



COMPARAÇÃO ENTRE RECALQUE ESTIMADO EM SAPATA POR MÉTODOS TEÓRICOS E RECALQUE DE SAPATA OBTIDO COM PROVA DE CARGA EM PLACA NO SOLO DE CASCAVEL-PR

LUCAS ALAN BALBINO¹; MAYCON ANDRÉ DE ALMEIDA²

¹Discente, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel-PR. lucas_alan8@hotmail.com;

²Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento. Prof. Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel-PR.
mayconalmeida@creapr.org.br.

RESUMO: O desempenho de uma estrutura ao longo da sua vida útil, principalmente de uma fundação, é ligado diretamente a alteração do maciço do solo, então a correta análise dessa alteração é de grande importância para evitar problemas em uma edificação. Neste artigo, foi realizada a comparação entre os recalques obtidos através de prova de carga em placa com os recalques estimados por meio da Teoria da Elasticidade e Adensamento, utilizando para isso ensaios como o de sondagem à percussão do tipo *Standard Penetration Test* (SPT), ensaios triaxiais e ensaios de adensamento, todos realizados no Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz (CEEF), podendo assim verificar o comportamento dos métodos de estimativa de recalque. Com toda a análise, pode-se verificar que os recalques obtidos pelos métodos consagrados, Teoria da Elasticidade e Adensamento, são inferiores aos recalques finais obtidos pela prova de carga, reforçando a importância de se realizar ensaios de provas de carga em placa para projetar fundações rasas sobre solos argilosos muito moles, pois existe uma incerteza em relação aos métodos consagrados.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações. Recalque. Sapata.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento do setor habitacional popular, houve um aumento significativo na demanda por obras pequenas, justificando a necessidade de projetos mais racionais, selecionando o tipo de fundação conforme o comportamento mecânico do solo. De acordo com Pinto (2006), as sapatas são dimensionadas principalmente em função da tensão admissível do solo, dessa maneira podem ser executadas para obras de pequeno e grande porte. É um tipo de fundação com custo pequeno e tem rapidez na execução, podendo ser construída sem o uso de equipamentos e ferramentas específicas. Uma sapata bem dimensionada pode ser executada com pouca escavação e um pequeno consumo de concreto.

Segundo Zen e Almeida (2018), o solo situado na cidade de Cascavel-PR é argiloso residual e laterítico, com elevado índice de porosidade. De acordo com Cardoso *et al.* (2003), as edificações situadas neste solo tendem à ocorrência de recalque, devido ao adensamento das

camadas. As sapatas têm grande desempenho quando utilizadas em solos arenosos, ou seja, solo diferente do qual é encontrado na cidade de Cascavel-PR.

As fundações são de grande importância na construção, uma vez que transmitem cargas ao solo. Segundo Colares (2006), a forma adequada de estes esforços serem transmitidos é atendendo aos requisitos básicos, como a segurança com relação à ruptura e recalques conciliáveis com a estrutura.

Segundo Cintra *et al.* (2003), o desempenho de uma estrutura ao longo da sua vida útil, especialmente de uma fundação, depende diretamente do grau de alteração do maciço de solo. A correta verificação dessa alteração no solo em fundações é fundamental para que o comportamento das edificações seja correto, podendo evitar o surgimento de patologias e outros problemas. De acordo com Rebello (2008), recalque é a variação volumétrica do solo, quando atua um carregamento sobre ele. Esta movimentação, que ocorre na fundação causada pela deformação, pode ocasionar deslocamentos do solo em sentido vertical, resultando em danos para a estrutura apoiada. Esses danos podem ser divididos em três: visuais e estéticos, danos que comprometem o uso da edificação e danos estruturais que colocam em risco a segurança dos usuários.

Com estas informações, o presente artigo teve como motivação verificar a validade dos métodos de estimativa de recalque pela Teoria da Elasticidade e Teoria de Adensamento. A busca por essa validade se dá pelo fato de que, se esta estimativa não estiver de acordo com o recalque real, este pode ser maior do que o admissível, trazendo problemas para edificação como: fissuras, desnivelamento entre estruturas e desaprumo de edifícios, acarretando em grandes prejuízos, podendo até levar a inutilização do empreendimento, e em casos extremos, ao desabamento da obra. A importância da análise de estimativa de recalque tem como principal função minimizar erros e reduzir a incidência de recalques provocados pelas tensões geradas por edificações.

Dessa forma, é conveniente a verificação dos métodos da Teoria da Elasticidade e Teoria de Adensamento, utilizadas na estimativa de recalque imediato e primário, para averiguar se realmente são eficazes. Para analisar a validade dos métodos, foram comparados os valores de recalque encontrados em campo, através de provas de carga em placa, por Vieira, Radoll e Almeida (2017), com os obtidos através de métodos teóricos de estimativa de recalque. Assim, será possível proporcionar aos engenheiros de fundações, uma garantia, e consequentemente segurança para o desenvolvimento de projetos para solos semelhantes aos estudados.

De acordo com todas as informações expostas anteriormente, o presente trabalho teve como objetivo geral investigar se os métodos consagrados de estimativa de recalque são compatíveis com o recalque real, que foi obtido através de provas de carga em placa no Campo Experimental de Engenharia da FAG realizado por Vieira, Radoll e Almeida (2017).

Salienta-se que, para que o presente trabalho científico possa ter pleno êxito, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Realizar o dimensionamento de sapatas de referência através de carga pré-determinada e tensão admissível definida pelos métodos de Terzaghi e N_{SPT} ;
- Estimar o recalque imediato e primário das sapatas de referência através da Teoria da Elasticidade e Teoria do Adensamento;
- Comparar os recalques obtidos pelos métodos consagrados com o recalque final obtido através de provas de carga em placa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Recalque

Segundo Rebello (2011), quando o solo é submetido a uma carga e sofre deformação, denomina-se recalque. Essa deformação acaba provocando uma movimentação na fundação que foi executada sobre o solo, e dependendo da intensidade, pode resultar em sérios danos a superestrutura da construção. O solo pode passar por três tipos de deformação: deformação elástica, por escoamento lateral e deformação por adensamento.

Deformação elástica ou imediata é aquela que ocorre imediatamente, ou seja, logo após a aplicação da carga e com maior frequência em solos não coesivos. A deformação por escoamento lateral são aqueles casos em que há migração de solo de regiões mais solicitadas para as menos solicitadas, ou seja, do centro para lateral. Já a deformação por adensamento (recalque primário e secundário) ocorre pela redução do volume do maciço de solo, provocado pelo fechamento de vazios que foram deixados pela água (REBELLO, 2011).

De acordo com Alonso (1991), recalque absoluto é aquele em que ocorre o deslocamento vertical de somente um elemento da fundação, e a diferença entre recalques absolutos de dois elementos é denominado recalque diferencial. Este último é o mais perigoso, pois condena a estrutura, podendo ocasionar grandes fissuras e até mesmo a ruína total ou parcial da edificação.

Cintra *et al.*, (2003) complementam que, recalque absoluto de mesma magnitude quando acontece em todos os elementos da fundação, pode ser tolerado. Os recalques diferenciais são os mais preocupantes, pois podem ocasionar problemas estruturais e arquitetônicos de difícil reparação. Por isso a correta estimativa do recalque se torna tão importante para a execução de uma obra.

