verificação da planeza com régua de bolha



Fonte: os autores.

Durante a execução dos carregamentos rápido, lento e cíclico lento, a carga e descarga foram aplicadas à placa em estágios sucessivos. A leitura dos recalques em cada um dos ensaios, foi realizada conforme os critérios de estabilização determinados na NBR 6489 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984) e NBR 12131 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006). O registro das leituras foi efetuado em planilhas preenchidas manualmente, das quais foram extraídas as informações para elaboração dos gráficos carga-recalque dos ensaios. O ensaio foi levado até ser alcançado um recalque total de 25 mm ou atingir-se o dobro da tensão admitida para o solo, prevista inicialmente em 600 kPa.

3.1.3 Análise dos resultados

Apesar de estabelecer os limites para interrupção do ensaio de placa, a NBR 6489 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984) não estipula critérios para determinação da tensão de ruptura do solo. Sendo assim, com base nos gráficos carga-recalque obtidos dos ensaios, serão aplicados os seguintes critérios, costumeiramente adotados em estudos com ensaio de placa, para determinação da tensão de ruptura e tensão admissível do solo:

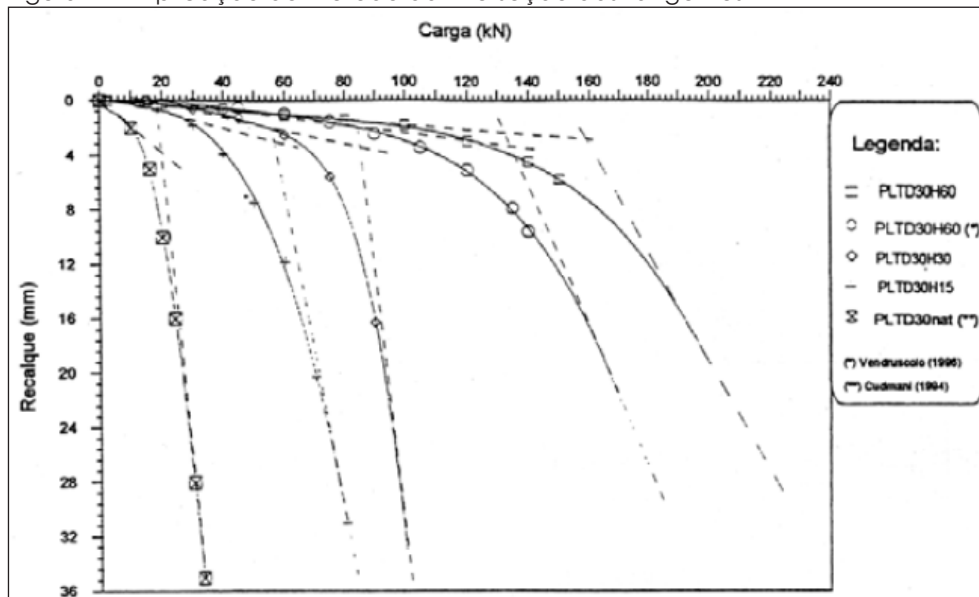
- a) Limitar o recalque máximo a $d/30$, onde d é o diâmetro da placa;
- b) Ponto de interseção das tangentes dos trechos inicial e final da curva carga-recalque;
- c) Critério de Boston.

O primeiro critério, apresentado por Russi (2007), Moreira (2014) e Kirschner (2017), limita o recalque máximo da placa a $d/30$, com seu diâmetro em milímetros. No caso da placa de 15 cm, o recalque máximo com base neste critério é de 5 mm. A tensão admissível, aplicado o coeficiente de segurança do Quadro 1, obtém-se através da Equação 1.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{d/30}}{2}, \text{ em MPa.} \quad (1)$$

O segundo critério, apresentado por Russi (2007) e descrito por Nienov (2006), traz um método proposto por Mansur e Kaufman (1956). Neste critério, são traçadas duas tangentes, uma no trecho inicial da curva e outra no trecho final. A tensão de ruptura é definida na interseção das duas tangentes, conforme Figura 11. A tensão admissível será obtida através da divisão do valor encontrado pelo coeficiente de segurança igual a 2.

Figura 11 – Aplicação do método da interseção das tangentes



Fonte: Sales (1998).

