Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v.12, 2024
ISSN 2178-6925

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICO ECONÔMICA DE FUNDAÇÕES RASAS EM CASAS POPULARES NO MUNICÍPIO DE GURUPI-T0: ESTUDO DE CASO

Erica Vitoria dos Santos Alves
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1810-3561
Cursando Engenharia Civil, Universidade Publica – UnirG, Gurupi-TO
E-mail: ericavsalves@unirg.edu.br

José Carlos Frazão Merabet Júnior
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1215-8310
Professor de Engenharia Civil da Universidade de Gurupi – UnirG, Gurupi-TO
E-mail: jose_merabet@hotmail.com

Douglas Freitas Augusto dos Santos
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9306-5660
Professor do Instituto Federal do Tocantins - IFTO, Campus Gurupi-TO
E-mail: douglas.augusto@ifto.edu.br

Resumo

Com o aumento da expectativa de vida e da urbanização global, resolver crises locais de moradia se torna um dos desafios vitais, particularmente no Brasil, onde a construção de casas populares continua sendo um desafio significativo. Neste contexto, surgem projetos habitacionais modelos, cujos projetos são disponibilizados de forma gratuita nas plataformas online. No entanto, isso não exime a necessidade da reavaliação do projeto ao ser implementado em um determinado local, pois cada localidade terá seu próprio solo e demais condições ambientais, assim como suas próprias tendências construtivas regionais. No final, a escolha correta dos métodos construtivos acaba sendo determinante no orçamento final da residência. Desta forma, este trabalho avaliou a viabilidade técnico-econômica de fundações rasas sendo implementadas em residências populares em solos do município de Gurupi-TO. O estudo comparou os custos de implementação de fundações do tipo sapatas isoladas e radiers, analisando-as sob as perspectivas técnica e econômica, com base em dados obtidos a partir de sondagens geotécnicas do tipo SPT realizadas no local. A análise do radier foi feita pelo software Eberick AltoQi. Os resultados indicaram que a fundação por sapatas é mais econômica em relação aos radiers, sendo a necessidade das armaduras para punção do radier decisivas na comparação. Por outro lado, o radier, apesar de seu custo mais alto, tem um desempenho melhorado em solos fracos, justificando assim o investimento adicional em alguns

casos. Por fim, entende-se que mais dados são necessários para melhorar o dimensionamento de fundação do tipo radier e que o sucesso econômico de projetos de habitação de baixa renda pode, em parte, depender dessas boas práticas na construção, a começar pela fundação.
Palavras-chave: Sapata isolada; radier; orçamento; casa popular.

Abstract

With the increase in life expectancy and global urbanization, solving local housing crises has become one of the vital challenges, particularly in Brazil, where the construction of affordable housing remains a significant challenge. In this context, model housing projects emerge, with their designs made available for free on online platforms. However, this does not eliminate the need for reevaluation of the project when implemented in a specific location, as each site will have its own soil and environmental conditions, as well as its own regional construction trends. Ultimately, the correct choice of construction methods becomes a determining factor in the final budget of the residence. Thus, this study evaluated the technical and economic feasibility of shallow foundations being implemented in affordable housing on soils in the municipality of Gurupi-TO. The study compared the costs of implementing isolated footing and raft foundations, analyzing them from both technical and economic perspectives, based on data obtained from SPT geotechnical surveys conducted on-site. The analysis of the raft foundation was conducted using the Eberick AltoQi software. The results indicated that the footing foundation is more economical compared to the raft, with the need for reinforcement to prevent punching failure in the raft being decisive in the comparison. On the other hand, the raft, despite its higher cost, performs better in weak soils, justifying the additional investment in some cases. Finally, it is understood that more data is needed to improve the design of the raft foundation, and that the economic success of low-income housing projects may, in part, depend on these good construction practices, starting with the foundation.
Keywords: Isolated Footing; raft; budget; social housing.

1. Introdução

Nos últimos anos, em nível internacional, vem ocorrendo um aumento significativo na expectativa de vida humana para ambos os sexos devido às melhorias na sobrevivência, com isso, a população mundial que residia em áreas urbanas em 2024 era em cerca de 58% (ASSEMBLEIA GERAL DAS NAÇÕES UNIDAS, 2024). Em função desse aumento populacional nas áreas urbanas surgem novos problemas como o déficit populacional.

No Brasil, em 2017, esse número chega a 6.068.566, tendo uma queda em 2019 para 5.964.933 (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2023). Em busca de soluções para o problema habitacional, o governo brasileiro tem traçado, desde

2009, novos caminhos e estratégias, como o lançamento do programa Minha Casa Minha Vida, para melhorar a situação no país (SALTO *et al*., 2022).

Contudo, os problemas habitacionais no Brasil são em grande parte causados por questões orçamentárias, que afetam a construção de habitações adequadas às normas. A busca por reduzir custos leva ao uso de materiais de baixa qualidade, resultando em obras inadequadas. Em 2019, havia 11.176.790 residências com inadequação edilícia (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2023).

> Com isso, para Pinheiro e Crivelaro (2017) é crucial modificar esse cenário, pois uma habitação bem planejada e construída adequadamente traz inúmeros benefícios ao proprietário a longo prazo. Sendo assim, a engenharia é vista como a ponte entre a técnica e os recursos financeiros, visando maximizar a qualidade e a segurança na construção dentro das restrições orçamentárias.

Para Albuquerque (2020), a qualidade de uma construção começa pela base, ou seja, pela fundação. Os problemas enfrentados pelo engenheiro civil tendem a se agravar significativamente quando é necessário escavar abaixo da superfície do terreno. Embora construções acima do solo também possam apresentar desafios, é abaixo da superfície que esses problemas tendem a se multiplicar.

Portanto, a escolha da fundação deve considerar a análise técnica do solo, e o elemento estrutural de fundação, que deve ser capaz de transmitir a carga ao terreno, seja pela base, pelo fuste, ou por uma combinação de ambos (ALBUQUERQUE, 2020). Além de fatores econômicos, sociais e de mão de obra também devem ser levados em consideração.

Em residências populares, como as do programa Minha Casa Minha Vida, a ausência de lajes e as áreas construtivas menores resultam em cargas mais leves sobre as fundações. Por isso, torna-se comum não realizar estudos detalhados do solo, uma vez que esses estudos possuem um custo.

Além disso, devido às baixas cargas sobre as fundações, é comum o uso de fundações superficiais nesse tipo de residência. Segundo a NBR 6122 – PROJETO E EXECUÇÃO DE FUNDAÇÕES (ABNT NBR 6122:2022), fundações superficiais transmitem a carga ao terreno principalmente pela base, com profundidade de assentamento inferior ao dobro da menor dimensão da fundação. Exemplos

incluem sapatas, blocos, radier, sapatas associadas, vigas de fundação e sapatas corridas.

Ainda, segundo a ABNT NBR 6122:2022, sapatas isoladas são projetadas para que as tensões de tração sejam suportadas pela armadura e não pelo concreto, e são construídas diretamente dentro de uma escavação recebendo o carregamento de um pilar. Por outro lado, a fundação do tipo radier é feita de concreto armado como a sapata, porém construído sob o solo em formato de laje no qual abrange todos os pilares da obra ou carregamentos distribuídos.

Para escolher entre os dois tipos de fundações, Alonso (2019) recomenda levar em conta a proximidade dos edifícios limítrofes, bem como seu tipo de fundação e estado de conservação, a natureza e características do subsolo no local da obra, as grandezas das cargas a serem transmitidas à fundação e as limitações dos tipos de fundações existentes no mercado.