Segundo Teixeira e Godoy (2006), recalque total é limitado para que o recalque diferencial também seja limitado, e os valores admissíveis para recalque diferencial e recalque total para sapatas em areia é de 25mm e 40mm, e para sapatas em argilas é 25mm e 65mm.

Conforme Alonso (1991), o recalque tolerado ou admissível está ligado a tradição da comunidade, ou seja, os valores são determinados pelo especialista que está desenvolvendo o projeto, executando e acompanhando o desenvolvimento da obra. Os valores admissíveis devem ser estabelecidos de acordo com a experiência local, logo, podendo concluir que para aquele tipo de local, estrutura e carregamento, tais valores de recalque podem ser aceitáveis, sendo assim admissíveis.

Teixeira e Godoy (2006) relatam que os danos trazidos pelo recalque podem ser divididos em três grupos: danos arquitetônicos, que são visíveis ao observador comum causando algum tipo de desconforto; danos à funcionalidade, que podem trazer desaprumo da edificação; e danos estruturais, que são causados à própria estrutura, comprometendo a sua estabilidade.

2.2 Estimativa de recalque

Realizar a estimativa de recalque em fundações superficiais é um trabalho bastante difícil, pois os resultados obtidos através de modelos, por mais confiáveis que sejam, devem ser sempre considerados como uma estimativa e nunca como uma realidade. Os métodos para estimativa de recalque são divididos em três grupos: métodos racionais, semiempíricos e empíricos. Os métodos racionais utilizam parâmetros de deformabilidade obtidos em laboratórios ou em campo. Os semiempíricos, são aqueles em que os parâmetros de deformabilidade são atingidos através de ensaios de penetração. E por fim, os métodos empíricos, que são baseados em tabelas que apresentam valores típicos de tensão admissíveis para diferentes solos (VELLOSO e LOPES, 2010).

2.2.1 Teoria da Elasticidade

De acordo com Poulos e Davis (1974), a Teoria da Elasticidade fornece uma variedade de diagramas de tensões e deslocamentos, tanto verticais como horizontais, que são dirigidos por tensões aplicadas em áreas planas com várias formas geométricas. Com esta teoria é possível calcular o recalque imediato, que ocorre através da deformação tridimensional, que nada mais é do que a mudança de forma sem a mudança de volume.

Cintra *et al.*, (2011) considera que, no cálculo de recalque imediato através da Teoria da Elasticidade, utiliza-se o módulo de deformabilidade, que é a propriedade que o solo tem de alterar sua forma como resposta à ação das forças. Se o valor dessa deformabilidade for constante, tem-se o chamado meio elástico homogêneo, como é o caso das argilas. Em contraposição, quando a deformabilidade for variável, tem-se o meio elástico não homogêneo, como é o caso das areias.

Para a estimativa de recalque imediato, a Teoria da Elasticidade é aplicada apenas para os materiais que apresentam o módulo de deformabilidade constante, como é o caso das argilas e ao contrário das areias. Os métodos de cálculo de recalque imediato de argilas são divididos em dois, quando a camada é semi-infinita e finita. Para calcular o recalque imediato das areias, estas são divididas em subcamadas pouco espessas, de modo que seja coerente supor um valor constante de módulo de deformabilidade (CINTRA *et al.*, 2011).

2.2.2 Teoria do Adensamento

O adensamento primário é uma deformação que ocorre pela redução no volume do maciço do solo. As cargas fazem pressão na fundação, e esta pressão expulsa a água presente nos vazios do solo, fazendo com que haja a retração dos mesmos (ALONSO, 1991).

Alonso (1991) relata que o recalque primário é composto por duas parcelas. A primeira parcela corresponde à recompressão do solo até a tensão de pré-adensamento, e a segunda parcela de recalque ocorre através da variação da tensão, que é a pressão inicial que já atuava sobre o solo menos o acréscimo de tensão causada pela fundação.

O recalque por adensamento secundário ocorre ao longo do tempo, porém, com uma pressão efetiva constante, pois com o efeito da aplicação da carga na fundação, não há mais saída de água do solo. Este fenômeno de adensamento secundário é dado por uma deformação

viscoelástica da argila sob a ação da pressão efetiva posta, e esse fenômeno ainda não é definitivamente explicado (ALONSO, 1991).

2.3 Prova de carga

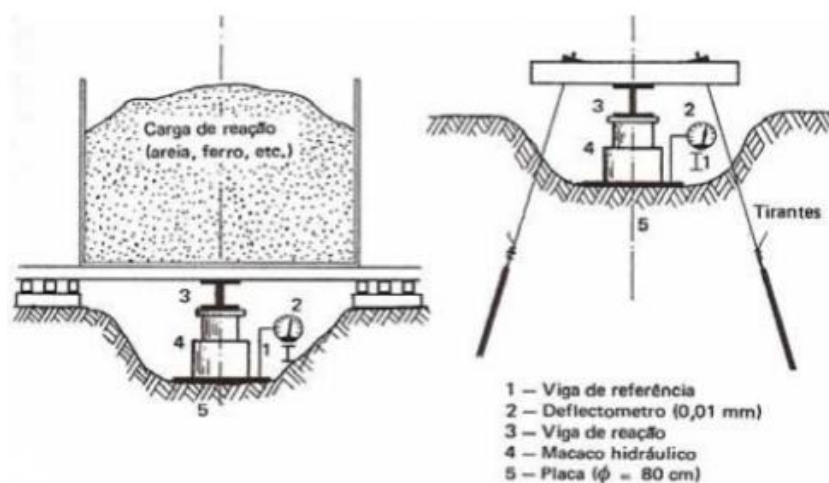
Cintra *et al.*, (2011) relatam que prova de carga nada mais é do que um ensaio realizado em fundações em um determinado tipo de solo, no qual são aplicados diferentes estágios de carregamentos, verificando assim o comportamento de tensão e recalque do sistema e do solo no qual será executada a fundação. Os autores afirmam que o sistema de prova de carga é um método experimental para previsão de recalque em fundações de sapata. A ABNT NBR 6489 (1984) regulamenta que o ensaio deve ser realizado instalando uma placa rígida de aço, com um diâmetro de 0,8m, na mesma cota onde será executada a sapata, aplicando estágios de carregamento até que ocorra o dobro da tensão admissível, e realizando a medida simultânea de recalque.

Segundo Alonso (1991), o ensaio detalha o comportamento de uma fundação superficial que é submetida à ação de cargas da estrutura em campo, este transmite uma determinada pressão sobre o solo através de uma placa rígida com área mínima de $0,5 \text{ m}^2$, sendo que essa placa é carregada através de um macaco hidráulico que age contra o sistema de reação, podendo ser um tipo de ancoragem ou cargueiras.

O ensaio fornece o deslocamento sofrido pelo solo, por conta da deformação que este sofreu, resultando em curvas de tensão x recalque, que são utilizadas para determinar a capacidade de carga da sapata e seu recalque. A prova de carga pode ser classificada de acordo com a localização e modo de carregamento. Tratando-se de carregamento, normalmente é realizada deformação controlada por carga incremental, isto é, o incremento só acontece quando ocorre a estabilização do recalque do estágio anterior de aplicação de carga (VELLOSO e LOPES, 2004).

O sistema de reação é o aspecto mais importante da prova de carga, pois ele deve ser resistente para suportar a aplicação das cargas sem que aconteçam deformações. Esse sistema pode ser de estruturas metálicas ancoradas ou fixas por contrapeso. Em relação à aplicação de carga, geralmente são utilizados macacos hidráulicos com força suficiente para aplicação das cargas, conforme Figura 1 (VELLOSO e LOPES, 2004).

