

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

CENTRO DE TECNOLOGIA

ENGENHARIA CIVIL

Leonardo Garcia de Albuquerque Santana

**ENSAIOS DE PLACA EM TERRENO NATURAL E EM SOLO-CIMENTO PARA
DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROJETO**

Maceió - AL

2021

Leonardo Garcia de Albuquerque Santana

**ENSAIOS DE PLACA EM TERRENO NATURAL E EM SOLO-CIMENTO PARA
DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROJETO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado para o curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como forma de obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Juliane Andréia Figueiredo Marques

Maceió - Al

2021

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Livia Silva dos Santos – CRB-4 – 1670

S231e Santana, Leonardo Garcia de Albuquerque.

Ensaio de placa em terreno natural e em solo-cimento para determinação de parâmetros de projeto / Leonardo Garcia de Albuquerque Santana. – 2021.
60 f.:il.

Orientadora: Juliana Andréia Figueiredo Marques.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) –
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2021.

Bibliografia: f. 52-54
Anexo: f.55-60

1. Fundação em Radier. 2. Cálculo de recalque. 3. Fundações diretas. 4. Ensaio de placa. 5. Solo-cimento. I. Título.

CDU: 624



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Sugestões de correções:

As observações e modificações estão indicadas nos arquivos em PDF enviados ao aluno.

Assinatura:

A1

Documento assinado digitalmente

gov.br

Luciana Correia Laurindo Martins Vieira
Data: 21/09/2021 15:21:18-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

A2

Documento assinado digitalmente

gov.br

Karlisson Andre Nunes da Silva
Data: 22/09/2021 13:44:32-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

A3



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Parecer:

Deverão ser dadas notas ao trabalho (de zero a 10) considerando o desempenho do(a) aluno(a) nas 3 áreas de análise (Monografia, Apresentação oral do trabalho e Arguição).

A nota final de cada avaliador, denominada NFA_n , será calculada da seguinte forma:

$$NFA_n = (0,6 \times \text{Monografia} + 0,2 \times \text{Apresentação oral do trabalho} + 0,2 \times \text{Arguição})$$

$$A_1: NFA_1 = (0,6 \times 10,0 + 0,2 \times 10,0 + 0,2 \times 10,0) = 10,0$$

$$A_2: NFA_2 = (0,6 \times 9,8 + 0,2 \times 9,8 + 0,2 \times 9,8) = 9,8$$

$$A_3: NFA_3 = (0,6 \times 9,8 + 0,2 \times 9,8 + 0,2 \times 9,8) = 9,8$$

A nota final do(a) aluno(a) será a média aritmética das notas atribuídas pelos avaliadores:

$$\text{Nota Final} = (NFA_1 + NFA_2 + NFA_3) / 3$$

$$\text{Nota Final} = 9,87$$

Assinatura:

A₁

A₂

A₃

Karlisson Andre Nunes da Silva
Data: 22/09/2021 13:45:14-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Documento assinado digitalmente
Luciana Correia Laurindo Martins Vieira
Data: 21/09/2021 15:21:58-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 14:00 horas do dia 21 de Setembro de 2021, por meio da Plataforma on-line Google Meet, reuniu-se de forma virtual a banca examinadora para avaliação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do aluno **Leonardo Garcia de Albuquerque Santana**, sob o título “**Ensaio de Placa em Terreno Natural e em Solo-Cimento para Determinação de Parâmetros de Projeto**”, composta pelos seguintes participantes:

Orientador: Prof(a) (A₁) Juliane Andréia Figueiredo Marques,


Prof(a) Avaliador(a) (A₂) Luciana Correia Laurindo Martins Vieira,

Prof(a) Avaliador(a) (A₃) Karlisson André Nunes da Silva.

A apresentação oral do aluno foi realizada em 26 minutos, findos os quais foi iniciado o debate, perfazendo um tempo total de defesa de 1 hora (s) e 15 minutos.

O aluno obteve média final 9,87 (nove vírgula oitenta e sete)

Abaixo, assinatura do orientador, seguida dos membros da banca, de acordo com a ordem listada acima, todos seguidos da respectiva nota, a assinatura do aluno e a assinatura do Coordenador do TCC.

Prof(a) (A₁) , nota final 10,0

Documento assinado digitalmente



Luciana Correia Laurindo Martins Vieira
Data: 21/09/2021 15:22:39-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof(a) (A₂) , nota final 9,8

Documento assinado digitalmente



Karlisson Andre Nunes da Silva
Data: 22/09/2021 13:45:48-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof(a) (A₃) _____, nota final 9,8

Aluno: 

Coordenador do TCC: _____

AGRADECIMENTOS

Descrever a gratidão que sinto ao entregar este trabalho é difícil, longas foram as noites de estudo, perrengues vividos e estresses acumulados, mas Deus sempre me trouxe serenidade e calma, para que nos momentos difíceis, não desistisse desse sonho, e a Ele eu agradeço por sempre me dar a força de perseverar em meus objetivos.

À minha família, especialmente meus pais, Guilherme e Larissa, e meus avós, André, Catarina, Joaquim e Ângela, meu eterno obrigado, por me incentivarem em busca de meus sonhos, me trazerem influências positivas e me darem todo o suporte que precisei durante todo o curso.

Agradeço também aos meus queridos amigos do grupo “Vamos à Luta”, Ana Elza, Christian, Maria Helena, Milena, Rodrigo e Yanna, que dividiram comigo todas as alegrias e sofrimentos dessa caminhada desde os primeiros dias, com trabalhos, provas e momentos de reclamar da vida ou contar sobre o final de semana de cada um. É a certeza de que terei grandes companheiros de profissão com quem continuarei a contar.

Minha gratidão também se estende à professora Juliane, que me orientou desde a monitoria de Mecânica dos Solos 1 até este trabalho, se fazendo presente em minha graduação e acreditando no meu potencial. Muito obrigado por se esforçar para conciliar o mundo acadêmico com o mercado de trabalho, que tantas vezes durante a graduação parecem mais distantes do que realmente são.

Por fim, gostaria de agradecer à AGM Geotécnica, por fornecer dados para esse trabalho e estar sempre contribuindo com a UFAL.

É o fim de um ciclo, mas o início de uma longa caminhada. Muito aprendi durante esses 5 anos, e muito a UFAL me proporcionou durante esse tempo, que nos novos ciclos que vêm, eu esteja preparado para adquirir todos os conhecimentos que puder, e que no futuro possa recompensar à universidade de alguma forma tudo que ela fez por mim.

RESUMO

SANTANA, L. G. A. **Ensaio de Placa em Terreno Natural e em Solo-Cimento para Determinação de Parâmetros de Projeto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2021.

O presente trabalho propõe analisar os resultados de três ensaios de placa, realizados de acordo com a NBR-6489/19, com a motivação de se verificar a viabilidade da implantação de uma fundação direta do tipo Radier, em um empreendimento habitacional com 8 blocos de apartamentos, na parte alta da cidade de Maceió-AL. Uma vez que, após a realização da investigação do subsolo por meio do SPT (*Standard Penetration Test*) encontrou-se um perfil de solo predominantemente argiloso, com baixa resistência nos primeiros metros, onde seria a cota de assentamento da fundação e sem a presença do NA. Desta forma, realizaram-se três ensaios em diferentes situações: solo-cimento pré-inundado (PC-01), solo natural (PC-02) e solo natural pré-inundado (PC-03), sendo este solo natural composto nas camadas superficiais de uma argila silto-arenosa, afim de garantir a caracterização do solo diante de diversas situações, prevendo a saturação do solo por alguma anomalia acidental. Estimando os recalques totais para a pressão aplicada pelo Radier no solo ($7,2 \text{ tf/m}^2$), obteve-se valores satisfatórios para este tipo de fundação, viabilizando tecnicamente seu uso.

Palavras-Chave: Fundação Direta; Fundação em Radier; Solo-Cimento; Ensaio de placa; Recalques;

ABSTRACT

SANTANA, L. G. A. **Plate Load Tests in Natural Soil and in Soil-Cement for the Determination of Projects Parameters.** Course Completion Work (Graduate - Bachelor of Civil Engineering)– Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2021.

The work in question intends to analyze three slab load tests and their results, those carried out according to NBR-6489/19, with the intuition of verifying the viability of a direct foundation in an 8 blocks housing project, in the upper part of the city of Maceió. AL. Once the building's underground soil was investigated, using an SPT (Standard Penetration Test), a low-resistance mostly clay soil was found in the first meters, where the foundation of the slab would occur, with no water level found. Thus, three load tests were carried out, each in a different situation: pre-flooded cement-soil(PC-01), natural soil(PC-02) and pre-flooded natural soil(PC-03), being this natural soil made of a silty-sandy clay, in the way of characterizing the soil in some situations, the saturation of the soil was made to predict any accidental anomalies. Estimating the total settlements for the tension applied by the slab foundation in the soil (7,2 tf/m²), satisfactory values were obtained for this type of foundation, technically enabling its use.

Keywords: Direct Foundation; Slab Foundations; Soil-Cement; Plate Load Test; Settlements;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ruptura superficial em fundações superficiais e ruptura profunda em fundações profundas.	14
Figura 2: Tipos de fundação rasa.....	15
Figura 3: Exemplo de escavação de Radier e delimitação com alvenaria.....	16
Figura 4: Exemplo de passagem de instalações hidráulicas antes da concretagem do Radier.	17
Figura 5: Exemplo de Radier sendo concretado.....	17
Figura 6: Exemplo de Radier após a concretagem.	18
Figura 7: Configuração típica da aparelhagem para aplicação de carga.	19
Figura 8: Exemplo de curva Tensão x Recalque com ruptura visível.	20
Figura 9: Exemplo de curva Tensão x Recalque sem ruptura visível.	21
Figura 10: Gráfico Tensão x Recalque para o solo natural.	24
Figura 11: Gráfico Tensão x Recalque para o solo natural pré-inundado.	24
Figura 12: Gráfico Tensão x Recalque para o aterro arenoso.	25
Figura 13: Gráfico Tensão x Recalque para o solo natural, solo natural pré-inundado e aterro arenoso.....	26
Figura 14: Rompimento de canalizações enterradas, resultando na saturação e erosão do solo.	27
Figura 15: Descarga de água de reservatório, saturando o solo.	28
Figura 16: Localização do empreendimento.	30
Figura 17: Construção do empreendimento com a localização do Bloco Residencial "A".....	30

Figura 18: Perfil de sondagem do furo SP-01.	33
Figura 19: Perfil de sondagem do furo SP-03.	34
Figura 20: Locação dos Ensaios de Placa.....	35
Figura 21: Ensaio de placa PC-03, demonstrando deflectômetros para medição de deslocamentos e utilização de lonas para proteção contra intempéries.....	36
Figura 22: Escavações dos ensaios PC-01 (solo-cimento pré-inundado) e PC-02 (solo natural).	36
Figura 23: Representação esquemática dos ensaios.	37
Figura 24: Gráfico Tensão x Recalque do ensaio PC-01.....	40
Figura 25: Gráfico Tensão x Recalque do ensaio PC-02.....	41
Figura 26: Gráfico Tensão x Recalque do ensaio PC-03.....	42
Figura 27: Gráficos Tensão x Recalque dos ensaios PC-01, PC-02 e PC-03.....	43
Figura 28: Pontos para cálculo do Ks nas curvas dos PC-01, PC-02 e PC-03.	44
Figura 29: Perfil estratigráfico do terreno ensaiado.	47
Figura 30: Fator μ_0 para o cálculo de recalques imediatos de fundação superficial flexível em camada de argila finita.....	49
Figura 31: Fator μ_1 para o cálculo de recalques imediatos de fundação superficial flexível em camada de argila finita.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: porcentagem de cimento a adicionar em solo melhorado, de acordo com o solo preexistente.	29
Tabela 2: Estágios de carregamento do ensaio de placa do tipo lento.	38
Tabela 3: Tempos de medição de deslocamentos para cada estágio da fase de carregamento do tipo lento.	38
Tabela 4: Estágios de descarregamento do ensaio de placa do tipo lento.	39
Tabela 5: Tempos de medição de deslocamentos para cada estágio da fase de descarregamento do tipo lento.	39
Tabela 6: Valores do coeficiente de forma da placa rígida (I_p)	45
Tabela 7: Valores do coeficiente de Poisson, para cada tipo de solo.	46
Tabela 8: Valores para encontrar fatores μ_0 e μ_1 .	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO GERAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	JUSTIFICATIVA	13
4	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	14
5	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
5.1	FUNDAÇÕES DIRETAS	14
5.2	FUNDAÇÃO TIPO RADIER	15
5.3	ENSAIO DE PLACA	18
5.3.1	ESPECIFICAÇÕES DO ENSAIO	18
5.3.2	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO	20
5.3.3	CÁLCULO DE RECALQUES	22
5.3.4	J. MARQUES, R. MARQUES E RAMOS (2015)	23
5.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS SIMULAÇÕES DE ENSAIO	26
5.5	SOLO-CIMENTO	28
6	ESTUDO DE CASO	29
6.1	DESCRIÇÃO DO EMPREENDIMENTO	29
6.2	MOTIVAÇÃO DOS ENSAIOS	31
6.3	EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	35

6.4	SOLO-CIMENTO	39
7	RESULTADOS	40
7.1	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	40
7.2	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	43
7.3	CÁLCULOS DOS RECALQUES	47
8	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	52
	ANEXO A	55

1 INTRODUÇÃO

A utilização da Engenharia de Fundações está presente desde os primórdios da vida em sociedade, em que o homem pré-histórico, buscava um bom solo para fincar seus alicerces. Com o passar dos séculos, grandes obras surgem nas sociedades grega, romana e egípcia, demonstrando o crescimento do intelecto humano no tangente à área de fundações. No Brasil, o entendimento técnico sobre o tema teve seu avanço após a colonização portuguesa, como citado por (NETO *et al*, 2019), com a construção de museus, palácios, grandes jardins, entre outros. Com isso, o conhecimento em Mecânica dos Solos e Fundações precisou ser aprofundado e disseminado no país.

Diante disso, entram em cena as fundações diretas e profundas, descritas pela NBR – 6122 “Projeto e execução de fundações” (ABNT, 2019). Para encontrar qual destes é o tipo adequado de fundação para uma construção, deve-se levar em consideração aspectos técnicos (investigação do subsolo, cargas provenientes da estrutura), econômicos e regionais (maquinário disponível, construções vizinhas). Uma vez que, escolhida de maneira incoerente com a realidade, a fundação pode trazer desde gastos excessivos, até riscos aos moradores com a ruína de sua estrutura.

A investigação do subsolo, costumeiramente feita por meio da sondagem de simples reconhecimento com SPT(*Standard Penetration Test*), é de grande valor para o projetista de fundações, uma vez que, por meio da sondagem, pode-se entender o perfil do subsolo naquele ponto do ensaio, a cada metro, como citado na NBR – 6484/2020 “Solo – Sondagens de simples reconhecimentos com SPT – Método de ensaio” descrevendo o solo em tipo, compacidade e/ou consistência, presença ou não do nível d’água e resistência (ABNT, 2020).

Por certas vezes, após a investigação geotécnica, encontra-se um solo de baixa resistência em sua profundidade inicial, e a impossibilidade econômica da utilização de fundações profundas. Segundo Vitali (2008), uma possível solução para esta problemática é o melhoramento das propriedades do solo, através do tratamento com aditivos e compactação, sendo o mais utilizado o cimento Portland.

Assim, é apresentado neste trabalho um caso de obra em que se deseja adotar fundação direta em Radier, em solo de média a baixa resistência. Realizando a análise de ensaios de placa, afim de garantir a segurança e resistência, de acordo com as propriedades geotécnicas, das fundações de um empreendimento residencial na parte alta de Maceió-AL.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Verificar a viabilidade da adoção de uma fundação em Radier apoiado sobre solo-cimento a partir de resultados de ensaios de placa.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar os ensaios de placa realizados, interpretando comparativamente seus resultados
- Elaborar gráficos Tensão x Recalque;
- Calcular os recalques;
- Verificar a viabilidade de se adotar a fundação proposta.

3 JUSTIFICATIVA

A parte alta de Maceió possui dimensões territoriais, tendo grande parte da população maceioense. A capital alagoana possui uma população estimada em 1.025.360 pessoas (IBGE, 2020), sendo que 17,28% desta população vive em bairros circunvizinhos ao empreendimento em estudo (Antares, Benedito Bentes, Cidade Universitária e Tabuleiro dos Martins), além de todos serem caracterizados como bairros em expansão (IBGE, 2010). Diante dessa situação, existe uma demanda crescente para habitação nesta região, seja esta de caráter social ou de baixo custo, o que traz investimentos de construtoras para estes bairros.

Para a concepção destes empreendimentos, deve-se interpretar de maneira assertiva os dados obtidos por meio sondagens e observações *in loco*, afim de evitar erros de projeto e execução, que podem ocasionar em patologias futuras (MILITITSKY et al, 2015), de forma a mesclar o uso de práticas construtivas e insumos, garantindo a qualidade almejada e estando de acordo com as normativas brasileiras, de modo a viabilizar economicamente a construção.

