

Análise da capacidade de carga de um perfil geotécnico para a determinação do número máximo de pavimentos apoiados em uma fundação rasa, a partir de ensaio de SPT (Standard Penetration Test)

AUTOR – Vinícius Vicente Stipp Giandoni (vgiandoni1@gmail.com)

ORIENTADOR – Cristiano Sanchez Júnior (csj.contatoengenharia@gmail.com)

FACULDADE GALILEU

Resumo: *Este trabalho realiza uma análise técnica da capacidade de suporte de um perfil geotécnico específico na região de Botucatu-SP, visando determinar o limite de pavimentos que o solo suporta com segurança. O comportamento do solo é o fator determinante para o desempenho estrutural e para a viabilidade do projeto. O estudo baseia-se estritamente nas normas técnicas brasileiras, utilizando a ABNT NBR 6120:2019 para a definição das ações e cargas da superestrutura e a ABNT NBR 6122:2022 para o dimensionamento e segurança das fundações. A caracterização do subsolo é feita por meio do ensaio de simples reconhecimento (SPT), conforme a ABNT NBR 6484:2020, que fornece os parâmetros de resistência à penetração e a caracterização estratigráfica necessários para avaliar a capacidade de suporte do terreno. Por meio de métodos semiempíricos e critérios normativos de segurança (ABNT NBR 8681:2025), busca-se identificar até que ponto a estrutura pode ser verticalizada sem comprometer a estabilidade e a segurança das fundações. Os resultados permitiram determinar a tensão admissível do terreno e estabelecer um limite teórico de pavimentos compatível com a capacidade resistente do solo analisado.*

Palavras-chave: *Fundações, Perfil Geotécnico, SPT, Capacidade de Carga do Solo, Normas Técnicas.*

Analysis of the Bearing Capacity of a Geotechnical Profile for Determining the Maximum Number of Stories Supported by a Shallow Foundation Based on Standard Penetration Test (SPT)

Abstract: *This study presents a geotechnical analysis of the bearing capacity of a specific soil profile located in the city of Botucatu, São Paulo, Brasil, aiming to determine the maximum number of building stories that the subsoil can safely support. Soil behavior is considered a determining factor for structural performance and project feasibility. The study is strictly based on razilian technical standards, using ABNT NBR 6120:2019 to define superstructure actions and loads, and ABNT NBR 6122:2022 for foundation design and safety criteria. Subsoil characterization was carried out through the Standard Penetration Test (SPT), in accordance with ABNT NBR 6484:2020, providing penetration resistance parameters and stratigraphic data required to evaluate the soil bearing capacity. Using semi-empirical methods and the safety criteria established by ABNT NBR 8681:2025, the study seeks to determine the maximum structural height without compromising foundation stability and safety. The results made it possible to determine the allowable bearing capacity of the soil and establish a theoretical limit for the number of stories compatible with the resistance capacity of the analyzed ground.*

Keywords: *Shallow Foundations, Geotechnical Profile, Standard Penetration Test (SPT), Soil Bearing Capacity, Technical Standards.*

1. INTRODUÇÃO:

Todo projeto de engenharia civil inicia-se com uma análise de viabilidade técnica para garantir que os recursos e métodos empregados estejam em conformidade com a segurança estrutural e os objetivos da obra. No contexto da construção de edifícios, a ABNT NBR 6122:2022 — “Projeto e execução de fundações” explicita que a fundação desempenha o papel crítico de transmitir ao solo as cargas provenientes da superestrutura, garantindo que não ocorram tensões excessivas ou deslocamentos que comprometam a estabilidade da edificação.

Tendo em vista a constante necessidade de garantir a estabilidade e a segurança das edificações conforme estabelecido em norma, o problema que cerca tais questões é encontrar a capacidade máxima que um solo com um perfil geotécnico específico suporta com segurança ou a quantidade máxima de pavimentos de um edifício multifamiliar que não ultrapasse tensões máximas de capacidade do solo.

Portanto, é necessário assegurar que todo o processo de cálculo e execução das fundações atenda aos padrões exigidos, evitando subdimensionamento que comprometa a segurança ou superdimensionamento desnecessário. A análise detalhada do subsolo por meio do ensaio de simples reconhecimento (SPT), regulamentado pela NBR 6484:2020, é indispensável para viabilizar a fundação e determinar o potencial de uso do terreno.

Interpretando os resultados do ensaio SPT, calculando a capacidade de carga e a tensão admissível do terreno e estimando as ações permanentes e variáveis da superestrutura por pavimento, podemos verificar o limite de carga suportada pela fundação, atingindo o objetivo do presente trabalho, que é determinar de maneira analítica o número máximo de pavimentos que um solo específico suporta, utilizando parâmetros geotécnicos e normativos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para efeitos de dimensionamento, o trabalho leva em consideração a ABNT NBR 6120:2019 — “Ações para o cálculo de estruturas de edificações”, que define as ações permanentes e variáveis que serão consideradas no dimensionamento das estruturas. Essa norma é aplicada na etapa inicial do projeto, pois estabelecerá o plano de cargas geradas pela superestrutura. Essa base criada por tal norma servirá para o cálculo pré dimensional estrutural e de fundações, pois determina as forças que serão transmitidas ao solo e, por consequência, definirá a fundação.

Complementando essa etapa, a ABNT NBR 8681:2025 — “Ações e segurança nas estruturas — Procedimento” determina as combinações de ações e os critérios de segurança necessários para garantir a estabilidade da edificação. Junto a ela, a ABNT NBR 6118:2023 — “Projeto de estruturas de concreto — Procedimento” estabelece os critérios de cálculo, detalhamento e execução das estruturas de concreto armado, que serão fundamentais. Juntas, as normas formam um conceito técnico, que permitirá garantir segurança e atender as necessidades apresentadas pela ABNT NBR 6120:2019.

A partir da ABNT NBR 6122:2022 — “Projeto e execução de fundações”, serão definidos os parâmetros para o dimensionamento e execução das fundações, superficiais ou profundas, mediante a necessidade apresentada pelas características geotécnicas, orientando os procedimentos para verificar a capacidade do solo e garantindo a estabilidade da edificação.

Para garantir que o projeto seja executado com parâmetros de qualidade, serão levadas em consideração as normas ABNT NBR 15575:2021 — “Edificações Habitacionais — Desempenho” e ABNT NBR 14931:2004 — “Execução de estruturas de concreto — Procedimento”, que juntas asseguram que o processo, desde o cálculo até a execução, seja conduzido conforme os padrões exigidos pela construção civil.

