CARLOS ALBERTO DIAS DA SILVA

PAULO PEREIRA AGUIAR

COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE FUNDAÇÕES COM SAPATAS E EM *RADIER*

SÃO CARLOS

2021

CARLOS ALBERTO DIAS DA SILVA

PAULO PEREIRA AGUIAR

COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE FUNDAÇÕES COM SAPATAS E EM *RADIER*

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia Civil do Centro Universitário Central Paulista, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. MSc. Renato Silva Nicoletti

SÃO CARLOS

2021

Carlos Alberto Dias da Silva

Dedico esse trabalho a minha mãe Verônica, por ter me incentivado a estudar desde criança e me apoiado financeiramente para que eu pudesse concluir a minha graduação; ao meu pai Salvador e a meus irmãos, irmãs e sobrinhos, especialmente Vilson, Sandra e Giovane, que acompanhavam e me apoiavam nessa jornada e Deus os levou antes que eu concluísse a graduação; e a todas as minhas sobrinhas, especialmente a Bruna, quem sabe uma futura engenheira...

Paulo Pereira Aguiar

Dedico esse Trabalho a minha família, por terem me incentivado a cursar engenharia civil.

AGRADECIMENTOS

Carlos Alberto Dias da Silva

Agradeço a Deus, por estar sempre ao meu lado, capacitando–me e abençoando todos os meus afazeres.

Aos meus pais, Salvador e Verônica, que sempre apoiaram e incentivaram nos momentos de dedicação aos estudos.

Ao meu irmão Adenir, pelo apoio financeiro e incentivo para que eu concluise a graduação.

À minha sobrinha Amanda pelos livros e incentivo durante a minha graduação.

Aos meus colegas de classe Jhuly e Paulo, por todo apoio e incentivo.

Ao professor Dagoberto pela paciência e incentivo em suas aulas.

Ao professor orientador Renato, que muito contribuiu para elaboração do trabalho monográfico.

Paulo Pereira Aguiar

Agradeço a todos os professores que me ensinaram nesta jornada. Principalmente ao professor Renato, meu orientador, que sanava minhas dúvidas e ansiedade a respeito do TCC. Sou grato a todos os colegas pelo incentivo durante toda minha graduação.

“*O que me preucupa não é o grito dos maus. É o silêncio dos bons.*”

Martin Luther King

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 JUSTIFICATIVA 1
1.2 OBJETIVO 2
1.2.1 Objetivo geral 2
1.2.2 Objetivos específicos 2
2 REVISÃO DE LITERATURA 3
2.1 BREVE HISTÓRICO DA ENGENHARIA GEOTÉCNICA NO MUNDO 3
2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS FUNDAÇÕES 3
2.2.1 Fundações superficiais ou rasas 4
2.2.2 Fundações Profundas 4
2.3 FUNDAÇÕES EM SAPATAS 5
2.3.1 Sapata isolada 5
2.4 *RADIER*S 9
2.4.1 Classificação do *radier* 10
2.4.2 Critérios de Dimensionamento 12
2.5 MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA TENSÃO ADMISSÍVEL DO SOLO 13
2.5.1 Prova de carga 13
2.5.2 Métodos teóricos 17
2.5.2.1 Método de Terzaghi 17
2.5.3 Métodos semiempíricos 19
2.5.3.1 Correlação do SPT (standard penetration test) com as tensões admissíveis 20
3 MATERIAIS E MÉTODO 21
4 RESULTADOS 28
4.1 ANÁLISE PARAMÉTRICA DO SISTEMA DE FUNDAÇÕES COM SAPATAS 28
4.1.1 Análise da variação da carga distribuída na área de influencia do pilar no consumo de aço e concreto 28
4.1.2 Análise da variação da tensão admissível do solo no consumo de aço e concreto 29
4.1.3 Análise da variação do f_{ck} do concreto no consumo de aço e concreto 31
4.1.4 Análise da variação da área de influência da carga nos pilares no consumo de aço e concreto 32
4.1.5 Análise da variação da carga nos pilares no consumo de aço e concreto 34
4.2 ANÁLISE DO SISTEMA DE FUNDAÇÕES EM *RADIER* 35

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.....43
REFERÊNCIAS.....45
APÊNDICE 1 - PLANILHA DE DIMENSIONAMENTO DAS SAPATAS.....48

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Sapata isolada. 5
Figura 2: Vistas da sapata isolada. 6
Figura 3: Representação tridimensional de uma sapata isolada. 6
Figura 4: Ilustração da área de uma sapata. 8
Figura 5: Exemplo real de fundação em radier. 9
Figura 6: Representação tridimensional de uma sapata isolada. 10
Figura 7: Radier em concreto armado. 11
Figura 8: Cordoalhas de um radier protendido. 12
Figura 9: Configuração típica para aparelhagem para aplicação de carga com escavação do terreno. 13
Figura 10: Configuração típica para aparelhagem para aplicação de carga sem escavação do terreno. 14
Figura 11: Gráfico tensão x recalque. 15
Figura 12: Modelo de ruptura proposto por Terzaghi. 18
Figura 13: Ábaco de fatores de carga do método de Terzaghi. 19
Figura 14: Captura de tela da planilha de dimensionamento de sapatas. 21
Figura 15: Radier objeto de análise no software Eberick. 25
Figura 16: Planta de locação do radier. Medidas em cm. 26
Figura 17: Planta de formas no nível do radier. Medidas em cm. 27
Figura 18: Influência da carga distribuída por metro quadrado no consumo de concreto. 28
Figura 19: Influência da carga distribuída por metro quadrado no consumo de aço. 29
Figura 20: Influência tensão admissível por metro quadrado no consumo de concreto. 30
Figura 21: Influência tensão admissível por metro quadrado no consumo de aço. ...30
Figura 22: Influência da variação da resistência característica do concreto no consumo de concreto. 31
Figura 23: Influência da variação da resistência característica do concreto no consumo de aço. 32
Figura 24: Influência da variação da área de influência da carga no pilar no consumo de concreto. 33

Figura 25: Influência da variação da área de influência da carga no pilar no consumo de aço. 33
Figura 26: Influência da variação da carga axial no pilar no consumo de concreto. .34
Figura 27: Influência da variação da carga axial no pilar no consumo de aço. 35
Figura 28: Discretização da laje em grelhas.....36
Figura 29: Detalhamento da armadura superior do radier – Eixo x. 37
Figura 30: Detalhamento da armadura inferior do radier – Eixo y. 38
Figura 31: Detalhamento da armadura superior do radier – Eixo x. 39
Figura 32: Detalhamento da armadura superior do radier – Eixo y. 40
Figura 33: Detalhe da armadura de malha base. 41
Figura 34: Detalhe da armadura de bordo da laje. 41

RESUMO

A fundação é a base para qualquer tipo de superestrutura se manter estável ao longo de sua vida útil, transmitindo ao solo as cargas provindas das lajes, vigas e pilares. Há diferentes tipos de fundações, sendo divididas em fundações rasas e profundas. As fundações rasas são divididas em blocos, sapatas, radier e grelhas. Em estruturas de pequeno porte (residências e sobrados), comumente a solução do sistema de fundações restringe-se às sapatas ou radier. Com isso, o presente trabalho busca fornecer ao projetista dados sobre a influência da tensão admissível do solo, da classe do concreto e da arquitetura na escolha do tipo de fundação para edificações com baixas cargas. O objetivo é comparar, por meio de análises paramétricas, sistemas de fundação em sapatas com um sistema de fundação em radier. Os materiais e métodos utilizados neste estudo foram planilhas do Microsoft Office Excel e análises feitas no software AltoQi Eberick. Os resultados obtidos para sapatas mostraram que quanto maior a carga, maior o consumo de concreto e aço, de forma praticamente linear. Por sua vez, quanto maior a tensão admissível do solo, menor o consumo de concreto e aço, senda essa uma relação exponencial. Por fim, a resistência do concreto (f_{ck}) não exerceu influência considerável no consumo dos materiais. Para o radier, a simulação no software AltoQi Eberick demonstrou que este modelo de fundação consumiu duas vezes mais concreto e trinta vezes mais aço que a solução em sapatas. A conclusão geral deste estudo foi que, desconsiderando o impacto do tempo da construção, a fundação em sapatas isoladas se mostrou mais viável do que o *radier* considerando as recomendações das normas técnicas vigentes.

Palavras-chave: Fundações Rasas, Sapatas Isoladas, Radier.

1 INTRODUÇÃO

A fundação é a base para qualquer tipo de superestrutura se manter estável ao longo de sua vida útil. Ela tem como objetivo transmitir as cargas provindas das lajes, vigas e pilares ao solo a qual foi implantada. Quando não dimensionada e executada de forma correta desencadeia várias patologias podendo comprometer toda estrutura.

Há diferentes tipos de fundações, cada uma com sua característica específica para um tipo de estrutura e solo. Para um melhor dimensionamento visando segurança e custo da estrutura, pode-se classificar em dois subtipos a saber: fundações rasas e profundas. As fundações rasas são divididas em blocos, sapatas, *radier* e grelhas. Este subtipo é amplamente utilizado em construções de pequeno porte, pois nem sempre as características do solo podem ditar qual fundação é ideal, ficando a definição à critério do responsável pelo projeto.

O custo de uma obra, na maioria das vezes, é o principal limitador de um projeto, assim os responsáveis são guiados pela segurança versus orçamento. O objetivo deste estudo é comparar os custos destes tipos de fundações rasas para uma melhor rentabilidade. A importância de fazer um estudo comparativo pode ser crucial em certos projetos, como em um projeto de uma residência unifamiliar, mas nem sempre é realizada esta comparação. Portanto, o comparativo de fundações torna-se interessante para uma melhor compreensão de todas as possibilidades, considerando a melhor técnica de dimensionamento e de execução e a viabilidade econômica.

1.1 Justificativa

Segundo Joppert (2007), as fundações constituem de 3% a 7% do valor de uma obra. Porém, a falta de projetos e os vícios de execução podem aumentar os custos das fundações. Para habitações populares, nas quais busca-se um custo total baixo, o valor correspondente às fundações apresenta-se pouco representativo para a execução das mesmas e das sondagens necessárias para um correto dimensionamento.

Além disso, a sensibilidade do projetista frente aos dados de entrada (tais como tensão admissível do solo e carga na fundação) possui elevada importância para a decisão da solução adotada para os sistemas de fundações.

Em muitos casos, a solução adotada para as fundações é viável do ponto de vista técnico. Contudo, pode-se estar tendo um gasto acima do necessário, isto é, o viés econômomico poderia ser otimizado.

Em estruturas de pequeno porte (residências e sobrados), comumente a solução do sistema de fundações restringe-se à sapatas ou *radier*. Visto isso e com base nas justificativas citadas anteriormente, o presente trabalho busca fornecer ao projetista dados sobre a influência da tensão admissível do solo, da classe do concreto e da arquitetura na escolha do tipo de fundação para edificações com cargas baixas. Com isso, busca-se subsidiar projetos que seja, concomitantemente, seguro e econômico.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

Comparar sistemas de fundação em sapatas com um sistema de fundação em *radier*.

1.2.2 Objetivos específicos

- Investigar a influência da carga solicitante, da tensão admissível do solo, da classe do concreto e da solução arquitetônica no desempenho de sistemas de fundações em sapatas;
- Analisar e ponderar a viabilidade técnica e econômica de sistemas de fundação em sapatas e em *radier*;
- Desenvolver planilhas para o dimensionamento de sapatas;
- Compreender o dimensionamento de radiers e realizar um dimensionamento no software AltoQi Eberick.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Breve histórico da engenharia geotécnica no mundo

A história da engenharia geotécnica no Brasil e no mundo data dos primórdios da civilização humana. Desde o início, no Paleolítico, já se tem registro de obras, mesmo que modestas, com indícios que já existia noção sobre a estabilidade dos maciços onde eram realizadas tais obras (UFC/LMSP, 2007). Posteriormente, no Neolítico, com o manejo da técnica da pedra lascada, o homem constrói suas primeiras habitações, obtendo noções preliminares sobre a estabilidade de estruturas e da resistência dos materiais. Muitas dessas estruturas eram construídas na beira de lagos ou em regiões inundáveis sobre estacas de madeira: as palafitas.

Com a descoberta dos metais houve um grande salto na evolução das estruturas. O desenvolvimento de novas técnicas construtivas com ferramentas mais eficientes permitirá um melhor uso dos materiais como pedras, madeiras, etc. O uso destas novas técnicas permitiu obras com maiores dimensões como as construções dos mesopotâmios e dos egípcios na Idade Antiga. No decorrer da história, a maioria das obras como castelos, templos, palácios, dentre outras, eram assentadas sobre fundações com restos de outras estruturas ou paredes previamente compactadas, sucessivamente. As estruturas eram sobrepostas.

Na idade Clássica, os gregos com suas construções imponentes de pedras e granitos, as suas fundações passaram a ser feitas com blocos sobrepostos, sendo eles os primeiros a utilizarem como hoje conhecemos sapatas isoladas (UFC/LMSP, 2007). No final do século XIX, desde o início de sua carreira, o engenheiro Karl Terzaghi dedicou seus esforços aos problemas com a engenharia dos solos e das fundações. Reconhecido, então, como o pai da mecânica dos solos e da engenharia geotécnica, o seu livro Soil Mechanics in Engineering Practice, com parceria com Ralph B. Peck, é de consulta obrigatória para os profissionais da engenharia geotécnica (DAS, 2010).

2.2 Classificação das fundações

De acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2019), as fundações se dividem em duas categorias: fundações superficiais ou rasas e as fundações profundas.

2.2.1 Fundações superficiais ou rasas

De acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2019), as fundações diretas ou superficiais são aquelas em que a carga é transmitida ao solo, principalmente pelas tensões distribuídas sob a base do elemento de fundação. A profundidade de assentamento de uma fundação superficial em relação ao terreno adjacente deve ser inferior a duas vezes a menor dimensão do elemento estrutural. Pela definição normativa, tem-se que:

- Sapatas isoladas são elementos de concreto armado dimensionadso de modo que as tensões de tração nele resultantes sejam resistidas pelo emprego de armadura;
- Sapatas associadas consiste na sapata comum a mais do que dois pilares, quando não alinhados e desde que representem até 70 % das cargas da estrutura;
- Sapatas corridas tratam-se de sapatas sujeitsa à ação de uma carga distribuída linearmente ou de três ou mais pilares ao longo de um mesmo alinhamento, desde que representem até 70 % das cargas da estrutura;
- *Radier* é o elemento de fundação com rigidez para receber e distribuir mais do que 70 % do carregamento da estrutura;
- Vigas de fundação consistem em vigas no nível do solo comum a múltiplos pilares cujos centros de gravidade estejam situados no mesmo alinhamento;
- Blocos são elemento de fundação de concreto ou outro material dimensionado de modo que as tensões de tração nele resultantes sejam resistidas pelo material, sem necessidade de armadura.

2.2.2 Fundações Profundas

Segundo a NBR 6122 (ABNT, 2019), as fundações profundas são aquelas que a carga é transmitida para o terreno pela sua resistência de ponta (base) e por sua resistência lateral (fuste) ou pela combinação destas, sendo sua ponta ou base apoiada em uma profundidade superior a oito vezes a sua menor dimensão em planta

e no mínimo 3,0 m. A norma citada anteriormente define os seguintes tipos de fundações profundas:

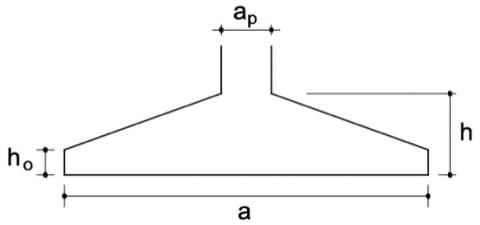
- Tubulões: elemento de fundação em que a carga é transmitida pela resistência de ponta que em qualquer fase de sua execução tenha a descida de operário;
- Estacas: elementos de fundação executadas por ferramentas ou equipamentos de perfuração no solo, não necessitando a descida de operário em qualquer de suas fases de execução;
- Caixões: elemento de fundação de forma prismática concretado na superfície e inserido no terreno por meio de escavação interna.

