



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

LEONARDO HENRIQUE DE MACEDO DANTAS

**ESTIMATIVA DE RECALQUE DE SAPATA ASSENTADA EM AREIA ATRAVÉS
DE MÉTODO SEMI-EMPÍRICO E EXPERIMENTAL**

ANGICOS

ANO/2025

LEONARDO HENRIQUE DE MACEDO DANTAS

**ESTIMATIVA DE RECALQUE DE SAPATA ASSENTADA EM AREIA ATRAVÉS
DE MÉTODO SEMI-EMPÍRICO E EXPERIMENTAL**

Trabalho Final de Graduação apresentado à
Universidade Federal Rural do Semiárido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. ARTHUR GOMES
DANTAS DE ARAÚJO

ANGICOS

ANO / 2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

DD192
C

Dantas, leonardo henrique de macedo .
COMPARAÇÃO NA ESTIMATIVA DE RECALQUE DE SAPATA
ASSENTADA EM AREIA ATRAVÉS DE MÉTODO SEMI-EMPÍRICO
E EXPERIMENTAL / leonardo henrique de
macedo Dantas. - 2025. 34 f. : il.

Orientador: ARTHUR GOMES DANTAS DE ARAUJO.
Coorientador: KLEBER CAVALCANTI CABRAL.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2025.

1. Solo. 2. Prova de carga em placa. 3.
Sondagem SPT. 4. Areia. I. ARAUJO, ARTHUR GOMES
DANTAS DE , orient. II. CABRAL, KLEBER CAVALCANTI
, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em
conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo
autor(a). Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

LEONARDO HENRIQUE DE MACEDO DANTAS

**ESTIMATIVA DE RECALQUE DE SAPATA ASSENTADA EM AREIA ATRAVÉS
DE MÉTODO SEMI-EMPÍRICO E EXPERIMENTAL**

Trabalho Final de Graduação apresentado à
Universidade Federal Rural do Semiárido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 05 / 08 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

ARTHUR GOMES DANTAS DE ARAUJO, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

LUIS HENRIQUE GONCALVES COSTA, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

KLEBER CAVALCANTI CABRAL, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso representa não apenas o encerramento de uma etapa acadêmica, mas também a concretização de um sonho — um sonho que só se tornou possível graças ao apoio de muitas pessoas especiais. Em primeiro lugar, agradeço à minha família, base de tudo em minha vida.

Ao meu pai, Amaro Henrique, pelo exemplo de força e perseverança. À minha mãe, Ana Maria, por seu amor incondicional e incentivo constante. Às minhas irmãs, Ana Lúcia e Lethicia Fontineli, por todo o carinho e companheirismo ao longo dessa caminhada. E ao meu avô, José Valentim, cuja sabedoria e apoio sempre foram fonte de inspiração. Ele foi construtor e sonhava em ser engenheiro. Sempre me dizia que, quando este momento chegasse, seria como se ele também estivesse realizando seu próprio sonho.

Vindo de uma família numerosa e com poucos recursos, morando na zona rural distante de qualquer cidade, meu desejo de estudar foi negado por meu bisavô, devido às dificuldades financeiras. Hoje, sinto uma imensa gratidão, pois sei que estou concretizando não apenas o meu sonho, mas também o dele. Embora tenha falecido em 2018, seu legado continua sendo uma das minhas maiores fontes de força. Sou igualmente grato aos professores que marcaram minha trajetória acadêmica.

Em especial, agradeço ao professor Arthur Gomes, que me ensinou não apenas conteúdos técnicos, mas também valiosas lições de vida. Aos professores Kleber Cabral, Luís Henrique, Klaus André e Janaina Salústio, cujos ensinamentos, orientações e palavras de incentivo foram essenciais para o meu crescimento intelectual e pessoal. Agradeço, de forma especial, à UFERSA, que foi minha casa durante esses anos. Nesta instituição, adquiri conhecimento, vivi experiências marcantes, construí amizades verdadeiras e formei laços que levarei comigo por toda a vida. Por fim, e acima de tudo, agradeço a Jesus Cristo, minha fonte de força, inspiração e luz em todos os momentos. Sem Ele, nada disso teria sido possível. A todos vocês, meu mais sincero e profundo agradecimento.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo comparar os recalques obtidos pelo método de Schmertmann e através de provas de carga em placa em uma fundação tipo Sapata Superficial. O perfil do local do estudo é composto por areia fina e média situado na praia de Barra de Tabatinga/RN. Os dados obtidos para utilizar o método de Schmertmann foi através de sondagens SPT (Standard Penetration Test) e o método experimental foi obtido através de três provas de carga em placa, um deles executado na superfície e outros dois a 2 m de profundidade. Os resultados da prova de carga realizada na superfície mostraram grande similaridade com os ensaios realizados a 2 metros de profundidade, demonstrando uniformidade no comportamento do solo. Os recalques obtidos pelo método de Schmertmann e pelas provas de carga em placa foram também similares, o que reforça a confiabilidade das análises realizadas.

Palavras-chave: Solo. Prova de carga em placa. Sondagem SPT. Areia.

ABSTRACT

This study aims to compare the settlements obtained by the Schmertmann method and plate load tests on a shallow footing foundation. The study site is composed of fine and medium sand located on Barra de Tabatinga beach, Rio Grande do Norte. The data obtained for the Schmertmann method were obtained through SPT (Standard Penetration Test) drillings, and the experimental method was obtained through three plate load tests, one performed at the surface and the other two at a depth of 2 m. The results of the surface load test showed great similarity with the tests performed at a depth of 2 m, demonstrating uniformity in soil behavior. The settlements obtained by the Schmertmann method and the plate load tests were also similar, reinforcing the reliability of the analyses performed.