O comportamento do solo é um dos principais fatores que determinam o dimensionamento e o tipo da fundação que será adotada. Segundo Pinto (2006), o solo é um material natural heterogêneo e de diferentes propriedades, formado por partículas orgânicas e minerais, que são resultado da decomposição de uma rocha mãe, que define as propriedades mecânicas do solo originado. É extremamente essencial a compreensão dessas propriedades para que a capacidade de carga do solo seja estimada, tal qual a compressibilidade do potencial de recalque do terreno, assegurando que a carga exigida pela superestrutura seja transmitida de forma segura e não danosa ao solo. Portanto, um estudo geotécnico, com ensaios tipo *Standard Penetration Test* (SPT), é indispensável no processo de viabilidade da fundação.

O reconhecimento geotécnico do subsolo do tipo SPT é regulamentado pela ABNT NBR 6484:2020 — “Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio”, que mostra a execução, registro e interpretação dos resultados obtidos, fornecendo parâmetros como a resistência à penetração, caracterização estratigráfica e amostras do solo. Tais dados permitem avaliar a capacidade de suporte do terreno.

De acordo com Velloso e Lopes (2010), a escolha do tipo da fundação deverá considerar diversos aspectos técnicos. As fundações são sumariamente resumidas em dois grandes grupos: fundações profundas, com elementos como estacas e tubulões, que são utilizados quando as camadas superficiais do solo não possuem capacidade de carga suficiente para suportar o peso

da superestrutura, assim exigindo que tal carga seja transferida para camadas mais resistentes em profundidade. E fundações rasas, como sapatas, blocos e radiers, indicadas em situações para as quais as camadas superficiais do solo têm uma adequada capacidade de suporte. Velloso e Lopes (2010) afirmam ainda que a decisão do uso de um tipo ou outro não depende apenas dos critérios técnicos, mas também de fatores como prazo, disponibilidade de equipamentos e mão de obra qualificada, para que a escolha adequada impacte positivamente na obra, sem comprometer a segurança das estruturas.

Segundo Das (2019), as propriedades físicas e mecânicas dos solos devem ser levadas em consideração diretamente na escolha e dimensionamento das fundações. O tipo predominante do material que compõe o solo a ser estudado define tais propriedades. Solos arenosos são caracterizados por elevada percolação de água e baixa coesão, apresentam uma capacidade de suporte aceitável e tendem a sofrer pequenas deformações, sendo indicada fundação rasa quando não sofre influência do nível do lençol freático. Já os solos argilosos são pouco permeáveis e mais coesos, possuem comportamento muito ligado à variação de umidade, podendo gerar recalques diferenciais, exigindo fundações mais profundas. Por sua vez, solos siltosos são intermediários, mas tendem a apresentar problemas de instabilidade quando saturados. Dessa maneira, verificar as características do solo permite não apenas o dimensionamento correto, mas uma otimização sem negligenciar de critérios técnicos e de segurança.

Segundo apresentado por Velloso e Lopes (2010) e por Das (2019), as propriedades mecânicas dos solos influenciam diretamente o dimensionamento das fundações, sendo a capacidade de carga um dos principais parâmetros. Essa capacidade corresponde à tensão máxima que o solo pode suportar sem colapsar ou ter deformações excessivas. Do ponto de vista teórico, essa tensão pode ser estimada por modelos como a teoria de Terzaghi (1943), conforme é apresentada por Velloso e Lopes (2010), que relaciona todos os parâmetros do solo para sua determinação. Entretanto, na prática, é comum o uso de correlações empíricas baseadas no ensaio SPT.

Determinada a capacidade de carga do solo, torna-se necessário definir qual é a tensão admissível. Esta corresponde à capacidade de carga reduzida por um fator de segurança, conforme determina a ABNT NBR 6122:2022, com o objetivo de garantir as condições de serviço. Esse procedimento considera incertezas proporcionadas pela variabilidade do solo, simplificação dos cálculos e condições de execução. Desta forma, a tensão admissível permite

a aplicação prática dos parâmetros obtidos pelo SPT, assegurando que as cargas da superestrutura sejam transmitidas ao solo de maneira segura.

A determinação do número máximo de pavimentos está diretamente relacionada à capacidade do solo de suportar cargas, respeitando os limites de tensão admissível. À medida que novos pavimentos são adicionados, ocorre o aumento progressivo das cargas, que serão transmitidas para a fundação, podendo superar a tensão admissível do terreno. Segundo Velloso e Lopes (2010), a segurança das fundações diretamente da relação entre as tensões transmitidas pela estrutura e a capacidade resistente do solo. Portanto o limite de pavimentos é definido pela relação gerada entre as cargas atuantes e a resistência do solo.

Além da capacidade de suporte do solo, o aumento do número de pavimentos influencia diretamente a estabilidade dos pilares da edificação. Segundo Hibbeler (2010), pilares submetidos à compressão axial podem apresentar perda de estabilidade lateral antes mesmo de atingir a resistência máxima do material, fenômeno conhecido como flambagem. Segundo a teoria clássica desenvolvida por Euler em 1744 demonstra que pilares esbeltos tendem a perder estabilidade em função da carga crítica de flambagem, a qual depende das propriedades geométricas do elemento, do comprimento de flambagem e das condições de apoio. Dessa forma, a análise da esbeltez dos pilares torna-se importante em edificações de múltiplos pavimentos, uma vez que o aumento das cargas verticais e da altura da estrutura elevam a suscetibilidade aos efeitos de instabilidade.

3. METODOLOGIA

Para o presente estudo, definiu-se o seguinte fluxograma para o melhor entendimento dos processos envolvidos:

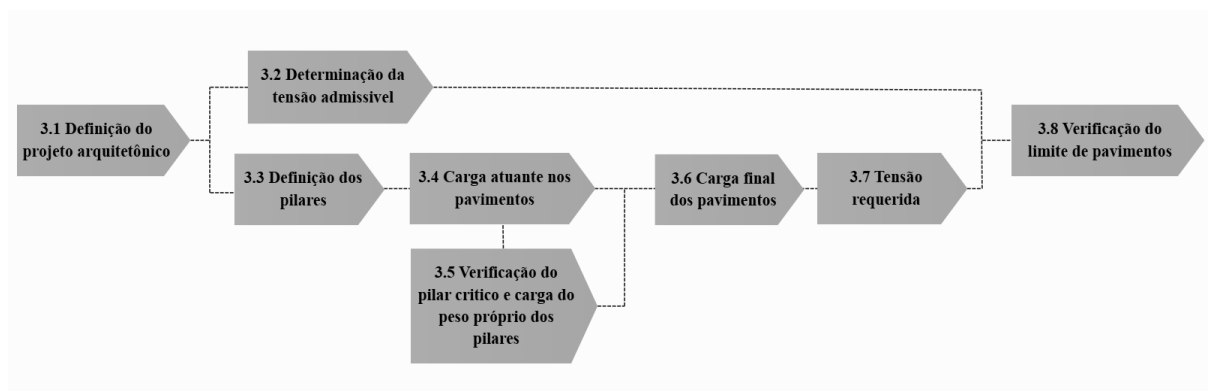


Figura 1 – Fluxograma.

