

## **Análise de viabilidade de implantação de telhados verdes em edificações de interesse social: impacto da sobrecarga sobre a estrutura e fundação**

**Leyziane Naianne Pinheiro da Silva**

Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

✉ [leyzianenaianne@hotmail.com](mailto:leyzianenaianne@hotmail.com)

**Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello**

Pós-doutorado em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo (USP), professora do curso de Engenharia Civil e membro permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

✉ [isabelamcvbello@hotmail.com](mailto:isabelamcvbello@hotmail.com)

**Luis Eduardo Santos Alves**

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

✉ [eduardo\\_alves2@outlook.com](mailto:eduardo_alves2@outlook.com)

Recebido em ? de ??? de 2022

Aceito em? de ??? de 2022

### **Resumo:**

O telhado verde é uma solução construtiva sustentável que tem sido adotado para mitigar as más consequências da urbanização, trazendo equilíbrio entre as construções e o meio ambiente, e atuando como uma importante ação tática pela gestão ambiental das cidades. Este artigo apresenta uma análise de viabilidade da implantação de telhados verdes quanto ao impacto causado pela sobrecarga gerada na estrutura e na fundação. Trata-se de uma edificação de 4 pavimentos tipo, mais térreo, com sistema construtivo em paredes de concreto e fundação por radier estaqueado apoiada sobre espessos depósitos de solos de baixa resistência, configuração típica de habitação de interesse social construída na Região Metropolitana de Recife, Pernambuco. O dimensionamento estrutural foi realizado 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. Para analisar o desempenho da fundação modelou-se todo sistema construtivo no software SAP 2000. Os recalques gerados foram comparados com os resultados dos recalques estimados e monitorados no Cenário 1. Verificou-se que todas as coberturas verdes poderiam ser implantadas, pois não houve acréscimo significativo nos deslocamentos da estrutura sobre o solo, não sendo exigido reforço na estrutura e na fundação. O Cenário 3 seria o mais indicado para implantação em edificações de interesse social semelhantes a edificação estudada, pois é de fácil instalação, manuseio e manutenção, fornecendo benefícios ambientais e econômicos.

**Palavras-chave:** Tecnologia ecológica, sustentabilidade, meio ambiente, capacidade de carga.

### **Feasibility analysis of the implementation of green roofs in social interest buildings: impact of the overload on the structure and foundation**

#### **Abstract:**

The green roof is a sustainable constructive solution that has been adopted to mitigate the bad consequences of urbanization, bringing balance between buildings and the environment, acting as an

important tactical action for the environmental management of cities. This article presents a feasibility analysis of the implementation of green roofs regarding the impact caused by the overload generated in the structure and foundation. It is a building of 4 floors type, more ground floor, with constructive system in concrete walls and foundation by pile raft supported on thick deposits of soils of low resistance, typical configuration of housing of social interest constructed in the Metropolitan Region of Recife, Pernambuco. The structural design was performed for five scenarios: 1) common slab in reinforced concrete; 2) extensive green roof with draining layer of expanded clay; 3) extensive green roof with draining layer of gravel; 4) intensive green roof with shrubby vegetation; 5) Intensive green roof with vegetation of small trees and shrubs. To analyze the performance of the foundation, the entire construction system was modeled in SAP 2000 software. The repressions generated were compared with the results of the repressions estimated and monitored in Scenario 1. It was verified that all green roofs could be implemented, since there was no significant increase in the displacements of the structure on the ground, not requiring reinforcement in the structure and foundation. Scenario 3 would be the most suitable for implementation in buildings of social interest like building studied, as it is easy to install, handle and maintain, providing environmental and economic benefits.

**Keywords:** Eco technology, sustentabilit, enviroment. load capacity.

### **Análisis de viabilidad de la implantación de cubiertas verdes en edificios de interés social: impacto de la sobrecarga sobre la estructura y cimentación**

#### **Resumen:**

El techo verde es una solución constructiva sostenible que se ha adoptado para mitigar las malas consecuencias de la urbanización, trayendo equilibrio entre los edificios y el medio ambiente, actuando como una importante acción táctica para la gestión ambiental de las ciudades. Este artículo presenta un análisis de factibilidad de la implementación de techos verdes respecto al impacto causado por la sobrecarga generada en la estructura y cimentación. Se trata de un edificio de 4 plantas tipo, más planta baja, con sistema constructivo en muros de hormigón y cimentación por radiador apilado sobre gruesos depósitos de suelos de baja resistencia, configuración típica de vivienda de construida en la Región Metropolitana de Recife, Pernambuco. El diseño estructural se realizó para cinco escenarios: 1) losa común en hormigón armado; 2) extenso techo verde con capa drenante de arcilla expandida; 3) amplio techo verde con capa de grava drenante; 4) techo verde intensivo con vegetación arbustiva; 5) Techo verde intensivo con vegetación de pequeños árboles y arbustos. Para analizar el rendimiento de la cimentación, todo el sistema de construcción se modeló en el software SAP 2000. Las represiones generadas fueron comparadas con los resultados de las represiones estimadas y monitoreadas en el Escenario 1. Se verificó que todos los techos verdes pudieran implementarse, ya que no hubo un aumento significativo en los desplazamientos de la estructura en el suelo, no requiriendo refuerzo en la estructura y cimentación. El escenario 3 sería el más adecuado, ya que es fácil de instalar, manejar y mantener, y puede aplicarse en construcciones populares similar al edificio estudiado, aportando beneficios ambientales y económicos.