O terceiro critério, denominado como Critério de Boston, apresentado por Russi (2007), Moreira (2014) e Kirschner (2017), considera a tensão admissível como sendo o menor valor entre a tensão encontrada no recalque 10 mm e a tensão encontrada no recalque 25 mm aplicando o coeficiente de segurança, conforme Equação 2.

$$\sigma_{adm} \leq \begin{cases} \sigma_{10} \\ \frac{\sigma_{25}}{2} \end{cases}, \text{ em MPa.} \quad (2)$$

Conforme Russi (2007), o critério de Boston é utilizado em casos onde não fica evidenciada a ruptura do solo na curva carga-recalque. Para casos em que a ruptura é evidenciada, aplica-se o critério de Terzaghi (1943, apud RUSSI, 2007), utilizando-se como valor característico a tensão de ruptura, conforme Equação 3.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{rup}}{2}, \text{ em MPa.} \quad (3)$$

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Foi realizada uma sondagem a trado, próximo ao local de execução dos ensaios de placa. A sondagem alcançou a profundidade de 0,40 m, sendo impenetrável a partir deste ponto com o equipamento utilizado, de onde foi extraída uma amostra de solo para determinação de suas características em laboratório.

A fim de estabelecer esses dados, utilizaram-se as seguintes orientações:

- a) Umidade natural (w) (%), foram utilizadas as prescrições da NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016);
- b) Limite de liquidez foi realizado de acordo com a NBR 6459 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016);
- c) Limite de plasticidade foi realizado de acordo com a NBR 7180 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016);
- d) Índice de plasticidade foi obtido conforme fórmula indicada na NBR 7180 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016);
- e) Massa específica real dos grãos, foram seguidas as recomendações da NBR 6458 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016);
- f) Análise Granulométrica, realizada de acordo com a NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984), combinando peneiramento e sedimentação.

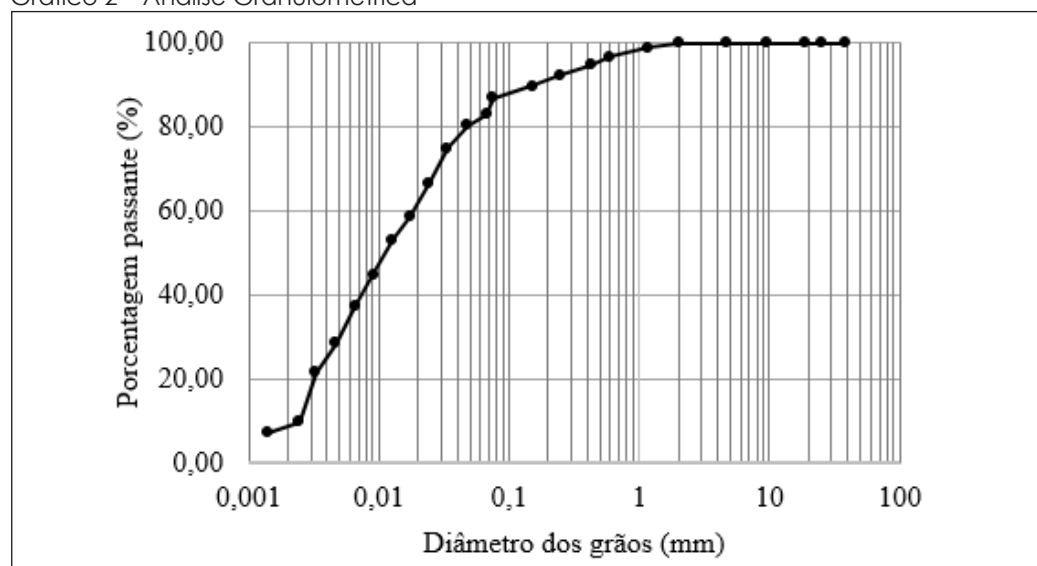
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos após a realização dos ensaios com a placa de 15 cm de diâmetro e diferentes tipos de carregamento. O capítulo será organizado com os resultados de caracterização geotécnica, comportamento tensão-recalque, identificação dos padrões de ruptura do solo, comparação entre os gráficos e determinação das tensões admissíveis.