Fonte: Autor (2026).

3.1. Definição do projeto arquitetônico

O modelo arquitetônico será utilizado como base para a distribuição dos elementos resistentes e determinação das ações atuantes na edificação. A partir das características geométricas do projeto, como dimensões dos ambientes e disposição dos pilares, será possível estabelecer o comportamento global da estrutura e as cargas transmitidas ao solo.

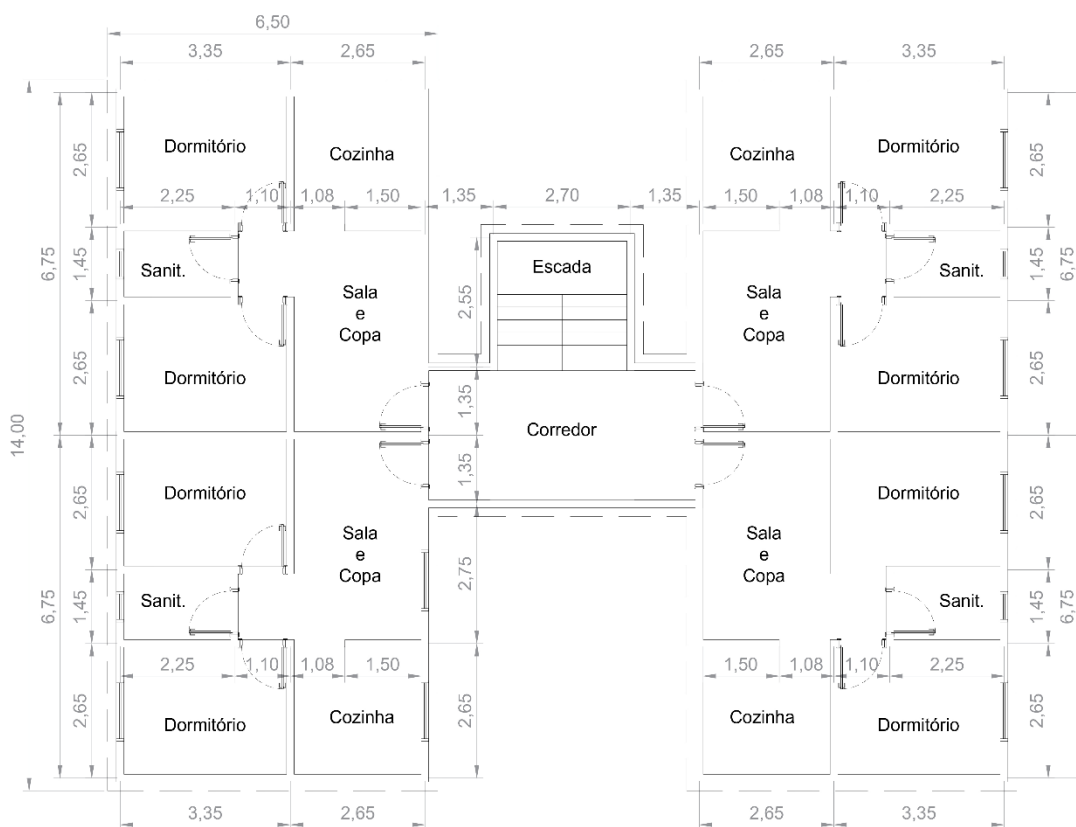


Figura 2 – Croqui arquitetônico.

Fonte: Autor (2026).

3.2. Determinação da tensão admissível do solo

A caracterização geotécnica do solo constitui a etapa subsequente, sendo fundamental para a compreensão do comportamento do terreno frente às cargas impostas pela estrutura. Para isso, serão utilizados dados provenientes de ensaio de simples reconhecimento do tipo SPT.

O perfil geotécnico adotado no estudo é apresentado na Figura 3, na qual são indicadas as camadas de solo identificadas, suas respectivas profundidades e os valores de resistência à

penetração (N-SPT) ao longo do furo de sondagem para terreno situado no município de Botucatu, interior de São Paulo.