**Palabras clave:** Tecnología ecológica, sostenibilidad, medio ambiente, capacidad de carga.

#### **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 em relação aos 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, Hellies e Deidda, 2017).

As edificações populares financiadas pelo Programa Minha Casa Minha Vida (MCMV) têm sido executadas em grande escala no Brasil e, por isso, apresentam alto potencial de contribuição ambiental, caso agregarem as coberturas verdes como padrão de execução. Algumas cidades já oferecem descontos no Imposto Predial de Território Urbano (IPTU) para prédios que realizam práticas sustentáveis, estimulando assim, a instalação de telhados verdes. Na cidade de Recife, capital de Pernambuco, existe a Lei nº 18.112/2015 (Brasil, 2015), que obriga a instalação de telhado verde a todos os edifícios novos que possuem mais de quatro pavimentos.

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 e Palha, 2017). Um aspecto importante para implantação desse sistema é a sobrecarga que ele exercerá sobre as estruturas construídas, principalmente, quando saturado pela chuva. Portanto, a viabilidade de sua instalação em construções já existentes e que ainda estão em planejamento deve ser considerada.

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.

O objetivo deste artigo é apresentar a análise de viabilidade da implantação de telhados verdes quanto ao impacto causado pela sobrecarga gerada na estrutura de uma edificação padrão MCMV, de quatro pavimentos tipo, mais térreo, com sistema construtivo em paredes de concreto, e na fundação por radier estaqueado sobre espessos depósitos de solos de baixa resistência. A edificação está situado em um condomínio residencial localizado Região Metropolitana do Recife, Pernambuco. A consideração da implantação de coberturas verdes em edificações padrão MCMV, seus benefícios e a influência estrutural dessa tecnologia em fundação em radier estaqueado torna este estudo pioneiro, integrando a sustentabilidade com a análise solo-estrutura.

## **METODOLOGIA/ MATERIAL E MÉTODOS**

### **Caracterização da área**

A área de estudo está compreendida em uma obra de um condomínio residencial, o EcoVila Praia, o qual possui 14 blocos, com 5 andares, cada (térreo e 4 pavimentos tipo), localizado no bairro Candeias, no município de Jaboatão dos Guararapes, Região Metropolitana do Recife, no estado de Pernambuco (Latitude 8°11'55.44"S e longitude 34°55'35.98"O). A maquete digital da Figura 1 representa, em 3D, a disposição dos blocos pertencentes ao condomínio e apresenta o bloco 13, o qual é o objeto de análise da dissertação de Silva (2003).

Para o levantamento geológico e geotécnico do local foram realizados ensaios *Standart Penetration Test* (SPT), de acordo com a 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 10,0m de espessura, seguido por uma camada de areia muito argilosa de 7,0 m de areia muito argilosa, e cerca de 22 m de espessura de uma camada de areia. Diante dessas características do terreno, determinou-se utilizar radier estaqueado como solução

para a fundação. 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 no bloco 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.

**Figura 1.** Maquete digital do condomínio.



**Fonte:** Adaptado de (Silva, 2023).

Para o bloco 13 foram executadas 82 estacas pré-fabricadas em concreto com uma capacidade de carga de 86 toneladas, comprimento variando de 14 m a 21 m, possuindo seção transversal quadrada de lado correspondente a 26,5 cm, vazadas com furo de 12 cm de diâmetro e armadas com aço CA-50. A área do radier corresponde a 528m<sup>2</sup> e a área da laje é de 422,4m<sup>2</sup>, aproximadamente 20% menor que a área do radier. Na Figura 2 é registrada a construção do empreendimento, indicando a disposição das estacas e o radier.

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. Respectivamente, com as espessuras de 15 cm, 10 cm e 25 cm foram adotados na modelagem estrutural para as análises.