4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

No Gráfico 2 e na Tabela 2 estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica, realizados no laboratório de solos da Unoesc, em Joaçaba/SC.

Gráfico 2 – Análise Granulométrica



Fonte: os autores.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de caracterização do solo

Amostra	W _{nat} (%)	Massa esp. real grãos (g/cm ³)	Limites de Atterberg		
			LL (%)	LP (%)	IP (%)
01	8,73	2,348	61	38	23

Fonte: os autores.

Com base na Tabela 2 e aplicando-se as Equações 4 e 5, foram obtidos Índice de Consistência (IC) igual a 2,27 e Índice de Liquidez (IL) igual a 1,27, permitindo realizar a classificação do solo como altamente plástico e de consistência dura, conforme Caputo (1988).

$$IC = \frac{LL - W_{nat}}{IP} \quad (4)$$

$$IL = \frac{LP - W_{nat}}{IP} \quad (5)$$

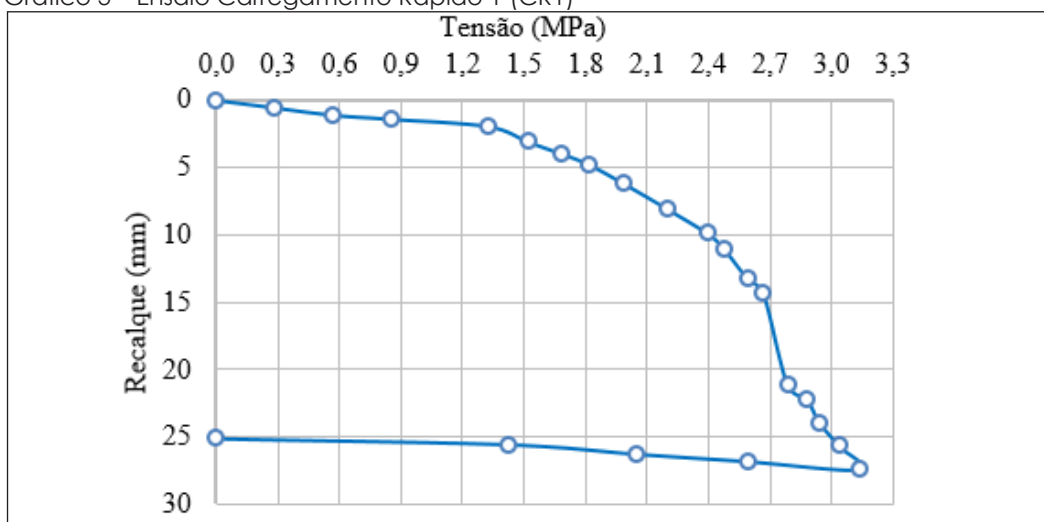
4.2 COMPORTAMENTO TENSÃO-RECALQUE

Nos Gráficos 3 a 6, são apresentados os dados obtidos através de leituras realizadas no acompanhamento dos ensaios, as tabelas com os valores estabilizados para cada estágio estão no Apêndice A deste artigo. Os valores apresentados nos gráficos correspondem às

leituras de recalques estabilizadas ao final de cada estágio de aplicação de carga. Optou-se por apresentar os valores do eixo correspondente à carga, já convertidos para tensão em MPa, para melhor identificação da tensão de ruptura do solo.

No ensaio Carregamento Rápido 1 (CR1), foram realizados 18 estágios de incremento de carga e 4 estágios de descarregamento. O ensaio foi conduzido até o recalque de 27,4 mm e, após o descarregamento total da placa, o recalque retornou a 25,1 mm, conforme Gráfico 3.