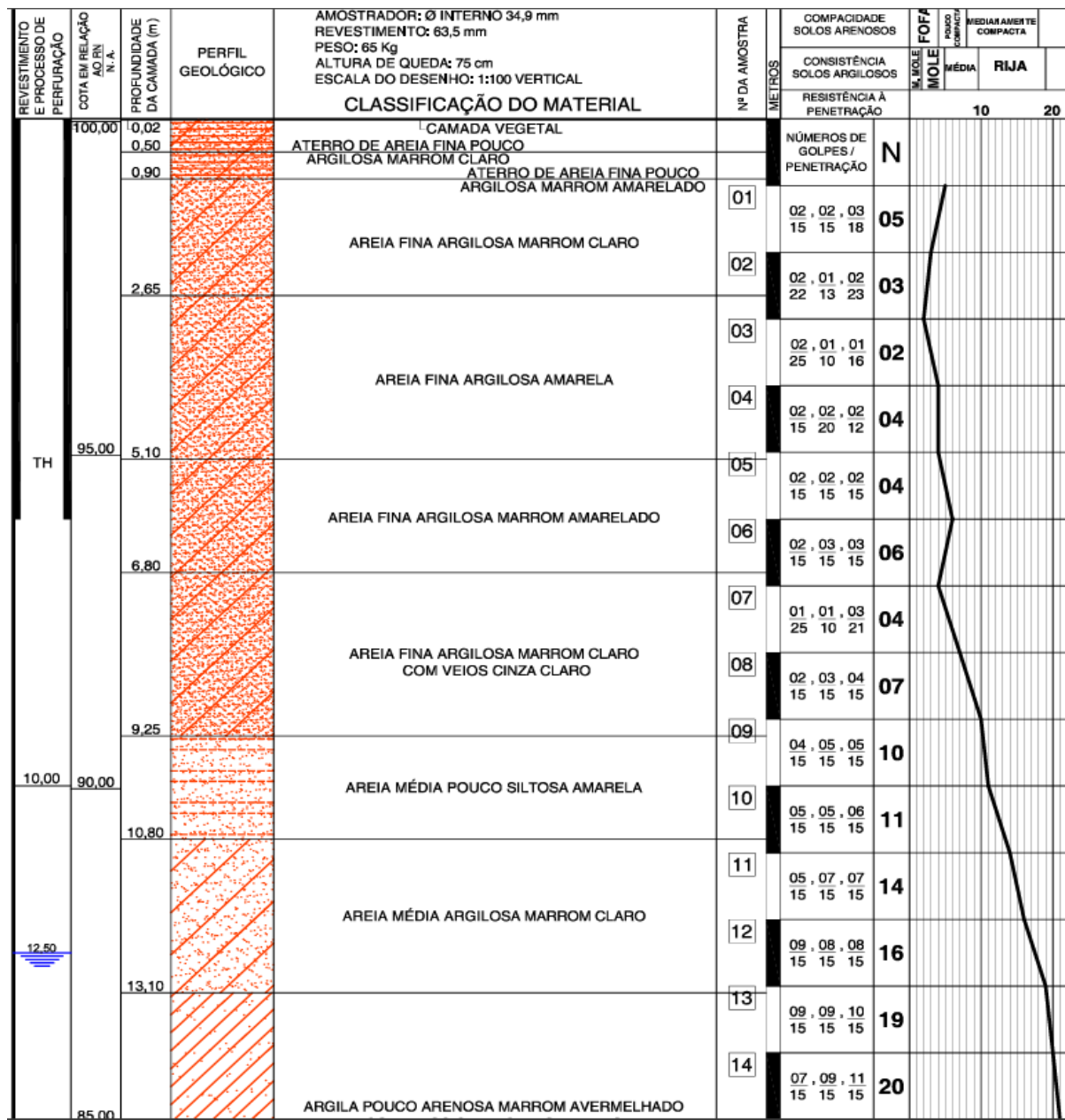


Figura 3 – SPT.

Fonte: Autor (2026), adaptado de empresa responsável.

Para a determinação da capacidade de suporte do terreno, é necessário definir a profundidade de influência do bulbo de tensões no solo, representada pelo parâmetro Z. Essa profundidade corresponde à região do subsolo efetivamente solicitada pelas cargas transmitidas pela fundação, sendo fundamental para a análise das camadas que participarão do

comportamento resistente do terreno. Conforme ilustrado na figura 4, o bulbo de tensão se propaga abaixo da fundação, distribuindo os esforços ao longo da profundidade do solo.

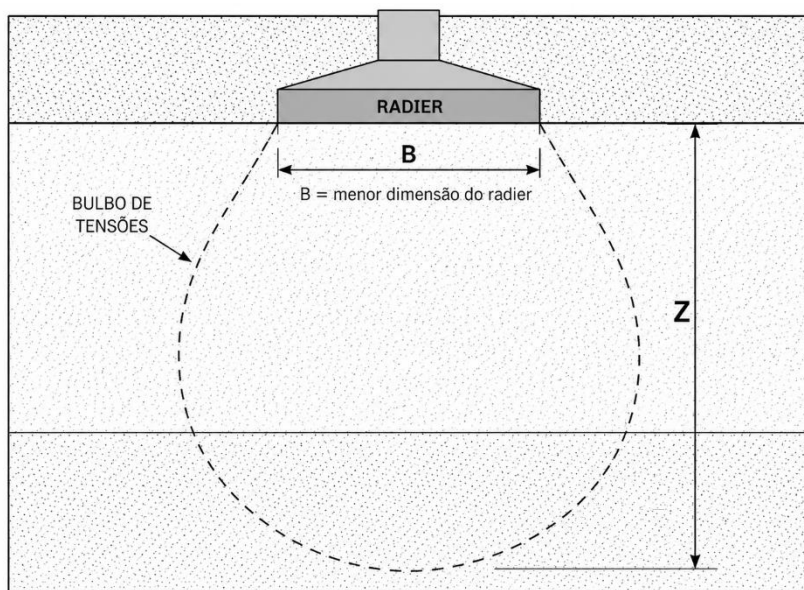


Figura 4 – Esquema representativo do bulbo de tensões em fundações superficiais.

Fonte: Adaptado de Velloso e Lopes (2010).

Embora alguns métodos semiempíricos considerem profundidades de influência de até quatro vezes a menor dimensão da fundação, as tensões transmitidas ao solo reduzem-se progressivamente com a profundidade (Velloso e Lopes, 2010). Assim, adotou-se neste estudo o critério prático da Mecânica dos Solos. Dessa forma, definiu-se uma profundidade de influência equivalente a duas vezes a menor dimensão do radier, conforme prática usual em fundações superficiais. Assim, o valor de Z será determinado pela Equação 1 a seguir:

$$Z = 2 \cdot B$$

Onde:

- Z = profundidade de influência do bulbo de tensões (m);
- B = menor dimensão do radier (m).

A partir da definição dessa profundidade, será possível identificar as camadas de solo efetivamente influenciadas pelas cargas da estrutura e, conseqüentemente, utilizar os valores de N-SPT correspondentes para a determinação da tensão admissível do terreno.

O radier será apoiado na cota de 1,00 m de profundidade em relação ao terreno natural. Dessa forma, para a análise da capacidade de suporte do solo, serão considerados apenas os valores de resistência à penetração abaixo da cota de apoio da fundação, conforme o perfil geotécnico obtido pelo ensaio SPT apresentado anteriormente.

Adotando-se a menor dimensão do radier igual a $B = 6,50$ m aplicada na equação 1, obtém-se:

$$Z = 2 \cdot 6,50m$$

$$Z = 13,00m$$

Assim, o bulbo significativo de tensões atuará entre as cotas de 1,00 m e 14,00 m de profundidade. Portanto, para a determinação do valor representativo do terreno, será utilizado o valor médio de N-SPT compreendido nesse intervalo.

Considerando os valores obtidos entre os metros 2 e 14 do perfil geotécnico, tem-se:

$$NSPT_{médio} = \frac{3 + 2 + 4 + 4 + 6 + 4 + 7 + 10 + 11 + 14 + 16 + 19 + 20}{13}$$

Resultando em um NSPT de:

$$NSPT_{médio} = 9,23$$

Esse valor será utilizado nas etapas subsequentes para estimativa da tensão admissível do solo e verificação da capacidade de suporte do terreno frente às cargas provenientes da estrutura.

Considerando que todas as camadas inseridas na região de influência do bulbo de tensões do radier são predominantemente compostas por solos arenosos, será adotada a correlação semi-empírica proposta por Terzaghi entre NSPT e tensão última para solos arenosos, representada pela equação 2:

$$\sigma_{ult} = \frac{NSPT}{8}$$

Onde:

- σ_{ult} = tensão última do solo (kgf/cm²);
- $NSPT$ = valor médio do ensaio SPT.

