



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**LEYZIANE NAIANNE PINHEIRO DA SILVA**

**ANÁLISE DO IMPACTO DA SOBRECARGA DE TELHADO VERDE GERADO**  
**SOBRE O RADIER ESTAQUEADO DE UMA EDIFICAÇÃO**

**CARUARU**

**2023**

LEYZIANE NAIANNE PINHEIRO DA SILVA

**ANÁLISE DO IMPACTO DA SOBRECARGA DE TELHADO VERDE GERADO  
SOBRE O RADIER ESTAQUEADO DE UMA EDIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.  
Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello

Caruaru

2023

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

S586a Silva, Leyziane Naianne Pinheiro da.  
Análise do impacto da sobrecarga de telhado verde gerado sobre o radier  
estaqueado de uma edificação. / Leyziane Naianne Pinheiro da Silva. – 2023.  
88 f.; il.: 30 cm.

Orientadora: Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Pós-  
Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2023.  
Inclui Referências.

1. Tecnologia ambiental. 2. Fundações (Engenharia). 3. Recalque de estruturas.  
4. Deformações e tensões. 5. Telhados – Recife, Região Metropolitana do (PE). 6.  
Análise estrutural (Engenharia). I. Bello, Maria Isabel Marques da Cunha Vieira  
(Orientadora). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2023-068)

LEYZIANE NAIANNE PINHEIRO DA SILVA

**ANÁLISE DO IMPACTO DA SOBRECARGA DE TELHADO VERDE GERADO  
SOBRE O RADIER ESTAQUEADO DE UMA EDIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Aprovada em: 28 / 02 / 2023.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

---

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

---

Prof. Dr. Eduardo Antônio Maia Lins (Examinador Externo)  
Instituto Federal de Pernambuco - IFPE

Dedico esta dissertação a Deus e aos meus pais, Genival e Elza.

## AGRADECIMENTOS

Meu primeiro agradecimento pertence a Deus, pois é dEle que vem minha força, minha disposição, minha coragem e meu respirar de cada dia para realizar tudo que Ele projetou para mim, mesmo em meio às maiores dificuldades. Segundamente, agradeço aos meus pais, pela confiança, pela paciência, pela força e por serem eles os canais de Deus para zelarem por mim até hoje.

À minha irmã por muitas vezes compreender os dias em que o mestrado mais ocupava meu tempo.

Agradeço aos meus amigos tão presentes em todo o tempo do mestrado, aos momentos vividos, às risadas, aos desesperos e demais momentos que ficarão na memória. Em especial Jefferson Pedro, Leandro Valter, Sávio Holanda e Sidrak, que me deram tanto suporte.

Agradeço a todos os envolvidos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) da UFPE - Campus do Agreste, ao secretário Marcelo e a todos os professores.

Agradeço a minha orientadora Isabella Bello pela ajuda, paciência e compreensão todo esse tempo. A Luiz Eduardo, por me ajudar grandemente no meu tema.

Agradeço aos meus amigos da vida e do trabalho, os quais não contribuíram diretamente na construção do meu mestrado, mas, extraordinariamente de forma indireta.

Em geral, a todos os quais pude compartilhar espaço na sala de aula, pude aprender com todos, não só professores, mas, alunos e funcionários. Podemos tornar os lugares por onde passamos numa grande escola.

“[...] pois é Deus quem produz em vós tanto o querer como o realizar, de acordo com sua boa vontade.” (BÍBLIA..., N. T., Filipenses, 2:13).

## RESUMO

Devido à necessidade mais urgente de implantação de tecnologias ambientais na construção civil, deve-se garantir a completa eficácia ecológica e estrutural das edificações. Esta pesquisa apresenta uma análise do impacto da sobrecarga na fundação gerada pela presença de telhado verde em uma edificação de 4 pavimentos tipo mais térreo, com sistema construtivo em paredes de concreto e fundação por radier estaqueado, situada em um condomínio residencial na Região Metropolitana do Recife (RMR). Foi realizado um estudo considerando o dimensionamento estrutural para cinco cenários: 1) laje comum em concreto armado; 2) telhado verde extensivo com camada drenante de argila expandida; 3) telhado verde extensivo com camada drenante de brita; 4) telhado verde intensivo com vegetação arbustiva; 5) telhado verde intensivo com vegetação de pequenas árvores e arbustos. A análise de desempenho da fundação foi possível mediante a modelagem de todo sistema construtivo no software SAP 2000. Os parâmetros de resistência e deformabilidade do solo foram obtidos através de correlações semiempíricas a partir de dados do ensaio de sondagem à percussão. Os recalques gerados foram comparados com os resultados dos recalques estimados e monitorados no Cenário 1, ou seja, sem a consideração do telhado verde. Foi possível concluir que não houve acréscimo significativo nos deslocamentos da estrutura sobre o solo. Todas as coberturas verdes, inclusive as intensivas, podem ser implantadas no empreendimento. A maior diferença nas reações de apoio e recalques ocorreram entre os Cenários 5 e 1, de, aproximadamente, 10,30%, significando 34,6 kN e 0,27 mm, respectivamente, para as estacas e 0,077 kN e 0,29 mm para o radier. Contudo, por ser uma cobertura intensiva, o Cenário 5 exige maior custo para instalação e manutenção, por isso, o Cenário 3, do tipo extensivo, seria mais indicado para implantação no empreendimento, pois, é de fácil instalação, manuseio e manutenção, além de apresentar uma contribuição inferior em carregamento e recalque, podendo ser aplicado em construções populares, fornecendo benefícios ambientais e econômicos.

**Palavras-chave:** tecnologia ecológica; fundação mista; recalque; capacidade de carga.

## ABSTRACT

Due to the more urgent need to implement environmental technologies in civil construction, the complete ecological and structural effectiveness of buildings must be guaranteed. This research presents an analysis of the impact of the overload on the foundation generated by the presence of a green roof in a building with 4 floors, plus ground floor, with a construction system in concrete walls and a piled raft foundation, located in a residential condominium in the Metropolitan Region of Recife (RMR). A study was carried out considering the structural dimensioning for five scenarios: 1) common slab in reinforced concrete; 2) extensive green roof with drainage layer of expanded clay; 3) extensive green roof with draining gravel layer; 4) intensive green roof with shrub vegetation; 5) Intensive green roof with vegetation of small trees and shrubs. The foundation performance analysis was possible by modeling the entire constructive system in the SAP 2000 software. The soil resistance and deformability parameters were obtained through semi-empirical correlations based on data from the percussion drilling test. The settlements generated were compared with the results of the settlements estimated and monitored in Scenario 1, that is, without considering the green roof. It was possible to conclude that there was no significant increase in the displacements of the structure on the ground. All green roofs, including intensive ones, can be implemented in the project. The greatest difference in the support and settlement reactions occurred between Scenarios 5 and 1, of approximately 10.30%, meaning 34.6 kN and 0.27 mm, respectively, for the piles and 0.077 kN and 0.29 mm for the radiator. However, as it is an intensive coverage, Scenario 5 requires a higher cost for installation and maintenance, therefore, Scenario 3, the extensive type, would be more suitable for implementation in the enterprise, since it is easy to install, handle and maintain, in addition to present a lower contribution in loading and settlement, can be applied in popular constructions, providing environmental and economic benefits.

**Keywords:** eco technology; mixed foundation; displacements; load capacity.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fotografia 1 -	Telhado verde em edifícios.....	21
Figura 1 -	Jardins Suspensos da Babilônia.....	23
Figura 2 -	Representação da classificação dos telhados verdes.....	24
Figura 3 -	Composição de um telhado verde.....	26
Figura 4 -	Estrutura de um telhado verde em módulos pré-fabricados.....	29
Figura 5 -	Módulos pré-fabricados.....	30
Figura 6 -	Sistema Modular de um telhado verde .....	31
Figura 7 -	Sistema de telhado verde alveolar grelhado .....	31
Figura 8 -	Sistema de telhado verde laminar.....	31
Figura 9 -	Hipótese de Winkler, apresenta a deformabilidade do solo através de molas discretas em uma sollicitação de carga proveniente de uma fundação rasa.....	36
Figura 10 -	Proposta de Winkler para estacas cravadas em solo: (a) é a sollicitação transversal real e (b) é sollicitação modelada pela proposta de Winkler	36
Figura 11 -	Diferenças entre coeficiente de mola e de deslocamento.....	37
Fotografia 2 -	Mapa de localização do condomínio visto por satélite.....	43
Figura 12 -	Maquete digital do condomínio.....	44
Gráfico 1 -	Curva Carga x Recalque do PCE.....	45
Fotografia 3 -	Disposição das estacas e construção do radier .....	45
Fluxograma 1 -	Modelagem numérica e estrutural.....	46
Figura 13 -	Cenário 2 - Modelagem do telhado verde extensivo com camada drenante de argila expandida.....	48
Figura 14 -	Cenário 3 - Modelagem do telhado verde extensivo com camada drenante de brita n.º 2.....	48
Figura 15 -	Cenário 4 - Modelagem do telhado verde intensivo com vegetação arbustiva.....	49
Figura 16 -	Cenário 5 - Modelagem do telhado verde intensivo com pequenas árvores e vegetação arbustiva .....	50
Figura 17 -	Modelo numérico do Bloco 13 utilizando o SAP 2000.....	51
Figura 18 -	Malha de elementos finitos das lajes.....	52
Figura 19 -	Malha de elementos finitos das paredes.....	52
Figura 20 -	Malha de elementos finitos do radier.....	52
Gráfico 2 -	Reações nas estacas para os cinco cenários.....	56
Gráfico 3 -	Deslocamentos nas estacas para os cinco cenários.....	56
Gráfico 4 -	Carga x recalque das estacas do Cenário 1.....	57
Gráfico 5 -	Carga x recalque das estacas do Cenário 2.....	57
Gráfico 6 -	Carga x recalque das estacas do Cenário 3.....	58
Gráfico 7 -	Carga x recalque das estacas do Cenário 4.....	58
Gráfico 8 -	Carga x recalque das estacas do Cenário 5.....	59
Gráfico 9 -	Reações no radier para os cenários 1, 2 e 3.....	62
Gráfico 10 -	Deslocamentos no radier para os cenários 1, 2 e 3.....	63
Gráfico 11 -	Carga x recalque do radier do Cenário 1.....	63
Gráfico 12 -	Carga x recalque do radier do Cenário 2.....	64
Gráfico 13 -	Carga x recalque do radier do Cenário 3.....	64
Gráfico 14 -	Carga x recalque do radier do Cenário 4.....	65
Gráfico 15 -	Carga x recalque do radier do Cenário 5.....	65
Gráfico 16 -	Evolução das reações dos cenários do radier estaqueado.....	67

Gráfico 17 - Evolução dos recalques dos cenários no radier estaqueado..... 67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Dados sobre as estruturas dos telhados verdes .....	33
Tabela 2 -	Valores de $K_v$ ( $kN.m^{-3}$ ) definidos por Terzaghi (1955).....	39
Tabela 3 -	Valores de $K_v$ definidos por Moraes (1976) .....	39
Tabela 4 -	Valores de fator de forma ( $I_s$ ) para um meio de espessura infinita .....	40
Tabela 5 -	Valores de forma e espessura para carregamentos na superfície ( $I_d=1$ ) de um meio de espessura finita .....	41
Tabela 6 -	Valores dos coeficientes $\alpha$ e $K$ definidos por Teixeira e Godoy (1996) ...	41
Tabela 7 -	Obtenção do módulo de elasticidade através do ensaio SPT .....	47
Tabela 8 -	Sobrecarga adicional aos cenários com telhado verde .....	47
Tabela 9 -	Propriedades dos elementos estruturais inseridas na modelagem na SAP 2000 .....	51
Tabela 10 -	Somatório de cargas nas estacas fornecidos pelo SAP 2000 .....	53
Tabela 11 -	Resultado do teste de Wilcoxon para comparação entre cenários dos resultados das estacas .....	54
Tabela 12 -	Medidas de posição dos resultados de carga e recalque nas estacas .....	54
Tabela 13 -	Comparação de resultados de carga e recalque entre cenários .....	55
Tabela 14 -	Somatório de cargas no radier fornecidos pelo SAP 2000 .....	60
Tabela 15 -	Resultado do teste de Wilcoxon para comparação entre cenários dos resultados do radier .....	60
Tabela 16 -	Medidas de posição dos resultados de carga e recalque no radier .....	61
Tabela 17 -	Comparação de resultados entre cenários .....	61
Tabela 18 -	Cargas absorvidas pelos elementos do radier estaqueado .....	66
Tabela 19 -	Variação entre máximos e mínimos de carga e recalques nos elementos do radier estaqueado .....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EPS	Poliestireno Expandido
<i>et al.</i>	E outros
IBI	Instituto Brasileiro de Impermeabilização
ISE	Interações Solo-Estrutura
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
PCE	Prova de Carga Estática
PET	Polietileno Tereftalato
RMR	Região Metropolitana do Recife
SPT	<i>Standart Penetration Test</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_f$	Área carregada da base da fundação
$B$	Menor dimensão da base da fundação
cm	Centímetro
$d$	Deslocamento vertical ou recalque
$e$	Coefficiente empírico em função do tipo de solo
$E_s$	Módulo de elasticidade do solo ou módulo de Young
$F$	Força aplicada num ponto da fundação
$f_{ck}$	Resistência característica
$H$	Reação horizontal
$I$	Fator de influência da fundação
$I_d$	Fator de profundidade/embutimento
$I_h$	Fator de espessura de camada compressível
$I_s$	Fator de forma da fundação e de sua rigidez
$K$	Coefficiente definido por Teixeira e Godoy (1996)
kg	Quilograma
$K_m$	Coefficiente de mola ou apoio elástico
$K_{mh}$	Coefficiente de mola para deslocamentos horizontais
$K_{mv}$	Coefficiente de mola para deslocamentos verticais
$K_{m\theta}$	Coefficiente de mola para rotações
kN	Quilo-newton
$K_v$	Coefficiente de reação vertical; módulo de reação vertical ou coeficiente de recalque
$M$	Momento
m	Metro
mm	Milímetro
$N_{SPT}$	Índice de resistência à penetração
$P$	Pressão aplicada numa área da fundação
$\nu$	Coefficiente de Poisson do Solo
$\alpha$	Coefficiente definido por Teixeira e Godoy (1996)
$v$	Deslocamento horizontal
$\rho$	Deslocamento vertical
$P(x,y)$	Deslocamento vertical ou recalque
$\sigma(x,y)$	Tensão de contato média na base da fundação
$\phi$	Deslocamento rotacional

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.1</b>	<b><i>Geral .....</i></b>	<b>17</b>
<b>1.1.2</b>	<b><i>Específicos .....</i></b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura da dissertação .....</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Telhados verdes .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.1</b>	<b><i>História dos telhados verdes.....</i></b>	<b>22</b>
<b>2.1.2</b>	<b><i>Classificação dos telhados verdes.....</i></b>	<b>24</b>
<b>2.1.2.1</b>	<b>Telhados verdes intensivos.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1.2.2</b>	<b>Telhados verdes extensivos.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.2.3</b>	<b>Telhados verdes semi-intensivos.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.3</b>	<b><i>Composição das coberturas verdes de sistema contínuo.....</i></b>	<b>26</b>
<b>2.1.3.1</b>	<b>Vegetação.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1.3.2</b>	<b>Substrato.....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.3.3</b>	<b>Camada filtrante.....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.3.4</b>	<b>Camada de drenagem.....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.3.5</b>	<b>Camada impermeabilizante.....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.3.6</b>	<b>Camada de suporte.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1.4</b>	<b><i>Sistema em módulos pré-fabricados.....</i></b>	<b>29</b>
<b>2.1.5</b>	<b><i>Condições estruturais para a implantação de um telhado verde.....</i></b>	<b>31</b>
<b>2.2</b>	<b>Modelagem de estruturas e fundações .....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.1</b>	<b><i>Comportamento estrutural do radier estaqueado .....</i></b>	<b>34</b>
<b>2.2.2</b>	<b><i>Hipótese de Winkler .....</i></b>	<b>36</b>
<b>2.2.3</b>	<b><i>Características do solo de fundação .....</i></b>	<b>38</b>
<b>2.2.4</b>	<b><i>Coefficiente de mola para as estacas no regime elástico linear .....</i></b>	<b>41</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>43</b>
<b>3.1</b>	<b>Caracterização da área .....</b>	<b>43</b>
<b>3.2</b>	<b>Modelagem da estrutura e fundação .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.1</b>	<b><i>Cenários de carga.....</i></b>	<b>47</b>
<b>3.3.2</b>	<b><i>Modelagem da estrutura em concreto armado .....</i></b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise de reações de apoio e recalques .....</b>	<b>53</b>
<b>4.1.1</b>	<b><i>Estacas .....</i></b>	<b>53</b>
<b>4.1.2</b>	<b><i>Radier .....</i></b>	<b>59</b>
<b>4.1.3</b>	<b><i>Análise radier x estacas .....</i></b>	<b>65</b>
<b>4.2</b>	<b>Considerações finais quanto a implantação das soluções de telhado verde</b>	<b>68</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE A - CARGAS DAS COBERTURAS VERDES DOS</b>	
	<b>CENÁRIOS 2, 3, 4 E 5.....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE B – RESULTADO DO SAP 2000 - CARGAS E RECALQUES</b>	
	<b>DAS ESTACAS.....</b>	<b>80</b>

<b>APÊNDICE C - RESULTADO DO SAP 2000 - CARGAS E RECALQUES DO RADIER (AMOSTRA COM 100 PONTOS).....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXO A - PLANTA BAIXA DOS BLOCOS 1 AO 13 DO EMPREENDIMENTO.....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO B - RESULTADO DO ENSAIO SPT FORNECIDO PELA CONSTRUTORA (PERFIS GEOTÉCNICOS).....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO C - ESBOÇO DA FUNDAÇÃO EM RADIER ESTAQUEADO...</b>	<b>88</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a modificação do meio urbano pelo homem, o ambiente tem se apresentado cada vez mais impermeabilizado, permitindo com que as cidades urbanizadas absorvam menos chuva e mais radiação solar, havendo a modificação do ciclo hidrológico, isto é, aumento nas taxas de escoamento de água, volume e fluxo de pico nas redes de drenagem (BEVILAQUA, 2021). Torna-se necessário a adoção de tecnologias ecológicas, como o telhado verde, que tem mostrado diversas vantagens se comparando com os telhados convencionais em relação à economia financeira, redução de enchentes, melhoria na qualidade do ar, atuando como uma verdadeira ação tática pela gestão ambiental das cidades, por promover conforto térmico das edificações em que está instalado, reter parcela de água de chuva que seria escoada superficialmente, aumentar a evapotranspiração e o sequestro de carbono pela vegetação, possibilitar manejo e reutilização da porção de água absorvida pelas coberturas e promover ambientes de lazer (BUCOLLA E SPOLEK, 2023; CHAN E CHOW, 2013; LAGUERRE *et al.*, 2023; PAIVA, FERREIRA E ARAÚJO, 2018; STELLA E PERSONNE, 2021; VIOLA, HELLES E DEIDDA, 2017).

O telhado verde é o resultado de uma composição de algumas camadas, as quais podem apresentar particularidades de acordo com o porte e do tipo de vegetação utilizado, da necessidade de manutenção, dos materiais constituintes do sistema, do peso, tipo de uso e finalidade dessa cobertura (CALHEIROS; PALHA, 2017). Um aspecto importante para implantação desse sistema é a sobrecarga que ele exercerá sobre as estruturas construídas, principalmente, quando saturado pela chuva.

É impreterível a análise da estrutura junto com sua fundação, a qual irá suportar todo peso da edificação e transferi-la para o solo. É desejável que essa transferência não gere rupturas ou deslocamento no maciço de solo. Para isso, deve-se considerar as interações solo-estrutura (ISE) para a análise dos recalques e das rigidezes da fundação e da estrutura e garantir a funcionalidade, estabilidade e a durabilidade da obra durante toda a sua vida útil (AGUIAR, 2017; GUARNIERI *et al.*, 2018). A fim de evitar recalques quando o solo possui baixa capacidade de carga e deseja-se uniformizá-los, as fundações do tipo radier estaqueado têm se apresentado como uma boa solução (AGUIAR, 2017). Tal tipo de fundação pode ser modelado pelo método dos elementos finitos (MEF) através do Software SAP 2000 com o auxílio de algumas teorias, como a hipótese de Winkler, as quais auxiliam nas análises de recalques.

Diante de todos os benefícios citados, esta pesquisa visa analisar o impacto da sobrecarga gerada pela construção de telhados verdes na estrutura e fundação de uma edificação

de quatro pavimentos tipo mais térreo, com sistema construtivo em paredes de concreto e fundação por radier estaqueado, situado em um condomínio residencial na Região Metropolitana do Recife, no padrão Minha Casa Minha Vida.

Trata-se de uma pesquisa inserida ao projeto intitulado “Estudo de fundação por radier-estaqueado de edificios com sistema construtivo parede de concreto”, no qual já foram realizados diversos estudos com foco em análise de fundações, contudo, o estudo considerando a implantação de coberturas verdes, seus benefícios e utilização em edificações padrão Minha Casa Minha Vida e a influência estrutural dessa tecnologia em radier estaqueado ainda é inédito. As edificações populares Minha Casa Minha Vida têm sido executadas em grande escala no Brasil e, por isso, apresentam alto potencial contribuição ambiental se agregarem as coberturas verdes como padrão de execução.

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Geral***

Analisar o impacto da sobrecarga gerada pela construção de telhados verdes na estrutura e fundação de uma edificação de quatro pavimentos tipo mais térreo, com sistema construtivo em paredes de concreto e fundação por radier estaqueado, situado em um condomínio residencial na Região Metropolitana do Recife.

### ***1.1.2 Específicos***

- Modelar cenários de telhados verdes nas lajes do empreendimento e quantificar as respectivas cargas;
- Atribuir os parâmetros do solo, da interação solo estrutura e o carregamento dos cenários de telhado verde na modelagem estrutural e de fundação;
- Analisar a influência da carga na fundação de radier estaqueado e sua contribuição nos recalques que o sistema poderá sofrer.

## **1.2 Justificativa**

Em vista de diversos problemas ambientais presentes nas regiões urbanas, muitos métodos para reduzir os impactos gerados pela alteração do meio ambiente de urbano para rural

têm sido avaliados. Dentre eles, podendo citar os telhados verdes, os quais são uma solução vantajosa que tem sido mais difundida nos últimos anos no Brasil. Contudo, por conter diversas camadas de materiais além da vegetação, o sistema pode sobrecarregar a estrutura da edificação que o comporta, favorecendo a ocorrência de recalques.

Este trabalho torna-se relevante por apresentar a influência da utilização de telhados verdes numa estrutura propensa a recalques, a qual utiliza como método de fundação o radier estaqueado (fundação do tipo mista), analisando o possível aumento dos recalques neste tipo de fundação e os benefícios que o sistema de cobertura verde poderia conferir ao ambiente.

O radier estaqueado bem como as coberturas verdes são temas bastante importantes, os quais, se trabalhados em conjunto, possuem um grande potencial de geração de pesquisas e de muitas soluções para diversos impasses concernentes à engenharia civil e ambiental.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos, os quais serão mencionados neste tópico para facilitar a compreensão do leitor.

O Capítulo 1 apresenta a introdução a esta pesquisa, bem como os seus objetivos e justificativa pela qual o presente trabalho foi realizado, além de uma sucinta apresentação da estrutura desta dissertação e sua composição.

O Capítulo 2 é composto pelo estudo bibliográfico sobre o tema tratado nesta pesquisa, apresentando todas as informações ao entendimento do leitor e necessárias ao desenvolvimento deste trabalho, contemplando assuntos como: (a) Telhados verdes: história, classificação e composição; sistemas de módulos pré-fabricados; condições estruturais para a implantação de um telhado verde; (b) Modelagem de estruturas e fundações: (a) comportamento estrutural do radier estaqueado; (b) Hipótese de Winkler; (c) parâmetros do solo de fundação; e (d) coeficiente de mola para as estacas no regime elástico linear.

No Capítulo 3 estão descritas a caracterização da área e do objeto de estudo, os dados de estudos preliminares já realizados no empreendimento, como ensaios *in situ* e modelagens numéricas estruturais, além das informações pertinentes do presente estudo, as quais incluem a discriminação dos cenários estudados e a metodologia utilizada para as análises.

No Capítulo 4, encontram-se os resultados do presente trabalho, os quais compreendem todos os recalques e as reações resultantes das análises realizadas no SAP 2000 para cada cenário, além de comparações entre eles e análise dos impactos na estrutura e no comportamento do radier estaqueado gerados pela utilização das coberturas verdes.

O Capítulo 5 traz a conclusão e o fechamento das concepções desenvolvidas ao longo desta pesquisa, a partir dos resultados obtidos, bem como sugestões para o prosseguimento do estudo em trabalhos futuros ou desenvolvimentos de novos temas que podem ser trabalhados tendo esta pesquisa como suporte.

Após o Capítulo 5, são encontradas as referências bibliográficas utilizadas na composição da pesquisa, documentos anexos, como projetos do empreendimento, dados de estudos anteriores e apêndices com dados da pesquisa atual, os quais não puderam ser inclusos dentro do corpo do trabalho devido à sua extensão.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os temas necessários para o desenvolvimento deste trabalho: (a) Telhados verdes: história, classificação e composição; sistemas de módulos pré-fabricados; condições estruturais para a implantação de um telhado verde; (b) Modelagem de estruturas e fundações: (a) comportamento estrutural do radier estaqueado; (b) Hipótese de Winkler; (c) parâmetros do solo de fundação; e (d) coeficiente de mola para as estacas no regime elástico linear.

### 2.1 Telhados verdes

Devido a urbanização, as cidades, em detrimento dos ambientes não urbanizados, apresentam algumas características, como impermeabilidade de sua superfície, maior absorção de energia e radiação solar (KLEIN; COFFMAN, 2015), modificação do ciclo hidrológico, isto é, aumento nas taxas de escoamento de água, volume e fluxo de pico nas redes de drenagem (BEVILAQUA, 2021). Ou seja, as cidades urbanizadas absorvem menos água decorrente das chuvas e mais temperatura solar. Com isso, surge a necessidade de novas tecnologias mitigatórias desses problemas.