Com isso, a existência de solos nas camadas superficiais do terreno com resistência inferior à desejada podem resultar, no caso de utilização de fundações rasas, em deformações acima das admissíveis na estrutura, impossibilitando tecnicamente seu uso. Já a adoção de fundações profundas pode inviabilizar financeiramente a execução do empreendimento. Dessa forma, a técnica de estabilização com solo-cimento pode possibilitar a adoção de fundações diretas em solos de baixa resistência, que de maneira segura e menos onerosa, viabilizando assim o projeto.

4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

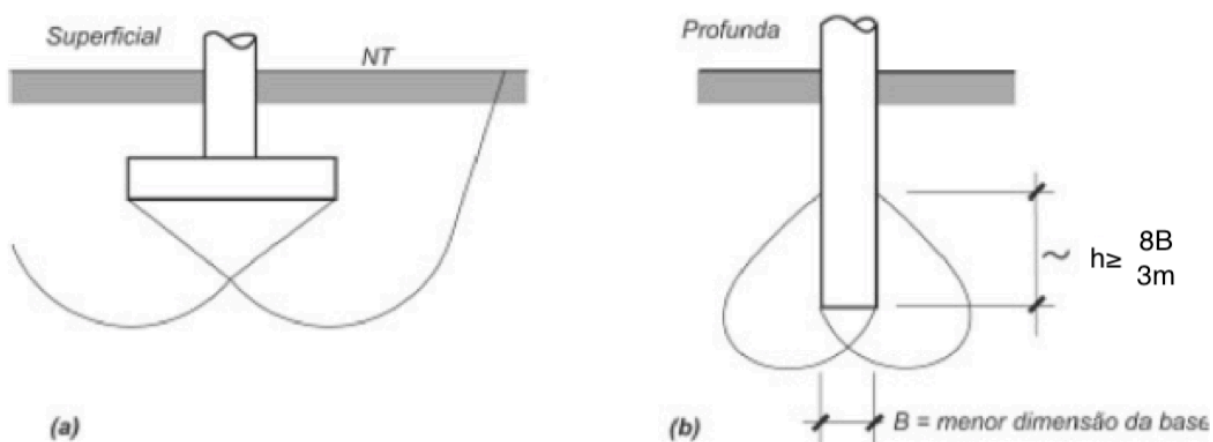
O referente trabalho se limita pela análise de tensões e deformações para a fundação de um empreendimento na parte alta de Maceió-AL. Obtidas a partir de ensaios de placa aplicados no solo, sendo este ensaiado em sua forma natural, natural pré-inundado e solo-cimento pré-inundado.

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 FUNDAÇÕES DIRETAS

As fundações se dividem em dois grupos gerais: fundações profundas e fundações diretas, esta em análise, se distingue da outra pelo fato de que o mecanismo de ruptura ocorre na superfície do terreno, como se vê na figura 1. Segundo Formigoni (2009), este tipo de fundação é menos custoso do que a fundação profunda, além de comparativamente, ter uma execução mais simples.

Figura 1: Ruptura superficial em fundações superficiais e ruptura profunda em fundações profundas.



Fonte: Adaptado Velloso e Lopes (2004)

As fundações diretas são descritas pela NBR – 6122/2019 “Projeto e execução de fundações”, como

Fundação rasa (direta ou superficial):

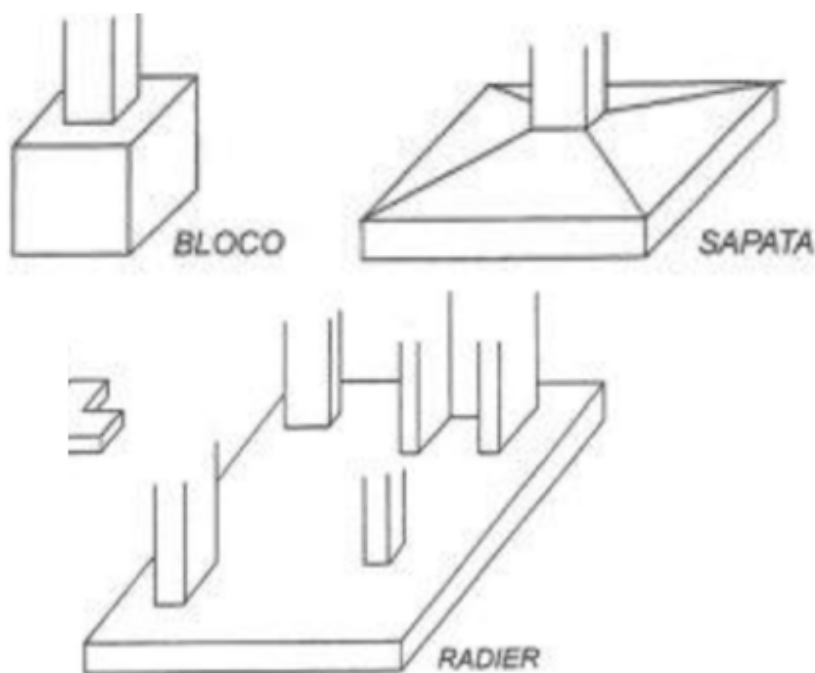
Elemento de fundação cuja base está assentada em profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação, recebendo aí as tensões distribuídas que equilibram a carga aplicada; para esta definição adota-se a menor profundidade, caso esta não seja constante em todo o perímetro da fundação. (ABNT, 2019, p 5)

Além disso, tem-se diferentes tipos de fundações rasas, são elas:

- Bloco;
- Sapata;
- Sapata Associada;
- Sapata Corrida;
- Viga Alavancada ou de Equilíbrio; e
- Radier.

A partir da figura 2, pode-se ver a representação de alguns tipos de fundações diretas.

Figura 2: Tipos de fundação rasa.



Fonte: Adaptado de Velloso e Lopes (2004)

5.2 FUNDAÇÃO TIPO RADIER

No empreendimento em estudo, se propõe a fundação direta em Radier, que é descrita como “elemento de fundação direta, assim como a sapata, dotado de rigidez para receber e distribuir mais do que 70 % das cargas da estrutura” (ABNT, 2019, p 7).

Para a sua execução, segundo ABNT (2019) e SCHNEIDER (2020), devem-se ter como seguimento as etapas abaixo:

- Escavação do solo, com paralisação dos serviços mecanizados em 30cm acima da cota de assentamento do Radier, para remoção manual da parcela final, como se vê na figura 3;
- Inspeção por responsável técnico, para averiguar a capacidade de resistência do solo na cota de assentamento da fundação, por meio de ensaios de campo;
- Em casos negativos, uma opção é aumentar a escavação e preencher a diferença de altura com concreto ($F_{ck} > 10\text{MPa}$) até a cota anterior;
- Antes da concretagem, se executa a instalação dos elementos de água e esgoto, a partir dos projetos complementares, como se observa na figura 4;
- É feita a montagem da forma do Radier, por meio de formas metálicas ou material compensado de madeira;
- Execução das malhas de aço e armaduras complementares, de modo a garantir corretos espaçamentos e cobrimento, de acordo com o projeto estrutural;
- Posicionamento e certificação das armaduras de arranque dos pilares;
- Realização da concretagem do Radier, com o respectivo controle tecnológico do concreto utilizado, como se vê nas figuras 5 e 6;
- Finalização com a impermeabilização da superfície do Radier; e
- Reaterro compactado da escavação.

A partir da figura 3, observa-se uma fundação em Radier já em sua fase final de execução.

Figura 3: Exemplo de escavação de Radier e delimitação com alvenaria.



Fonte: RIBEIRO *et al* (2020)

Figura 4: Exemplo de passagem de instalações hidráulicas antes da concretagem do Radier.



Fonte: RIBEIRO *et al* (2020)

Figura 5: Exemplo de Radier sendo concretado.



Fonte: Zancko Soluções Construtivas (2021)

Figura 6: Exemplo de Radier após a concretagem.



Fonte: Autor (2021)

5.3 ENSAIO DE PLACA

5.3.1 ESPECIFICAÇÕES DO ENSAIO

O projeto de fundações, como citado anteriormente, se baseia em diversos fatores para escolher e dimensionar o melhor método e tipo construtivo a ser utilizado em cada empreendimento. Após o dimensionamento dessas peças, de acordo com o conhecimento acerca de carregamentos e do solo, existem as provas de cargas estáticas, que simulam os carregamentos reais provocados pelo empreendimento.

Para o caso deste trabalho, tem-se na NBR-6489/2019 – “Solo – Prova de carga estática em fundação direta” todas as referências para utilização deste ensaio de placa.

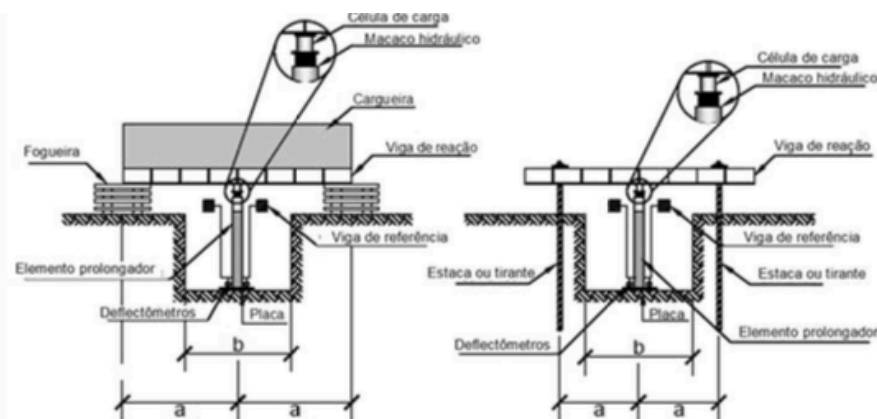
Estes carregamentos são aplicados até que: ocorra a ruptura do terreno; o deslocamento da placa atinja o limite estabelecido pelo projetista; ou a carga aplicada atinja o dobro do valor da taxa de trabalho admitida pelo solo. Segundo Albuquerque e Garcia (2020), solos de alta resistência costumam ter o critério de ruptura como o prevalente, já os de baixa resistência, o de recalques admissíveis.

Para a realização do ensaio, utilizam-se os seguintes aparelhos:

- Célula de carga;
- Macaco hidráulico
- Viga de reação
- Viga de referência
- Estacas ou tirantes;
- Placa;
- Deflectômetros;
- Elemento prolongador; e
- Cargueira, caso solicitado para o ensaio.

Estes, tem suas designações demonstradas na figura 7:

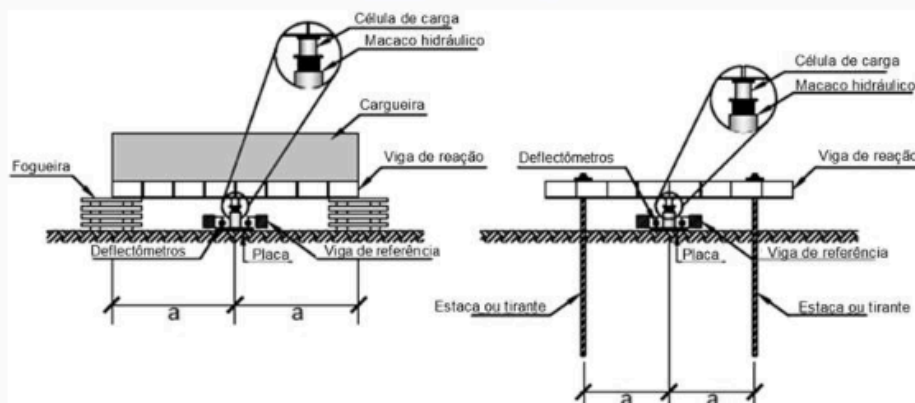
Figura 7: Configuração típica da aparelhagem para aplicação de carga.



Legenda

- a 1,5 vez o diâmetro da placa ou 1,5 vez o maior lado (mínimo 1,5 m)
- b Para o caso de poços – diâmetro da placa + 0,60 m ou maior lado + 0,60 m

a) Prova de carga com escavação no terreno



Legenda

- a 1,5 vez o diâmetro da placa ou 1,5 vez o maior lado (mínimo 1,0 m)

b) Prova de carga sem escavação no terreno

Fonte: ABNT (2019)

O sistema de reação, demonstrado pelas estacas ou tirantes, na figura 7, são elementos que funcionarão à tração, de modo a fornecer a estabilidade da aparelhagem sob a utilização das cargas máximas ensaiadas. Este, deve ter seu levantamento controlado por meio de deflectômetros, para garantir o maior nível de estabilidade possível para a prova de carga.

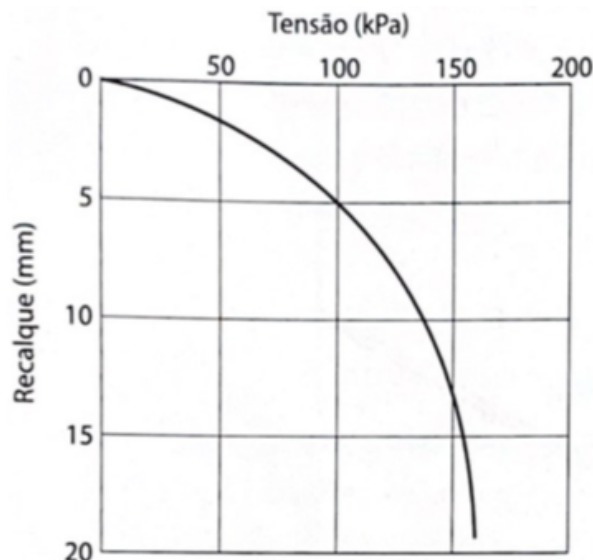
Para a preparação do ensaio, deve-se ter informações acerca das sondagens e que estas estejam próximas ao local de carregamento, ter como cota de carregamento a cota de assentamento da fundação e estar protegida de intempéries.

Por fim, caracteriza-se o ensaio de acordo com a execução de suas cargas para a posterior análise dos resultados, esses processos, segundo a ABNT (2019), podem ser classificados por carregamento: lento; rápido; misto tipo 1 (lento seguido de rápido); misto tipo 2 (rápido seguido de lento); e cíclico.

5.3.2 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO

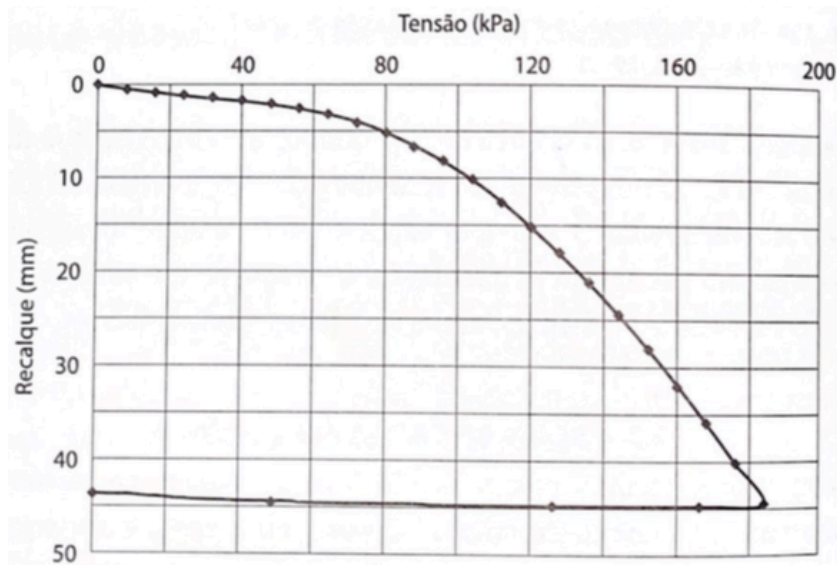
A partir do ensaio de placa realizado de acordo com as especificações já vistas, monta-se uma curva Tensão x Recalque, que pelo hábito do estudo de fundações, tem como apresentação o recalque no eixo das ordenadas, apresentado para baixo, e as tensões no eixo das abscissas, como se vê nos exemplos de curvas das figuras 8 e 9, sendo a tensões advindas do carregamento e administradas pelo macaco hidráulico, e os recalques, deslocamentos verticais para baixo, a partir de um referencial fixo e indeslocável.

Figura 8: Exemplo de curva Tensão x Recalque com ruptura visível.



Fonte: Vargas (1951)

Figura 9: Exemplo de curva Tensão x Recalque sem ruptura visível.



Fonte: Macacari (2001)

Analisando as curvas demonstradas, percebe-se que a da figura 8 possui uma nítida ruptura na tensão de 160kPa. Já a da figura 9, tem tensões crescentes com os recalques, de forma a impossibilitar a percepção gráfica da tensão de ruptura, necessitando esta ser encontrada por meio de algum critério, como o de Terzaghi, que considera o ponto de tensão no trecho final em que a curva se transforma em linha reta não vertical, nesse caso sendo 140kPa.