2.3 Fundações em sapatas

2.3.1 Sapata isolada

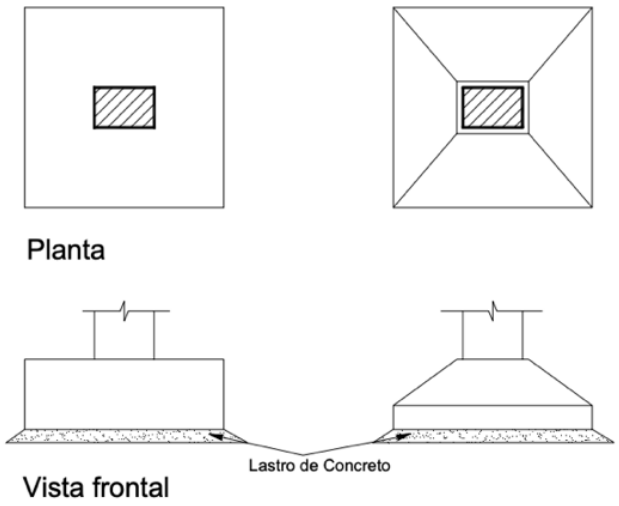
A sapata isolada é aquela que transmite ao solo as ações de um único pilar. Uma sapata isolada é comumente usada em residências. Bastos (2016) afirma que é um elemento de fundação de concreto armado caracterizado como superficial de forma que a força aplicada nele não venha afetar de forma geral a sapata, considerando a armadura nela aplicada. As Figuras 1, 2 e 3 apresentam detalhes da sapata isolada em corte, em vista e uma representação tridimensional, respectivamente.

Figura 1: Sapata isolada.



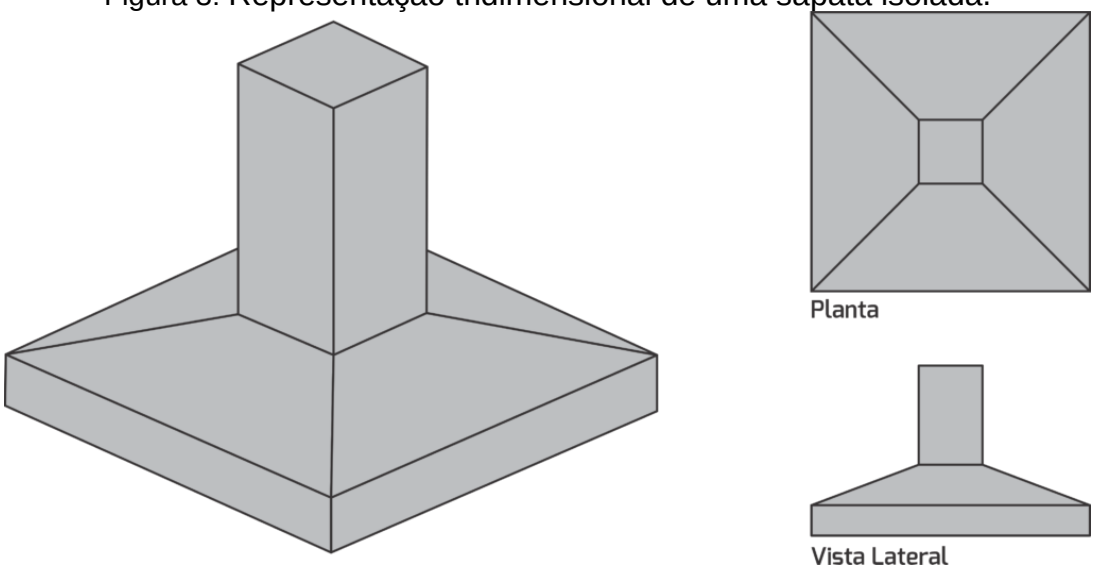
Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Figura 2: Vistas da sapata isolada.



Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Figura 3: Representação tridimensional de uma sapata isolada.



Fonte: Portal Utilizando BIM.

As sapatas quadradas ou retangulares são as mais comuns, porém, há também a possibilidade de sapatas isoladas circulares e trapezoidal com suas características empregadas através de cálculos conforme as normas desse tipo de fundação.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica as sapatas quanto à rigidez de acordo com as Equações (1) e (2).

$$h < \frac{a - a_p}{3} \quad (1)$$

$$h \geq \frac{a - a_p}{3} \quad (2)$$

Em que a é a dimensão da sapata na direção analisada; h é a altura da sapata; e a_p é a dimensão do pilar na direção analisada.

As sapatas flexíveis são de uso mais raro, utilizadas em pequenas cargas. Outro fator determinante é a resistência do solo. Andrade (1989) sugere sapatas flexíveis para solos de tensão admissíveis abaixo de 150 kN/m² (0,15 MPa). As sapatas flexíveis apresentam o comportamento de uma peça fletida nas duas direções ortogonais. São dimensionadas ao momento fletor e à força cortante. A verificação de punção em sapatas flexíveis é necessária, pois esse fenômeno é crítico nelas quando comparadas às sapatas rígidas.

As sapatas rígidas são adotadas em terrenos de boa resistência nas camadas mais superficiais do solo. No dimensionamento das armaduras longitudinais de flexão, utiliza-se o método geral de bielas e tirantes. Como as flexíveis, as rígidas podem serem dimensionadas à flexão, com uma razoável precisão. As tensões de cisalhamento devem ser verificadas pela ruptura por compressão diagonal do concreto na ligação sapata – pilar. Já a verificação de punção é desnecessária, pois situa-se inteiramente dentro do cone hipotético de punção, impossibilitando haver a ocorrência de tal fenômeno.

Quanto à locação em planta, dois requisitos devem ser atendidos:

- Centro de gravidade da sapata deve coincidir com o centro de gravidade do pilar;
- A estimativa da área da base, sendo a sapata submetida à carga centrada sem momentos, calculada pela Equação (3).

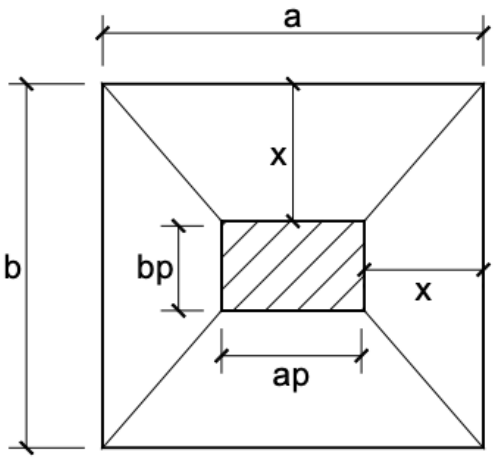
$$A = \frac{\alpha \cdot N_k}{\sigma} \quad (3)$$

Onde N_k é a força normal nominal do pilar; σ é a tensão admissível do solo; α é o coeficiente que leva em conta o peso próprio da sapata, sendo igual 1,05 para as flexíveis e 1,10 para as rígidas.

As dimensões a e b devem ser escolhidas de tal forma a resultar em um dimensionamento econômico. Para tanto considera-se que os balanços das sapatas são iguais em todas as direções e sentidos, resultando nas Equação (4) e Figura 4.

$$\begin{matrix} a = a_p + 2x \\ b = b_p + 2x \end{matrix} \rightarrow a - b = a_p - b_p \quad (4)$$

Figura 4: Ilustração da área de uma sapata.



Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Isolando a dimensão b, resulta a Equação (5).

$$b = a - (a_p - b_p) \quad (5)$$

Relacionando as Equações (3) e (5), resulta a Equação (6).

$$A = a.b = a[a - (a_p - b_p)] \quad (6)$$

Resolvendo a Equação (6), encontra-se que a dimensão a é dada por uma equação de 2° grau, a qual está exposta na Equação (7).

$$a = \frac{a_p - b_p}{2} + \sqrt{\frac{\left(a_p - b_p\right)^2}{4} + A} \quad (7)$$

Finalmente, pode-se a calcular a dimensão “b” dividindo a área (A) pela dimensão (a) – vide Equação (8).

$$b = \frac{A}{a} \quad (8)$$

Por sua vez, os momentos solicitantes nas duas direções (M_{1A} e M_{1B}) e a área de aço na sapata (A_s) podem ser calculados pelas Equações (9), (10) e (11).

$$M_{1A} = p \cdot \frac{x_A^2}{2} \cdot b \quad (9)$$

$$M_{1B} = p \cdot \frac{x_B^2}{2} \cdot a \quad (10)$$

$$A_s = \frac{M_d}{0{,}85d \cdot f_{yd}} \quad (11)$$

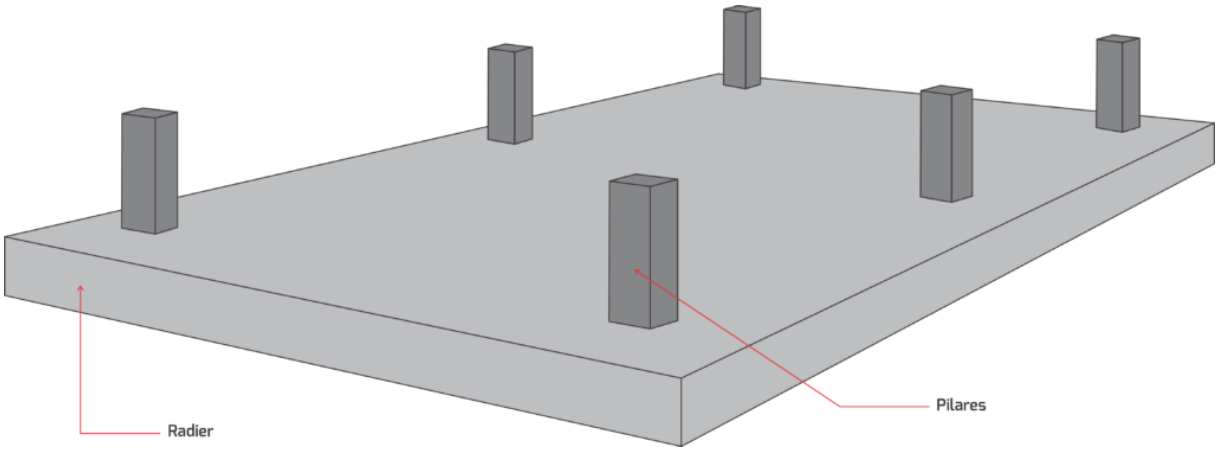
2.4 *Radiers*

A NBR 6122 (ABNT 2019), intitulada “Projeto e Execução de Fundação”, classifica o elemento *radier* como uma fundação superficial que abrange todos os carregamentos envolvidos na estrutura. Segundo Ribeiro (2010), o *radier* é executado quando o solo tem baixa capacidade de carga para uniformizar os recalques e quando há sapatas uma próxima da outra ou quando a área destas forem maiores que a metade da construção (Figura 5). A Figura 6 apresenta uma representação esquemática de uma fundação em *radier*.

Figura 5: Exemplo real de fundação em *radier*.

Fonte: Xavier (2015).

Figura 6: Representação tridimensional de uma sapata isolada.



Fonte: Portal Utilizando BIM.

Já de acordo com a norma do American Concrete Institute ACI:360R-06 (2006) denomina-se o *radier* como uma laje apoiada no solo com a finalidade de resistir as cargas provenientes da superestrutura sobre a tensão admissível de suporte do solo. Singer (2014) concorda que o *radier* pode ter espessura variável ou uniforme e que pode conter enrijecedores como nervuras ou vigas de concreto protendido, reforçado ou simples.

O *radier* em concreto protendido é utilizado em edificações que são atendidas pelo PAR (Programa de Arrendamento Residencial) por sua praticidade, segurança e vantagens econômicas (ARAGÃO, 2016). Segundo Dória (2007), o *radier* pode ser utilizado quando o lençol freático se encontra próximo da superfície ou quando os solos possuem grandes recalques.

2.4.1 Classificação do *radier*

Em relação ao *radier* em concreto armado, segundo Dória (2007), a resistência à compressão do concreto tem influência direta na espessura do *radier* e nas propriedades das suas superfícies, como também tem influência nas deformações de retração e nas deformações pela variação da temperatura (Figura 7). Geralmente é utilizado para apoiar edifícios ou casas baixas de até 8 pavimentos (ARAGÃO, 2016).

Figura 7: *Radier* em concreto armado.

Fonte: Bizerris (2013).

Já em relação ao *radier* em concreto protendido, no Brasil, a execução da tecnologia de protensão com o uso de cordoalhas engraxadas e plastificadas começou em um edifício em Fortaleza, ano de 1999, após um seminário sobre protensão ocorrido em Embu/SP em 1996 (CAUDURU, 2000). Cauduru (2000) cita que a espessura de um elemento em concreto protendido seja em torno de 70% desse elemento em concreto armado (Figura 8).

Em contrapartida ao sistema de protensão utilizando bainhas metálicas, o sistema de protensão em cordoalhas engraxadas é mais vantajoso por deduzir perdas por atrito, por simplificar a montagem dos cabos, por não necessitar de grauteamento nas bainhas, sendo executado com maior rapidez e com maior economia (HANAI, 2000).

Figura 8: Cordoalhas de um *radier* protendido.

Fonte: Portal “Impacto Protensão”. Disponível em: <https://impactoprotensao.com.br/servicos/*radier*-protendido/>. Acesso 25 set. 2021.

2.4.2 Critérios de Dimensionamento

De acordo com Mohr (2013), o cálculo é semelhante ao de uma laje, destacando que o *radier* está apoiado diretamente no solo. O autor comenta que para um dimensionamento certeiro do elemento, os esforços devem ser calculados em razão ao porte da estrutura. Os deslocamentos e seus esforços internos podem ser analisados com a interação solo-estrutura. Já para Dória (2007), partindo das análises de interações, os valores dos esforços são obtidos diretamente ou indiretamente por meio de contato. A determinação das pressões de contato é então necessária para cálculo dos esforços interno do *radier*.

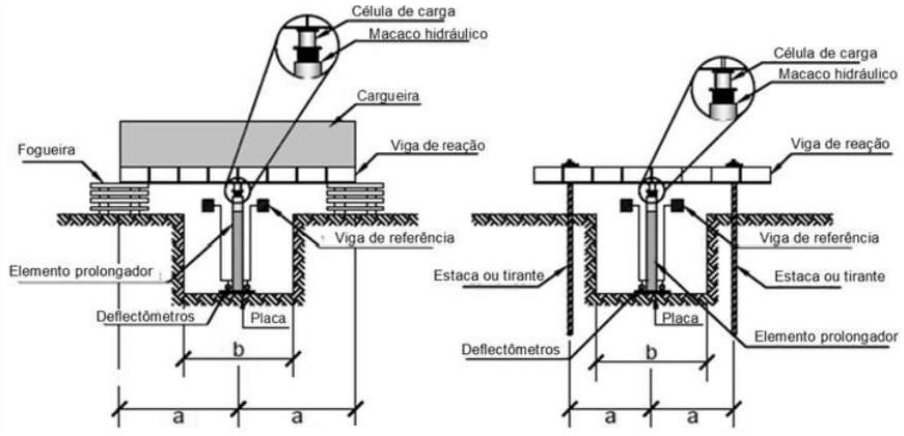
Vale ressaltar a importância dos coeficientes de recalque vertical e horizontal para o dimensionamento e que devem estar de acordo com o solo e seus estudos geotécnicos (MOHR, 2013). Mohr (2013) também ressalta que os coeficientes de recalque vertical e horizontal do solo devem ser determinados para que se alcance um dimensionamento com comportamento satisfatório, evitando problemas estruturais.

2.5 Métodos para determinação da tensão admissível do solo

2.5.1 Prova de carga

A prova de carga é um ensaio para determinação da resistência do solo, quepode ser feito pelo ensaio de placa. A norma brasileira NBR 6122/2019 define o ensaio de placa como sendo uma prova de carga direta sobre o terreno, com o objetivo de caracterizar a deformabilidade e resistência do solo sob carregamentos de fundações rasas, e deve ser feito seguindos os requisitos da norma brasileita NBR 6489 (ABNT, 2019), intitulada “Solo – Prova de carga estática em fundação direta.” Segundo a NBR 6489 (ABNT, 2019)., este método permite traçar a curva tensão-deslocamento e estimar os parâmetros de deformabilidade (coeficiente de reação vertical e módulo de deformabilidade) e de resistência (tensão admissível) do solo em análise. O item 4.1 desta norma, define que o método ensaio consiste na aplicação de esforços estáticos axiais de compressão à placa e registro dos deslocamentos correspondentes, e que o ensaio deve ser levado até, pelo menos, o dobro da tensão admissível prevista para o terreno ou até o deslocamento máximo previsto pelo projetista. As Figuras 9 e 10 ilustram as configurações de aparelhagem para a aplicação de carga segundo a NBR 6489 (ABNT, 2019).