Os telhados verdes consistem numa técnica de implantação de vegetação sobre as edificações, como apresentado na fotografia 1. As coberturas são revestidas por vegetações que compõem um sistema de várias camadas sobrepostas a fim de desempenharem um bom funcionamento. Essas coberturas podem variar entre um simples gramado no teto de uma edificação ou grandes jardins que podem comportar árvores e permitirem a locomoção de pessoas em seu meio (ALMEIDA; BRITO; SANTOS, 2018; PAIVA; FERREIRA; ARAÚJO, 2018).

Os telhados verdes têm sido adotados para ajudar a mitigar as más consequências da urbanização, pois são uma solução construtiva sustentável, as quais apresentam, de acordo com Paiva, Ferreira e Araújo (2018), diversas vantagens em relação aos telhados convencionais, atuando como uma verdadeira ação tática pela gestão ambiental das cidades. Diversos benefícios ambientais e econômicos podem ser observados com a utilização dessa tecnologia, como o abrandamento do efeito ilha de calor urbano, a melhoria na gestão de águas pluviais, melhoramento da qualidade da água para reutilização, economia de energia para aquecimento e resfriamento das edificações (a cobertura verde auxilia na transferência de calor e no resfriamento térmico), prolongamento da vida útil do telhado e de sua impermeabilização,

melhora na qualidade do ar, promoção de sequestro de carbono, favorecimento da biodiversidade, valorização imobiliária e da estética urbana, possibilidade de implantação de áreas recreativas e paisagísticas (ALVES *et al.*, 2021, BEVILAQUA, 2021; SUTTON, 2015; VIJAYARAGHAVAN, 2016).

Fotografia 1 - Telhado verde em edifícios



Fonte: Portal Ambiente legal (2015).

A depender do tipo, coberturas verdes ajudam a manter um controle de temperatura na edificação, equilibrando os efeitos da insolação na cobertura, reduzindo sua temperatura durante o dia e tornando mais lento o seu resfriamento durante a noite (STELLA E PERSONNE, 2021). Chan e Chow (2013) explicam que a utilização de telhados verdes em edifícios comerciais tem crescido devido às suas contribuições com o isolamento térmico dos edifícios, pois, há a redução do ganho de calor através da área do telhado e da exigência de resfriamento dos edifícios (aspecto muito relevante financeira e economicamente nesse tipo de edificação).

Bucolla e Spolek (2023) validam a capacidade de retenção e detenção do escoamento de água da chuva dos telhados verdes, contribuindo para a redução do escoamento superficial e, como confirmam em seu estudo, Viola, Hellies e Deidda (2017), a retenção de água da chuva pelas coberturas verdes favorece a evapotranspiração, contribuindo para o equilíbrio do ciclo hidrológico, uma vez que o “desvio” da chuva para as redes de drenagem é amenizado.

Laguerre *et al.*, (2023) os quais apresentam alguns tipos de suculentas utilizadas em telhados verdes, as quais emitem substâncias com baixo potencial de formação de ozônio na atmosfera, tornando-se consideravelmente promissoras no esverdeamento de ambientes

urbanos com baixo impacto ambiental. Uma vez que a produção de ozônio pode formar poluentes secundários.

Paiva, Ferreira e Araújo, (2018, p. 03) constatam que

Apesar de tantos benefícios, o telhado verde ainda é um sistema de cobertura muito pouco usado no Brasil. As principais causas disso são, provavelmente, o alto custo inicial do sistema em relação aos convencionais e a falta de informação sobre essa tecnologia, tanto por parte de profissionais da construção como por parte dos clientes, que não veem o telhado verde como uma opção, como uma solução construtiva viável.

### ***2.1.1 História dos telhados verdes***

Os telhados verdes possuem uma história milenar. Eles eram utilizados no passado, principalmente, para fins estéticos e paisagísticos. De acordo com Jim (2017), que estudou quarenta e três exemplos diferentes de telhados verdes e sua evolução ao longo dos anos, os telhados verdes da antiguidade eram expressos em estruturas religiosas e aristocráticas. Na época medieval, esses telhados já eram adotados com cunhos paisagísticos renascentistas, como os jardins de terraço. Atualmente, apesar das renovações tecnológicas de metodologias e materiais, os princípios e fundamentos dos telhados verdes permanecem os mesmos.

Sabe-se, que, no século V a.C, os telhados verdes foram implementados nos jardins suspensos na Babilônia (como mostra a figura 1), assim como nos Zigurates da antiga Mesopotâmia. Os romanos também adotaram esse sistema arquitetônico. No norte da Europa, a Noruega, por exemplo, utilizou telhados verdes para aumentar o isolamento térmico, devido ao clima frio, melhorando o conforto nos edifícios durante condições meteorológicas adversas. Mais recentemente, na década de 70, houve um aumento na popularidade e implementação dos telhados verdes nos países germânicos França e Suíça. Nos últimos anos, o Japão tem apresentado os telhados verdes como principal tecnologia para reduzir ilhas de calor e favorecer construções sustentáveis. (ALMEIDA, BRITO; SANTOS, 2018; BEVILAQUA, 2021; COUTTS *et al.*, 2013; DUNNETT; KINGSBURY, 2008; EISENMAN, 2006; KOHLER *et al.*, 2002; LIU; BASKARAN, 2003; WILLIAMS; RAYNER; RAYNOR, 2010).

Figura 1 - Jardins Suspensos da Babilônia



Fonte: Academia Brasileira de Arte (2022).

Vieira (2021) reitera que alguns países da Europa (Alemanha, França, Áustria, Suíça, Noruega, Hungria, Suécia, Reino Unido, Itália) e países americanos (Estados Unidos, México e Brasil) têm utilizado os telhados verdes como sistemas compensatórios ao meio ambiente. Segundo o autor, no Brasil, várias cidades têm buscado soluções ambientais para reduzir o impacto causado pela ação humana no meio ambiente.

Duarte *et al.*, (2017) afirmam que a arborização tem sido um elemento urbanístico indispensável nos centros urbanos. Diante disso, Vieira (2021) mostra que tem sido adotadas algumas soluções como a Lei de Compensação Ambiental em construções urbanas, normas de incentivo fiscal e a promoção do uso de telhados verdes para se obter selos de sustentabilidade e certificações. Existe, também, a Lei 18.112/2015, sancionada na cidade do Recife, a qual busca melhorar a qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde" e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências a depender de alguns critérios.

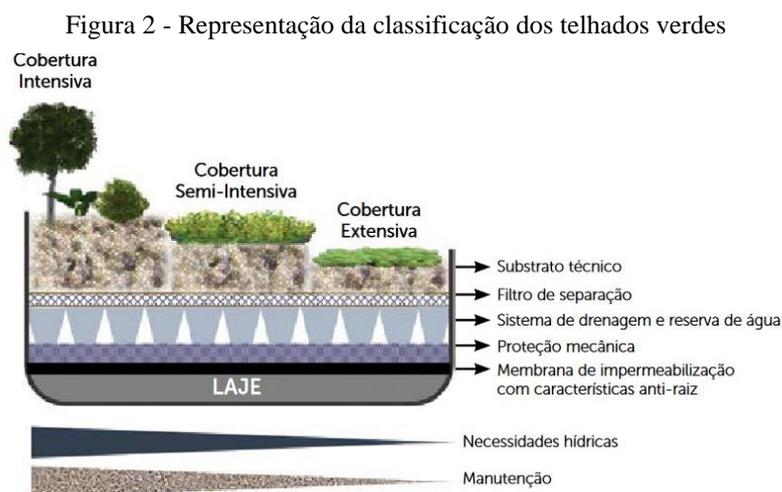
Atualmente, é notória a maior atenção que tem sido dada aos telhados verdes através das competições, conferências e associações que são desenvolvidos neste assunto em todo mundo (BERARDI; GHAFARIANHOSEINI; GHAFARIANHOSEINI, 2014). Muitas pesquisas têm sido realizadas a fim de se estudar o comportamento térmico dos telhados verdes em relação ao isolamento, meio de cultivo, plantas a serem utilizadas e sua contribuição para a atenuação das ilhas de calor.

A evolução dos aspectos tecnológicos se tratando de telhados verdes tem contribuído para a inclusão dessa tecnologia nas construções e nos planejamentos arquitetônicos, difundindo-a por todo o mundo (ALMEIDA; BRITO; SANTOS, 2018; BEVILAQUA, 2021).

De acordo com Calheiros e Palha (2017), o tempo de duração de um telhado verde em países que possuem normas técnicas para sua construção é em torno de 30 a 40 anos. Mesmo tempo previsto para a duração da impermeabilização da cobertura. Com o desenvolvimento tecnológico, a construção das coberturas verdes tem se tornado mais fácil, podendo ser adaptada à maioria dos projetos urbanos.

### 2.1.2 Classificação dos telhados verdes

Os telhados verdes podem ser classificados em intensivos, extensivos e, para alguns autores, semiextensivos (figura 2). Essa classificação se dá através do porte e do tipo de vegetação utilizado, da necessidade de manutenção, dos materiais constituintes do sistema, do peso, tipo de uso e finalidade dessa cobertura (CALHEIROS; PALHA, 2017).



Fonte: Calheiros e Palha (2017).

#### 2.1.2.1 Telhados verdes intensivos

Telhados verdes intensivos são as coberturas que demandam uma camada mais espessa – geralmente, superior a 15cm - e consistente de solo, pois utiliza vegetação, normalmente, de maior porte, desde rasteiras até arbustos e árvores. Podem atingir uma carga superficial de 1200 kg/m<sup>2</sup>. Eles permitem a utilização de uma diversidade relevante de plantas, promovendo ambientes recreativos e de biodiversidade atraente. Esse tipo de cobertura possui um desempenho eficiente se tratando de isolamento térmico, gestão de águas pluviais e retenção energética. Contudo, é uma cobertura pesada, exigindo estruturas reforçadas de suporte de carga, para drenagem e irrigação do sistema. Ou seja, apresenta maior complexidade técnica e

torna-se dispendiosa sua manutenção, pois, deve ser semelhante a manutenção de um jardim convencional, se tratando de fertilização e rega (BEVILÁQUA, 2021; CALHEIROS; PALHA, 2017; DINSDALE; PEAREN; WILSON, 2006; DUNNETT; KINGSBURY, 2008; KREBES; SATTLER, 2010).

#### 2.1.2.2 Telhados verdes extensivos

Telhados verdes extensivos são coberturas caracterizadas por um meio de crescimento menor, necessitam de uma cobertura menos espessa de solo – espessura do substrato inferior a 15cm -, vegetação rasteira ou médio porte, normalmente rasteiras, musgos, herbáceas e suculentas, conseguem realizar automanutenção e, requerem menos água. Com isso, possuem baixo custo de manutenção e operação.

Esse tipo de telhado pesa menos – até 100kg/m<sup>2</sup> - e são bastante indicados para coberturas de grandes dimensões, podendo ser inclinadas ou não, pois, seu processo de construção é baseado em técnicas simples. Todavia, essas coberturas não permitem acesso ao público, geralmente, e possuem limitações no ponto de vista energético e de gestão de águas pluviais (BEVILÁQUA, 2021; CALHEIROS; PALHA, 2017; DUNNETT; KINGSBURY, 2008; KREBES; SATTLER, 2010; MACLVOR *et al.*, 2013).

#### 2.1.2.3 Telhados verdes semi-intensivos

Telhados verdes semi-intensivos são telhados caracterizados por ocuparem uma posição intermediária entre as coberturas intensivas e extensivas. Isso se dá pois, nesse tipo de telhado podem ser utilizadas vegetações próprias dos dois tipos de coberturas, ou seja, é próprio para receber quase todo tipo de vegetação de jardim, desde plantas modestas até árvores. Normalmente são utilizadas vegetações perenes, arbustos e rasteiras. Geram uma carga superficial de 100kg/m<sup>2</sup> a 700kg/m<sup>2</sup>. A composição desse tipo de telhado se dá a partir do clima local e sua manutenção (irrigação, poda e fertilização) varia de frequente a moderada, a depender do clima local e do tipo de vegetação, todavia, normalmente, requerem menos manutenção que os intensivos, além de permitirem acesso ao público. Ainda existem poucas referências para esse tipo de cobertura (CALHEIROS; PALHA, 2017; FLL, 2002; HEIM; LUNDHOLM, 2014; KREBES; SATTLER, 2010; NAGASE *et al.*, 2013).

### 2.1.3 Composição das coberturas verdes de sistema contínuo

A coberturas verdes de sistema contínuo, ou convencionais, são constituídas de diversos componentes diferentes, os quais possuem funções diferentes e são dispostos de forma lógica a fim de otimizar todo o sistema. Dentre eles podem ser destacados (figura 3) a vegetação, o substrato, a camada filtrante, a camada drenante, a proteção da impermeabilização, a barreira antirraízes, a impermeabilização do sistema e a estrutura de suporte (ALBINO, 2020; LEAL, 2019). Os materiais que compõem estas camadas podem variar a depender do local, disponibilidade e diversos outros fatores (MORAKINYO *et al.*, 2017).

Figura 3 - Composição de um telhado verde



Fonte: ecotecnologias.org (2023).

#### 2.1.3.1 Vegetação

A vegetação é a camada mais externa do sistema. As plantas utilizadas nos telhados verdes devem possuir raízes firmes, a fim de suportar a ação dos ventos (que é maior que nos jardins comuns) sem sofrer movimentações além do normal. Já nos casos dos telhados extensivos, as plantas devem suportar a períodos de estiagem e poucas manutenções (LEAL, 2019; WILLES, 2014).

Gonçalves (2017) destaca que o tipo de vegetação utilizado depende do tipo de cobertura - extensivo, intensivo ou semi-intensivo -, do clima local, da finalidade e necessidade de manutenção. Segundo Albino (2020), nos casos de cobertura extensiva, são utilizadas plantas

do tipo *Sedum*, mais conhecidas como suculentas, também são utilizadas alguns tipos de gramíneas e herbáceas, justamente, devido a sua baixa exigência de manutenção, irrigação e sua capacidade de autorregeneração e resistência às intempéries. Nos casos das coberturas intensivas, são utilizadas vegetações de maior porte, como relva ou plantas perenes, arbustos e árvores, como apresentado por Raji, Tenpierik, e Van Den Dobbelen (2015). Os autores ainda informam que nos casos das coberturas verdes sem intensivas, a vegetação aplicada é compreendida por relvas, ervas e arbustos. Calheiros e Palha (2017) destacam ainda que a possibilidade de produção de alimentos em topo de edifícios tem sido uma realidade em diversos locais, podendo destacar, dentre eles, Tóquio, Singapura, Amsterdam, Hong Kong, Nova York e Montreal.

Diante do exposto, Oliveira, Rodrigues e Oliveira Jr. (2021) destacam que os telhados verdes são uma grande oportunidade para a inserção de espécies nativas na sociedade, colaborando com o conhecimento da flora nativa e com a conservação da biodiversidade.

#### 2.1.3.2 Substrato

A camada que está diretamente ligada à vegetação é denominada de substrato. Há uma grande variedade na composição dessa camada, todavia, todas elas devem suprir as necessidades nutricionais das plantas. O substrato funciona como o solo do jardim, apesar de possuir, normalmente, características físicas diferentes (WILLES, 2014). A espessura do substrato deve ser ideal para garantir o bom funcionamento do sistema. Além de beneficiar as plantas, esta camada tem função de retenção de águas pluviais, isolamento térmico e de som. É indispensável conhecer a capacidade de retenção de água do substrato, pois essa característica deve garantir a sobrevivência de plantas em períodos de estiagem, a redução do escoamento de água durante precipitações, prevenir vazamentos e sobrepeso no telhado devido ao acúmulo de água (LEAL, 2019; SHAFIQUE, KIM E RAFIQ, 2018; VIJAYARAGHAVAN, 2016).

O substrato caracteriza-se por possuir elevado teor de material poroso e baixo teor de matéria orgânica. Podem ser compostos por solo natural, areia, argila expandida, ardósia, diatomito, perlita, zeolite, vermiculita, poliestireno expandido (EPS) (ALBINO, 2020). Franco *et al.* (2019) utilizaram em sua pesquisa de campo a casca de arroz, vermiculita, resíduo da construção, vermicomposto, substrato comercial a base de turfa e solo natural e conseguiram obter resultados satisfatórios.

### 2.1.3.3 Camada filtrante

A camada filtrante é responsável por separar a camada drenante do substrato. É fundamental para impedir a obstrução da camada de drenagem e reter os nutrientes no substrato. Para que isso ocorra, os materiais utilizados devem ser resistentes às ações mecânicas das raízes e, simultaneamente, apresentar considerável permeabilidade à água. Normalmente, nessa camada são utilizadas mantas geotêxteis ou bidim (ALBINO, 2020; WILLES, 2014).

### 2.1.3.4 Camada de drenagem

A camada drenante tem a função de retirar o excesso de água retida no substrato - por não ter sido absorvida pelas plantas e pelo próprio substrato - e direcioná-la para o sistema de reúso, de drenagem de águas pluviais ou outro fim pré-estabelecido. A camada de drenagem contribui para que haja um equilíbrio ideal entre água e ar no sistema.

O tipo de material a ser utilizado nessa camada deve ser determinado por diversos fatores como custo, requisitos de construção, a dimensão e o tipo de cobertura. A composição da camada de drenagem se dá por material sintético, como placas alveoladas, mantas sanduíche geotêxtil, tubos ou cones perfurados, formas grelhadas ou de materiais granulares, como agregados de argila expandida, xisto expandido, tijolo triturado, cascalho grosso e lascas de pedra. (ALBINO, 2020; WILLES, 2014).

### 2.1.3.5 Camada impermeabilizante

Albino (2020) afirma que essa “camada se torna bastante importante, pois impede que a água atinja a camada de suporte evitando as indesejáveis infiltrações e possíveis penetrações das raízes da vegetação principalmente para coberturas do tipo intensivas.”

Willes (2014) explica que os materiais utilizados na camada de impermeabilização devem ser especificados em projeto, pois, existe uma grande variedade destes no mercado. Todavia, o mais utilizado dentre eles é a manta asfáltica. Mesmo que um pouco mais oneroso, um sistema de maior durabilidade de acordo com o IBI (Instituto Brasileiro de Impermeabilização) se trata da combinação de armaduras de poliéster com a manta asfáltica adicionada de polímero e herbicidas para impedir a penetração de raízes, afirmam (BORGES; MACEDO, 2022).

### 2.1.3.6 Camada de suporte

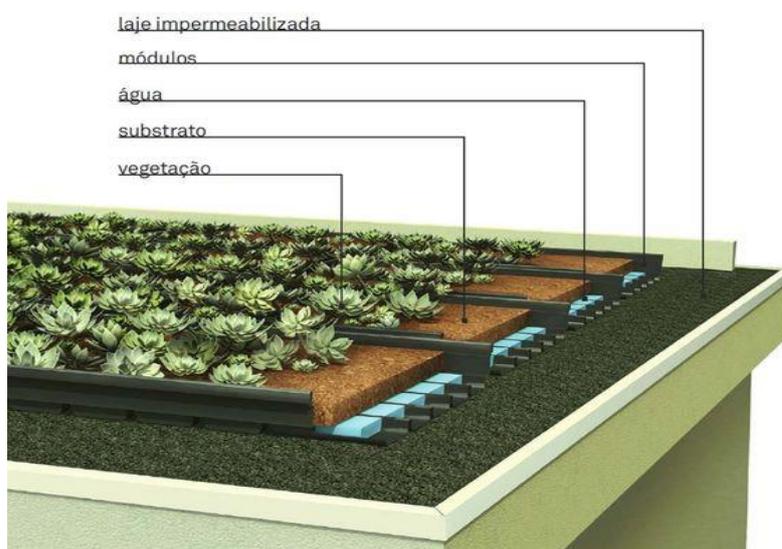
Camada de suporte ou estrutura do telhado, possui a função de suportar o telhado verde e, por isso, deve ser dimensionado para suportar seu peso quando estiver saturado. Em edificação já construídas, devem ser realizados estudos na estrutura existente, para caso necessário, realizar reforço estrutural.

Para o dimensionamento da camada de suporte devem ser previstas as ações permanentes (peso próprio do sistema saturado) e as ações variáveis (sobrecarga referente à acessibilidade na cobertura, sobrecarga de manutenção, ação do vento, neve, abalos sísmicos etc.) (LEAL, 2019).

### 2.1.4 Sistema em módulos pré-fabricados

Sistema em módulos pré-fabricados são patenteados e comercializados, os quais, permitem a montagem do sistema de cobertura através de módulos que são encaixados entre si, podendo ser transportados comportando substrato, vegetação e outros componentes do sistema contínuo. Esses sistemas facilitam a instalação rápida do telhado verde de acordo com a necessidade de cada cobertura. Além disso, podem ser compostos por materiais reciclados como fibra de coco, garrafas de Polietileno Tereftalato (PET), solas de sapato etc. (PAIVA; FERREIRA; ARAÚJO, 2018; WILLES, 2014). Como apresentado nas figuras 4 e 5, os módulos são assentes sobre a estrutura de suporte impermeabilizada.

Figura 4 - Estrutura de um telhado verde em módulos pré-fabricados



Fonte: [arkpad.com.br](http://arkpad.com.br) (2023).

Figura 5 - Módulos pré-fabricados

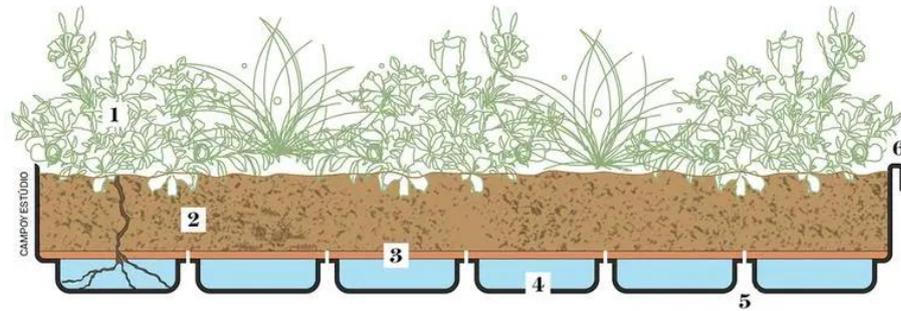


Fonte: deckdeck.com.br (2023).

Paiva, Ferreira e Araújo (2018) apresentam alguns sistemas, como o sistema modular convencional, o qual possui arranjo similar ao sistema contínuo, porém, disposto dentro de módulos, que são dispostos na estrutura da cobertura impermeabilizada e com membrana antirraízes (figura 6). As dimensões e formas dos módulos variam de acordo com o fabricante, assim também como algumas outras particularidades. Segundo os autores, esse tipo de sistema é indicado para coberturas mais planas e que possuam contenção lateral. Inclusive, necessita de irrigação inicial constante, para adaptação da vegetação. Confere carga ao sistema de, aproximadamente,  $75 \text{ kg/m}^2$  a  $110 \text{ kg/m}^2$ . Já, similar ao sistema modular convencional, diferindo, apenas, por seus módulos possuírem alvéolos, existe o sistema alveolar (figura 7), o qual permite maior retenção de água no sistema, possibilitando a utilização de uma maior variedade de plantas.

Contudo, o sistema possui, como pontos negativos, uma maior carga - aproximadamente,  $80 \text{ kg/m}^2$  -, e menor desempenho em telhados com inclinações maiores que 20%, podendo ser composto por grelha ou não na sua estrutura. E o mais pesado dos sistemas modulares mais populares é o sistema laminar (figura 8) – com uma média de  $120 \text{ kg/m}^2$  - pois, acumula uma grande quantidade de água, permitindo, assim, a escolha de uma maior variedade de plantas e uma menor frequência de irrigação. Esta irrigação acontece através de capilarização. Como desvantagem, esse sistema não permite ser utilizado em coberturas inclinadas, pois, tal fato interfere no armazenamento de água no sistema (PAIVA; FERREIRA; ARAÚJO, 2018).

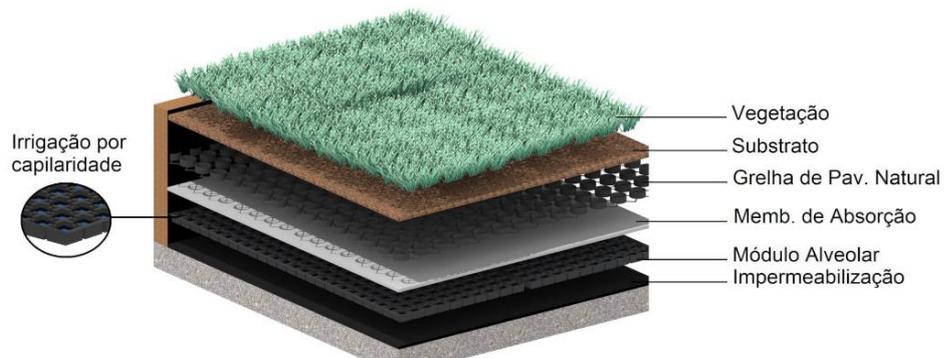
Figura 6 - Sistema Modular de um telhado verde



1. Plantas 2. Substrato leve 3. Filtro 4. Reservatórios de água 5. Sistemas de drenagem (furos nas interseções entre os módulos) 6. Haste de travamento

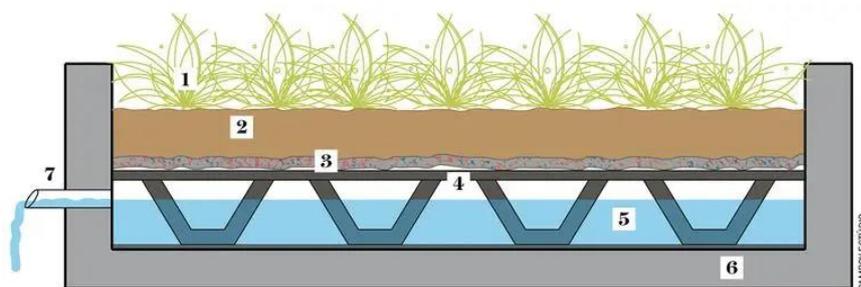
Fonte: Arquitetura e Construção (2017).