Após obtida a curva Tensão x Recalque, segundo Cintra *et al* (2011) calcula-se o K_s (coeficiente de recalque) de acordo com a equação 1, ajustando a curva por uma reta, sendo este o coeficiente angular da curva.

$$K_s = \frac{\sigma}{\rho} \quad (1)$$

Sendo:

σ = tensão aplicada no solo (MPa ou tf/m²); e

ρ = recalque da fundação (m).

A partir da curva, também se é possível inferir o E_s (módulo de deformabilidade do solo), a partir da Teoria da Elasticidade Linear, realizando as devidas considerações, se encontra a equação 2.

$$E_s = \frac{\sigma}{\rho_i} * B * (1 - \nu^2) * I_p \quad (2)$$

Onde:

ν = coeficiente de Poisson;

I_p = coeficiente de forma da placa rígida;

σ = tensão aplicada no solo (MPa ou tf/m²);

ρ = recalque da fundação (m);

B = diâmetro da placa rígida (m).

As unidades de recalque e do diâmetro da placa foram utilizadas em metros, afim de realizar a compatibilização de unidades.

5.3.3 CÁLCULO DE RECALQUES

Para o entendimento da mecânica dos solos, os recalques ocorrem a partir da diminuição do volume e/ou mudança da forma do maciço, e se apresentam 2 tipos distintos: os imediatos e os provenientes do adensamento. O primeiro, ocorre de maneira muito rápida, a partir de deformações a volume constante, já o outro, é típico de argilas saturadas, em que ao serem submetidas a carregamentos permanentes, lentamente tem suas pressões neutras dissipadas.

A Teoria da Elasticidade Linear é utilizada para o cálculo dos recalques até os níveis de tensão aplicados pelas fundações diretas, sendo assim, segundo Vargas (1978) possibilitando a substituição do módulo de Elasticidade pelo módulo de Deformabilidade, estimando-os de acordo com a equação 3.

$$\rho = \mu_0 * \mu_1 * \frac{\sigma * B}{E_s} \quad (3)$$

Onde:

ρ = recalque da fundação(mm);

σ = tensão aplicada ao solo (tf/m²);

B = diâmetro da placa rígida(mm);

μ_0 e μ_1 = fatores de influência do embutimento da fundação e espessura da camada de solo compressível; e

E_s = módulo de deformabilidade do solo (tf/m²).

Com isso, de acordo com Skempton e MacDonald (1951), para que danos arquitetônicos, funcionais e até estruturais à construção sejam evitados, o recalque limite a se observar é $\rho_{lim} = 65$ a 100mm para Radier.

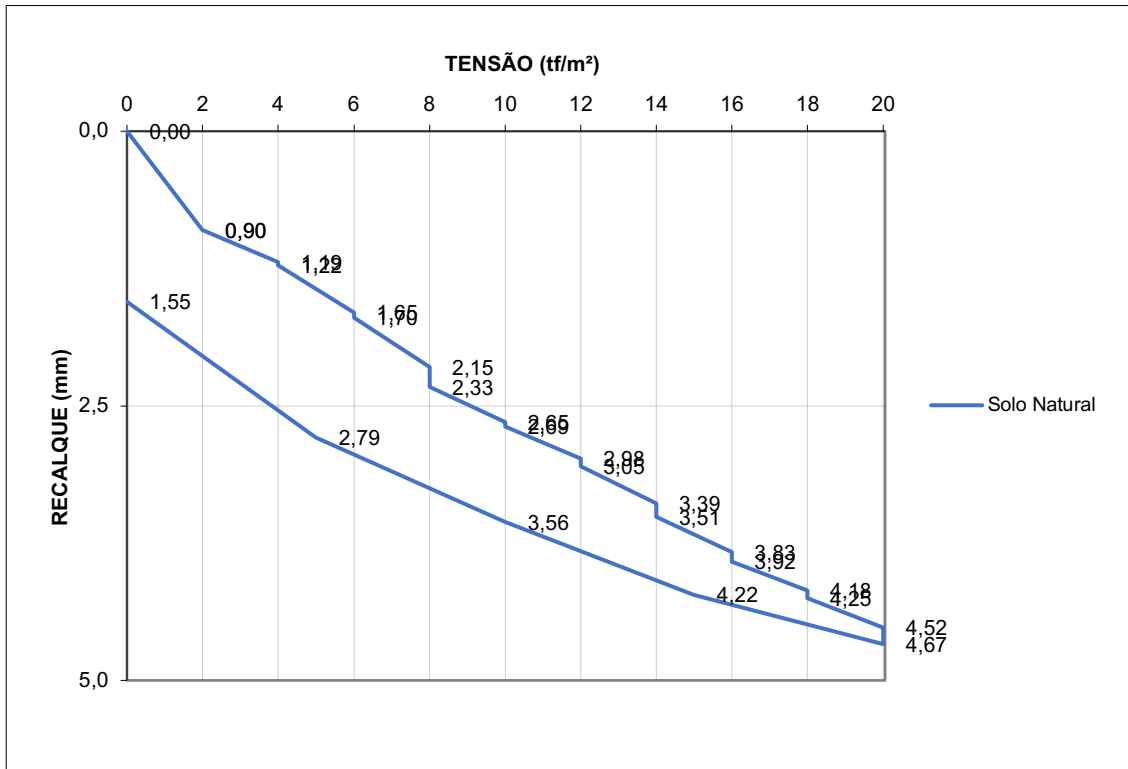
5.3.4 J. MARQUES, R. MARQUES E RAMOS (2015)

No trabalho de J. Marques, R. Marques e Ramos (2015), tem-se um empreendimento de porte similar ao em estudo neste trabalho, em que sondagens demonstraram um solo argiloso com presença de silte, sem a presença do NA e com queda na resistência nas profundidades iniciais. Dessa forma, questiona-se a viabilidade técnica da utilização da fundação direta em Radier.

Afim de obter dados quanto a deformação do solo, trazendo recursos para a tomada de decisão acerca do tipo de fundação, foram dimensionados e realizados três ensaios de placa, sendo o primeiro ensaio com o solo na umidade natural, o segundo ensaio com o solo pré-inundado e o terceiro ensaio sobre o aterro arenoso.

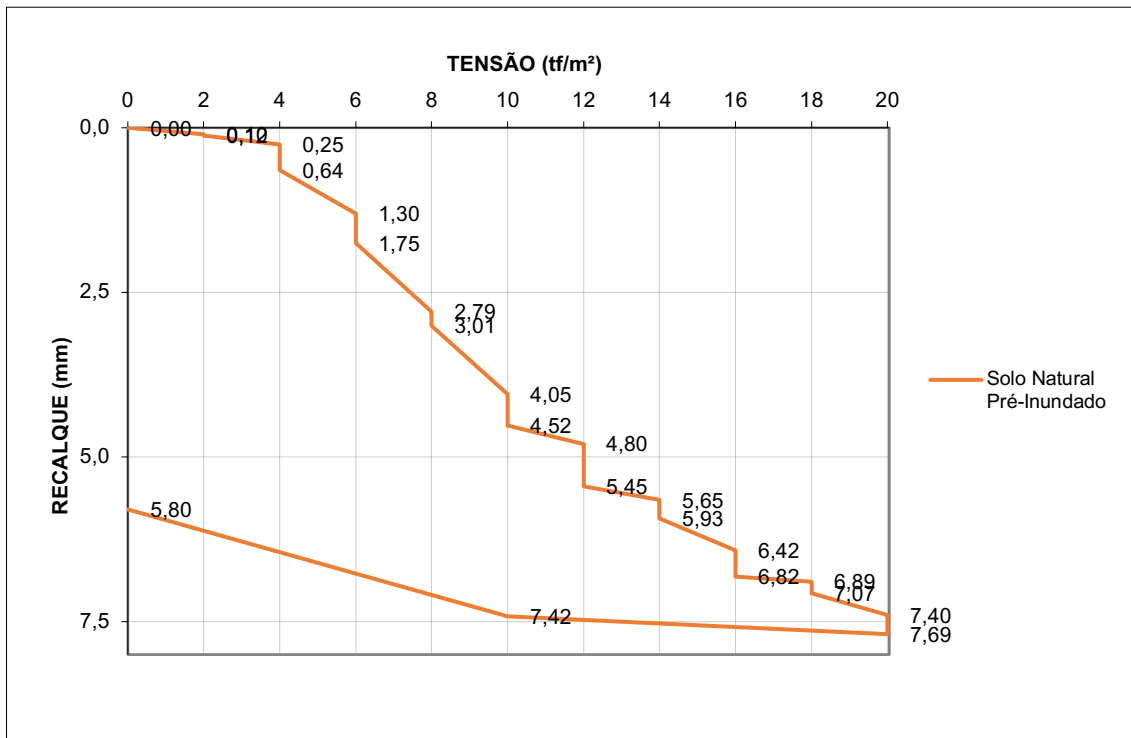
Com a realização dos ensaios, têm-se as curvas Tensões x Recalque, como se vê nas figuras 10 a 13:

Figura 10: Gráfico Tensão x Recalque para o solo natural.



Fonte: Adaptado J. Marques; R. Marques e Ramos (2015)

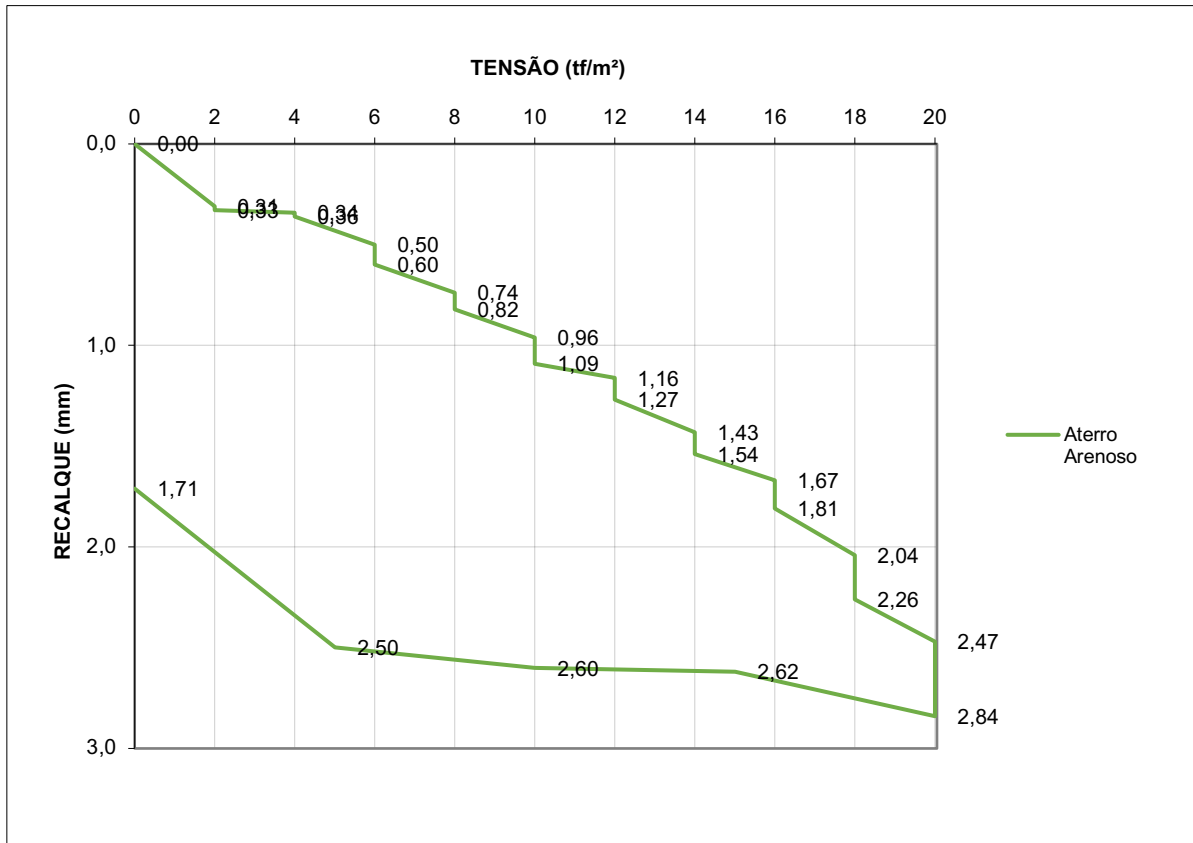
Figura 11: Gráfico Tensão x Recalque para o solo natural pré-inundado.



Fonte: Adaptado J. Marques; R. Marques e Ramos (2015)

A partir dos gráficos, tem-se que para a tensão máxima de ensaio (20tf/m²), o solo natural sem inundação prévia obteve 4,67mm de recalque, enquanto o solo natural pré-inundado, apresentou 7,69mm de deformação. Porém, ao se analisar os recalques para a tensão admissível de projeto (6tf/m²) as duas simulações obtiveram valores próximos, sendo a primeira de 1,70mm, já a segunda de 1,75mm.

Figura 12: Gráfico Tensão x Recalque para o aterro arenoso.

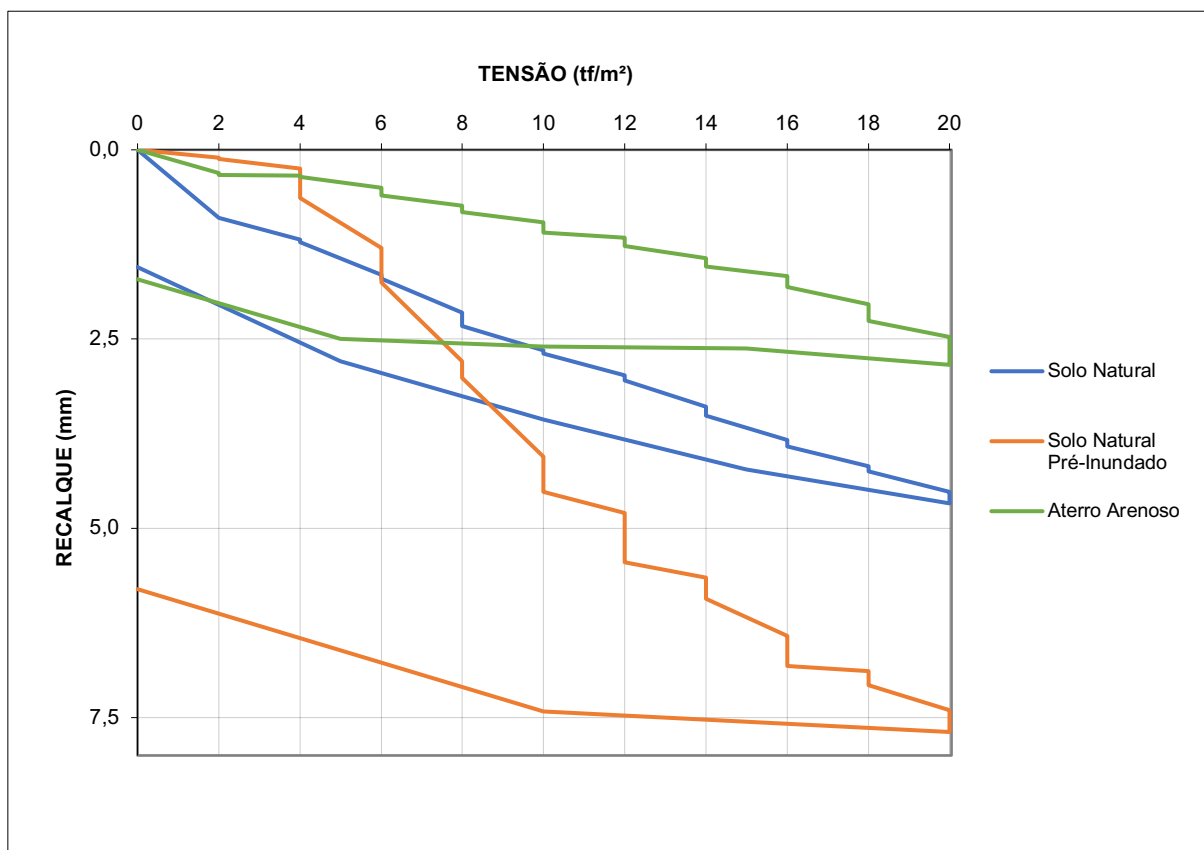


Fonte: Adaptado J. Marques; R. Marques e Ramos (2015)

A partir das figuras 7 e 8, tem-se que para a tensão máxima de ensaio (20tf/m²) o solo natural sem inundação prévia obteve 4,67mm de recalque, enquanto o solo natural pré-inundado, apresentou 7,69mm de deformação. Porém, ao se analisar os recalques para a tensão admissível de projeto (6tf/m²), as duas simulações obtiveram valores próximos, sendo a primeira de 1,70mm, já a segunda de 1,75mm.

Para o aterro arenoso (figura 12), encontra-se o menor recalque para a tensão admissível, de 0,6mm, o mesmo ocorre para a tensão máxima da simulação, em que ele obteve o valor de 2,84mm.

Figura 13: Gráfico Tensão x Recalque para o solo natural, solo natural pré-inundado e aterro arenoso.