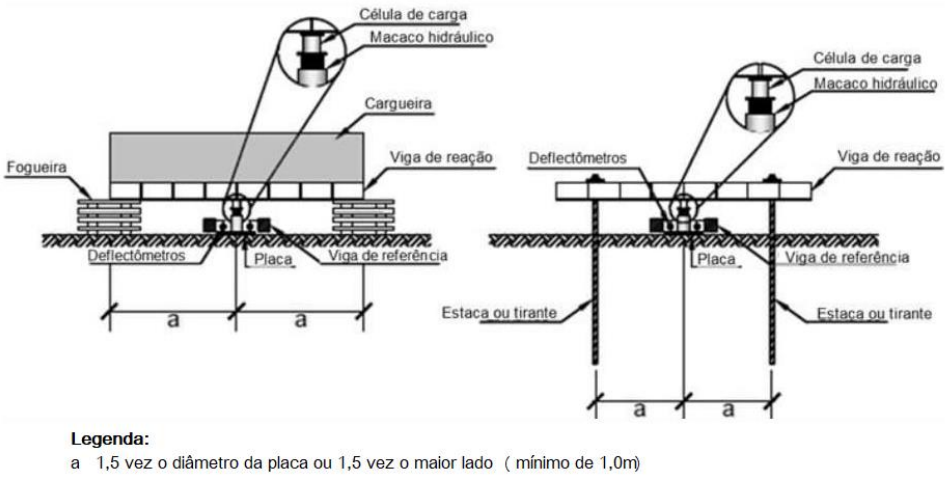
Figura 9: Configuração típica para aparelhagem para aplicação de carga com escavação do terreno.



Legenda:
a 1,5 vez o diâmetro da placa ou 1,5 vez o maior lado (mínimo de 1,5m)
b Para os casos de poços - diâmetro da placa + 0,6 m ou maior lado + 0,6 m

Fonte: NBR 6489 (ABNT, 2019).

Figura 10: Configuração típica para aparelhagem para aplicação de carga sem escavação do terreno.



Fonte: NBR 6489 (ABNT, 2019).

A placa para aplicação das cargas deve ter rigidez equivalentes à da fundação prevista (concreto armado ou aço) e deve ter diâmetro ou lado mínimo de 30 cm. Os demais detalhes dos equipamentos e métodos são descritos da NBR 6489.

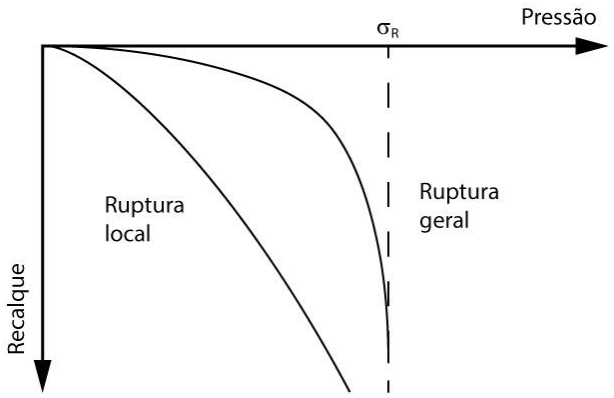
Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011), a tensão é caracterizada pela aplicação de uma força P sobre a sapata e sua base que pode ser de formatos variados. No caso de uma sapata retangular a base terá uma largura B e um comprimento L. A força no topo da sapata gera a mobilização de tensões resistentes no maciço de solo que, no contato sapata-solo, são normais à base da sapata, com valor médio σ dado pela Equação 12.

$$\sigma = \frac{P}{BL} \tag{12}$$

Ainda segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011), pelo princípio de ação e reação, essa tensão é aplicada no solo pela sapata. Dessa forma, o elemento isolado de fundação por sapata caracteriza um sistema sapata-solo, formado pelo elemnto estrutural (a sapata) e pelo elemento geotécnico (o maciço de solo). O aumento gradativo da força P (e consequentemente, da tensão σ) vai provocar o surgimento de uma superfície pontencial de ruptura no interior do maciço de solo. Na iminência da ruptura, teremos a mobilização da resistência máxima do sistema sapata-solo, que

denominamos capacidade de carga do elemento de fundação por sapata e representamos por σ_r (a letra r é a inicial das palavras resistências e ruptura), conforme ilustrado no gráfico da figura 11.

Figura 11: Gráfico tensão x recalque.



Fonte: Marinho (2019).

Ainda segundo os autores, uma sapata suficientemente resistente como peça estrutural de concreto armado, a capacidade de carga do elemento de fundação é a tensão que provoca a ruptura σ_r do maciço de solo em que a sapata está embutida ou apoiada, e é o mesmo significado de capacidade de suporte, expressão usada por alguns autores.

Segundo o item 3.30 da NBR 6122/2019, o cálculo de valores admissíveis, sendo forças ou tensões, é dado pelo valor da tensão de ruptura dividido por um fator de segurança global, conforme a equação 13.

$$P_{adm} = \frac{R_k}{FS_g} \quad e \quad P_{adm} \geq S_k \tag{13}$$

Onde:

- P_{adm} é a tensão admissível de sapatas e tubulões e carga admissível de estacas;
- R_k representa as forças ou tensões características de rupturas (últimas);
- S_k representa as solicitações características;

- FS_g é o fator de segurança global;

A Tabela 1 da NBR 6122 (ABNT, 2019) apresenta os fatores de segurança e coeficientes de ponderação para solicitações de compressão para as fundações rasas. Nesta tabela o fator de segurança globa FSg é igual a 2, para métodos semiempíricos ou analíticos acrescidos de duas ou mais provas de carga, necessariamente executadas na fase de projeto, conforme recomendado no item 7.3.1 da mesma norma. Ou seja, nestes casos o valor da tensão admissível será metade do valor da tensão de ruptura como apresentado na Equação 14. Cintra, Aoki e Albiero (2011) ressaltam que a norma é omissa quanto ao fator de segurança a ser aplicado à capacidade de carga obtida no ensaio de placa, e que a versão da norma anterior a 2010 sugeria um FSg igual a 3.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_k}{2} \quad e \quad P_{adm} \geq S_k \tag{14}$$

Existem outros métodos para determinação da tensão admissível diferentes do método descrito na norma brasileira. Um deles é o método de Boston, que leva o neme da cidade americana de Boston onde foi desenvolvido. Segundo Cintra, Aoki e Albiero (2011), este método usa o ensaio de placa usando uma palca de 30 x 30 cm, mas considera dois valores de recalque sendo um a 10 mm e outro a 25 mm. Tais valores geram tensões correspondentes a σ_{10} e σ_{25}, respectivamente, na curva tensão x recalque, sendo que a tensão admissível para este método é calculada pela Equação 15.

$$\sigma_{adm} \leq \begin{cases} \sigma_{10} \\ \dfrac{\sigma_{25}}{2} \end{cases} \tag{15}$$

Esse critério significa estabelecer um recalque admissível (ρ_{adm}) de 10 mm para a placa e um critério de ruptura convencional em que a tensão de ruptura (σ_r) está associada ao recalque arbitrário de 25 mm, correspondendo o denominador 2 ao fator de segurança. Teixeira e Godoy (1996) apud Cintra, Aoki e Albiero (2011) concluíram que o valor de $\sigma_{25}/2$ é mais rigoroso que o σ_{10}.

2.5.2 Métodos teóricos

O item 7.3.2 da NBR 6122 especifica que podem ser empregados métodos analíticos (teorias de capacidade de carga) nos domínios de validade de sua aplicação, desde que contemplem todas as particularidades do projeto, inclusive a natureza do carregamento (drenado ou não drenado). Na tabela 1 da mesma norma, o coeficiente de segurança global para este tipo de método é FSg igual a 3, portanto, o valor médio da capacidade de carga obtido por um método teórico deve ser divido por 3 como apresentado na Equação 16.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_k}{3} \tag{16}$$

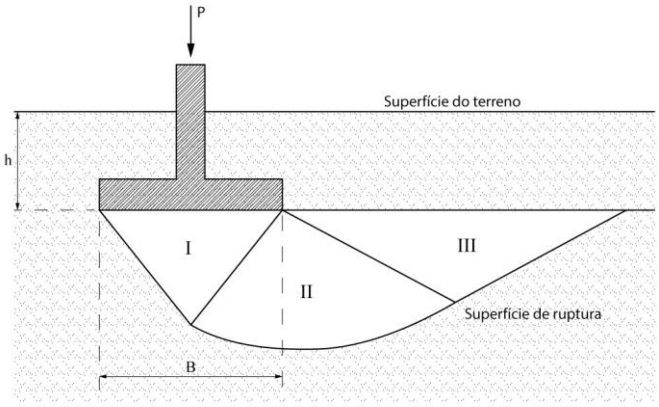
Um dos métodos teóricos mais utilizados é o método de Terzaghi.

2.5.2.1 Método de Terzaghi

Karl Terzaghi, o pai da Mecânica dos Solos, foi pioneiro no desenvolviemnto de uma teoria de capacidade de carga de um sistema sapata-sola, em 1943, tendo como hipóteses básicas 3 pontos: considerar uma sapata corrida simplificando o problema em caso bidimensional; considerou a profundidade de embutimento da sapata inferior a largura (h < B), o que permitiu desprezar a resistência ao cisalhamento da camada de solo situada acima da cota de apoio da sapata, e assim substituir essa espessura h e peso específico γ por uma sobre carga q = γh; e por fim considerou o maciço de solo sob a base da sapata como sendo rígido, ou seja, caracterizando o caso de ruptura geral (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011).

Marinho (2019) explica que Terzaghi propôs um modelo de ruptura de solo em que, ao submeter o mesmo sobre uma tensão de ruptura, ocorrerá um puncionamento de uma cunha abaixo da fundação, representada pela região I, apresentada na figura 12. O autor ressalta que o puncionamento acarretará empuxos laterais sobre a região II, que transmitirá tais esforços à região III, fazendo com que seja mobilizada uma resistência à cisalhamento do solo ao longo da superfície de ruptura ao longo das regiões II e III.

Figura 12: Modelo de ruptura proposto por Terzaghi.



Fonte: Marinho (2019).

Ainda segundo Marinho (2019) foi através deste modelo considerando as três hipóteses básicas, Terzaghi chegou a sua formulação inicial, que foi posteriormente adaptada por outros pesquisadores para sapatas de diversos formatos, sendo que a tensão de ruptura pode ser calculada pela Equação 17.

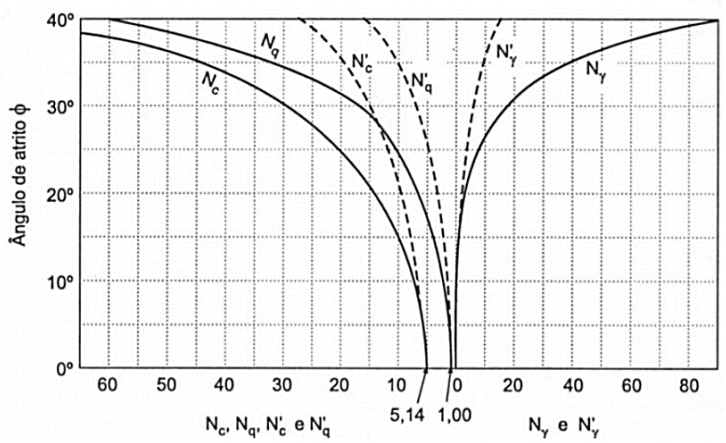
$$\sigma_r = cN_cS_c + qN_qS_q + 0{,}5\gamma BN_\gamma S_\gamma \quad (17)$$

Onde:

- σ_r é a capacidade de carga do solo;
- c é a coesão do solo;
- q é a tensão efetiva no solo na cota de assentamento ($q = \gamma \cdot h$);
- γ é o peso específico do solo;
- B é a dimensão da fundação;
- N_i são os fatores de carga obtidos através do ângulo de atrito do solo;
- S_i são os fatores de forma da fundação.

Os fatores de carga podem ser obtidos pela utilização do ábaco apresentado na Figura 13, onde as linhas cheias são referentes aos solos de ruptura geral, e as linhas pontilhadas são referentes ao solo de ruptura local.

Figura 13: Ábaco de fatores de carga do método de Terzaghi.



Fonte: Marinho (2019).

Os fatores de forma são apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Fatores de forma para o método de Terzaghi.

Forma da fundação	Fatores de forma		
	S_c	S_q	S_γ
Corrida	1,0	1,0	1,0
Quadrada	1,3	0,8	1,0
Circular	1,3	0,6	1,0
Retangular	1,1	0,9	1,0

Fonte: Marinho (2019).

2.5.3 Métodos semiempíricos

Segundo o item 7.3.3 da norma NBR 6122 (ABNT, 2019), os métodos semiempríricos são métodos que relacionam resultados de ensaios (tais como o SPT, CPT e etc.) com as tensões admissíveis ou tensões resistentes de cálculo. Devem ser observados os domínios de validade desuas aplicações, bem como as dispersões dos dados e as limitações regionais associadas a cada um dos métodos. Ainda segundo a NBR 6122 (ABNT, 2019), a Tabela 1 especifica que o FG_s é igual a 3 na ausência de prova de carga. Cintra, Aoki e Albiero (2011) ressaltam que correlações consagradas na prática de projeto de fundações diretas fornecem diretamente o valor da tensão admissível, com segurança implícita, o que dispensa a aplicação de fator de segurança.

2.5.3.1 Correlação do SPT (standard penetration test) com as tensões admissíveis

Segundo Galvis (2015), o SPT (standard penetration test) é um dos ensaios geotécnicos mais utilizados no Brasil e em grande parte do mundo, pois utiliza um equipamento simples e de fácil manejo, além de apresentar um baixo custo. Esse ensaio também fornece o índice de resistência à penetração no solo (N_{spt}), que é o número de golpes de martelo necessários para a cravação de 30 cm do amostrador SPT no solo, após uma penetração inicial de 15 cm. Os golpes são produzidos por um martelo de 65 kg que é elevado até uma altura de 75 cm de onde ele cai livremente para transferir essa energia ao conjunto de hastes.

Cintra, Aoki e Albiero (2011) salientam que, no meio técnico brasileiro, há uma regra para obter a tensão admissível em fundações diretas por sapatas, em fundação do N_{SPT}. Galvis (2015) deixa claro que esta correlação não tem fundamento científico e que pesquisadores tem procurado desenvolver métodos racionais de análise, baseado na energia gasta no SPT para correlacionar com a tensão. De qualquer forma, a correlação utilizada no meio técnico é apresentada na Equação 18.

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{spt}}{50} + q\ (MPa)\ com\ \ 5 \leq N_{spt} \leq 20 \tag{18}$$

Onde N_{SPT} é o valor médio do bulbo de tensões e a parcela correspondente à sobre carga *q* pode ou não ser considerada.

Outra correlação descrita por Cintra, Aoki e Albiero (2011) como sendo uma relação usada na prática da engenharia, é a correlação relatada por Melo (1975) e apresentada na Equação 19.

$$\sigma_{adm} = \ 0{,}1\left(\sqrt{N_{spt} - 1}\right)\ (\text{MPa})\ \text{com}\ \ 4 \leq N_{spt} \leq 16 \tag{19}$$

Uma terceira correlação apresentada por Cintra, Aoki e Albiero (2011) foi descrita por Teixeira (1996), e é apresentada na equação 20.

$$\sigma_{adm} = \ 0{,}05 + (1 + 0{,}4 \cdot B)\frac{N_{spt}}{100}\ (\text{MPa}) \tag{20}$$

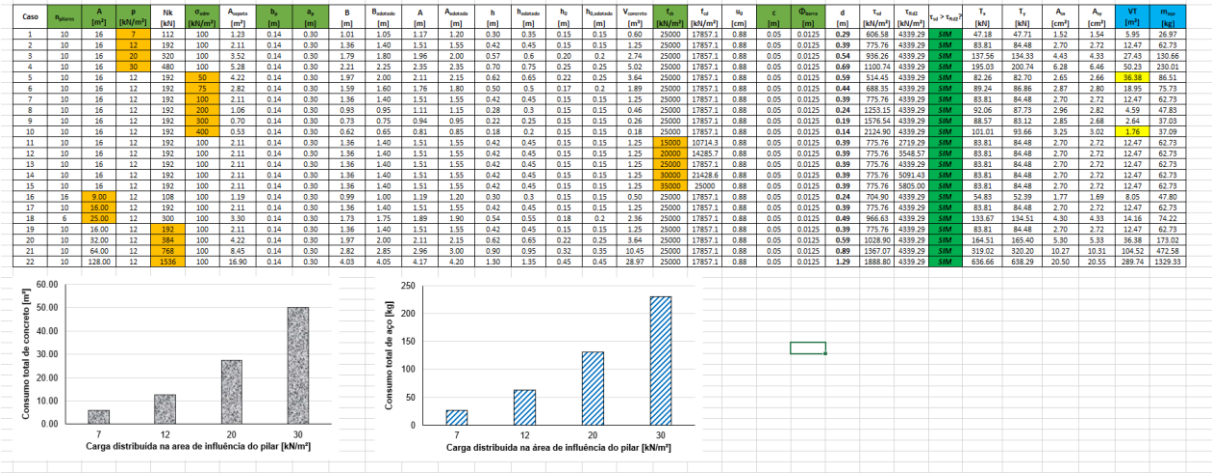
3 MATERIAIS E MÉTODO

Inicialmente, foram desenvolvidas planilhas no software Microsoft Office Excel para o dimensionamento de geométrico e estrutural de sapatas isoladas. Especificamente, os os dados de entrada são a tensão admissível do solo, as dimensões do pilar e carga solicitante, a classe do concreto e o tipo de aço da armadura.

