



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ÍTALO BRUNO RODRIGUES FELÍCIO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS ENTRE A FUNDAÇÃO RADIER E
SAPATA PARA CONSTRUÇÃO DE UMA RESIDÊNCIA EM MOSSORO - RN**

MOSSORÓ – RN

2020

ÍTALO BRUNO RODRIGUES FELÍCIO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS ENTRE A FUNDAÇÃO RADIER E
SAPATA PARA CONSTRUÇÃO DE UMA RESIDÊNCIA EM MOSSORO - RN**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-árido – UFERSA,
Centro de Engenharias para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Francisco Alves da Silva
Junior, Prof. Dr.

MOSSORÓ – RN

2020

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F314a Felício, Ítalo Bruno Rodrigues.
Análise comparativa de custos entre a fundação
radier e sapata para construção de uma residência
em Mossoró - RN / Ítalo Bruno Rodrigues Felício. -
2020.
73 f. : il.

Orientador: Francisco Alves da Silva Junior.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2020.

1. Fundações rasas. 2. Sapata. 3. Radier. 4.
Economia. 5. Segurança. I. Alves da Silva Junior,
Francisco, orient. II. Título.

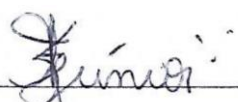
ÍTALO BRUNO RODRIGUES FELÍCIO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS ENTRE A FUNDAÇÃO RADIER E
SAPATA PARA CONSTRUÇÃO DE UMA RESIDÊNCIA EM MOSSORO - RN**

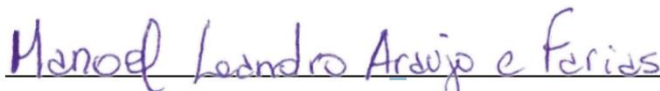
Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-árido – UFERSA,
Centro de Engenharias para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 10/12/2020

BANCA EXAMINADORA



Francisco Alves da Silva Junior, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Manoel Leandro Araújo e Farias, Me.
Membro Examinador



Felipe Augusto Dantas de Oliveira, Eng. Civil.
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Jeová, por seu infinito amor, pelas oportunidades dadas a mim durante toda a minha vida, e principalmente, pela dádiva da vida.

A minha mãe, Maria Rodrigues da Silva por ser essa mulher forte, batalhadora que me ensina a extrair o melhor de mim. Por ter me dado todo o amor incondicional, carinho, conselhos, lições de vida e a educação necessária para formar o caráter que tenho hoje.

A minha amada irmã, Maria Rita Rodrigues Pinheiro por ser a melhor irmã que eu poderia ter.

Aos meus avós maternos, Rita Rodrigues da Silva e Sebastião Gomes da Silva por acreditarem em mim e sempre torcer pelo meu sucesso.

Aos meus dois pais, Josemar Moreira Felício e Jurandir Pinheiro de Oliveira por sempre me apoiar e servirem de exemplos para mim.

As minhas tias, Francisca Rodrigues, Maria da Conceição, Daianny Rodrigues, Daulirene Rodrigues e Renata de Sousa, que sempre me ajudaram ao longo da minha vida.

Aos meus primos que me ajudaram ao longo da minha vida no que precisei e continuam comigo torcendo e me dando força.

A Antonia Dayane Mota Uchôa por estar presente em minha vida e me apoiar em todos os momentos.

Aos meus amigos que sempre torceram pelo meu sucesso.

A UFERSA e a todos os professores que compartilham e levam conhecimento, com vocação e prazer em ensinar.

E por fim, e não menos importante, a meu orientador, o professor Dr. Francisco Alves da Silva Junior por ter me aceitado como orientando. Agradecer pela paciência comigo, por ajudar e acompanhar cada etapa de construção desse presente trabalho. Que Deus abençoe hoje e sempre o senhor.

Agradeço aos membros da banca pela disponibilidade em avaliar este trabalho.

Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.

Albert Einstein

RESUMO

A magnitude das cargas de uma residência comumente leva a opção da adoção de fundações rasas para transmitir suas cargas ao solo. A escolha leva em consideração os custos e eficiência, ou seja, o que melhor satisfaz a relação custo-benefício. O presente trabalho teve como finalidade realizar uma comparação dos custos de execução entre duas fundações rasas, radier e sapata, possibilitando a escolha do sistema mais viável economicamente para uma edificação térrea em Mossoró. A partir do ensaio SPT realizado no terreno da residência, obteve-se os parâmetros do solo, sendo possível calcular a capacidade de carga do mesmo, dimensionar a fundação em sapata com o uso do método das bielas e a fundação em radier com o programa de cálculo estrutural *Eberick 2020*. O levantamento dos custos para execução das fundações foi realizado com base no SINAPI e SEINFRA. Os resultados dessa análise mostram que a fundação sapata apresentou um custo de 17,02% menor comparada a fundação radier. Sendo assim, a fundação em sapata torna-se mais viável economicamente para edificação estudada por proporcionar a economia de R\$5.330,88.