**Figura 2.** Construção da fundação do empreendimento



**Legenda:** (a) – Disposição das estacas; (b) – Construção do radier.  
**Fonte:** Alves, 2021.

## Metodologia

A metodologia utilizada consistiu em: (a) analisar os dados estruturais para determinar os cenários de tipo e carga de telhados verdes e quantificar as respectivas cargas; (b) inserir as cargas referentes aos cenários de telhados verdes no modelo numérico e estrutural da edificação pelo método dos elementos finitos (MEF) através do software SAP 2000; e (c) verificar o acréscimo de carga e sua contribuição nos recalques dos elementos isolados estacas e radier, e do sistema radier-estaca.

Tanto o radier em contato com o solo quanto as estacas foram modeladas com apoios elásticos lineares, conforme proposto por Winkler (1867). Para a determinar o coeficiente de mola, calculou-se o módulo de elasticidade, a partir dos resultados do SPT.

Foram propostos 5 cenários de configuração de coberturas verdes:

- Cenário 1: Laje convencional em concreto armado (peso específico: 200,29 kg/m<sup>2</sup>).
- Cenário 2: Telhado verde plano e extensivo (peso específico: 339,10 kg/m<sup>2</sup>). Composto pela camada de impermeabilização (manta asfáltica); camada drenante com 7 cm de espessura (argila expandida); camada filtrante e anti raízes (manta geotêxtil bidim);

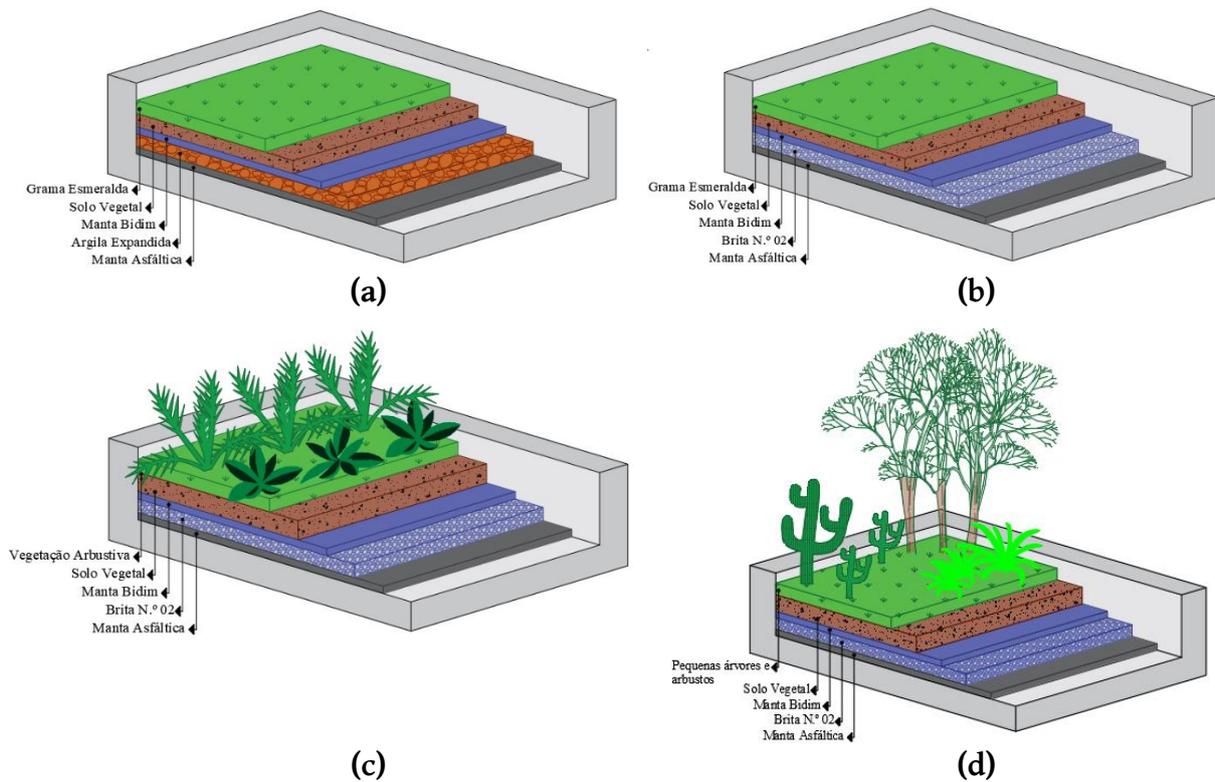
camada de substrato de terra vegetal com 6 cm de espessura; vegetação de grama esmeralda (Figura 3a).

- Cenário 3: Telhado verde plano e extensivo (peso específico: 500,00 kg/m<sup>2</sup>). Composto pela camada de impermeabilização (manta asfáltica); camada drenante com 7 cm de espessura (brita 02); camada filtrante e anti raízes (manta geotêxtil bidim); camada de substrato de terra vegetal de 6 cm com espessura; vegetação de grama esmeralda (Figura 3b).