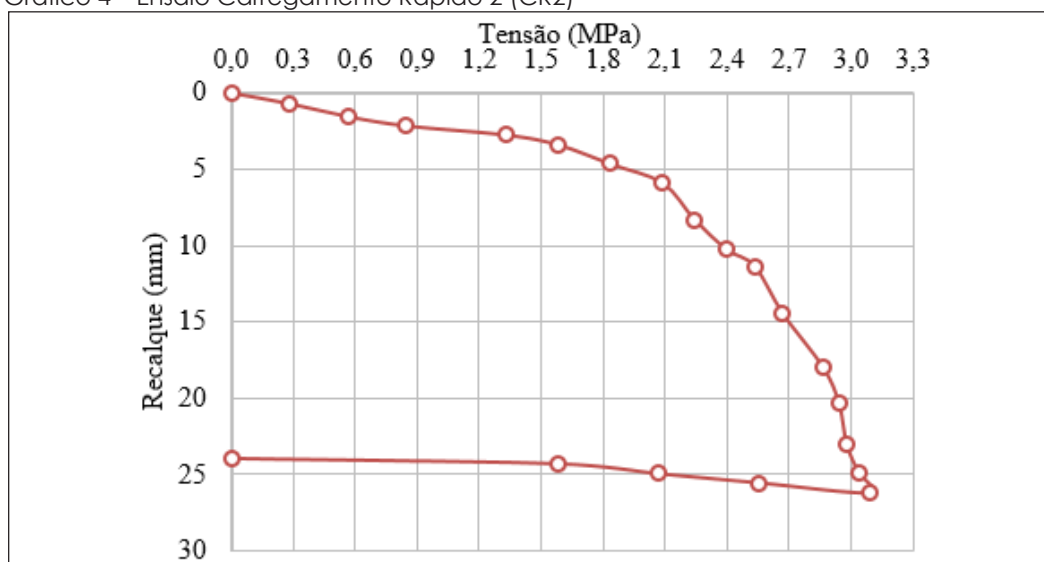
Gráfico 3 – Ensaio Carregamento Rápido 1 (CR1)



Fonte: os autores.

No ensaio Carregamento Rápido 2 (CR2), foram realizados 16 estágios de incremento de carga e 4 estágios de descarregamento. O ensaio foi conduzido até o recalque de 26,2 mm e, após o descarregamento total da placa, o recalque retornou a 24,0 mm, conforme Gráfico 4.

Gráfico 4 – Ensaio Carregamento Rápido 2 (CR2)



Fonte: os autores.

Em nenhum ensaio, houve um pronunciamento acentuado do recalque que possibilitasse a identificação de uma carga de ruptura definida, sendo esse comportamento característico em solos deformáveis.

4.3 PADRÕES DE RUPTURA DO SOLO

Foi possível observar que o comportamento dos gráficos tensão-recalque demonstrou compatibilidade com os padrões de ruptura descritos no item 2.2, conforme Velloso e Lopes (2011).

As Figuras 13 e 14 apresentam o solo na fase final dos ensaios CR1 e CR2, respectivamente, após o descarregamento total da placa. Em ambos ensaios, o solo apresentou fissuras do tipo radiais, mais pronunciadas no ensaio CR1, com cisalhamento rente às bordas da placa e sem movimentação na superfície, caracterizando ruptura por punção, conforme Figura 3.

Figura 13 – Ruptura do solo no ensaio CR1



Fonte: os autores.

Figura 14 – Ruptura do solo no ensaio CR2



Fonte: os autores.

As Figuras 15 e 16 apresentam o solo na fase final dos ensaios CL e CCL. Em ambos ensaios, o solo apresentou fissuras do tipo radiais e, também, diametrais, com cisalhamento rente às bordas da placa e sem movimentação na superfície, também caracterizando ruptura por puncionamento.

Figura 15 – Ruptura do solo no ensaio CL



Fonte: os autores.

Figura 16 – Ruptura do solo no ensaio CCL

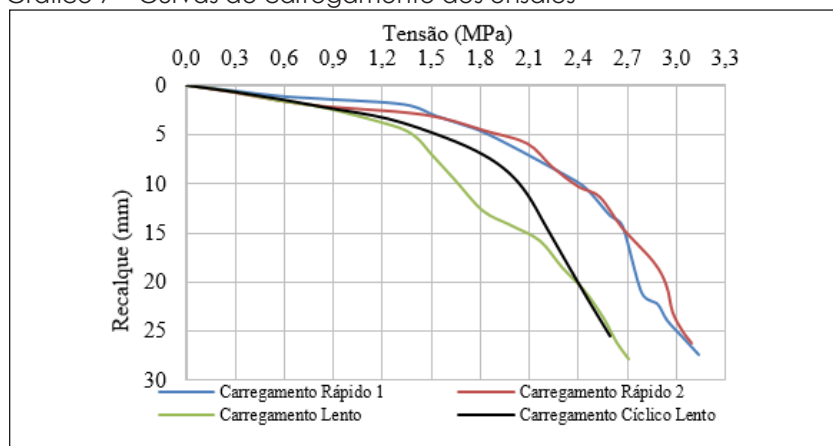


Fonte: os autores.