Figura 7 - Sistema de telhado verde alveolar grelhado



Fonte: ecotelhado.com (2023).

Figura 8 - Sistema de telhado verde laminar



1. Vegetação 2. Substrato 3. Membrana de absorção 4. Módulo laminar  
5. Reservatório de captação de chuva 6. Impermeabilização 7. Dreno

Fonte: Arquitetura e Construção (2017).

### 2.1.5. Condições estruturais para a implantação de um telhado verde

Um aspecto importante para implantação de um telhado verde é a sobrecarga que o novo telhado (cobertura convencional + camadas de impermeabilização + solo + vegetação + água

retida) exercerá sobre as estruturas construídas, uma vez que esta carga irá aumentar, principalmente nos dias de chuva. Desde forma, no projeto de construção ou na implantação do telhado verde, um requisito prioritário é atentar-se à carga que será exercida pelo novo telhado, visando uma construção de cobertura segura (HENEINE, 2008).

Segundo Krebs (2005), na avaliação inicial das forças exercidas em uma estrutura de telhado devem ser consideradas duas cargas: as permanentes e as acidentais. As cargas permanentes se referem ao peso de todas as camadas de regularização, impermeabilização, proteção, drenagem, substrato, dentre outras que constituem o novo telhado, somando ainda o peso da água retida e da vegetação cultivada (KREBS, 2005). Já as cargas acidentais referem-se à circulação de pessoas e máquinas para a manutenção do telhado verde ou reforma. Comprova-se neste caso que a construção extensiva é mais vantajosa que a intensiva, em virtude que não é necessária a realização de manutenções periódicas (KREBS, 2005).

De acordo com Heneine (2008), a escolha do tipo de telhado verde depende diretamente da estrutura que suporta o telhado construído. A construção de um de telhado verde extensivo em coberturas existentes é mais fácil e viável, pois este modelo exerce carga menor nas estruturas, mesmo em dias de chuva. Os modelos de cobertura extensiva e semiextensiva podem elevar a carga do telhado em níveis consideráveis.

As coberturas verdes extensivas são bem adequadas para suportar cargas menores e sendo possível adaptar em locais os quais não foram projetados para utilizar jardins de cobertura. São mais leves e podem ter sua capacidade de carga suportada pelas estruturas de cobertura existentes hoje, ao contrário das intensivas, que possuem mais peso e podem ter sérias implicações estruturais. Em novas construções deve-se verificar a necessidade de reforço para suporte do telhado no estágio do projeto, porém em construções existentes deve-se pensar na capacidade de carga da cobertura em si e somar o seu peso, assim analisando se ela está preparada ou se necessita de um reforço estrutural (HENEINE, 2008).

Screenski (2015) apresentou cálculos para as diferentes soluções, tendo em vista que diferentes espessuras dos telhados verdes implicam em sobrecargas estruturais diferentes:

- (a) Para a situação de simples cobertura impermeabilizada, sem tráfego, só proteção do sol e da chuva, foram consideradas uma sobrecarga acidental de 50 kg/m<sup>2</sup>, acrescentada da carga da impermeabilização de 100 kg/m<sup>2</sup>. Com estas informações, utilizando a NBR 6118/2014 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o engenheiro estrutural dimensionou uma estrutura com uma espessura média (ou volume) de concreto C25 (fck 25 MPa) de 12 cm por m<sup>2</sup> de laje, com um consumo de aço CA-50 de 100 kg por m<sup>3</sup> de concreto aplicado.

- (b) Para a mesma laje, com os mesmos vãos, só que agora considerando um jardim de espessura de acordo com o tipo de telhado verde extensivo (altura de 200 mm), foram consideradas uma sobrecarga acidental de 150 kg/m<sup>2</sup>, acrescentada da carga da impermeabilização de 100 kg/m<sup>2</sup>. Com estas informações, utilizando a mesma NBR 6118, a estrutura foi dimensionada com uma espessura média (ou volume) de concreto C25 de 12 cm por m<sup>2</sup> de laje, agora com um consumo de aço CA-50 de 110 kg por m<sup>3</sup> de concreto aplicado.
- (c) Ainda para a mesma laje e mesmos vãos, agora considerando um jardim de espessura de acordo com o tipo de telhado verde semi-intensivo (altura da ordem de 250 mm), foram consideradas uma sobrecarga acidental de 200 kg/m<sup>2</sup>, acrescentada da carga da impermeabilização de 100 kg/m<sup>2</sup>. A estrutura foi dimensionada com uma espessura média (ou volume) de concreto C25 de 13 cm por m<sup>2</sup> de laje, com um consumo de aço CA-50 de 110 kg por m<sup>3</sup> de concreto aplicado.
- (d) Considerando agora um jardim de espessura de acordo com o tipo de telhado verde intensivo (altura da ordem de 400 mm), para a mesma laje e mesmos vãos, considerou-se uma sobrecarga acidental de 500 kg/m<sup>2</sup>, acrescentada da carga da impermeabilização de 100 kg/m<sup>2</sup>. A estrutura foi dimensionada com uma espessura média (ou volume) de concreto C25 de 15 cm por m<sup>2</sup> de laje, com um consumo de aço CA-50 de 125 kg por m<sup>3</sup> de concreto aplicado.

Na tabela 1 estão colocadas as informações consideradas e obtidas no estudo de diversas alternativas da estrutura. Observa-se que o consumo de concreto e aço se elevam na fase de projeto e, nos casos de estrutura pré-existent, surge a necessidade de um reforço; logo, de uma forma ou de outra a variável “custo” será afetada.

Tabela 1 - Dados sobre as estruturas dos telhados verdes

<b>Tipo de telhado</b>	<b>Espessura de solo (mm)</b>	<b>Sobrecarga da cobertura verde (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Concreto (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Aço (kg/m<sup>3</sup> de concreto)</b>	<b>Aço (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Telhado convencional</b>	0,00	0,00	0,12	100,00	12,00
<b>Telhado verde extensivo</b>	200,00	250,00	0,12	110,00	13,20
<b>Telhado verde semi-intensivo</b>	250,00	312,00	0,13	110,00	14,30
<b>Telhado verde intensivo</b>	400,00	500,00	0,15	125,00	18,75

Fonte: SCRENSKI (2015).

## 2.2 Modelagem de estruturas e fundações

Nas modelagens e nos cálculos das estruturas em concreto armado, de acordo com Antoniazzi (2011), é prática comum a desconsideração de uma superfície deformável a qual suporta a base das edificações, que é, normalmente, o solo, permitindo, assim, que os dimensionamentos não sejam realistas o suficiente. É comum considerar a superfície de apoio da superestrutura como rígida e indeslocável em todas as direções, ou seja, anulam-se os graus de liberdade nos apoios. Diante disso, é imprescindível considerar as interações solo-estrutura (ISE) se tratando desse aspecto, por permitir a aferição de recalques e das rigidezes da fundação e da estrutura e garantir a funcionalidade, estabilidade e a durabilidade da obra durante toda a sua vida útil (ANTONIAZZI, 2011; GUARNIERI *et al.*, 2018; SILVA JÚNIOR, 2021).

Para Gusmão Filho (2002), há uma grande dificuldade na modelagem tanto da estrutura quanto da infraestrutura para simular diversos fatores, podendo citar:

- As propriedades reológicas dos materiais que são empregados na estrutura;
- Sequência construtiva da superestrutura;
- Carregamentos externos;
- Carregamentos nas fundações e no solo advindas da superestrutura;
- Mudanças de perfil e heterogeneidade do solo ao longo do seu perfil, o que pode gerar alteração nas tensões.

Diante de algumas soluções para modelagem de estruturas, considerando a interação solo-estrutura e representação de fatores como os citados, tem sido utilizados métodos numéricos como o método dos elementos finitos (MEF), o qual, recebe maior destaque por permitir discretizar todo o conjunto superestrutura–subestrutura–maciço de solos; inclusive, para fundações do tipo radier estaqueado, as quais, são um de seus maiores desafios (LEAL *et al.*, 2022; CRESPO, 2004).

### 2.2.1 Comportamento estrutural do radier estaqueado

Se tratando de projeto de fundações, o radier estaqueado é um tipo de fundação a qual considera a ação do contato radier-solo e radier-estacas, em contrapartida da utilização apenas das estacas, que não considera a interação do bloco de coroamento com o solo. Ainda que a NBR 6122/2019 não detalhe a utilização da fundação tipo radier estaqueado, ainda permite o

seu emprego, o qual confere ao projeto um maior ganho em capacidade de carga e rigidez do sistema de fundação (Leal *et al.*, 2022).

De acordo com Aguiar (2017), o emprego da fundação do tipo radier estaqueado é considerado viável técnica e economicamente quando um radier isolado não é capaz de absorver as cargas demandadas, quando as áreas das sapatas se aproximam umas das outras ou quando a soma das áreas destas forem maiores que a metade da área em projeção da construção, quando o solo tem baixa capacidade de carga, quando se deseja uniformizar os recalques ou em áreas sujeitas a abalos sísmicos.

Para Novak, Reese e Wang (2005), a análise do comportamento de um radier estaqueado é bastante desafiadora no sentido da interação solo-estrutura. Para isso, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma das técnicas bastante utilizadas e adequadas para análise de projetos de radiers estaqueados.

De acordo com Guarnieri *et al.* (2018), o radier estaqueado deve ser corretamente modelado de maneira que o resultado simule de forma real o comportamento do objeto de estudo. O autor ainda diz que, para os cálculos, são utilizadas algumas hipóteses para verificar a influência dos recalques de apoio em estruturas como a estudada nesse trabalho. O modelo a ser adotado na modelagem deve permitir a relação “tensão x deformação” em função dos parâmetros que dependem das propriedades mecânicas do solo. E, para comprovar a sua eficácia, o modelo deve possuir parâmetros que podem ser obtidos por meio de ensaios simples e que permitam a reprodução física e comportamental do solo.

Pinto (2021) defende que a modelagem considerando a interação solo estrutura pode ser feita basicamente através de um método mais simplificado com a hipótese de Winkler ou através de métodos computacionais que se utilizam de métodos discretos de análise.

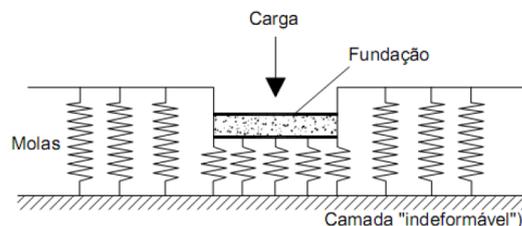
Antoniazzi (2011) ressalta que muitos modelos têm sido propostos para a análise de radier estaqueado, dentre os diversos estudados, é válido citar a hipótese de Winkler, que, em 1867 propôs um modelo que considera que as cargas que são aplicadas na superfície do solo só geram deslocamentos no ponto onde são aplicadas. Isso significa que o autor não considera o solo como um meio contínuo onde pode distribuir as tensões ao longo do seu perfil. Por isso, foi sugerida a substituição do solo por molas com rigidezes equivalentes, como por exemplo, molas discretas ao longo do fuste das fundações. Diante disso, o método de Winkler é considerado mais simples, de fácil implementação, contudo, não permite a análise de interação entre prédios vizinhos e grupos de estacas.

Dutta e Roy (2002) defendem a ideia de que os projetos devem considerar a interação solo-estrutura pelo menos com a hipótese de Winkler, a qual, apesar das limitações, é de fácil aplicação e proporciona resultados razoáveis, isto é, mais realistas (ANTONIAZZI, 2021).

### 2.2.2 Hipótese de Winkler

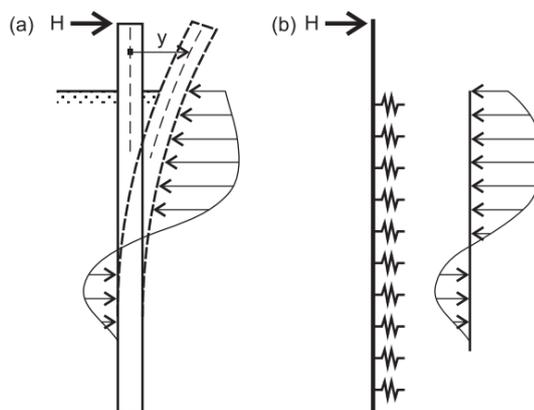
Na Hipótese de Winkler, as pressões aplicadas são diretamente proporcionais aos deslocamentos gerados. Com isso, devem ser gerados valores de coeficientes de reação para cada tipo de solo e de sistema de fundação para cada direção. A definição de uma constante de mola deve representar a rigidez do solo (figura 9) a qual é representada por  $k_v$  (Coeficiente de reação vertical, módulo de reação vertical ou coeficiente de recalque) e significa o quanto de rigidez o solo possui para resistir ao deslocamento ou recalque resultante de uma pressão aplicada (VELLOSO E LOPES, 2011). Em casos de estudo dos deslocamentos transversais de estacas, a proposta de Winkler apresenta a solução vista através da figura 10.

Figura 9 - Hipótese de Winkler, apresenta a deformabilidade do solo através de molas discretas em uma sollicitação de carga proveniente de uma fundação rasa



Fonte: Velloso e Lopes (2011).

Figura 10 - Proposta de Winkler para estacas cravadas em solo: (a) é a sollicitação transversal real e (b) é sollicitação modelada pela proposta de Winkler.



Fonte: Velloso e Lopes (2011).

O coeficiente de mola, representado por  $k_m$ , segue o mesmo raciocínio do coeficiente de rigidez do solo, contudo, funciona com uma força aplicada (ANTONIAZZI, 2021). Como apresentado nas equações 1 e 2.

$$F = K_m \cdot d \quad (1)$$

$$P = K_v \cdot d \quad (2)$$

Onde:  $F$  = Força aplicada num ponto da fundação;  $P$  = Pressão aplicada numa área da fundação;  $K_m$  = Coeficiente de mola ou apoio elástico;  $K_v$  = Módulo de reação vertical;  $d$  = deslocamento vertical ou recalque.

Destrinchando as equações, obtêm-se a equação 3, que é a relação entre coeficiente de reação vertical e o coeficiente de mola, apresentado por Scarlet (1993).

$$K_v = \frac{K_m}{A_f} \quad (3)$$

Onde:  $A_f$  = área carregada da base da fundação;

Na figura 11 é possível observar o comportamento do coeficiente de mola e do coeficiente de reação vertical.

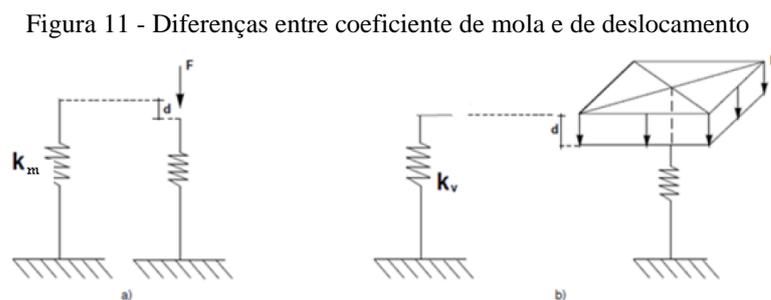


Figura 4.2- (a) coeficiente de mola, quociente entre força e deslocamento; (b) coeficiente de reação vertical, quociente entre pressão e deslocamento.

Fonte: Antoniazzi (2021).

A deformação vertical, ou recalque, pela hipótese de Winkler, também pode ser escrita de acordo com a equação 4.

$$\rho(x, y) = \frac{\sigma(x, y)}{K_v} \quad (4)$$

Onde:  $\sigma(x,y)$  = tensão de contato média na base da fundação;  $\rho(x,y)$  = deslocamento vertical ou recalque;  $K_v$  = módulo de reação vertical, o qual depende do tipo de solo.

Em casos de se admitir que a fundação permanecerá rígida mesmo após a deformação elástica do solo pode-se considerar a utilização de três molas globais no centro da fundação para deslocamentos verticais, horizontais e rotação do solo (Velloso e Lopes, 2011), assim como apresentam as equações 5, 6 e 7.

$$\rho = \frac{N}{K_{mv}} = \frac{F}{K_v \cdot A_f} \quad (5)$$

$$v = \frac{H}{K_{mh}} = \frac{H}{K_v \cdot A_f} \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{M}{K_{m\theta}} = \frac{M}{K_v \cdot A_f} \quad (7)$$

Onde:  $K_{mv}$  = coeficiente de mola para deslocamentos verticais;  $K_{mh}$  = coeficiente de mola para deslocamentos horizontais;  $K_{m\theta}$  = coeficiente de mola para rotações;  $\rho$  = deslocamento vertical;  $v$  = deslocamento horizontal;  $\varphi$  = deslocamento rotacional;  $M$  = momento;  $H$  = reação horizontal;  $N$  = reação vertical.

### ***2.2.3 Características do solo de fundação***

Conhecer as características do solo onde será implantada a edificação em estudo é imprescindível para modelar a estrutura com a maior fidelidade possível. De acordo com Antoniazzi (2021), o coeficiente  $K_v$  pode ser definido através de tabelas típicas de solo, por meio de ensaios de placa, pelo recalque estimado ou por correlações com as propriedades elásticas do maciço de solo, na ausência de dados precisos. Não se pode dizer que é o método mais adequado, todavia, torna-se uma solução com dados mais aproximados da realidade. Terzaghi (1955), adaptado de Velloso e Lopes (2011), sugere os parâmetros obtidos por meio de um ensaio de placa quadrada 30 cm x 30 cm (tabela 2). Moraes (1976), propõe os dados representados na tabela 3.

Tabela 2 - Valores de  $K_v$  ( $\text{kN.m}^{-3}$ ) definidos por Terzaghi (1955)

<b>Argilas</b>	<b>Rija</b>	<b>Muito Rija</b>	<b>Dura</b>
<b><math>q_u</math> (MPa)*</b>	0,1 a 0,2	0,2 a 0,4	> 0,4
<b>Faixa de Valores</b>	16.000 a 32.000	32.000 a 64.000	> 64.000
<b>Valor Proposto</b>	24.000	48.000	96.000
<b>Areias</b>	<b>Fofas</b>	<b>Mediamente Compacta</b>	<b>Compacta</b>
<b>Faixa de Valores</b>	6.000 a 19.000	19.000 a 96.000	96.000 a 320.000
<b>Areia acima NA</b>	13.000	42.000	160.000
<b>Areia Submersa</b>	8.000	26.000	96.000

\* $q_u$  corresponde a resistência à compressão não drenada.

Fonte: A Autora (2023).

Nota: Adaptado de Velloso e Lopes (2011).

Para a análise de recalque em argilas, pela teoria da elasticidade, pode-se considerar o solo como sendo uma camada semi-infinita, homogênea e com módulo de elasticidade constante com a profundidade  $E$ , determinado pela equação 8.

$$K_v = \frac{Es}{(1-\nu^2).B.I} \quad (8)$$

Onde:  $E_s$  = módulo de elasticidade do solo ou módulo de Young;  $\nu$  = Coeficiente de Poisson do solo;  $B$  = Menor dimensão da base da fundação;  $I$  = fator de influência da fundação.

Tabela 3 - Valores de  $K_v$  definidos por Moraes (1976)

<b>Tipos de solo</b>	<b><math>k_v</math> (<math>\text{kN.m}^{-3}</math>)</b>
<b>Turfa leve - solo pantanoso</b>	5.000 a 10.000
<b>Turfa pesada - solo pantanoso</b>	10.000 a 15.000
<b>Areia fina de praia</b>	10.000 a 15.000
<b>Aterro de silte, de areia e cascalho</b>	10.000 a 20.000
<b>Argila molhada</b>	20.000 a 30.000
<b>Argila úmida</b>	40.000 a 50.000
<b>Argila seca</b>	60.000 a 80.000
<b>Argila seca endurecida</b>	100.000
<b>Silte Compactado com areia e pedra</b>	80.000 a 100.000
<b>Silte Compactado com areia e muita pedra</b>	100.000 a 120.000
<b>Cascalho miúdo com areia fina</b>	80.000 a 120.000
<b>Cascalho médio com areia fina</b>	100.000 a 120.000
<b>Cascalho grosso com areia grossa</b>	120.000 a 150.000
<b>Cascalho grosso com pouca areia</b>	150.000 a 200.000
<b>Cascalho grosso com pouca areia compactada</b>	200.000 a 250.000

Fonte: A Autora 2023.

Nota: Adaptado de Velloso e Lopes (2011).

O fator de forma do radier (I) é obtido por meio da equação 9, em que:

$$I = I_s \times I_h \times I_d \quad (9)$$

Onde:  $I_s$  = fator de forma da fundação e de sua rigidez (no caso flexível, depende da posição do ponto: centro, bordo etc.);  $I_d$  = fator de profundidade/embutimento;  $I_h$  = fator de espessura de camada compressível.

Os fatores de forma  $I_s$  para carregamentos na superfície ( $I_d = 1,0$ ) de um meio de espessura infinita ( $I_h = 1,0$ ), apresentados por Velloso e Lopes (2011), estão na tabela 4.

Na tabela 5 estão apresentados os valores de  $I_s - I_h$  para carregamentos na superfície ( $I_d = 1,0$ ) de um meio de espessura finita, onde,  $h$  representa a espessura do meio, a corresponde a  $B/2$  e  $m = L/B$ , sendo  $L$  a dimensão da fundação no plano do momento e  $B$  a outra dimensão da fundação.

Tabela 4 - Valores de fator de forma ( $I_s$ ) para um meio de espessura infinita

Forma	Centro	Flexível		Rígido
		Borda	Média	
<b>Círculo</b>	1	0,64	0,85	0,79
<b>Quadrado</b>	1,12	0,56	0,95	0,99
<b>Retângulo</b>				
<b>L/B =1,5</b>	1,36	0,67	1,15	
<b>2</b>	1,52	0,76	1,30	
<b>3</b>	1,78	0,88	1,52	
<b>5</b>	2,10	1,05	1,83	
<b>10</b>	2,53	1,26	2,25	
<b>100</b>	4,00	2,00	3,70	
<b>1000</b>	5,47	2,75	5,15	
<b>10000</b>	6,90	3,50	6,60	

Fonte: A Autora (2023).

Nota: Adaptado de Velloso e Lopes (2011).

Segundo Guarnieri *et al.* (2018), quando não se dispõe de ensaios específicos é possível encontrarmos o módulo de deformabilidade ou elasticidade ( $E_s$ ) através de dados preexistentes, os denominados coeficientes, que, neste caso, são representados por  $\alpha$  e  $K$  – coeficientes empíricos em função do tipo de solo - os quais foram definidos por Teixeira e Godoy (1996) para definir o módulo de deformabilidade através da correção do índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ), conforme apresentam a equação 10 e a tabela 6.

$$E_S = \alpha \cdot K \cdot N_{SPT} \quad (10)$$

Tabela 5 - Valores de forma e espessura para carregamentos na superfície (Id=1) de um meio de espessura finita

h/a	Retângulo							
	Círculo	m=1	m=2	m=3	m=5	m=7	m=10	m=∞
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,2	0,096	0,096	0,098	0,098	0,099	0,099	0,099	0,100
0,5	0,225	0,226	0,231	0,233	0,236	0,237	0,238	0,239
1	0,396	0,403	0,427	0,435	0,441	0,444	0,446	0,452
2	0,578	0,609	0,698	0,727	0,748	0,757	0,764	0,784
3	0,661	0,711	0,856	0,910	0,952	0,965	0,982	1,018
5	0,740	0,800	1,010	1,119	1,201	1,238	1,256	1,323
7	0,776	0,842	1,094	1,223	1,346	1,402	1,442	1,532
10	0,818	0,873	1,155	1,309	1,475	1,556	1,619	1,758
∞	0,849	0,946	1,300	1,527	1,826	2,028	2,246	∞

Fonte: A Autora (2023).

Nota: Adaptado de Velloso e Lopes (2011).

Tabela 6 - Valores dos coeficientes  $\alpha$  e K definidos por Teixeira e Godoy (1996)

Tipo de Solo	Coefficiente $\alpha$
Areia	3
Silte	5
Argila	7
Tipo de Solo	Coefficiente K(MPa)
Areia Com Pedregulhos	1,10
Areia	0,90
Areia Siltosa	0,70
Areia Argilosa	0,55
Silte Arenoso	0,45
Silte	0,35
Argila Arenosa	0,30
Silte Argiloso	0,25
Argila Siltosa	0,20

Fonte: A Autora (2023).

Nota: Adaptado de Velloso e Lopes (2011).

### 2.2.4 Coeficiente de mola para as estacas no regime elástico linear

De acordo com Guarnieri *et al.* (2008), apesar do solo não ser um material elástico, pois não recupera o volume original ao efetuar o descarregamento dele, em análises convencionais limita-se a tensão atuante na base da fundação à tensão admissível do solo. Dessa forma, pode-se utilizar a Teoria de Winkler (equação 11).

$$K_{mf} = \frac{F}{z} = \frac{F}{K_v \cdot A_f} \quad (11)$$

Onde: F = Força normal a seção analisada;  $K_v$  = Coeficiente elástico; z = recalque;

Alves (2021) explica que a variável F equivale a carga média por estacas e que pode ser definida como o carregamento total final que vai para a fundação dividido pelo número total de estacas. Já o recalque (z) pode ser obtido através da interpolação dos dados obtidos do resultado de prova de carga estática (PCE) durante a fase de execução da obra, para os casos em que a obra já foi analisada.



Figura 12 - Maquete digital do condomínio



Fonte: A Autora (2023).