- Cenário 4: Telhado verde intensivo (peso específico: 700,00 kg/m<sup>2</sup>). Composto por camada de impermeabilização (manta asfáltica); camada drenante com 7 cm de espessura (brita 02); camada filtrante e anti raízes (manta geotêxtil bidim); camada de substrato de terra vegetal saturada e espessura de 20 cm; vegetação arbustiva (Figura 3c).

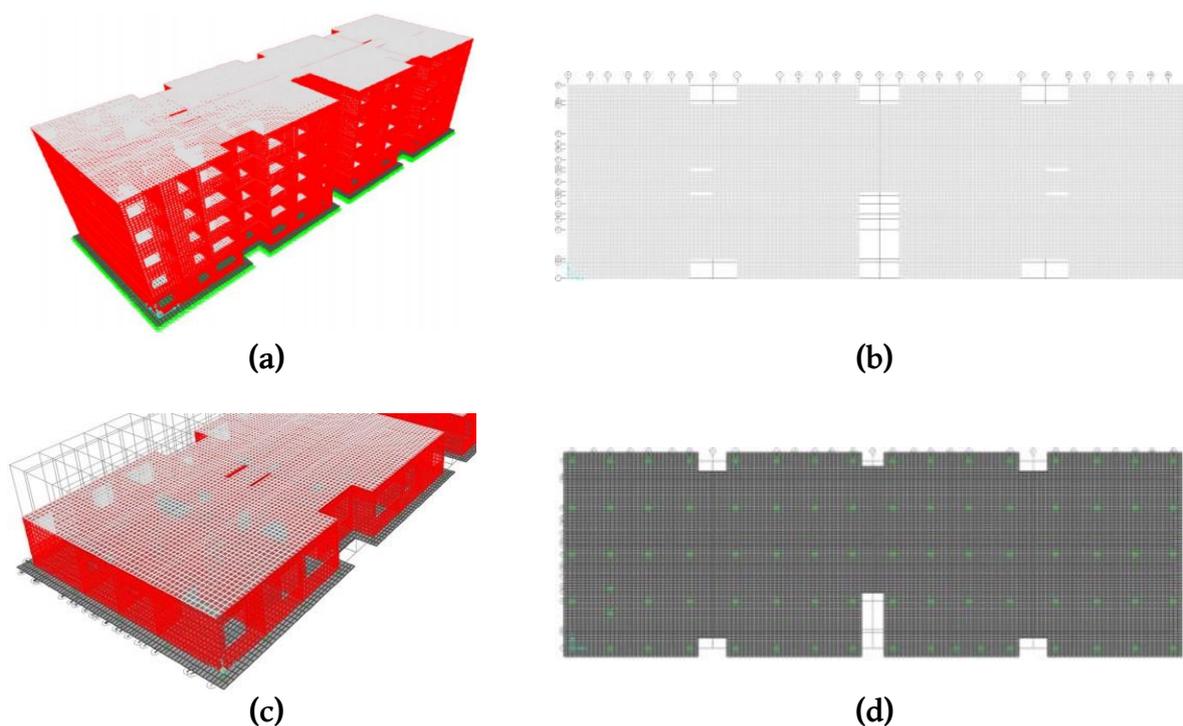
- Cenário 5: Telhado verde intensivo (peso específico: 700,00 kg/m<sup>2</sup>). Composto por camada de impermeabilização (manta asfáltica); camada drenante com 7 cm de espessura (brita 02); camada filtrante e anti raízes (manta geotêxtil bidim); camada de substrato de terra vegetal saturada, com 30 cm de espessura; vegetação com pequenas árvores e arbustos de maior porte (Figura 3d).

Figura 3. Modelagem dos telhados verdes extensivos.



Legenda: (a) – Cenário 2; (b) Cenário 3; (c) Cenário 4; (d) Cenário 5.  
Fonte: Silva (2023).

A modelagem consistiu na simulação estrutural das características descritas no projeto estrutural, gerando uma malha de elementos finitos. A modelagem da estrutura, as malhas das lajes, das paredes de concreto e do radier, respectivamente, podem ser analisadas através das Figuras 4a, 4b, 4c e 4d.

**Figura 4.** Modelo numérico e malhas de elementos finitos

**Legenda:** (a) – Bloco; (b) – Lajes; (c) Paredes; (d) Radier.  
**Fonte:** Silva (2023)

A partir dos dados das reações e dos deslocamentos obtidos pelo SAP 2000, realizou-se a análise estatística dos dados através do Software R. 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.

## RESULTADOS

### Somatório das cargas da estrutura

Após a modelagem, quantificando os elementos finitos, as estacas resultaram em 82 pontos, já o radier foi dividido em 10194 pontos. Na Tabela 1 estão apresentados o somatório das cargas nas estacas e radier para cada cenário.