Figura 1 – Ensaio de Placa.



Fonte: Alonso (1991).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Primeiramente foi estimada a tensão admissível do solo, em seguida foram dimensionadas as sapatas de referências e calculados os recalques dessas sapatas através da Teoria da Elasticidade e Teoria do Adensamento. Os recalques estimados pelos métodos teóricos, foram comparados com os recalques reais das sapatas, obtidos através da prova de carga em placa.

3.1 Tipo de estudo e local da pesquisa

Trata-se de um estudo comparativo para facilitar a compreensão sobre estimativa de recalque. A pesquisa é de cunho bibliográfico, que segundo Gil (2010), é aquela embasada em livros e artigos científicos. Utilizando-se do método qualitativo, buscando compreender e interpretar um assunto e determinar o porquê de seu comportamento. Todos os dados utilizados para realização da pesquisa foram extraídos, por outros autores, no Campo Experimental de Engenharia da FAG (CEEF), localizado na faculdade Assis Gurgacz, conforme Figura 2.

Figura 2: Localização do CEEF.



Fonte: Google Maps (2018)

3.2 Caracterização do subsolo do CEEF

Os dados que foram utilizados no artigo foram obtidos por Zen e Almeida (2018), Silva e Souza (2018), Almeida e Oliveira (2018), Junior e Reinehr (2018), Vieira, Radoll e Almeida (2017), Prado (2019) e Volpato (2015), para o solo superficial do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEF), considerando o mesmo em condições naturais ou compactado. O CEEF localiza-se em Cascavel, na região Oeste do estado do Paraná. É um espaço que serve como campo de testes para os acadêmicos de engenharia do Centro Universitário FAG, já possuindo diversos artigos publicados em congressos do Brasil.

Através de ensaio de granulometria feito em laboratório, Zen e Almeida (2018), determinaram o peso específico natural (γ_n), peso específico seco (γ_d) e o peso específico saturado (γ_s) do solo ao longo da profundidade, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Principais índices físicos do CEEF.

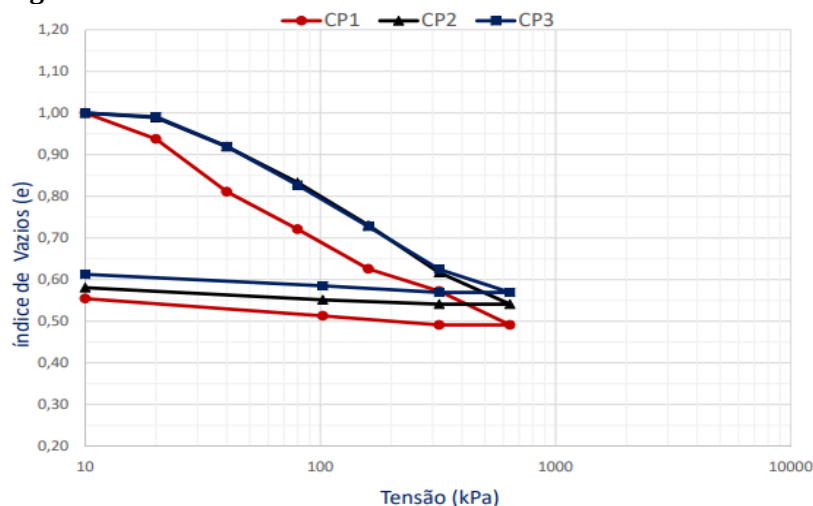
Valores Médios	Camada 1 – 1 a 9 metros	Camada 2 – 10 a 15 metros
W (%)	34	53
LL (%)	53	59
LP (%)	38	42
	Continua	

Valores médios	Camada 1 – 1 a 9 metros	Camada 2 – 10 a 15 metros
IP (%)	15	17
γ_d (KN/m ³)	12	12
γ_s (KN/m ³)	27	27
Argila (%)	70	56
Silte (%)	25	35
Areia (%)	5	9
Consistência	Muito mole a media	Rija dura
Índice de vazios (e)	1,22	1,55

Fonte: Zen e Almeida (2018).

Foram realizados, por Silva e Souza (2018), ensaios de adensamento com o solo natural, aplicando inicialmente uma carga de 20 kPa e dobrando-a a cada 24 horas. A cada estágio de carregamento foram realizadas leituras de deformação da amostra, através de um extensômetro. Com a determinação da curva de adensamento, apresentada na Figura 3, é possível determinar também a tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}), o índice de compressão (C_c) e o coeficiente de adensamento (C_v), determinados pelo método gráfico de Taylor, a partir da curva de adensamento resultante do ensaio para cada amostra.

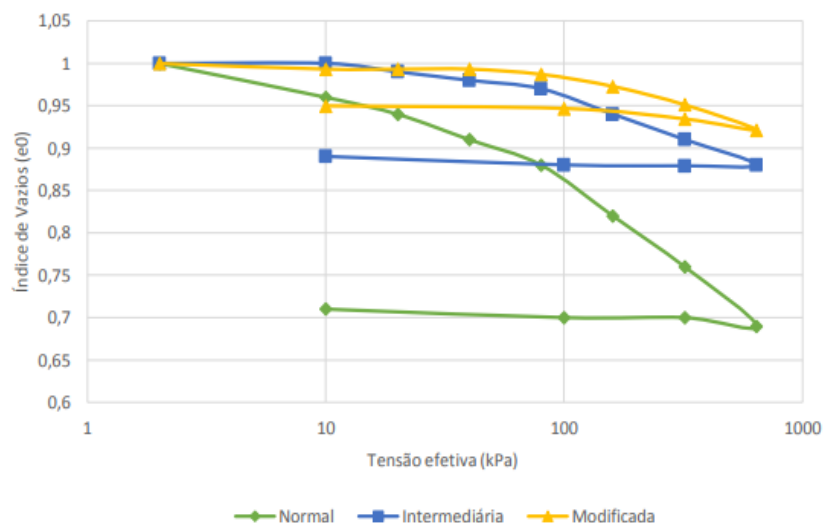
Figura 3 – Curvas de adensamento do solo natural.



Fonte: Silva e Souza (2018).

Para o solo compactado o ensaio de adensamento, realizado por Prado (2019), foi executado da mesma maneira do solo natural, o que diferencia é a compactação do solo. Através do ensaio, obteve-se a curva de adensamento, como apresenta a Figura 4, e através dela é possível determinar os parâmetros de adensamento.

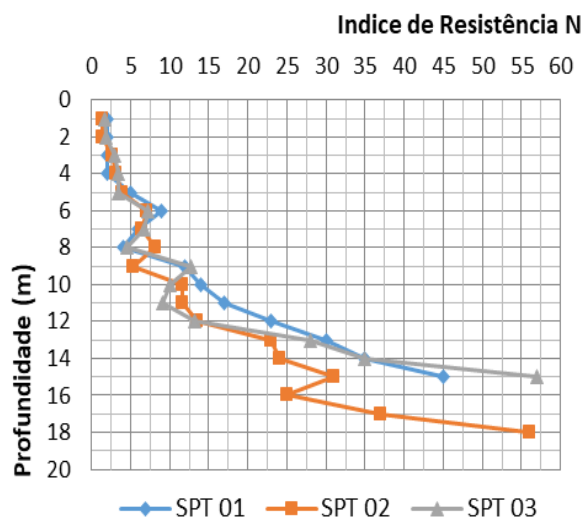
Figura 4 – Curvas de adensamento do solo compactado.