Substituindo o valor médio obtido anteriormente:

$$\sigma_{ult} = \frac{9,23}{8}$$
$$\sigma_{ult} = 1,1537 \frac{kgf}{cm^2}$$

Convertendo para outras unidades usuais da engenharia geotécnica:

$$\sigma_{ult} = 11,54 \frac{Tf}{m^2}$$

De acordo com a ABNT NBR 6122:2022 — “Projeto e execução de fundações”, a tensão admissível do solo deve ser obtida a partir da aplicação de um fator de segurança sobre a tensão última estimada, garantindo condições adequadas de estabilidade e desempenho da fundação. Para fundações superficiais, adota-se neste estudo um coeficiente de segurança igual a:

$$FS = 1,40$$

A definição da tensão admissível (σ_{adm}) é regida pelos critérios de segurança da ABNT NBR 6122:2022, visando compensar incertezas relacionadas à heterogeneidade do solo e às simplificações dos modelos de cálculo. Para este estudo, adotou-se o fator de segurança (FS) de 1,40 em substituição ao valor global de 3,00, frequentemente utilizado em estimativas mais genéricas. Tal escolha fundamenta-se na disponibilidade de dados específicos do subsolo obtidos via ensaios de Sondagem de Simples Reconhecimento (SPT), realizados conforme a NBR 6484:2020, que reduzem as incertezas diagnósticas sobre a estratigrafia e a resistência local. Ressalta-se que a metodologia aplicada se classifica como um método semiempírico, visto que utiliza correlações práticas entre o índice de resistência à penetração ($NSPT$) e a teoria clássica da mecânica dos solos para a estimativa da capacidade de carga última.

Assim, a tensão admissível do terreno pode ser determinada pela equação 3:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{ult}}{FS}$$

Onde:

- σ_{adm} = tensão admissível do solo (Tf/m²);
- σ_{ult} = tensão última estimada (Tf/m²);
- FS = fator de segurança.

Adotando-se o valor obtido pela correlação de Terzaghi na equação 3, tem-se:

$$\sigma_{adm} = \frac{11,54}{1,40}$$

Portanto, o presente estudo se dará a uma tensão admissível do solo igual a:

$$\sigma_{adm} = 8,24 \frac{Tf}{m^2}$$

3.3. Definição dos pilares

A partir da definição do modelo arquitetônico e da distribuição das vigas estruturais, foi possível estabelecer o esquema de pilares da edificação, permitindo a adequada transferência das cargas provenientes das lajes e vigas até as fundações, dispostos conforme à figura 5:

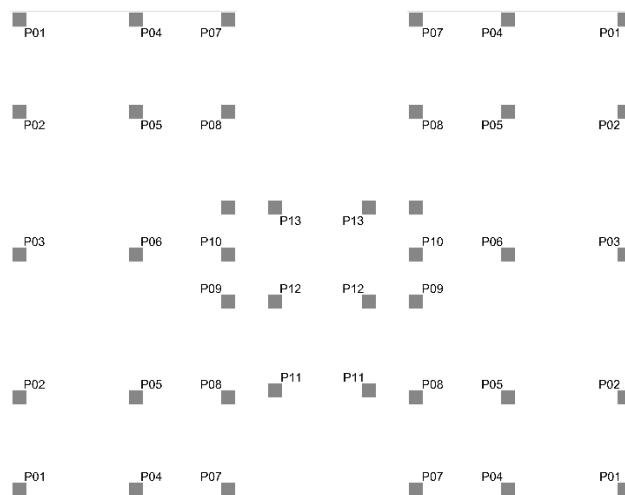


Figura 5 – Arranjo dos pilares

Fonte: Autor (2026).

3.4. Cargas atuantes nos pavimentos

Com base no modelo arquitetônico adotado, foram desenvolvidos os croquis estruturais de lajes e vigas da edificação, responsáveis pela distribuição das cargas atuantes até os pilares e, conseqüentemente, às fundações.

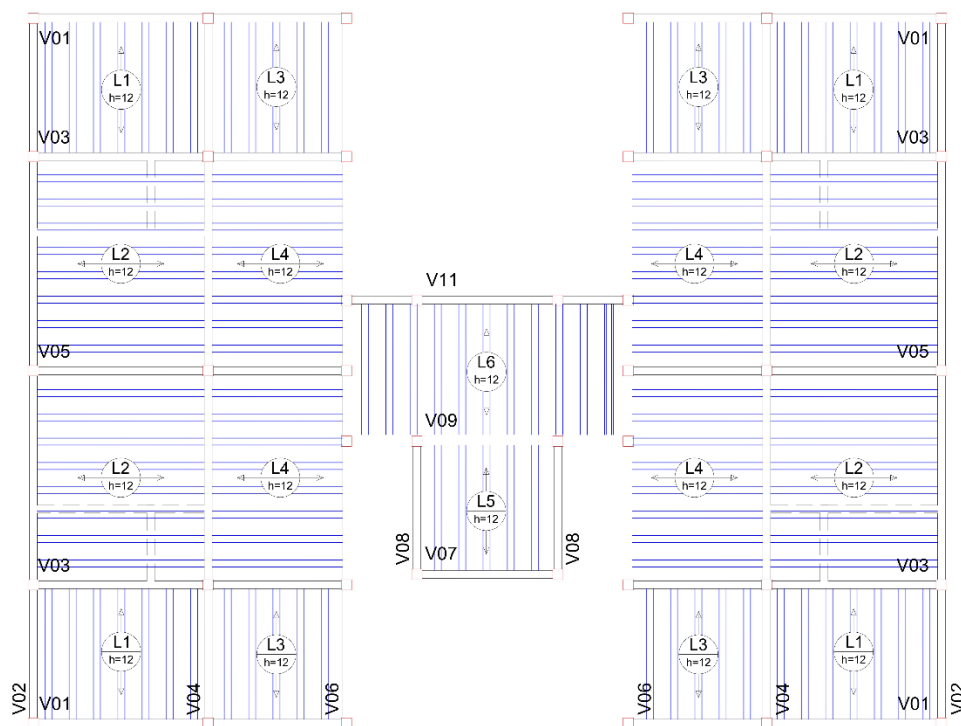


Figura 6 – Croqui estrutural

Fonte: Autor (2026).

Dessa forma, no pavimento térreo, os principais carregamentos considerados correspondem às cargas provenientes das alvenarias de vedação apoiadas sobre o radier. Para efeito de cálculo, foi considerado um pavimento com linhas de distribuição de carga para melhor entendimento das cargas atuantes.

Para as vigas de pavimento tipo, foram adotadas como ações permanentes o peso próprio dos elementos estruturais, contrapiso, piso, revestimento inferior, alvenarias de vedação, eventuais alvenarias posicionadas sobre as lajes e o peso próprio da escada. Como ações variáveis, foram consideradas as cargas de ocupação dos ambientes e a sobrecarga de utilização da escada, conforme critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6120:2019.

Já nas vigas de cobertura, foram consideradas como ações permanentes o peso próprio da estrutura, a platibanda, o revestimento inferior e o peso do telhado. Como ação variável, foi considerada a carga de ocupação para manutenção e utilização eventual da cobertura.