**Tabela 1** – Somatório de cargas nas estacas e radier fornecidos pelo SAP 2000.

Cenários	1	2	3	4	5
<b>ESTACAS</b>					
<b>Somatório reações (kN)</b>	24.439,49	25.155,83	25.652,31	26.227,78	26.943,10
<b>RADIER</b>					
<b>Somatório reações (kN)</b>	6.439,61	6.625,69	6.754,66	6.904,16	7.089,95

Fonte: Silva (2023)

### **Análise de reações de apoio e recalques: Estacas**

Foi realizada uma análise estatística dos resultados iniciando pela verificação da normalidade dos dados através do teste não paramétrico de *Kruskal-Wallis*, confirmando uma diferença de carga e recalque significativa entre os cenários. Com isso, seguiu-se para os testes de *Wilcoxon*, usado para testar se as medianas das amostras são iguais nos casos em que a suposição de normalidade não é satisfeita ou quando não for possível checar essa suposição. Os valores de P-valor das reações e dos deslocamentos foram de mesma ordem, o que representa uma boa proporcionalidade dos resultados e da relação “carga x recalque”.

Na Tabela 2 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 deslocamentos máximos de 0,2 mm (7,36%) e 0,3 mm (10,30%), respectivamente. Em relação aos valores de carga, houve um aumento 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%).

Entres os cenários com coberturas verdes, a menor diferença encontra-se entre as coberturas extensivas (Cenários 2 e 3) e a maior diferença entre os Cenários 2 e 5. Contudo, 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, a lógica acompanha os resultados, apresentando valores similares. Com esse resultado, pode-se identificar que o Cenário 3, o qual, possui a brita 02 em sua composição, pode certamente ser substituída pela cobertura do tipo intensiva de vegetação arbustiva do Cenário 4, sem acréscimo de recalque significativo.

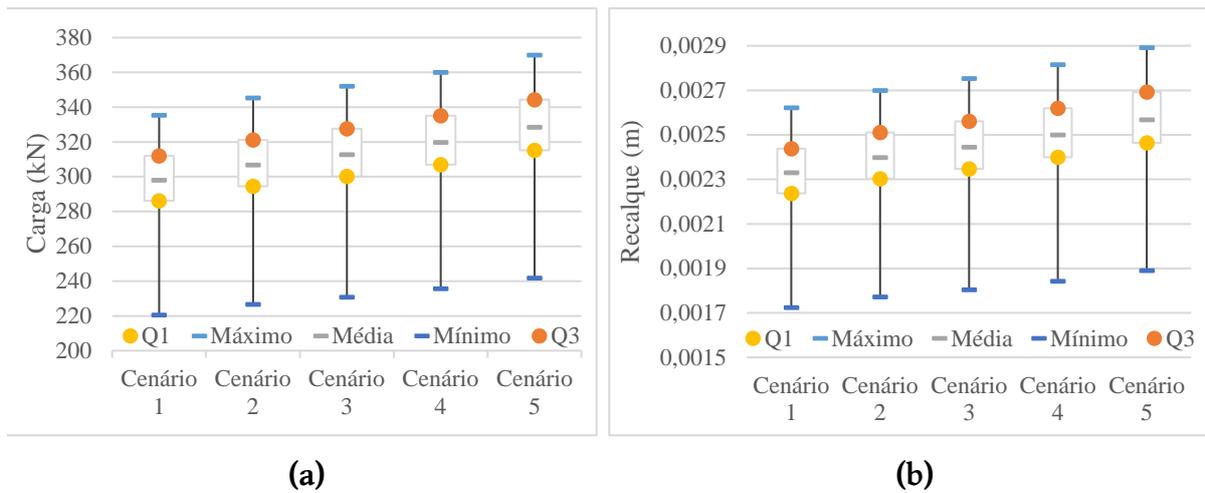
Nas Figuras 5 e 6 seguem os gráficos *boxplot* das reações e deslocamentos das estacas para os cinco cenários. Observa-se um crescimento uniforme das reações de apoio, com uma variação máxima de 115 kN no Cenário 1 e 129 kN no Cenário 5. Mesmo com maior carga conferida à estrutura, a proporção em que cada estaca recebe o carregamento não irá variar significativamente em carregamentos de magnitude semelhante. A variação entre mínimos e máximos permanece com pouca variação em todos os cenários.

**Tabela 2** - Comparação entre cenários, dos resultados de carga e recalque nas estacas.

Comparação	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: Silva (2023).

**Figura 2.** Gráfico *boxplot* das reações nas estacas para os cinco cenários.



**Legenda:** (a) – Reações; (b) – Deslocamentos.  
**Fonte:** Silva (2023).

Quanto aos deslocamentos, ocorreu a mesma uniformidade na evolução dos recalques, indicando que o solo não apresenta ruptura. O maciço consegue equilibrar as solicitações que lhe são impostas, permitindo deslocamentos mínimos e homogêneos à estrutura.