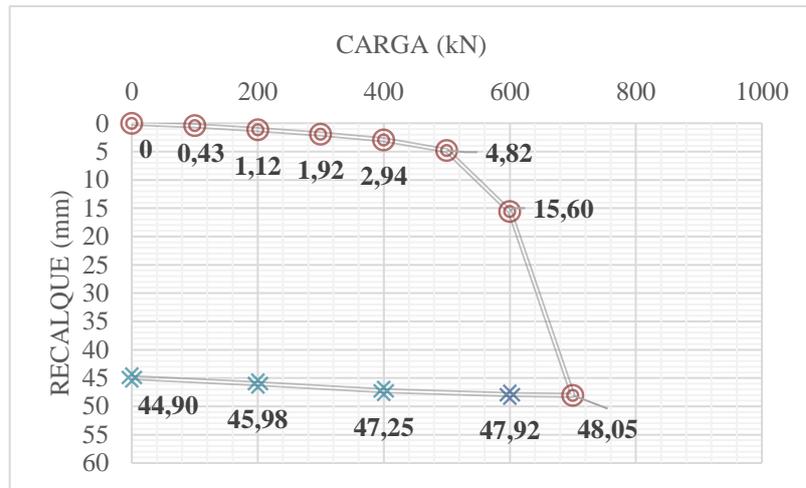
Nota: Adaptado de [www.multtecnicaengenharia.com.br](http://www.multtecnicaengenharia.com.br) (2022).

Para o levantamento geológico e geotécnico do local do empreendimento foram realizados ensaios *Standart Penetration Test* (SPT), de acordo com a norma NBR 8036/1983. No bloco 13, localizou-se o furo SP-103, ou SP03, no qual, apresentou o perfil composto por uma camada de argila siltosa de aproximadamente 10,0 m de espessura, seguido por uma camada de areia muito argilosa de 7,0 m de areia muito argilosa, e cerca de 22,0 m de espessura de uma camada de areia. Os demais dados dos outros furos e mais detalhes estão presentes no Anexo B.

Diante das características geológicas e geotécnicas do terreno do empreendimento foi determinada a utilização de radier estaqueado como solução para a fundação da edificação. Sabe-se que esse tipo de fundação é caracterizado como mista, uma vez que há a atuação em conjunto de uma fundação superficial com uma fundação profunda. Foi realizado um ensaio de prova de carga estática (PCE) no bloco residencial n.º 13 na estaca E20 devido a exigência da NBR 6122/2019, a qual obriga provas de carga em obras de fundações com mais de 100 estacas, no total. O gráfico 1, apresenta o resultado desta análise realizada por uma empresa contratada.

No ensaio, a estaca deveria ser submetida a uma carga máxima de 1000 kN, que corresponde a aproximadamente, duas vezes a carga de serviço que foi prevista para a estaca (490 kN). O carregamento seria progressivo a cada 100 kN até chegar ao valor citado anteriormente, contudo, no 7º estágio do carregamento (700 kN) a estaca apresentou um recalque elevado (48,05 mm), causando a interrupção do plano de carga até tal momento, concluindo um resultado não satisfatório para a contratada. O descarregamento foi realizado num intervalo de 200 kN.

Gráfico 1 - Curva Carga x Recalque do PCE



Fonte: A Autora (2023).

Nota: Adaptado de Silva, J. P. (2021).

Para o bloco 13, foram executadas 82 estacas pré-fabricadas em concreto com uma capacidade de carga de 86 toneladas, comprimento variando de 14,0 m a 21,0 m, possuindo seção transversal quadrada de lado correspondente a 26,5 cm, vazadas com furo de 12,0 cm de diâmetro e armadas com aço CA-50. Na fotografia 3 estão a distribuição das estacas e o radier executados.

Fotografia 3 - Disposição das estacas e construção do radier



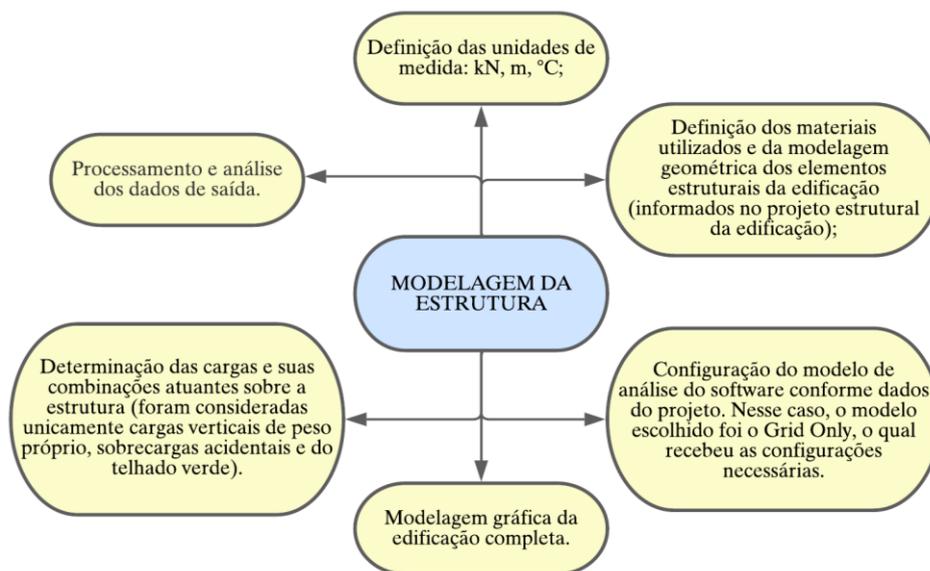
Fonte: Alves (2021).

O método construtivo adotado para este condomínio foi a execução de paredes de concreto armado moduladas *in loco*. Por projeto, os elementos estruturais constituintes da edificação são laje, paredes e radier estaqueado. Ambos, respectivamente, com as espessuras de 15,0 cm, 10,0 cm e 25,0 cm adotadas na modelagem estrutural para as análises.

### 3.2 Modelagem da estrutura e fundação

A modelagem numérica e estrutural da edificação foi realizada por Alves (2021), pelo MEF através do Software SAP 2000 (versão 16) e seguiu os parâmetros representados no fluxograma 1.

Fluxograma 1 - Modelagem numérica e estrutural



Fonte: A Autora (2023).

Alves (2021) observou que, de acordo com o projeto fornecido pela construtora, a área do radier corresponde a aproximadamente, 528,0 m<sup>2</sup> e que a área da laje é aproximadamente, 20% menor que a área do radier, totalizando um resultado de 422,4 m<sup>2</sup> por laje.

Tanto o radier em contato com o solo, quanto as estacas foram modeladas com apoios elásticos lineares, conforme proposto por Winkler (1867). Para a determinação do coeficiente de mola, através da equação 8, foi determinado o módulo de elasticidade (tabela 7). Os cálculos foram realizados por camada discriminada no ensaio SPT e depois, realizada a média ponderada entre eles para definir o módulo de elasticidade do solo.

### 3.3 Metodologia

A metodologia utilizada nesta pesquisa consistiu em determinar os cenários de tipo e carga de telhado, inserir no modelo já realizado por Alves (2021). Foi possível calcular o

acréscimo de carga e percentual de absorção dessas cargas na fundação (radier e estacas) e comparar os resultados para a utilização de cada cenário.

Tabela 7 – Obtenção do módulo de elasticidade através do ensaio SPT

MÉDIA $N_{SPT}$	K*	$\alpha^{**}$	E***	ESPESSURA
4,500	0,700	3,000	9,450	1,680
3,404	0,700	3,000	7,148	3,320
15,333	0,700	3,000	32,200	2,500
0,044	0,700	3,000	0,091	2,500
0,035	0,250	7,000	0,061	2,900
2,000	0,700	3,000	4,200	0,800
20,250	0,700	3,000	42,525	4,300

**Es - Média Ponderada (kN/m<sup>2</sup>)**

17040,590

\* Coeficiente empírico tabelado em função do tipo de solo; \*\* Coeficiente empírico tabelado em função do tipo de solo; \*\*\*módulo de elasticidade da subcamada.

Fonte: Alves (2021).

### 3.3.1 Cenários de carga

Em relação ao carregamento dos cenários com telhado verde foram considerados valores de peso específico padrões utilizados comercialmente para cada camada dos telhados verdes (tabela 8). O detalhamento das cargas está incluído no Apêndice A.

Tabela 8 – Sobrecarga adicional aos cenários com telhado verde

Cenário	2	3	4	5
<b>Carga total em kg/m<sup>2</sup></b>	200,29	339,10	500,00	700,00

Fonte: A Autora (2023).

No que tange aos tipos de coberturas verdes a serem adicionadas à laje da edificação, foram propostas as seguintes soluções separadas por cenários:

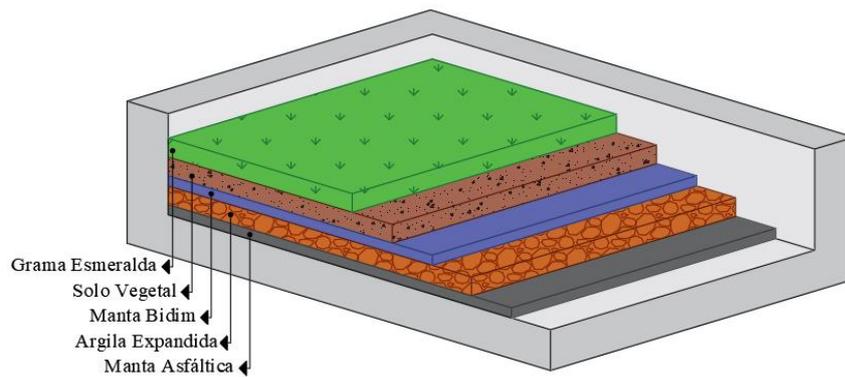
- Cenário 1: Laje convencional, em concreto armado projetada pela contratada e já analisada por Alves (2021);
- Cenário 2: Telhado verde plano e extensivo, adotado o sistema contínuo (completo) sobre a laje do Cenário 1, apresentando as seguintes camadas (figura 13):
  - Impermeabilização – manta asfáltica (Marca DRYKO);

- Camada drenante – argila expandida, espessura de 7,0 cm;
- Camada filtrante e antirraízes – manta geotêxtil bidim;
- Substrato – terra vegetal, espessura de 6,0 cm;
- Vegetação – grama esmeralda.

• Cenário 3: Telhado verde plano e extensivo, adotado o sistema contínuo (completo) sobre a laje do Cenário 1, apresentando as seguintes camadas (figura 14):

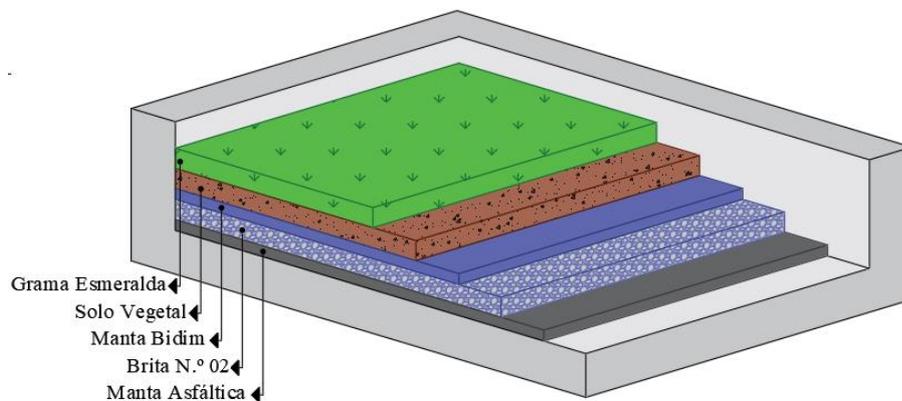
- Impermeabilização: manta asfáltica (Marca DRYKO);
- Camada drenante: brita 02, espessura de 7,0 cm;
- Camada filtrante e antirraízes: manta geotêxtil bidim;
- Substrato: terra vegetal, espessura de 6,0 cm;
- Vegetação: grama esmeralda.

Figura 13 - Cenário 02 - Modelagem do telhado verde extensivo com camada drenante de argila expandida



Fonte: A Autora (2023).

Figura 14 - Cenário 3 - Modelagem do telhado verde extensivo com camada drenante de brita n.º 2

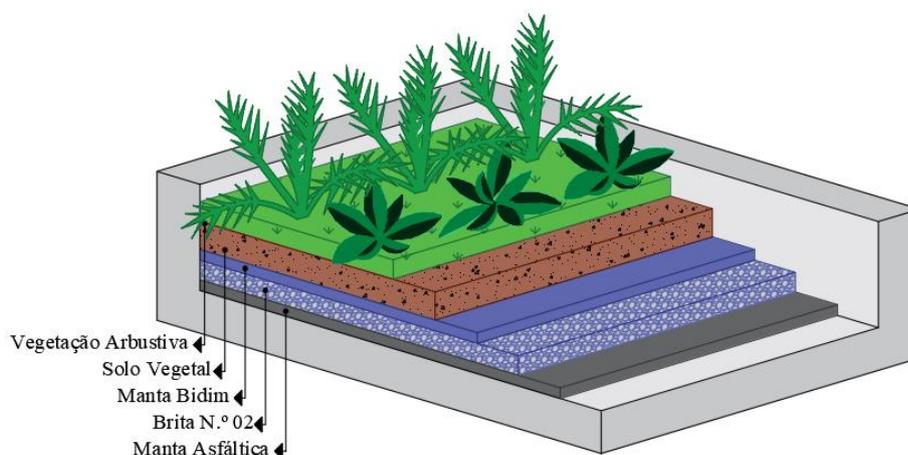


Fonte: A Autora (2023).

- Cenário 4: Telhado verde intensivo, com carga correspondente à utilizada por Screnski (2015), vegetação arbustiva de maior porte e camada drenante de brita n.º 2, adotado sobre a laje do Cenário 1 (figura 15);

- Impermeabilização – manta asfáltica (Marca DRYKO);
- Camada drenante – brita 02, espessura de 7,0 cm.
- Camada filtrante e antirraízes – manta geotêxtil bidim.
- Substrato – terra vegetal saturada, espessura de 20,0 cm.
- Vegetação arbustiva.

Figura 15 – Cenário 4 - Modelagem do telhado verde intensivo com vegetação arbustiva

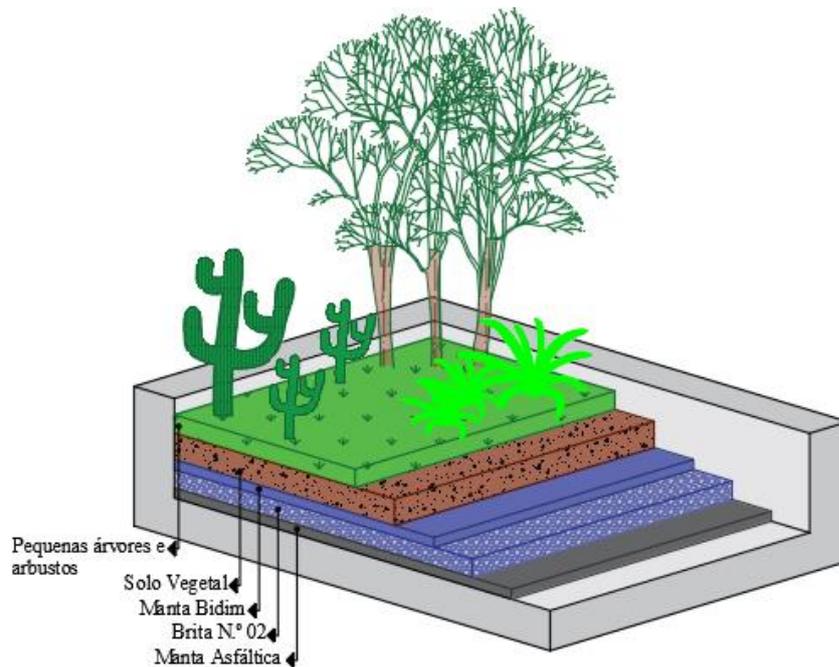


Fonte: A Autora (2023).

- Cenário 5: Telhado verde intensivo, com carga superior à utilizada por Screnski (2015), com cobertura vegetal composta por pequenas árvores e arbustos de maior porte, além da camada drenante de brita n.º 2, adotado sobre a laje do Cenário 1 (figura 16).

- Impermeabilização – manta asfáltica (Marca DRYKO);
- Camada drenante – brita 02, espessura de 7,0 cm.
- Camada filtrante e antirraízes – manta geotêxtil bidim.
- Substrato – terra vegetal saturada, espessura de 30,0 cm.
- Vegetação – pequenas árvores e arbustos.

Figura 16 – Cenário 5 - Modelagem do telhado verde intensivo com pequenas árvores e vegetação arbustiva



Fonte: A Autora (2023).

A tomada de decisão em relação às coberturas extensivas nos cenários 2 e 3 justifica-se pelas vantagens do uso de cobertura como a baixa necessidade de manutenção, menores riscos de infiltração, menor peso (a fim de evitar a necessidade de alteração no projeto estrutural) e facilidade na aquisição dos materiais necessários. A utilização da brita e argila expandida necessitaram ser comparadas, justamente, pelo fato de a brita ser um insumo extremamente comum nas obras, o que facilita no processo de aquisição por já estar presente na grande maioria dos orçamentos de obra e, normalmente, possuir um custo inferior que o da argila expandida.

No cenário 4, do tipo intensivo, foi proposta uma carga maior ao sistema, cerca de 500 kg/m<sup>2</sup>, devido a camada de substrato ser mais espessa (20,0 cm) e vegetação arbustiva de maior porte.

O cenário 5 apresenta as mesmas características de cobertura intensiva, contudo, projeção com vegetação de maior porte – pequenas árvores e arbustos, apresentando uma carga superior ao cenário 4.

Tanto o cenário 4 quanto o cenário 5 foram propostos apenas para análise de deslocamentos da fundação, uma vez que é um tipo de cobertura que demanda mais cuidados de manutenção e na estrutura, bem como apresenta maior custo.

### 3.3.2 Modelagem da estrutura em concreto armado

A modelagem no SAP 2000 foi realizada por Alves (2021) e consistiu na simulação estrutural das características já descritas em projeto estrutural - radier, paredes e lajes - foi utilizado o modelo tipo *SHELL*, bastante utilizado para elementos laminares, gerando uma malha de elementos finitos a qual é definida pelo usuário do Software. As características dos elementos estruturais e de modelagem foram definidas de acordo com a tabela 9.

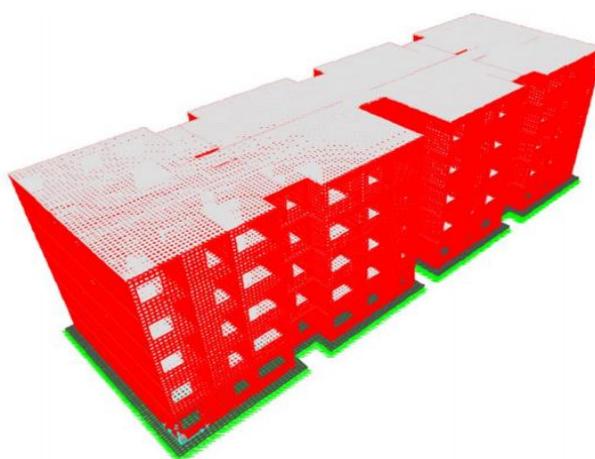
Tabela 9 - Propriedades dos elementos estruturais inseridas na modelagem na SAP 2000

Elemento Estrutural	Peso específico	Espessura (cm)	Resistência característica $f_{ck}$ (MPa)	Coefficiente de Poisson	Tipo de elemento de área	Malha (cm)
Radier	25,0	25,0	40,0	0,3	Shell	20 x 30
Parede	25,0	10,0	40,0	0,3	Shell	25 x 25
Laje	25,0	15,0	40,0	0,3	Shell	25 x 25

Fonte: Alves (2021).

A modelagem da estrutura por completo pode ser vista na figura 17. As malhas das lajes, das paredes de concreto e do radier, respectivamente, podem ser analisadas através das figuras 18, 19 e 20.

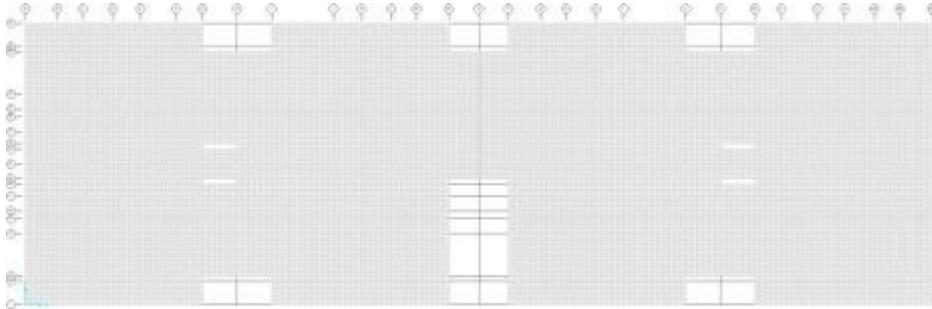
Figura 17 - Modelo numérico do Bloco 13 utilizando o SAP 2000



Fonte: Alves (2021).

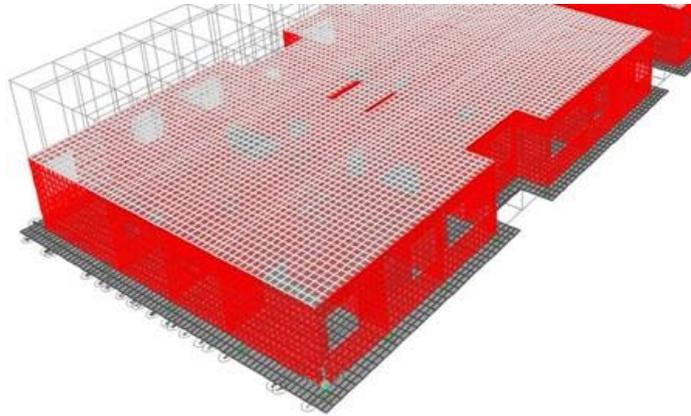
Após a modelagem, quantificando os elementos finitos, as estacas resultaram em 82 pontos, já o radier foi dividido em 10194 pontos.

Figura 18 - Malha de elementos finitos das lajes



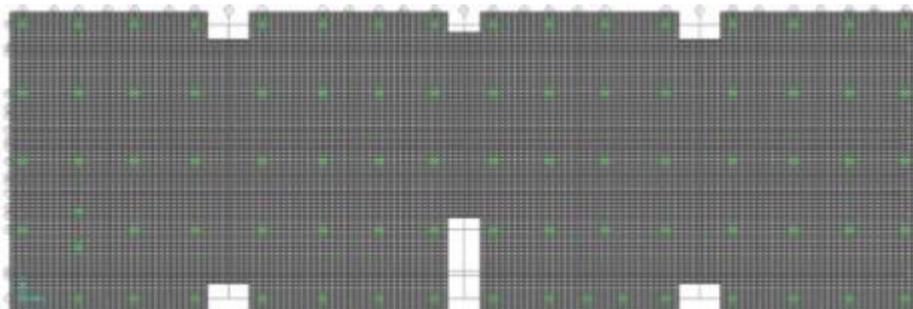
Fonte: Alves (2021).

Figura 19 - Malha de elementos finitos das paredes



Fonte: Alves (2021).

Figura 20 - Malha de elementos finitos do radier



Fonte: Alves (2021).

A partir dos dados das reações e dos deslocamentos obtidos pelo SAP 2000 foi realizada a análise estatística dos dados através do Software R. Inicialmente, foi verificada a normalidade dos dados para possibilitar a execução dos próximos testes de comparação, a fim de verificar se há ou não diferença estatística entre os resultados dos cenários fornecidos pelo SAP 2000.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo encontram-se os resultados desta pesquisa, os quais compreendem todos os recalques e as reações resultantes das análises realizadas no SAP 2000 para cada cenário, além de comparações entre eles e análise dos impactos na estrutura e no comportamento do radier estaqueado gerados pela utilização das coberturas verdes.

### 4.1 Análise de reações de apoio e recalques

#### 4.1.1 Estacas

Na modelagem numérica para análise estrutural, as estacas foram definidas por 82 pontos, sobre os quais foram apresentados as cargas e os recalques dos cinco cenários diferentes (Apêndice B). Na tabela 10 estão apresentados o somatório das cargas nas estacas em cada cenário. É possível observar a diferença entre os cenários, principalmente no tocante às reações dos apoios (cargas).

Tabela 10 – Somatório de cargas nas estacas fornecidos pelo SAP 2000

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
<b>Somatório reações (kN)</b>	24439,486	25155,837	25652,311	26227,776	26943,097

Fonte: A Autora (2023).

Foi realizada uma análise estatística dos resultados das 82 estacas, iniciando pela verificação da normalidade dos dados, através do teste de não paramétrico de Kruskal-Wallis, confirmando a hipótese de que há uma diferença significativa entre os cenários, tanto entre as cargas, quanto entre os recalques, com isso, dando-se seguimento para os testes de Wilcoxon para a carga e recalque (tabela 11).

Como todos os resultados de P-Valor dos testes em todos os cenários foram inferiores a 0,5, foi comprovada diferença estatística significativa entre os cenários. Isso significa que as cargas e os recalques, considerando todos os pontos, são significativamente diferentes entre cada tipo de cobertura. Somado a isto, nota-se que os valores de P-valor das reações e dos deslocamentos são de mesma ordem, o que representa uma boa proporcionalidade dos resultados e da relação “carga x recalque”.

Tabela 11 - Resultado do teste de Wilcoxon para comparação entre cenários dos resultados das estacas

<b>Comparação</b>	<b>Cargas (P-Valor)</b>	<b>Recalques (P-Valor)</b>	<b>Observação</b>
<b>Cenário 1 e Cenário 2</b>	0,00276	0,00279	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 1 e Cenário 3</b>	$9,896 \times 10^{-7}$	$9,974 \times 10^{-7}$	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 1 e Cenário 4</b>	$1,769 \times 10^{-11}$	$1,748 \times 10^{-11}$	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 1 e Cenário 5</b>	$< 2,2 \times 10^{-16}$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 2 e Cenário 3</b>	0,03308	0,03321	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 2 e Cenário 4</b>	$1,965 \times 10^{-5}$	$1,935 \times 10^{-5}$	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 2 e Cenário 5</b>	$5,341 \times 10^{-11}$	$5,105 \times 10^{-11}$	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 3 e Cenário 4</b>	0,01829	0,01845	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 3 e Cenário 5</b>	$8,091 \times 10^{-7}$	$8,223 \times 10^{-7}$	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 4 e Cenário 5</b>	0,00508	0,00516	Há diferença estatística entre os cenários

Fonte: A Autora (2023).