Por meio de tal planilhas, é possível realizar o dimensionamento de sapatas em poucos minutos, o que possibilita a realização da análise paramétrica, estudando a influência dos principais dados de entrada no aspecto técnico-econômico do projeto.

A Figura 14 apresenta capturas de tela das planilhas para cálculo de sapatas. O detalhamento da planilha está na íntegra está no Apêndice I do presente trabalho.

Figura 14: Captura de tela da planilha de dimensionamento de sapatas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com o objetivo de comparar de investigar a influência da carga solicitante, da tensão admissível do solo, da classe do concreto e da solução arquitetônica, uma análise paramétrica foi realizada nos sistemas de fundações em sapatas. As variações consideradas foram:

- Carga solicitante distribuída na área de influência dos pilares: 5 kN/m², 10 kN/m², 15 kN/m² e 20 kN/m²;
- Tensão admissível do solo: 0,5 kgf/cm², 0,75 kgf/cm², 1,0 kgf/cm², 2,0 kgf/cm², 3,0 kgf/cm² e 4,0 kgf/cm²;

- Classe do concreto: C15, C20, C25, C30 e C35;
- Solução arquitetônica: em todos os casos, admitiu-se área da edificação de 160 m². Foi variado o número de pilares em 18, 9 e 6, resultando em áreas de influência nos pilares de 8,89 m², 17,78 m² e 26,67 m², respectivamente;
- Carga axial característica (N_k) nos pilares: 160 kN, 320 kN, 640 kN e 1280 kN. Tais valores foram obitidos ao manter a carga distribuída por metro quadrado constante em 10 kN/m² e variar a área de influência total nos pilares em 16 m², 32 m², 64 m² e 128 m², respectivamente. Vale ressaltar que esses valores são coerentes para, de forma respectiva, edifícios com 1, 2, 4 e 8 pavimentos.

O Quadro 1 resume as variações da análise paramétrica, identificando as variáveis *default*, ou seja, os valores que são considerados fixos enquanto a variável parametrizada é variada.

Quadro 1: Variáveis da análise paramétrica.

Variável	**Variações**	**Valor *default***
Carga solicitante distribuída na área de influência dos pilares	5 kN/m², 10 kN/m², 15 kN/m² e 20 kN/m²	10 kN/m²
Tensão admissível do solo	0,5 kgf/cm², 0,75 kgf/cm², 1,0 kgf/cm², 2,0 kgf/cm², 3,0 kgf/cm² e 4,0 kgf/cm²	1,0 kgf/cm²
Classe do concreto	C15, C20, C25, C30 e C35	C25
Área de influência nos pilares	8,89 m², 17,78 m² e 26,67m²	17,78 m²
Carga axial característica nos pilares	160 kN; 320 kN; 640 kN; 1280 kN	177,78 kN

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em todos os casos, foi admitido que:

- Não há pilares de divisa, isto é, todos os pilares estão centrados nos pilares;

- A carga foi admitida como distribuída uniformemente nas áreas de influência dos pilares;
- Todas as sapatas isoladas foram dimensionadas como rígidas;
- Em concordância com a análise paramétrica da solução arquitetônico, considerou-se área total de 160 m² em todos os casos.

O Quadro 2 apresenta a relação detalhada dos casos analisados no presente trabalho.

Quadro 2: Detalhamento dos casos considerados no estudo paramétrico.

Caso	Variável parametrizada	$n_{pilares}$	Carga distribuída [kN/m²]	Tensão admissível [kgf/cm²]	Concreto	$A_{influência}$ [m²]	N_k [kN]
1	Carga distribuída	9	5	1,00	C25	17,78	88,88
2		9	10	1,00	C25	17,78	177,78
3		9	15	1,00	C25	17,78	266,66
4		9	20	1,00	C25	17,78	355,56
5	Tensão admissível	9	10	0,50	C25	17,78	177,78
6		9	10	0,75	C25	17,78	177,78
7		9	10	1,00	C25	17,78	177,78
8		9	10	2,00	C25	17,78	177,78
9		9	10	3,00	C25	17,78	177,78
10		9	10	4,00	C25	17,78	177,78
11	f_{ck} do concreto	9	10	1,00	C15	17,78	177,78
12		9	10	1,00	C20	17,78	177,78
13		9	10	1,00	C25	17,78	177,78
14		9	10	1,00	C30	17,78	177,78
15		9	10	1,00	C35	17,78	177,78
16	Área de influência dos pilares	18	10	1,00	C25	8,89	88,88
17		9	10	1,00	C25	17,78	177,78
18		6	10	1,00	C25	26,67	266,67
19	Carga axial característica nos pilares	9	10	1,00	C25	16	160
20		9	10	1,00	C25	32	320
21		9	10	1,00	C25	64	640
22		9	10	1,00	C25	128	1280

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os 22 casos de sistemas de fundação em sapatas foram comparados com um único caso sistema de fundação em radier, por conta da complexidade de análise desse elemento estrutural, o qual é submetido a esforços de flexão, cisalhamento e punção.

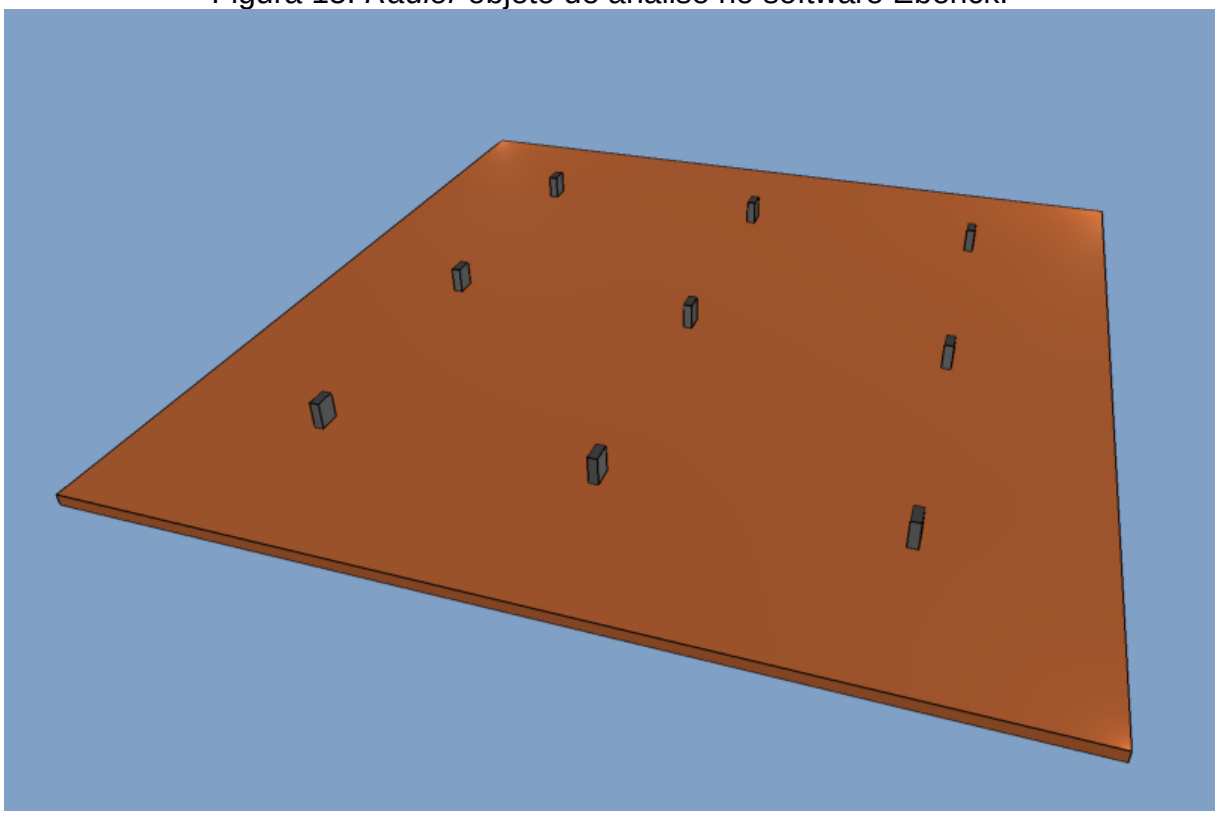
Especificamente, para o dimensionamento do sistema de fundação em radier considerou-se variáveis coerentes com as *default* adotadas para a parametrização dos sistemas de fundação em sapatas. Isto é, adotou-se:

- Área de 160 m²;
- 9 pilares;
- Área de influência nos pilares de 17,78 kN/m²;
- Carga distribuída característica na área de influência dos pilares igual a 10 kN/m²;
- Carga axial característica nos pilares igual a 177,78 kN;
- Pilares com seção 0,14 x 0,30 m;
- Resistência característica à compressão do concreto igual a 25.000 kN/m²;
- Aço CA-50;
- Coeficiente de recalque vertical do solo igual a 20.000 tf/m³, o qual é coerente com a tensão admissível padrão de 100 kN/m² adotado para as sapatas.
- Coeficiente de deslocamento horizontal de 0,1 tf/m³.

Para a análise e dimensionamento do *radier*, foi utilizado o software Eberick, versão 2021, desenvolvido pela AltoQi. Tal programa utiliza o método de grelhas para o levantamento de esforços no radier.

A Figura 15 apresenta o *radier* modelado no software Eberick Considerou-se pilares com altura de 40 cm apenas para a aplicação das cargas axiais de 177,78 kN em cada pilar.

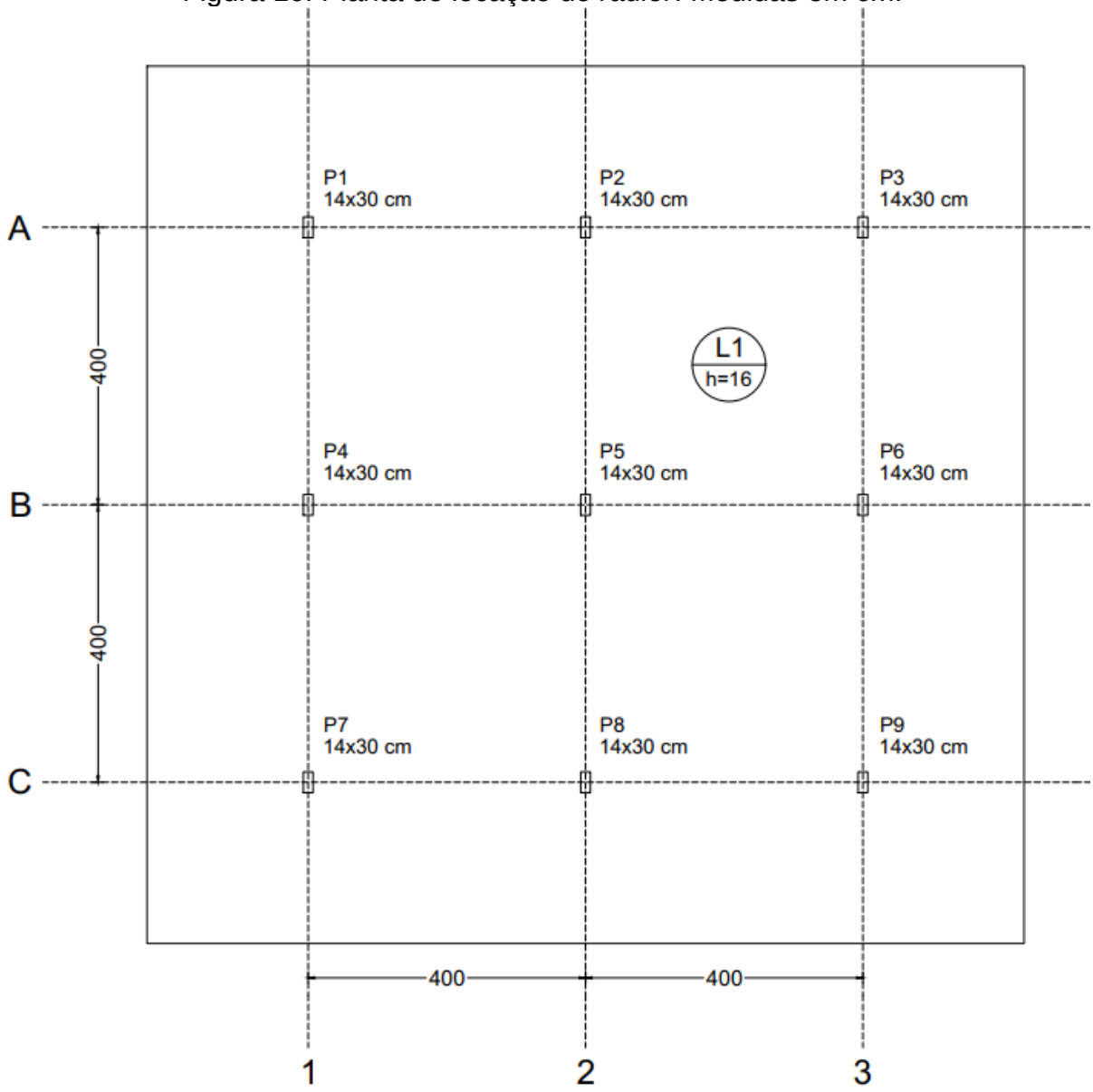
Figura 15: *Radier* objeto de análise no software Eberick.



Fonte: Elaborado pelos autores.

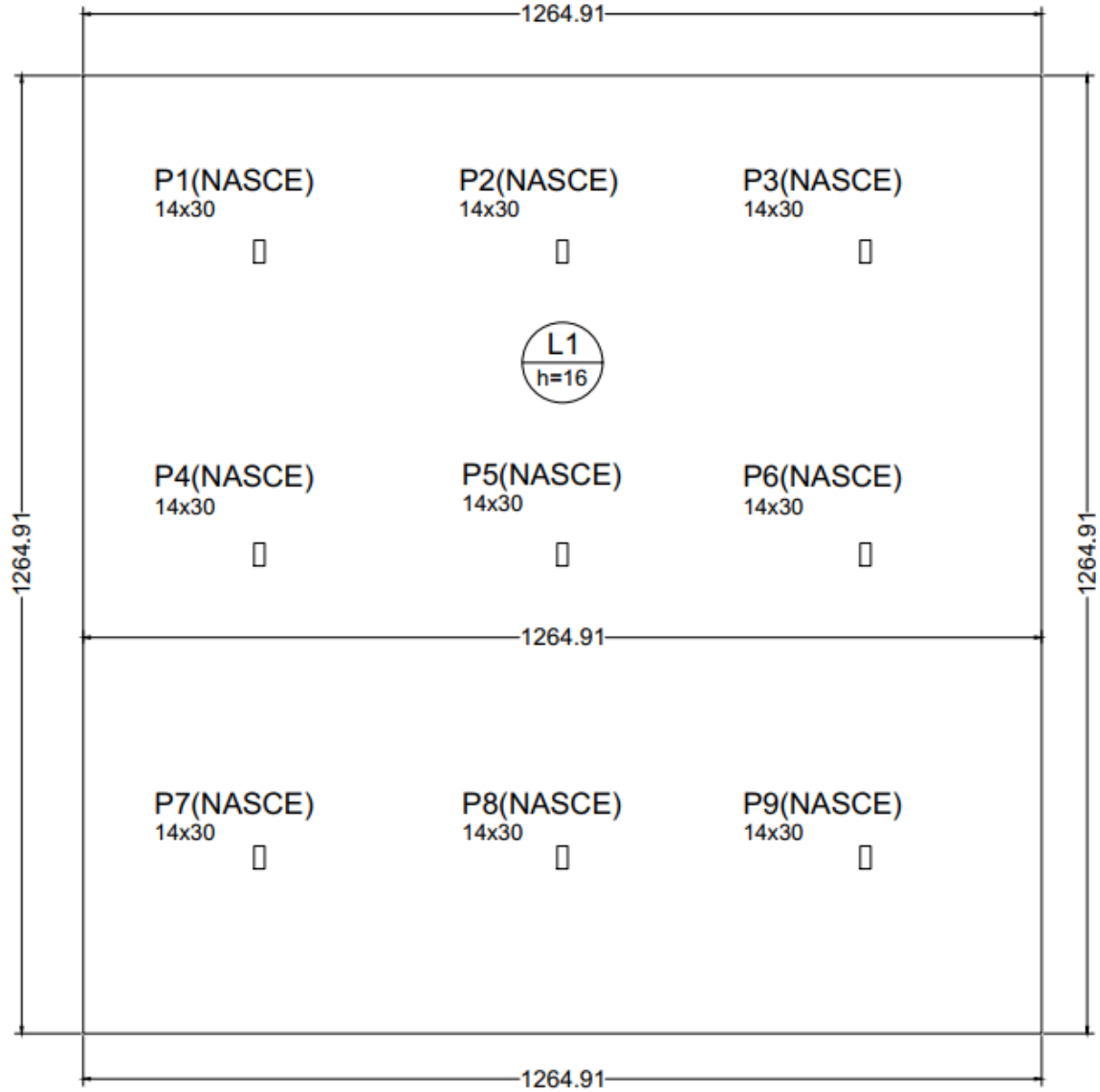
Por sua vez, as Figuras 16 e 17 apresentam a planta de locação e de formas no nível do *radier*. Trata-se de um radier quadrado, com lado de 12,64 m, a fim de totalizar uma área de 160 m².