Sendo assim, a norma ABNT NBR 6122:2022, indica a implantação de radiers quando a área das sapatas cobre cerca de 70% da área construída, ou solo tem baixa capacidade de carga e o projeto exige uma alta carga ou há uma distribuição concentrada da mesma, além disso o radier pode ser empregado quando há presença de lençóis freáticos (ALONSO, 2019). Muitas vezes o radier flexível é adotado quando o projetista deseja que sua fundação tenha a capacidade de flexionar e adaptar com a movimentação do solo, diferentemente do radier rígido, que resiste a essa movimentação. E seu uso é mais adequado para solos problemáticos, enquanto o radier rígido é mais eficiente em solos uniformes e estáveis (ALBUQUERQUE, 2020). Outro ponto relevante é que esse tipo de fundação tem ganhado espaço no mercado em construções residenciais de pequeno porte, uma vez que vem sendo executado como forma de poupar o uso de revestimento de pisos, uma vez que sua execução já garante um bom desempenho.

Em contrapartida, a sapata isolada é adotada nas situações em que: o solo possui boa capacidade de suporte nas camadas superficiais; quando as cargas de projeto são baixas e; quando o terreno tem espaço para a construção dos elementos. Além disso, o fator econômico tem grande relevância em favor da

sapata isolada, sendo preferível para pequenas obras, com menor custo e tempo de execução em relação ao radier (ALONSO, 2019).

No mercado, a projeção de sapatas isoladas é mais empregada atualmente devido ao seu custo baixo e vantagens construtivas (GUIMARÃES, 2018). Porém algumas empresas de renome que atuam na área de projetos de fundação optam há escolher trabalharem com o radier flexível, por exemplo, a Empresa MonteFerro, localizada na região metropolitana de São Paulo, e atua no mercado desde 2011. Segundo a própria empresa, opta-se por fundação em radier para evitar recalques do solo, pois ela distribui as cargas da edificação de forma uniforme.

No entanto, o uso do radier flexível pode ocasionar futuramente patologias como a rachaduras se o concreto não for de alta qualidade ou se a armadura não for adequadamente projetada (ALONSO, 2019). Nesse contexto, faz-se necessário avaliar as limitações do emprego de cada uma delas em contextos regionais, pois a fundação é um componente do sistema estrutural que depende também das características geotécnicas locais.

A cidade de Gurupi, localizada no estado do Tocantins, é deficiente de estudos mais elaborados com relação ao assunto. Existe uma fundamentação empírica na cidade sobre o uso de sapatas e principalmente um déficit de estudos geotécnicos para caracterizar um modelo ideal de fundação para a cidade.

Face ao exposto, este trabalho tem como objetivo principal avaliar e comparar as diferenças técnico-econômicas entre fundações em sapatas rígidas e em radier, tendo como referência um projeto residencial de casas populares de um programa de habitação popular. Para isso, serão utilizados dados de Sondagem a Percussão (SPT) realizados no município de Gurupi no Tocantins, com a finalidade de verificar como eventuais soluções alternativas aplicadas aos alicerces dessas residências podem influenciar no desempenho técnico-econômico da estrutura, bem como apontar os cuidados necessários e suas limitações.

2. Referencial Teórico

2.1 Investigações geotécnicas

Os solos têm uma formação variada e complexa em relação ao comportamento diante das necessidades da engenharia, sendo agrupados em

diferentes categorias, cada uma com suas próprias características e propriedades. Assim, as investigações geológico-geotécnicas são estudos necessários que caracterizam o solo e a rocha para garantir a segurança e a estabilidade das construções (Guimarães, 2018).

Diante disto, existem diversos mecanismos e procedimentos utilizados para a verificação e inspeção do solo para fins geotécnicos. Entre eles, destacam-se diferentes tipos de sondagens, como CPT, Vane Test e SPT, sendo este último o método mais comumente empregado, (HACHICH, 1998).

O Standard Penetration Test (SPT), ou Teste Padrão de Penetração, é um ensaio de sondagem de solo amplamente utilizado para determinar a resistência mecânica do solo por meio da cravação de um amostrador-padrão. Durante o ensaio, obtém-se o Índice de Resistência à Penetração (N_{SPT}) para cada metro de solo, sendo o número de golpes correspondente à cravação de 30 cm do amostrador-padrão, após a cravação inicial de 15 cm, utilizando-se corda de sisal para levantamento de um martelo padronizado (ABNT NBR 6484:2020). A utilização do amostrador-padrão do tipo Raymond possibilita coletar amostras a cada metro de profundidade (ALBUQUERQUE, 2020).

2.2 Fundações

A fundação é um sistema formado pelo terreno e o elemento estrutural de fundação que transmite a carga da obra para o solo. Consequentemente, esta estrutura sofre recalque por conta de tensões introduzido pelo edifício, e todo acréscimo de tensões corresponde a uma deformação no solo, porém, o importante é que não sejam ultrapassados os recalques limites admissíveis de cada edificação, podendo, assim, suportar sem prejuízo pelo tempo previsto para tal utilização (Guimarães, 2018).

O presente trabalho abordará dois tipos de fundações rasas: a sapata isolada e o radier. A sapatas são elementos construídos em concreto armado, podendo ser rígidas, ou seja, exigindo apenas uma armadura mínima, ou flexíveis, onde se necessita de uma armadura que suportará as tensões de tração devido à flexão, além disso, elas podem ter diversas formas geométricas que são formadas pelas dimensões em planta e corte (Albuquerque, 2020).

A fundação do tipo radier é projetada para suportar e distribuir as cargas da estrutura através de uma grande área em forma de laje, cuja geometria pode ser ajustada para melhorar a rigidez. Em geral, são utilizadas quando a área das sapatas ocupa cerca de 70% da área coberta pela construção ou quando se deseja reduzir ao máximo os recalques diferenciais (ALONSO, 2019).

2.2.1 Dimensionamento de Sapatas

De acordo com Velloso e Lopes (2011) e Martins e Almeida (2015), o dimensionamento de fundações por sapata requer a integração de análises geotécnicas e estruturais para garantir a eficiência e segurança da fundação. Do ponto de vista geotécnico, é essencial realizar uma investigação adequada do solo, determinando propriedades como a capacidade de carga do solo e a tensão admissível.

Para estimar a tensão admissível, a ABNT NBR 6118:2023 recomenda alguns métodos, entre eles o ensaio de placa e os métodos semiempíricos. O ensaio de placa é um dos métodos mais diretos, no qual uma carga é aplicada sobre uma placa de dimensões conhecidas, e a deformação do solo sob a placa é monitorada para calcular a capacidade de carga e a tensão admissível. Entretanto, o ensaio de placa pode ser bastante oneroso, devido à necessidade de equipamentos especializados e à realização de medições precisas, o que torna esse método mais viável e justificado principalmente em grandes obras ou quando há dúvidas significativas sobre a capacidade de carga do solo (VELLOSO; LOPES, 2011).

Por isso, são frequentemente utilizados métodos semiempíricos, que se baseiam em correlações entre parâmetros geotécnicos e os resultados de testes de campo, como o SPT. Cintra *et al.* (2004) apresentaram as correlações para obter a tensão admissível para solos arenosos conforme a Equação 1 desenvolvida por Teixeira (1996). O conceito de tensão admissível está associado à tensão máxima permitida sobre o solo sem exceder a capacidade de segurança estabelecida

$$\sigma_{adm} = 50 + (10 + 4B) \cdot N_{SPT} \quad (1)$$

Onde: *B* é a menor dimensão em planta da fundação em m, e σ_{adm} é a tensão admissível em kPa.

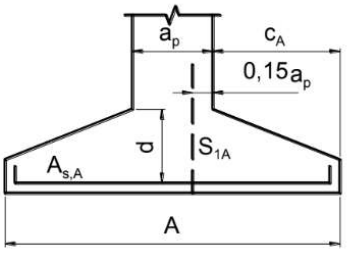
Também é possível utilizar a correlação indicada por Hachi (1998), em que a tensão admissível, em MPa, é obtida multiplicando o Nspt por 0,02, sendo válida para qualquer tipo de solo natural no intervalo 5 ≤ N ≤ 20. Ambos os autores utilizaram de dados experimentais para aprimorar as fórmulas teóricas, propondo fatores de correção adaptados a diferentes tipos de solo e condições de carga (CABETTE *et al.*, 2015).