Fonte: Adaptado J. Marques; R. Marques e Ramos (2015)

Dessa forma, realizadas as interpretações sobre o ensaio e os cálculos, afim de encontrar a estimativa de recalque total da fundação, chega-se ao valor de 17,75 mm na situação do terreno natural, e com o terreno pré-inundado obteve-se 18,38 mm. Sendo esses valores admissíveis, de acordo com o intervalo de recalques totais máximos para uma fundação direta em Radier, demonstrado por Skempton e MacDonald (1951), que é ρ_{lim} entre 65 e 100mm, viabilizando sua adoção no empreendimento.

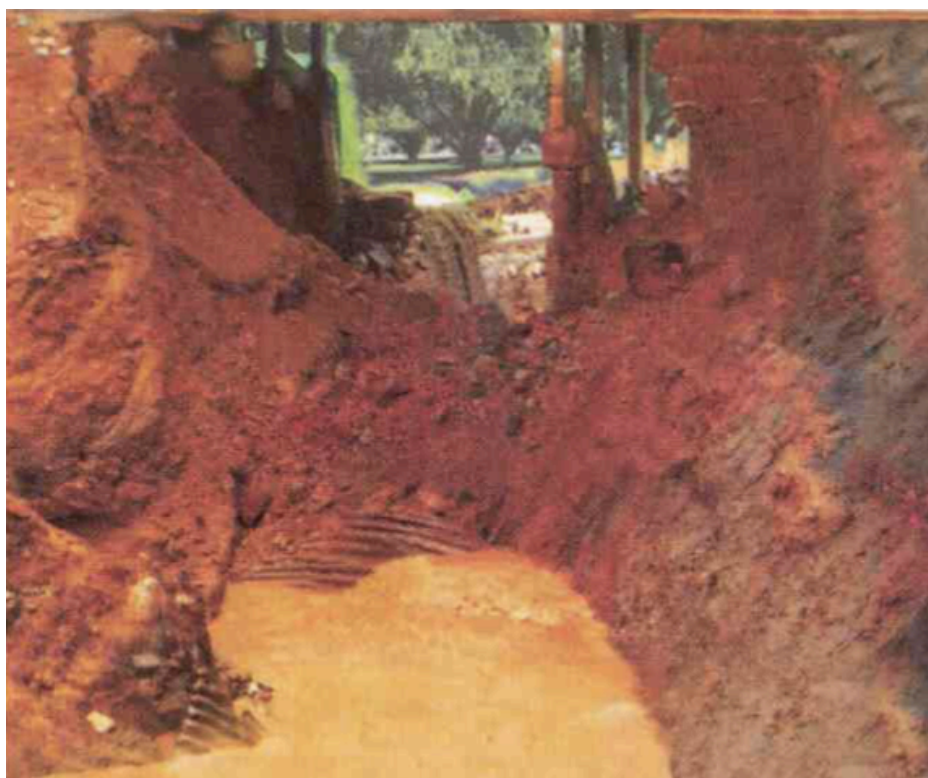
5.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS SIMULAÇÕES DE ENSAIO

Para a melhor relação entre os ensaios de placa, com a realidade do empreendimento a ser executado, deve-se dimensionar as formas de carregamento levando em consideração os conhecimentos teóricos e práticos acerca daquela região.

Deve-se levar em consideração o que se conhece no solo local, recolhido a partir de relatórios de sondagem, mas também o que Almeida (1999) conceitua como anomalia acidental, que são situações não previstas em projeto, mas que podem gerar patologias.

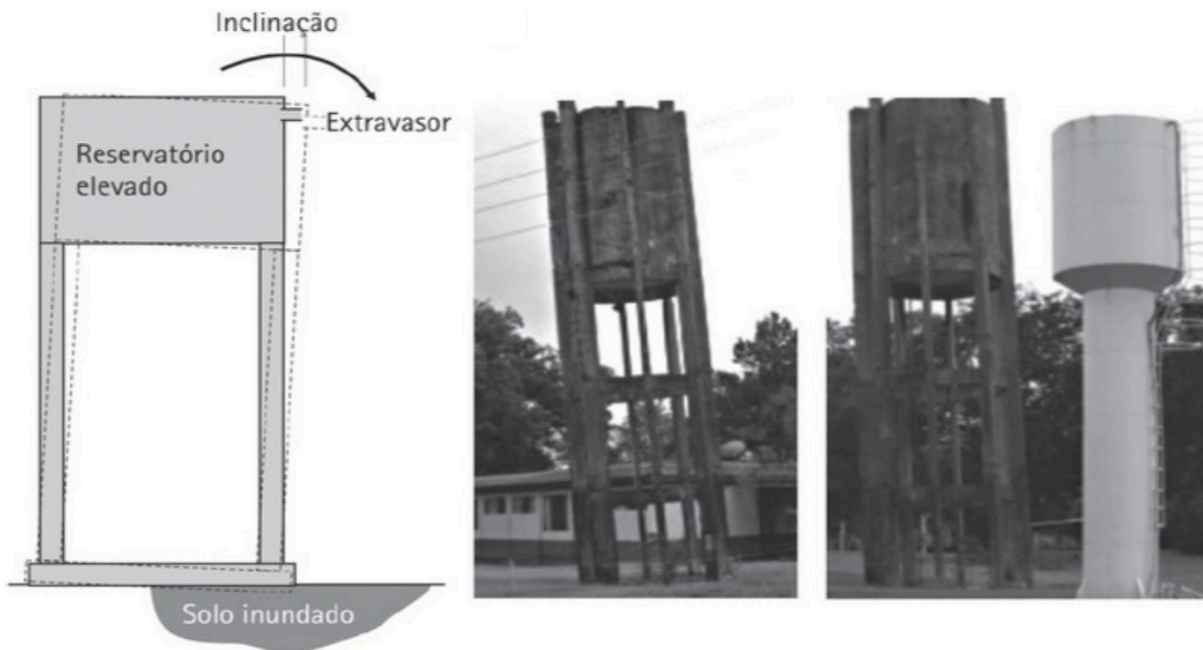
Deste modo, pode ser necessário analisar um tipo de solo de forma saturada, apesar daquele perfil não apresentar o nível de água, após análise de sondagens. Tem-se como exemplos dessa situação: rompimento de tubulações de água, derrame contínuo de água de um reservatório e falta de calhas para destinação correta de água da chuva. Esse acúmulo de água não previsto, pode provocar a saturação do solo, erodindo a sua parte mais frágil e provocando movimentações, influenciando principalmente as fundações superficiais (CARVALHO, 2010), com se percebe nas figuras 14 e 15.

Figura 14: Rompimento de canalizações enterradas, resultando na saturação e erosão do solo.



Fonte: Milititsky et al (2015)

Figura 15: Descarga de água de reservatório, saturando o solo.



Fonte: Milititsky et al (2015)

5.5 SOLO-CIMENTO

Em certas ocasiões, o projetista precisa trabalhar com um solo com baixa capacidade de suporte, tornando necessária a adoção de uma das seguintes medidas: levar em consideração as propriedades do solo como apresentado em campo; fazer a remoção deste solo, com uma substituição por outro mais adequado ao projeto; e alterar as propriedades do solo existente, afim de atender as necessidades da obra.

A técnica de melhoramento, conhecida por solo-cimento, é definido como uma mistura de solo pulverizado, cimento e água, que, sob compactação na umidade ótima, constitui um material estruturalmente resistente, estável e durável (FREIRE, 2003). Essa mistura pode ser aplicada em vários aspectos da engenharia, como em formas de tijolos e na pavimentação.

Este material reflete uma solução prática, simples e tecnológica, permitindo a redução de custos do empreendimento, uma vez que utiliza o solo preexistente e dispensando equipamentos sofisticados (TAVEIRA, 1988).

Dessa forma, investigações recentes mostram ganhos significativos de capacidade de suporte e redução de recalques, ao se introduzir uma camada de solo-cimento (FOPPA, 2016; THOMÉ

et al, 2003) viabilizando a utilização de fundações superficiais. Segundo Caballero (2019) estes ganhos estão presentes nas fundações diretas assentes em sistema de dupla camada, sendo a superior cimentada. Deste modo, essa é uma solução viável e prática, que vem sendo utilizada para garantir a segurança, de pequenas a grandes edificações, em relação a recalques excessivos.

Para o dimensionamento do traço deste solo melhorado, tem-se como parâmetro a tabela 1, que faz essa previsão, de acordo com o tipo de solo preexistente.

Tabela 1: porcentagem de cimento a adicionar em solo melhorado, de acordo com o solo preexistente.

Tipo de Solo	% de Cimento a ser adicionado
Pedra finamente britada	0,5 a 2
Pedregulho areno-argiloso bem graduado	2 a 4
Areia bem graduada	2 a 4
Areia mal graduada	4 a 6
Argila-arenosa	4 a 6
Argila-siltosa	6 a 8
Argila	8 a 15

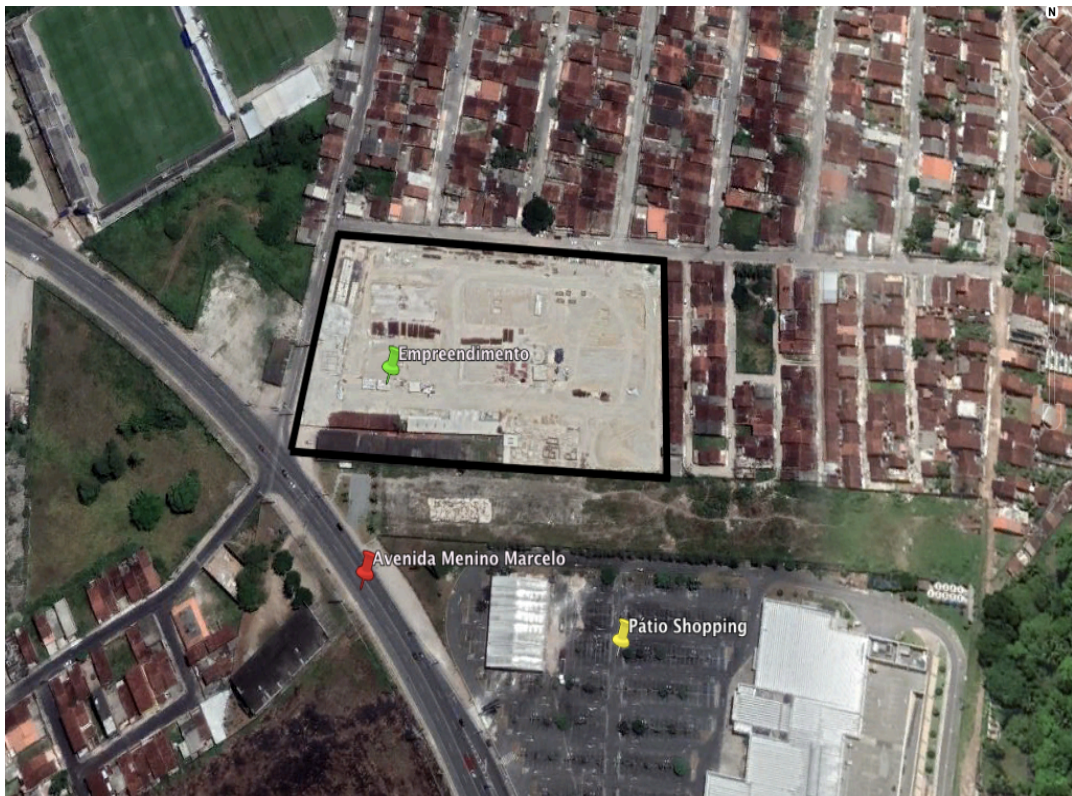
Fonte: CABALLERO, 2019

6 ESTUDO DE CASO

6.1 DESCRIÇÃO DO EMPREENDIMENTO

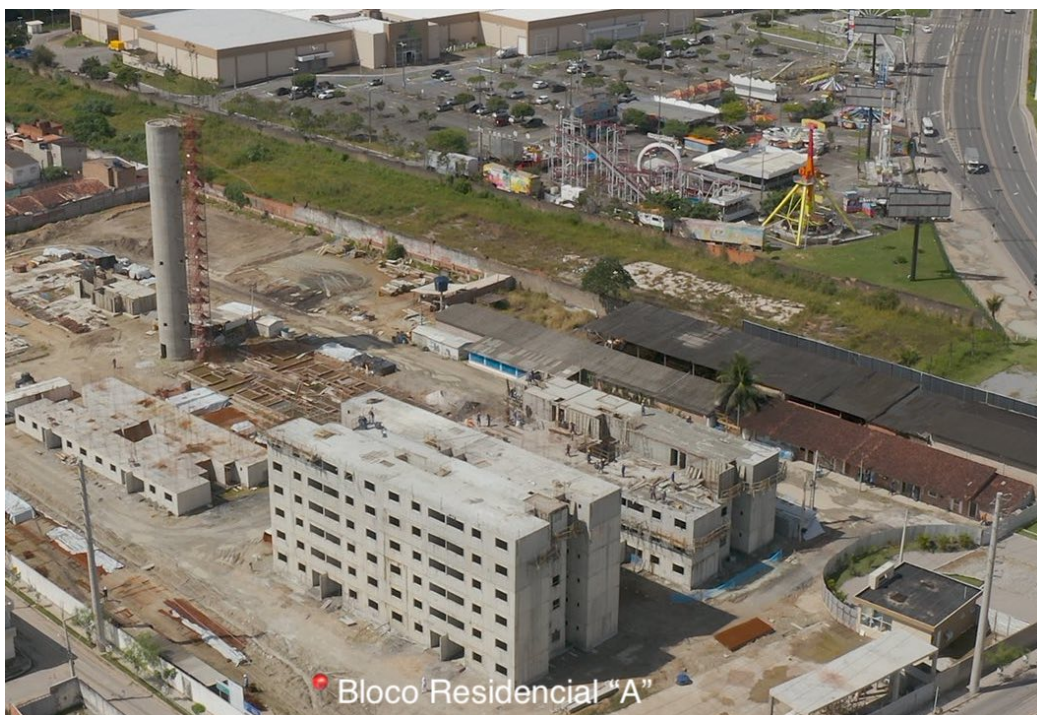
O empreendimento em estudo possui 8 blocos de apartamentos residenciais, formados por 1 pavimento térreo e 5 pavimentos tipo. Possui caráter de habitação de baixo custo, localizando-se na Rua Mangueira, no bairro Cidade Universitária, ao lado do shopping Pátio Maceió e de uma importante via de ligação da cidade, a Avenida Menino Marcelo, como se observa na figura 16.

Figura 16: Localização do empreendimento.



Fonte: Google Earth Pro (2020)

Figura 17: Construção do empreendimento com a localização do Bloco Residencial "A".



Fonte: Sanco Engenharia(2020)

6.2 MOTIVAÇÃO DOS ENSAIOS

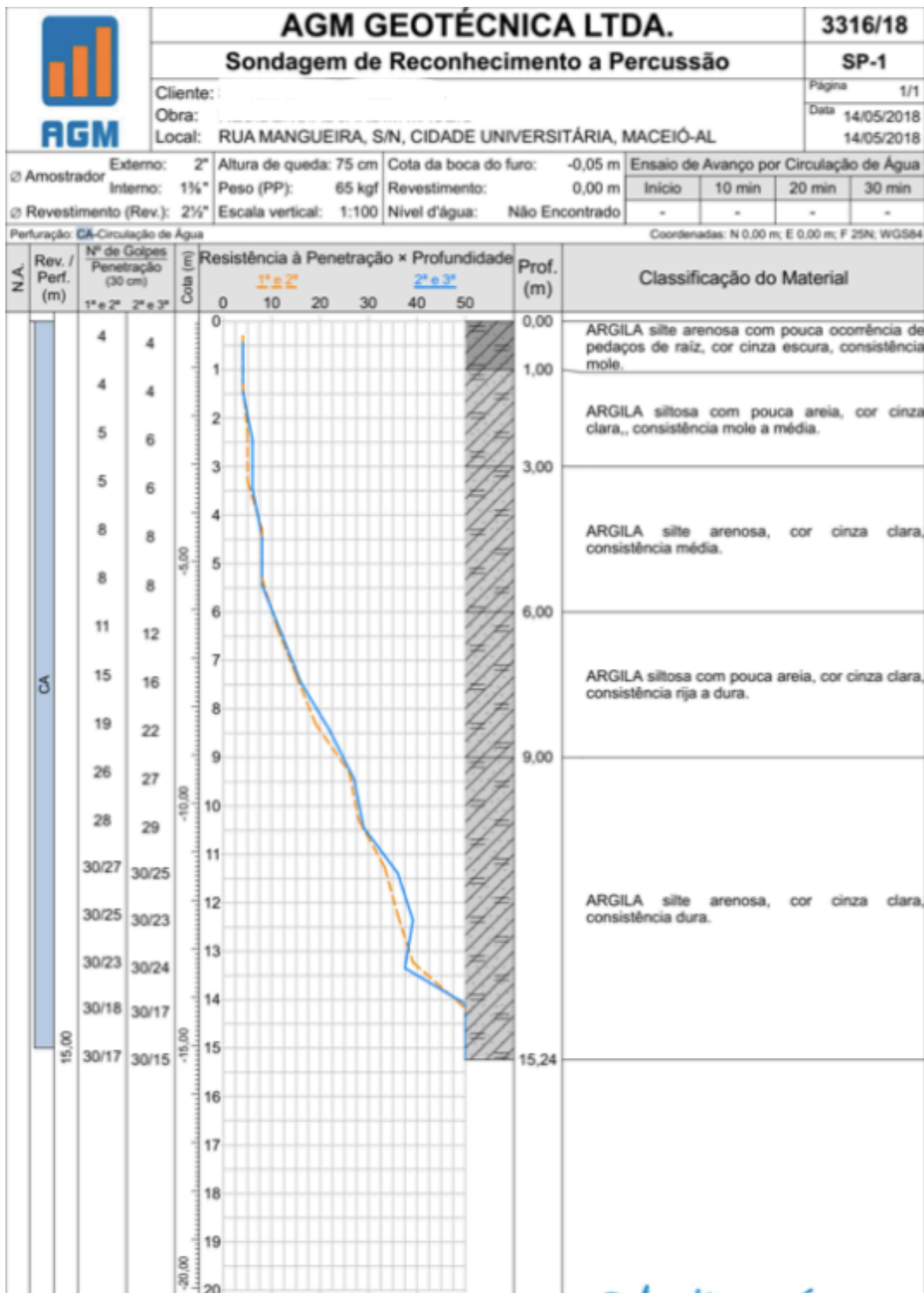
Como o empreendimento se caracteriza por uma habitação de baixo custo, percebe-se a necessidade de obter soluções construtivas que, garantindo a segurança da estrutura, viabilize também economicamente sua construção.