Figura 16: Planta de locação do *radier*. Medidas em cm.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 17: Planta de formas no nível do *radier.* Medidas em cm.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para a espessura do radier, considerou-se 16 cm, visto que essa é a altura mínima recomendada para lajes submetidas à punção pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

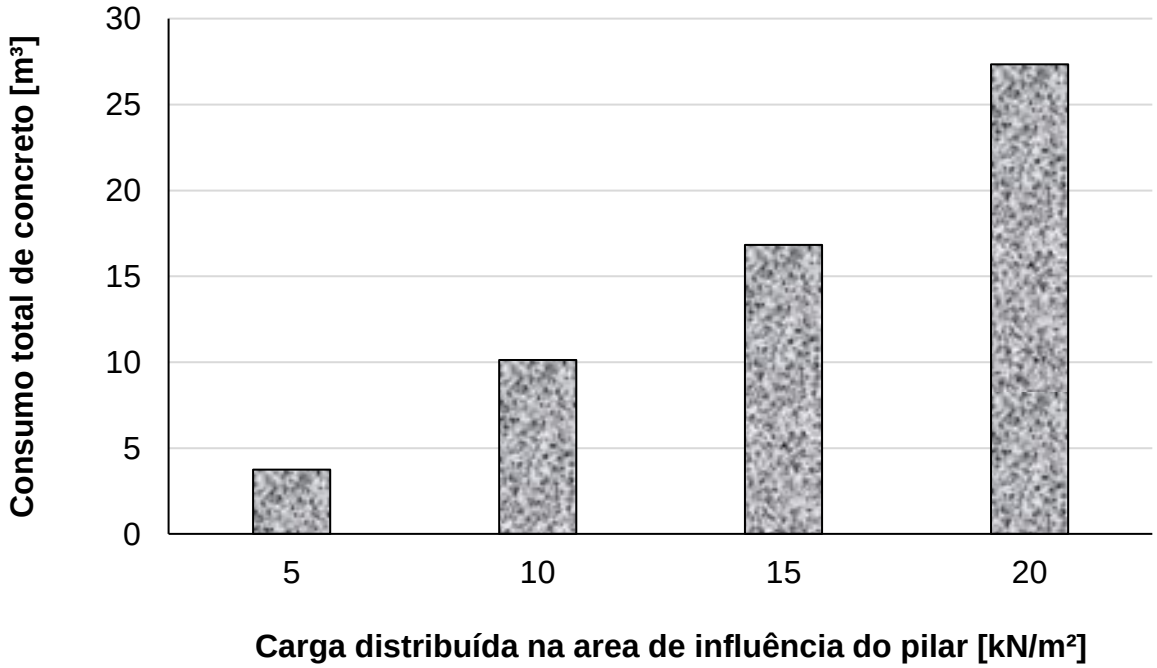
4 RESULTADOS

4.1 Análise paramétrica do sistema de fundações com sapatas

4.1.1 Análise da variação da carga distribuída na área de influencia do pilar no consumo de aço e concreto

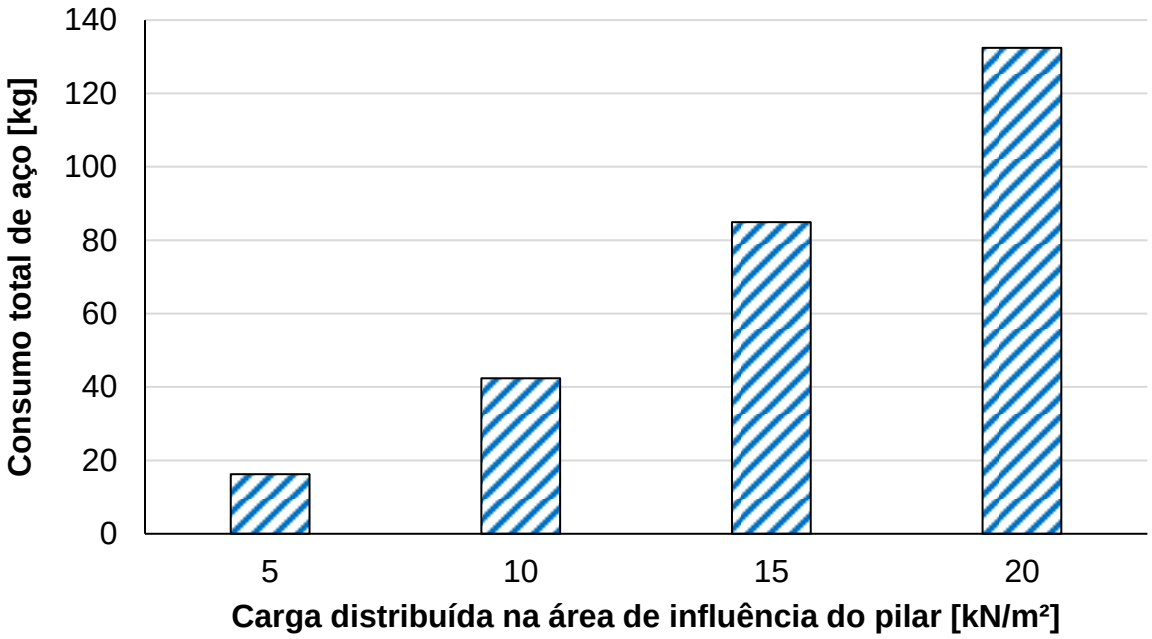
As Figuras 18 e 19 apresentam os resultados obtidos no estudo da influência da carga distribuída por metro quadrado no consumo de concreto e de aço nas sapatas.

Figura 18: Influência da carga distribuída por metro quadrado no consumo de concreto.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 19: Influência da carga distribuída por metro quadrado no consumo de aço.



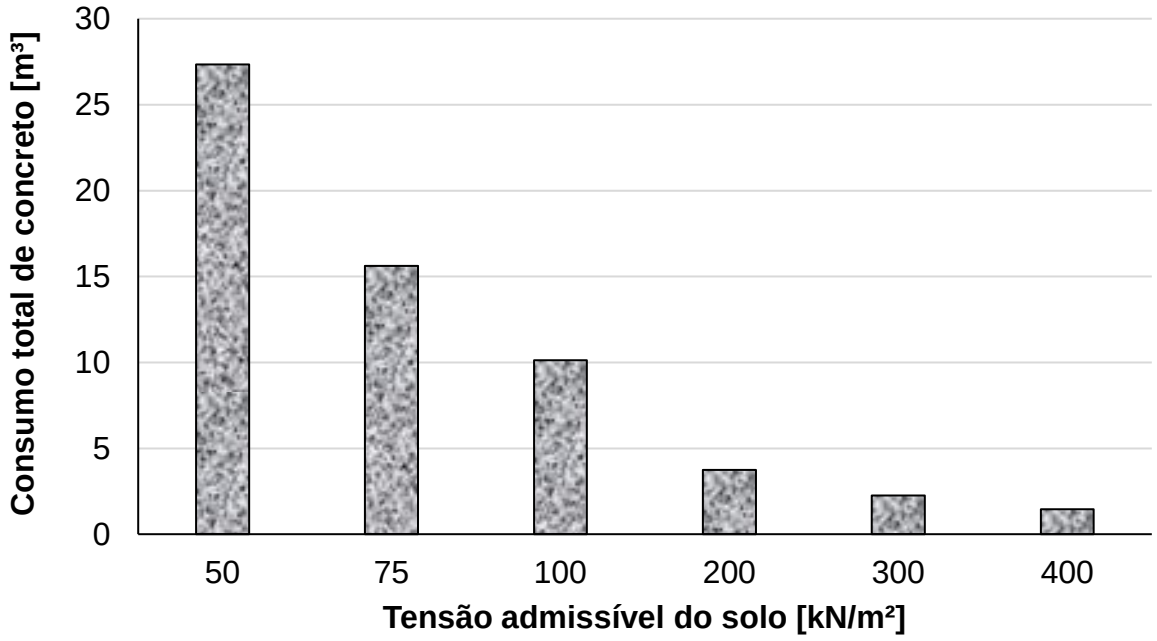
Fonte: Elaborado pelos autores.

Pelas Figuras 18 e 19 observa-se um aumento praticamente linear do consumo de concreto e de aço ao se elevar a carga distribuida na área de influência do pilar. Quantitativamente, um aumento de 4 vezes na carga distribuída ocasionou um respectivo aumento de aproximadamente, 9,95 vezes no consumo de concreto e de 8 vezes no consumo de aço. Observa-se ainda que o impacto no consumo de concreto e de aço foi da mesma ordem de grandeza. Contudo, o consumo apresentou um crescimento duas vezes maior que a elevação da carga.

4.1.2 Análise da variação da tensão admissível do solo no consumo de aço e concreto

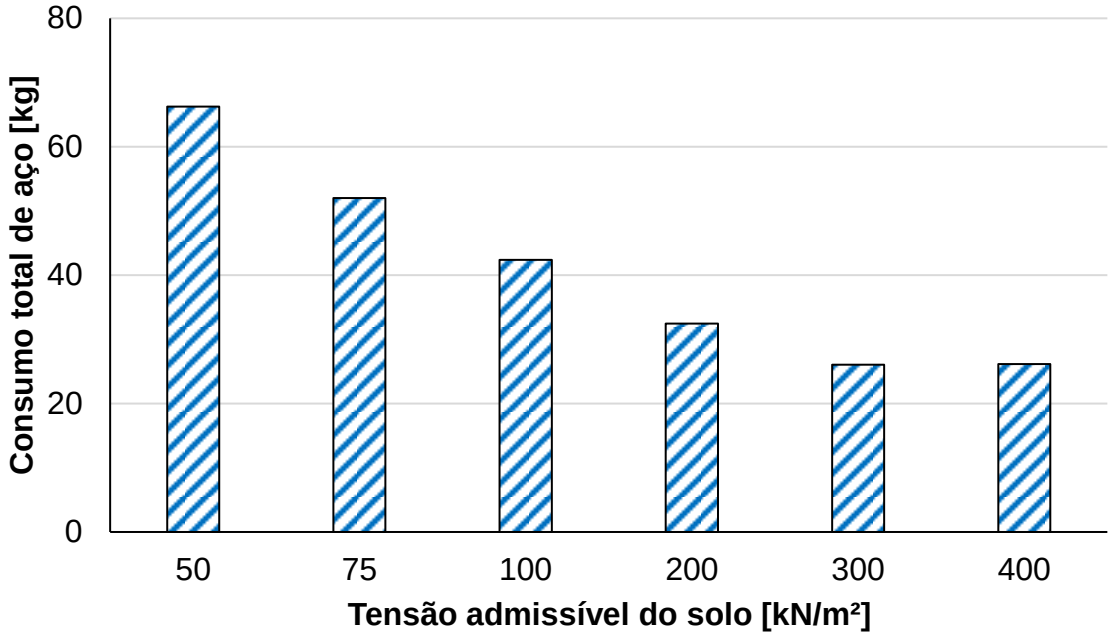
As Figuras 20 e 21 apresentam os resultados obtidos no estudo da influência da tensão admissível do solo no consumo de concreto e de aço nas sapatas.

Figura 20: Influência tensão admissível por metro quadrado no consumo de concreto.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 21: Influência tensão admissível por metro quadrado no consumo de aço.



Fonte: Elaborado pelos autores.

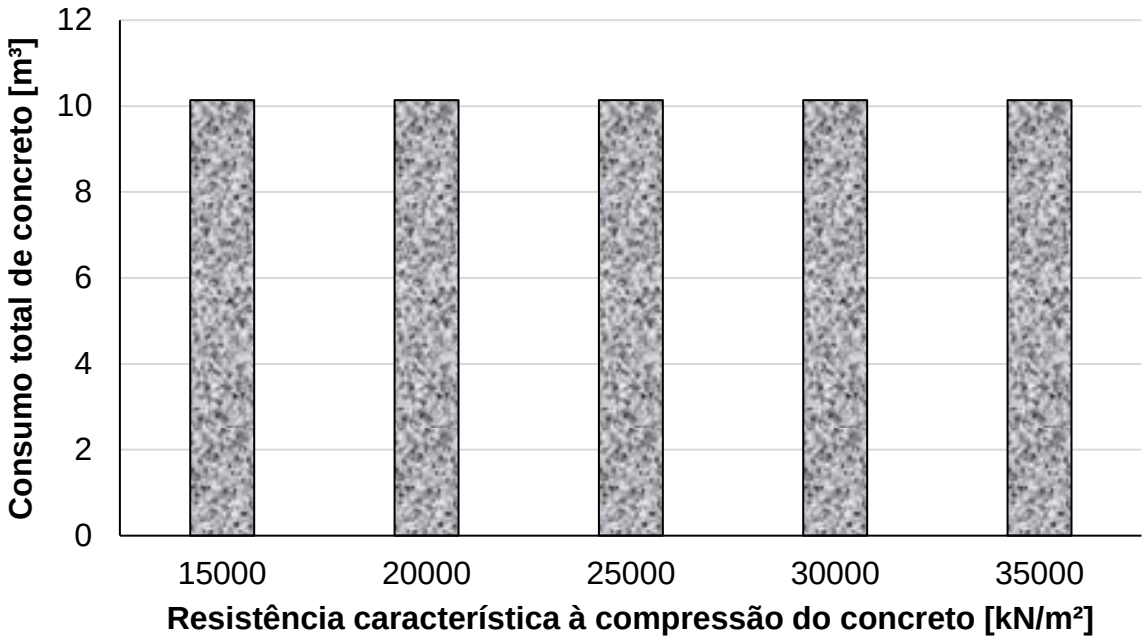
Pelas Figuras 20 e 21, nota-se um aumento exponencial do consumo de concreto e de aço conforme a tensão admissível do solo diminui, mostrando um comportamento inversamente proporcional, ou seja, quanto maior a tensão admissível do solo, menor o consumo de aço e concreto nas sapatas. Especificamente, ao aumentar a tensão admissível do solo em 8 vezes, o consumo de concreto foi reduzido em, aproximadamente, 18,73 vezes e o consumo de aço em 2,53 vezes. O comportamento foi praticamente exponencial.

O fato de a tensão admissível influenciar fortemente o consumo de concreto e de aço indica que, muitas vezes, justifica-se um custo maior com escavação, desde que se consiga atingir camadas de solos com maior tensão admissível, reduzindo assim, custos com concreto e com o aço.

4.1.3 Análise da variação do f_{ck} do concreto no consumo de aço e concreto

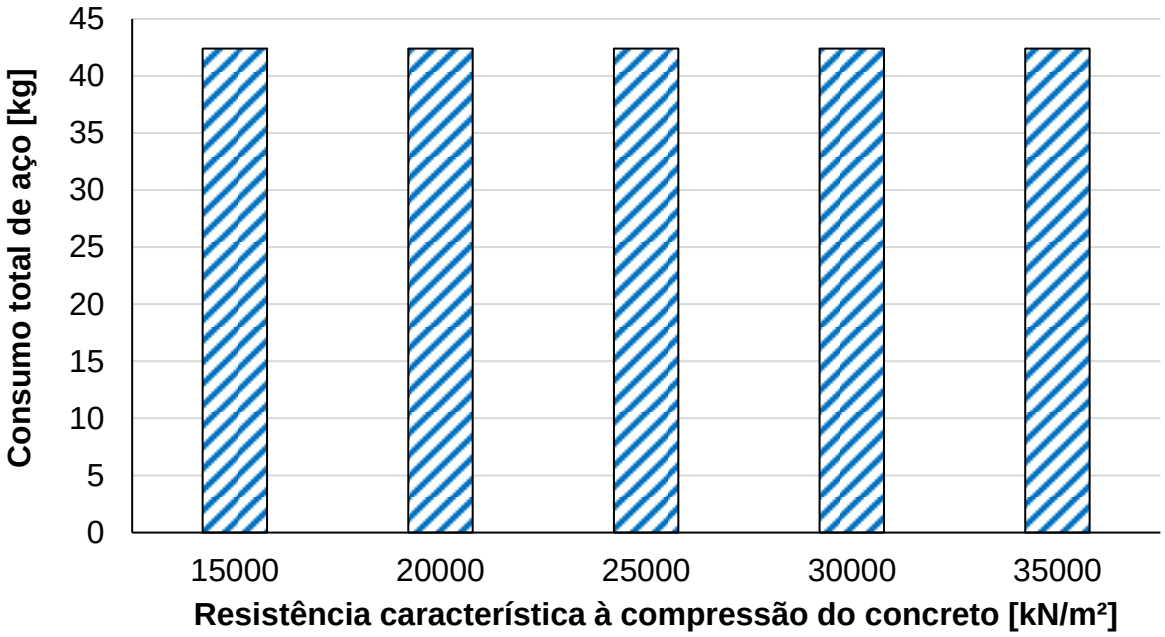
As Figuras 22 e 23 apresentam os resultados obtidos no estudo da influência da variação da resistência característica do concreto no consumo de concreto e de aço nas sapatas.