Para o dimensionamento estrutural de sapatas, tem-se o Método CEB-70, desenvolvido pelo Comitê Europeu de Concreto. Conforme Bastos (2019), este método pode ser usado para o cálculo de sapatas e blocos sobre estacas.

De acordo com essa metodologia, as dimensões da sapata devem atender considerações geométricas, como a relação entre a altura da sapata (h) e os balanços na direção x e y (c_A e c_B) indicados na Figura 1, de forma que o balanço deve ser igual em ambos os lados, com verificação do lado B caso necessário. Na condição de $c_A > 2h$, a sapata pode ser considerada como viga ou como placa. Se o balanço for pequeno ($c_A < h/2$) em qualquer direção, é admitido que se trata de um bloco de fundação, e o método apresentado não é aplicável.

De acordo com Bastos (2019), os métodos de projeto de sapatas variam no tipo de seção utilizada para calcular os momentos fletores. No caso do método CEB-70, o momento fletor máximo é calculado em seções de referência dentro do pilar a 0,15 vezes a dimensão do pilar (A_P) de sua face. Como a sapata é modelada como uma viga em balanço, ela sofre um carregamento vertical resultante da reação do solo conforme Figura 1.

Figura 1: Seção de referência relativa à dimensão S_{1A} da sapata (Bastos, 2019).



Os momentos fletores relativos às seções de referência S_{1A} e S_{1B} são obtidos pelas equações 2 e 3:

$$M1A = p \,.\, \frac{xA^2}{2} .\, B \quad (2) \qquad \text{e} \qquad M1B = p.\frac{xB^2}{2} \,.\, A \quad (3)$$

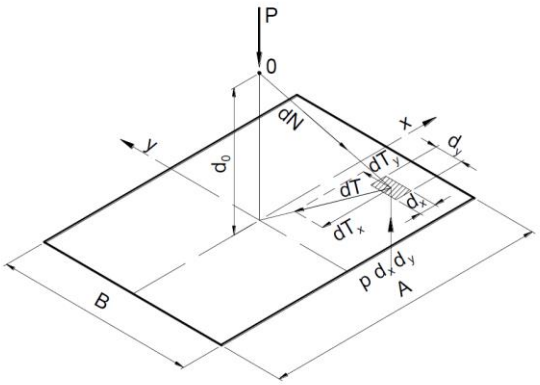
Segundo Bastos (2019), nas sapatas com superfícies superiores inclinadas, a seção comprimida de concreto (*A'c*) tem a forma de um trapézio e o cálculo exato das armaduras de flexão deve ter essa consideração. Como uma alternativa simplificada, Machado (1985) considera o cálculo admitindo uma seção retangular com braço de alavanca z = 0,85d, e que neste caso o erro cometido não ultrapassa 10%, e a área de armadura é obtido pela Equação 4:

$$As = \frac{Md}{0{,}85d \ . \ Fyd} \quad (4)$$

Além disso, para evitar problemas no preenchimento do concreto e fissuras, Bastos (2019) recomenda que o espaçamento entre as barras de armadura de flexão seja de 10 cm a 20 cm, com a armadura se estendendo por toda a sapata. Em sapatas quadradas, a armadura é distribuída uniformemente paralelamente aos lados, enquanto em sapatas retangulares, a armadura é distribuída de acordo com a largura menor da sapata, com critérios diferentes para a direção perpendicular.

O outro método para dimensionamento estrutural de sapatas é o de Bielas e Tirantes, em que, segundo Alonso (2019), a carga é transferida do pilar para a base da sapata por meio de bielas de concreto comprimido, induzindo tensões de tração na base da sapata, que devem ser resistidas pela armadura. A Figura 2 a seguir mostra as forças atuantes na sapata, de acordo com o método das bielas e tirantes.

Figura 2: Esquema de forças segundo o método das bielas



FONTE: BASTOS (2019)

2.2.2 Dimensionamento de Radier

De acordo com Santos e Brito (2000), o dimensionamento de um radier pode ser abordado de forma semelhante ao de uma laje sobre um meio elástico, onde o

comportamento do solo é modelado como um sistema de suportes. Para calcular as dimensões e os reforços necessários, diversos métodos podem ser utilizados, incluindo o método de placa sobre o solo de Winkler, que considera o solo como um conjunto de molas distribuídas, e o método do American Concrete Institute (ACI), amplamente adotado em projetos de fundações.

Outro método é o de elementos finitos (MEF), sendo uma ferramenta mais sofisticada e precisa, que é o foco de estudos mais recentes, permitindo uma análise detalhada das tensões e deformações do radier em resposta às cargas aplicadas (FARIA; ALMEIDA, 2011). Outros métodos, como o método estático e o método das diferenças finitas, também podem ser considerados, porém, devido às suas limitações na modelagem das interações solo-estrutura, não são frequentemente recomendados para o dimensionamento de fundações em radier (SOUZA; LIMA, 2008).

Para aplicar esses métodos, é comum o emprego de softwares como o Eberick, que é amplamente utilizado para o dimensionamento de estruturas de concreto armado, incluindo o dimensionamento de fundações como radier.

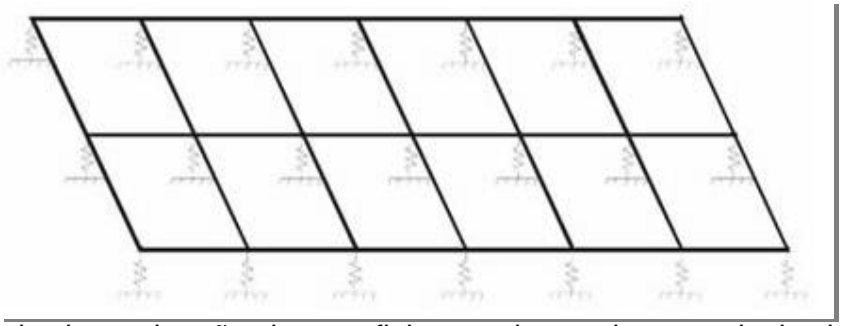
No caso do dimensionamento de fundações por radier, o Eberick modela o solo como um meio elástico, utilizando as propriedades do terreno para simular a interação solo-estrutura, em que a placa é substituída por uma malha sobre apoios elásticos equivalentes. Para modelar o comportamento do solo, utiliza-se a hipótese de Winkler, que considerada o solo análogo a um conjunto de molas (Figura 4) distribuídas continuamente ao longo da superfície do elemento, e as pressões de contato são proporcionais aos recalques, até ser atingida a pressão que leva a plastificação do solo (Suporte Alto QI Eberick, 2024).

A pressão de contato (p_s) em um ponto qualquer no interior do elemento de placa será calculada pela seguinte expressão:

$$p_S = k_v . d \quad (5)$$

Onde: k_V é o coeficiente de reação vertical do terreno, e d a deflexão vertical no ponto considerado.

Figura 4: Elementos da placa sobre apoio elástico. Fonte: Suporte Alto QI Eberick, 2024.



A adequada determinação dos coeficientes de recalque vertical e horizontal do solo é de extrema importância para que se obtenha um modelo compatível ao real da obra, pois estes valores interferem diretamente no comportamento da estrutura. Assim, valores inadequados poderão gerar um dimensionamento também inadequado e, portanto, gerar problemas estruturais em virtude de o modelo analisado não estar condizente com a situação real de obra (Suporte Alto QI Eberick, 2024).