Dessa forma, efetuaram-se 10 furos de sondagem à percussão com SPT (*standard penetration test*) na área do empreendimento, afim de caracterizar o perfil do solo e obter parâmetros para o projetista de fundações.

Nas figuras 18 e 19, tem-se respectivamente os furos SP-01 e SP-03, próximos ao bloco residencial “A”, e que se encontram na área de abrangência do ensaio de placa em estudo. Estes perfis apresentaram camadas de argilas silto-arenosas, com SPT's de 6 e 4 golpes aos 2 metros de profundidade, respectivamente; crescendo para 11 e 12 golpes aos 6 metros e atingindo 29 e 22 golpes na profundidade de 10 metros. Abaixo deste nível, os SPT's chegam a mais de 40 golpes aos 15 metros. Além disso, não foi encontrado durante a sondagem o nível do lençol

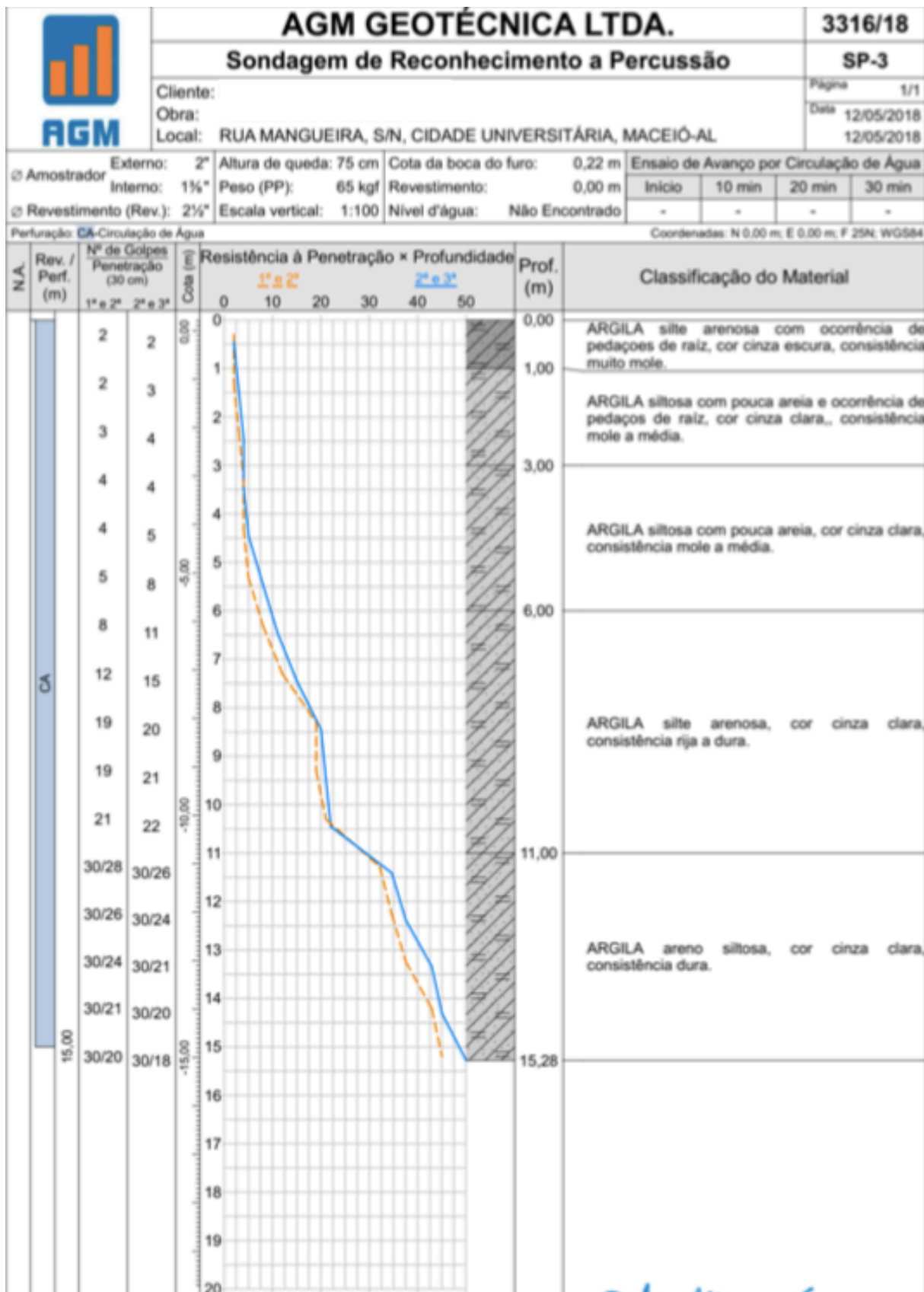
freático da região, que para a formação geológica predominante na região, a Formação Barreiras, esse nível está abaixo dos 30 metros nos tabuleiros (MARQUES, 2006).

Figura 18: Perfil de sondagem do furo SP-01.



Fonte: AGM (2020)

Figura 19: Perfil de sondagem do furo SP-03.



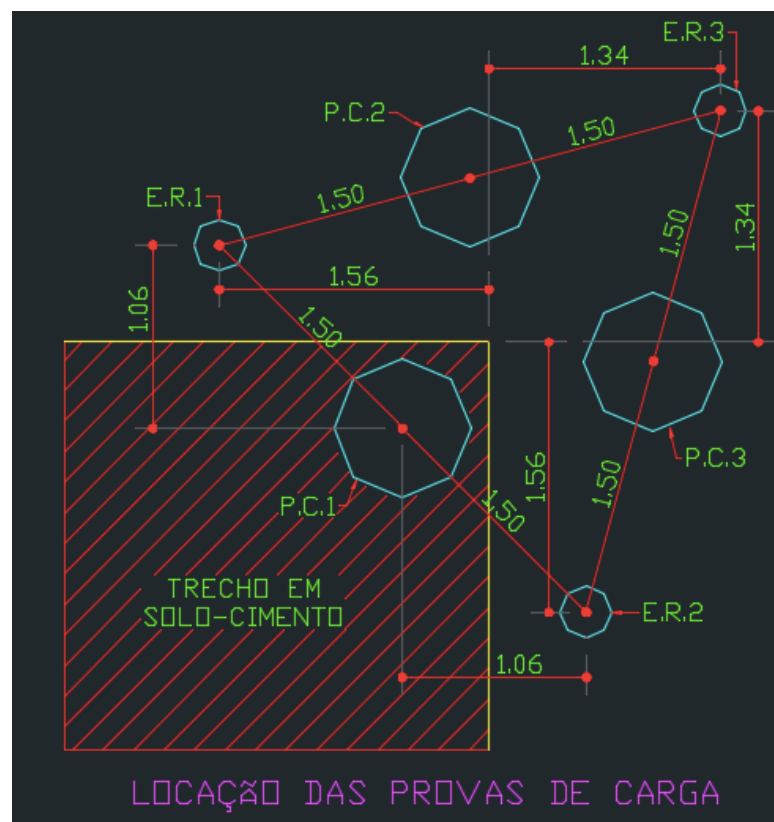
Fonte: AGM (2020)

Dessa maneira, de posse dos resultados das sondagens, percebe-se que nos primeiros metros, o solo natural possui uma baixa resistência, o que poderia inviabilizar a adoção de fundações rasas. Então, para se entender o comportamento do solo a partir de seu carregamento, foram projetados ensaios de placa, garantindo a obtenção parâmetros empíricos de resistência e deslocamento.

6.3 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Realizaram-se 3 ensaios de placa com o objetivo de realizar a medição *in situ* dos parâmetros geotécnicos. O PC-01 executado sobre a camada de solo-cimento, com inundação prévia durante 10 horas, o PC-02 realizado sobre o terreno natural, sem inundação prévia e o PC-03 feito sobre o terreno natural com inundação prévia da vala por um período de 10 horas, como se vê nas figuras 20 a 22, afim de entender como o solo se comporta em todos esses casos. Os locais de ensaio foram situados dentro da área de abrangência de 2 furos de sondagem (SP-01 e SP-03), garantindo a forma mais precisa de caracterização do solo.

Figura 20: Locação dos Ensaios de Placa



Fonte: AGM (2020)

Figura 21: Ensaio de placa PC-03, demonstrando deflectômetros para medição de deslocamentos e utilização de lonas para proteção contra intempéries.



Fonte: Autor (2020)

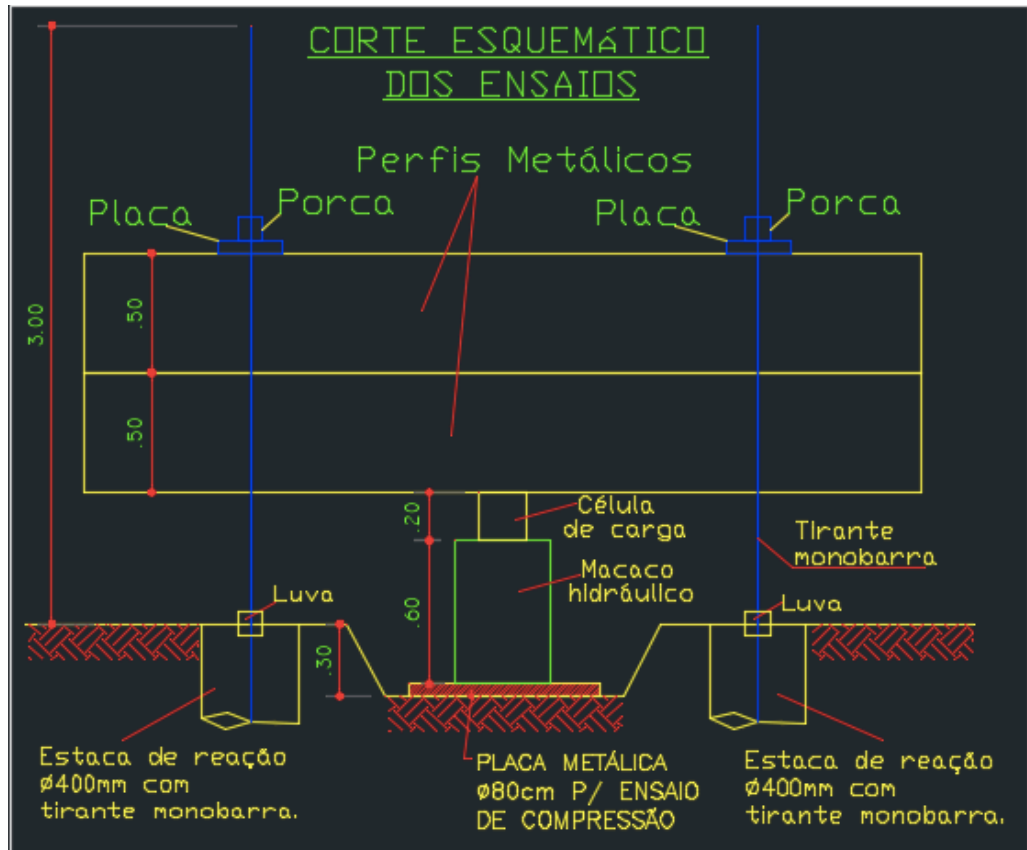
Figura 22: Escavações dos ensaios PC-01 (solo-cimento pré-inundado) e PC-02 (solo natural).



Fonte: Autor (2020)

Utilizou-se uma placa de 80cm de diâmetro, altura de escavação igual à de assentamento do Radier, de 30cm, como se vê na figura 22, macaco hidráulico para geração de carregamentos, três estacas de reação, demonstradas na figura 19 (E.R. 1, E.R. 2 e E.R. 3), com comprimento de 6m e diâmetro de 40cm, sendo cada uma delas utilizada em dois ensaios, armadas com tirante monobarra como sistema de reação, que pode ser observado na figura 23.

Figura 23: Representação esquemática dos ensaios.



Fonte: AGM (2020)

Para estimar a pressão aplicada pelo Radier ao solo, considerou-se a sobrecarga de 12kPa (1,2tf/m²) por pavimento, de acordo com os conhecimentos práticos de dimensionamento de estruturas de concreto armado, sendo então a pressão de cálculo aplicada pela superestrutura de 6 pavimentos de 72kPa (7,2tf/m²).

O tipo de carregamento escolhido foi o lento, o qual prevê que a carga de cada estágio deve ser mantida até a estabilização dos deslocamentos ou por no mínimo 30min, além de leitura imediata dos deslocamentos após a aplicação da carga (ABNT, 2019).

Neste ensaio se utilizaram 6 estágios de pressão para a fase de carregamento, como se vê na tabela 2, variando de estágio em estágio no tempo de 30 minutos, com medição de deslocamentos durante este intervalo, de acordo com a tabela 3. Já a etapa final, o descarregamento é feito em 4 estágios com suas respectivas cargas discriminadas na tabela 4, variando em cada estágio no tempo de 15 minutos, com medição de deslocamentos de acordo com a tabela 5.

Tabela 2: Estágios de carregamento do ensaio de placa do tipo lento.

ESTÁGIO	PRESSÃO APLICADA (tf/m ²)
1	4
2	8
3	12
4	16
5	20
6	24

Fonte: Autor (2021)

Tabela 3: Tempos de medição de deslocamentos para cada estágio da fase de carregamento do tipo lento.

TEMPO DE MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS (min)	2	4	8	15	30
---------------------------------------------	---	---	---	----	----

Fonte: Autor (2021)

Tabela 4: Estágios de descarregamento do ensaio de placa do tipo lento.

ESTÁGIO	PRESSÃO APLICADA (tf/m ²)
1	18
2	12
3	6
4	0

Fonte: Autor (2021)

Tabela 5: Tempos de medição de deslocamentos para cada estágio da fase de descarregamento do tipo lento.

TEMPO DE MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS (min)	2	4	8	15

Fonte: Autor (2021)

6.4 SOLO-CIMENTO

Na área onde será erguido o empreendimento, foi realizado o melhoramento dos 2 metros iniciais do solo. Este, sendo especificado para um traço de 20:1, em que para cada parte de cimento incorporada, tem-se 20 partes de solo natural, e compactação a ser realizada em camadas de 20 centímetros.

Dessa forma, buscando aumentar a capacidade de carga do solo, a partir de uma dupla camada, sendo a inicial formada pelo solo-cimento, diminuindo assim os recalques totais da edificação e viabilizando a utilização de fundações diretas.