Keywords: Soil. Plate load test. SPT drilling. Sand.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Recalque Imediato.....	16
Figura 2	–	Recalque Primário e Secundário	16
Figura 3	–	Exemplo de uma prova de carga em placa em execução.....	19
Figura 4	–	Proporção de recalque em placa circular e quadrada.....	20
Figura 5	–	Localização de Tabatinga/RN.....	25
Figura 6	–	Mapa Geológico do RN.....	26
Figura 7	–	Perfil Representativo.....	24
Figura 8	–	Extrapolção do Recalque para sapatas quadradas.....	26
Figura 9	–	Esquema de montagem da prova de carga em placa.....	27
Fig. 10	–	Provas de carga em placa em execução.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Características iniciais das provas de carga.....	25
Tabela 2	–	Resultados das provas de carga em placa.....	29
Tabela 3	–	Resultados dos recalques através do método semiempírico de Schmertmann (1978).....	29
Tabela 4	–	Resultados dos recalques através do método experimental por Sowers (1970) e Cintra et al. (2011).....	30
Tabela 5	–	Recalques pelos métodos de Schmertmann, Cintra e Sowers	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Bel -	Bacharel
Dr -	Doutor
Me -	Mestre
P&D -	Pesquisa e Desenvolvimento
PG& -	Perspectivas em Gestão & Conhecimento
SBGC -	Sociedade Brasileira de Gestão do Conhecimento
UI -	Unidade de Informação
ABNT -	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BR -	Brasil
C.P -	Corpo de Prova
Cm -	centímetros
Kgf -	kilograma-força
M -	metro
N -	Número de golpes (SPT)
NBR -	Norma Brasileira
Nmédio -	Valor Médio do número de golpes no SPT
RN -	Rio Grande do Norte
SPT -	Standard Penetration Test (Ensaio de Penetração Padrão)

LISTA DE SÍMBOLOS

S -	Recalque estimado
Q -	Tensão aplicada sobre o solo (carga/área)
B -	Largura da fundação (base da sapata)
ν -	Coefficiente de Poisson do solo
E _s -	Módulo de elasticidade do solo (obtido do SPT)
C ₁ -	Fator de forma
C ₂ -	Fator de profundidade
Δz -	Espessura da camada de solo analisada
N -	Valor do SPT (Standard Penetration Test)
σ' -	Tensão efetiva vertical no solo
γ -	Peso específico do solo
Z -	Profundidade em relação à superfície do terreno
A -	Área da base da fundação ou da placa
P -	Carga total aplicada
S -	Recalque medido em campo
σ_{adm} -	Tensão admissível do solo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos.....	14
1.2 Objetivos Geral.....	14
1.3 Objetivos Específicos.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 Método de Schmertmann.....	16
2.2 Método Experimental - Prova de Carga em Placa (PCP).....	17
2.2.2 Método de Sowers	20
2.2.3 Método de Cintra	21
3 METODOLOGIA.....	22
3.1 Local do Estudo – Praia de Tabatinga	22
3.2 Geologia Local	23
3.3 Investigação Geotécnica	24
3.4 Prova de Carga em Placa	25
4 RESULTADOS	28
4.1 Análise dos resultados das provas de carga em placa	28
4.2 Análise dos recalques obtidos através dos métodos Semiempírico e Experimental	29
4.3 Comparação dos recalques	30
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

O comportamento do solo diante das cargas aplicadas pelas estruturas é um dos aspectos mais críticos na engenharia geotécnica, sobretudo quando se busca garantir a estabilidade e a durabilidade das fundações. Dentre os principais parâmetros analisados nesse contexto, destaca-se o recalque, que corresponde ao deslocamento da estrutura devido à deformação do solo subjacente. Compreender e prever esse fenômeno é essencial para evitar problemas como fissuras, deslocamentos estruturais e até mesmo colapsos parciais (CINTRA et al., 2005).

Já os Recalques diferenciais são os que preocupam, pois a estrutura deforma desigualmente de um ponto para outro da fundação causando grandes problemas de fissuras, trincas, fendas e até mesmo o colapso total da estrutura de acordo com (TOMLINSON; BOOBY, 2009).

O Recalque imediato ocorre quase que instantaneamente após a aplicação da carga sobre o solo, estando associado a deformação elástica por isso é empregado a teoria da elasticidade devido a linearidade. O estudo é baseado nesse tipo de recalque que é bastante utilizado em solos arenosos (NAVARRO, 2012).

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo comparar os recalques estimados na superfície e a 2 metros de profundidade utilizando diferentes abordagens: o modelo semiempírico de Schmertmann, amplamente utilizado por sua aplicabilidade prática em solos granulares, o modelo experimental obtido a partir de ensaios de prova de carga em placa (PCP) através dos métodos propostos por (CINTRA et al., 2005).

Ao realizar essa comparação, busca-se avaliar os resultados entre os modelos Semiempíricos e experimentais, destacando suas limitações e aplicações práticas. Além disso, o trabalho pretende contribuir para a análise mais adequada da previsão de recalques em projetos geotécnicos, especialmente em situações em que há restrições de instrumentação ou variabilidade geológica significativa.

Além da importância de prever o recalque com precisão, é fundamental compreender como ele se manifesta em diferentes profundidades dentro do maciço de solo, já que o comportamento não é uniforme ao longo do perfil. Recalques diferenciais, ainda que pequenos, podem comprometer o desempenho estrutural de edificações. De acordo com SILVA (2019) a comparação obtida na superfície e a dois metros de profundidade da superfície permite analisar a variação de recalques em caso de sapata com e sem embutimento.

A previsão dos recalques em fundações é de fundamental importância para o desempenho estrutural das edificações, principalmente em solos compressíveis ou com alta

variabilidade geotécnica. Segundo TEIXEIRA (1997), Métodos semiempíricos, como o proposto por Schmertmann, têm sido amplamente utilizados por sua relativa simplicidade e boa aproximação prática. No entanto, a confiabilidade desses métodos ainda depende de validação com dados experimentais, como os obtidos por provas de carga em placa (PCP), que representam o comportamento real do solo sob carga.

Comparar os recalques em diferentes profundidades (na superfície e a 2 metros de profundidade) torna-se relevante para verificar a distribuição da deformação no maciço de solo e avaliar a segurança e desempenho das fundações rasas. Tal comparação, com base em métodos distintos, pode apontar vantagens e limitações de cada abordagem, orientando decisões em projetos futuros e promovendo maior eficiência e economia nas soluções geotécnicas adotadas por (CINTRA et al., 2005).

1.1 Objetivos

Serão abordados nos itens abaixo o objetivo geral e específicos.

1.1.1 Objetivo geral

Comparar os recalques estimados na superfície e a 2 metros de profundidade, utilizando o modelo semiempírico de Schmertmann, o método experimental por prova de carga em placa (PCP), através dos modelos de Sowers e Cintra.