Analisando as Tabelas 12 e 13 é possível observar que as maiores discrepâncias nos valores de carga e de recalque se concentram entre a laje convencional (Cenário 1) e as coberturas intensivas (Cenários 4 e 5), com acréscimos de deslocamentos mínimos de 0,1 mm (6,90%) e 0,2 mm (9,63%) e máximos de 0,2 mm (7,36%) e 0,3 mm (10,30%), respectivamente. O que já era esperado devido a diferença de carregamento entre as coberturas. Em relação aos valores de carga pode-se observar um aumento nos valores entre o Cenário 1 e Cenário 4 com 15,13 kN (6,86%) na estaca que recebe menor carregamento e 24,72 kN (7,37%) de acréscimo na estaca que recebe maior carregamento. Interpretando a evolução do Cenário 1 e Cenário 5 houve um acréscimo mínimo de 21,18 kN (9,60%) e máximo de 34,614 kN (10,32%).

Tabela 12 - Medidas de posição dos resultados de carga e recalque nas estacas

<b>Cenários</b>	<b>Mínimo</b>	<b>3º Quartil</b>	<b>Média</b>	<b>1º Quartil</b>	<b>Máximo</b>
<b>Reações (kN)</b>					
<b>Cenário 1</b>	220,5840	311,9303	298,0425	286,1948	335,3710
<b>Cenário 2</b>	226,6450	321,2063	306,7785	294,5148	345,2750
<b>Cenário 3</b>	230,8450	327,6353	312,8331	300,2810	352,1390
<b>Cenário 4</b>	235,7140	335,0868	319,8509	306,9425	360,0950
<b>Cenário 5</b>	241,7660	344,3488	328,5744	315,2028	369,9850
<b>Deslocamentos (m)</b>					
<b>Cenário 1</b>	0,0017	0,0024	0,0023	0,0022	0,0026
<b>Cenário 2</b>	0,0018	0,0025	0,0024	0,0023	0,0027
<b>Cenário 3</b>	0,0018	0,0026	0,0024	0,0023	0,0028
<b>Cenário 4</b>	0,0018	0,0026	0,0025	0,0024	0,0028
<b>Cenário 5</b>	0,0019	0,0027	0,0026	0,0025	0,0029

Fonte: A Autora (2023).

Tabela 13 - Comparação de resultados de carga e recalque entre cenários

Comparação entre cenários	Carga			Recalques		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
Cenário 1 e Cenário 2	2,75%	2,93%	2,95%	2,78%	2,93%	2,94%
Cenário 1 e Cenário 3	4,65%	4,96%	5,00%	4,64%	4,96%	5,00%
Cenário 1 e Cenário 4	6,86%	7,32%	7,37%	6,90%	7,32%	7,36%
Cenário 1 e Cenário 5	9,60%	10,24%	10,32%	9,63%	10,25%	10,30%
Cenário 2 e Cenário 3	1,85%	1,97%	1,99%	1,81%	1,98%	2,00%
Cenário 2 e Cenário 4	4,00%	4,26%	4,29%	4,01%	4,26%	4,30%
Cenário 2 e Cenário 5	6,67%	7,10%	7,16%	6,66%	7,11%	7,15%
Cenário 3 e Cenário 4	2,11%	2,24%	2,26%	2,16%	2,24%	2,25%
Cenário 3 e Cenário 5	4,73%	5,03%	5,07%	4,77%	5,03%	5,05%
Cenário 4 e Cenário 5	2,57%	2,73%	2,75%	2,55%	2,73%	2,74%

Fonte: A Autora (2023).

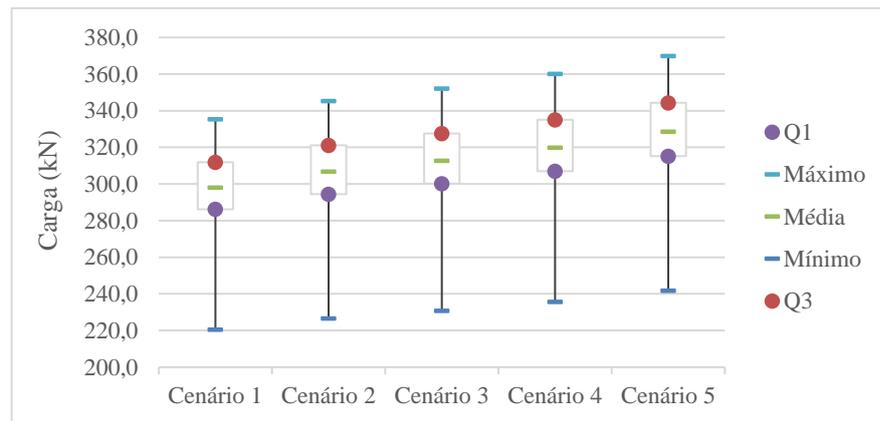
Entres os cenários com coberturas verdes a menor diferença encontra-se entre as coberturas extensivas (Cenários 2 e 3) e a maior, entre os Cenários 2 e 5. Contudo, podemos interpretar que uma cobertura intensiva com vegetação predominante de arbustos (Cenário 4) sobrecarregou a estrutura com valor máximo de apenas 7,96 kN nas estacas que recebem maior carregamento, se comparando com a cobertura extensiva do Cenário 3, sem acréscimo de recalque na ordem de  $10^{-4}$  m. O Cenário 5, o qual atribui maior carregamento na estrutura, apresentou, apenas, 17,85 kN de diferença máxima para o Cenário 3, com apenas 0,1 mm de deslocamento.

Os cenários de cobertura extensiva obtiveram pouca diferença entre si. No caso dos recalques, os resultados apresentaram valores similares. Com isso, pode-se identificar que o Cenário 3, o qual, possui a brita 02 em sua composição, pode certamente ser substituído pela cobertura do tipo intensiva de vegetação arbustiva do Cenário 4, sem acréscimo de recalque significativo.

Nos gráficos 2 e 3 foi realizado uma análise de reações para os cinco cenários estudados.

Observa-se um crescimento uniforme das reações de apoio, apresentando uma variação máxima de 115 kN no Cenário 1 e 129 kN no Cenário 5, comparando entre os valores mínimos e máximos. Isso dignifica que, mesmo com maior carga conferida à estrutura, a proporção em que cada estaca recebe o carregamento não irá variar significativamente em carregamentos de magnitude semelhante. A variação ente mínimos e máximos permanece com pouca variação em todos os cenários. A aplicação de maiores carregamentos, provavelmente não implica em sobrecarga em alguma estaca que já não estava sofrendo a mesma proporção de carregamento.

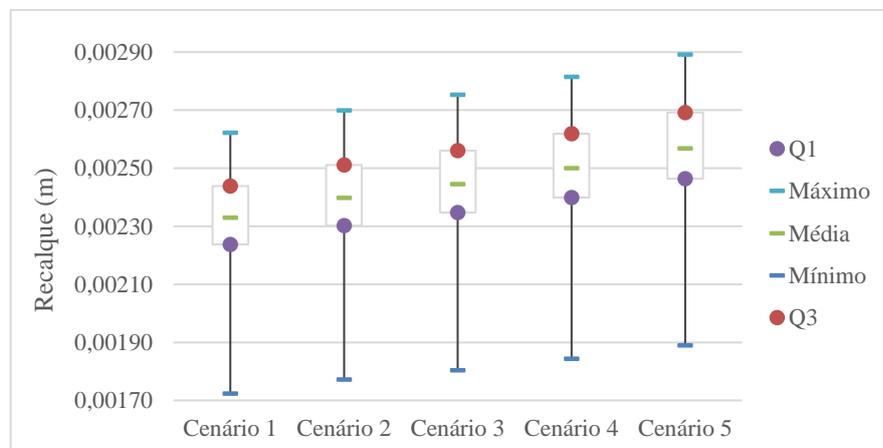
Gráfico 2 - Reações nas estacas para os cinco cenários



Fonte: A Autora (2023).

Em relação aos deslocamentos, é observada a mesma uniformidade na evolução dos recalques, isso indica que o solo resiste sem apresentar ruptura em todos os cenários apresentados. O maciço consegue equilibrar as solicitações que lhe são impostas, permitindo deslocamentos mínimos e homogêneos à estrutura.

Gráfico 3 - Deslocamentos nas estacas para os cinco cenários

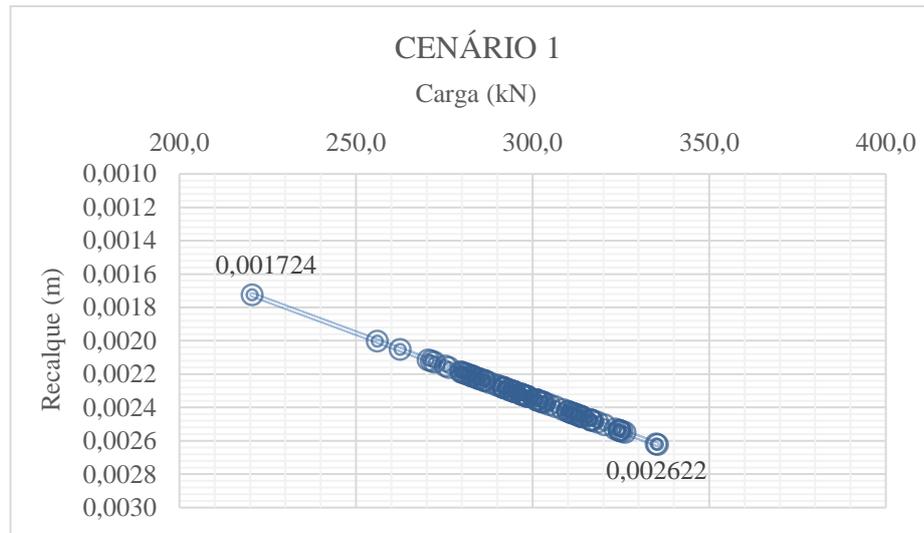


Fonte: A Autora (2023).

Nos gráficos 4, 5, 6, 7 e 8 observa-se, para os cinco cenários, a relação carga x recalque a partir dos dados fornecidos pelo software SAP 2000. O Cenário 1, apresenta um deslocamento mínimo de 1,724 mm para uma carga mínima de 220,584 kN e um deslocamento máximo de 2,62 mm para uma carga mínima de 335,37 kN (gráfico 4).

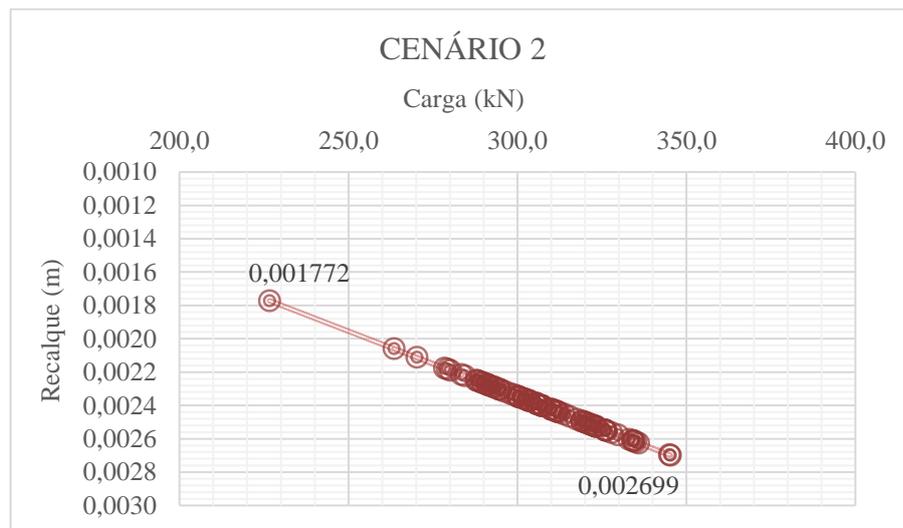
No gráfico do Cenário 2, observa-se 1,772 mm como valor mínimo de recalque e 2,699 mm para o valor máximo (gráfico 5). Já para as reações, foram obtidos os valores mínimo e máximo de 226,645 kN e 345,275 kN, respectivamente.

Gráfico 4 - Carga x recalque das estacas do Cenário 1



Fonte: A Autora (2023).

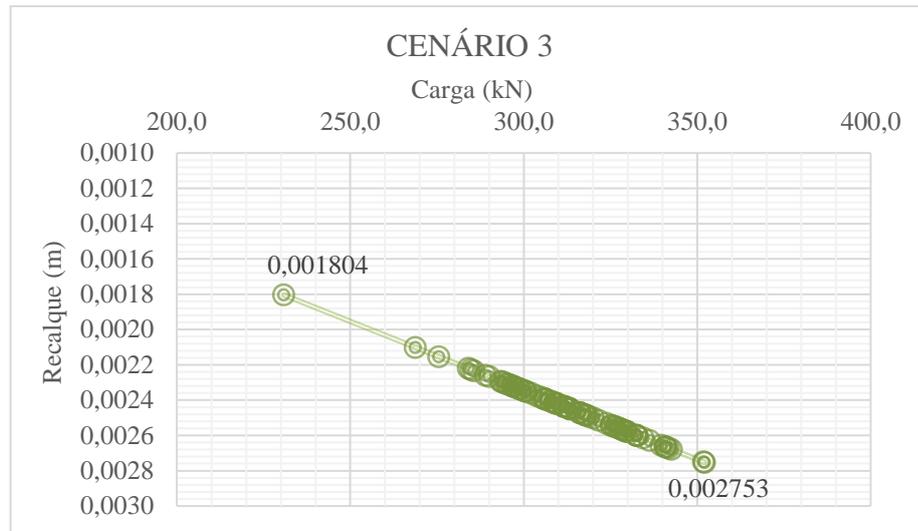
Gráfico 5 - Carga x recalque das estacas do Cenário 2



Fonte: A Autora (2023).

O gráfico 6 com os valores para o Cenário 3 apresenta os maiores valores, tanto de reação de apoio quanto de deslocamentos, obtendo um recalque mínimo de 1,804 mm para uma carga mínima de 230,845 kN e um deslocamento máximo de 2,753 mm para uma carga máxima de 352,139 kN.

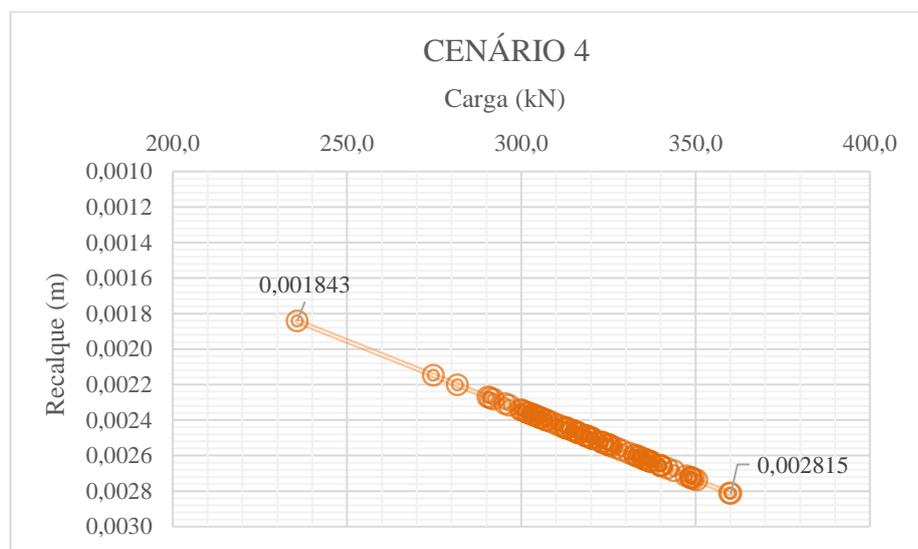
Gráfico 6 - Carga x recalque das estacas do Cenário 3



Fonte: A Autora (2023).

No gráfico 7 verifica-se um recalque mínimo de 1,843 mm e máximo de 2,815 mm, para uma diferença nas reações mínima de 235,714 kN e máxima de 360,095 kN. Ou seja, nas 82 estacas do Cenário 4, houve maior homogeneidade nos deslocamentos, com uma diferença um pouco inferior a 1,0 mm, já para as reações de carga, ouve uma diferença de 124,381 kN entre as estacas que recebem maior e menor carregamento. Isto significa que, apesar do acréscimo de carregamento ser considerável, há uma resistência também significativa aos deslocamentos nas estacas.

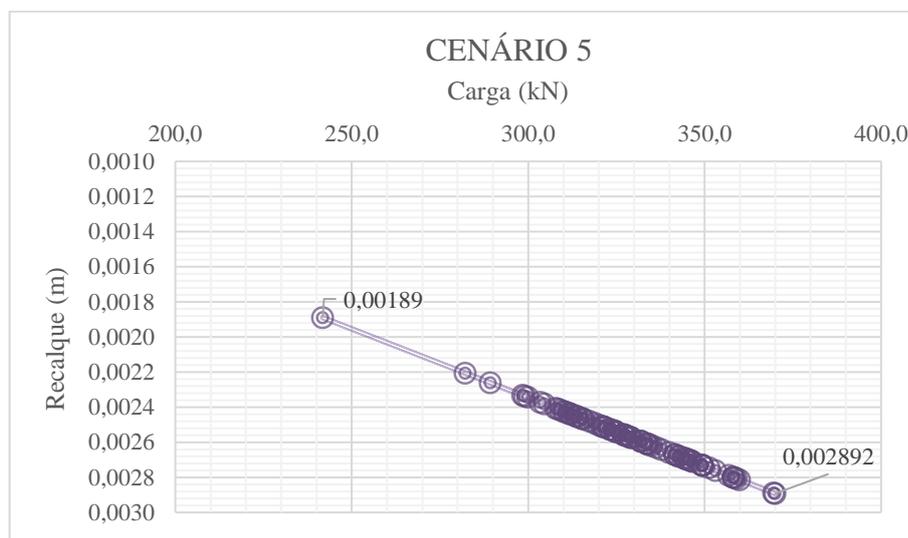
Gráfico 7 - Carga x recalque das estacas do Cenário 4



Fonte: A Autora (2023).

No Cenário 5, houve um carregamento mínimo nas estacas de 241,7660 kN e máximo de 369,9850 kN, com diferença de deslocamento de 1,0 mm, apenas, no acréscimo de 128,219 kN de carga, apresentando homogeneidade nos recalques (gráfico 8).

Gráfico 8 - Carga x recalque das estacas do Cenário 5



Fonte: A Autora (2023).

Os recalques nas estacas obtidos pelo SAP 2000, se comparados com os resultados de Silva (2021), possuem valores superiores em torno de 6,25% para o carregamento mínimo referente ao Cenário 1 de 220 kN e de 7,4% para o carregamento máximo de 379kN referente ao Cenário 5. Este autor quando estimou os recalques da mesma edificação estudada neste trabalho por métodos analíticos encontrou o valor de aproximadamente 1,6 mm de deslocamento para um carregamento de 220 kN, com os métodos de Poulos & Davis (1980) e Poulos (2000) e, aproximadamente, 2,70 mm para um carregamento de 370kN.

Silva (2021) também simulou a prova de carga estática (PCE) no PAXIS 3D pelos métodos Hardening Soil e Mohr-Coulomb os quais, apresentaram, respectivamente, para um carregamento de 200 kN, 2,37mm e 2,97mm de deslocamento. Com um carregamento de 400 kN, apresentaram um deslocamento de 5,3mm e 7,4mm. Deslocamentos superiores aos apresentados pelo SAP 2000 e pela própria PCE realizada em campo.

#### 4.1.2 Radier

Para o radier, o SAP 2000 forneceu 10194 pontos, contudo, pela grande quantidade de dados, os testes estatísticos podem incorrer a um falso negativo, conhecido como erro tipo I na

estatística (LIMA JR & GARCIA, 2021), ou seja, sempre negar a possibilidade de igualdade de resultados entre os cenários analisados, por isso, os testes foram realizados através de amostra aleatória de tamanho 100.

O carregamento total no radier para cada cenário foi contabilizado a partir do somatório das cargas nos 10194 pontos fornecidos pelo SAP 2000 e está descrito na tabela 14. Contudo, para as análises estatísticas, a amostra aleatória foi a utilizada.

Em relação a carga do radier, para checar a normalidade dos dados, foi utilizado o teste de Anderson Darling; como o P-valor apresentou-se inferior 0,05, os dados não seguem a distribuição normal. Diante disso, foi o utilizado o teste não paramétrico de Wilcoxon, para a comparação entre os cenários. Analisando a tabela 15, nota-se que os resultados para P-valor das comparações de carga e recalque entre os Cenários 1 e 2 e os Cenários 3 e 4 foram incoerentes por se apresentarem superiores a 0,05. Pois, é possível observar a diferença de carga entre os cenários na tabela 14. Tal falha pode ter ocorrido pela amostra de tamanho 100 ainda ser extensa para a análise do Software. Contudo, as comparações entre as médias ainda podem ser feitas e deduzidas de forma simples, como exposto na tabela 16, a qual, apresenta os valores de mínimo, máximo, primeiro e terceiro quartis e a média para reações e recalques nos cinco cenários.

Tabela 14 - Somatório de cargas no radier fornecidos pelo SAP 2000

	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>	<b>Cenário 4</b>	<b>Cenário 5</b>
<b>Somatório reações (kN)</b>	6439,614	6625,695	6754,660	6904,158	7089,955

Fonte: A Autora (2023).

Tabela 15 - Resultado do teste de Wilcoxon para comparação entre cenários dos resultados do radier

<b>Comparação</b>	<b>Cargas (P-Valor)</b>	<b>Recalques (P-Valor)</b>	<b>Observação</b>
<b>Cenário 1 e Cenário 2</b>	0,19870	0,19910	Não há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 1 e Cenário 3</b>	$1,871 \times 10^{-5}$	$1,893 \times 10^{-05}$	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 1 e Cenário 4</b>	$1,471 \times 10^{-4}$	$1,415 \times 10^{-4}$	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 1 e Cenário 5</b>	$4,509 \times 10^{-9}$	$4,286 \times 10^{-9}$	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 2 e Cenário 3</b>	0,00347	0,00333	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 2 e Cenário 4</b>	0,01097	0,01093	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 2 e Cenário 5</b>	$1,624 \times 10^{-6}$	$1,586 \times 10^{-6}$	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 3 e Cenário 4</b>	0,74430	0,73970	Não há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 3 e Cenário 5</b>	0,02929	0,02929	Há diferença estatística entre os cenários
<b>Cenário 4 e Cenário 5</b>	0,00719	0,00719	Há diferença estatística entre os cenários

Fonte: A Autora (2023).

Na tabela 16 constam os valores de mínimo, máximo, primeiro e terceiro quartis e a média para reações e recalques nos cinco cenários. Na tabela 17 observa-se a diferença entre esses valores. Observa-se a diferença entre os cenários de carga do radier apresentou uma porcentagem de 2,78% para valores mínimos e 10,42% para valores máximos, considerando todos os cenários. Para os deslocamentos, a variação iniciou com 2,84% para os mínimos e finalizou com 10,42% para os deslocamentos máximos.

Tabela 16 - Medidas de posição dos resultados de carga e recalque no radier

Cenários	Mínimo	3º Quartil	Média	1º Quartil	Máximo
<b>Reações (kN)</b>					
<b>Cenário 1</b>	0,5030	0,6708	0,6293	0,5855	0,7310
<b>Cenário 2</b>	0,5170	0,6908	0,6474	0,6015	0,7530
<b>Cenário 3</b>	0,5270	0,7048	0,6600	0,6133	0,7680
<b>Cenário 4</b>	0,5380	0,7208	0,6746	0,6263	0,7860
<b>Cenário 5</b>	0,5530	0,7400	0,6927	0,6423	0,8080
<b>Deslocamentos (m)</b>					
<b>Cenário 1</b>	0,0019	0,0026	0,0024	0,0023	0,0028
<b>Cenário 2</b>	0,0020	0,0027	0,0025	0,0023	0,0029
<b>Cenário 3</b>	0,0020	0,0027	0,0025	0,0024	0,0030
<b>Cenário 4</b>	0,0021	0,0028	0,0026	0,0024	0,0030
<b>Cenário 5</b>	0,0021	0,0029	0,0027	0,0025	0,0031

Fonte: A Autora (2023).

Tabela 17 - Comparação de resultados entre cenários

Comparação	Carga			Recalques		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
<b>Cenário 1 e Cenário 2</b>	2,78%	2,88%	3,01%	2,84%	2,88%	2,98%
<b>Cenário 1 e Cenário 3</b>	4,77%	4,87%	5,06%	4,85%	4,88%	5,07%
<b>Cenário 1 e Cenário 4</b>	6,96%	7,19%	7,52%	7,12%	7,19%	7,44%
<b>Cenário 1 e Cenário 5</b>	9,94%	10,06%	10,53%	9,96%	10,07%	10,42%
<b>Cenário 2 e Cenário 3</b>	1,93%	1,94%	1,99%	1,96%	1,94%	2,03%
<b>Cenário 2 e Cenário 4</b>	4,06%	4,20%	4,38%	4,16%	4,19%	4,34%
<b>Cenário 2 e Cenário 5</b>	6,96%	6,99%	7,30%	6,92%	6,99%	7,23%
<b>Cenário 3 e Cenário 4</b>	2,09%	2,21%	2,34%	2,17%	2,21%	2,26%
<b>Cenário 3 e Cenário 5</b>	4,93%	4,95%	5,21%	4,87%	4,95%	5,09%
<b>Cenário 4 e Cenário 5</b>	2,79%	2,68%	2,80%	2,65%	2,69%	2,77%

Fonte: A Autora (2023).