Quanto à relação carga x recalque, o Cenário 1 apresentou um deslocamento mínimo de 1,72 mm para uma carga mínima de 220,58 kN e um deslocamento máximo de 2,62 mm para uma carga máxima de 335,37 kN. No Cenário 2 observa-se 1,77 mm como valor mínimo de recalque e 2,70 mm para o valor máximo. Para as reações, foram obtidos os valores mínimo e máximo de 226,64 kN e 345,28 kN, respectivamente. 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 230,84 kN e um deslocamento máximo de 2,753 mm para uma carga máxima de 352,14 kN.

Verificou-se um recalque mínimo de 1,84 mm e máximo de 2,81 mm, para uma diferença nas reações mínima de 235,71 kN e máxima de 360,10 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 124,38 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. No Cenário 5, houve um carregamento mínimo nas estacas de 241,77 kN e máximo

de 369,99 kN, com diferença de deslocamento de 1,0 mm, apenas, no acréscimo de 128,22 kN de carga, apresentando homogeneidade nos recalques.

### **Análise de reações de apoio e recalques: Radier**

Em relação à 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. 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. Tal falha pode ter ocorrido pela amostra de tamanho 100 ainda ser extensa para a análise do Software. Contudo, as comparações entre as médias podem ser feitas e deduzidas de forma simples, apresentando os valores de mínimo, máximo, primeiro e terceiro quartis e a média para reações e recalques nos cinco cenários (Tabela 3).

**Tabela 3** - Comparação entre cenários, dos resultados de carga e recalque no radier.

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

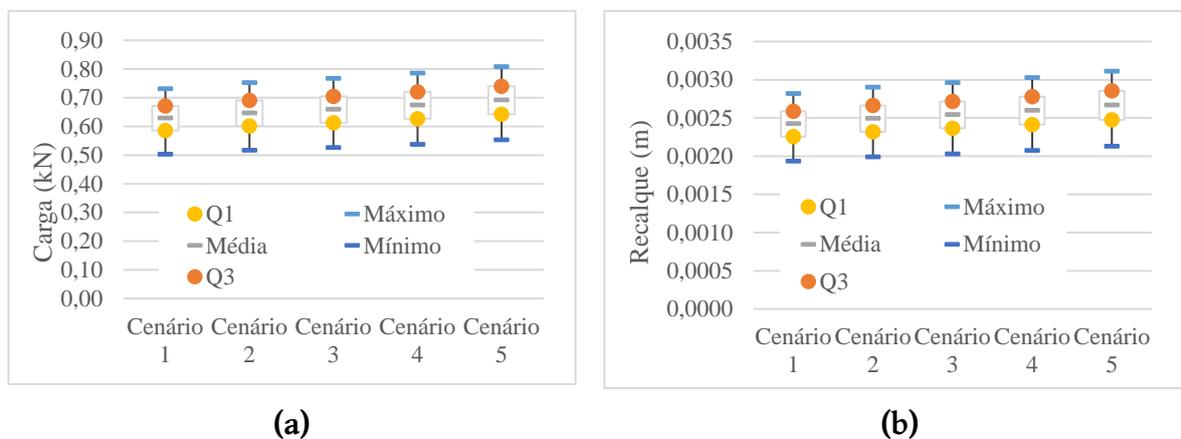
Fonte: Silva (2023).

Comparando os tipos de cobertura, 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 314,54 kN e pontual de, variando de 0,02 a 0,04 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 0,01 e 0,02 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 0,03 kN a 0,05 kN, enquanto o Cenário 5 (cobertura intensiva com árvores de pequeno porte e arbustos) apresentou um aumento nas reações de carga entre 0,05 kN a 0,08 kN. Para os deslocamentos, o Cenário 4 apresentou 0,02 mm de variação nos deslocamentos, e o Cenário 5 acrescentou de 0,02 mm a 0,03 mm nos deslocamentos.

As maiores diferenças entre todos os cenários em relação ao Cenário 1 são sobre as reações nos apoios ou pontos, como o SAP 2000 representa, ainda assim, são da ordem de 10<sup>-2</sup> kN. Os recalques variam sucintamente na ordem de 10<sup>-2</sup> mm, tanto nas coberturas extensivas quanto nas coberturas do tipo intensiva. Nos gráficos *boxplot* para as reações de apoio e recalques (Figura 6a e 6b), a maior diferença entre os carregamentos é inferior a 0,1 kN e uma flutuação singular entre os deslocamentos dos cenários, com valor inferior a 0,5 mm.