Considerando a Tabela 11.3 – Combinações últimas da norma ABNT NBR 6118:2023, calcula-se a carga total atuante utilizando a equação de combinações normais para esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto armado:

$$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{\varepsilon g} F_{\varepsilon gk} + \gamma_q (F_{q1k} + \Sigma \psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{\varepsilon q} \psi_{0\varepsilon} F_{\varepsilon qk}$$

A partir das ações consideradas, a Equação 4 pode ser reescrita para o presente estudo como:

$$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_q F_{qk}$$

Onde:

- F_d = valor de cálculo das ações para combinação última (kg);
- γ_g = coeficiente de ponderação das ações permanentes diretas;
- F_{gk} = ações permanentes diretas (kg);
- γ_q = coeficiente de ponderação das ações variáveis diretas;
- F_{qk} = ações variáveis diretas (kg).

Pela ABNT NBR 6120:2019 definem-se os valores dos pesos específicos para o cálculo das seguintes ações permanentes:

Tabela 1: Materiais utilizados para a obtenção das cargas permanentes:

Material	Tabela	Peso específico aparente (unidade)
Piso (P)	Tabela 1 – Item 2	2300 (kg/m ³)
	Blocos artificiais e pisos	=
	Porcelanato	30 (kg/m ²)
Contrapiso (C)	Tabela 1 – Item 3	1900 (kg/m ³)
	Argamassas e concretos	

Argamassa de cal, cimento e areia

Tabela 1: Materiais utilizados para a obtenção das cargas permanentes: (continuação)

Material	Tabela	Peso específico aparente (unidade)
Revestimento inferior (R)	Tabela 1 – Item 3 Argamassas e concretos Argamassa de cal, cimento e areia	1900 (kg/m ³)
Peso próprio (PP)	Tabela 1 – Item 3 Argamassas e concretos Concreto armado	2500 (kg/m ³)
Paredes com revestimento (PR)	Tabela 2 – Alvenarias Alvenaria de vedação Bloco cerâmico vazado Espessura do bloco: 14 cm Espessura do revestimento: 2 cm	190 (kg/m ²)
Telhado (T)	Tabela 6 Telhados Com telhas de fibrocimento onduladas (com espessura até 5 mm) e estrutura de madeira	40 (kg/m ²)
Laje pré-moldada treliçada com elemento de enchimento em EPS (L)	Catálogo	186 (kg/m ²)

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6120:2019

Pela ABNT NBR 6120:2019 definem-se pela Tabela 10 os valores característicos nominais das cargas variáveis de:

Tabela 2: Cargas variáveis presentes no edifício:

Local	Carga uniformemente distribuída (CUD) (kg/m ²)
Edifícios residenciais	Dormitórios 150
	Sala, copa, cozinha 150

Tabela 2: Cargas variáveis presentes no edifício: (continuação)

Local		Carga uniformemente distribuída (CUD) (kg/m ²)
Edifícios residenciais	Forro acessíveis apenas para manutenção e sem estoque de materiais	10
	Corredores dentro de unidades autônomas	150
Escadas e passarelas	Residenciais, hotéis	300

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6120:2019

Após a determinação das cargas permanentes e variáveis atuantes na estrutura, adotou-se o coeficiente de ponderação igual a 1,4 para todas as ações, conforme os critérios apresentados na Tabela 11.1 da ABNT NBR 6118:2023, buscando uniformizar as combinações e manter uma abordagem conservadora. Verificou-se também que o uso de coeficientes reduzidos nas cargas de uso e ocupação resultaria em uma redução pouco significativa das tensões atuantes, não proporcionando margem suficiente para viabilizar a inserção de um pavimento adicional na edificação analisada.

Portanto, podemos escrever a equação 4 utilizando as informações conhecidas como:

$$F_d = 1,4 (P + C + R + PP + PR + T + L + CUD)$$

As ações atuantes na estrutura foram distribuídas conforme a função de cada elemento estrutural, adotando-se apenas os carregamentos pertinentes a cada situação analisada, representando de maneira mais coerente as solicitações transmitidas aos pilares.

Para o pavimento térreo, foram determinados os carregamentos atuantes nas linhas de distribuição, resultando na carga total a seguir:

Tabela 3: Carga total do pavimento térreo:

Linha de distribuição	Carga (Tf)	Quantidade	Total (Tf)
VB02	8,98	2	17,96
VB04	8,98	2	17,96
VB06	8,98	2	17,96
VB08	1,40	2	3,39
VB01	3,99	4	15,96
VB03	3,99	4	15,96
VB05	3,99	1	3,99
VB07	5,41	1	5,41
VB09	5,41	1	5,41
VB11	3,59	1	3,59
Carga total do pavimento térreo			107,59

Fonte: Autor (2026)

Para o pavimento tipo, foram determinados os carregamentos atuantes nos pilares, bem como a carga destes, resultando na carga total a seguir:

Tabela 4: Carga total do pavimento tipo:

Pilar	Carga (Tf)	Quantidade	Total (Tf)
P1	4,27	4	17,07
P2	9,22	4	36,88
P3	11,49	2	22,97
P4	6,65	4	26,61
P5	12,79	4	51,15
P6	15,10	2	30,21
P7	3,64	4	14,55
P8	5,73	4	22,92
P9	4,35	4	17,40
P10	3,31	2	6,61
P11	4,29	2	8,58
P12	5,81	2	11,62
P13	3,69	2	7,38
Carga total do pavimento tipo			273,94

Fonte: Autor (2026)

Para o pavimento de cobertura, determinou-se tal qual o pavimento tipo, resultando na carga total a seguir:

Tabela 5: Carga total do pavimento de cobertura:

Pilar	Carga (Tf)	Quantidade	Total (Tf)
P1	2,52	4	10,10
P2	4,30	4	17,18
P3	5,08	2	10,16
P4	3,72	4	14,89
P5	5,67	4	22,68
P6	6,71	2	13,41
P7	1,87	4	7,47
P8	2,94	4	11,75
P9	3,06	4	12,24
P10	1,92	2	3,84
P11	2,23	2	4,47
P12	3,28	2	6,55
P13	2,28	2	4,57
Carga total do pavimento de cobertura			139,30

Fonte: Autor (2026)

Essa divisão dos carregamentos permite representar de forma mais coerente as diferentes ações atuantes na edificação, evitando a combinação indevida entre carregamentos distintos. Além disso, facilita o incremento progressivo dos pavimentos, considerando o pavimento tipo como elemento repetitivo da análise estrutural.

3.5. Verificação do pilar crítico e carga do peso próprio dos pilares

Para a verificação simplificada da esbeltez dos pilares da edificação, adotou-se a definição de um pilar padrão representativo, tomando como base o elemento mais solicitado da estrutura em termos de esforço axial de compressão, segundo os princípios da teoria de flambagem de Euler. Dessa forma, buscou-se estabelecer uma seção transversal capaz de atender às condições mínimas de segurança estrutural. A equação clássica de Euler para flambagem é apresentada pela Equação 5:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{10^4 (K \cdot L)^2}$$

Onde:

- P_{cr} = carga crítica de flambagem do pilar (Tf);
- E = módulo de elasticidade do material ($29 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, concreto fck 35);
- I = momento de inércia da seção transversal ($a^4/12 \text{ m}^4$, para um pilar quadrado);
- K = coeficiente de flambagem associado às condições de apoio (1 de forma simplificada e conservadora para fins analíticos);
- L = comprimento de flambagem do pilar (2,5 m).