Comparando os tipos de cobertura entre si, observa-se que, para as coberturas extensivas, mesmo a cobertura de maior carregamento, com camada de drenagem composta por brita n.º 02, apresenta uma sobrecarga geral de 314,544 kN e pontual de, variando de 0,024 a

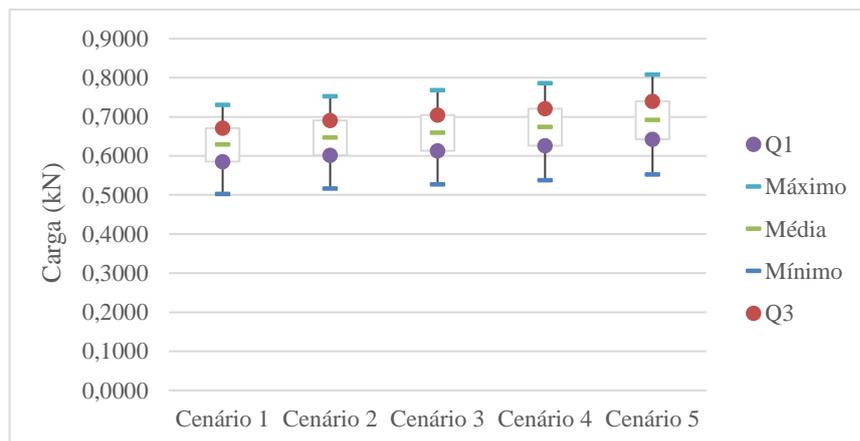
0,037 kN. Para o recalque, o acréscimo variou de 0,1 a 0,2 mm. O Cenário 3 acaba diferindo do Cenário 2 (camada drenante de argila expandida) pelo facto de apresentar recalque constante de 0,1 mm e carregamento variando entre 0,014 e 0,022 kN com o Cenário 1.

Para as coberturas intensivas, obviamente, foram encontrados maiores valores para cargas e recalques. Comparando as cargas com o Cenário 1, o Cenário 4 (cobertura intensiva arbustiva) apresentou reações variando de 0,035 kN a 0,055 kN, enquanto o Cenário 5 (cobertura intensiva com árvores de pequeno porte e arbustos) apresentou um aumento nas reações de carga entre 0,050 kN a 0,077 kN. Para os deslocamentos, o Cenário 4 apresentou 0,02 mm de variação nos deslocamentos, já o Cenário 5, acrescentou de 0,02 mm a 0,03 mm nos deslocamentos apresentados pelo Cenário 1.

Observa-se então, que as maiores diferenças de todos os cenários em relação ao Cenário 1 (Laje plana impermeabilizada) referem-se às reações nos apoios ou pontos (como o SAP 2000) e ainda assim, são da ordem de  $10^{-2}$  kN. Os recalques variam sucintamente, e na ordem de  $10^{-2}$  mm, tanto nas coberturas extensivas quanto nas coberturas do tipo intensiva.

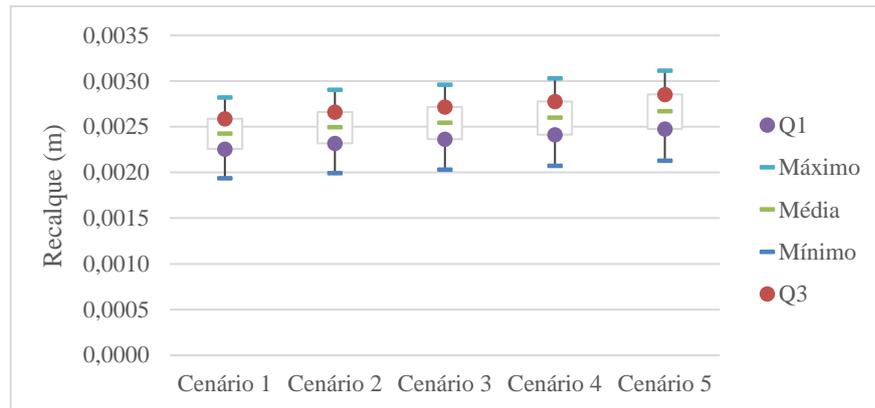
Nos gráficos 9 e 10 estão apresentadas as reações de apoio e recalques, respectivamente. Observa-se que a maior diferença entre os carregamentos é inferior a 0,1 kN (gráfico 9) e uma flutuação singela entre os deslocamentos dos cenários com valor inferior a 0,5 mm (gráfico 10).

Gráfico 9 - Reações no radier para os cenários 1, 2 e 3



Fonte: A Autora (2023).

Gráfico 10 - Deslocamentos no radier para os cenários 1, 2 e 3



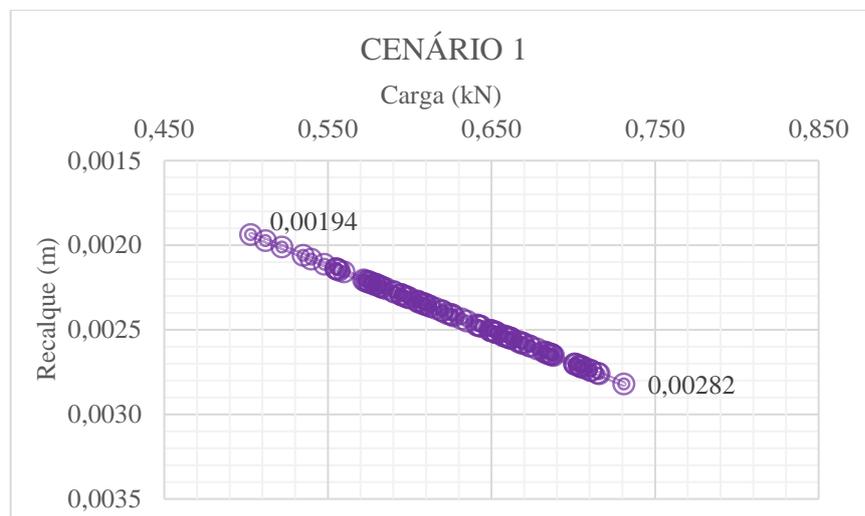
Fonte: A Autora (2023).

Nos gráficos 11 e 12 podem ser analisadas as relações “carga x recalque” para cada cenário.

No Cenário 1 observa-se um recalque mínimo de 1,94 mm resultado de uma solicitação de 0,503 kN e um deslocamento de 2,82 mm para uma carga de 0,731 kN (gráfico 11).

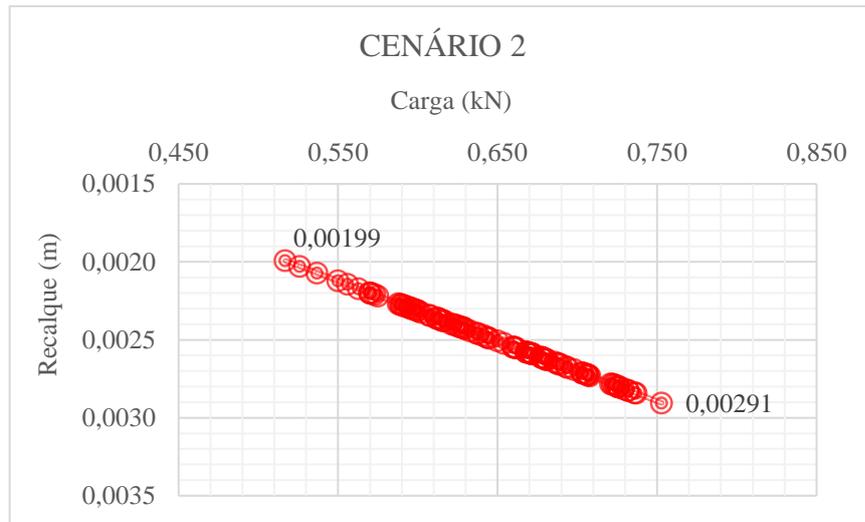
No Cenário 2, os recalques variaram entre 1,99 mm e 2,91 mm (gráfico 12). Entre as cargas houve uma variação de mínimo para máximo de 0,517 kN para 0,753 kN (tabela 16).

Gráfico 11 - Carga x recalque do radier do Cenário 1



Fonte: A Autora (2023).

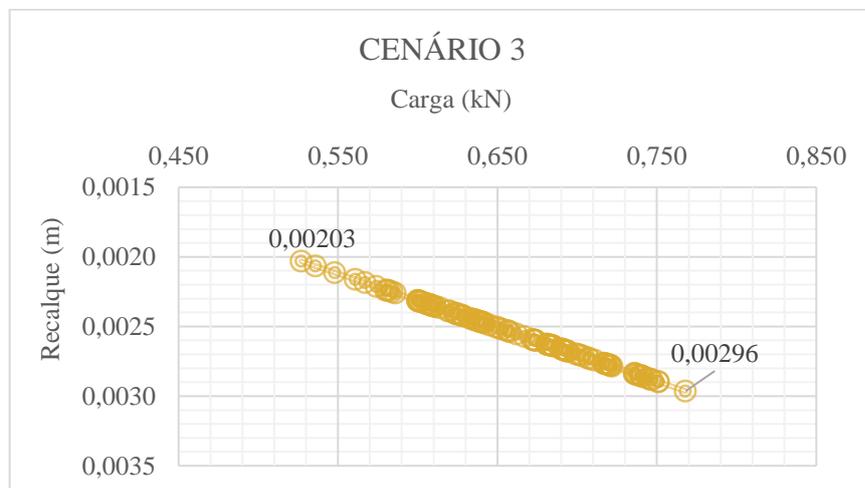
Gráfico 12 - Carga x recalque do radier do Cenário 2



Fonte: A Autora (2023).

Os recalques do Cenário 3 variaram entre 1,8 mm e 2,8 mm, ou seja, tiveram um aumento de 1 mm a uma diferença de carga de aproximadamente, 0,241 kN entre a carga máxima e mínima (gráfico 13).

Gráfico 13 - Carga x recalque do radier do Cenário 3

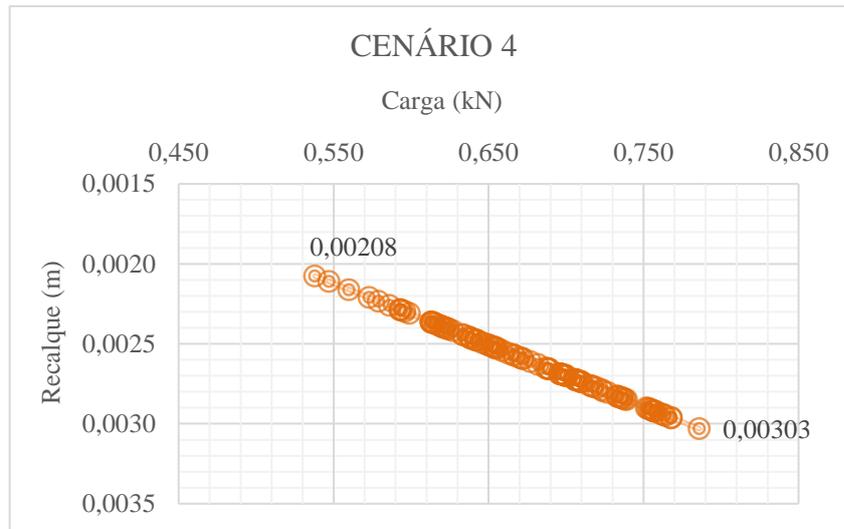


Fonte: A Autora (2023).

No gráfico 14 encontrou-se uma variação de 0,95 mm para uma diferença de carregamento de 0,248 kN referentes ao Cenário 4.

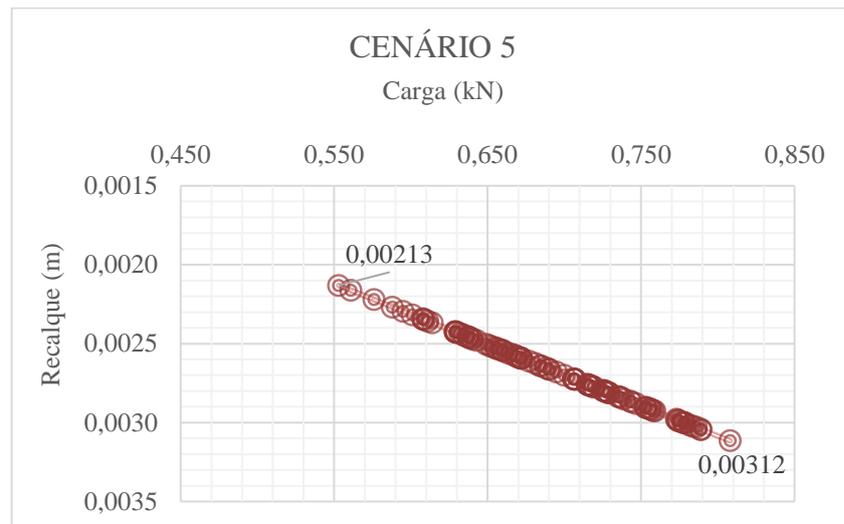
No Cenário 5 (gráfico 15) foi verificada uma variação de 0,99 mm entre os recalques para um carregamento de 0,255 kN.

Gráfico 14 - Carga x recalque do radier do Cenário 4



Fonte: A Autora (2023).

Gráfico 15 - Carga x recalque do radier do Cenário 5



Fonte: A Autora (2023).

O carregamento dos radiers, apresentou-se inferior a alguns dos resultados apresentados na Tese de Doutorado de Patrício (2019), os quais apresentaram 4,1 mm de deslocamento para 63,6 kPa de carregamento em radiers de concreto armado, assentes sobre solo com características argilosas.

#### 4.1.3 Análise radier x estacas

Como o radier estaqueado foi criado para trabalhar em conjunto, sabe-se que as estacas e o radier absorvem as solicitações de forma diferente. É possível observar que para todos os

cenários o radier absorve apenas 21% da carga total enquanto as estacas absorvem os 79% restantes (tabela 18). O que é positivo, pelas características do solo da região necessitarem que as fundações profundas resistam às maiores solicitações.

Tabela 18 - Cargas absorvidas pelos elementos do radier estaqueado

		<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>	<b>Cenário 4</b>	<b>Cenário 5</b>
<b>Somatório reações (kN)</b>	<b>Radier</b>	6439,614	6625,695	6754,66	6904,158	7089,955
<b>% em relação ao total</b>	<b>Radier</b>	21	21	21	21	21
<b>Somatório reações (kN)</b>	<b>Estacas</b>	24439,486	25155,837	25652,311	26227,776	26943,097
<b>% em relação ao total</b>	<b>Estacas</b>	79	79	79	79	79
<b>Total (kN)</b>		<b>30879,1</b>	<b>31781,53</b>	<b>32406,97</b>	<b>33131,934</b>	<b>34033,05</b>

Fonte: A Autora (2023).

Diante dos dados apresentados é possível observar e realizar uma simples comparação entre os resultados radier x estacas. Como a quantidade de pontos do radier é significativamente maior que a quantidade de pontos das estacas observa-se uma diferença na ordem de  $10^3$  nas reações dos pontos dos elementos construtivos, com resultados maiores nas estacas.

É possível observar também, que os recalques são muito similares entre os pontos do radier e das estacas. No entanto, a diferença maior está entre os recalques mínimos, onde o radier inicia com, pelo menos, 12,8% de deslocamento a mais que as estacas. Nos recalques máximos, a diferença é de 7,6%. É importante frisar que os recalques são semelhantes, apesar das cargas em cada apoio elementos serem extremamente divergentes, como já foi citado. Isso só reforça a maior capacidade das estacas a resistir aos esforços.

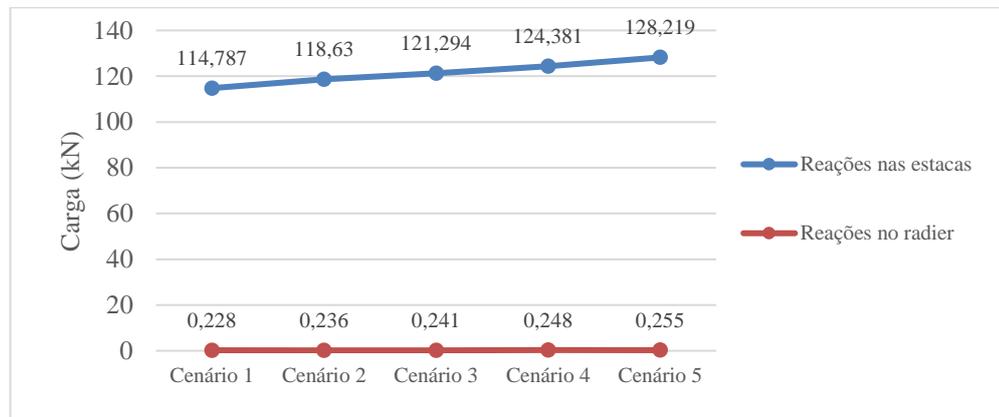
Nas diferenças entre os cenários, ambos os elementos foram similares quanto às variações, contudo, o radier apresentou valores um pouco maiores, principalmente nos recalques mínimos. Ou seja, na menor solicitação em um ponto do radier o nó já desloca mais que uma carga significativamente maior solicitando uma estaca. Todavia, vale ressaltar que as rigidezes dos pontos são bastante diferentes, como visto na metodologia. É possível visualizar na tabela 19 o aumento do recalque à medida do aumento de carga entre os cenários. No gráfico 16 é representada a evolução das reações dos cenários do radier estaqueado.

Tabela 19 - Variação entre máximos e mínimos de carga e recalques nos elementos do radier estaqueado

Estacas	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
$\Delta F$ (kN)	114,7870	118,6300	121,2940	124,3810	128,2190
$\Delta d$ (mm)	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0
Radier	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
$\Delta F$ (kN)	0,2280	0,2360	0,2410	0,2480	0,2550
$\Delta d$ (mm)	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0

Fonte: A Autora (2023).

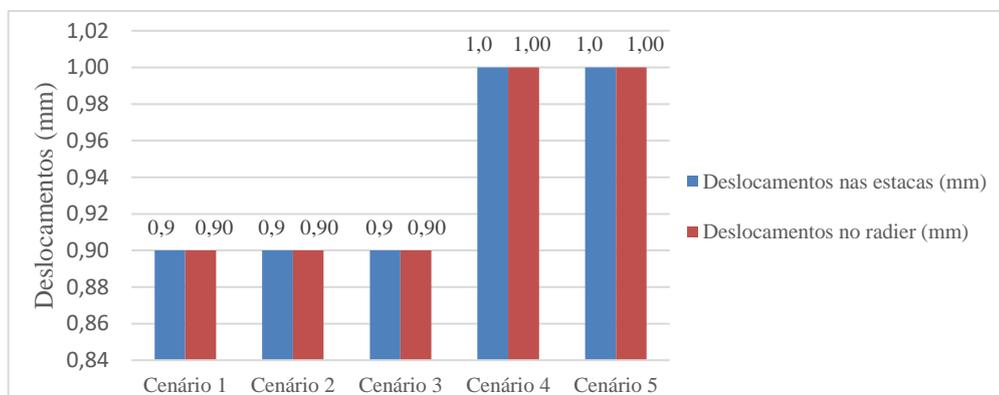
Gráfico 16 - Evolução das reações dos cenários do radier estaqueado



Fonte: A Autora (2023).

No gráfico 17 observa-se a variação dos recalques ao longo dos cenários para o radier estaqueado. O gráfico de barras foi o mais adequado para a observação do comportamento semelhante do radier e das estacas.

Gráfico 17 - Evolução dos recalques dos cenários no radier estaqueado



Fonte: A Autora (2023).

Observa-se o mesmo acréscimo de recalque nos Cenários 1 ao 3 e nos Cenários 4 e 5. É importante salientar que o radier desloca o equivalente às estacas às solicitações bem menores, como já discutido anteriormente. Fomentando a teoria de que o radier é elemento menos resistente do conjunto radier estaqueado.

Após todos os resultados apresentados, observa-se que os deslocamentos obtidos no SAP 2000 são inferiores aos resultados da prova estática realizada em campo, contribuindo para a implantação dos telhados verdes no empreendimento, uma vez que não irá gerar impactos de grande influência na estrutura.

#### **4.2 Considerações finais quanto a implantação das soluções de telhado verde**

A partir de todos os dados de carga e recalque, pode-se entender que a, se tratando de carregamento, é possível a utilização de cobertura verde de qualquer cenário analisado no empreendimento, pois os acréscimos de recalques foram aceitáveis.

Levando em conta as características próprias dos tipos de telhado verde, sabe-se que os tipos de telhados intensivos (Cenários 4 e 5) conferem maior carga e recalque, contudo apresenta um ótimo enriquecimento ambiental, promove um ambiente recreativo para a população, apresenta uma ótima retenção de CO<sub>2</sub> e ajuda na redução do escoamento superficial da localidade em que está inserido. Contudo, as desvantagem desse tipo de cobertura apresenta um enorme obstáculo na utilização, que é a alta probabilidade de infiltração, devido a sua maior capacidade de retenção da água, a necessidade de cuidados na manutenção da vegetação e do funcionamento do sistema de drenagem e de irrigação do sistema; há, também, uma grande possibilidade de reforço na laje de contenção da cobertura, para garantia do suporte de carga - o que não foi estudado neste trabalho - e instalação de dispositivos de suporte e segurança para os usuários do ambiente, uma vez que a cobertura de laje não foi projetada para utilização recorrente de pessoas.

Considerando os Cenários 2 e 3 que apresentam os tipos de cobertura verde extensiva, sabe-se que é um tipo de cobertura mais leve, a qual conferiu menores recalques e reações de apoio; por ter uma camada de substrato menos espessa, apresenta menor potencial de infiltração; por comportar vegetação de menor porte, necessita de menos manutenção e irrigação e se torna menos atrativa para o acesso recorrente de pessoas, o que pode descartar a necessidade de estruturas de suporte e segurança para os moradores, tornando sua implantação menos oneroso. Contudo, pelos menos motivos já citados, pode apresentar menor sequestro de carbono e retenção de água pluvial, correndo o risco de não contribuir para a redução do

escoamento superficial como o esperado; contudo, este assunto, também deve ser mais bem estudado.

Destaca-se, então, a importância de planejamento de coberturas verdes durante a fase de projeto a fim de evitar possíveis impedimentos quanto ao tipo de telhado a ser utilizado, bem como, gastos financeiros desnecessários. Nesse caso, os resultados foram satisfatórios, contudo, é possível situações em que não seja. Em caso de imóveis existentes é importante o estudo da estrutura como um todo, além da fundação para que transtornos futuros sejam evitados.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo traz a conclusão e o fechamento das concepções desenvolvidas ao longo desta pesquisa, a partir dos resultados apresentados, bem como sugestões para o prosseguimento do estudo em trabalhos futuros ou desenvolvimentos de novos temas que podem ser trabalhados tendo esta pesquisa como suporte.

Diante dos dados apresentados, foi possível verificar estatisticamente os resultados e comprovar, apesar dos valores serem significativamente pequenos, que existe diferença estatísticas nos resultados de reações de apoio e recalques nos cenários propostos.

Os cenários de sobrecarga e recalques apresentaram-se satisfatórios, principalmente na evolução de carregamento. Tendo a maior diferença – o que já era esperado - entre os Cenários 5 e 1, de, aproximadamente, 10,30% para as reações de apoio e os recalques, significando 34,6 kN e 0,27 mm, respectivamente, para as estacas e 0,077 kN e 0,29 mm para o radier.

Outro ponto positivo a ser observado é o comportamento dos cinco cenários com a implantação do radier estaqueado no empreendimento ter apresentado melhores números que a prova de carga estática realizada *in situ*, a qual não apresentou resultados satisfatórios até determinado ponto. Isso pode ser visto através dos gráficos de carga x recalque de todas as situações mencionadas.

Todas as coberturas verdes, inclusive os cenários de cobertura intensiva, podem ser utilizados no empreendimento no âmbito do comportamento da fundação. Todavia, as coberturas do tipo intensiva apresentam maiores dificuldades de instalação e manutenção da cobertura e da estrutura, por isso, apesar de apresentarem bons resultados de recalques e carregamentos, dificilmente esse tipo de cobertura seria implantado no empreendimento, o que resta como opção mais aceitável as coberturas dos Cenários 2 e 3, destacando a cobertura do Cenário 3, a qual utiliza brita n.º 02, pois, além dos benefícios ambientais que a cobertura propõe, como conforto térmico, redução do efeito ilha de calor, sequestro de carbono, redução do escoamento superficial, a utilização da brita na constituição das coberturas verdes, facilita a implantação destes sistemas, pelo custo e disponibilidade acessível na região, além de ser um material sempre cotado nas planilhas orçamentadas de obra, diferente da argila expansiva, a qual é mais utilizada em paisagismo e jardinagem mas, não em todos os empreendimentos.

Como o empreendimento estudado neste trabalho faz parte do programa Minha Casa, Minha Vida, é notória a viabilidade na consideração de telhados verdes do tipo extensivo para construções populares, uma vez que não exigirá reforço na estrutura e na fundação devido às solicitações de carga e os recalques serem mínimos, fomentando a implantação de tecnologias

ambientalmente favoráveis a baixo custo e grandes proporções, pelo fato da modalidade Minha Casa Minha Vida ter crescido em grandes proporções em todo o Brasil, abrangendo grandes áreas. Quanto maior a área de implantação dos telhados verdes, maior a proporção de benefícios ao ambiente em que eles estão inseridos.