1.1.2 Objetivos específicos

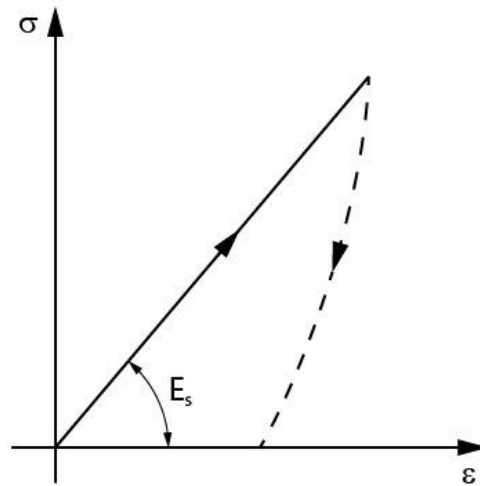
- Aplicar o método de Schmertmann para estimar o recalque em dois níveis de profundidade.
- Analisar os resultados de provas de carga em placa realizadas na área de estudo.
- Estimar recalques com base nas metodologias propostas por Sowers e Cintra.
- Comparar os recalques obtidos por cada método.
- Avaliar a confiabilidade e aplicabilidade prática dos modelos utilizados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A capacidade de carga das fundações rasas é um dos aspectos fundamentais na engenharia geotécnica, sendo responsável por garantir a estabilidade das estruturas. O recalque

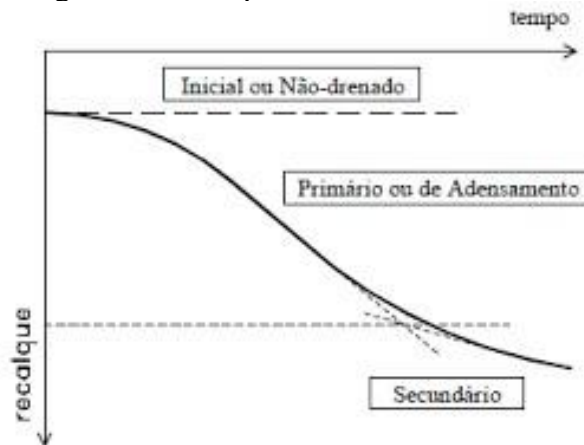
de uma fundação é o deslocamento vertical sofrida pelo solo de apoio em resposta às cargas aplicadas pela estrutura. Segundo (TOMLINSON; BOOBY, 2009), os recalques são classificados em três tipos: imediato (ou elástico), primário (adensamento) e secundário (fluência ou creep), de acordo com os gráficos das Figuras 1 e 2:

Figura 1 - Recalque Imediato.



(SILVA e MENDES, 2021).

Figura 2 - Recalque Primário e Secundário.



(SILVA e MENDES, 2021).

Dentre eles, o recalque é o que ocorre logo após a aplicação da carga, sem que haja tempo para dissipação de poro-pressões, sendo predominante em solos granulares (arenosos) ou em solos coesivos sob pequenas espessuras ou cargas rápidas. O recalque imediato ocorre devido à deformação elástica do solo e depende principalmente das características tensão-

deformação do material, da geometria da fundação e da distribuição de tensões no maciço (SILVA e MENDES, 2021).

2.1 Método de Schmertmann (1978)

O método de Schmertmann é um modelo semiempírico desenvolvido para estimar o recalque elástico de fundações rasas, especialmente em solos arenosos e coesivos não saturados. Ele se baseia em conceitos da teoria da elasticidade e em observações empíricas obtidas a partir de ensaios de CPT (Cone de Penetration Test), podendo ser adaptado também para uso com valores de SPT. A metodologia considera a distribuição da deformação ao longo da profundidade, assumindo que a deformação ocorre predominantemente até cerca de 2 a 4 vezes a largura da fundação. Para isso, é utilizado o fator de influência de profundidade (I_n), que varia conforme a geometria da fundação (quadrada, retangular ou contínua) (FORMIGONI, 2019).

A deformação total (recalque) é obtida pela integração da deformação uniaxial vertical em cada camada do solo sob a fundação:

$$S = C_1 \cdot C_2 \cdot q \cdot \sum \left(\frac{\Delta z}{E_z} \cdot I_z \right) \quad \text{Equação (1)}$$

em que:

S = recalque estimado (mm);

C_1 = fator de correção para rigidez na carga repetida (tipicamente entre 1 e 2);

C_2 = fator de correção para tempo (tipicamente entre 1 e 1,2);

q = tensão de contato (kPa);

Δz = espessura da camada considerada (m);

E_z = módulo de elasticidade da camada na profundidade z (kPa);

I_z = fator de influência de profundidade.

O recalque elástico é predominante e ocorre imediatamente após a aplicação da carga. Esse tipo de deformação é representado pela deformabilidade do solo, estimada por meio do módulo de elasticidade, obtido a partir de ensaios de campo, como o SPT. A deformação vertical se distribui em profundidade conforme a zona de influência da fundação.

Esse é um método prático e eficaz, especialmente para solos granulares, pois considera o perfil estratificado do subsolo e o comportamento real do solo sob a fundação, baseando-se em parâmetros obtidos diretamente em campo. No entanto, não contempla recalques de longo

prazo relacionados ao adensamento. Para sua aplicação, é fundamental uma boa definição do perfil geotécnico e a obtenção de dados confiáveis. Trata-se de um método mais confiável para fundações rasas submetidas a carregamentos centrados.

2.2 Método Experimental - Prova de Carga em Placa (PCP)

A Prova de Carga em Placa (PCP) é um ensaio de campo utilizado para avaliar diretamente o comportamento tensão $\times$ deformação do solo sob cargas aplicadas. É considerada uma das formas mais confiáveis de estimar a capacidade de carga e o recalque imediato de fundações rasas, pois reproduz as condições reais de carregamento e resposta do solo. Esse método é regido pela norma ABNT NBR 6489:2019 – Solo – Ensaio de carga estática em placa, e consiste na aplicação de cargas verticais sobre uma placa metálica rígida, geralmente circular e com dimensões padronizadas (normalmente de 30 cm a 60 cm de diâmetro), apoiada diretamente sobre o terreno previamente preparado. O recalque correspondente é medido em cada etapa de carregamento, por meio de relógios comparadores ou sensores de deslocamento, como mostra a Figura 3, a prova de carga sendo executada.

Figura 3 – Exemplo de uma prova de carga em placa em execução.



Fonte: [https://www.geoaxengenharia.com.br/ensaio-de-placa/\(01/06/2025\)](https://www.geoaxengenharia.com.br/ensaio-de-placa/(01/06/2025))

Durante o ensaio, as cargas são aplicadas em estágios sucessivos e crescentes, mantendo-se cada etapa até a estabilização dos recalques. Os resultados obtidos são representados por uma curva carga $\times$ recalque, que permite avaliar não apenas a capacidade de

suporte do solo, mas também seu módulo de deformabilidade (módulo de reação do solo), parâmetro fundamental para dimensionamento de pavimentos e fundações superficiais.