O software permite a consideração das cargas da edificação, distribuídas por meio dos pilares, e realiza a análise das tensões e deformações da laje radier, verificando a necessidade de reforço e ajustando a espessura e a distribuição das armaduras. Além disso, o Eberick calcula os recalques e possíveis deslocamentos diferenciais, garantindo que a fundação atenda aos requisitos de estabilidade e segurança.

Velloso e Lopes (2011) destacam a importância de uma análise rigorosa no dimensionamento da armadura contra puncionamento, especialmente em fundações radier. De acordo com os autores, a aplicação de cargas concentradas, como as geradas pelos pilares, pode levar à formação de tensões críticas no concreto, exigindo um reforço adequado em torno dessas áreas de contato. Eles ressaltam que a armadura de puncionamento, muitas vezes composta por estribos mais próximos e malhas adicionais, é essencial para garantir a resistência do concreto contra essas tensões localizadas e evitar a falha do elemento de fundação.

No contexto do radier, além da armadura convencional para resistência a esforços de flexão e cisalhamento, o Eberick também permite o dimensionamento da armadura contra puncionamento, que é essencial para evitar o colapso local do concreto sob as áreas de aplicação de carga concentrada, como os pilares. O

puncionamento ocorre quando uma carga excessiva é transmitida por um pilar, causando a ruptura do concreto no ponto de contato entre a fundação e o pilar.

Para prevenir esse tipo de falha, o Eberick dimensiona a armadura de puncionamento, distribuída ao redor dos pilares, de forma a reforçar a área de contato, com estribos e malhas adicionais. O software calcula o reforço necessário para garantir que as tensões de puncionamento sejam adequadamente distribuídas e que a fundação resista às cargas sem risco de colapso local.

2.4 Estimativa de Custos

Na engenharia civil o orçamento é essencial para planejar, controlar e monitorar os custos de um projeto, garantindo que os recursos sejam utilizados de forma eficiente e dentro do orçamento previsto. Assegurando a viabilidade financeira, facilitando a gestão de riscos e permitindo ajustes rápidos em caso de desvios. Além disso, auxilia na negociação com fornecedores e na tomada de decisões estratégicas (CARVALHO, 2019).

Como isso a estimativa de custos pode ser feita usando diferentes métodos baseados em dados históricos, como o Custo Unitário Básico (CUB), o Sistema Nacional de Índices e Preços da Construção (SINAPI), o Custo Unitário Geométrico (CUG), regressão, Raciocínio Baseado em Casos (RBC) e Redes Neurais Artificiais (RNAS). Como os dois primeiros são bastante usados na construção no Brasil, vamos detalhá-los a seguir, (CARVALHO, 2019).

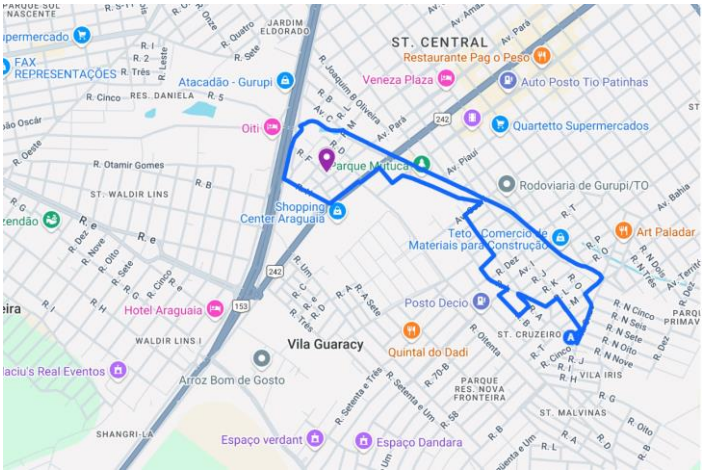
3. Metodologia

A metodologia deste trabalho foi sequenciada na seguinte ordem: Levantamento de dados de geotécnicos, definição do referencial de projeto estrutural para o levantamento das cargas de projeto, dimensionamento geotécnico e estrutural das fundações por sapatas e por radier, e estimativa de custos para implementação das fundações utilizadas.

3.1 Área de Estudo e Parâmetros Geotécnicos

Para realizar o dimensionamento das estruturas de fundação, foram utilizados dados de 4 sondagens do tipo STP realizadas no Setor União V do município de Gurupi-TO, conforme ilustra o mapa de localização na Figura 5.

Figura 5: Mapa do Setor União V em Gurupi no Tocantins -11.732933129371558, -49.07801507589887. Fonte: Google Maps.



Estes dados foram obtidos pelo portal transparência GOV do Município de Gurupi e estão disponíveis na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados de sondagens realizado no *Setor União V*

1° FURO			2° FURO			3° FURO			4° FURO		
AMOSTRA	PROF. (M)	NSPT 30CM FINAIS	AMOSTRA	PROF. (M)	NSPT 30CM FINAIS	AMOSTRA	PROF. (M)	NSPT 30CM FINAIS	AMOSTRA	PROF. (M)	NSPT 30CM FINAIS
0	-1		0	-1		0	-1		0	-1	
1	-1,45	6	1	-1,45	4	1	-1,45	6	1	-1,45	6
2	-2,45	9	2	-2,45	7	2	-2,45	9	2	-2,45	7
3	-3,45	10	3	-3,45	11	3	-3,45	10	3	-3,45	12
4	-4,45	13	4	-4,45	10	4	-4,45	10	4	-4,45	11e
5	-5,45	7	5	-5,45	8	5	-5,45	6	5	-5,45	8
6	-6,45	2	6	-6,45	4	6	-6,45	6	6	-6,45	4
7	-7,45	2	7	-7,45	8	7	-7,45	9	7	-7,45	8
8	-8,45	22	8	-8,45	10	8	-8,45	30	8	-8,45	17
9	-9,34	38/19	9	-9,29	30/14	9	-9,28	28/13	9	-9,28	32
10	10,1		10	-10,1		10	-10,1		10	-10,1	32/18
11	-11,1		11	-11,1		11	-11,05		11	-11,05	22/13

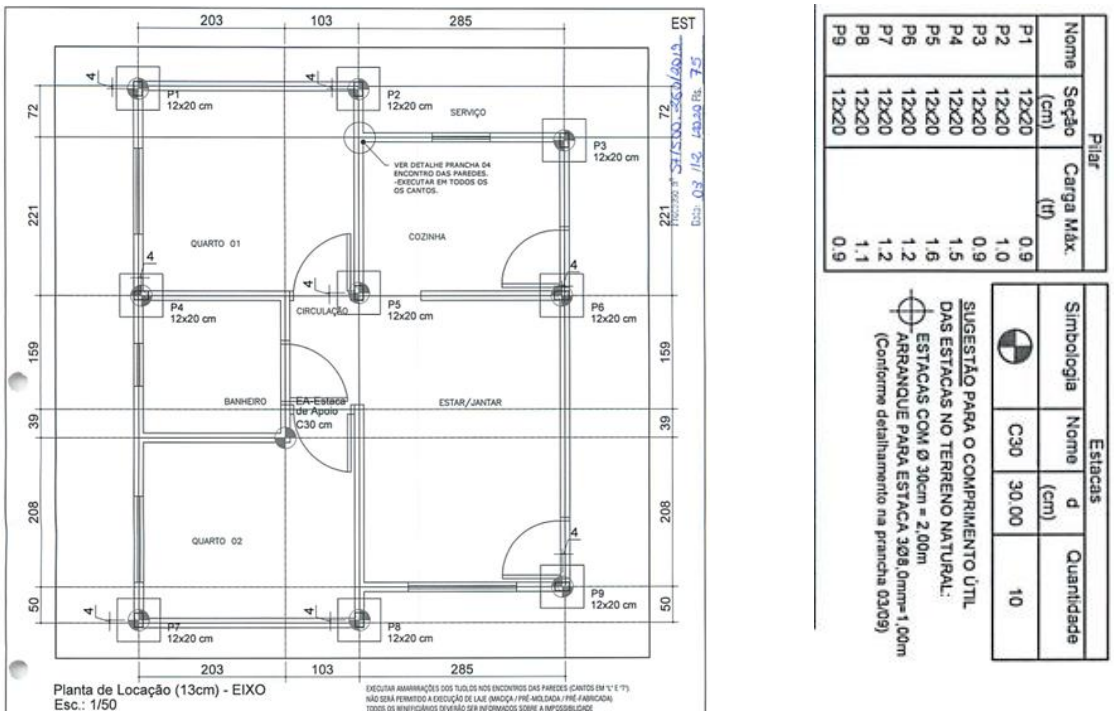
FONTE: Adaptado do lado obtido em Site da Prefeitura do Município de Gurupi < https://transparencia.gurupi.to.gov.br/transparencia/mapa>