Fonte: Prado (2019).

Foram utilizados, para o cálculo de tensão admissível e recalque imediato, os dados dos ensaios de sondagem a percussão do tipo *Standard Penetration Test* (SPT), que fornece o índice de resistência à penetração do amostrador padrão. Este ensaio foi realizado por Zen e Almeida (2018), utilizando um amostrador padrão, ligado a um jogo de hastes que possui na extremidade uma cabeça de bater. A resistência à penetração é obtida através da quantidade de golpes necessários para a cravação dos 30 cm finais do amostrador padrão. Os resultados do ensaio são apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Índices de resistência N_{SPT} ao longo da profundidade do CEEF.



Fonte: Zen e Almeida (2018 (sic)).

No presente artigo, foram empregados dados obtidos por meio do ensaio de compressão triaxial, realizado por Almeida e Oliveira (2018) com o solo natural e por Volpato (2015) com o solo compactado. Com os ensaios triaxiais, foi possível determinar as envoltórias de resistência e, consequentemente o intercepto de coesão e o ângulo de atrito. Os dados obtidos para o solo natural estão na Tabela 2. Para o solo compactado, obteve-se um ângulo de atrito de 22,76 ° e um intercepto coesivo de 98 kPa.

Tabela 2 – Parâmetros de resistência do solo natural.

Cota (m)	Intercepto coesivo	Ângulo de atrito	Cota (m)	Intercepto coesivo	Ângulo de atrito
1	2 kPa	14,2°	8	12 kPa	26,6°
2	2 kPa	15,5°	9	31 kPa	26,6°
3	13 kPa	17,4°	10	49 kPa	24,8°
4	12 kPa	16,4°	11	24 kPa	30,4°
5	22 kPa	14,1°	12	27 kPa	22,5°

Fonte: Almeida e Oliveira (2018).

Foram realizados ensaios de prova de carga em placa, por Vieira, Radoll e Almeida (2017) com o solo natural e por Junior e Reinehr (2018) para solo compactado. Os ensaios foram realizados de acordo com a ABNT NBR 6489 (1984), utilizando uma placa metálica circular com diâmetro de 0,80m e espessura de 25mm, resultando em uma área de 0,50 m² para aplicação do carregamento sobre o solo. Nessas placas foram aplicadas cargas por meio de um macaco hidráulico que reage contra um sistema de reação. Uma imagem do sistema montado, conforme descrito, pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Sistema utilizado para as provas de carga.

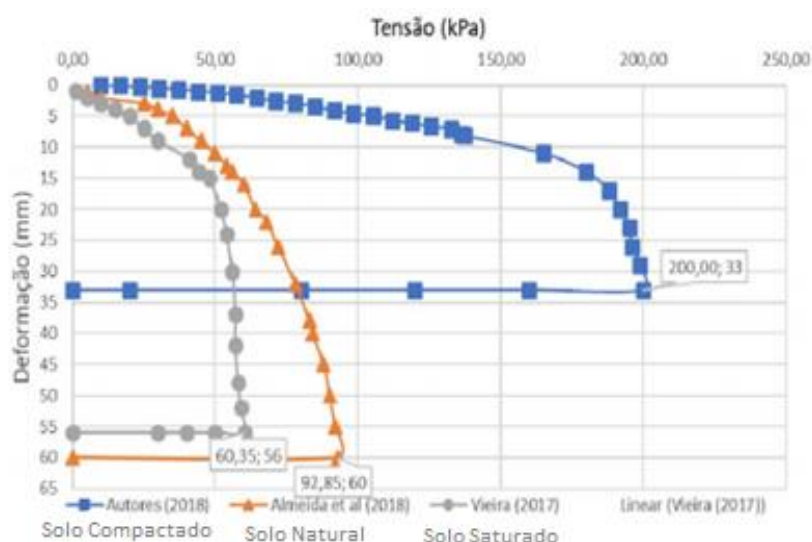


Fonte: Vieira, Radoll e Almeida (2017).

Na realização dos ensaios, as cargas aplicadas foram em estágios de 10% da tensão admissível plausível do solo. Ao aplicar as cargas, os recalques eram lidos imediatamente após a aplicação e após os intervalos de tempo sucessivamente dobrados, sendo 1, 2, 4, 8 e 15 minutos. Após a verificação da estabilização dos recalques em até 5% entre as leituras, realizou-se um novo acréscimo de carga.

Os ensaios prosseguiram até que se observou um recalque total de 25 mm, e a descarga foi realizada em dois estágios sucessivos de aproximadamente 50% da carga total, lendo-se os recalques de imediato e 15 minutos após a descarga. Com o solo no estado natural, o ensaio de prova de carga em placa foi realizado por Almeida e Oliveira (2018). Já com o mesmo no estado compactado, foi realizado por Junior e Reinehr (2018). Ambos ensaios foram executados no CEEF, os dados obtidos são apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Curvas tensão x deformação das provas de carga com solo.



Fonte: Junior e Reinehr (2018).

3.3 Instrumentos e procedimentos para coleta de dados

3.3.1 Cálculo das tensões admissíveis

No presente artigo foram realizadas análises do solo em situações diferentes, com o solo natural e compactado. Para o solo natural, a tensão admissível é menor que no compactado,

pois ao realizar a compactação do solo natural, ocorre a diminuição dos espaços vazios, deixando o solo mais denso e com uma maior capacidade de carga.

Inicialmente as tensões admissíveis do solo foram determinadas pelo Método de Terzaghi e através de correlações com o índice de resistência da sondagem SPT, sendo que para o solo compactado, foi realizado somente pelo Método de Terzaghi, pois não foi realizado ensaio de sondagem SPT do solo compactado. Estas tensões foram utilizadas para o pré-dimensionamento de sapatas de referência, para que os recalques das mesmas sejam estimados e posteriormente comparados com o recalque da prova de carga em placa.

Com o método de Terzaghi, foi utilizada a Equação 1 para determinar a tensão admissível. Foi aplicado um fator de segurança global igual a 3,0 para tensão admissível em relação à ruptura. Nesse método, foram empregados os parâmetros de resistência obtidos pelo ensaio triaxial, realizado por Almeida e Oliveira (2018) com o solo natural e por Volpato (2015) com o solo compactado.

$$\sigma_{ult} = c * N_c * S_c + q * N_q * S + \frac{1}{2 * B * \gamma * N_\gamma * S_\gamma} \quad (1)$$

Onde σ_{ult} é a capacidade de carga de ruptura do solo, “c” é o intercepto coesivo do solo, N_c , N_q e N_γ são fatores de capacidade de carga, S_c , S_q e S_γ são fatores de forma, ambos encontrados por equações e índices elaboradas por Vesic (1975), “q” é a sobrecarga e o “ γ ” é o peso específico do solo, que é tensão geostática sobre camada de apoio da sapata. O fator de forma S_c foi encontrado através da Equação 2, e nela é empregado os fatores de capacidade de carga (N_q e N_c) que são obtidos através do ângulo de atrito do solo.

$$S_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} \quad (2)$$

O fator de forma S_q foi encontrado através da Equação 3, e nela é empregado somente a tangente do ângulo de atrito do solo.

$$S_q = 1 + \tan \Phi \quad (3)$$

Já o fator de forma S_γ foi encontrado através da Equação 4, e nela é usado o valor da base (B) e a largura (L) da sapata.

$$S_\gamma = \frac{B}{L} - 0,4 \quad (4)$$

Teixeira e Godoy (2006) relatam que para a determinação da tensão admissível de uma fundação superficial, através da média dos índices de resistência dos ensaios SPT das camadas a partir da cota de apoio da fundação, deve-se utilizar da Equação 5, que é empregue somente N_{SPT} da camada de análise. Então a referida foi utilizada para determinar a tensão admissível pelo N_{SPT} .