Figura 22: Influência da variação da resistência característica do concreto no consumo de concreto.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 23: Influência da variação da resistência característica do concreto no consumo de aço.



Fonte: Elaborado pelos autores.

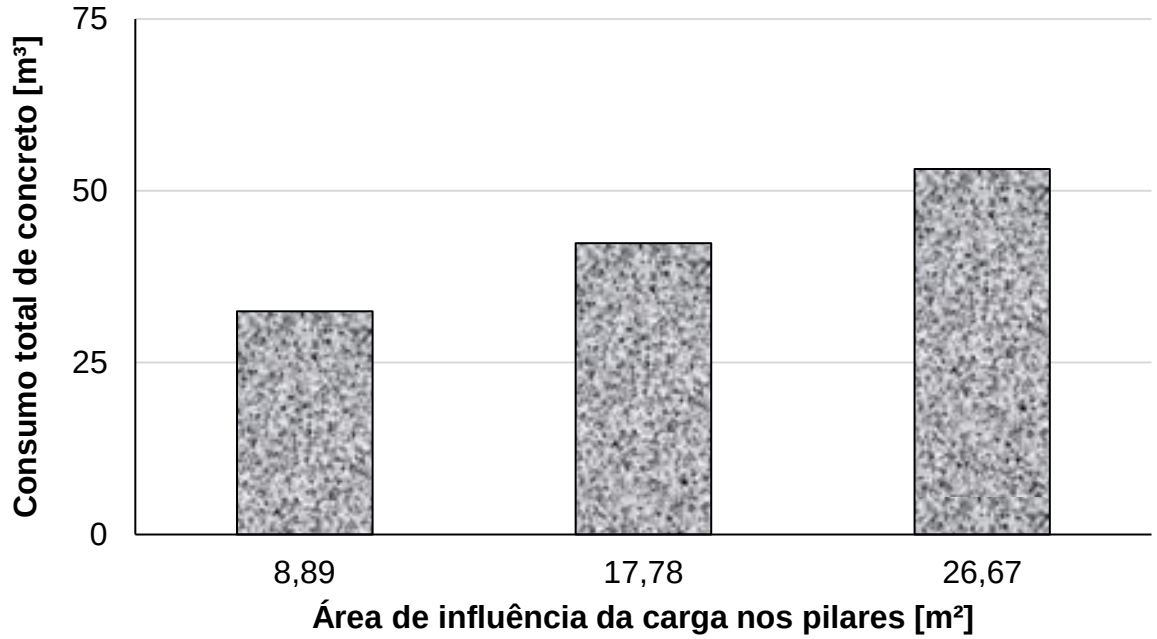
As Figuras 22 e 23 evidenciam que quando se mantém todos os demais parâmetros constantes, o consumo de concreto e aço também se manterão constantes, independente da variação da resistência característica do concreto.

Especificamente, a classe do concreto auxilia apenas nas verificações da compressão na biela.

4.1.4 Análise da variação da área de influência da carga nos pilares no consumo de aço e concreto

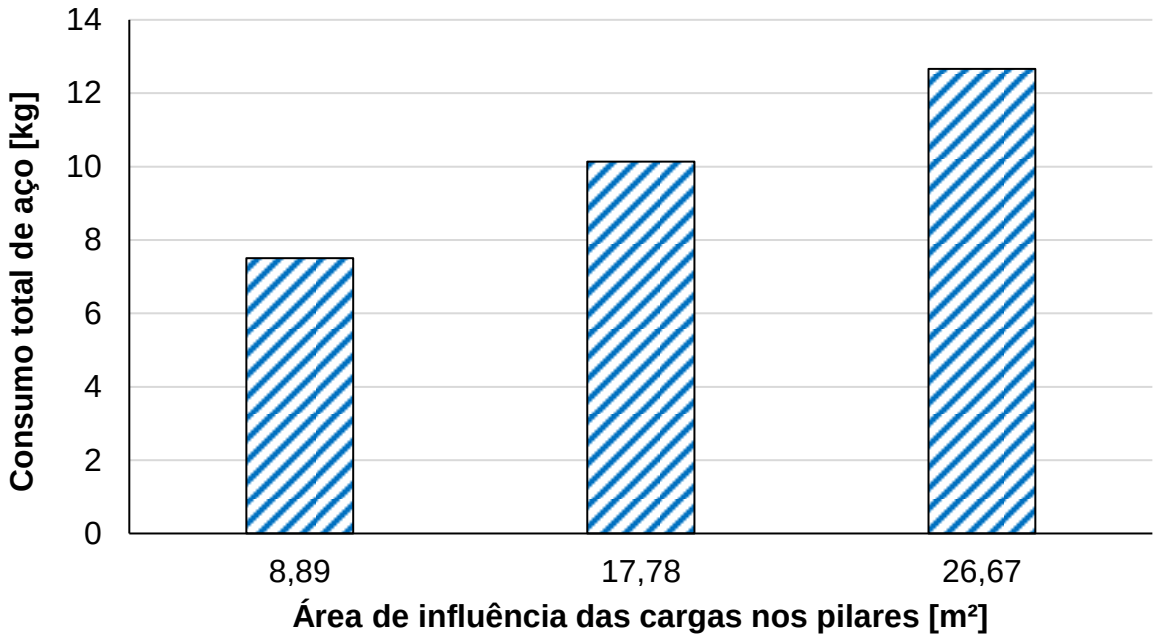
As Figuras 24 e 25 apresentam os resultados obtidos no estudo da influência da variação da área de influência da carga nos pilares no consumo de concreto e de aço nas sapatas.

Figura 24: Influência da variação da área de influência da carga no pilar no consumo de concreto.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 25: Influência da variação da área de influência da carga no pilar no consumo de aço.



Fonte: Elaborado pelos autores.

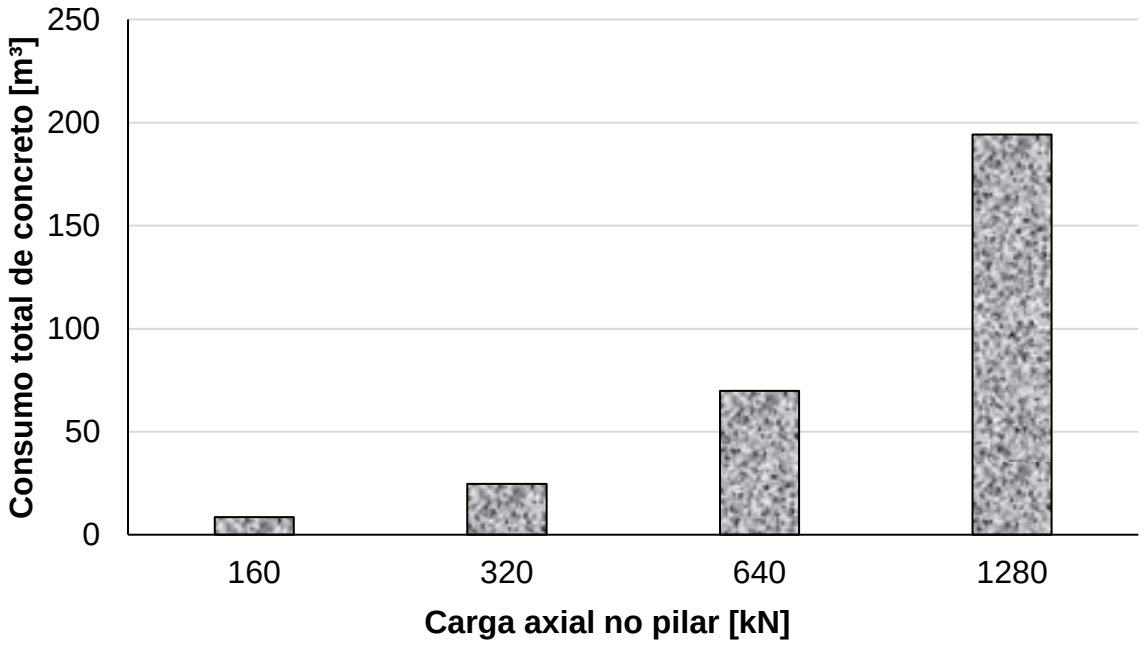
Tal análise é muito similiar à feita para as cargas, visto que áreas de influência maiores acarretam em cargas maiores. As Figuras 24 e 25 apresentam os resultados da variação da área de influência de cargas nos pilares, permitindo observar um comportamento linear. Um aumento da área de influência em 3 vezes ocasionou aumentos do consumo de concreto de 1,63 vezes e do aço de 1,69 vezes.

Comparando os efeitos da área de influência dos pilares com a carga distribuída no pavimento, verifica-se que, quanto menos pilares, menor foi o consumo de concreto e de aço nos casos analisados, mesmo que eles estejam sujeitos à esforços de maior magnitude.

4.1.5 Análise da variação da carga nos pilares no consumo de aço e concreto

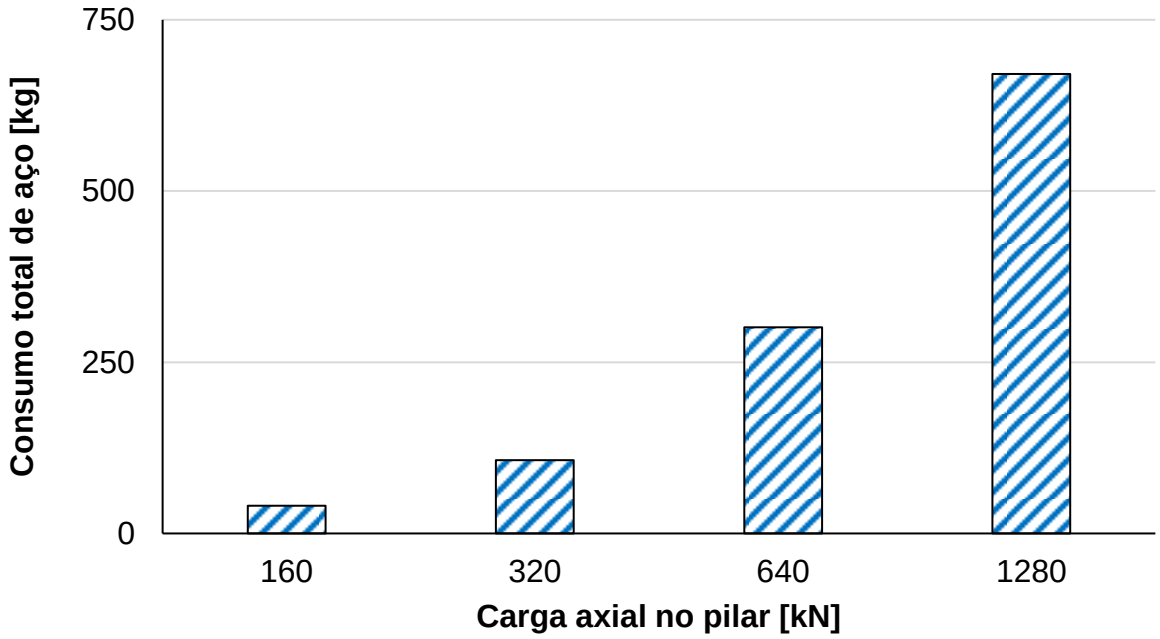
As Figuras 26 e 27 apresentam os resultados obtidos no estudo da influência da variação da carga nos pilares no consumo de concreto e de aço nas sapatas.

Figura 26: Influência da variação da carga axial no pilar no consumo de concreto.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 27: Influência da variação da carga axial no pilar no consumo de aço.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tal analise é muito similiar à exposta no item 4.1.1, porém ela tem o intuito de avaliar o impacto do número de pavimentos e não da carga distribuída por pavimento. As Figuras 26 e 27 evidenciam uma forte influência da variação da carga axial no pilar no consumo de concreto e aço. Para um aumento da carga em 8 vezes, o consumo de concreto aumentou cerca de 22,76 vezes e o consumo de aço em 16,59 vezes.

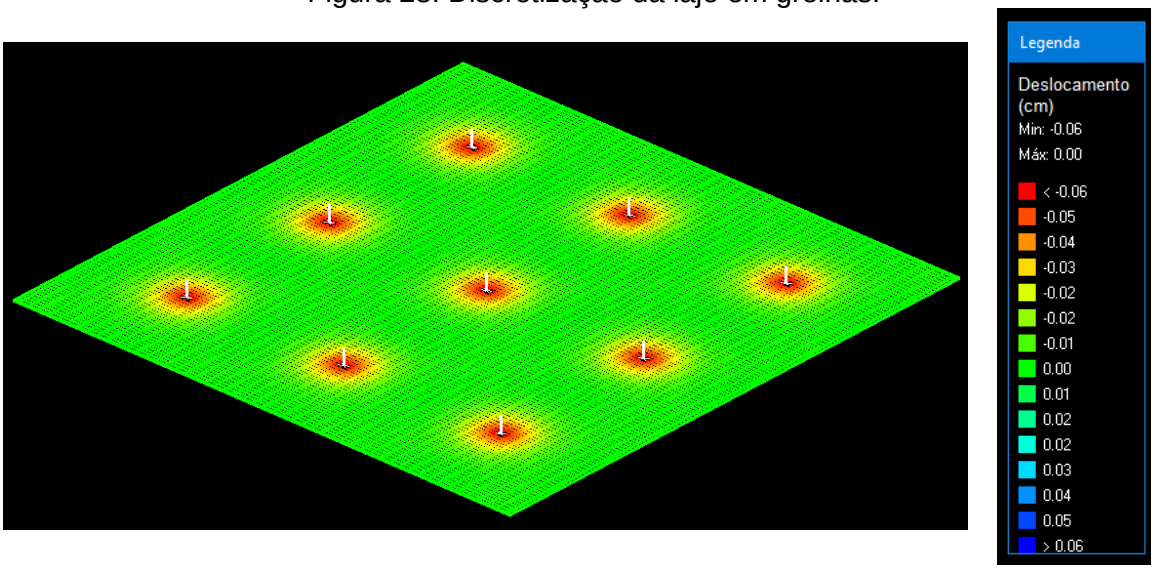
4.2 Análise do sistema de fundações em *radier*

O dimensionamento realizado no Eberick resultou nas seguintes armaduras:

- Armadura positiva
  - Barras Φ12,5 c/14,0 cm em x;
  - Barras Φ12,5 c/11,0 cm em y.
- Armadura negativa
  - Barras Φ6,3 c/19,0 cm em x;
  - Barras Φ10,0 c/20,0 cm em y.

A Figura 28 ilustra o modelo de grelha utilizado para o dimensionamento do radier. Ela evidencia os deslocamentos em cada ponto da malha, expondo concentrações de tensões nos pontos em que os pilares se apoiam nas lajes. No presente trabalho, considerou-se nós a cada 10 cm em x e a cada 25 cm em y, de modo que houvesse no mínimo 1 nó no interior de cada pilar.