A marca em azul na Tabela 1 indica que o nível do lençol freático está situado a 6,45 m de profundidade e que as amostras caracterizam o material como areia grossa siltosa vermelha, ou seja, um solo arenoso-siltoso. Esses resultados são comuns para outras regiões do município de com acordo com os demais laudos de sondagens disponibilizados pela prefeitura local e órgãos públicos. Segundo a ABNT NBR 6484:2020, trata-se de um solo que, devido à sua composição, tende a apresentar valores de N relativamente elevados no SPT, indicando uma boa resistência e capacidade de carga, no entanto, seu comportamento pode ser influenciado pela presença de silte, o que pode modificar ligeiramente suas características de compactação e permeabilidade.

3.2 Projeto Estrutural

Para realizar o dimensionamento das fundações foi utilizado como referência o projeto estrutural disponibilizado pelo programa de habitação popular do Estado do Mato Grosso do Sul – AGEHAB, conforme mostra a Figura 6. Os pilares, de acordo com o projeto, têm dimensão de 12 x 20 cm, com armadura longitudinal de bitola 8 mm, e a viga baldrame com dimensões de 30 x 12 cm.

Figura 6: Projeto Estrutural completo de uma Moradia Popular de MS



Fonte:https://www.agehab.ms.gov.br/wp-content/uploads/2021/05/Projeto-Estrutural-Franklin-01-a-09.pdf

Ressalta-se que no projeto estavam previstas fundações por estacas manuais de 2 m e diâmetro de 30 cm sob blocos de coroamento, com requisito de pressão admissível do solo superior a 0,40 kgf/cm².

3.3 Dimensionamento por Sapatas

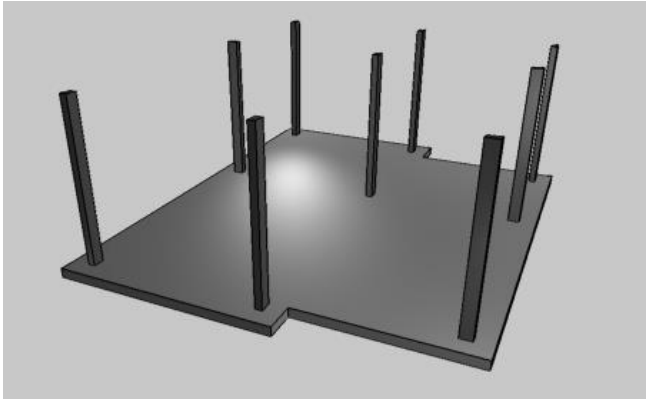
Para o dimensionamento da fundação por sapatas isoladas foram consideradas as cargas dos pilares determinadas no projeto estrutural de referência, cuja faixa de valores varia de 0,9 a 1,6 ton. A cota de assentamento considerado foi de 1,5 m. A altura da sapata foi dimensionada para que a sapata seja considerada rígida. A classe de agressividade considerada foi de nível 3, conforme ABNT NBR 6118:2023, para elementos estruturais em contato com o solo, o que requer um cobrimento nominal de 4 cm, enquanto a classe de concreto utilizada foi C20, o mesmo estabelecido para os pilares.

Para o dimensionamento geotécnico foram utilizadas as correlações semiempíricas sugeridas por Hachich (1998) e Cintra *et al.* (2004) descritas no Item 2.2.1. O dimensionamento e o detalhamento estrutural foram realizados pelos Método CEI e Bielas e Tirantes, além de seguir as recomendações normativas da ABNT NBR 6118:2023 e ABNT NBR 6122:2022.

3.4 Dimensionamento por Radier

O dimensionamento da fundação por radier foi realizado com o auxílio do software AltoQi Eberick. No lançamento da estrutura (Figura 7) para a fundação em radier foram consideradas as cargas dos pilares fornecidas pelo projeto estrutural.

Figura 7: Lançamento da estrutura para o dimensionamento da fundação por radier.



A borda de contorno considerada para o radier foi de 30 cm, calculada para evitar que a área de influência dos pilares alcance os limites da laje considerada. A espessura de partida para as análises foi de 16 cm, que é a mínima da espessura estabelecida pela NBR 6118 (ABNT, 2023). A classe do concreto foi de C-25 para um cobrimento mínimo de 4 cm.

A malha considerada foi de 10 x 10 cm para fazer com que os pilares coincidam com os nós da malha que o programa simula.

O coeficiente de recalque vertical do solo K_v considerado foi de 1,93 kgf/cm³, obtido a partir da tabela 2 oposta (Morrison, 1993), que correlaciona o K_v com a tensão admissível do solo de apoio para o radier.

TABELA 2: Correlação entre resistência do solo e kv

Tensão admissível (Kgf/cm³)	Kv (Kgf/cm³)	Tensão admissível (Kgf/cm³)	Kv (Kgf/cm³)
0,25	0,65	1,15	2,47
0,3	0,78	1,20	2,56
0,35	0,91	1,25	2,65
0,4	1,04	1,30	2,74
0,45	1,17	1,35	2,83
0,5	1,3	1,40	2,91
0,55	1,39	1,45	3,01
0,6	1,48	1,5	3,10
0,65	1,57	1,55	3,19
0,70	1,66	1,60	3,28
0,75	1,75	1,65	3,37
0,8	1,84	1,7	3,46
0,85	1,93	1,75	3,55
0,9	2,02	1,80	3,64
0,95	2,11	1,85	3,73
1,00	2,20	1,90	3,82
1,05	2,29	1,95	3,91
1,10	2,38	2,00	4,00

Fonnte: Adaptado de (MORRISON, 1993).

O coeficiente de recalque horizontal do solo K_h foi calculado a partir da correlação entre o coeficiente de Poisson e o coeficiente de recalque vertical do solo, por meio da equação (6) (MORRISON, 1993):

$$k_h = v \,.\, k_v \quad (6)$$

Para o solo arenoso-siltoso da área de estudo foi considerado um coeficiente de Poisson de 0,3, conforme recomendações de Ortigão (1994). Para esse valor, o k_h considerado foi de 0,579 kgf/cm³.

3.5 Levantamento de materiais e Orçamentos

Após o dimensionamento das sapatas e do radier, fez-se o quantitativo de materiais, o qual é fornecido pelo próprio programa no caso do radier. Com os quantitativos de materiais em mãos, é realizado o orçamento, de acordo com as tabelas e preços da SINAPI TOCANTINS EDIFICAÇÕES, do mês de setembro de ano de 2024. Para ambos os orçamentos foram usados valores totais de aço, concreto, de formas e de escavações. Para as sapatas, foi somada às quantidades de materiais.

A sequência de execução para as duas fundações é semelhante: para as sapatas têm-se as escavações com posterior colocação das formas, lançamento do lastro de concreto, posicionamento das armaduras e, por fim, o concreto, seu lançamento e adensamento. Já para o radier, a sequência é o apiloamento do solo, execução das fôrmas, lançamento do lastro de brita, posicionamento das armaduras, a fabricação do concreto, seu lançamento e adensamento.