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{SPT}}{0,05} \text{ (kPa)} \quad (5)$$

3.3.2 Estimativa de recalque

Para estimar o recalque imediato, considerando uma sapata retangular (L x B) ou circular (diâmetro B), a uma profundidade h, solo com modulo de deformabilidade (E_s) constante e espessura H, foi usada a Teoria da Elasticidade. Segundo Janbu *et al.* (1956), nos casos em que a camada de solo é de espessura finita e está sobre um material muito rígido ou praticamente indeformável, como costuma ser o topo rochoso, utiliza-se da Equação 6 para prever o recalque imediato.

$$\rho_i = \mu_0 * \mu_1 * \frac{(\sigma \cdot B)}{E_s} \quad (6)$$

Onde ρ_i é a parcela de recalque imediato, μ_0 é relativo ao embutimento da sapata, μ_1 é relativo à espessura do estrato, σ é a tensão aplicada no solo, B é a largura da sapata, E_s é o módulo de deformabilidade do solo.

O módulo de deformabilidade utilizado na equação da Teoria da Elasticidade foi encontrado através da Equação 7, determinada por Teixeira e Godoy (2006), contexto em que se aplica o N_{SPT} da camada de solo, a razão de atrito (α) e o coeficiente K, que levam em consideração o tipo do solo.

$$E_s = N_{spt} * \alpha * K \quad (7)$$

Na determinação da estimativa do recalque primário foi utilizada a Teoria do Adensamento. De acordo com Alonso (1991), é através da Equação 8 que se estima o recalque primário, sendo que para a estimativa deste recalque foram utilizados os índices físicos e dados do ensaio de adensamento, realizado por Silva e Souza (2018) com o solo natural e por Prado (2019) com o solo compactado.

$$\rho_a = H * \left[\frac{C_s}{1 + e_0} * \log\left(\frac{\sigma_{vm}}{\sigma_{v0}}\right) + \frac{C_c}{1 + e_0} * \log\left(\frac{\sigma_{v0} + \Delta\sigma_v}{\sigma_{vm}}\right) \right] \quad (8)$$

Onde ρ_a é o recalque por adensamento, C_c é o índice de compressão, C_s é o índice de recompressão e H é a espessura da camada de solo que sofrerá o recalque. De acordo com Alonso (1991), é através da Equação 4 que se estima o recalque primário, sendo que, e_0 é o índice de vazios inicial antes do recalque, σ_{v0} é a tensão inicial sobre a camada de solo, σ_{vm} é a tensão de pré-adensamento e $\Delta\sigma_v$ é a variação de tensão.

3.3.3 Recalque a partir da prova de carga

Para determinar o recalque da sapata de referência pela prova de carga, foi utilizada a Equação 9. A expressão relaciona as dimensões da sapata de referência e a relação entre o recalque e a dimensão da placa da prova de carga, e assim, consegue-se estimar qual será o recalque proporcional da sapata de referência.

$$\rho_s = \frac{\rho_p B_s}{B_p} \quad (9)$$

Onde ρ_s é o recalque da sapata real, ρ_p é o recalque da mini placa, B_s é o diâmetro real da sapata, B_p é o diâmetro da mini placa.

3.4 Análise dos dados

Conforme as bibliografias analisadas, foi estimado o recalque total de uma sapata de referência, posteriormente sendo comparado com o recalque real obtido por prova de carga em

placa. Dessa maneira, foi possível saber se os métodos semiempíricos de estimativa de recalque condizem com o método racional de prova de carga.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cálculo da tensão admissível

4.1.1 Solo natural

Para o solo natural, foram calculadas as tensões admissíveis pelos dois métodos: SPT e Terzaghi. No primeiro método, considerou-se uma média dos valores de N_{SPT} , determinados por Zen e Almeida (2018), dos quatro primeiros metros de solo, pois são os menores valores de N_{SPT} , dessa forma, trabalhou-se com um coeficiente de segurança maior. No segundo método, foi utilizada a equação de Terzaghi, descrita no item 3.3.1. Nesta foram empregados os fatores de capacidade de carga que são determinados por equações e índices, elaboradas por Vesic (1975) através do ângulo de atrito do solo.

Junto aos fatores de capacidade de carga, foram utilizados o intercepto coesivo (C) e o ângulo de atrito (ϕ), determinados por Almeida e Oliveira (2018) através do ensaio triaxial. Também foram utilizados o peso específico do solo, definido através dos índices físicos por Zen e Almeida (2018), e a sobrecarga (q) do solo, definida através do peso específico deste. Todos os dados utilizados para o cálculo de tensão admissível são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados utilizados para o cálculo da tensão.

S_c	1,35	N_c	10,43	$\Phi(^{\circ})$	14,1
S_q	1,25	N_q	3,63	C (kPa)	2
S_{γ}	0,6	N_{γ}	2,33	q (kPa)	16,2

Fonte: Autor (2019).

Após a obtenção da tensão admissível, foram adotados valores de carga para as sapatas. Estes valores foram de 50 kN, 100 kN e 150 kN. Com os valores da tensão admissível do solo e as cargas das sapatas de referência em mãos, foram determinadas as áreas que as sapatas deveriam possuir e consequentemente, as dimensões. Os dados obtidos podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – Tensões e dimensões das sapatas.

Método	σ_{adm} (kPa)	Carga (kN)	Área (m ²)	Dimensões BxL (m ²)
Terzaghi	39,48	50	1,27	1,13 x 1,13
	39,48	100	2,53	1,59 x 1,59
	39,48	150	3,80	1,95 x 1,95
SPT	44	50	1,14	1,07 x 1,07
	44	100	2,27	1,51 x 1,51
	44	150	3,41	1,85 x 1,85

Fonte: Autor (2019).

4.1.2 Solo compactado

Para o solo compactado, foi aplicado somente o método de Terzaghi para determinação da tensão admissível, pois para o solo neste estado, não foi realizado o ensaio de sondagem, a percussão do tipo *Standard Penetration Test* (SPT). A tensão admissível do solo compactado foi estimada da mesma forma que a do solo natural, ou seja, utilizando a fórmula descrita no item 3.3.1. A mudança que ocorre de um solo para o outro são os valores de intercepto coesivo e o ângulo de atrito aplicados, 96 kPa e 22,76°, respectivamente. Esses valores para solo compactado foram determinados por Volpato (2015), a partir do ensaio triaxial.

A tensão admissível encontrada para o solo compactado foi de 796,14 kPa. Como a tensão admissível foi exorbitante, as dimensões das sapatas ficaram pequenas, menores do que o mínimo estipulado pela ABTN NBR 6122 (2019), que é 80 cm de diâmetro. Devido a isso, foi definida como tensão admissível do solo, aquela que foi encontrada por Junior e Reinehr (2018) através do ensaio de prova de carga em placa, 105 kPa, e as dimensões adotadas para a sapata foram de B= 0,71 m e L= 0,71 m, que correspondem à área mínima estipulada pela norma.