A PCP de acordo DÉCOURT e QUARESMA (1978), é especialmente útil em solos heterogêneos ou em locais onde se deseja confirmar os resultados obtidos por métodos teóricos ou empíricos. Além disso, é frequentemente utilizada para validar projetos geotécnicos, analisar o comportamento do solo compactado em aterros e verificar a qualidade de solos de fundação após melhoramentos. Vale destacar que, embora muito representativa, a prova de carga em placa apresenta algumas limitações. Como o ensaio é executado com uma placa de pequena área, os resultados podem não refletir fielmente o comportamento de fundações de maior dimensão, especialmente em solos com variação de características com a profundidade. Por isso, os valores obtidos são geralmente corrigidos ou interpretados com base em fatores de escala e em conhecimento técnico especializado, onde a tensão admissível é a carga máxima, dividido pelo fator de segurança, como mostra a Equação 2.

A tensão admissível pode ser definida por:

$$\sigma_{adm} = \frac{q_{máx}}{F_s}$$

Equação (2)

em que:

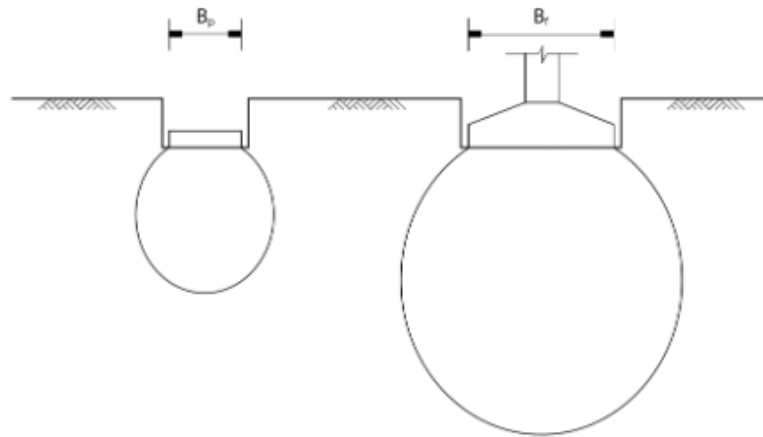
q_{max} = carga por unidade de área no ponto de ruptura ou no recalque limite;

F_s = fator de segurança (geralmente 2,0);

A tensão admissível do solo pode ser determinada com base em um limite de recalque aceitável ou por critério de ruptura quando há identificação clara do colapso na curva carga-deformação. A prova de carga em placa permite a medição direta do comportamento carga-deformação do solo, representando uma fundação rasa em escala reduzida (LOPES e SOUZA, 2018).

Durante o ensaio, o solo é submetido a um carregamento real, o que provoca a redistribuição das tensões e permite avaliar com fidelidade a resposta do solo. Por isso, esse ensaio é uma importante ferramenta de calibração para modelos teóricos de previsão de recalques e capacidade de carga de acordo com (FERREIRA, 1996), temos como simular em uma placa circular o recalque em uma placa retangular real como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Proporção de recalque em placa circular e quadrada.



Fonte: (CINTRA et al., 2005). (25/07/2025)

Os resultados obtidos podem ser extrapolados para fundações maiores utilizando equações empíricas, com devidos ajustes quanto ao fator de forma, profundidade de assentamento e tipo de solo. Dessa forma, diz (CINTRA et al., 2005). que o ensaio fornece uma representação realista do comportamento do solo e é amplamente utilizado como instrumento de controle tecnológico e validação de projetos geotécnicos.

2.2.1 Método de Sowers

A equação de Terzaghi-Peck foi generalizada por Sowers (1962) para extrapolar o recalque obtido em placa quadrada de qualquer dimensão (B_p) para uma sapata quadrada de lado B_f é mostrada na equação (3).

$$\rho_f = \rho_p \left[\frac{B_f (B_p + 0,30)}{B_p (B_f + 0,30)} \right]^2 \quad \text{Equação (3)}$$

Entretanto, estudos de casos apresentados por Bjerrum e Eggestad (1963, *apud* Perloff e Baron, 1976) mostram uma grande dispersão na correlação entre o recalque da sapata e da placa de 0,30 m, afetada pela compactidade e granulometria da areia, de acordo com a Equação (4) em que o fator β caracteriza a relação entre os recalques da sapata e da placa, para uma mesma tensão aplicada:

$$\beta = \frac{\rho_f}{\rho_p} \quad \text{Equação (4)}$$

2.2.2 Método de Cintra et al. (2005)

Cintra et al. (2005) apresentam uma solução ao problema da extrapolação do recalque em areia, para sapatas quadradas apoiadas à superfície, considerando que o módulo de deformabilidade segue a função da Equação (5).

$$E_s = E_0 + kz$$

Equação (5)

Utilizando o método de Schmertmann (1970) para diferentes relações, temos a Equação (6).

$$\frac{E_0}{k} \quad (\text{com unidades em metros})$$

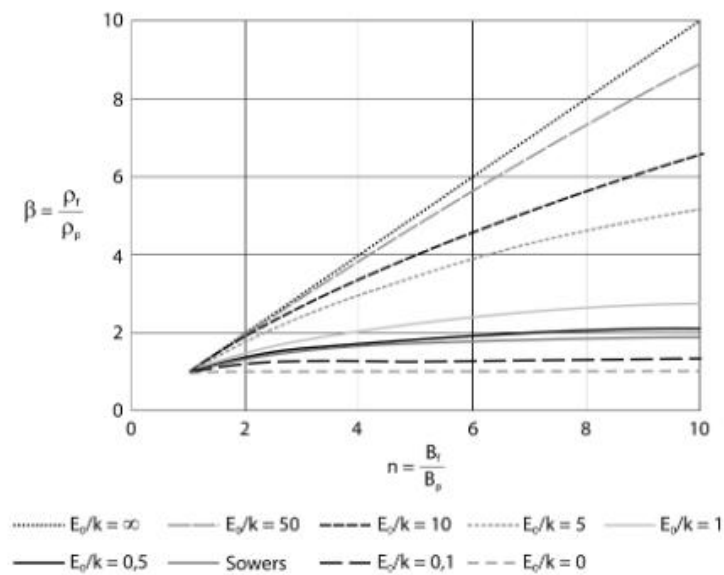
Equação (6)

Dessa forma, sempre que for possível a consideração de meio elástico linearmente não homogêneo com a correspondente estimativa de E_0 e de k e, portanto, da relação E_0/k , possibilitará a extrapolação do recalque da placa. Essa solução é aplicável não somente a areias, como também a qualquer tipo de solo c-φ, desde que o seu módulo de deformabilidade possa ser aproximado pela função linear como mostra a Equação (7).

$$E_s = E_0 + k \cdot z$$

Equação (7)

Figura 8 – Extrapolação (β) do Recalque para sapatas quadradas.



Fonte: (CINTRA et al., 2005).

No contexto do método de Cintra, a extrapolação dos resultados obtidos na PCP para o dimensionamento de sapatas rasas baseia-se na premissa de que o comportamento deformacional do solo pode ser correlacionado através de fatores de escala que consideram a geometria da fundação e o regime de tensões atuante.