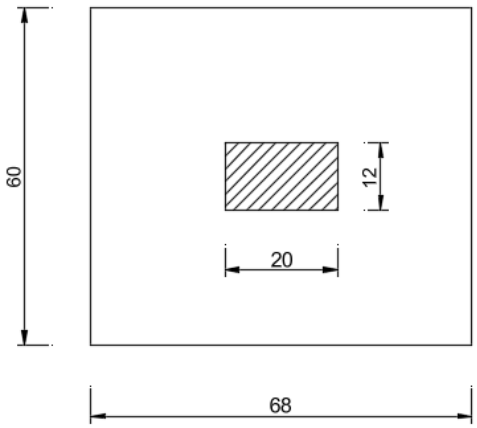
4. Resultados e Discussão

4.1 Fundações por Sapatas Isoladas - Dimensionamento

A tensão admissível média de acordo com os métodos de Hachi (1998) e Cintra *et al*. (2004) foi de 1,55 kgf/cm². Para essa tensão admissível, as áreas das sapatas (considerando uma majoração de carga de 5% devido ao peso próprio) para os pilares de maior e menor carregamento, respectivamente, foram de 0,108 m² e 0,06 m². Em ambos os casos, as dimensões das sapatas foram inferiores a 60 cm, que é a dimensão mínima recomendada pela ABNT NBR 6122:2022.

Nesse caso, adotou-se sapata retangulares para seguir igualar os balanços c_a e c_b, conforma mostra a Figura 7.

Figura 7: Medidas de sapata



Fonte: Elaborada pelos autores.

A altura da sapata, supondo-a como rígida conforme a ABNT NBR 6118:2023 deve possuir altura de 16 cm, com a altura útil de 12 cm (d). No entanto, para garantir a ancoragem da armadura longitudinal do pilar dentro do volume da sapata, a altura útil, deve ser superior ao comprimento de ancoragem (*lb*) da armadura do pilar (*d* > *lb*). O comprimento de ancoragem, considerando região de boa aderência, concreto C20, ϕ = 8 mm, requer *lb* de 26 cm, adotando-se, portanto, uma altura de 30 cm.

Para o dimensionamento segundo o método CEB-70, Bastos (2019) diz que, as cargas relativas ao peso próprio da sapata e do solo sobre a sapata não necessitam ser consideradas no cálculo do momento fletor, pois são transferidas diretamente ao solo, sem causar flexão na sapata, logo, a pressão exercida pela sapata sobre o solo foi de 0,0549 kN/cm². Verificando as condições geométricas da sapata a mesma satisfaz os limites determinados pelo método CEB-70.

Os momentos fletores nas seções de referência S_{1A} e S_{1B} (equações 2 e 3), obtidos foram de e $M_{1A} = 120\ kN.cm$ e $M_{1B} = 124,25\ kN.cm$. Com isso, as armaduras de flexão segundo os lados A e B da sapata, considerando f_{yd} = 43,48 kN/cm² para o aço CA-50, são de $A_{S,A}$ = 0,135 cm² e $A_{S,B}$ = 0,14 cm², respectivamente, conforme a Equação 4.

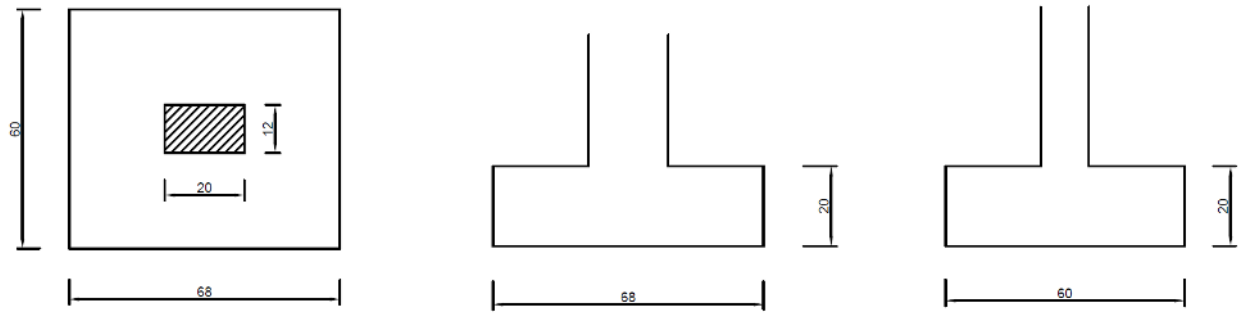
Para o dimensionamento segundo o método Bielas e Tirantes, considerando somente a direção x, determinou-se a força de tração na base da sapata, sendo

4 kN. A área de aço para responder à flexão obtida foi de 0,124 cm², valor próximo ao obtido pela metodologia CEB-70.

A ABNT NBR 6118:2023 não especifica uma armadura mínima de flexão para as sapatas. De acordo com Bastos (2019), alguns autores aplicam a armadura mínima especificada pela norma para as vigas, o que geralmente resulta armadura mínima maior que a calculada no caso das sapatas rígidas, devido à sua grande altura. Em resumo, recomendam armaduras mínimas de $0{,}0018b_wd$ ou $0{,}0020b_wd$, dependendo do tipo de aço. Neste caso, optou-se por aplicar essas recomendações para as sapatas em análise, obtendo-se, portanto, uma armadura mínima de 2,6 cm², sendo a recomendação mais conservadora. Desta forma, foi adotado uma bitola de 8 milímetros para seguir as recomendações de espaçamento entre 10 e 20 cm, conforme Bastos (2019). O detalhamento pode ser visualizado nas Figura 8 e 9.

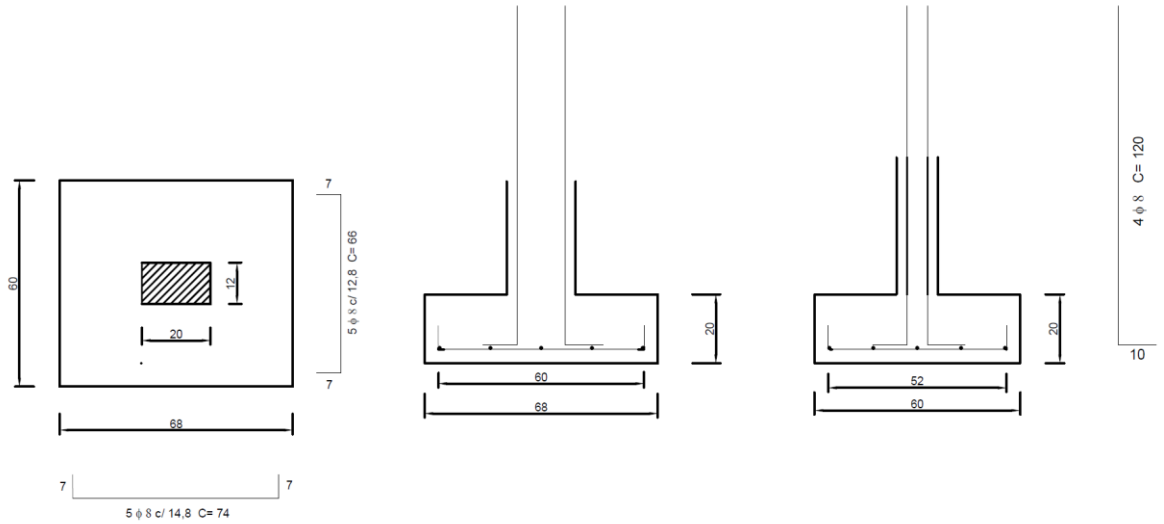
Verificou-se também que não irá ocorrer o esmagamento do concreto na diagonal comprimida, pois a tensão cisalhamento atuante é inferior à tensão de cisalhamento resistente. Em relação à punção, como a sapata é rígida, não ocorre a ruptura por punção, por isso basta verificar a tensão na diagonal de compressão, na superfície crítica.