A partir da somatória das áreas de influência e cargas atuantes, obtém-se que o pilar P6 é o mais carregado, conforme descrito abaixo:

Tabela 6: Carga total dos pilares:

Pilar	Carga atuante no pavimento tipo (Tf)	Carga atuante na cobertura (Tf)	Carga total para 5 pavimentos (Tf)
P1	4,27	2,52	19,59
P2	9,22	4,30	41,17
P3	11,49	5,08	51,02
P4	6,65	3,72	30,33
P5	12,79	5,67	56,82
P6	15,10	6,71	67,12
P7	3,64	1,87	16,42
P8	5,73	2,94	25,86
P9	4,35	3,06	20,46
P10	3,31	1,92	15,15
P11	4,29	2,23	19,39
P12	5,81	3,28	26,51
P13	3,69	2,28	17,05

Fonte: Autor (2026)

Utilizando a equação 5 para uma carga de 67,12 Tf, tem-se:

$$67,12 = \frac{\pi^2 \cdot 29 \cdot 10^9 \cdot \frac{a^4}{12}}{10^4(1 \cdot 2,5)^2}$$

Encontramos um valor para o lado desse pilar:

$$a = 0,1147 \text{ m}$$

Que resultaria em uma área quadrada de 131,56 cm², muito inferior ao mínimo exigido pela ABNT NBR 6118:2023. Portanto, adota-se seção mínima de (19×19) cm conforme critérios práticos e normativos. Portanto, gerando uma carga de peso próprio de:

Tabela 8: Carga dos pilares a partir da seção mínima:

Quantidade de pilares total	Altura do pilar (m)	Área do pilar (m ²)	Peso específico aparente (Tf/m ³)	Total acrescido do $\gamma_g=1,40$ (Tf)
40	2,50	0,0361	2,50	12,64

Fonte: Autor (2026)

Para a verificação simplificada da estabilidade dos pilares, considerou-se que a capacidade resistente do elemento está associada principalmente à flambagem em torno do eixo de menor inércia, conforme previsto pela teoria de Euler. Dessa forma, para os objetivos do presente estudo, a área do pilar mostrou-se pouco influente em relação à sua seção transversal específica, uma vez que a análise busca apenas verificar se a dimensão mínima normatizada é suficiente para atender às condições de estabilidade.

3.6. Carga final dos pavimentos

Considerando as cargas provenientes dos pilares, estas foram somadas às cargas correspondentes ao pavimento tipo e ao pavimento de cobertura, permitindo a determinação da carga total atuante sobre a fundação para cada configuração analisada. Conforme demonstrado a seguir:

Tabela 9: Carga final dos pavimentos:

Pavimento	Carga final (Tf)
Térreo (B)	120,22
Tipo (T)	286,57
Cobertura (C)	139,30

Fonte: Autor (2026)

3.7. Tensão requerida

Após a determinação das cargas atuantes nos elementos estruturais da edificação e da definição dos pilares, procedeu-se à obtenção da tensão média transmitida ao radier, considerando a distribuição uniforme das ações sobre a área total da fundação.

Para a determinação da carga total atuante na fundação, foram considerados três grupos principais de carregamentos, conforme definido anteriormente: a carga do pavimento térreo, representado por B, ds pavimentos tipo, representados por T, e da cobertura, representada por C. Já a área do radier foi obtida a partir do croqui estrutural da edificação, configurando uma área total de 205,84 m².

Para a tensão requerida pelo edifício no solo, tem-se representada pela equação 6:

$$\sigma_{req} = \frac{P_{total}}{A_{radier}}$$

Onde:

- σ_{req} = tensão requerida (Tf/m²);
- P_{total} = carga total do edifício (Tf);
- A_{radier} = área do radier (m²).

Para o cálculo do P_{total} , tem-se a equação 7:

$$P_{total} = B + nT + C$$

Onde:

- B = carga do pavimento térreo (Tf/m²);
- nT = carga do pavimento tipo multiplicada n vezes (Tf/m²);
- C = carga do pavimento de cobertura (Tf/m²)

Com a substituição da Equação 7 na Equação 6, determinaram-se as tensões requeridas para cada configuração de pavimentos, conforme apresentado na Tabela a seguir:

Tabela 10: Tensão requerida com o acréscimo de pavimentos:

Pavimentos	B (Tf)	T (Tf)	C (Tf)	Quantidade T	Carga total (Tf)	Área (m ²)	σ_{req} (Tf/m ²)
Térreo				0	362,44		1,76
Térreo + 1 tipo				1	649,02		3,15
Térreo + 2 tipos	120,22	286,57	139,30	2	935,59	205,84	4,55
Térreo + 3 tipos				3	1222,17		5,94
Térreo + 4 tipos				4	1508,74		7,33
Térreo + 5 tipos	136,44	294,23	179,06	5	1830,71	214,48	8,54

Fonte: Autor (2026)

Ao analisar a configuração correspondente ao pavimento térreo acrescido de quatro pavimentos tipo, verificou-se que a tensão solicitante ainda permanecia inferior à tensão admissível do solo, indicando a possibilidade de ampliação da edificação. Entretanto, para a condição de térreo acrescido de cinco pavimentos tipo, tornou-se necessária a inclusão de um fosso de elevador ao projeto arquitetônico, em atendimento às exigências normativas de acessibilidade e circulação vertical para edificações com maior número de pavimentos, gerando os valores maiores de carga para os pavimentos apresentados.

3.8. Verificação do limite de pavimentos

Após a determinação das tensões atuantes na fundação, realizou-se a verificação da capacidade de suporte do solo, por meio da comparação entre a tensão solicitante e a tensão admissível do terreno, conforme apresentado na Tabela a seguir:

Tabela 11: Comparação da tensão requerida com a tensão admissível:

Pavimentos	σ_{req} (Tf/m ²)	σ_{adm} (Tf/m ²)	Verificação
Térreo	1,76		Atende
Térreo + 1 tipo	3,15		Atende
Térreo + 2 tipos	4,55		Atende
Térreo + 3 tipos	5,94	8,24	Atende
Térreo + 4 tipos	7,33		Atende
Térreo + 5 tipos	8,54		Não atende

Fonte: Autor (2026)

Portanto, o número máximo de pavimentos foi definido no instante em que a tensão transmitida ao solo atingiu valores maiores a tensão admissível do terreno.