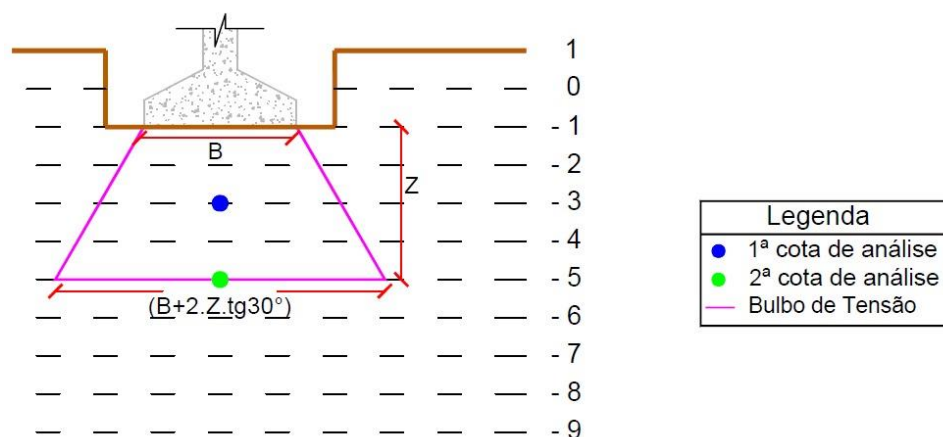
4.2 Cálculo dos recalques das fundações

Após concluir o dimensionamento das sapatas, através da tensão admissível do solo, foi realizada a estimativa de recalque das sapatas através dos métodos consagrados: Teoria da Elasticidade e Teoria do Adensamento.

4.2.1 Solo natural

Os cálculos de recalque para o solo natural foram realizados para as cargas de 50 kN, 100 kN e 150 kN e suas respectivas dimensões. As análises de recalque foram feitas em duas cotas diferentes da camada de argila siltosa marrom, como mostra a Figura 8. Uma das análises foi realizada na metade da camada de argila, como habitualmente é feito, ou seja, na cota – 5 m. Como existe uma incerteza de qual cota realmente analisar o recalque, foi executada uma nova análise em uma cota diferente, dessa forma, foi possível analisar os dois resultados e verificar qual se aproximou mais da prova de carga em placa.

Figura 8: Cotas de análise.



Fonte: Autor (2019).

A outra análise foi realizada próximo ao meio do bulbo de tensões das sapatas de referência, que segundo Cintra et al. (2003), é 2,5 vezes a dimensão da sapata, então, a segunda análise foi feita na cota – 3 m. Sendo assim, foram realizadas duas análises e observou-se que a tensão que chega na cota – 5 m é menor que a que chega na cota – 3 m, como apresenta a Figura 8. Portanto, o recalque encontrado na primeira cota de análise foi diferente do encontrado na segunda.

Para realização dos cálculos, primeiramente, foram determinados os recalques imediatos das sapatas de referência através da Teoria da Elasticidade, que utiliza a equação descrita no item 3.3.2. Nesta equação, foi empregado o módulo de deformabilidade do solo (E_s), calculado por meio dos coeficientes empíricos K e α obtidos através de tabelas que consideram o tipo do solo, descritas por Teixeira e Godoy (2006), e o N_{SPT} médio da camada analisada. Aplicou-se

também na equação, a tensão que a sapata transmite ao solo (σ), a largura da mesma (B_1) e os fatores relativos ao embutimento da sapata (μ_0/μ_1), obtidos por gráficos criados por Janbu et al. (1956). Todos os valores utilizados para realizar o cálculo de recalque imediatos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados utilizados para o cálculo de recalque imediato.

	Cota -3 m						Cota -5 m					
Carga	50 kN		100 kN		150 kN		50 kN		100 kN		150 kN	
D/M	SPT	Terz.	SPT	Terz.	SPT	Terz.	SPT	Terz.	SPT	Terz.	SPT	Terz.
μ_0	0,72	0,75	0,8	0,8	0,84	0,84	0,74	0,75	0,8	0,8	0,83	0,84
μ_1	0,65	0,63	0,6	0,6	0,58	0,55	0,7	0,7	0,67	0,65	0,65	0,65
$\sigma(\text{kPa})$	44	39,48	44	39,48	44	39,48	44	39,48	44	39,48	44	39,48
$B_1(\text{m})$	1,07	1,13	1,51	1,59	1,85	1,98	1,07	1,13	1,51	1,59	1,85	1,95
α	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
$K(\text{kPa})$	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
N_{spt}	2	2	2,18	2,18	2,6	2,6	2	2	2,18	2,18	2,6	2,60

Fonte: Autor (2019).

Em seguida, foram estimados os recalques primários das sapatas por meio da Teoria de Adensamento, utilizando-se da equação descrita no item 3.3.2. Na equação foram aplicados a espessura da camada de solo (H) e o índice de vazios na cota de análise (e_i), índice este encontrado através do ensaio de adensamento feito por Silva e Souza (2018). Foram empregadas também a tensão inicial (σ_i) e final (σ_f) na cota de análise, encontradas através do peso específico do solo e o acréscimo de tensão das sapatas.

Ainda na determinação do recalque primário, empregou-se a tensão de pré-adensamento do solo. De acordo com Pinto (2006), o valor dessa tensão separa os trechos de recompressão e compressão virgem do solo na curva de adensamento, e representa o maior valor de tensão já sofrido pelo solo em campo. Dessa maneira, quando se aplica uma tensão no solo menor que a de pré-adensamento é utilizado o índice de recompressão (C_R) para realizar o cálculo de recalque primário, e quando se aplica uma tensão maior que a tensão de pré-adensamento se utiliza o índice de compressão virgem (C_C).

Dessa forma, na cota – 5 m, utilizou-se somente o coeficiente de compressão virgem, pois a tensão inicial aplicada no solo, de 80 kPa, é maior que a tensão de pré-adensamento de

50 kPa. Já na cota – 3 m, foi utilizado o coeficiente de recompressão e compressão, pelo fato de a tensão inicial de 48 kPa ser menor que a tensão de pré-adensamento de 50 kPa. Os coeficientes e a tensão de pré-adensamento foram determinados por Silva e Souza (2018), através do ensaio de adensamento. Por meio da Tabela 6 é possível verificar todos os dados descritos e utilizados para o cálculo de recalque primário.

Tabela 6 – Dados utilizados no cálculo do recalque primário.

	Cota –3 m						Cota -5 m					
Carga	50 kN		100 kN		150 kN		50 kN		100 kN		150 kN	
D/M	SPT	Terz.	SPT	Terz.	SPT	Terz.	SPT	Terz.	SPT	Terz.	SPT	Terz.
C _C	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
C _R	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0	0	0	0	0	0
H(m)	4	4	4	4	4	4	8	8	8	8	8	8
σ _i	48	48	48	48	48	48	80	80	80	80	80	80
σ _f	52,3	52,2	54,8	54,4	56,6	56,2	81,55	81,52	82,6	81,5	83,5	83,4
σ _{vm}	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
B (m)	1,07	1,13	1,51	1,59	1,85	1,95	1,07	1,13	1,51	1,59	1,85	1,95
e _i	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97

Fonte: Autor (2019).