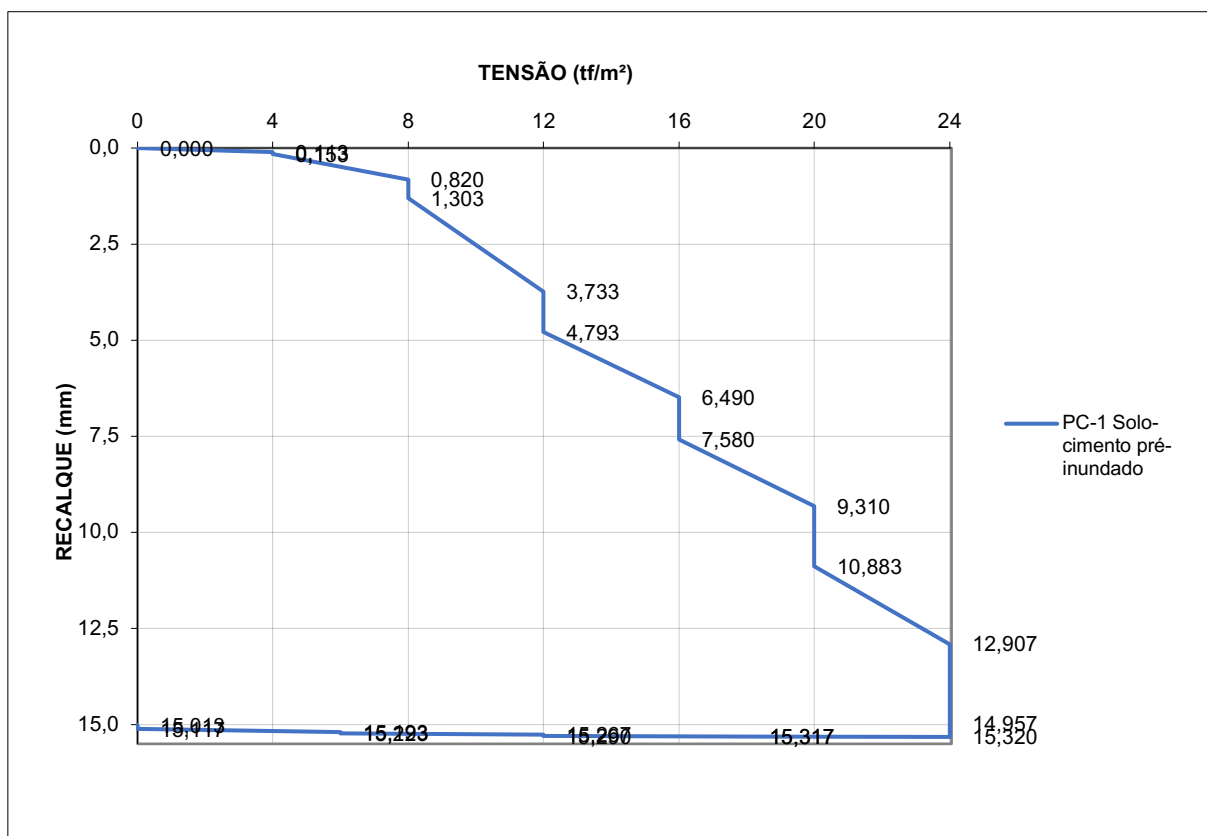
7 RESULTADOS

7.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

A partir dos três ensaios de placa efetuados no solo, tem-se como resultados gráficos Tensão x Recalque, mostrados nas figuras 24 a 27, formatados a partir dos valores dispostos no Anexo A, em que se utilizam os valores da média das leituras dos deflectômetros no início e no fim de cada estágio.

Para os cálculos das médias foram ignorados os deflectômetros que apresentaram leituras negativas de deslocamentos, uma vez que, com a compressão do solo, buscam-se valores positivos de recalques. Sendo assim, os deflectômetros 3 e 1 foram descartados nos ensaios PC-01 e PC-02, respectivamente.

Figura 24: Gráfico Tensão x Recalque do ensaio PC-01.

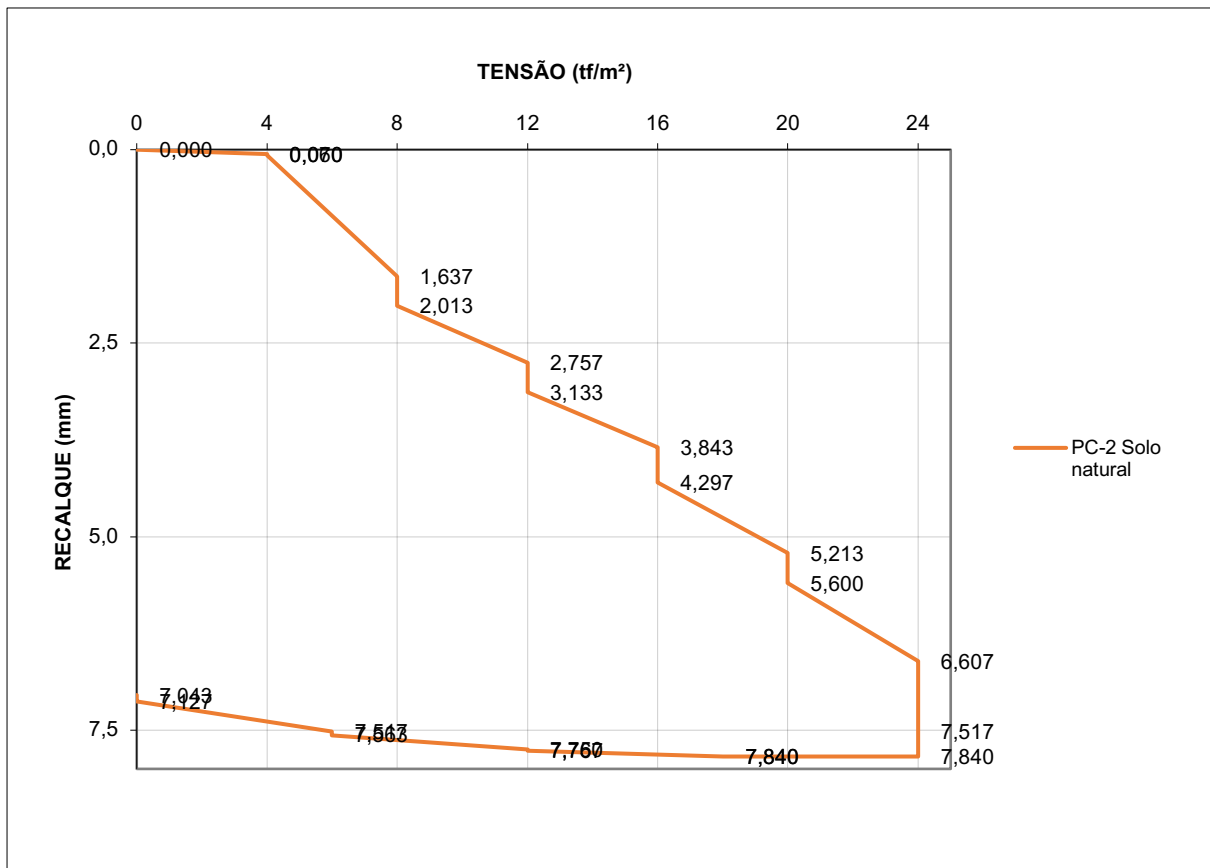


Fonte: Autor (2021)

No ensaio com o solo-cimento pré-inundado, observa-se que do 1º ao 2º estágio de carregamento o solo apresenta pouca variação de recalque, ficando em pouco mais de 1mm. Já nos estágios posteriores, ocorrem aumentos substanciais dos recalques, chegando próximo a

15mm ao final do 6º estágio. Já na fase de descarregamento, tem-se 15,32mm de recalque para seu início, chegando a 15,01mm no descarregamento total.

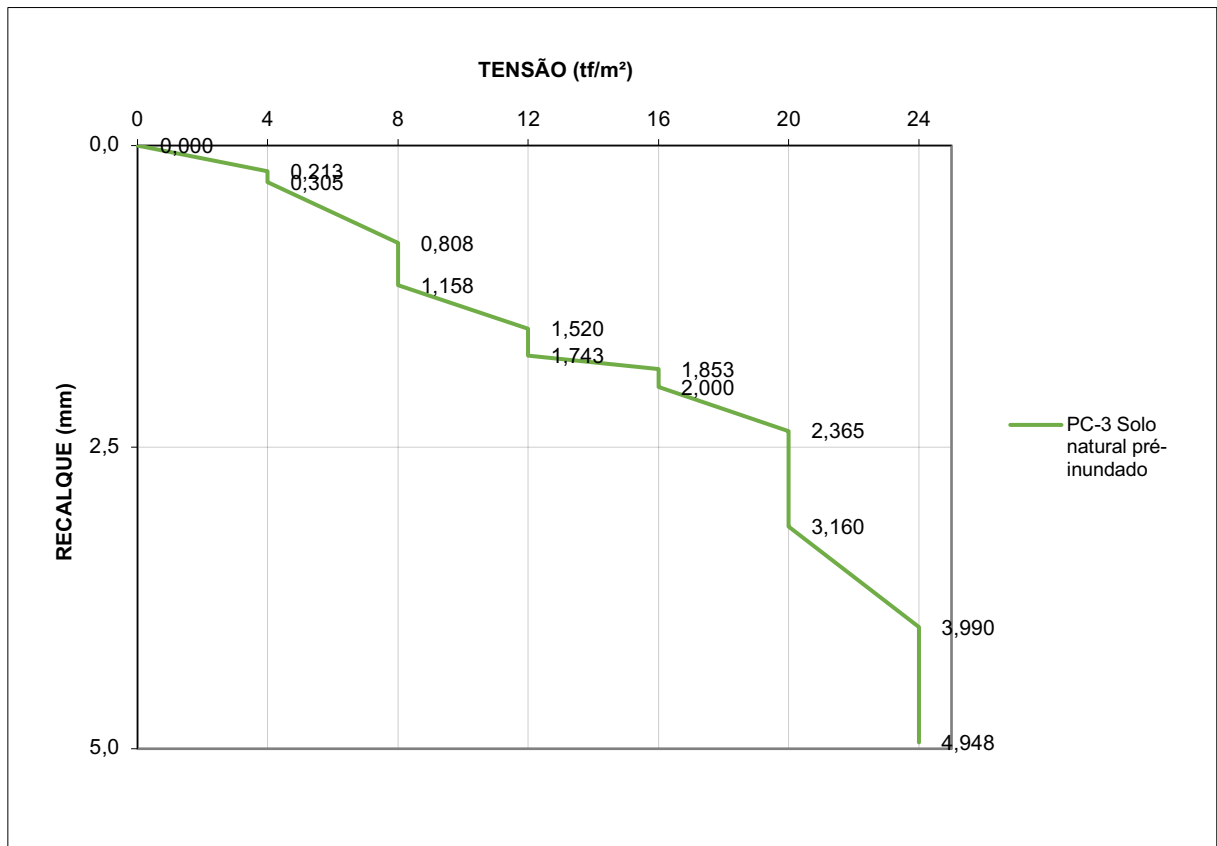
Figura 25: Gráfico Tensão x Recalque do ensaio PC-02.



Fonte: Autor (2021)

Para o solo natural, percebe-se que há uma grande diferença de recalque entre o 1º e o 2º estágios, sendo 0,07mm no primeiro e 2,01mm no segundo. Depois disso, os deslocamentos mantiveram valores, variando entre 1,12mm a 1,91mm a cada estágio, finalizando o carregamento com 7,51mm de recalque. Para a fase de descarregamentos, encontra-se 7,84mm em seu início, diminuindo a cada estágio e finalizando com 7,04mm.

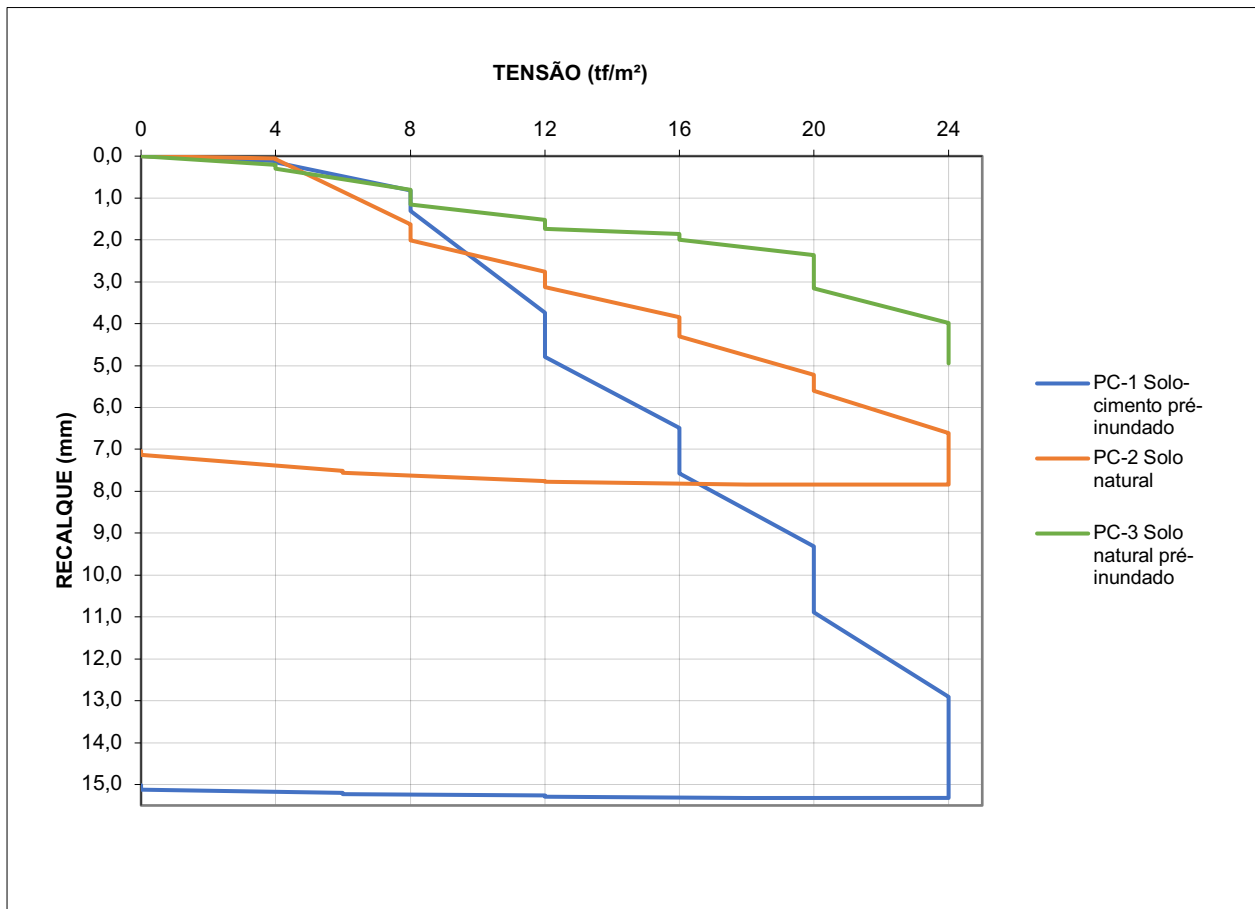
Figura 26: Gráfico Tensão x Recalque do ensaio PC-03.



Fonte: Autor (2021)

Já o PC-03, por sua vez, apesar da inundação prévia, obteve para o 6º estágio de carregamento 4,95mm de recalque, sendo este valor 33% menor que o ensaio realizado sem a presença de água. Neste ensaio, percebe-se que a fase de descarregamento não foi realizada, uma vez que intempéries desestabilizaram as vigas de referência, impossibilitando as leituras dos deflectômetros. No entanto, esta perda não impossibilitou os cálculos de recalque para este trabalho, uma vez que a pressão admissível trabalhada está entre o 2º e 3º estágios de carregamento.

Figura 27: Gráficos Tensão x Recalque dos ensaios PC-01, PC-02 e PC-03.