Ao confrontar os resultados obtidos, realizou-se uma análise de sensibilidade para avaliar o impacto do conservadorismo no dimensionamento. Caso fosse adotado um fator de segurança de 3,00 (usual em cenários de maior incerteza ou ausência de ensaios *in loco*) a tensão admissível seria reduzida para aproximadamente 3,85 Tf/m², valor significativamente inferior aos 8,24 Tf/m² calculados com o FS de 1,40. Sob essa ótica restritiva, a viabilidade estrutural do edifício seria drasticamente reduzida, suportando apenas a configuração de pavimento térreo acrescido de um pavimento tipo, ao passo que a análise com FS de 1,40 permitiu a verticalização de até quatro pavimentos tipo. Essa comparação evidencia que a escolha do coeficiente de segurança, embora técnica e amparada na existência do ensaio SPT, é o fator preponderante na definição do limite teórico de pavimentos para o perfil geotécnico analisado.

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise do perfil geotécnico obtido por meio do ensaio SPT permitiu determinar um valor médio de NSPT igual a 9,23 na região compreendida pelo bulbo de tensões da fundação, adotado com profundidade de 13,00 m. Os resultados indicam a predominância de camadas arenosas ao longo do perfil investigado, característica compatível com os solos encontrados na região de Botucatu-SP.

A partir do valor médio de NSPT e da correlação semiempírica adotada, foi determinada uma tensão admissível de 8,21 Tf/m² para o terreno analisado. O valor obtido mostrou-se compatível com as características geotécnicas identificadas no perfil de sondagem, servindo como parâmetro fundamental para a avaliação da viabilidade de verticalização da edificação proposta.

A análise simplificada da estabilidade dos pilares foi realizada por meio da teoria clássica de flambagem de Euler, considerando o pilar mais solicitado da estrutura. Os resultados indicaram que uma dimensão mínima teórica de aproximadamente 11,47 cm seria suficiente para resistir à carga crítica de flambagem calculada. Dessa forma, a seção adotada de 19 × 19 cm atende com margem significativa às exigências de estabilidade e aos requisitos mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2023, não representando fator limitante para o estudo.

Com base na tensão admissível do terreno, procedeu-se à comparação entre as tensões solicitantes resultantes do aumento gradual do número de pavimentos da edificação. Como

esperado, observou-se que o acréscimo progressivo de pavimentos provocou aumento gradual das tensões transmitidas ao solo, mantendo-se, entretanto, dentro do limite admissível até a configuração correspondente ao pavimento térreo acrescido de quatro pavimentos tipo. Nessa condição, a tensão requerida atingiu $7,33 \text{ Tf/m}^2$, valor inferior à tensão admissível de $8,21 \text{ Tf/m}^2$, indicando que o solo apresenta capacidade de suporte suficiente para essa condição de carregamento.

Ao analisar o cenário que corresponde ao pavimento térreo acrescido de cinco pavimentos tipo, verificou-se que a tensão solicitante atingiu $8,54 \text{ Tf/m}^2$, ultrapassando a capacidade admissível do terreno. Observa-se que essa condição não decorre exclusivamente do acréscimo de um novo pavimento, mas também da necessidade de inclusão de um fosso de elevador, exigência associada à acessibilidade e à circulação vertical em edificações mais altas. Nessa condição, como a tensão requerida tornar-se superior à tensão admissível do terreno, não atende aos critérios de segurança adotados no presente estudo, caracterizando o limite teórico de verticalização para o perfil geotécnico analisado.

A análise de sensibilidade realizada permitiu avaliar a influência do fator de segurança sobre os resultados obtidos. Mantidas as demais condições do estudo, a adoção de um fator de segurança igual a 3,00 reduziria a tensão admissível para aproximadamente $3,85 \text{ Tf/m}^2$, limitando a edificação à configuração de pavimento térreo acrescido de apenas um pavimento tipo. Em contrapartida, a utilização do fator de segurança de 1,40 mostrou-se compatível com a metodologia empregada e com a disponibilidade de dados provenientes do ensaio SPT. Esse resultado evidencia a importância da investigação geotécnica para a redução das incertezas de projeto, possibilitando soluções estruturalmente seguras e economicamente mais eficientes.

5- CONCLUSÃO

O presente trabalho alcançou o seu objetivo principal ao realizar uma análise técnica integrada entre a superestrutura e a infraestrutura, determinando de forma analítica o limite de verticalização de uma edificação multifamiliar apoiada em fundação rasa do tipo radier na região de Botucatu-SP. A metodologia adotada, fundamentada na interpretação do ensaio de simples reconhecimento (SPT) e no plano de cargas regulamentado pelas normas técnicas nacionais, permitiu mapear com segurança a interação entre as solicitações da edificação e a capacidade de suporte do perfil geotécnico.

Os resultados demonstraram a viabilidade técnica da edificação até a condição correspondente ao pavimento térreo acrescido de quatro pavimentos tipo, mantendo a tensão

solicitante inferior à tensão admissível do terreno. Entretanto, o acréscimo de um quinto pavimento tipo resultou na superação da capacidade resistente do solo, caracterizando o limite teórico de verticalização para o perfil geotécnico analisado. Observou-se ainda que a necessidade de implantação do elevador, exigida para essa condição, contribuiu significativamente para o aumento das cargas atuantes, constituindo também um fator limitante para o acréscimo de pavimentos na edificação.

A análise de sensibilidade evidenciou que a escolha dos critérios de segurança é o fator preponderante na viabilidade de empreendimentos imobiliários. A flexibilização fundamentada do fator de segurança para 1,40, viabilizada pelo conhecimento específico do subsolo através da sondagem, evitou o conservadorismo extremo de um fator global de 3,00, o qual limitaria o edifício a apenas um pavimento tipo, comprovando que a investigação geotécnica detalhada é indispensável para conciliar economia e segurança na engenharia civil.

Por fim, como limitação deste estudo analítico e visando a continuidade da pesquisa, sugere-se para trabalhos futuros a investigação de alternativas de fundações profundas ou mistas para o mesmo perfil geotécnico. Recomenda-se, especificamente, a modelagem e o estudo comparativo de um sistema de radier estaqueado. Esta solução permitiria absorver cargas mais elevadas, viabilizar a inclusão do fosso do elevador sem penalizar o solo superficial e, conseqüentemente, possibilitar uma verticalização ainda maior para o empreendimento de forma segura e eficiente.

6- REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 6118:2023 — Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023.

ABNT. NBR 6120:2019 — Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

ABNT. NBR 6122:2022 — Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022.

ABNT. NBR 6484:2020 — Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022.

ABNT. NBR 8681:2025 — Ações e segurança nas estruturas — Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.

ABNT. NBR 14931:2004 — Execução de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT. NBR 15575:2021 — Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.

DAS, Braja M. Princípios de Engenharia de Fundações. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2019.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos materiais*. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

PINTO, C. de S. Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3ª ed. Oficina de Textos, 2006.

VELLOSO, Dirceu A.; LOPES, Francisco R. Fundações: teoria e prática. 2. ed. São Paulo: PINI, 2010.