**Figura 6.** Gráfico *boxplot* no radier para os cenários 1, 2 e 3



**Legenda:** (a) – Reações; (b) – Deslocamentos.  
**Fonte:** Silva (2023).

No Cenário 1 observa-se um recalque mínimo de 1,94 mm, resultado de uma

solicitação de 0,50 kN e um deslocamento de 2,82 mm para uma carga de 0,73 kN. No Cenário 2, os recalques variaram entre 1,99 mm e 2,91 mm. Entre as cargas, houve uma variação de mínimo para máximo de 0,52 kN para 0,75 kN. Os recalques do Cenário 3 variaram entre 1,8 mm e 2,8 mm, a uma diferença de carga de 0,24 kN entre a carga máxima e mínima. Nos Cenários 4 e 5, houve uma variação entre os recalques de 0,95 mm e de 0,99 mm para uma diferença de carregamento de 0,25 kN e de 0,25 kN, respectivamente.

O carregamento dos radiers, apresentou-se inferior a alguns dos resultados apresentados por 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.

#### **Análise de reações de apoio e recalques: radier x estacas**

Para todos os cenários, o radier absorve apenas 21% da carga total enquanto as estacas absorvem os 79% restantes (Tabela 4), o que é positivo, pelas características do solo da região necessitarem que as fundações profundas resistam às maiores solicitações.

**Tabela 4** - Cargas absorvidas pelos elementos do radier estaqueado

CENÁRIOS	1	2	3	4	5
<b>RADIER</b>					
<b>Somatório reações (kN)</b>	6.439,61	6.625,70	6.754,66	6.904,16	7.089,95
<b>% em relação ao total</b>	21	21	21	21	21
<b>ESTACA</b>					
<b>Somatório reações (kN)</b>	24.439,49	25.155,84	25.652,31	26.227,78	26.943,10
<b>% em relação ao total</b>	79	79	79	79	79
<b>Total (kN)</b>	<b>30.879,10</b>	<b>31.781,53</b>	<b>32.406,97</b>	<b>33.131,934</b>	<b>34.033,05</b>

Fonte: Silva (2023).

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.

Na Tabela 5 é apresentada a variação entre máximos e mínimos de carga e recalques nos elementos do radier estaqueado, para cada cenário. 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.

**Tabela 5** - Variação entre máximos e mínimos de carga e recalques nos sistemas radier- estaca.

ESTACAS	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
<b>Carga (kN)</b>	114,79	118,63	121,29	124,38	128,22
<b>Recalque (mm)</b>	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0
RADIER	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
<b>Carga (kN)</b>	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25
<b>Recalque (mm)</b>	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0

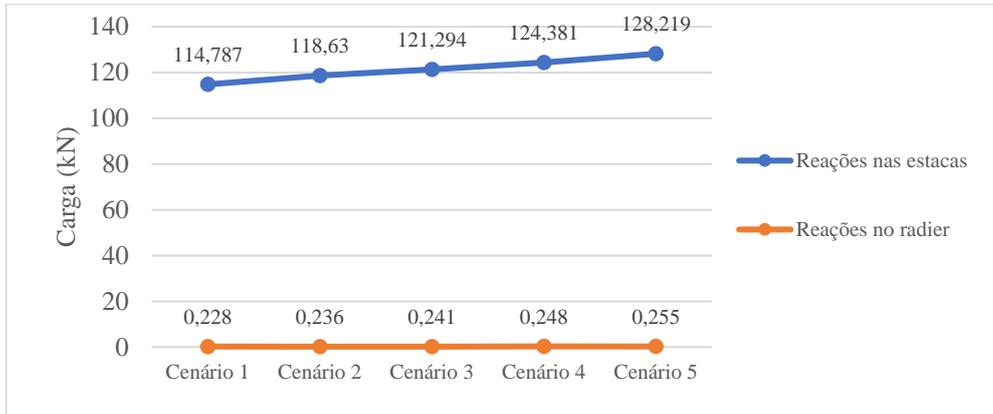
Fonte: Silva (2023).

Na Figura 5 é representada a evolução das reações do radier estaqueado à medida do aumento de carga entre os cenários. Na Figura 6 tem-se a variação dos recalques ao longo dos cenários para o radier estaqueado. Observa-se o mesmo acréscimo de recalque nos Cenários 1 ao 3 e nos Cenários 4 e 5. É importante salientar que o radier se desloca às solicitações bem menores, fomentando que o radier é elemento menos resistente do sistema radier-estaca.