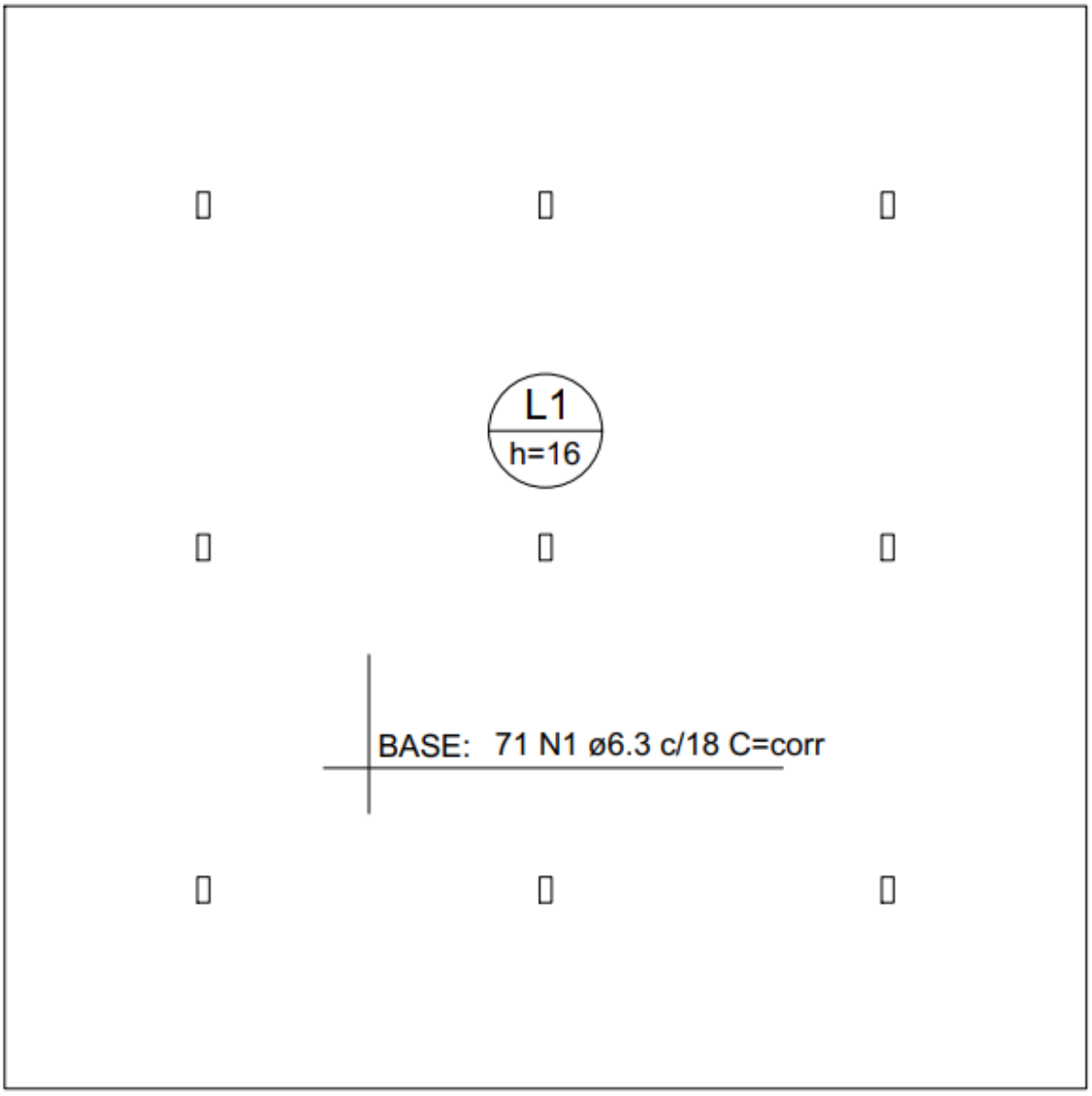
Figura 28: Discretização da laje em grelhas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

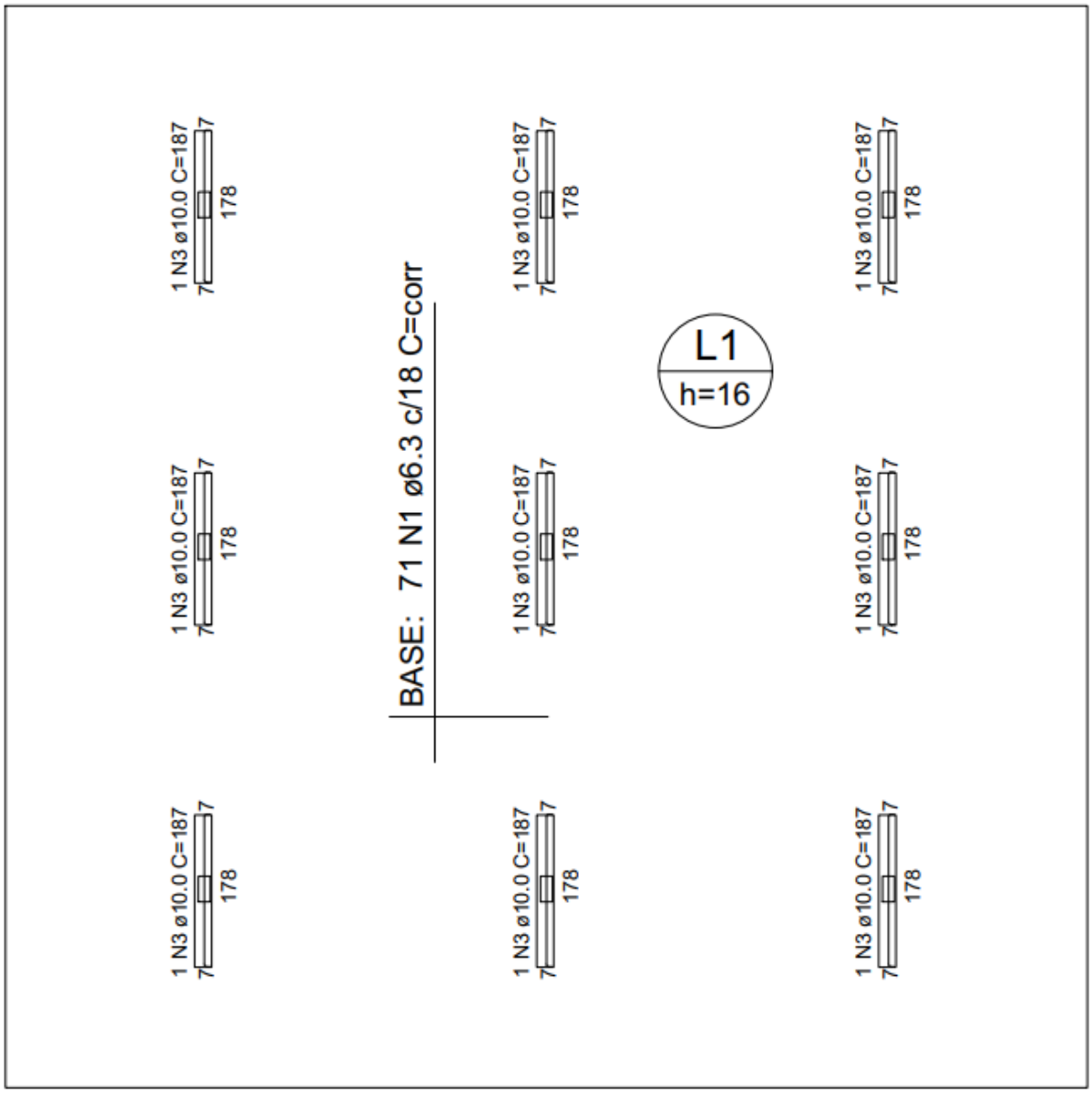
As Figuras 29, 30, 31, 32, 33 e 34 apresentam o detalhamento da armadura do *radier*.

Figura 29: Detalhamento da armadura superior do radier – Eixo x.



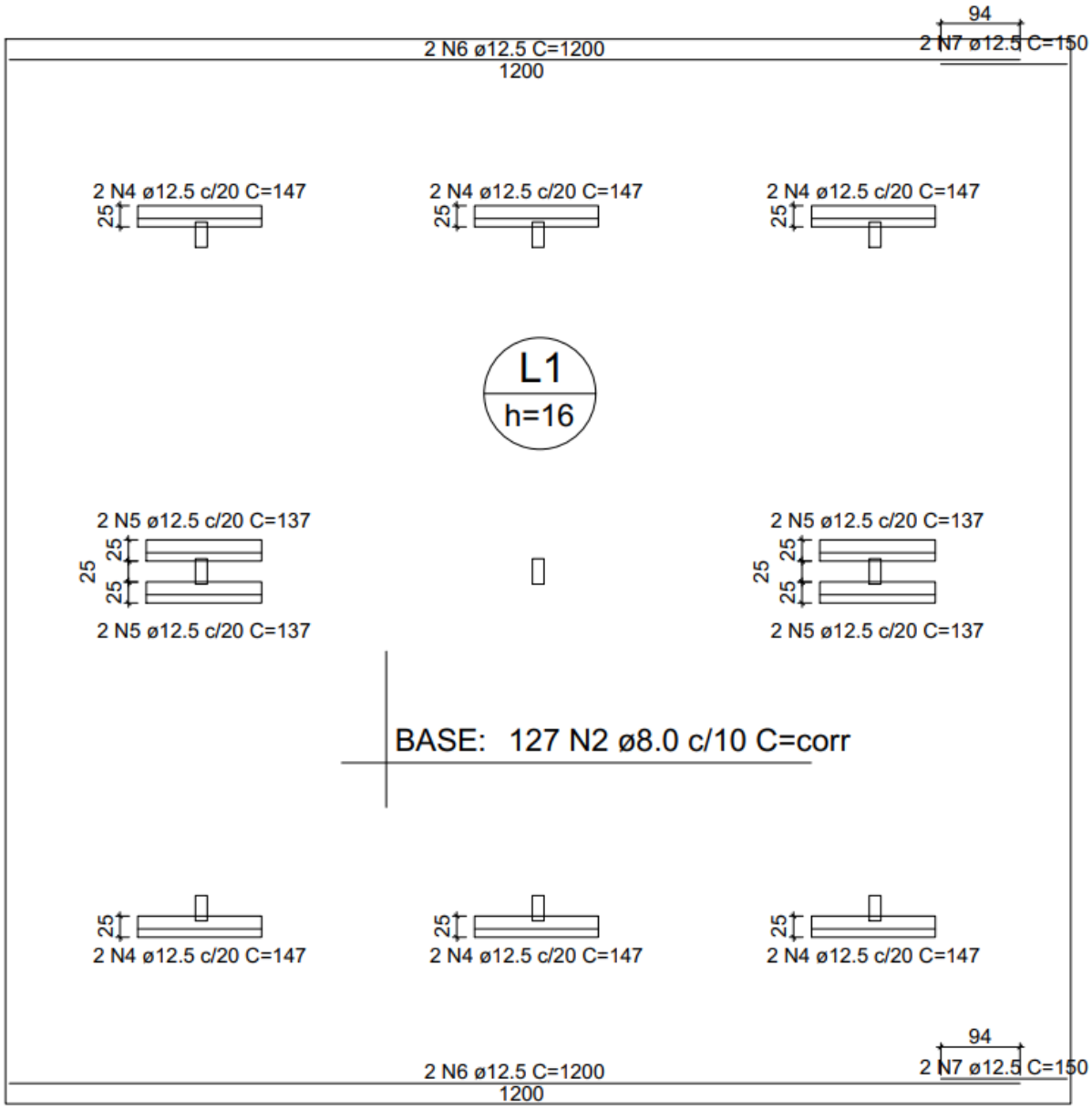
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 30: Detalhamento da armadura inferior do radier – Eixo y.



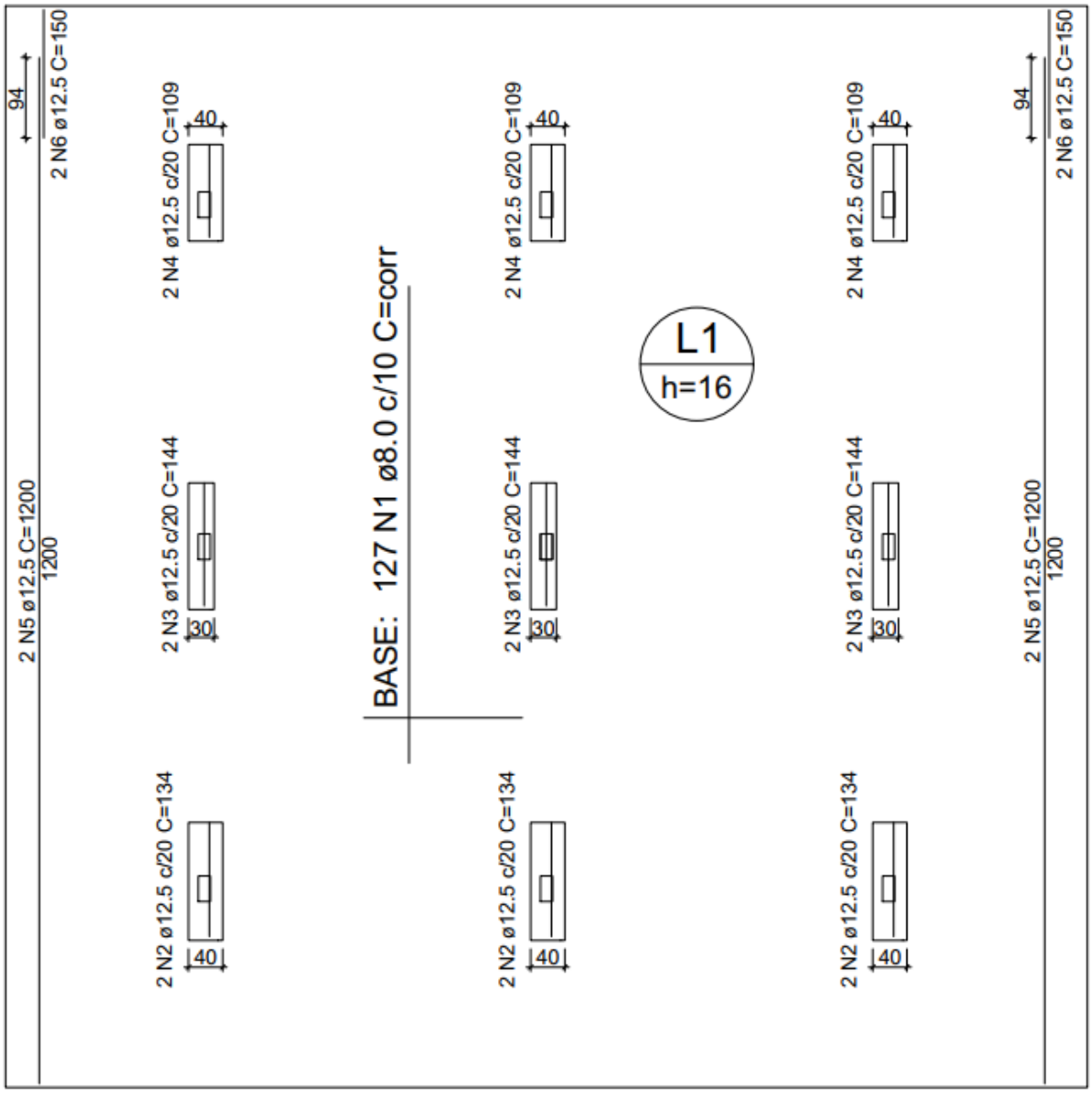
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 31: Detalhamento da armadura superior do radier – Eixo x.



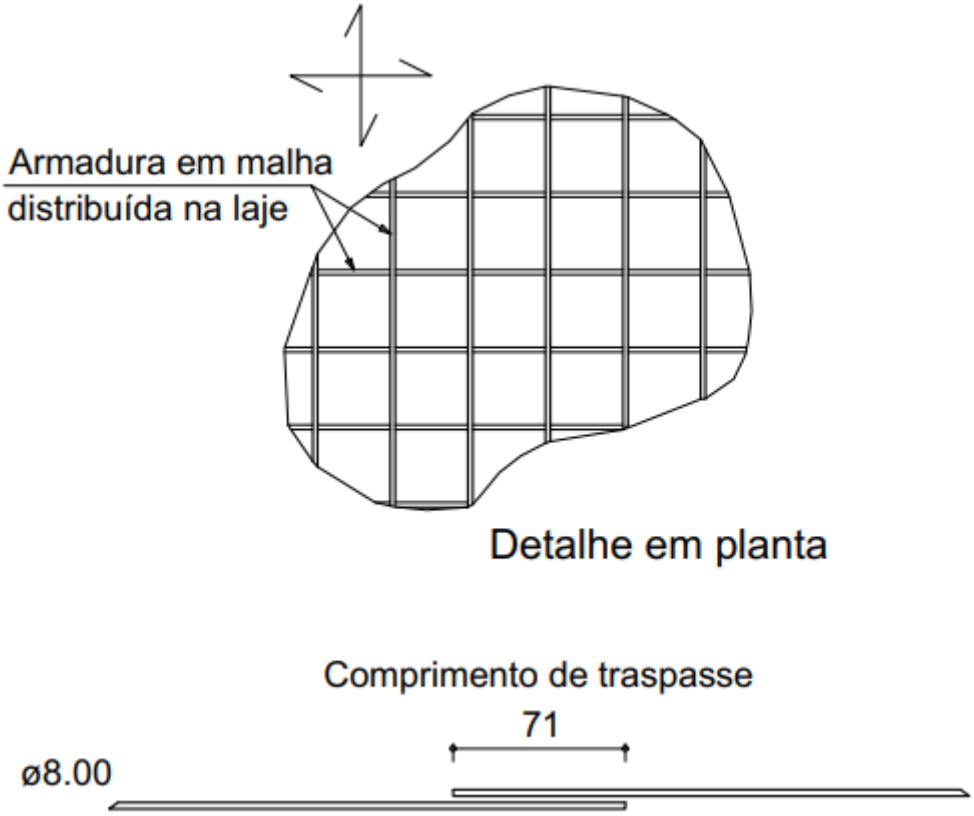
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 32: Detalhamento da armadura superior do radier – Eixo y.