4.4 COMPARATIVO ENTRE OS ENSAIOS

A fim de realizar comparação entre os ensaios, foram geradas curvas que consideram somente os estágios finais de carregamento das placas até o ponto de recalque máximo alcançado durante o ensaio (Gráfico 7).

Gráfico 7 – Curvas de carregamento dos ensaios



Fonte: os autores.

Através do Gráfico 7, é possível observar o comportamento dos 4 ensaios, com superposição das curvas até a tensão de 0,4 MPa. A partir deste ponto, a curva correspondente ao ensaio Carregamento Rápido 1 (CR1) se separa das demais e passa a apresentar um comportamento onde, apesar do aumento da tensão, não sofre deformação proporcional às outras curvas. As curvas dos ensaios Carregamento Rápido 2 (CR2), Carregamento Lento

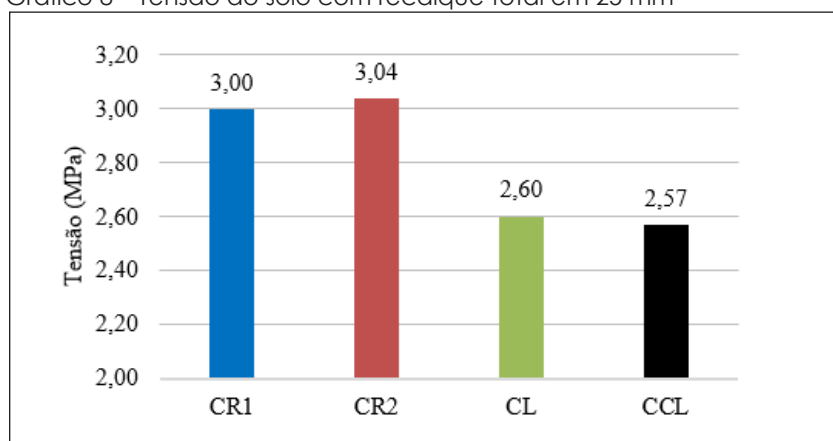
(CL) e Carregamento Cíclico Lento (CCL), continuam superpostas até a tensão de 0,8 MPa assumindo, a partir desse ponto, comportamentos distintos.

As curvas correspondentes aos ensaios CR1 e CR2, possuem comportamento semelhante, não-linear. Ambas não trabalham superpostas na maior parte do ensaio, mas ocorre o cruzamento entre elas em vários pontos, indicando similaridade. Próximo ao estágio final de carregamento do ensaio, percebe-se que as curvas se aproximam novamente e tendem a um novo cruzamento ou superposição.

As curvas que relacionam os ensaios CL e CCL, apresentam similaridade até a tensão de 0,9 MPa. No intervalo entre 0,9 MPa e 2,4 MPa, as curvas apresentam comportamento totalmente distinto, sendo que no ensaio CL são observados recalques mais pronunciados que o ensaio CCL para valores de tensão iguais. A partir de 2,4 MPa, as curvas se cruzam e voltam a apresentar geometria similar, não ocorrendo a superposição, mas muito próximas e paralelas uma a outra.

A NBR 6489 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984) estabelece o recalque total de 25 mm para conclusão do ensaio de placa, com base neste valor tem-se o seguinte: no recalque 25 mm, o ensaio CR1 apresentou tensão de 3,00 MPa e o ensaio CR2 apresentou tensão de 3,04 MPa, ou seja, o ensaio CR2 apresentou valor 1,33% maior que CR1, por sua vez, o ensaio CL apresentou tensão de 2,60 MPa e o ensaio CCL apresentou tensão de 2,57 MPa, ou seja, o ensaio CL apresentou valor 1,17% maior que CCL (Gráfico 8).

Gráfico 8 – Tensão do solo com recalque total em 25 mm



Fonte: os autores.