Figura 8: Dimensionamento da sapata



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 9: Armadura da sapata



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Fundações por Sapatas Isoladas - Orçamento

Para fins de orçamento, o projeto conta com 9 sapatas com as dimensões de 68 x 60 cm, altura de 30 centímetros e profundidade de escavação de 1,5 m. Além disso, também foram consideradas as vigas baldrames. Os valores de orçamento obtidos pela tabela SINAPI-TO/2024 estão disponíveis na Tabela 3.

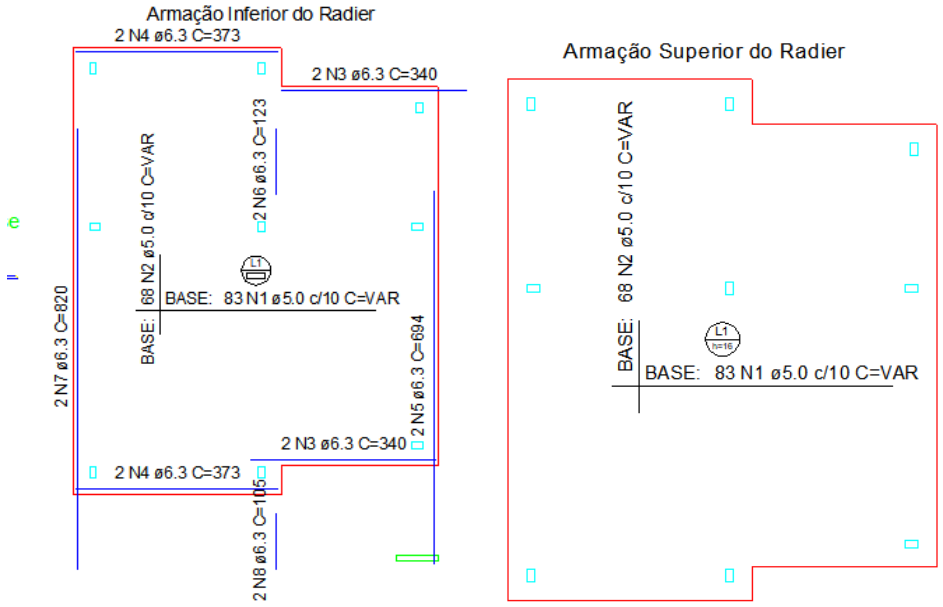
TABELA 3: Estimativa de custo para sapatas do projeto. Fonte: Elaborado pelos autores.

DESCRIÇÃO DA COMPOSIÇÃO	UN.	**QUANTITATIVO**	**CUSTO UNITARIO (R$)**	**CUSTO TOTAL (R$)**
ESCAVAÇÃO MANUAL DE VALA.	m^3	123,57	73,81	9.120,32
LASTRO DE CONCRETO MAGRO, APLICADO EM BLOCOS DE COROAMENTO OU SAPATAS, ESPESSURA DE 5 CM.	m^3	0,16	41,69	6,74
ARMAÇÃO DE SAPATA ISOLADA, VIGA BALDRAME E SAPATA CORRIDA UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 8 MM - MONTAGEM.	kg	195,02	14,62	2.851,19
CONCRETO FCK = 20MPA, TRAÇO 1:2,6:2,9 (EM MASSA SECA DE CIMENTO/ AREIA MÉDIA/ SEIXO ROLADO) - PREPARO MECÂNICO COM BETONEIRA 400 L.	m^3	3,17	539,70	1.692,97
FABRICAÇÃO, MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA PARA SAPATA, EM MADEIRA SERRADA, E=25 MM, 1 UTILIZAÇÃO	m^2	17,5	256,96	4.496,00
			Total:	18.167,22

4.3 Fundações por Radier – Dimensionamento

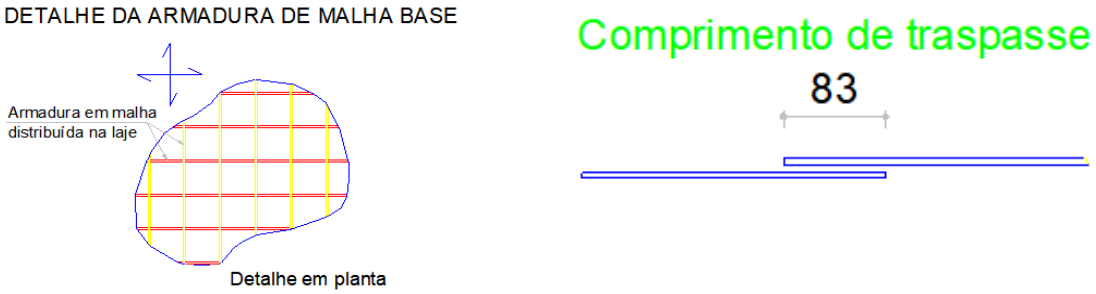
As Figuras 10 e 11 a seguir apresentam os resultados do detalhamento das armaduras inferiores e superiores em formato de malha obtidos pela análise do software Eberick.

Figura 10: Detalhamento das armaduras inferior e superior do radier.



FONTE: Software Eberick.

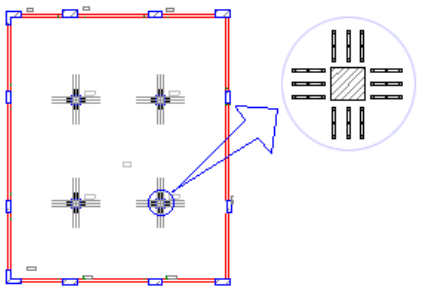
Figura 11: Detalhamento Da Armadura De Malha De Base



FONTE: Software Eberick.

O software também disponibiliza as armaduras de punção no encontro entre pilares e o radier, sendo esta etapa crucial para a segurança da estrutura. A Figura 12 e 13 ilustram de forma representativa do esquema de armadura de punção e o quantitativo de aço a ser utilizado. Enquanto a Tabela 4 apresenta o quantitativo dos conectores para a armadura de punção.

Figura 12: Quantitativo de aço



RELAÇÃO DO AÇO

Punção

AÇO	N	DIAM (mm)	QUANT	C.UNIT (cm)	C.TOTAL (cm)
CA50	1	10.0	16	166	2656
	2	10.0	10	158	1580
	3	10.0	2	158	316
	4	10.0	6	173	1038
	5	10.0	2	181	362

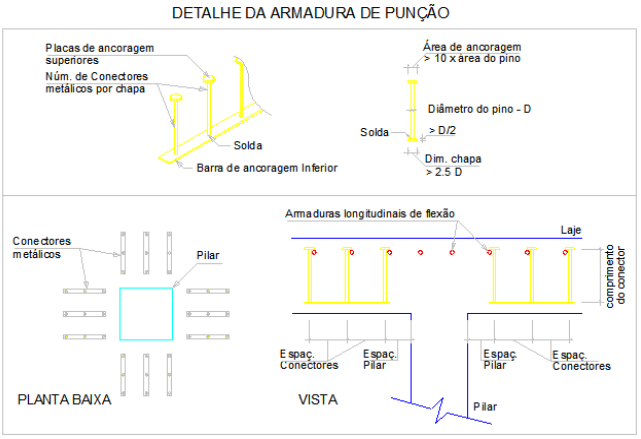
RESUMO DO AÇO

AÇO	DIAM (mm)	C.TOTAL (m)	PESO + 10% (kg)
CA50	10.0	59.5	40.4

PESO TOTAL (kg)	
CA50	40.4

FONTE: Adaptado do Software Alto QI Eberick.