Como sugestão para trabalhos futuros, podem ser destacadas as análises a seguir:

- Estudar, de forma mais aprofundada, as contribuições ambientais que os cenários propostos nesta pesquisa podem oferecer à região (sequestro de carbono, redução de ilha de calor, redução do escoamento superficial etc.).
- Aos impactos gerados pela implantação de telhados verdes em conjuntos habitacionais horizontais populares, como o Minha Casa, Minha Vida.
- Realizar um levantamento orçamentário e comparativo entre as coberturas verdes as quais podem ser utilizadas sem impactar negativamente o orçamento do empreendimento estudado nesse trabalho.
- Analisar os impactos de sobrecarga gerada por diferentes tipos de coberturas verdes em edificações com outros tipos de fundações e solo.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. V. A. **Estudo paramétrico sobre recalque de radiers estaqueados utilizando o Método dos Elementos Finitos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2017. Disponível em: <http://tede2.unicap.br:8080/handle/tede/982>. Acesso em: 7 out. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8036: Programação de Sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.
- ALBINO, P. F. D. V. **Importância do Substrato no Comportamento Higrotérmico das Coberturas Verdes**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiente) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Portugal, 2020. Disponível em: <https://eg.uc.pt/bitstream/10316/90138/1/Import%C3%A2ncia%20do%20Substrato%20no%20Comportamento%20Higrot%C3%A9rmico%20das%20Coberturas%20Verdes.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2022
- ALMEIDA, S. P. C.; BRITO, G. P.; SANTOS, S. M. Revisão Histórica dos Telhados Verdes: da Mesopotâmia aos dias atuais. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.2, n.1, p. 42-51, 2018. ISSN: 2595-4431. Disponível em: <https://revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/64/157>. Acesso em: 25 jan. 2023.
- ALVES, L. E. S. **Análise de diferentes cenários de apoio de uma fundação por radier estaqueado**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.
- ALVES, J. J. A.; BEZERRA, C. W. F.; SILVA FILHO, R. V. S.; SOUZA, J. V. S.; CORDEIRO, J. A.; SILVA, L. F. Telhado verde e seu desempenho térmico em residências de regiões semiáridas. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 4, 2021. e-ISSN 2176-9168 Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/download/8258/6786/#:~:text=O%20telhado%20verde%20pode%20alterar,a%20ambientes%20sem%20sua%20instala%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 8 jan. 2022.
- BÍBLIA Sagrada. King James atualizada. [S. l.]: Abba Press, 2012. Disponível em: <https://bibliaportugues.com/kja/philippians/2.htm>. Acesso em: 25/02/2023.
- BORGES, L. R. L.; MACEDO, F. R. C. Telhados verdes e telhas ecologicamente sustentáveis: análise comparativa de benefícios e custos em comparação com telhados convencionais. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v. 14, n. 4, 2022. ISSN 2176-7270.

Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/20728>. Acesso em: 5 jan. 2023.

BUCCOLA, N.; SPOLEK, G. A Pilot-Scale Evaluation of Greenroof Runoff Retention, Detention, and Quality. **Water Air Soil Pollut**, v. 216, p. 83–92, 2011. Disponível em <https://doi-org.ez16.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11270-010-0516-8>. Acesso em: 21 abr. 2023

CALHEIROS, C. S. C.; PALHA, P. Infraestruturas verdes: A tendência das coberturas verdes nas cidades. **Ingenium**, n. 158, ed. 3, p. 87-89, 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/317169023\\_Green\\_infrastructures\\_-\\_The\\_trend\\_of\\_green\\_roofs\\_in\\_cities\\_Infraestruturas\\_verdes\\_a\\_tendencia\\_das\\_coberturas\\_verdes\\_nas\\_cidades](https://www.researchgate.net/publication/317169023_Green_infrastructures_-_The_trend_of_green_roofs_in_cities_Infraestruturas_verdes_a_tendencia_das_coberturas_verdes_nas_cidades). Acesso em: 25 jan. 2022.

CHAN, A.L.S; CHOW, T.T. Evaluation of Overall Thermal Transfer Value (OTTV) for commercial buildings constructed with green roof. **Applied Energy**, v. 107, p. 10-24, 2013. ISSN 0306-2619. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913001189>. Acesso em: 21 abr. 2023.

COUTTS, A.; DALY, E.; BERINGER, J.; TAPPER, NJ. Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. **Building and Environment**. v. 70, p. 266–276, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132313002473>. Acesso em: 25 jan. 2023.

CRESPO, V. A. S. **Estudo da sensibilidade de edificações em relação ao solo**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos Dos Goytacazes, 2004. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-civil/wp-content/uploads/sites/3/2015/09/VICTOR-AUGUSTO-DE-SOUZA-CRESPO.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2023.

DINSDALE, S.; PEAREN, B.; WILSON, C. Feasibility study for green roof application on queen's university campus. **Queen's Physical Plant Services**, 2006. Disponível em: <https://commons.bcit.ca/greenroof/files/2012/01/queens.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2022.

DUARTE, T. E. P.; ANGEOLETTO, F. H. S.; SANTOS, J. W. M. C.; LEANDRO, D. S.; BOHRER, J. F. C.; VACCHIANO, M. C.; LEITE, L. B. O papel da cobertura vegetal nos ambientes urbanos e sua influência na qualidade de vida nas cidades. **Desenvolvimento em questão**. v. 15, n. 40. p. 175-203, 2017. Disponível em: <https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/desenvolvimentoemquestao/article/view/5859>. Acesso em: 20 jan. 2022.

DUNNET, N.; KINGSBURY, N. **Planting green roofs and living walls**. Edição Revisada. Portland, OR: Timber Press, 2008.

FLL - **Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof sites**. Alemanha: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. – FLL, 2002.

GUARNIERI, G.; PAVAN, R. C.; PILZ, S. E.; COSTELLA, M. F. Interação solo-estrutura para sistemas estruturais reticulados sobre fundações profundas. **Engevista**. v. 20, n.3, p. 424-441, 2018. ISSN online: 2317-6717. ISSN: 1415-7314. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/9492>. Acesso em: 7 out. 2022.

GUSMÃO FILHO, J. A. **Fundações, do conhecimento geológico à prática da engenharia**. Recife: Editora universitária – UFPE, 2002.

HEIM, A.; LUNDHOLM, J., 2014. Species interactions in green roof vegetation suggest complementary planting mixtures. **Landscape and Urban Planning**. V. 130, p. 125-133, 2014.

HENEINE, M. C. A. S. **Cobertura verde**. 2008. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <https://docplayer.com.br/5312025-Monografia-cobertura-verde-autor-maria-cristina-almeida%20de-souza-heneine-orientadores-professor-firmino-siqueira-professor-dalmo-mendes-figueiredo.html>. Acesso em: 26 jan 2023.

JIM, C. Y. Green roof evolution through exemplars: Germinal prototypes to modern variants. **Sustainable Cities and Society**. v. 35, p. 69–82, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670717306121>. Acesso em: 27 nov. 2022.

JORDÃO JUNIOR, J. V. M. **Avaliação dos recalques por distorção angular em uma fundação por radier estaqueado**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.

KLEIN, P. M.; COFFMAN, R. Establishment and performance of an experimental green roof under extreme climatic conditions. **Science of The Total Environment**. v. 15, p. 82-93, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969715000236>. Acesso em: 2 jan. 2022.

KÖHLER, M.; SCHMIDT, M.; GRIMME, F.W.; LAAR, M.; PAIVA, V. L. A.; TAVARES S. Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. **Environmental Management and Health**, v. 13, n. 4, p. 382-391, 2002. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/235280451\\_Green\\_roofs\\_in\\_temperate\\_climates\\_and\\_in\\_the\\_hot-humid\\_tropics\\_-\\_far\\_beyond\\_the\\_aesthetics](https://www.researchgate.net/publication/235280451_Green_roofs_in_temperate_climates_and_in_the_hot-humid_tropics_-_far_beyond_the_aesthetics). Acesso em: 26 jan, 2023.

KREBS, L. F.; SATTLER, M. A. Coberturas vivas extensivas: Análise da utilização em projetos na região metropolitana de Porto Alegre e Serra Gaúcha. **XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Canela, out. 2010.

KREBS, L. F. **Coberturas Verdes Extensivas: Análise da Utilização em Projetos na Região Metropolitana de Porto Alegre e Serra Gaúcha**. 2005. Dissertação (Mestrado profissional em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/10177>>. Acesso em: 27 jan. 2023.

LAGUERRE, A.; BRENNAN, D. L.; STARRY, O.; ROSENSTIEL, T. N.; GALL, E. T. Characterization of Volatile Organic Compound Emissions and CO<sub>2</sub> Uptake from Eco-roof Plants. **Building and Environment**, v. 234, 2023. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez16.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0360132323001853?via%3Dihub>. Acesso em: 21 mar. 2023.

LEAL, F. C. A.; FREITAS, A. P. S.; NETO, O. F.; GUSMÃO, A. D. Avaliação do desempenho de uma fundação do tipo radier estaqueado de um aerogerador por métodos dos elementos finitos. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 4, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i4.26174>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/26174/23820/318798>. Acesso em: 7 out. 2022.

LEAL, M. F. P. **Conceção, especificação e pormenorização de coberturas verdes**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Portugal, 2019. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/121993/2/347649.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2022.

LIMA JR, R. M.; GARCIA, G. D. Diferentes análises estatísticas podem levar a conclusões categoricamente distintas. **Revista da ABRALIN**, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 1–19, 2021. DOI: 10.25189/rabralin.v20i1.1790. Disponível em: <https://revista.abralin.org/index.php/abralin/article/view/1790>. Acesso em: 12 jan. 2023.

LIU, K. Y.; BASKARAN, B. A. Thermal performance of green roofs through field valuation. **National Research Council Canada**, NRCC-46412, p. 1-10, 2003.

MACIVOR, J. S.; MARGOLIS, L.; PUNCHER, C. L.; MATTHEWS, B. J. C. Decoupling factors affecting plant diversity and cover on extensive green roofs. **Journal of Environmental Management**, v. 130, p. 297–305, 2013.

GONÇALVES, R. M. **Coberturas Ajardinadas. A Importância do Substrato Técnico: Contribuição para o seu Uso**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade de Lisboa (Instituto Superior de Agronomia), Portugal, 2017.

MORAES, M.C. **Estruturas de Fundações**. São Paulo: MCGRAW-HILL, 1976.

MORAKINYO, T. E.; DAHANAYAKE, K. W. D. K. C.; NG, E.; CHOW, C. L. Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study. **Energy and Buildings**, v. 145, p. 226-237, 2017.

NAGASE, A.; DUNNETT, N.; CHOI, M-S. Investigation of weed phenology in an establishing semi-extensive green roof. **Ecological Engineering**, v. 58, p. 156-164, 2013.

NOVAK, L. J.; REESE, L. C.; WANG, S-T. Analysis of Pile-Raft Foundations with 3D Finite-Element Method. **Structures Congress 2005**, New York, United States, 2005.

OLIVEIRA, S.; OLIVEIRA JUNIOR, J. F.; RODRIGUES, S. Telhados verdes: uma proposta para o uso de espécies nativas do Brasil. **MIX Sustentável**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 111–126, 2021. DOI: 10.29183/2447-3073.MIX2021.v7.n3.111-126. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/4593>. Acesso em: 27 jan. 2023.

PAIVA, B. A.; FERREIRA, G. R.; ARAÚJO, R. C. S. Telhado verde: análise do impacto da sobrecarga gerada sobre o custo da estrutura de uma obra. **Revista Gestão, Inovação e Negócios**, v. 4, n. 3, 2018. ISSN 2447- 8520. Disponível em: <http://revistas2.unievangelica.edu.br/index.php/administracao/article/view/3476>. Acesso em: 1 nov. 2021.

Patricio, J. D. **Avaliação de desempenho de radiers na região metropolitana do Recife**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/34260/4/TESE%20Jonny%20Dantas%20Patricio.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2023.

PINTO, C. P. J. **Análise de estrutura com interação solo-estrutura e as molas de Winkler**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/25165>. Acesso em: 8 out. 2022.

RAJI, B.; TENPIERIK, M. J.; VAN DEN DOBBELSTEEN, A. The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 610–623, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.011>.

RECIFE (PE). **Lei nº 18.112/2015**. Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. Recife (PE): Câmara Municipal de Recife, 2015. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/pe/r/recife/lei-ordinaria/2015/1812/18112/lei-ordinaria-n-18112-2015-dispoe-sobre-a-melhoria-da-qualidade-ambiental-das-edificacoes-por-meio-da-obrigatoriedade-de-instalacao-do-telhado-verde-e-construcao-de-reservatorios-de-acumulo-ou-de-retardo-do-escoamento-das-aguas-pluviais-para-a-rede-de-drenagem-e-da-outras-providencias>. Acesso em 1 nov 2021.

SCRENSKI, A. J. **Viabilidade do telhado verde como instrumento de redução de emissões de carbono**. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Projetos Sustentáveis, Mudanças Climáticas e Gestão Corporativa de Carbono do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/51254>. Acesso em: 16 jan. 2022.

SHAFIQUE, M.; KIM, R.; RAFIQ, M. Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 757-773, 2018. ISSN 13640321.

SILVA JÚNIOR, R. P. **Avaliação da interação solo-estrutura com monitoramento de recalques e análise da influência da sequência construtiva no desempenho de radiers estaqueados**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.

SILVA, J. P. **Análise de projeto de fundação em radier estaqueado utilizando o método dos elementos finitos nas análises de prova de carga**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.

SILVA, R. F. N. **Confiabilidade e segurança de uma fundação por radier estaqueado. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.** Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/42535/1/Trabalho%20de%20Conclus%C3%A3o%20de%20Curso%202020-%20R%20Francisco%20do%20Nascimento%20Silva.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2023.

Stella, P., and E. Personne. Effects of Conventional, Extensive and Semi-intensive Green Roofs on Building Conductive Heat Fluxes and Surface Temperatures in Winter in Paris. **Building and Environment**, v. 205, 2021. Disponível: <https://www-sciencedirect.ez16.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S036013232100603X?via%3Dihub>. Acesso em: 21 mar. 2023.

SUTTON R. K. **Green Roof Ecosystems.** Springer International Publishing Switzerland. Ecological Studies 223, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-14983-7>. Acesso em: 13 jan. 2023.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. Análise, projeto e execução de fundações rasas. In: **Fundações: teoria e prática.** São Paulo: PINI, p. 227-264, 1996.

TERZAGHI, K. Evaluation of coefficient of subgrade reaction. **Geotechnique**, London, v. 5. n. 4, p. 297-326, 1955.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: Critérios de Projeto - Investigação do Subsolo - Fundações Superficiais.** 2. ed. rev. [S. l.]: Oficina de textos, 2011. 240 p. v. 1. ISBN 978-85-7975-014-4.

VIEIRA, C. M. Lei 18112/15: Em busca da melhor associação entre telhados verdes e reservatórios de águas pluviais. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, ano 6, v. 10, ed. 2, p. 99-118, fev. 2021. ISSN: 2448-0959. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/telhados-verdes>. Acesso em: 25 jan. 2022.

VIJAYARAGHAVAN, K. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 740-752, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115015026>. Acesso em: 13 jan. 2023

WILLES, J. A. **Tecnologias em telhados verdes extensivos: meios de cultura, caracterização hidrológica e sustentabilidade do sistema.** 2014. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-03122014-171411/ptbr.php>. Acesso em: 16 jan. 2022.

WILLIAMS, N. S. G.; RAYNER, J. P.; RAYNOR, K. J. Green roofs for a wide brown land: opportunities and barriers for rooftop greening in Australia. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 9; ed. 3, p. 245–51, 2010. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1618866710000099>. Acesso em: 16 jan. 2022.

WINKLER, E. **Die lehre von der Elastizitat und Festigkeit**. Praga: H. Dominicus, 1867.

## APÊNDICE A – CARGAS DAS COBERTURAS VERDES DOS CENÁRIOS 2, 3, 4 E 5

### Cenário 02 – Telhado verde 01 (Sistema contínuo completo)

- Camada de impermeabilização – manta asfáltica =  $3\text{kg/m}^2$
- Camada drenante – argila expandida (7cm de espessura) =  $600\text{kg/m}^3 \times 0,07\text{m} = 42\text{kg/m}^2$
- Substrato – terra vegetal saturada, espessura 6cm =  $1800\text{kg/m}^3 \times 0,06\text{m} = 108,0 \text{ kg/m}^2$
- Vegetação – grama esmeralda =  $23\text{kg/m}^2$

**Total Cenário 02 =  $176,0 \text{ kg/m}^2 \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 1726,56 \text{ N/m}^2$**

### Cenário 03 – Telhado verde 02 (Sistema contínuo completo)

- Impermeabilização – manta asfáltica =  $3\text{kg/m}^2$
- Camada drenante – brita 02, espessura de 7 cm =  $1362,0 \text{ kg/m}^3 \times 0,07\text{m} = 95,34\text{kg/m}^2$
- Substrato – terra vegetal saturada, espessura de 6 cm =  $1800\text{kg/m}^3 \times 0,06\text{m} = 108,0 \text{ kg/m}^2$
- Vegetação – grama esmeralda =  $23,0 \text{ kg/m}^2$

**Total Cenário 03 =  $229,34\text{kg/m}^2 \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 2249,83\text{N/m}^2$**

### Cenário 04 – Telhado verde 03 (Sistema contínuo intensivo completo)

- Impermeabilização – manta asfáltica =  $3\text{kg/m}^2$
- Camada drenante – brita 02, espessura de 7 cm =  $1362,0 \text{ kg/m}^3 \times 0,07\text{m} \approx 95,3\text{kg/m}^2$
- Substrato – terra vegetal saturada, espessura de 20 cm =  $1800\text{kg/m}^3 \times 0,20\text{m} = 360,0 \text{ kg/m}^2$
- Vegetação arbustiva  $\approx 41,7 \text{ kg/m}^2$

**Total Cenário 04 =  $500,0\text{kg/m}^2 \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 4905,0 \text{ N/m}^2$**

### Cenário 05 – Telhado verde 04 (Sistema contínuo intensivo completo)

- Impermeabilização – manta asfáltica =  $3\text{kg/m}^2$
- Camada drenante – brita 02, espessura de 7 cm =  $1362,0 \text{ kg/m}^3 \times 0,07\text{m} \approx 95,3\text{kg/m}^2$
- Substrato – terra vegetal saturada, espessura de 30 cm =  $1800\text{kg/m}^3 \times 0,30\text{m} = 540,0 \text{ kg/m}^2$
- Vegetação – pequenas árvores e arbustos =  $61,7 \text{ kg/m}^2$

**Total Cenário 05 =  $700,0\text{kg/m}^2 \times 9,81\text{m/s}^2 = 6867,0 \text{ N/m}^2$**

## APÊNDICE B – RESULTADO DO SAP 2000 - CARGAS E RECALQUES DAS ESTACAS

Ponto	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5	
	Carga (kN)	Recalque (m)								
1	262,561	-0,002052	270,215	-0,002112	275,52	-0,002154	281,669	-0,002202	289,313	-0,002262
10	280,578	-0,002193	288,778	-0,002257	294,462	-0,002302	301,049	-0,002353	309,238	-0,002417
23	293,598	-0,002295	302,066	-0,002361	307,936	-0,002407	314,739	-0,00246	323,195	-0,002526
26	302,809	-0,002367	311,691	-0,002436	317,847	-0,002485	324,982	-0,00254	333,852	-0,00261
27	295,065	-0,002306	303,644	-0,002374	309,591	-0,00242	316,483	-0,002474	325,05	-0,002541
35	282,72	-0,00221	291,017	-0,002275	296,768	-0,00232	303,433	-0,002372	311,719	-0,002437
40	279,68	-0,002186	287,737	-0,002249	293,32	-0,002293	299,792	-0,002343	307,836	-0,002406
44	298,631	-0,002334	307,402	-0,002403	313,48	-0,00245	320,525	-0,002506	329,282	-0,002574
45	291,703	-0,00228	300,12	-0,002346	305,954	-0,002392	312,716	-0,002444	321,121	-0,00251
64	296,78	-0,00232	305,657	-0,002389	311,809	-0,002437	318,941	-0,002493	327,806	-0,002562
65	281,103	-0,002197	289,479	-0,002263	295,284	-0,002308	302,013	-0,002361	310,378	-0,002426
70	284,857	-0,002227	293,171	-0,002292	298,933	-0,002337	305,612	-0,002389	313,914	-0,002454
71	293,176	-0,002292	301,772	-0,002359	307,729	-0,002405	314,634	-0,002459	323,217	-0,002527
83	281,622	-0,002201	289,791	-0,002265	295,452	-0,00231	302,015	-0,002361	310,172	-0,002425
84	312,603	-0,002444	321,782	-0,002515	328,144	-0,002565	335,517	-0,002623	344,683	-0,002694
86	301,817	-0,002359	310,858	-0,00243	317,124	-0,002479	324,387	-0,002536	333,414	-0,002606
87	283,963	-0,00222	292,403	-0,002286	298,253	-0,002331	305,034	-0,002384	313,462	-0,00245
89	286,718	-0,002241	295,06	-0,002306	300,841	-0,002352	307,542	-0,002404	315,872	-0,002469
90	296,561	-0,002318	305,261	-0,002386	311,29	-0,002433	318,279	-0,002488	326,966	-0,002556
91	275,342	-0,002152	283,369	-0,002215	288,932	-0,002259	295,38	-0,002309	303,395	-0,002372
92	311,062	-0,002432	320,125	-0,002502	326,407	-0,002551	333,688	-0,002608	342,739	-0,002679
93	303,494	-0,002372	312,518	-0,002443	318,771	-0,002492	326,02	-0,002548	335,031	-0,002619
94	312,045	-0,002439	321,325	-0,002512	327,757	-0,002562	335,212	-0,00262	344,478	-0,002693
101	283,035	-0,002212	291,305	-0,002277	297,036	-0,002322	303,68	-0,002374	311,938	-0,002438
102	326,214	-0,00255	335,878	-0,002626	342,576	-0,002678	350,339	-0,002739	359,989	-0,002814
103	313,79	-0,002453	322,984	-0,002525	329,357	-0,002575	336,743	-0,002632	345,924	-0,002704
104	325,389	-0,002544	335,021	-0,002619	341,697	-0,002671	349,435	-0,002732	359,054	-0,002807
105	298,702	-0,002335	307,303	-0,002402	313,263	-0,002449	320,173	-0,002503	328,761	-0,00257
106	318,457	-0,002489	327,844	-0,002563	334,35	-0,002614	341,89	-0,002673	351,264	-0,002746
107	316,633	-0,002475	325,966	-0,002548	332,435	-0,002599	339,933	-0,002657	349,252	-0,00273
109	311,586	-0,002436	320,85	-0,002508	327,27	-0,002558	334,711	-0,002616	343,961	-0,002689
110	304,801	-0,002383	313,857	-0,002453	320,134	-0,002502	327,41	-0,002559	336,454	-0,00263
111	317,086	-0,002479	326,318	-0,002551	332,717	-0,002601	340,133	-0,002659	349,352	-0,002731
112	324,476	-0,002536	334,112	-0,002612	340,79	-0,002664	348,531	-0,002724	358,152	-0,0028
113	320,318	-0,002504	329,713	-0,002577	336,224	-0,002628	343,771	-0,002687	353,152	-0,002761
114	301,277	-0,002355	310,032	-0,002423	316,099	-0,002471	323,131	-0,002526	331,873	-0,002594
115	292,172	-0,002284	300,631	-0,00235	306,493	-0,002396	313,287	-0,002449	321,733	-0,002515
116	313,61	-0,002451	322,798	-0,002523	329,166	-0,002573	336,546	-0,002631	345,721	-0,002702

117	294,272	-0,0023	302,879	-0,002368	308,844	-0,002414	315,758	-0,002468	324,352	-0,002535
119	297,4	-0,002325	305,971	-0,002392	311,912	-0,002438	318,798	-0,002492	327,357	-0,002559
121	313,781	-0,002453	323,068	-0,002525	329,504	-0,002576	336,964	-0,002634	346,238	-0,002707
122	309,945	-0,002423	318,999	-0,002494	325,274	-0,002543	332,548	-0,002599	341,59	-0,00267
123	323,385	-0,002528	332,957	-0,002603	339,592	-0,002655	347,282	-0,002715	356,841	-0,002789
124	290,697	-0,002272	299,065	-0,002338	304,864	-0,002383	311,586	-0,002436	319,942	-0,002501
125	220,584	-0,001724	226,645	-0,001772	230,845	-0,001804	235,714	-0,001843	241,766	-0,00189
127	271,332	-0,002121	279,259	-0,002183	284,752	-0,002226	291,12	-0,002276	299,035	-0,002338
131	316,477	-0,002474	325,91	-0,002548	332,448	-0,002599	340,027	-0,002658	349,446	-0,002732
180	256,076	-0,002002	263,547	-0,00206	268,725	-0,002101	274,727	-0,002148	282,187	-0,002206
181	324,555	-0,002537	334,168	-0,002612	340,831	-0,002664	348,553	-0,002725	358,153	-0,0028
387	335,371	-0,002622	345,275	-0,002699	352,139	-0,002753	360,095	-0,002815	369,985	-0,002892
417	313,009	-0,002447	322,134	-0,002518	328,459	-0,002568	335,79	-0,002625	344,902	-0,002696
12128	272,254	-0,002128	280,172	-0,00219	285,659	-0,002233	292,02	-0,002283	299,926	-0,002344
12130	310,852	-0,00243	319,954	-0,002501	326,262	-0,00255	333,573	-0,002608	342,662	-0,002679
12132	284,947	-0,002227	293,273	-0,002292	299,043	-0,002338	305,731	-0,00239	314,044	-0,002455
12136	296,668	-0,002319	305,345	-0,002387	311,359	-0,002434	318,33	-0,002488	326,996	-0,002556
12137	291,623	-0,00228	300,005	-0,002345	305,815	-0,002391	312,549	-0,002443	320,919	-0,002509
12138	298,402	-0,002333	307,006	-0,0024	312,969	-0,002446	319,881	-0,0025	328,473	-0,002568
12139	306,411	-0,002395	315,397	-0,002465	321,625	-0,002514	328,844	-0,002571	337,817	-0,002641
12143	291,813	-0,002281	300,355	-0,002348	306,275	-0,002394	313,136	-0,002448	321,665	-0,002514
12145	289,634	-0,002264	297,96	-0,002329	303,73	-0,002374	310,418	-0,002427	318,732	-0,002491
12147	301,117	-0,002354	309,96	-0,002423	316,088	-0,002471	323,192	-0,002526	332,022	-0,002595
12148	294,957	-0,002306	303,466	-0,002372	309,364	-0,002418	316,2	-0,002472	324,698	-0,002538
12158	298,069	-0,00233	306,984	-0,0024	313,162	-0,002448	320,323	-0,002504	329,224	-0,002574
12159	283,123	-0,002213	291,549	-0,002279	297,389	-0,002325	304,158	-0,002378	312,571	-0,002443
12161	286,146	-0,002237	294,49	-0,002302	300,273	-0,002347	306,977	-0,0024	315,31	-0,002465
12162	294,537	-0,002302	303,17	-0,00237	309,153	-0,002417	316,088	-0,002471	324,709	-0,002538
12168	302,722	-0,002366	311,788	-0,002437	318,072	-0,002486	325,355	-0,002543	334,408	-0,002614
12169	270,406	-0,002114	278,447	-0,002177	284,02	-0,00222	290,48	-0,002271	298,509	-0,002333
12171	279,977	-0,002189	288,119	-0,002252	293,762	-0,002296	300,302	-0,002347	308,433	-0,002411
12172	297,178	-0,002323	305,894	-0,002391	311,935	-0,002438	318,936	-0,002493	327,64	-0,002561
12173	276,367	-0,00216	284,441	-0,002223	290,037	-0,002267	296,523	-0,002318	304,585	-0,002381
12174	287,815	-0,00225	296,241	-0,002316	302,081	-0,002361	308,85	-0,002414	317,264	-0,00248
12177	324,733	-0,002538	334,376	-0,002614	341,058	-0,002666	348,804	-0,002727	358,433	-0,002802
12180	286,341	-0,002238	294,589	-0,002303	300,305	-0,002347	306,931	-0,002399	315,167	-0,002464
12182	314,267	-0,002457	323,566	-0,002529	330,011	-0,00258	337,481	-0,002638	346,767	-0,002711
12183	309,999	-0,002423	319,053	-0,002494	325,328	-0,002543	332,601	-0,0026	341,642	-0,002671
12184	316,518	-0,002474	325,953	-0,002548	332,491	-0,002599	340,07	-0,002658	349,491	-0,002732
12192	335,05	-0,002619	344,944	-0,002696	351,801	-0,00275	359,75	-0,002812	369,63	-0,002889
12200	308,479	-0,002411	317,472	-0,002482	323,705	-0,00253	330,929	-0,002587	339,909	-0,002657
27386	282,299	-0,002207	290,584	-0,002271	296,326	-0,002316	302,982	-0,002368	311,255	-0,002433
27390	301,173	-0,002354	309,989	-0,002423	316,098	-0,002471	323,18	-0,002526	331,983	-0,002595
27408	302,691	-0,002366	311,565	-0,002435	317,715	-0,002484	324,845	-0,002539	333,706	-0,002609