Através dos Gráficos 7 e 8, observa-se claramente que os ensaios CR1 e CR2, executados com carregamento rápido, atingiram tensões finais maiores que os ensaios CL e CCL, executados com carregamento lento. Considerando o maior valor, 3,04 MPa, obtido no ensaio CR2 e o menor valor, 2,57 MPa, obtido no ensaio CCL, a tensão no ensaio rápido é 18,29% maior que no ensaio lento. Essa situação corrobora as afirmações de Milititsky (1991) e o experimento de Russi (2007) citado no item 2.4, onde se concluiu que carregamentos rápidos irão gerar tensões finais maiores que carregamentos lentos.

Nota-se que o período de estabilização das leituras interferiu diretamente nos resultados obtidos. Nos ensaios com carregamento lento, CL e CCL, as curvas desenvolveram trajetória mais fechada que os ensaios com carregamento rápido, CR1 e CR2, alcançando valores de recalque maiores para iguais valores de tensão. Baseando-se em conhecimentos geotécnicos gerais, é possível afirmar que esse comportamento ocorre devido a maneira como as tensões se distribuem no solo, favorecendo a acomodação dos grãos quando realizada de forma gradual.

4.5 DEFINIÇÃO DA TENSÃO ADMISSÍVEL

Aplicando-se os critérios estabelecidos em 3.1.3, foi possível determinar a tensão de ruptura e tensão admissível do solo através dos ensaios com a placa circular de 15 cm. As tensões de ruptura encontradas podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Tensões de ruptura do solo para cada ensaio

Critério	Tensão de ruptura (MPa)			
	CR1	CR2	CL	CCL
d/30	1,84	1,91	1,38	1,49
Int. Tangentes	1,73	2,15	1,71	1,86
Boston	2,40	2,37	1,66	1,96
Boston	3,00	3,04	2,60	2,57

Fonte: os autores.

Para definição da tensão admissível, aplicou-se um fator de segurança igual a 2 aos dados da Tabela 3, conforme estabelece o Quadro 1 do capítulo 2.1. As tensões admissíveis para cada ensaio e a média das tensões, podem ser observadas na Tabela 5.

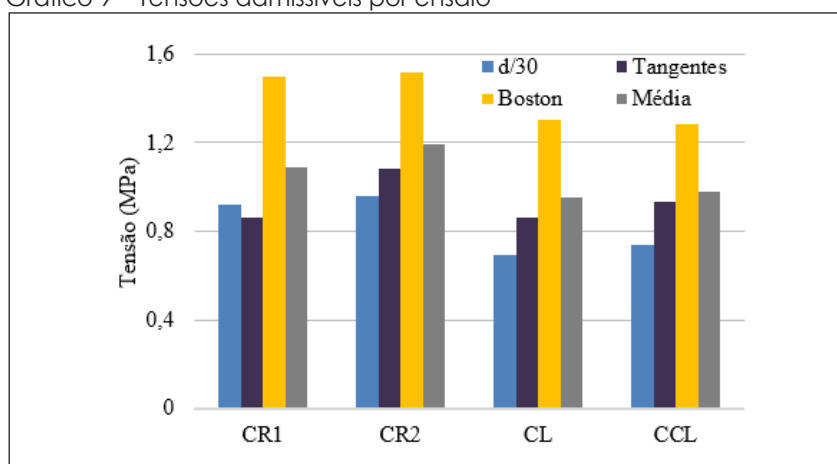
Tabela 5 – Tensões admissíveis do solo para cada ensaio

Critério	Tensão admissível (MPa)			
	CR1	CR2	CL	CCL
d/30	0,92	0,96	0,69	0,74
Int. Tangentes	0,86	1,08	0,86	0,93
Boston	1,50	1,52	1,30	1,28
Tensão adm média	1,09	1,19	0,95	0,98

Fonte: os autores.