Na Tabela 7, são apresentados os valores de recalques obtidos na análise da cota - 5 m e - 3 m. São exibidos os recalques imediatos (ρ_i) e recalque primários (ρ_a), assim como o recalque total (ρ_{total}) que foi obtido pela somatória dos dois.

Tabela 7 - Recalques obtidos pelos métodos consagrados.

Análise no meio da camada de argila siltosa mole (Cota – 5 m)				
Método	Carga (kN)	ρ_i (mm)	ρ_a (mm)	ρ_{total} (mm)
Terzaghi	50	8,33	6,62	14,95
	100	10,71	11,25	21,96
	150	11,54	15,01	26,55
SPT	50	8,68	6,76	15,43
	100	11,65	11,56	23,21
	150	12,04	15,48	27,52

Continua

Análise no meio do bulbo das sapatas (Cota – 3 m)				
Método	Carga (kN)	ρ_i (mm)	ρ_a (mm)	ρ_{total} (mm)
Terzaghi	50	7,50	8,42	15,92
	100	9,88	15,79	25,67
	150	10,66	20,96	30,73
SPT	50	7,84	8,90	16,74
	100	10,43	16,69	27,12
	150	10,87	22,20	33,07

Fonte: Autor (2019).

Após estimar os recalques totais das sapatas de referência, pelos métodos consagrados, foram encontrados os recalques das sapatas através da prova de carga em placa, realizada por Vieira, Radoll e Almeida (2017), conforme a Tabela 8. Este recalque foi determinado através da equação descrita no item 3.3.3.

Tabela 8 – Recalques obtidos através da prova de carga em placa.

Método	Carga (kN)	Recalque (mm)
Prova de Carga	50	63,30
	100	89,52
	150	109,64

Fonte: Autor (2019)

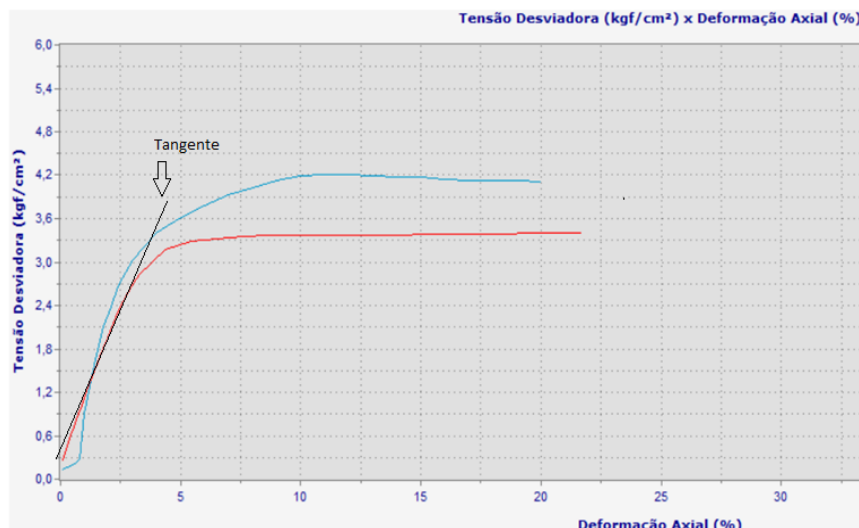
4.2.2 Solo compactado

Para o solo compactado, foi adotada a tensão admissível encontrada pela prova de carga em placa e as dimensões mínimas que uma sapata deve possuir de acordo com a ABNT NBR 6122 (2019). Dessa maneira, os cálculos foram realizados apenas uma vez e no meio do bulbo de tensões da sapata, ao contrário do que foi feito para o solo natural, em que cada carga e sua respectiva dimensão possui o seu recalque.

Inicialmente realizou-se o cálculo de recalque imediato através da Teoria da Elasticidade, da mesma forma que foi estimado para o solo natural, sendo assim, utilizando a fórmula descrita no item 3.3.2. O que mudou de um solo para o outro foi o módulo de deformabilidade. Para solo compactado, o módulo foi obtido por meio da tensão desviadora do solo, na qual o valor numérico do ângulo da linha tangente a elevação inicial da curva,

apresentada na Figura 9, é o valor do módulo de deformabilidade (6000 kPa). O recalque imediato encontrado foi de 8,70 mm.

Figura 9 – Tensão desviadora x deformação de ensaio triaxial com solo compactado (CEEF).



Fonte: Volpato (2015).

Em seguida, foi determinado o recalque primário do solo compactado, a partir da equação descrita no item 3.3.2. Para o solo compactado, foi utilizado somente o índice de compressão virgem ($C_c = 0,17$), pois quando o solo é compactado, ele se encontra com a maior tensão sofrida. Na realização da estimativa de recalque primário do solo compactado, os dados utilizados foram determinados por Prado (2019), o recalque calculado foi de 20,03 mm.

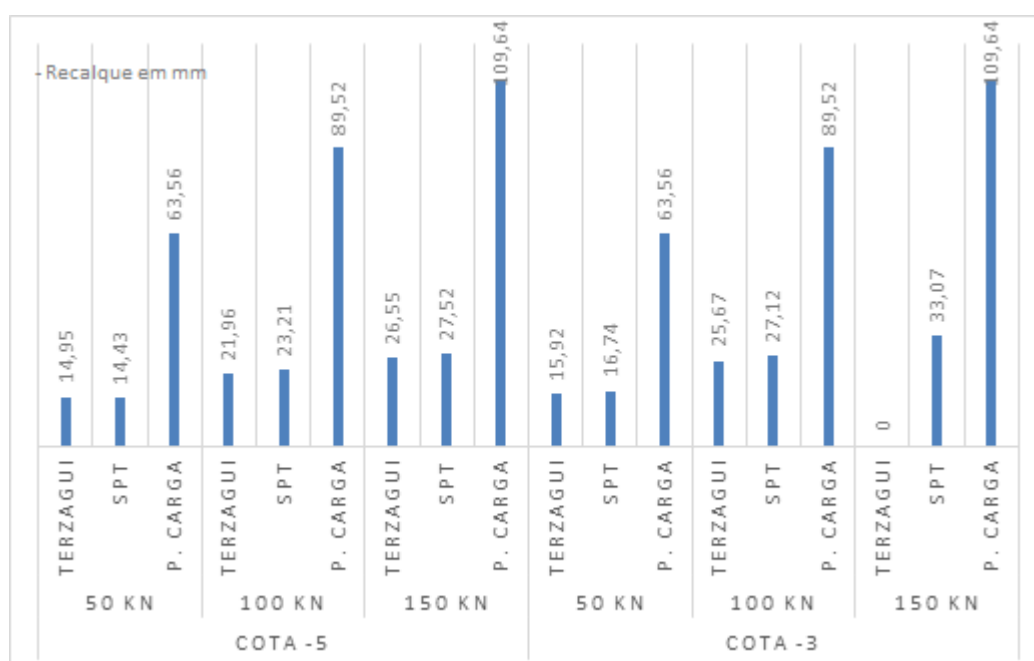
Após determinar o recalque imediato e primário, foi determinado o recalque total da sapata, por meio do somatório dos dois recalques, esse recalque foi de 28,73 mm. Posteriormente, encontrou-se o recalque da sapata dimensionada para o solo compactado a partir da prova de carga em placa, realizado por Junior e Reinehr (2018). Esse recalque foi determinado através da fórmula descrita no item 3.3.3, sendo seu valor de 32 mm.