Fonte: Autor (2021)

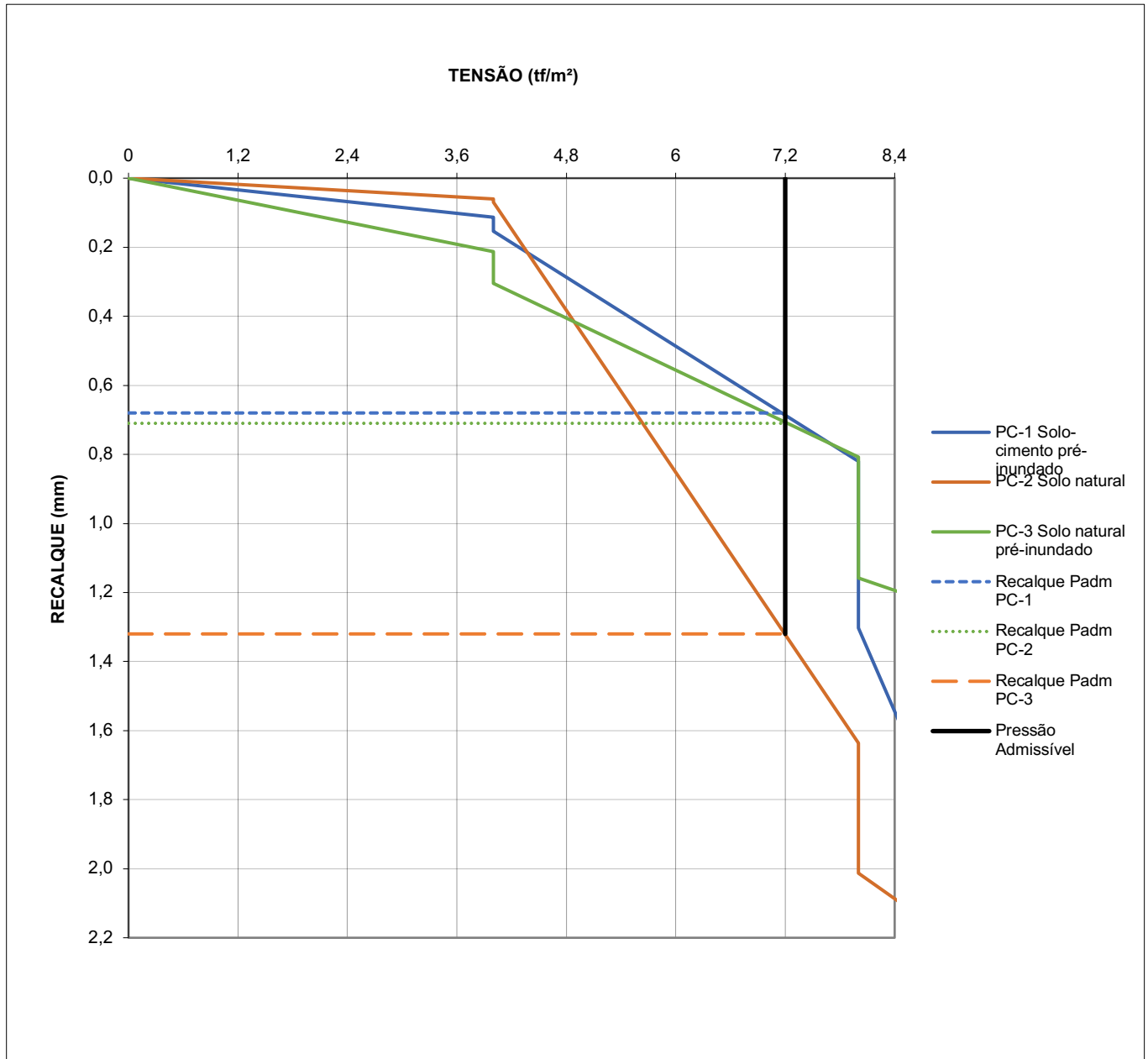
De posse destes dados, percebe-se que as três curvas em questão apresentam um comportamento semelhante até o segundo estágio de carregamento ($p=8 \text{ tf/m}^2$), com diferenças de recalques menores que 1mm, sendo o do PC-01 de 1,3mm, no PC-02 de 2,01mm e no PC-03 com 1,16mm. Deste modo, para o nível de tensão que o Radier estará submetido ($P_{adm}=7,2 \text{ tf/m}^2$), os valores de deformação do terreno encontrados para as condições de solo ensaiadas são próximos, como se vê na figura 28.

7.2 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

A partir dos ensaios realizados e dos gráficos encontrados, é possível calcular os recalques elásticos da fundação, mas para isso, deve-se encontrar primeiramente o módulo de deformabilidade do solo.

Assim, analisa-se o trecho inicial da curva Tensão x Recalque até a pressão admissível de projeto ($p=7,2 \text{ tf/m}^2$), de forma a encontrar o coeficiente de recalque (K_s), de acordo com a equação 1, utilizando os pontos mostrados na figura 28.

Figura 28: Pontos para cálculo do K_s nas curvas dos PC-01, PC-02 e PC-03.



Fonte: Autor (2021)

Disso, tem-se que o recalque das curvas PC-01, PC-02 e PC-03, para a pressão admissível de 7,2 tf/m^2 , podem ser aproximados para 0,68mm, 1,32mm e 0,71mm, respectivamente. Então, calculam-se os coeficientes de recalque, a partir da equação 1, para as situações K_{sc} (solo natural pré-inundado), K_s (solo natural) e K_{si} (solo natural pré-inundado):

$$Ks = \frac{\sigma}{\rho} \quad (1)$$

$$K_{sc} = \frac{7,2}{0,68 \times 10^{-3}} = 10.588,23 \left(\frac{\text{tf}}{\text{m}^2}\right)$$

$$K_s = \frac{7,2}{1,32 \times 10^{-3}} = 5.454,54 \left(\frac{\text{tf}}{\text{m}^2}\right)$$

$$K_{si} = \frac{7,2}{0,71 \times 10^{-3}} = 10.140,84 \left(\frac{\text{tf}}{\text{m}^2}\right)$$

Para efetuar o cálculo do módulo de deformabilidade das camadas de solo, a partir da equação 2, encontram-se os valores do coeficiente de forma da placa rígida (I_p) na tabela 6 e do coeficiente de Poisson na tabela 7.

Tabela 6: Valores do coeficiente de forma da placa rígida (I_p)

FLEXÍVEL				RÍGIDA
Forma	Centro	Canto	Médio	
Circular	1	0,64	0,85	0,79
Quadrada	1,12	0,56	0,95	0,99
L/B=1,5	1,36	0,67	1,15	-
2	1,52	0,76	1,3	-
3	1,78	0,88	1,52	-
5	2,1	1,05	1,83	-
10	2,53	1,26	2,25	-
100	4	2	3,7	-

Fonte: Velloso e Lopes (2014)

Tabela 7: Valores do coeficiente de Poisson, para cada tipo de solo.

Solo	ν
Areia pouco compacta	0,2
Areia compacta	0,4
Silte	0,3 – 0,5
Argila saturada	0,4 – 0,5
Argila não saturada	0,1 – 0,3

Fonte: Teixeira e Godoy (1996)

Com isso, sabendo tratar-se de uma placa rígida circular, tem-se que $I_p=0,79$, já o coeficiente de Poisson, por se tratar se uma argila saturada, no caso dos PC-01 e PC-03 (pré-inundados), e uma argila não saturada, no caso do PC-02, decidiu-se trabalhar com o valor de $\nu = 0,35$, para o diâmetro da placa rígida utilizada, tem-se $B=0,80\text{m}$. Com essas considerações, calcula-se uma equação para o modulo de deformabilidade do solo.

$$Es = \frac{\sigma}{\rho i} * B * (1 - \nu^2) * Ip \quad (2)$$

$$Es = \frac{\sigma}{\rho i} * 0,8 * (1 - 0,35^2) * 0,79$$

$$Es = 0,5546 * Ks \quad (4)$$

Sendo assim, encontra-se para cada situação, sendo E_{sc} (solo-cimento pré-inundado), E_s (solo natural) e E_{si} (solo natural pré-inundado):

$$E_{sc} = 0,5546 \times 10.588,23 = 5.872,23 \text{ tf/m}^2$$

$$E_s = 0,5546 \times 5.454,54 = 3.025,09 \text{ tf/m}^2$$

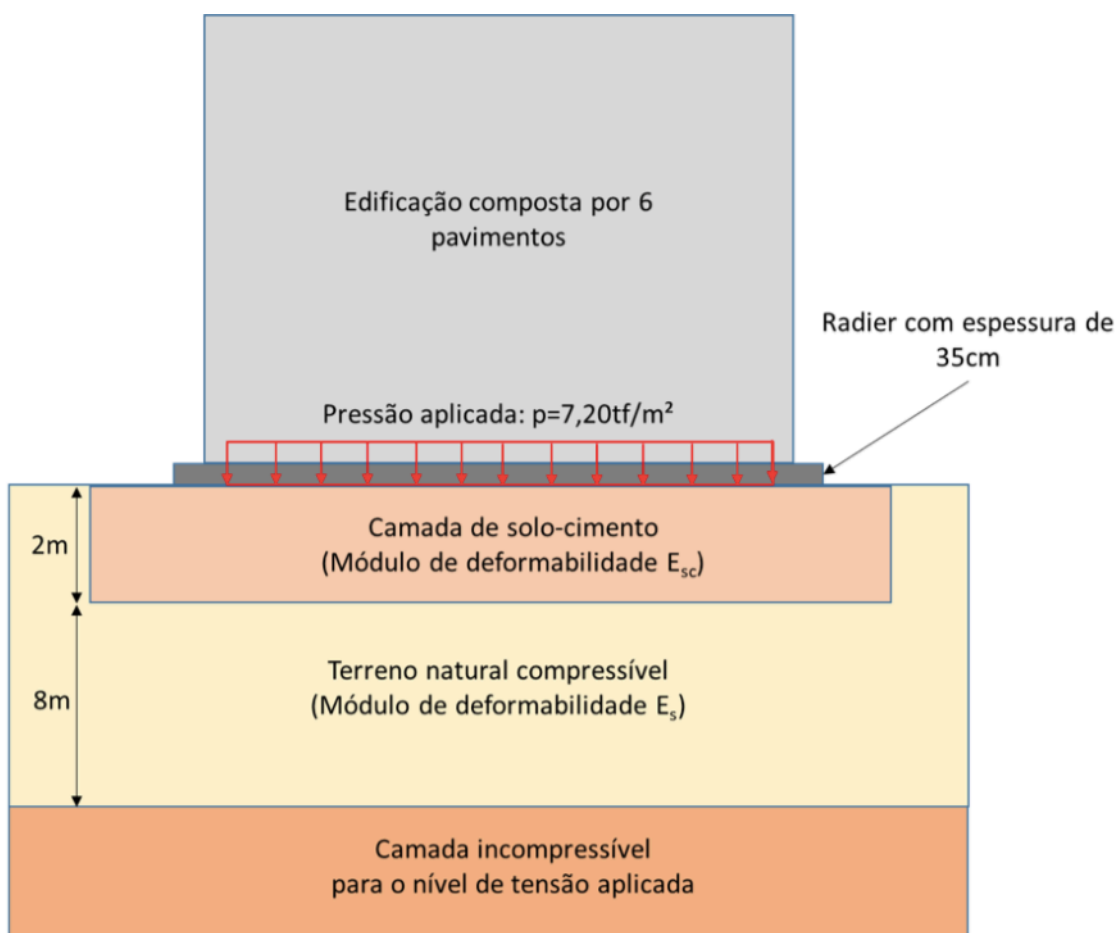
$$E_{si} = 0,5546 \times 10.140,84 = 5.624,11 \text{ tf/m}^2$$

7.3 CÁLCULOS DOS RECALQUES

De posse dos parâmetros de deformabilidade das camadas de solo natural e de solo-cimento, estimam-se os recalques a partir da Teoria da Elasticidade, de acordo com a equação 3.

Afim de encontrar o resultado mais real possível, foi considerado um perfil estratigráfico do terreno em questão, levando em consideração os furos de sondagem previamente apresentados (SP-01 e SP-03) e incluindo a camada de solo-cimento, a ser realizada nos 2 metros iniciais abaixo do Radier.

Figura 29: Perfil estratigráfico do terreno ensaiado.



Fonte: AGM (2020)

Conforme apresentado figura 28, consideram-se duas camadas de interesse, onde haverá recalques, e também uma camada indeslocável, em que os recalques não atuarão:

- Camada de solo-cimento: é a primeira camada, vai da cota de apoio do Radier até 2m de profundidade. Seu módulo de deformabilidade é $E_{sc}=5.872,23 \text{ tf/m}^2$ (58,72MPa)
- Camada de solo natural: é a segunda camada, que tem 8m de espessura, indo da cota 2m até 10m, sendo composto por uma argila silte-arenosa. Seu módulo de deformabilidade adotado é $E_s=3.025,09 \text{ tf/m}^2$ (30,25MPa), que corresponde ao solo natural sem inundação prévia, uma vez que este obteve os maiores recalques para a tensão admissível estudada.
- Camada indeslocável: é a terceira e última camada, constituída por SPT's maiores que 20 golpes, como se vê nas sondagens realizadas (figuras 12 e 13), sendo considerada incompressível para o nível de tensões aplicadas pelo Radier.

De forma conservadora, adotou-se que a pressão aplicada pelo Radier se mantivesse constante ao longo da profundidade, tanto na camada de solo-cimento quanto no solo natural abaixo desta. Com isso, foi calculado um único módulo de deformabilidade médio solo (E_m), representativo para os dois materiais por meio da média ponderada:

$$E_m = \frac{E_{sc} \times 2m + E_s \times 8m}{10m} \quad (5)$$

Com o perfil estratigráfico do solo e os valores dos módulos de deformabilidade, encontra-se o E_m :

$$E_m = \frac{5.872,23 \times 2 + 3.025,09 \times 8}{10} = 3.594,52 \text{ tf/m}^2$$

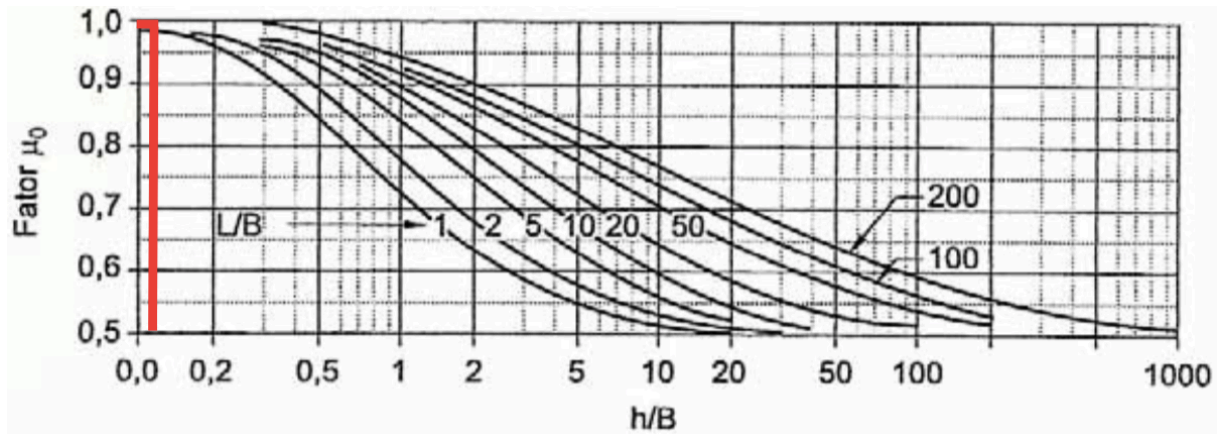
As dimensões da laje do Radier são $B=16,20\text{m}$ e $L=36,30\text{m}$ e os fatores empíricos de influência do embutimento da fundação (μ_0) e da espessura da camada de solo compressível (μ_1) foram encontrados a partir da tabela 8 e figuras 31 e 32, e considerados os valores de 1,0 e 0,35, respectivamente.

Tabela 8: Valores para encontrar fatores μ_0 e μ_1 .

Dimensões	
L (m)	36,3
B (m)	16,2
h (m)	0,3
H (m)	10
<hr/>	
L/B	2,241
H/B	0,617
h/B	0,019

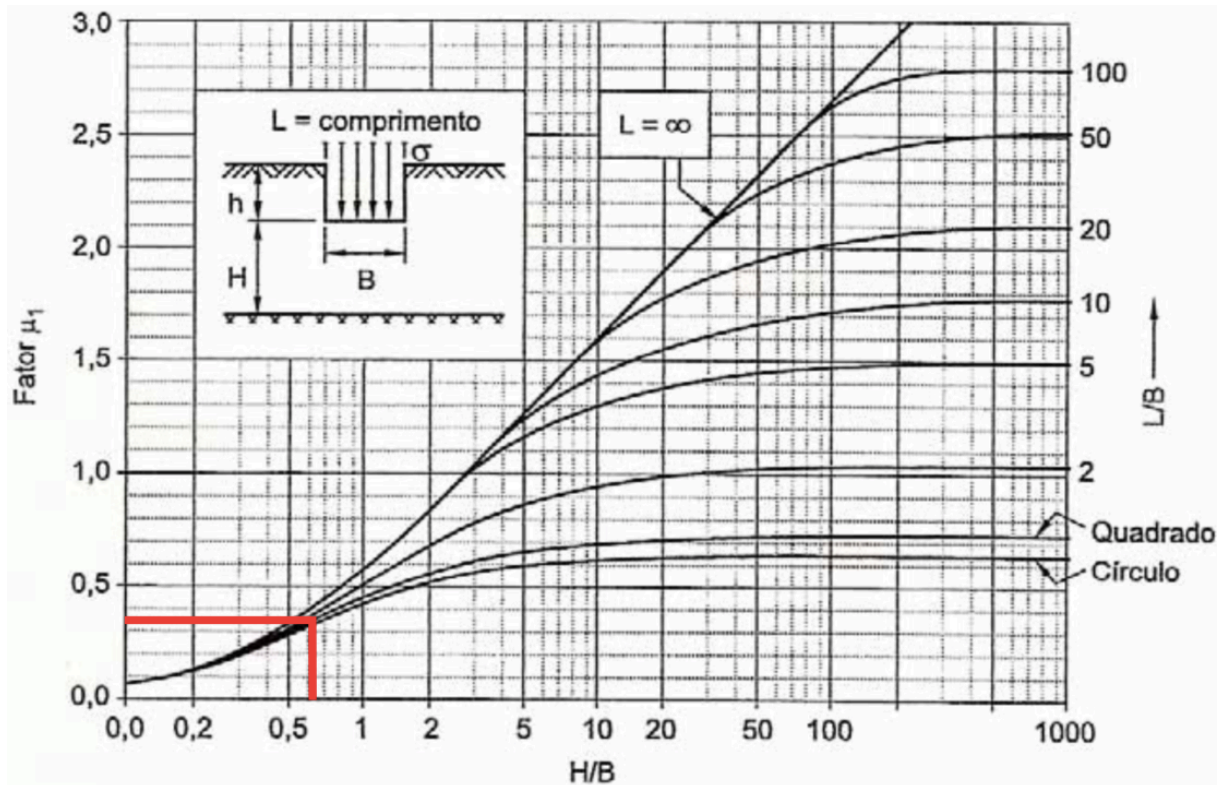
Fonte: Autor (2021)

Figura 30: Fator μ_0 para o cálculo de recalques imediatos de fundação superficial flexível em camada de argila finita.