Figura 13: Detalhamento da armadura de punção e seus conectores.



FONTE: Software Alto QI Eberick

Tabela 4 - Quantitativo dos conectores da armadura de punção.

ARMADURA DE PUNÇÃO									
Conjunto	Quant.	Dim. chapa (cm)	Característica dos conectores						
			Aço	Diam. (mm)	Comp. (cm)	Espaç. Pilar (cm)	Espaç. Conectores (cm)	Quant. por chapa	Quant. total
1	46	19.2x3.2	CA50	8.0	9.0	5	8	3	138

FONTE: Elaborado pelos autores

4.4 Fundações por Radier – Orçamento

De acordo com a tabela SINAPI-TO/2024, obteve-se o orçamento disponível na Tabela 5 para o radier.

TABELA 5: Estimativa de radier do projeto

DESCRIÇÃO DA COMPOSIÇÃO	UN.	QUANTITATIVO	CUSTO UNITARIO (R$)	CUSTO TOTAL (R$)

ESCAVAÇÃO MANUAL DE VIGA DE BORDA PARA RADIER.	m^3	12,6	226,85	2.858,31
LASTRO COM MATERIAL GRANULAR, APLICADO EM PISOS OU LAJES SOBRE SOLO, ESPESSURA DE *5 CM*.	M³	12,6	275,75	3.474,45
ARMAÇÃO DE LAJE DE ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO AÇO CA-60 DE 5,0 MM	KG	263,4	13,73	3.616,48
ARMAÇÃO DE LAJE DE ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 10,0 MM	kg	40,4	11,18	451,67
ARMAÇÃO DE LAJE DE ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 6,3 MM	kg	8,64	13,14	224,69
CONCRETO FCK = 25MPA, TRAÇO 1:2,3:2,7 (EM MASSA SECA DE CIMENTO/ AREIA MÉDIA/ BRITA 1) - PREPARO MECÂNICO COM BETONEIRA 400 L	m^3	8,32	575,12	4.784,99
FABRICAÇÃO, MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA PARA VIGA BALDRAME, EM MADEIRA SERRADA, E=25 MM, 1 UTILIZAÇÃO.	m^2	42	150,81	6.334,02
			Total:	21.744,62

FONTE: Elaborado pelos autores

4.5 Comparativo técnico-econômico

Através das tabelas 3 e 5 a diferença de execução entre as duas fundações e de R$ 3.577,41. Isso indica que para a execução do projeto neste local a opção que será viável economicamente são as sapatas isoladas. Este resultado já era previsto devido ao entendimento que o radier precisará de um maior consumo de materiais, principalmente se tratando das armaduras e do consumo de concreto. Apesar de ser uma solução estrutural robusta e adequada para certas condições de solo, essas necessidades adicionais resultam em um custo mais elevado em comparação com as sapatas isoladas (Guimarães, 2018). No entanto, a depender dos critérios estabelecidos pelo cliente, o radier pode ser polido e se tornar um piso industrial, muito utilizado pela indústria e na arquitetura de alto padrão, o que poderia significar uma grande economia em relação às fundações por sapatas.

Construir com radier pode impactar significativamente o orçamento, no qual o consumo de materiais, como concreto e aço são maiores para atender aos critérios de segurança, embora os processos de escavação e preparação sejam menos onerosos. Além disso, há a necessidade de lastro com material granular, que adiciona mais um custo ao orçamento total.

5. Conclusão

Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que, para a área de estudo analisada na cidade de Gurupi, no estado do Tocantins, a adoção de um modelo de habitação popular demandaria, do ponto de vista técnico e econômico, a utilização de fundação do tipo sapata isolada como a solução mais adequada. Embora o mercado esteja explorando novas tecnologias construtivas, como o uso de radier em pequenas construções, esses métodos ainda necessitam de uma investigação mais aprofundada, dado que não há, até o momento, estudos suficientes que comprovem sua viabilidade a longo prazo. O fato de o Brasil não ter uma norma regulamentadora para o dimensionamento de radiers pode implicar na subestimação ou superdimensionamento dos resultados devido à falta de critérios para determinação dos parâmetros de projeto.

Referências

ALBUQUERQUE, Paulo José Rocha de. Engenharia de Fundações. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2020. E-book. ISBN 9788521636977.

ALONSO, Urbano R. Exercícios de Fundações. São Paulo: Editora Blucher, 2019. E-book. ISBN 9788521213857.

ALONSO, Urbano R. Previsão e controle das fundações. São Paulo: Editora Blucher, 2019. E-book. ISBN 9788521213895.

Alto QI Eberick: Suporte Técnico: Dimensionamento de laje de fundação tipo radier. Disponível em: https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/360037896274

ASSEMBLEIA GERAL DAS NAÇÕES UNIDAS, ONU News. População mundial chegará a 9,9 bilhões em 2054. 2024. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2024/04/1830966>. Acesso em: 18 Nov. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto -Procedimentos. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. NBR 6122. Rio de Janeiro, 2022.

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

BASTOS, P. S. S. SAPATAS DE FUNDAÇÃO. UNESP / Faculdade de Engenharia Civil: 2019.

BENTO, Mahmod A. Issa/. Agência de Habitação Popular do Estado de Mato Grosso do Sul. AGEHAB. Disponível em: <https://www.agehab.ms.gov.br/>. Acesso em: 27 Oct. 2024.

CABETTE, J.; HELOISA, H.; MARINHO, F. Métodos semiempíricos versus ensaios de carregamento dinâmico em estacas. Geotecnia (Lisboa), v. 135, n. 135, p. 89–113, 2015.

CARVALHO, Michele. Conhecendo o Orçamento de Obras. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2019. E-book. p.14. ISBN 9788595150768.

CINTRA, J. C., AOKI, N. E ALBIEIRO, J. H. (2004) Fundações Superficiais: Projeto Geotécnico, 2. ed., Oficina de Textos, São Paulo

FARIA, J.; ALMEIDA, R. (2011). *Métodos Numéricos no Dimensionamento de Fundações*. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Déficit habitacional no Brasil. Belo Horizonte, 2017. GUIMARÃES, Diego. Fundações. Porto Alegre: Grupo A, 2018. E-book. ISBN 9788595023536.

HACHICH, F. *Fundação de Edificações: Conceitos e Aplicações*. São Paulo:

Editora Oficina de Textos, 1998.

MACHADO, C.P. Edifícios de Concreto Armado – Fundações. São Paulo, FDTE, EPUSP, nov. 1985, p.11.31-11.33.

MARTINS, J. P.; ALMEIDA, R. (2015). *Manual de Fundações*. São Paulo: Blucher.
MONTEFERRO. Ferragem Armada. Monteferro. Disponível em: <https://www.montaferro.com.br/>. Acesso em: 7 Sep. 2024.

Morrison, N. (1993). Interacción suelo-estructuras: semi-espaço de winkler. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

PINHEIRO, Antonio Carlos da Fonseca B.; CRIVELARO, Marcos. Qualidade na Construção Civil. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2014. E-book. ISBN 9788536518787.

SALTO, Felipe; VILLAVERDE, João; KARPUSKA, Laura. Série IDP - Reconstrução: o Brasil nos anos 20. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2022. *E-book.* ISBN 9786553623064.

SANTOS, J. R.; BRITO, J. Ensoleiramentos gerais e grelhas de fundação. 49f. Notas de aula da cadeira de construção de edifícios do curso de mestrado avançado em construção e reabilitação. Instituto superior técnico – Universidade de Lisboa, 2000.

SOUZA, M.; LIMA, P. (2008). *Fundação e Solos: Teoria e Prática*. São Paulo: Editora Érica, 2008.

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

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Resende. Fundações:

Critérios de Projeto – Investigação de Subsolo – Fundações. Volume Único. 1ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.