A metodologia proposta por (CINTRA et al., 2005) propõe um fator de extrapolação (β) fundamentado em análises empíricas e semiempíricas, que contempla o aumento do recalque com a largura da fundação por meio de uma função potencial, onde o expoente “m” reflete a sensibilidade do solo ao aumento da área carregada. Além disso, a correlação direta entre as tensões aplicadas introduz uma proporcionalidade linear que simplifica a aplicação prática do método. Vale destacar que a prova de carga em placa, além de fornecer dados confiáveis sobre a deformabilidade do solo, também permite a avaliação de parâmetros como a rigidez inicial, a taxa de amortecimento do recalque e até a identificação de comportamento não linear em solos granulares.

Quando adequadamente interpretados, esses resultados contribuem significativamente para a calibração dos modelos analíticos de recalque, conferindo maior segurança e confiabilidade ao dimensionamento geotécnico de fundações.

Adicionalmente, o método de Cintra baseado na PCP é recomendado em situações em que os métodos puramente teóricos ou semiempíricos não oferecem segurança suficiente devido à variabilidade dos parâmetros geotécnicos, especialmente em solos heterogêneos ou quando há poucas informações geotécnicas disponíveis. Sua aplicação prática tem se mostrado eficaz

tanto em obras de pequeno porte quanto em empreendimentos de maior complexidade, sendo amplamente adotada por profissionais da área como uma ferramenta de verificação e calibração de projetos de fundações diretas (NOGUCHI, 2012).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho envolveu inicialmente a caracterização do local de estudo, etapa fundamental para a compreensão das condições geotécnicas e ambientais que influenciam diretamente o desempenho das fundações analisadas.

3.1 Local do Estudo – Praia de Tabatinga

A área de estudo está localizada na Praia de Tabatinga como mostra a Figura 5, situada no litoral sul do estado do Rio Grande do Norte, no município de Nísia Floresta, distante aproximadamente 35 km da capital, Natal. A região é de grande relevância turística e ambiental, caracterizando-se por um relevo suavemente ondulado, vegetação de restinga e presença de falésias em alguns trechos da orla.

Figura 5 – Localização de Tabatinga/RN.



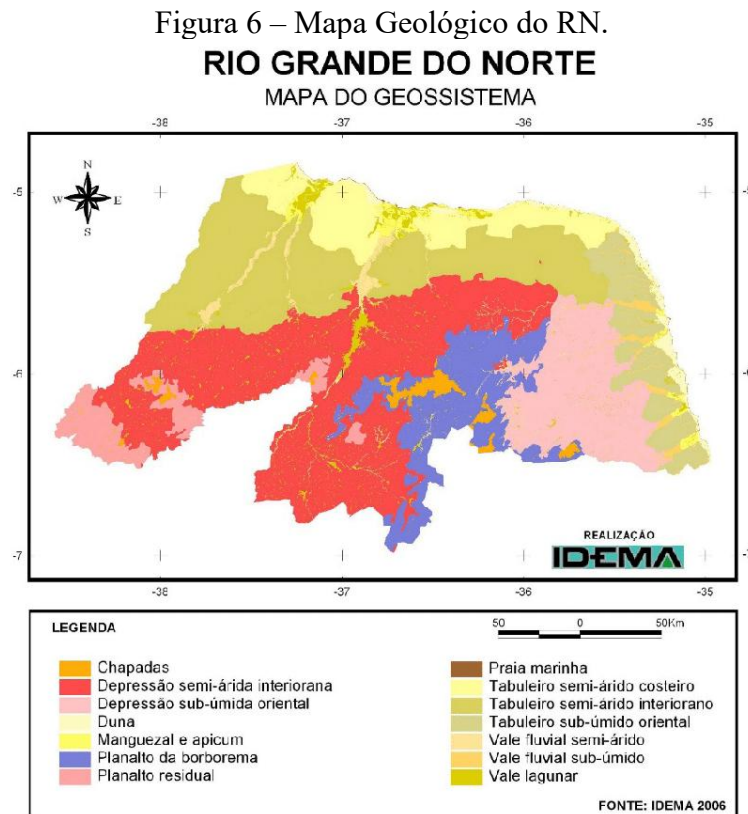
Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/N%C3%ADsia_Floresta. (25/07/2025).

3.2 Geologia Local

Segundo mapeamentos geológicos da região (MORAIS, 2020), geologicamente a região está inserida na Bacia Potiguar, mas as formações mais visíveis atualmente são os depósitos da Formação Barreiras e da Formação Barra de Tabatinga.

A Formação Barreiras, datada do Mioceno-Plioceno, é composta por sedimentos inconsolidados, como arenitos, argilas e siltitos, e constitui o corpo principal das falésias que margeiam a costa. Essas falésias são suscetíveis à erosão, principalmente durante períodos de chuvas intensas, quando há maior risco de escorregamentos.

Sobre essas formações, ocorrem depósitos mais recentes da Formação Barra de Tabatinga, do Pleistoceno, caracterizados por arenitos com estruturas sedimentares cruzadas, e que as coberturas Cenozoicas predominam sobre a região da praia de Tabatinga/RN como mostra a Figura 6.



Fonte: (IDEMA, 2006). (12/07/2025).

A frente litorânea é constituída por areias quartzosas, muitas vezes mobilizadas pelo vento, formando dunas móveis e fixas. Também são encontrados depósitos aluvionares e eólicos recentes, típicos de ambientes tropicais úmidos e litorâneos.

3.3 Investigação Geotécnica

Para a caracterização do subsolo na área de interesse, foi executado um programa de investigação geotécnica composto por ensaios de sondagem de simples reconhecimento, com medição de SPT, conforme os critérios da NBR 6484:2020. A Figura 7 apresenta o perfil representativo do local estudado.

Figura 7 – Perfil Representativo

z(m)	NSPT	Solo
1	8	Areia fina e média
2	10	
3	10	
4	11	
5	17	Areia fina e média, siltosa
6	19	
7	20	Areia fina
8	29	
9	24	
10	30	
11	40	
12	39	

Fonte: Autoria Própria

O perfil indica uma camada inicial composta por areia fina e média pouco a medianamente compacta, seguido de uma camada de areia fina e média siltosa medianamente compacta a compacta, e por fim uma camada de areia fina compacta a muito compacta. O nível freático está a 5 m de profundidade em média em relação do nível do terreno.

3.4 Prova de Carga em Placa

Foram executadas três provas de carga em placa, denominadas neste trabalho por PCP1, PCP2 e PCP3. Os ensaios foram executados segundo as premissas da norma NBR 6489:2019. e foram executados em placa circular, rígida, de aço, com 25 mm de espessura e 0,50 m de diâmetro. A Tabela 1 apresenta as características iniciais das provas de carga em placa.