4.3 Análise dos recalques

Através da Figura 10, é possível analisar os recalques do solo natural. Os recalques obtidos na cota - 3 m são superiores aos recalques obtidos na cota -5 m, isso aconteceu pelo fato de que a tensão aplicada na cota - 3 m é superior à tensão aplicada na cota - 5 m, consequentemente o recalque foi maior. Também foi possível analisar a diferença entre os

recalques obtidos pelos métodos consagrados, utilizando dados de investigações geotécnicas, e o da prova de carga em placa. Os recalques obtidos através da prova de carga são 70% maiores do que os recalques obtidos pelos métodos consagrados, na cota – 3, na qual os valores se aproximaram mais da prova de carga em placa. Os métodos consagrados consideram como tensão admissível do solo aquela encontrada pelo método de Terzaghi e N_{SPT} .

Figura 10: Recalques do solo natural.



Fonte: Autor (2019).

Com o recalque encontrado para o solo compactado, pode-se verificar que, o obtido pelos métodos consagrados, de 28,78 mm, fica muito próximo do recalque obtido pela prova de carga em placa, de 32 mm. Sendo assim, tem-se uma diferença inferior a 10%. Levando em consideração que para analisar o recalque do solo compactado, foi utilizada a tensão admissível do solo encontrada pela prova de carga em placa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente artigo foram estudados os recalques de sapatas, obtidos através dos métodos consagrados e por prova de carga em placa. Os métodos consagrados utilizados são a Teoria da Elasticidade e Teoria de Adensamento, sendo que estas teorias utilizam dados de investigações geotécnicas, ensaios triaxiais e ensaios de adensamento. Estas teorias também levam em

consideração as tensões admissíveis do solo, que foram encontradas através do método de Terzaghi e N_{SPT} , para solo natural, e através da prova de carga em placa para o solo compactado.

Para o solo natural, as tensões admissíveis encontradas por Terzaghi e N_{SPT} ficaram muito próximas. Devido ao fato de o solo analisado conter consistência muito mole nas primeiras camadas, observou-se que as tensões admissíveis determinadas através dos métodos N_{SPT} e Terzaghi apresentam uma grande deformidade em relação às tensões atingidas no ensaio de prova de carga. Dessa maneira, os recalques obtidos pelos cálculos, que levaram em consideração as tensões admissíveis do solo pelo método de Terzaghi e N_{SPT} , ficaram menores do que os recalques alcançados pela prova de carga em placa. Visto que, se levar em conta uma tensão admissível do solo maior do que ele realmente possui, os recalques são menores.

No solo compactado, os recalques obtidos pelos métodos consagrados ficaram parecidos com os alcançados pela prova de carga em placa. Porém, a tensão admissível do solo compactado utilizado para realização dos cálculos foi obtida pela prova de carga em placa, ou seja, a tensão que foi considerada é a que o solo realmente suporta. De modo que se pode concluir que o problema maior é a determinação da tensão admissível do solo.

Portanto, reforça-se a importância de se realizar ensaios de provas de carga em placa para projetar fundações rasas sobre solos argilosos muito moles, pois existe uma incerteza em relação a determinação da tensão admissível do solo. No caso de sapatas, que são fundações rasas, é viável executar a prova de carga em placa, devido ao ensaio ser realizado em pequenas profundidades, ao invés de realizar ensaios em laboratório para determinar a tensão admissível do solo. Beck (2012) sugere não considerar como critério de projeto a avaliação unicamente de um parâmetro, mas sim de todo o projeto através de análise estatística de probabilidade de ruína.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. A., OLIVEIRA, R. M. M., **Estimativa de Ângulo de Atrito e Coesão através de Índices de Resistências Obtidos pela Sondagem SPT em Solo Laterítico e Colapsível Característico da Cidade de Cascavel no Estado do Paraná**. 2018.

ALONSO, U. R. **Previsão e controle das fundações**. 142 p. São Paulo. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: **Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, ABNT: 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: **Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, ABNT: 2010.

CARDOSO, D. L.; MEDEIROS, J. A. **Propriedades geotécnicas da região de Cascavel-PR.** In: Anais do I ENGEOPAR – Encontro Geotécnico do Terceiro Planalto Paranaense, Maringá, 2003.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. – **Tensão Admissível em Fundações Diretas.** São Carlos: RiMa, 2003.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N., ALBIERO, J. H. **Fundações Diretas: projeto geotécnico.** São Paulo. 2011.

COLARES, G. M. **Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios.** 2006. 83 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 2. ed. SP: Atlas, 1991.

JANBU, N.; BJERRUM, L.; KJAERNSLI, B. **Veiledning ved losning av fundamenteringsoppgaver.** Oslo: Norwegian Geotechnical Institute, 1956.

JUNIOR, S. D. M., REINEHR, R. W., **Análise de prova de carga em solo compactado.** 2018.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos, em 16 Aulas.** 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. **Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics.** New York: John Wiley, 1974.

PRADO, D. F, **Análise de recalque em solo compactado com diferentes energias de compactação.** 2019.

REBELLO, Y. C. P. **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento.** 3º ed. São Paulo: Zigurate Editora, 2011.

SOUZA, C.E.; SILVA, E.S.; **Variabilidade dos Parâmetros de Deformabilidade do Solo de Cascavel/Pr ao Longo da Profundidade.** 2018.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N.S. – **Análise, projeto e execução de fundações rasas.** In: HACHICH et al. (eds). **Fundações teoria e prática.** São Paulo: Pini, 2006.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas.** São Paulo, 2010.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações.** Vol 1. Nova Edição. São Paulo/SP: Oficina de Texto, 2004.

VESIC, A. S., **“Bearing capacity of shallow foundations”.** In: **Foundation Engineering Handbook,** New York, McGraw-Hill, pp.121-147. 1975.

VIEIRA, M. K.; RADOLL, J.; ALMEIDA, M. A., Análise de Aplicação de Fundações Rasas a partir de Resultados de Prova de Carga em Solo de Cascavel/PR. 2017.

VOLPATO, A. L. Determinação da resistência ao cisalhamento de um solo argiloso e laterítico característico da região de Cascavel com adição de cal hidratada. 2015.

ZEN, B. A. B.; ALMEIDA, M. A., Implantação e Caracterização Geotécnica do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz Cascavel/PR. 2018.

CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG

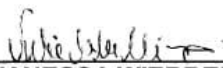
LUCAS ALAN BALBINO

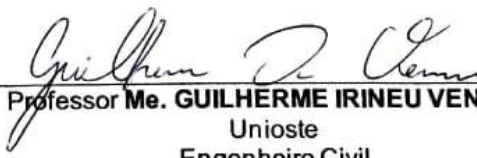
**COMPARAÇÃO ENTRE RECALQUE ESTIMADO EM SAPATA POR
MÉTODOS TEÓRICOS E RECALQUE DE SAPATA OBTIDO COM PROVA DE
CARGA EM PLACA NO SOLO DE CASCAVEL-PR**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Professor **Me. Eng. Civil MAYCON ANDRÉ DE ALMEIDA**.

BANCA EXAMINADORA


Orientador Prof. **Me. MAYCON ANDRÉ DE ALMEIDA**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil


Professora **VANESSA WIEBBELLING**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheira Civil


Professor **Me. GUILHERME IRINEU VENSON**
Unioeste
Engenheiro Civil

Cascavel, 29 de outubro de 2019.