Fonte: Cintra *et al* (2003)

Figura 31: Fator μ_1 para o cálculo de recalques imediatos de fundação superficial flexível em camada de argila finita.



Fonte: Cintra *et al* (2003)

Assim, pôde-se estimar o recalque total da fundação em Radier a partir da equação 3:

$$\rho = \mu_0 * \mu_1 * \frac{\sigma * B}{E_s} \quad (3)$$

$$\rho = 1 \times 0,35 \times \frac{7,2 \times 16200}{3.594,52} = 11,36mm$$

O valor encontrado para o recalque total é satisfatório, uma vez que comparado aos limites recomendados por Skempton & MacDonald (1951), que é ρ_{lim} entre 65 e 100mm. Dessa forma, as fundações projetadas atendem aos critérios geotécnicos de desempenho, evitando danos à edificação.

8 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados encontrados, tem-se que a utilização de uma dupla camada de solo, sendo esta primeira de um solo-cimento com espessura de 2 metros, a segunda de solo natural entre a profundidade de 2 a 10 metros, é eficiente e segura para o tipo de terreno e de carregamentos dispostos no empreendimento em estudo, com a utilização de uma fundação em Radier.

Os três ensaios de placa (PC-01, PC-02 e PC-03) executados próximos ao Bloco Residencial A, após terem suas curvas Tensão X Recalque elaboradas e interpretadas, mostraram que as três simulações estudadas (solo-cimento pré-inundado, solo natural e solo natural pré-inundado), apresentam recalques admissíveis para as pressões aplicadas pelo Radier. Dessa forma, encontrando-se o valor de 11,36mm para o recalque total da fundação, que é perfeitamente aceitável e seguro para este tipo de edificação.

Como resultado disso, admite-se que as análises feitas a partir deste trabalho próximas ao Bloco Residencial A, podem ser extrapoladas para os outros 7 Blocos Residenciais existentes no empreendimento, devido a uniformidade dos perfis de sondagem SPT executados na área a ser construída.

Por fim, apresentam-se algumas sugestões para trabalhos futuros com o intuito de abordar as limitações presentes no trabalho em questão:

- Realização estudos para se entender a diminuição de recalque do solo natural, quando realizada a sua inundação prévia.
- Realização de ensaios com o solo-cimento em seu estado natural, para analisar se o comportamento dos recalques será similar ao solo natural.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P. J. R.; GARCIA, J. R. **Engenharia de Fundações**. 1 ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2020. p 3-6, 74-77.

ALMEIDA, D. F. **Patologia, Terapia e Profilaxia nas Edificações de Concreto – parte 1**. Qualidade na Construção, São Paulo, ano II, n. 14, p. 33-38, men. 1999.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6489: Solo – Prova de carga estática em fundação direta**. Rio de Janeiro, 2019.

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

CABALLERO, R. D. **Desenvolvimento de uma Metodologia de Projeto de Fundações Superficiais Circulares Assentes Sobre Camada de Solo-Cimento**. 2019

CARVALHO, D. M. C. **Patologias das Fundações: Fundações em Depósitos de Vertente na Cidade de Machico**. Dissertação. Universidade da Madeira, 2010.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Tensão Admissível em Fundações Diretas**. 1 ed. São Carlos: Rima Editora, 2003.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações Diretas: Projeto Geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. cap. 2 e 3.

FOPPA, D. **Novo Método Para Cálculo da Capacidade de Carga de Fundações Superficiais Assentes sobre Camada de Reforço em Solo-Cimento**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

FORMIGONI, D. D. P. **Análise Comparativa do Desempenho de Fundação Rasa do tipo Radier com Fundação Rasa de Sapatas Isoladas**. Trabalho de conclusão de curso - UTFP. Curitiba, 2009.

FREIRE, W. J., BERALDO, A. L. **Tecnologia e Materiais Alternativos de Construção**. Unicamp, Campinas – SP, 2003. p.27-54.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE divulgou censo realizado e estratificado por bairro em Maceió**. 2010. <http://www.bairrosdemaceio.net/noticias/ibge-divulgou-censo-realizado-e-estratificado-por-bairro-em-maceio>. Acesso em: abril de 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama da Cidade de Maceió – Alagoas**. 2020. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/maceio/panorama>. Acesso em: abril de 2021.

KOLLING, E. M; TROGELLO, E; MODOLO, A. J. **Avaliação da resistência mecânica de diferentes traços de solo-cimento estabilizados com areia**. 2012

MACACARI, M. F. **Variação da Capacidade de Carga com a Sucção e Profundidade em Ensaio de Placa em Solo Colapsível**. Dissertação. São Carlos: USP, 2001.

MARQUES, R. F. **Estudo da capacidade de carga de estacas escavadas com bulbos, executadas em solo não saturado da Formação Barreiras da cidade de Maceió - AL**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE. 2006.

MARQUES, J. A. F; MARQUES, R. F; RAMOS, D. L. **Plate-Load-Tests on Soil from the Barreiras Formation in Maceió-AL – Case Study**. Maceió, 2015.

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F. **Patologia das Fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

NETO, A. D. F. N.; VARGAS, M.; SAYÃO, A. S. F. J.; DANZIGER, B. R.; NUNES, A. L. L. S.; BARATA, F. E. **Fundações: Teoria e Prática**. 3 ed. São Paulo: 2019. cap. 1.

RIBEIRO, F. R. C.; MONTEIRO, L. M. S.; LIMA, C. J. F.; SILVA, M. S.; PARENTE, L. M.; MODOLO, R. C. E. **Utilização de Radier em Residências Populares: Estudo de Caso**. CBPAT, Fortaleza. 2020

SANTOS, M. V. S.; RAMOS, P. V. B.; JÚNIOR, W. R. A.; TEIXEIRA, A. L.; GOES, J. R. A. **Utilização da Fundação do Tipo Radier**. Sergipe: IFS, 2016.

SCHNEIDER, N. **Fundação Radier: O que é? Projeto e Execução.** 2020. <https://nelsoschneider.com.br/fundacao-radier/>. Acesso em: abril de 2021.

ZANCKO SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS. **Concretagem do Radier.** https://fotos.habitissimo.com.br/foto/concretagem-do-radier_1303355. Acesso em: agosto de 2021.

SKEMPTON, A. W. **The bearing capacity of clays.** In: BUILDING RESEARCH CONGRESS, 1951, London. Proceedings... London, 1951. p. 180-189.

TAVEIRA, E. S. N. **O solo-cimento no campo e na cidade: Construir, morar, habitar.** UNIOESTE – Cascavel. (1988).

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. **Análise, projeto e execução de fundações rasas.** In: HACHICH, W. et al (ed.) **Fundações: teoria e prática.** São Paulo. 1996.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics.** New York: John Wiley & Sons, 1943.

THOMÉ, A. et al. **Análise e Proposta de Método de Dimensionamento de Fundações Superficiais Apoiadas em Sistema de Dupla Camada. Solos e Rochas.** Revista Latino-Americana de Geotecnia, v. 2, n. 26, p. 141–163, 2003.

VARGAS, M. **Fundação Sobre Aterro Compactado.** Boletim da repartição de Águas e Esgotos, ERA, ano 13, junho, 1951.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações.** Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2004

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações Volume 1: Critérios de Projeto – Investigação do subsolo – Fundações superficiais.** 2 ed, São Paulo, 2014: Oficina de textos.

VITALI, O. P. M. **Efeito da Composição de Misturas de Solo-Cimento nos Parâmetros de Rigidez e de Resistência.** Dissertação. Porto: FEUP, 2008.

ANEXO A

ETAPA DE CARREGAMENTO					
ESTÁGIO	PRESSÃO (tf/m ²)	INTERVALO DE TEMPO (min)	MÉDIA DAS LEITURAS (mm)		
			PC-01	PC-02	PC-03
1	4	2	0,113	0,060	0,213
		30	0,153	0,070	0,305
2	8	2	0,820	1,637	0,808
		30	1,303	2,013	1,158
3	12	2	3,733	2,757	1,520
		30	4,793	3,133	1,743
4	16	2	6,490	3,843	1,853
		30	7,580	4,297	2,000
5	20	2	9,310	5,213	2,365
		30	10,883	5,600	3,160
6	24	2	12,907	6,607	3,990
		30	14,957	7,517	4,948
ETAPA DE DESCARREGAMENTO					
ESTÁGIO	PRESSÃO (tf/m ²)	INTERVALO DE TEMPO (min)	MÉDIA DAS LEITURAS (mm)		
			PC-01	PC-02	PC-03
	24		15,320	7,840	0,000
1	18	2	15,317	7,840	0,000
		15	15,317	7,840	0,000
2	12	2	15,290	7,767	0,000
		15	15,267	7,750	0,000
3	6	2	15,223	7,563	0,000
		15	15,193	7,517	0,000
4	0	2	15,117	7,127	0,000
		15	15,013	7,043	0,000

CARREGAMENTO - SOLO CIMENTO PRÉ INUNDADO (PC-01)							
ESTÁGIO	PRESSÃO (tf/m ²)	INTERVALO DE TEMPO (min)	LEITURA (mm)				
			1	2	3	4	MÉDIA
1	4	2	0	0,29	-0,13	0,05	0,113
		4	0	0,33	-0,18	0,08	
		8	0	0,33	-0,19	0,08	
		15	0	0,37	-0,19	0,09	
		30	0	0,37	-0,19	0,09	0,153
2	8	2	0,25	1,42	-0,12	0,79	0,820
		4	0,36	1,68	-0,06	1,02	
		8	0,41	1,75	-0,04	1,12	
		15	0,54	1,97	0,02	1,3	
		30	0,58	2,01	0,02	1,32	1,303
3	12	2	2,21	4,75	1,92	4,24	3,733
		4	2,41	5,1	2,32	4,81	
		8	2,65	5,36	2,55	5,21	
		15	2,89	5,68	2,83	5,69	
		30	2,9	5,74	2,86	5,74	4,793
4	16	2	3,87	7,02	5,08	8,58	6,490
		4	4,18	7,36	5,83	9,36	
		8	4,29	7,57	6,42	10,05	
		15	4,36	7,68	6,64	10,31	
		30	4,52	7,8	6,73	10,42	7,580
5	20	2	5,44	8,76	9,84	13,73	9,310
		4	5,85	9,15	11,03	14,9	
		8	6,03	9,39	11,94	15,77	
		15	6,45	9,68	12,59	16,45	
		30	6,45	9,68	12,68	16,52	10,883
6	24	2	8,08	10,77	16,71	19,87	12,907
		4	8,95	11,29	18,51	21,26	
		8	9,7	11,83	19,89	22,38	
		15	9,91	12,03	20,37	22,78	
		30	9,95	12,07	20,45	22,85	14,957

DESCARREGAMENTO - SOLO CIMENTO PRÉ INUNDADO (PC-01)							
ESTÁGIO	PRESSÃO (tf/m ²)	INTERVALO DE TEMPO (min)	LEITURA (mm)				
			1	2	3	4	MÉDIA
	24		10,31	12,42	20,85	23,23	15,320
1	18	2	10,31	12,41	20,85	23,23	15,317
		4	10,31	12,41	20,85	23,23	
		8	10,31	12,41	20,85	23,23	
		15	10,31	12,41	20,85	23,23	15,317
2	12	2	10,31	12,4	20,78	23,16	15,290
		4	10,31	12,4	20,78	23,16	
		8	10,31	12,39	20,78	23,16	
		15	10,31	12,35	20,76	23,14	15,267
3	6	2	10,3	12,3	20,65	23,07	15,223
		4	10,28	12,25	20,63	23,05	
		8	10,28	12,25	20,63	23,05	
		15	10,28	12,25	20,63	23,05	15,193
4	0	2	10,23	12,16	20,52	22,96	15,117
		4	10,11	12,11	20,5	22,93	
		8	10,09	12,09	20,47	22,91	
		15	10,07	12,07	20,46	22,9	15,013

CARREGAMENTO - SOLO NATURAL (PC-02)							
ESTÁGIO	PRESSÃO (tf/m ²)	INTERVALO DE TEMPO (min)	LEITURA (mm)				
			1	2	3	4	MÉDIA
1	4	2	0,16	0,04	0,07	0,07	0,060
		4	0,18	0,05	0,08	0,07	
		8	0,18	0,05	0,08	0,08	
		15	0,18	0,05	0,08	0,08	
		30	0,18	0,05	0,08	0,08	0,070
2	8	2	-0,58	0,5	1,24	3,17	1,637
		4	-0,65	0,53	1,34	3,31	
		8	-0,75	0,56	1,54	3,65	
		15	-0,82	0,61	1,6	3,83	
		30	-0,82	0,61	1,6	3,83	2,013
3	12	2	-0,82	0,94	2,23	5,1	2,757
		4	-0,73	1,03	2,4	5,2	
		8	-0,58	1,12	2,57	5,3	
		15	-0,43	1,25	2,74	5,39	
		30	-0,41	1,26	2,75	5,39	3,133
4	16	2	0,68	2,01	3,58	5,94	3,843
		4	1,16	2,26	3,87	6,08	
		8	1,34	2,38	4,02	6,12	
		15	1,53	2,51	4,16	6,18	
		30	1,58	2,54	4,17	6,18	4,297
5	20	2	2,98	3,46	5,2	6,98	5,213
		4	3,32	3,19	5,5	7,16	
		8	3,36	3,82	5,55	7,17	
		15	3,44	3,91	5,64	7,24	
		30	3,45	3,91	5,64	7,25	5,600
6	24	2	4,7	5,17	6,47	8,18	6,607
		4	5,14	5,68	6,88	8,57	
		8	5,62	6,22	7,2	8,89	
		15	5,66	6,28	7,25	8,93	
		30	5,73	6,33	7,27	8,95	7,517

DESCARREGAMENTO - SOLO NATURAL (PC-02)							
ESTÁGIO	PRESSÃO (tf/m ²)	INTERVALO DE TEMPO (min)	LEITURA (mm)				
			1	2	3	4	MÉDIA
	24		5,99	6,76	7,56	9,2	7,840
1	18	2	5,99	6,76	7,56	9,2	7,840
		4	5,99	6,76	7,56	9,2	
		8	5,99	6,76	7,56	9,2	
		15	5,99	6,76	7,56	9,2	7,840
2	12	2	5,92	6,73	7,5	9,07	7,767
		4	5,9	6,69	7,5	9,06	
		8	5,9	6,69	7,5	9,06	
		15	5,9	6,69	7,5	9,06	7,750
3	6	2	5,56	6,5	7,38	8,81	7,563
		4	5,53	6,46	7,36	8,78	
		8	5,5	6,44	7,35	8,76	
		15	5,5	6,44	7,35	8,76	7,517
4	0	2	4,81	6,1	7,06	8,22	7,127
		4	4,81	6,09	7,05	8,19	
		8	4,76	6,06	7	8,07	
		15	4,76	6,06	7	8,07	7,043

CARREGAMENTO - SOLO NATURAL PRÉ INUNDADO (PC-03)							
ESTÁGIO	PRESSÃO (tf/m ²)	INTERVALO DE TEMPO (min)	LEITURA (mm)				
			1	2	3	4	MÉDIA
1	4	2	0,13	0,09	0,35	0,28	0,213
		4	0,13	0,12	0,39	0,32	
		8	0,19	0,15	0,41	0,34	
		15	0,19	0,16	0,43	0,35	
		30	0,19	0,16	0,46	0,41	0,305
2	8	2	0,7	0,38	1,26	0,89	0,808
		4	0,81	0,488	1,41	1,03	
		8	0,91	0,51	1,56	1,09	
		15	0,93	0,52	1,6	1,11	
		30	1,05	0,57	1,77	1,24	1,158
3	12	2	1,37	0,77	2,26	1,68	1,520
		4	1,48	0,87	2,42	1,83	
		8	1,54	0,9	2,49	1,91	
		15	1,56	0,92	2,51	1,91	
		30	1,56	0,92	2,55	1,94	1,743
4	16	2	1,68	1	2,68	2,05	1,853
		4	1,71	1,01	2,8	2,14	
		8	1,79	1,03	2,83	2,16	
		15	1,8	1,04	2,88	2,22	
		30	1,8	1,05	2,91	2,24	2,000
5	20	2	2,13	1,27	3,38	2,68	2,365
		4	2,38	1,44	3,75	3,05	
		8	2,58	1,61	4,13	3,44	
		15	2,71	1,72	4,31	3,7	
		30	2,72	1,74	4,42	3,76	3,160
6	24	2	3,33	2,2	5,52	4,91	3,990
		4	3,6	2,44	5,96	5,33	
		8	3,96	2,8	6,65	5,94	
		15	3,98	2,85	6,76	6,04	
		30	4,05	2,89	6,79	6,06	4,948