Tabela 1 – Características iniciais das provas de carga.

Ensaio	Condição de ensaio	Tipo de carregamento	Tensão máxima de ensaio (kgf/cm ²)
PCP 01	Não saturado	Lento	3
PCP 02	saturado	Lento	3
PCP 03	saturado	Lento	3

Fonte: Autoria Própria

As cargas foram aplicadas com o auxílio de um cilindro hidráulico de 500 kN de capacidade, alimentado por uma bomba manual, e medidas por meio de manômetro. Todos os equipamentos utilizados foram previamente aferidos. Para a montagem dos ensaios, foi preparado previamente uma cava prismática com 1,00 m de lado e 2,00 m de profundidade com a finalidade de permitir que os ensaios fossem executados com a placa assentada na mesma cota em que se pretende apoiar as futuras fundações, com exceção do ensaio PCP1, a qual foi executada na superfície do terreno.

A PCP1 foi executada em condição não saturada, enquanto os ensaios PCP2 e PCP3 foram executados em condição saturada. A saturação da cava foi realizada através do lançamento de água por uma mangueira durante todo o período de execução do ensaio. Para evitar erosão nas bordas da placa foi colocada em seu redor uma camada de brita.

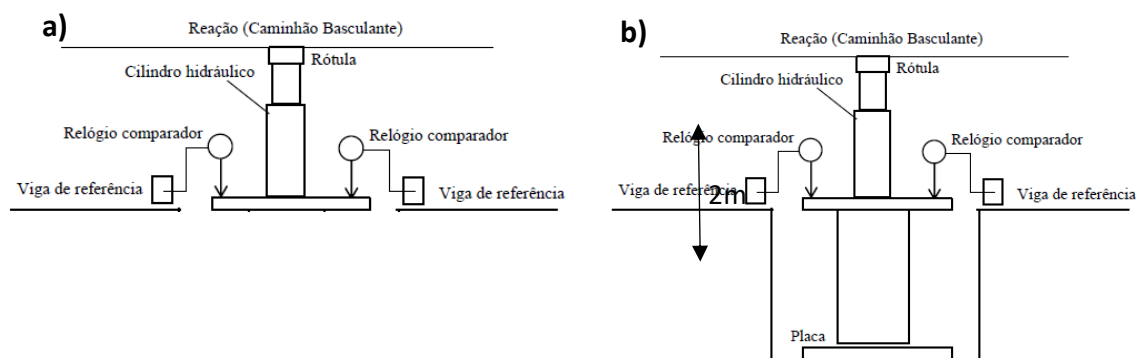
Para os ensaios PCP2 e PCP3, após a cava pronta, foi feita a raspagem da superfície do solo com o intuito de remover o material solto de escavação, bem como promover o nivelamento para recebimento da placa e garantir uma superfície de contato uniforme entre a placa e o solo. Posteriormente, foi realizada a introdução da placa, seu nivelamento e em seguida posicionada uma coluna em aço com 2,00 m de altura com a finalidade de transferir os carregamentos provenientes do macaco hidráulico para a placa no interior da cava. Por fim, foi posicionado sobre a coluna o cilindro hidráulico e uma rótula para normalização dos carregamentos.

O sistema de reação aos carregamentos foi constituído por um caminhão basculante carregado com areia, com aproximadamente 10 toneladas de carga disponível. A Figura 9 indica o esquema de montagem das provas de carga em placa executada na superfície (PCP1) e executadas em profundidade (PCP2 e PCP3).

Os recalques na placa foram medidos através de quatro relógios comparadores mecânicos com resolução de 0,01 mm e curso de 30 mm. Estes foram instalados diametralmente

opostos com o auxílio de bases magnéticas articuláveis fixadas em vigas de referência rígidas metálicas, de 3 m de comprimento, dispostas transversalmente.

Figura 9 – Esquema de montagem da prova de carga em placa: a) Prova de carga em placa executada na superfície (PCP1); b) Prova de carga em placa executada a 2m de profundidade (PCP2 e PCP3).

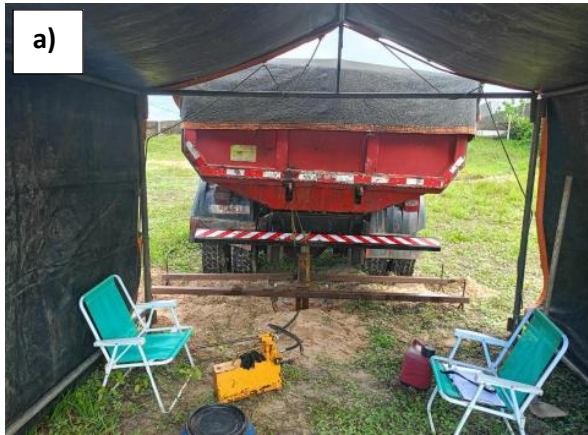


Fonte: Autoria própria

As provas de carga realizadas foram do tipo SML (slow maintained load), ou seja, lenta. A carga foi aplicada à placa em estágios sucessivos correspondentes a 20% da taxa admissível do solo. A tensão admissível indicada para o local foi de $1,5 \text{ kgf/cm}^2$, desse modo o ensaio foi levado até o dobro desta tensão, correspondendo a $3,0 \text{ kgf/cm}^2$, correspondendo a uma carga de 5890 kgf. Sendo assim, foram aplicados dez estágios de 589,05 kgf, o que corresponde a uma tensão de $0,30 \text{ kgf/cm}^2$.

Ao ser atingida a carga máxima e obtida a estabilização dos recalques, a carga foi mantida pelo período de mínimo de 12 horas, e posteriormente foi feito o descarregamento em quatro estágios, sendo cada um deles correspondente a 25% da carga máxima atingida. Todos os estágios de descarregamento foram mantidos pelo período mínimo de 15 minutos, até o descarregamento total. A Figura 10 apresenta as provas de carga em placa em execução.

Figura 10 – Provas de carga em placa em execução: a) PCP1 (placa apoiada na superfície); b) PCP2 e PCP3 (placa apoiada a 2m de profundidade).



Fonte: Autoria Própria

4 RESULTADOS

Os métodos de Cintra et al. (2005), Sowers (1970) e Schmertmann (1978) foram utilizados para estimativa do recalque, baseados nos dados de sondagem SPT e provas de carga em placa realizadas em uma obra na Praia de Tabatinga/RN. Para realização dos cálculos foi adotada uma sapata de seção quadrada com lado igual a 1,50 m.