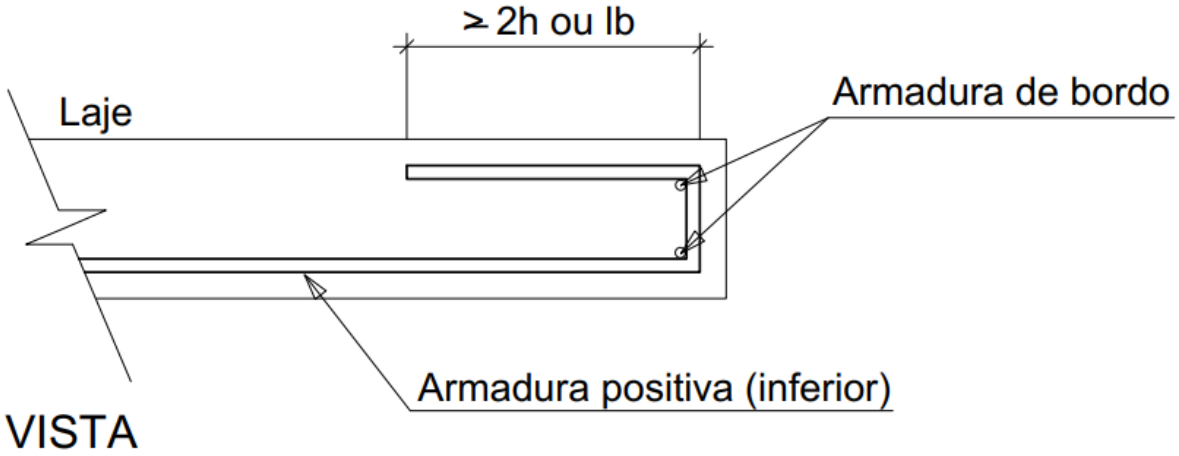
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 33: Detalhe da armadura de malha base.



Fonte: AltoQi Eberick.

Figura 34: Detalhe da armadura de bordo da laje.



Fonte: AltoQi Eberick.

No total, o radier dimensionado apresentou o seguinte consumo de materiais:

- 25,6 m³ de concreto;
- 1859,54 kg de aço.

Isso resulta numa taxa de aço de 79,9 kg/m³ de concreto.

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O presente trabalho teve o objetivo de comparar sistemas de fundação em sapatas com um sistema de fundação em *radier*, investingando a influência da carga solicitante, da tensão admissível do solo, da classe do concreto e da solução arquitetônica no desempenho de sistemas de fundações em sapatas.

Com as simulações realizadas para a fundação em sapatas, foi possível concluir que:

- A relação entre a carga e a área de influência de carga nos pilares com o consumo de concreto e de aço foi proporcional e praticamente linear;
- A relação entre a tensão admissível e o consumo de concreto e de aço foi inversamente proporcional, com comportamento exponencial;
- A resistência característica à compressão do concreto não influenciou no consumo de concreto e de aço. Tal variável apenas auxiliou nas verificações;
- Quanto menor o número de pilares no pavimento, maior foi a economia de concreto e de aço no sistema de fundações, mesmo que a carga axial por pilar aumente.

Notou-se ainda que o *radier* é um elemento mais complexo de ser analisado, visto que está sujeito a cargas distribuídas e pontuais, sendo necessário avaliar a resistência à flexão, ao cisalhamento e à punção. Além disso, a determinação dos esforços no *radier* não é simples, sendo, na maioria dos casos, necessário algum software para discretizá-lo e levantar tais esforços.

Comparando o consumo de material do *radier* com o consumo do sistema de fundações em sapatas com as variáveis *default*, verificou-se que o radier consumiu aproximadamente o dobro de concreto e 30 vezes mais aço que o sistema em sapatas, comprovando que é economicamente é menos vantajoso que o sistema em sapatas. Contudo, vale ressaltar que o fator “tempo de construção” e custos de mão de obra não foram considerados nessa comparação.

Apesar deste resultado, é preciso ressaltar que, na prática, o uso do *radier* se mostra competitivo pois os construtores não obedecem a recomendação de espessura mínima de 16 cm feita pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para lajes submetidas à punção, conseguindo assim minimizar custos.

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo da viabilidade do emprego de *radiers* com espessura inferior a 16 cm do ponto de vista estrutural; e a comparação entre sistemas de fundações em sapatas com sistemas de fundações em estacas moldadas *in loco*.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 360R-92**: Design of slabs on grade, 2006.

ANDRADE, J. R. L. **Fundações, blocos e vigas de transição**. Notas de aula – Estruturas Correntes de Concreto Armado, EESC/USP, São Carlos, 4a parte, 1989.

ARAGÃO, W. R. J. **A utilização da fundação do tipo *radier***. V Congresso de Iniciação Científica. Aracaju, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2004.

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

BASTOS, P. S. S. **Sapatas de fundação**. 120 p., Bauru, 2019. Disponível em: wwwp.feb.unesp.br\pbastos. Acessado em: 23 abril de 2021.

BIZERRIS, R. ***Radier***, 2013. Disponível em: <http://blog.construir.arq.br/*radier*/>. Acessado em: 23 abril de 2021.

CAQUOT, A.; KERISEL, J. **Table for the calculation of passive pressure, active pressure and bearing capacity of foundations.** Paris: Gauthier-Villars, 1948.

CAUDURO, E. L. **Execução de *radier*s protendidos: simplicidade e economia**. In: 42º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. TRABALHO II-B-026. Fortaleza, 2000. p. 1 - 14.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson; ALBIERO, José Henrique. **Fundações Diretas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 140 p.

DAS, B. M. **Principles of Geotechnical Engineering**, Cengage Learning, 2010, p 7.

DÓRIA, L. E. S. **Projeto de estrutura de fundação em concreto do tipo *radier***. 2007. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió/AL, 2007.

GALVIS, J. Z. **Estimativa das tensões internas e externas atuantes no amostrador SPT durante sua cravação**. 144 p., São Carlos SP, 2015. Disponível em: www.teses.usp.br. Acessado em: 13 junho de 2021.

HANAI, J. B. **Lajes de edifícios em concreto protendido com cabos pós-tracionados – manual de projeto**. Tradução do Relatório Técnico nº 43, Concrete Society. São Carlos, 2000.

IBAPE-MG, Conferência na Sociedade Mineira de Engenheiros, Belo Horizonte/MG, 1979

JOPPERT JUNIOR, I. **Fundações e contenções de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução**. São Paulo: Ed. PINI Ltda, 2007.

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS E PAVIMENTAÇÃO, **Breve História da Fundação**, pg 4. Disponível em: <http://www.lmsp.ufc.br/arquivos/graduacao/fundacao/apostila/01.pdf>. Acessado em: 20 de abril de 2020.

MARANGON, M. **Capacidade de Carga nos Solos**, Faculdade de Engenharia – UFJF, Mecânica dos Solos II, Juiz de Fora, 2018.

MARINHO, Filipe. **Cálculo da tensão admissível do solo.** 2019. Disponível em: https://www.guiadaengenharia.com/tensao-admissivel-metodos-determinacao/. Acesso em: 17 set. 2021.

MEYERHOF, G. G. **Influence of Roughness of Base and Ground-Water Conditions On The Ultimate Bearing Capacity of Foundations**. Géotechnique, [S.L.], v. 5, n. 3, p. 227-242, set. 1955. Thomas Telford Ltd. http://dx.doi.org/10.1680/geot.1955.5.3.227.

MOHR, M. M. **Lançamento de *radier***, 2013. Disponível em: < http://faq.altoqi.com.br/content/261/1072/pt-br/dimensionamento-e-detalhamento-de-*radier*.html>. Acessado em 25 abril de 2021.

MOURA, A. P. **Fundações rasas – determinação da capacidade de carga**. Fundações e obras de terra, UFVJM, Mucuri, 2016.

PORTAL UTILIZANDO BIM. Tipos de Fundações rasas e suas características. Disponível em: <ttps://utilizandobim.com/blog/fundacoes-rasas/>. Acesso em 09 set. 2021.

PORTO, M. J. C. **Prospecção Geotécnica do Subsolo**. Editora LTC, 1979.

REISNER, G. A.; FISHER, C. S.; LYON, D. G. **Harvard excavations at Samaria, 1908-1910**. Cambridge: Harvard University Press, 1924.

RIBEIRO, M. A. A. **Análise comparativa de métodos utilizados no cálculo da interação solo-*radier***. 2010. 101 f., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SINGER, M. F. **Análise de Solução Para *Radier*: Estudo Sobre o Uso de Concreto Reforçado com Fibras de Aço.** Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

TERZAGHI, K.; PECK, R. **Soil mechanics in engineering practice**. 2nd Edition, John Wiley, New York. 1967.

UFC/LMSP; **Apostila, Capitulo 1 Introdução**, 2007. Disponível em < http://www.lmsp.ufc.br/arquivos/graduacao/fundacao/apostila/01.pdf >. Acessado em: 20 de abril de 2021.

XAVIER, A. **Você conhece as lajes *radiers*? Confira agora tudo sobre este tipo de fundação e como elas são usadas no Brasil,** 2015. Disponível em: <http://www.brz-experts.com.br/news/voce-conhece-as-lajes-*radier*s-confira-agora-Tudo-sobre-este-tipo-de-fundacao-e-como-elas-sao-usadas-no-brasil>. Acessado em: 20 abril de 2021.

APÊNDICE 1 - PLANILHA DE DIMENSIONAMENTO DAS SAPATAS

Caso	$n_{pilares}$	A [m²]	p [kN/m²]	Nk [kN]	σ_{adm} [kN/m²]	A_{sapata} [m²]	b_p [m]	a_p [m]	B [m]	$B_{adotado}$ [m]
1	9	17,78	5	88,89	100	0,98	0,14	0,30	0,89	0,90
2	9	17,78	10	177,78	100	1,96	0,14	0,30	1,30	1,35
3	9	17,78	15	266,67	100	2,93	0,20	0,80	1,37	1,40
4	9	17,78	20	355,56	100	3,91	0,14	0,30	1,89	1,90
5	9	17,78	10	177,78	50	3,91	0,14	0,30	1,89	1,90
6	9	17,78	10	177,78	75	2,61	0,14	0,30	1,52	1,55
7	9	17,78	10	177,78	100	1,96	0,14	0,30	1,30	1,35
8	9	17,78	10	177,78	200	0,98	0,14	0,30	0,89	0,90
9	9	17,78	10	177,78	300	0,65	0,14	0,30	0,70	0,75
10	9	17,78	10	177,78	400	0,49	0,14	0,30	0,59	0,60
11	9	17,78	10	177,78	100	1,96	0,14	0,30	1,30	1,35
12	9	17,78	10	177,78	100	1,96	0,14	0,30	1,30	1,35
13	9	17,78	10	177,78	100	1,96	0,14	0,30	1,30	1,35
14	9	17,78	10	177,78	100	1,96	0,14	0,30	1,30	1,35
15	9	17,78	10	177,78	100	1,96	0,14	0,30	1,30	1,35
16	18	8,89	10	88,89	100	0,98	0,14	0,30	0,89	0,90
17	9	17,78	10	177,78	100	1,96	0,14	0,30	1,30	1,35
18	6	26,67	10	266,67	100	2,93	0,14	0,30	1,62	1,65
19	9	16,00	10	160	100	1,76	0,14	0,30	1,23	1,25
20	9	32,00	10	320	100	3,52	0,14	0,30	1,79	1,80
21	9	64,00	10	640	100	7,04	0,14	0,30	2,57	2,60
22	9	128,00	10	1280	100	14,08	0,14	0,30	3,67	3,70

Caso	A [m]	$A_{adotado}$ [m]	h [m]	$h_{adotado}$ [m]	h_0 [m]	$h_{0,adotado}$ [m]	$V_{concreto}$ [m³]
1	1,09	1,10	0,27	0,3	0,15	0,15	0,42
2	1,45	1,45	0,40	0,45	0,15	0,15	1,13
3	2,10	2,10	0,43	0,45	0,15	0,15	1,87
4	2,06	2,10	0,60	0,6	0,20	0,2	3,04
5	2,06	2,10	0,60	0,6	0,20	0,2	3,04
6	1,68	1,70	0,47	0,5	0,17	0,2	1,73
7	1,45	1,45	0,40	0,45	0,15	0,15	1,13
8	1,09	1,10	0,27	0,3	0,15	0,15	0,42
9	0,87	0,90	0,20	0,25	0,15	0,15	0,25
10	0,81	0,85	0,18	0,2	0,15	0,15	0,16
11	1,45	1,45	0,40	0,45	0,15	0,15	1,13
12	1,45	1,45	0,40	0,45	0,15	0,15	1,13
13	1,45	1,45	0,40	0,45	0,15	0,15	1,13
14	1,45	1,45	0,40	0,45	0,15	0,15	1,13
15	1,45	1,45	0,40	0,45	0,15	0,15	1,13
16	1,09	1,10	0,27	0,3	0,15	0,15	0,42
17	1,45	1,45	0,40	0,45	0,15	0,15	1,13
18	1,78	1,80	0,50	0,55	0,18	0,2	2,11
19	1,41	1,45	0,38	0,4	0,15	0,15	0,95
20	1,96	2,00	0,57	0,6	0,20	0,2	2,74
21	2,71	2,75	0,82	0,85	0,28	0,3	7,76
22	3,81	3,85	1,19	1,2	0,40	0,4	21,58

Caso	f_{ck} [kN/m²]	f_{cd} [kN/m²]	u_0 [cm]	c [m]	Φ_{barra} [m]	d [m]	τ_{sd} [kN/m²]	τ_{Rd2} [kN/m²]	$\tau_{sd} > \tau_{Rd2}$?
1	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,24**	580,16	4339,29	***SIM***
2	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,39**	718,29	4339,29	***SIM***
3	25000	17857,14	2	0,05	0,0125	**0,39**	474,07	4339,29	***SIM***
4	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,54**	1040,29	4339,29	***SIM***
5	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,54**	520,14	4339,29	***SIM***
6	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,44**	637,36	4339,29	***SIM***
7	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,39**	718,29	4339,29	***SIM***
8	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,24**	1160,32	4339,29	***SIM***
9	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,19**	1459,76	4339,29	***SIM***
10	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,14**	1967,50	4339,29	***SIM***
11	15000	10714,29	0,88	0,05	0,0125	**0,39**	718,29	2719,29	***SIM***
12	20000	14285,71	0,88	0,05	0,0125	**0,39**	718,29	3548,57	***SIM***
13	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,39**	718,29	4339,29	***SIM***
14	30000	21428,57	0,88	0,05	0,0125	**0,39**	718,29	5091,43	***SIM***
15	35000	25000	0,88	0,05	0,0125	**0,39**	718,29	5805,00	***SIM***
16	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,24**	580,16	4339,29	***SIM***
17	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,39**	718,29	4339,29	***SIM***
18	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,49**	859,23	4339,29	***SIM***
19	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,34**	740,50	4339,29	***SIM***
20	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,54**	936,26	4339,29	***SIM***
21	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**0,79**	1282,75	4339,29	***SIM***
22	25000	17857,14	0,88	0,05	0,0125	**1,14**	1780,43	4339,29	***SIM***

Caso	T_x [kN]	T_y [kN]	A_{sx} [cm²]	A_{sy} [cm²]	VT [m³]	$m_{aço}$ [kg]
1	51,05	48,50	1,17	1,12	3,75	16,22
2	90,86	95,60	2,09	2,20	10,14	42,38
3	154,07	142,22	3,54	3,27	16,82	84,93
4	205,98	201,40	4,74	4,63	27,34	132,47
5	102,99	100,70	2,37	2,32	27,34	66,23
6	98,15	98,85	2,26	2,27	15,61	52,01
7	90,86	95,60	2,09	2,20	10,14	42,38
8	102,11	97,00	2,35	2,23	3,75	32,44
9	96,34	97,95	2,22	2,25	2,25	26,03
10	119,03	99,56	2,74	2,29	1,46	26,15
11	90,86	95,60	2,09	2,20	10,14	42,38
12	90,86	95,60	2,09	2,20	10,14	42,38
13	90,86	95,60	2,09	2,20	10,14	42,38
14	90,86	95,60	2,09	2,20	10,14	42,38
15	90,86	95,60	2,09	2,20	10,14	42,38
16	51,05	48,50	1,17	1,12	7,50	32,44
17	90,86	95,60	2,09	2,20	10,14	42,38
18	141,77	142,72	3,26	3,28	12,66	53,15
19	93,67	90,41	2,15	2,08	8,53	40,44
20	175,08	170,96	4,03	3,93	24,69	106,90
21	345,70	347,11	7,95	7,98	69,88	301,13
22	546,27	547,81	12,56	12,60	194,18	671,11