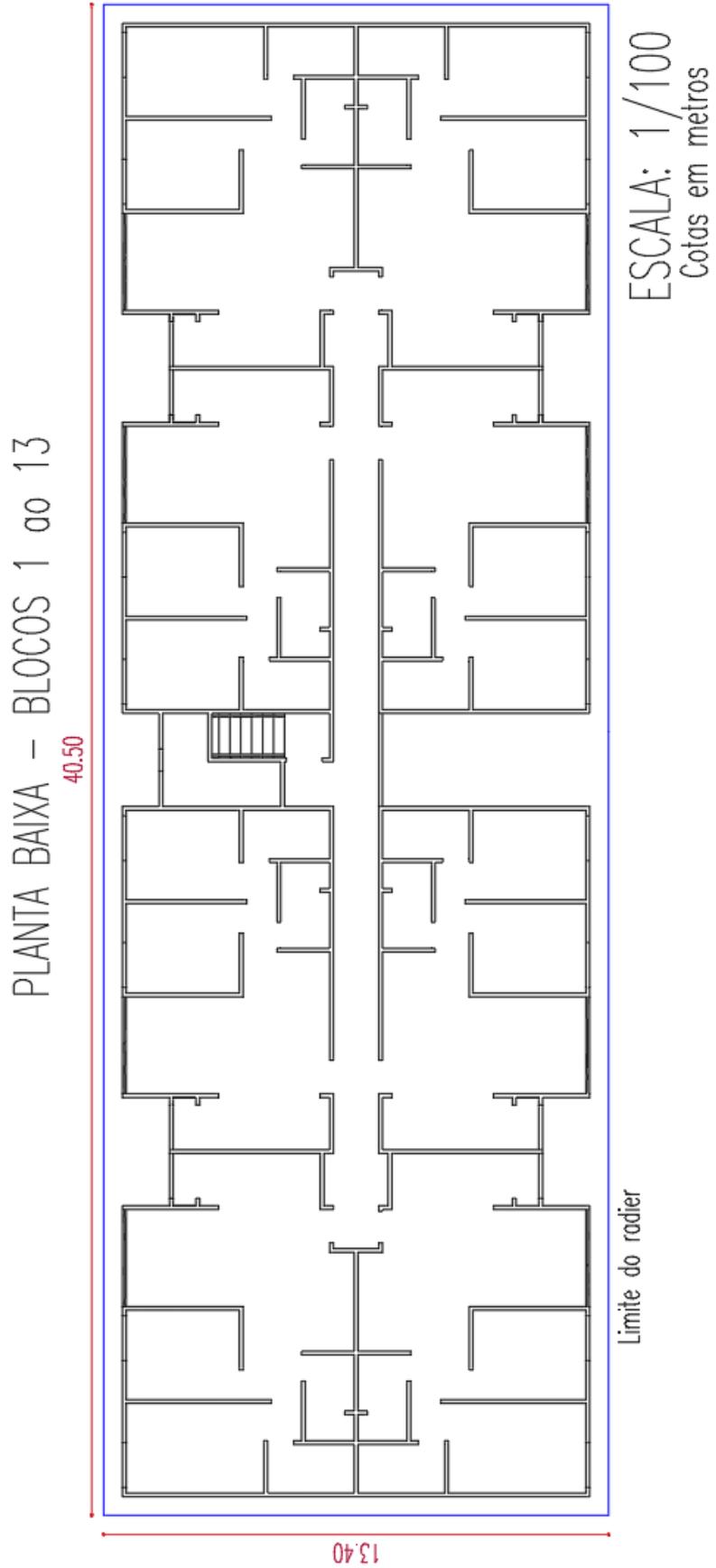
**APÊNDICE C – RESULTADO DO SAP 2000 -CARGAS E RECALQUES DO RADIER  
(AMOSTRA COM 100 PONTOS)**

Ponto	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5	
	Carga (kN)	Recalque (m)								
6488	0,68400	-0,00264	0,70400	-0,00271	0,71800	-0,00277	0,73400	-0,00283	0,75400	-0,00291
2154	0,57600	-0,0022220	0,59200	-0,00228	0,60200	-0,00232	0,61500	-0,00237	0,63000	-0,00243
7448	0,65100	-0,0025090	0,66900	-0,00258	0,68200	-0,00263	0,69700	-0,00269	0,71600	-0,00276
2587	0,62300	-0,00241	0,64100	-0,00247	0,65300	-0,00252	0,66700	-0,00257	0,68500	-0,00264
7806	0,57900	-0,00223	0,59500	-0,00229	0,60600	-0,00234	0,61900	-0,00239	0,63500	-0,00245
5909	0,65800	-0,00254	0,67800	-0,00261	0,69100	-0,00267	0,70600	-0,00273	0,72600	-0,00280
2642	0,61000	-0,00235	0,62800	-0,00242	0,64000	-0,00247	0,65400	-0,00252	0,67100	-0,00259
2767	0,60000	-0,00231	0,61700	-0,00238	0,62900	-0,00243	0,64300	-0,00248	0,66000	-0,00255
2893	0,60900	-0,00235	0,62600	-0,00241	0,63800	-0,00246	0,65200	-0,00251	0,66900	-0,00258
3530	0,64300	-0,00248	0,66100	-0,00255	0,67400	-0,00260	0,68900	-0,00266	0,70700	-0,00273
5372	0,67800	-0,00261	0,69800	-0,00269	0,71100	-0,00274	0,72700	-0,00281	0,74700	-0,00288
8084	0,55700	-0,00215	0,57300	-0,00221	0,58400	-0,00225	0,59600	-0,00230	0,61100	-0,00236
9129	0,55500	-0,00214	0,57000	-0,00220	0,58100	-0,00224	0,59300	-0,00229	0,60800	-0,00235
3203	0,62600	-0,00241	0,64400	-0,00249	0,65700	-0,00253	0,67200	-0,00259	0,69000	-0,00266
8750	0,57400	-0,00222	0,59000	-0,00228	0,60100	-0,00232	0,61300	-0,00237	0,62900	-0,00243
5276	0,61300	-0,00237	0,63000	-0,00243	0,64200	-0,00248	0,65600	-0,00253	0,67200	-0,00259
10117	0,66800	-0,00258	0,68800	-0,00265	0,70100	-0,00270	0,71700	-0,00276	0,73600	-0,00284
1420	0,61000	-0,00235	0,62800	-0,00242	0,64000	-0,00247	0,65400	-0,00252	0,67200	-0,00259
4210	0,65300	-0,00252	0,67200	-0,00259	0,68500	-0,00264	0,70000	-0,00270	0,71900	-0,00277
3994	0,64900	-0,00251	0,66800	-0,00258	0,68100	-0,00263	0,69600	-0,00269	0,71500	-0,00276
9648	0,68700	-0,00265	0,70700	-0,00273	0,72100	-0,00278	0,73800	-0,00285	0,75800	-0,00293
9119	0,55500	-0,00214	0,57000	-0,00220	0,58000	-0,00224	0,59300	-0,00229	0,60800	-0,00234
2716	0,61600	-0,00238	0,63300	-0,00244	0,64500	-0,00249	0,65900	-0,00254	0,67700	-0,00261
6630	0,65900	-0,00254	0,67800	-0,00261	0,69100	-0,00267	0,70600	-0,00272	0,72600	-0,00280
5445	0,59700	-0,00230	0,61400	-0,00237	0,62600	-0,00241	0,63900	-0,00247	0,65600	-0,00253
5781	0,63500	-0,00245	0,65400	-0,00252	0,66700	-0,00257	0,68200	-0,00263	0,70000	-0,00270
7073	0,50300	-0,00194	0,51700	-0,00199	0,52700	-0,00203	0,53800	-0,00208	0,55300	-0,00213
4009	0,64200	-0,00248	0,66000	-0,00255	0,67300	-0,00260	0,68800	-0,00265	0,70600	-0,00273
6763	0,66200	-0,00255	0,68100	-0,00263	0,69400	-0,00268	0,71000	-0,00274	0,72900	-0,00281
7959	0,57300	-0,00221	0,58900	-0,00227	0,60000	-0,00232	0,61300	-0,00236	0,62900	-0,00243
550	0,54000	-0,00208	0,55600	-0,00214	0,56700	-0,00219	0,57900	-0,00223	0,59500	-0,00230
2728	0,60500	-0,00233	0,62100	-0,00240	0,63300	-0,00244	0,64600	-0,00249	0,66300	-0,00256
6945	0,70100	-0,00270	0,72100	-0,00278	0,73600	-0,00284	0,75200	-0,00290	0,77300	-0,00298
6793	0,68500	-0,00264	0,70600	-0,00272	0,71900	-0,00278	0,73600	-0,00284	0,75600	-0,00291
8519	0,58200	-0,00225	0,59800	-0,00231	0,60900	-0,00235	0,62200	-0,00240	0,63800	-0,00246
4596	0,66000	-0,00255	0,67900	-0,00262	0,69200	-0,00267	0,70800	-0,00273	0,72700	-0,00280
7608	0,57800	-0,00223	0,59400	-0,00229	0,60500	-0,00233	0,61800	-0,00238	0,63400	-0,00244
3182	0,68200	-0,00263	0,70300	-0,00271	0,71700	-0,00276	0,73300	-0,00283	0,75300	-0,00290
682	0,57600	-0,00222	0,59200	-0,00228	0,60300	-0,00233	0,61600	-0,00238	0,63200	-0,00244
8852	0,59500	-0,00230	0,61200	-0,00236	0,62400	-0,00241	0,63800	-0,00246	0,65500	-0,00253
1012	0,62000	-0,00239	0,63800	-0,00246	0,65100	-0,00251	0,66600	-0,00257	0,68400	-0,00264
1210	0,60800	-0,00235	0,62600	-0,00242	0,63800	-0,00246	0,65300	-0,00252	0,67000	-0,00259
8616	0,57500	-0,00222	0,59000	-0,00228	0,60100	-0,00232	0,61400	-0,00237	0,62900	-0,00243

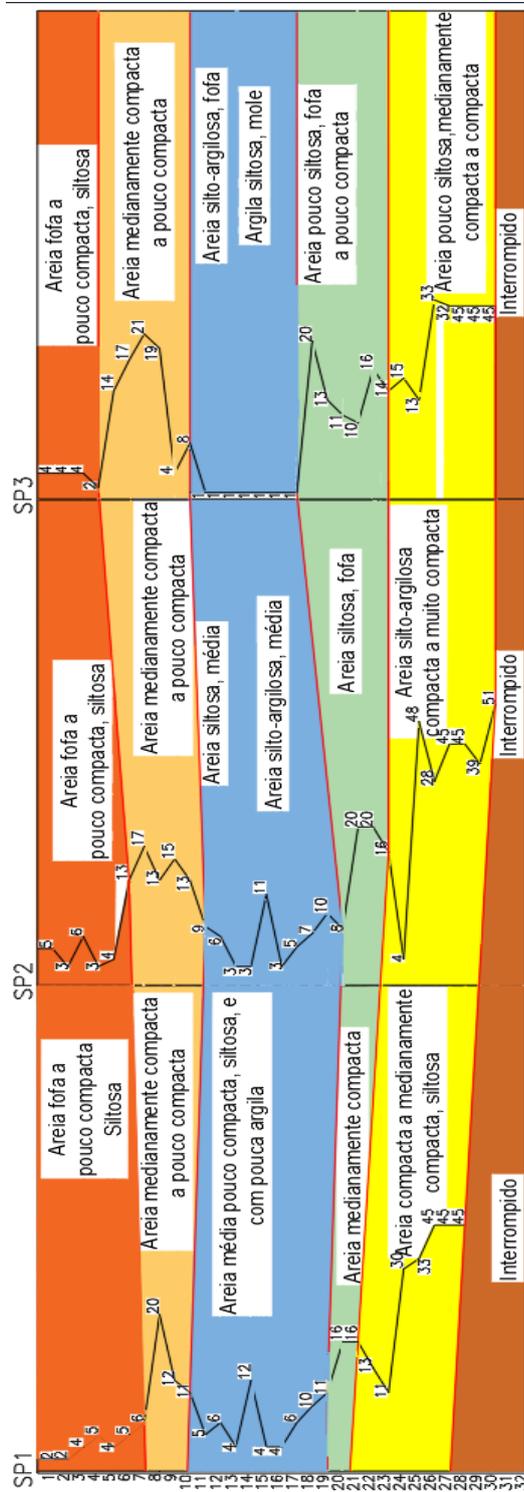
2739	0,58400	-0,00225	0,60000	-0,00231	0,61100	-0,00236	0,62400	-0,00241	0,64000	-0,00247
6747	0,62500	-0,00241	0,64300	-0,00248	0,65600	-0,00253	0,67000	-0,00259	0,68800	-0,00265
9564	0,70800	-0,00273	0,72900	-0,00281	0,74400	-0,00287	0,76100	-0,00294	0,78200	-0,00302
206	0,60500	-0,00234	0,62300	-0,00240	0,63600	-0,00245	0,65000	-0,00251	0,66800	-0,00258
9868	0,67400	-0,00260	0,69400	-0,00268	0,70800	-0,00273	0,72400	-0,00279	0,74400	-0,00287
5807	0,65300	-0,00252	0,67200	-0,00259	0,68500	-0,00264	0,70000	-0,00270	0,71900	-0,00278
3532	0,63200	-0,00244	0,65000	-0,00251	0,66200	-0,00255	0,67700	-0,00261	0,69500	-0,00268
2621	0,62000	-0,00239	0,63700	-0,00246	0,64900	-0,00250	0,66300	-0,00256	0,68100	-0,00263
4361	0,65300	-0,00252	0,67100	-0,00259	0,68400	-0,00264	0,69900	-0,00269	0,71700	-0,00277
2708	0,59100	-0,00228	0,60800	-0,00235	0,61900	-0,00239	0,63300	-0,00244	0,64900	-0,00250
5636	0,68700	-0,00265	0,70700	-0,00273	0,72100	-0,00278	0,73700	-0,00284	0,75700	-0,00292
1463	0,59500	-0,00229	0,61300	-0,00236	0,62500	-0,00241	0,63900	-0,00247	0,65700	-0,00254
8036	0,56000	-0,00216	0,57500	-0,00222	0,58600	-0,00226	0,59900	-0,00231	0,61400	-0,00237
4356	0,64400	-0,00248	0,66200	-0,00255	0,67400	-0,00260	0,68900	-0,00266	0,70700	-0,00273
333	0,67300	-0,00260	0,69300	-0,00267	0,70700	-0,00273	0,72300	-0,00279	0,74300	-0,00286
7276	0,51200	-0,00197	0,52600	-0,00203	0,53600	-0,00207	0,54700	-0,00211	0,56100	-0,00216
4857	0,59900	-0,00231	0,61600	-0,00238	0,62800	-0,00242	0,64200	-0,00248	0,65900	-0,00254
3178	0,65700	-0,00253	0,67700	-0,00261	0,69000	-0,00266	0,70600	-0,00272	0,72500	-0,00280
9336	0,71100	-0,00274	0,73200	-0,00283	0,74700	-0,00288	0,76400	-0,00295	0,78600	-0,00303
3172	0,68300	-0,00264	0,70300	-0,00271	0,71700	-0,00277	0,73300	-0,00283	0,75300	-0,00291
5874	0,65000	-0,00251	0,67000	-0,00258	0,68300	-0,00263	0,69800	-0,00269	0,71700	-0,00277
6465	0,68600	-0,00264	0,70600	-0,00272	0,72000	-0,00278	0,73600	-0,00284	0,75600	-0,00292
819	0,58000	-0,00224	0,59600	-0,00230	0,60800	-0,00234	0,62100	-0,00240	0,63800	-0,00246
6721	0,70200	-0,00271	0,72300	-0,00279	0,73700	-0,00284	0,75400	-0,00291	0,77400	-0,00299
7922	0,58300	-0,00225	0,60000	-0,00231	0,61100	-0,00236	0,62400	-0,00241	0,64000	-0,00247
9203	0,53500	-0,00206	0,55000	-0,00212	0,56100	-0,00216	0,57300	-0,00221	0,58800	-0,00227
6178	0,71500	-0,00276	0,73600	-0,00284	0,75100	-0,00290	0,76800	-0,00296	0,78900	-0,00304
822	0,59000	-0,00227	0,60700	-0,00234	0,62000	-0,00239	0,63400	-0,00244	0,65100	-0,00251
6152	0,71600	-0,00276	0,73700	-0,00284	0,75100	-0,00290	0,76800	-0,00296	0,78900	-0,00305
3935	0,73100	-0,00282	0,75300	-0,00291	0,76800	-0,00296	0,78600	-0,00303	0,80800	-0,00312
4178	0,64100	-0,00247	0,66000	-0,00254	0,67200	-0,00259	0,68700	-0,00265	0,70600	-0,00272
4822	0,61200	-0,00236	0,62900	-0,00243	0,64100	-0,00247	0,65500	-0,00253	0,67200	-0,00259
7080	0,55600	-0,00214	0,57100	-0,00220	0,58200	-0,00224	0,59400	-0,00229	0,60900	-0,00235
9916	0,66600	-0,00257	0,68600	-0,00264	0,69900	-0,00270	0,71500	-0,00276	0,73500	-0,00284
9341	0,70400	-0,00272	0,72600	-0,00280	0,74000	-0,00286	0,75700	-0,00292	0,77800	-0,00300
6332	0,65000	-0,00251	0,66800	-0,00258	0,68100	-0,00263	0,69600	-0,00269	0,71500	-0,00276
5942	0,66200	-0,00255	0,68100	-0,00263	0,69400	-0,00268	0,71000	-0,00274	0,72900	-0,00281
9681	0,70500	-0,00272	0,72600	-0,00280	0,74100	-0,00286	0,75800	-0,00292	0,77900	-0,00300
2787	0,58600	-0,00226	0,60200	-0,00232	0,61400	-0,00237	0,62700	-0,00242	0,64300	-0,00248
7478	0,66900	-0,00258	0,68800	-0,00265	0,70200	-0,00271	0,71700	-0,00277	0,73700	-0,00284
7902	0,57200	-0,00221	0,58800	-0,00227	0,60000	-0,00231	0,61300	-0,00236	0,62900	-0,00243
182	0,67000	-0,00258	0,69000	-0,00266	0,70400	-0,00271	0,72000	-0,00278	0,73900	-0,00285
7694	0,58200	-0,00224	0,59800	-0,00231	0,60900	-0,00235	0,62200	-0,00240	0,63800	-0,00246
4504	0,59500	-0,00229	0,61200	-0,00236	0,62300	-0,00240	0,63700	-0,00246	0,65300	-0,00252
7536	0,62700	-0,00242	0,64500	-0,00249	0,65800	-0,00254	0,67200	-0,00259	0,69000	-0,00266
10135	0,66100	-0,00255	0,68000	-0,00262	0,69400	-0,00268	0,70900	-0,00274	0,72800	-0,00281
6034	0,71100	-0,00274	0,73200	-0,00282	0,74600	-0,00288	0,76300	-0,00294	0,78400	-0,00302
8774	0,57900	-0,00224	0,59600	-0,00230	0,60700	-0,00234	0,62000	-0,00239	0,63700	-0,00246
5587	0,68800	-0,00265	0,70800	-0,00273	0,72200	-0,00279	0,73900	-0,00285	0,75900	-0,00293
1554	0,52200	-0,00201	0,53700	-0,00207	0,54800	-0,00211	0,56000	-0,00216	0,57600	-0,00222
6717	0,70400	-0,00271	0,72400	-0,00279	0,73800	-0,00285	0,75500	-0,00291	0,77500	-0,00299
1388	0,59800	-0,00231	0,61500	-0,00237	0,62800	-0,00242	0,64200	-0,00248	0,66000	-0,00255

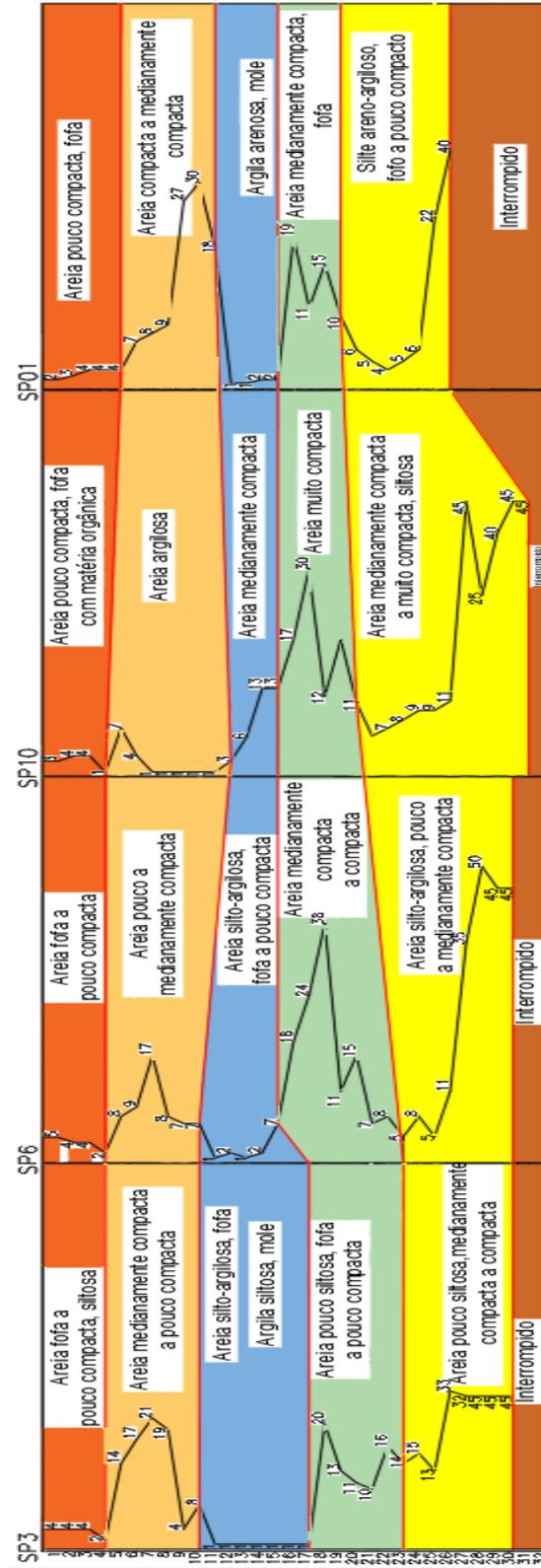
8294	0,54800	-0,00212	0,56300	-0,00217	0,57400	-0,00221	0,58600	-0,00226	0,60100	-0,00232
6194	0,70100	-0,00271	0,72200	-0,00279	0,73600	-0,00284	0,75300	-0,00290	0,77400	-0,00298
3098	0,70600	-0,00272	0,72600	-0,00280	0,74100	-0,00286	0,75700	-0,00292	0,77800	-0,00300
6271	0,70500	-0,00272	0,72500	-0,00280	0,74000	-0,00285	0,75600	-0,00292	0,77700	-0,00300
7643	0,60600	-0,00234	0,62400	-0,00241	0,63500	-0,00245	0,64900	-0,00250	0,66600	-0,00257

**ANEXO A – PLANTA BAIXA DOS BLOCOS 1 AO 13 DO EMPREENDIMENTO**



**ANEXO B – RESULTADO DO ENSAIO SPT FORNECIDO PELA CONSTRUTORA  
(PERFIS GEOTÉCNICOS)**





# ANEXO C – ESBOÇO DA FUNDAÇÃO EM RADIER ESTAQUEADO