4.1 Análise dos resultados das provas de carga em placa

A Tabela 2 e a Figura 11 apresentam os resultados das provas de cargas. Como era de se esperar, a PCP1 apresentou o maior valor de recalque para a tensão máxima atingida no ensaio, pois a placa nesse ensaio foi assentada na superfície do terreno, ou seja, não havia o efeito de sobrecarga do solo adjacente a placa no caso em que é assentada em profundidade. Além disso, de acordo com o perfil do terreno (Figura YY – aquela que pedi para você fazer no início do cap.3), o solo superficial apresenta resistência inferior que em camadas mais profundas. Em termos gerais, os resultados obtidos apresentaram valores de recalque bastante próximos entre si.

Figura 11 – Resultado das provas de carga em placa.

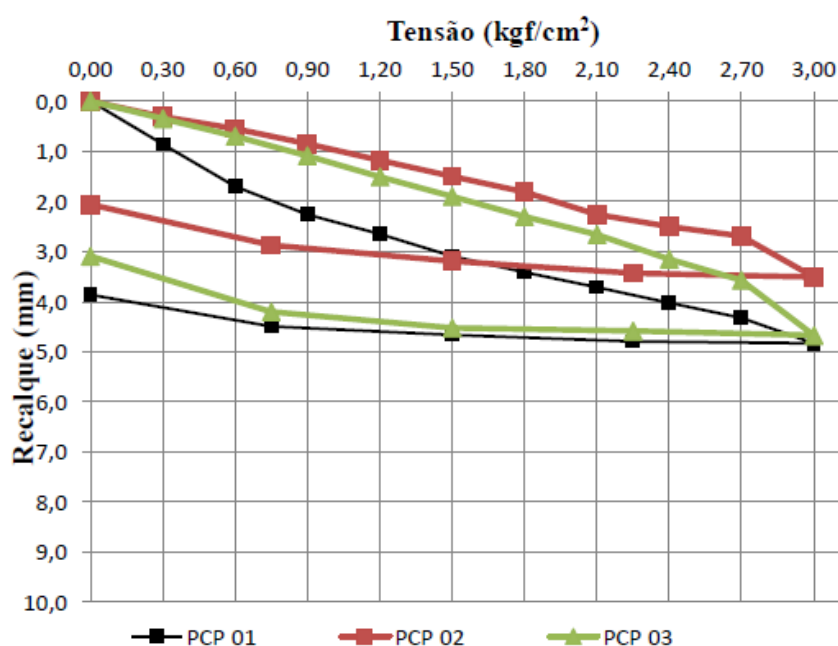


Tabela 2 – Resultados das provas de carga em placa.

Ensaio	Carga Máxima (kgf)	Tensão máxima (kgf/cm ²)	Recalque máximo (mm)	Recuperação elástica (mm)	Recalque residual (mm)
PCP 01	5.887,5	3,00	4,83	0,97	3,86
PCP 02	5.887,5	3,00	3,51	1,45	2,06
PCP 03	5.887,5	3,00	4,67	1,58	3,09

4.2 Análise dos recalques obtidos através dos métodos Semiempírico e Experimental

O método semiempírico proposto por Schmertmann (1978), foi calculado considerando a sapata adotada assentada na superfície e em dois metros de profundidade. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3 – Resultados dos recalques através do método semiempírico de Schmertmann (1978).

Cota da Sapata	C1	C2	$\sigma^*(\text{kg/cm}^2)$	$(iz/E_s) \times \Delta z$	Recalque Sapata(mm)
SAPATA NA SUPERFÍCIE (Z=0,0M)	1	1	1,5	0,043	6,5
SAPATA (Z=-2,0M)	0,86	1	1,5	0,021	2,1

Fonte: Autoria própria

Como esperado, a sapata enterrada apresentou valor de recalque menor. Isso pode ser explicado devido a sobrecarga do solo adjacente a sapata, e devido o bulbo de recalque da sapata enterrada atingir profundidade maior. Como o perfil indica tendência de compactidade crescente em função da profundidade, justifica o resultado menor de recalque para a sapata embutida.

O método experimental utilizado foram as provas de carga em placa. É necessário extrapolar os resultados dos recalques obtidos na placa para a sapata estudada. Desse modo, a Tabela 4 apresenta os resultados da extrapolação dos recalques pelo método de Sowers (1970) e por (CINTRA et al., 2005).

Verifica-se, para todas as provas de carga em placa, que a diferença entre os recalques obtidos por Cintra et al. (2005) são aproximadamente 40% menor que os recalques obtidos por Sowers (1970). Os recalques obtidos por Sowers (1970) não leva em consideração a variação do módulo de deformabilidade da areia em profundidade e, por ser um meio elástico não homogêneo, pode gerar resultados com confiabilidade questionável.

Tabela 4 – Resultados dos recalques através do método experimental por Sowers (1970) e Cintra et al. (2005).

Ensaio	Lpeça	Lsapata	σ_{adm}	Recalque na σ_{adm}	β	Recalque Sapata Sowers (1970) (mm)	Recalque Sapata Cintra et al. (2011) (mm)
PCP1	0,5	1,5	1,5	3,09	1,6	8,58	4,94
PCP2	0,5	1,5	1,5	1,5	1,6	4,16	2,4
PCP3	0,5	1,5	1,5	1,9	1,6	5,27	3,04

Fonte: Autoria própria

4.3 Comparação dos recalques

A Tabela 5 apresenta a comparação entre os recalques obtidos pelo método de Schmertmann (1978) e pelos métodos de Sowers (1970) e Cintra et al. (2005).

Tabela 5 - Recalques pelos métodos de Schmertmann, Cintra e Sowers.

MÉTODOS	PCP 01 (Z=superficial)	PCP 02 (Z=2,0m)	PCP 03 (Z=2,0m)
Cintra et al. (2005)	4,94 mm	2,40mm	3,04mm
Sowers (1970)	8,58 mm	4,16mm	5,27mm
Schmertmann (1978)	6,50 mm	2,1 mm	

Fonte: Autoria própria (2025)

De acordo com os resultados superficiais observa-se que o método semiempírico de Schmertmann é intermediário aos resultados dos métodos de Cintra e Sowers. Já nos resultados em que há embutimento da sapata o método de Schmertmann é menor do que os métodos experimentais.

Em todos os casos, pode-se considerar que os resultados são semelhantes um dos outros. Interessante ressaltar que na análise em que a sapata está embutida (normalmente o que se pratica) o resultado do método de Schmertmann se aproximou mais do método de Cintra, que além de levar em consideração as dimensões da placa e sapata, utiliza a variação do módulo de deformabilidade em profundidade, importante para casos em que o terreno é composto por areia.