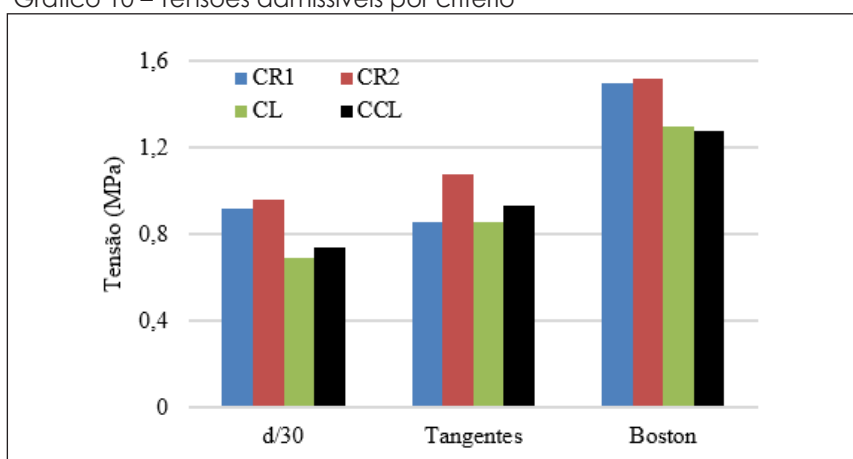
Os Gráficos 9 e 10 ilustram, comparativamente, as tensões admissíveis obtidas por ensaio e por critério.

Gráfico 9 – Tensões admissíveis por ensaio



Fonte: os autores.

Gráfico 10 – Tensões admissíveis por critério



Fonte: os autores.

Com base no Gráfico 9, é possível observar que todos os critérios levam à obtenção de valores diferentes para a tensão admissível. O critério de Boston foi o que apresentou tensões admissíveis mais elevadas, para todos os ensaios. Já o critério d/30 foi o que apresentou valores mais moderados, exceto no ensaio CR1, onde o método da Interseção das Tangentes obteve menor valor.

O Gráfico 10 demonstra que o critério d/30 e o critério de Boston apresentam, de maneira geral, tensões admissíveis maiores para os ensaios com carregamento rápido, acompanhando o comportamento de suas curvas apresentadas no Gráfico 7.

5 CONCLUSÃO

A expectativa anterior ao ensaio era de se chegar à ruptura completa do solo, porém, nenhum dos casos apresentou carga de ruptura bem definida. Sendo assim, os estágios de incremento de carga foram realizados até se atingir, no mínimo, recalque de 25 mm.

Em todos os ensaios, à medida que ocorriam os incrementos de carga, o solo logo abaixo da placa afundava, sem movimento na superfície, caracterizando ruptura por punção.

Após obter os gráficos com comportamento tensão-recalque ao final dos ensaios, foi possível observar que a velocidade de carregamento da placa interfere diretamente na capacidade de carga do solo, assumindo valores maiores para os ensaios caracterizados com carregamento rápido. Comparando-se o menor valor obtido para o ensaio com carregamento lento e o maior valor para o ensaio rápido, no recalque de 25 mm, o aumento foi de 18,29%.

A aplicação de diferentes critérios para determinação da tensão admissível, conduziram a valores de tensões distintos, variando entre 0,69 MPa e 1,52 MPa.

O critério de Boston foi o método que apresentou valores superiores para tensão admissível, enquanto o critério d/30 foi o que apresentou valores mais moderados.

Levando-se em conta o que foi observado no solo estudado, pode-se dizer que o tempo de estabilização das leituras foi determinante nos resultados obtidos, onde, alcançaram-se maiores valores de recalque para um determinado valor de tensão atuando na placa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122 - projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457 - amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458 - grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459 - solo – determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6489 - prova de carga direta sobre terreno de fundação**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180 - solo – determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181 - análise granulométrica de solos**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12131 - estacas – prova de carga estática – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2006.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1988.

KIRSCHNER, Felipe Feron. **Estudo do comportamento de carga e recalque de solos residuais lateríticos argilosos, naturais e estabilizados, visando uso em fundações superficiais.** 2017. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2017.

MOREIRA, Renan. **Estudo da capacidade de carga e recalque de solo residual de basalto.** 2014. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2014.

NIENOV, Fabiano Alexandre. **Comportamento à compressão de estacas escavadas de pequeno diâmetro em solo sedimentar na região de Santa Maria.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

RUSSI, Daniel. **Estudo do comportamento de solos através de ensaios de placa de diferentes diâmetros.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SALES, Luís Fernando Pedroso. **Estudo do comportamento de fundações superficiais assentes em solos tratados.** 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. **Fundações volume completo.** São Paulo: Oficina de textos, 2011.