Os deslocamentos obtidos no SAP 2000 são inferiores aos resultados da prova estática

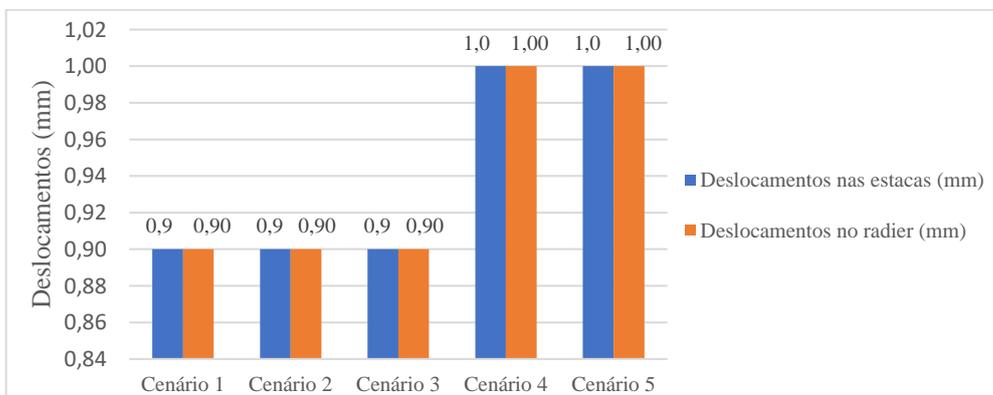
realizada em campo, contribuindo para a implantação dos telhados verdes em qualquer cenário analisado, uma vez que não irá gerar impactos de grande influência na estrutura. Os acréscimos de recalques foram aceitáveis.

**Figura 5** - Gráfico da evolução das reações dos cenários do radier estaqueado



Fonte: Silva (2023).

**Figura 3** - Gráfico da evolução dos recalques dos cenários no radier estaqueado



Fonte: Silva (2023).

Quanto as características próprias dos tipos de telhado verde, 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. As desvantagens desse tipo de cobertura apresentam 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. Em uma edificação já construída, existe uma grande possibilidade de reforço na laje de contenção da cobertura para garantia do suporte de carga 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.

As coberturas verdes extensivas (Cenários 2 e 3) por ser mais leve, conferiu menores recalques e reações de apoio. Por ter uma camada de substrato menos espessa, apresenta menor potencial de infiltração, e por comportar vegetação de menor porte, necessita de menos manutenção e irrigação, tornando-se menos atrativa para o acesso recorrente de pessoas, o que pode descartar a necessidade de estruturas de suporte e segurança para os moradores. Contudo, 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.

Destaca-se 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. Em caso de imóveis existentes, é importante o estudo da estrutura como um todo, além da fundação para que transtornos futuros sejam evitados.

## CONCLUSÃO

Os cenários de sobrecarga e recalques apresentaram-se satisfatórios, principalmente na evolução de carregamento, na qual a maior diferença ocorreu entre os Cenários 5 e 1 (10,30% para as reações de apoio e os recalques), significando 34,60 kN e 0,27 mm para as estacas e 0,08 kN e 0,29 mm para o radier.

Todas as coberturas verdes poderiam ser utilizadas no empreendimento no âmbito do comportamento da fundação. As coberturas do tipo intensiva (Cenário 4 e 5), apesar de apresentarem bons resultados de recalques e carregamentos, necessitam de maiores cuidados de instalação e manutenção da cobertura e da estrutura, dificultando a implantação desse tipo de cobertura no empreendimento. A opção mais aceitável seriam as coberturas dos

Cenários 2 e sobretudo do Cenário 3, pois além dos benefícios ambientais que a cobertura propõe, 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 do Cenário 2, a qual é mais utilizada em paisagismo e jardinagem.

Os resultados obtidos mostram a viabilidade na consideração de telhados verdes do tipo extensivo para construções populares semelhantes a edificação estudada, 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.

## REFERÊNCIAS/REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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.  
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.

BUCOLLA, 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.

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.

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->

Análise de viabilidade de implantação de telhados verdes em edificações de interesse social: impacto da sobrecarga sobre a estrutura e fundação

[sciedirect.ez16.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0360132323001853?via%3Dihub](https://sciedirect.ez16.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0360132323001853?via%3Dihub) . Acesso em: 21 mar. 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.

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-%20qualidade-ambiental-das-edificacoes-por-meio-da-obrigatoriedade-de-instalacao-do-%20telhado-verde-e-construcao-de-reservatorios-de-ac%C3%BAmulo-ou-de-retardo-do-escoame%20nto-das-aguas-pluviais-para-a-rede-de-drenagem-e-da-outras-providencias> Acesso em 1 nov 2022.

SILVA, L. N. P. *Análise do impacto da sobrecarga de telhado verde gerado sobre o radier estaqueado de uma edificação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/54688>. Acesso em: 12 dez. 2023.

STELLA, P.; PERSONNE, E. *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-sciedirect.ez16.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S036013232100603X?via%3Dihub> . Acesso em: 21 mar. 2023.

HELLIES, M; DEIDDA, R; VIOLA, F. *Retention performances of green roofs worldwide at different time scales*. Land Degradation and Development 29(6), 2017. Disponível: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ldr.2947>.



Este trabalho está licenciado com uma Licença [Creative Commons - Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).