Como em fase de projeto usa-se normalmente apenas a sondagem SPT para estimativa do recalque imediato da sapata e o método semiempírico se aproximou bastante do

comportamento real do terreno, pode-se considerar que o método de Schmertmann (1978) é válido para ser utilizado em situações similares a esta obra.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados obtidos pelos diferentes métodos de estimativa de recalque em sapatas rasas, pôde-se verificar que o método semiempírico de Schmertmann (1978) apresenta desempenho coerente e tecnicamente satisfatório, especialmente quando comparado aos métodos propostos por Cintra e Sowers.

Na condição superficial, os recalques estimados pelo método de Schmertmann situaram-se entre os valores obtidos pelos métodos de Cintra e Sowers, revelando-se uma abordagem intermediária. Já nas análises com sapata embutida — que refletem com maior precisão as condições práticas de execução — observou-se que o método de Schmertmann tendeu a fornecer valores inferiores aos obtidos experimentalmente, mas ainda dentro de uma faixa de coerência.

Um ponto de destaque é a aproximação entre os resultados de Schmertmann e Cintra no caso da sapata embutida. Tal comportamento pode ser atribuído à consideração, por parte do método de Cintra, da variação do módulo de deformabilidade com a profundidade, característica essencial em solos arenosos.

Os resultados obtidos nos diferentes métodos apresentam valores de recalque bastante próximos, o que reforça a confiabilidade das análises realizadas. Para a profundidade superficial (Z-superficial), o método de Cintra et al. (2011) indicou um recalque de 4,94 mm, enquanto Sowers (1970) apontou 8,58 mm e Schmertmann (1978) 6,50 mm. Já para a profundidade de 2,0 m, os valores foram 2,40 mm (Cintra et al.), 4,16 mm (Sowers) e 2,10 mm (Schmertmann) na PCP 02, e 3,04 mm, 5,27 mm e 2,10 mm, respectivamente, na PCP 03. Essa proximidade entre os valores sugere que, mesmo utilizando diferentes abordagens teóricas e empíricas, os métodos são consistentes e apresentam resultados compatíveis, aumentando a confiança na precisão das estimativas de recalque para a sapata analisada.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122:2019. Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=405145>>. Acesso em: 21 jul. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6489:2020. Solo – Ensaio de carga estática em placa. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=464395>>. Acesso em: 21 jul. 2025.

CINTRA, J. C. A.; ALBIERO, A. L.; et al. **Estimativa de recalques e módulo de deformabilidade baseado em SPT e CPT**, incluindo método de Schmertmann (1970/1978) e correlações Teixeira & Godoy. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG, 2010. Anais. [S. l.: s. n.], 2010. p. [s. p.].

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Projeto de fundações em solos colapsíveis**. São Carlos: EESC-USP, 2009.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações diretas**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 04 ago. 2025.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; MOTTA, R. F. **Fundações diretas**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2003. Capítulo 6 – **Recalque elástico**: apresenta métodos de cálculo com base em teoria da elasticidade, usando parâmetros como módulo de elasticidade e geometria da fundação.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; MOTTA, R. F. **Fundações diretas**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2003. Capítulo 7 – **Provas de carga em placa**: discute os procedimentos, interpretação dos resultados e aplicação prática em projetos de fundações.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; MOTTA, R. F. **Fundações diretas**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2003. Capítulo 8 – **Correlação entre ensaios e recalques**: traz uma análise prática da utilização de sondagens e ensaios in situ para prever o comportamento de recalque em fundações rasas.

DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R. **Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 6., 1978, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABMS, 1978. v. 1, p. 45–54.

FERREIRA, R. S. Análise crítica da NBR 6489/84 – **Prova de carga direta sobre terreno de fundação**. In: CONGRESSO TÉCNICO-CIENTÍFICO DE ENGENHARIA CIVIL – CONTECC, 1996, Florianópolis. Anais. v. 5, p. 931–940.

FORMIGONI, D. D. **Análise comparativa do desempenho de fundação rasa do tipo radier com fundação rasa de sapatas isoladas**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

IDEMA – INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO NORTE.

Mapa do Geossistema do Rio Grande do Norte. 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Mapa-do-Geossistema-do-Rio-Grande-do-Norte-Fonte-IDEMA-2006_fig6_327247595. Acesso em: 2 ago. 2025.

LOPES, J. B.; SOUZA, A. C. R. **Estudo do comportamento de sapatas isoladas em solos coesivos**. Revista Brasileira de Engenharia Civil, v. 24, n. 3, p. 349–362, 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbeca/a/djYTcWqTCbTLzx7kZxJjSrM/?lang=pt>>. Acesso em: 03 ago. 2025.

NAVARRO, M. **Fundamentos de engenharia de fundações**. São Paulo: Blucher, 2012. Disponível em: <<https://www.blucher.com.br/livro/fundamentos-de-engenharia-de-fundacoes-navarro>>. Acesso em: 03 ago. 2025.

NOGUCHI, Leandro Tomio. **Análise da capacidade de carga de fundação por sapatas executadas na cidade de São Caetano do Sul/SP**. 2012. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

PEREIRA, F. J.; ALMEIDA, M. G. **Avaliação da capacidade de carga de sapatas rasas com base em ensaios de campo**. Engenharia Civil, v. 14, n. 1, p. 55–67, 2020. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/engcivil/article/view/35682>>. Acesso em: 03 ago. 2025.

SCHMERTMANN, J. H. **Guidelines for Cone Penetration Test: Performance and Design**. Federal Highway Administration (FHWA), Report FHWA-TS-78-209, Washington, D.C., 1978. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/ts78209/index.cfm>>. Acesso em: 21 jul. 2025.

SILVA, R. T.; MENDES, L. C. **Recalque imediato em fundações rasas: estudo experimental e numérico**. Revista Engenharia de Estruturas, v. 11, n. 2, p. 142–156, 2021. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/estruturas/article/view/69508>>. Acesso em: 03 ago. 2025.

SILVA, T. C. da. **Diagnóstico geotécnico da falésia da Praia de Tabatinga, Nísia Floresta/RN: riscos e impactos ambientais**. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/29508>

SOWERS, G. B.; SOWERS, G. F. **Introductory Soil Mechanics and Foundations**. 4. ed. New York: Macmillan, 1970.

TEIXEIRA, Cornélio Zampier. **Capacidade de carga de sapatas, estacas de pequeno diâmetro e tubulões curtos em função do SPT: um estudo em solos residuais de gnaisses para a região Sul de Minas**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

TOMLINSON, M. J.; BOOBY, R. W. **Fundações: projeto e construção**. 8. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. Disponível em: <<https://exemplo.com/livro/tomlinson-fundacoes>>. Acesso em: 03 ago. 2025.