Palavras-chave: Sapata isolada. Dimensionamento. Fundações superficiais. Concreto.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de capacidade de carga	24
Tabela 2: Fatores de forma de Beer	24
Tabela 3: Número mínimo de sondagens	27
Tabela 4: Fator de influência I_p	29
Tabela 5: Coeficiente de Poisson (ν)	29
Tabela 6: Coeficiente α	30
Tabela 7: Coeficiente K	30
Tabela 8: Tolerância a recalque	31
Tabela 9: Valores de K_v de acordo com o tipo de solo	38
Tabela 10: Cargas na fundação	42
Tabela 11: Dimensionamento da fundação sapata	49
Tabela 12: Verificação da tensão de cisalhamento e recalque	50
Tabela 13: Armadura empregadas nas sapatas	51
Tabela 14: Materiais para fundação sapata	53
Tabela 15: Orçamento fundação sapata	54
Tabela 16: Materiais para fundação radier	58
Tabela 17: Orçamento fundação radier	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SPT	Standard Penetration Test
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
BDI	Benefícios e Despesas Indiretas
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fundação rasa e profunda.....	14
Figura 2: Bloco de fundação	15
Figura 3: Radier Liso	16
Figura 4: Radier com pedestais ou cogumelos	16
Figura 5: Radier nervurado	17
Figura 6: Radier em caixaõ	17
Figura 7: Sapata isolada.....	19
Figura 8: Sapata associada.....	19
Figura 9: Sapara em divisa	20
Figura 10: Sapata corrida.....	20
Figura 11: Ruptura geral.....	21
Figura 12: Ruptura por puncionamento	21
Figura 13: Ruptura localizada.....	22
Figura 14: Esquema do equipamento para sondagem do SPT	26
Figura 15: Amostradores	27
Figura 16: Posições das sondagens.....	28
Figura 17: Dimensões da sapata	32
Figura 18: Sapata em perfil.....	34
Figura 19: Tensões de tração atuantes na sapata	36
Figura 20: Fluxograma para execução.....	39
Figura 21: Estrutura da residência	41
Figura 22: Localização dos furos da sondagem.....	43
Figura 23: Perfil individual do furo 01	44
Figura 24: Perfil individual do furo 02	45
Figura 25: Detalhamento sapatas	52
Figura 26: Influência dos serviços e materiais na fundação sapata	55
Figura 27: Extremidade da fundação radier.....	57
Figura 28: Lançamento da fundação radier	57
Figura 29: Influência dos serviços e materiais na fundação radier.....	60
Figura 30: Consumo de concreto	61
Figura 31: Consumo de aço	61
Figura 32: Consumo de formas.....	62

Figura 33: Materiais da sapata e viga de fundação	62
Figura 34: Custo por etapa de serviço	63
Figura 35: Custo total das fundações	63
Figura 36: Custo por metro quadrado	64
Figura 37: Área de construção	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo Geral	13
1.2	Objetivos específicos	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	Fundações	14
2.1.1	Fundações Rasas	15
2.1.1.1	Bloco de fundação.....	15
2.1.1.2	Fundação Radier	15
2.1.1.3	Fundação Sapata	18
2.2	Capacidade de carga	21
2.2.1	Método analítico: Teoria de Terzaghi.....	22
2.2.2	Método semi-empírico: Correlação com SPT	25
2.3	Análise Geotécnica	25
2.4	Recalque diferencial	28
2.5	Método de dimensionamento das fundações	31
2.5.1	Método de dimensionamento da fundação sapata	31
2.5.2	Dimensionamento do Radier.....	36
3	METODOLOGIA	39
3.1	Determinação dos parâmetros Geotécnicos.....	40
3.2	Dimensionamento e detalhamento das sapatas.....	40
3.3	Dimensionamento e detalhamento do radier	40
3.4	Determinação dos quantitativos e custos.....	40
3.5	Definição estrutural	40
4	RESULTADOS.....	43
4.1	Análise geotécnica.....	43
4.2	Dimensionamento da fundação em sapata.....	49
4.2.1	Custos para construção da fundação sapata isolada	53
4.3	Dimensionamento da fundação em radier	56
4.3.1	Custos para construção da fundação radier.....	58
4.4	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	61
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65

REFERÊNCIAS.....	66
ANEXO A – PROJETO ARQUITETÔNICO	68
ANEXO B – LOCAÇÃO DOS PILARES	69
ANEXO C – DETALHAMENTO DAS SAPATAS.....	70
ANEXO D – LOCAÇÃO DA FUDAÇÃO EM RADIER.....	73

1 INTRODUÇÃO

A escolha correta do tipo de fundação a ser adotada é uma das etapas mais importantes em um projeto de edificação, devido à complexidade de suas características e por exercer uma das funções mais importantes de toda estrutura. Uma fundação bem planejada garante estabilidade e segurança em todo empreendimento.

O engenheiro tem a responsabilidade de escolher qual o tipo de fundação é a mais adequada para a edificação. A escolha correta é fundamental para toda a sua arquitetura, além disso, deve-se atentar para escolher a melhor opção com base no tempo de execução e no custo da mesma, visto que o preço final é um fator decisivo para viabilidade do empreendimento. De acordo com Brito (1987), as fundações bem projetadas podem custar entre 3% e 10% do valor final da obra, caso sejam mal planejadas, esse percentual pode variar de 5 a 10 vezes.

Para Joppert (2007) a construção de uma fundação ideal, depende do controle de qualidade, da escolha da melhor solução técnica e econômica, seguindo pelo detalhamento do projeto executivo e finalizando com o controle de execução da mesma.

Atualmente as fundações são divididas em dois grupos: rasas e profundas. Para construção da residência estudada é mais adequada as fundações rasas e diretas, considerando a quantificação das cargas a serem transmitidas ao solo, entre as quais podem ser citadas: radier, sapata, sapata corrida, sapata associada, bloco, viga de fundação e grelha.

É responsabilidade do engenheiro estudar e elaborar métodos que tragam segurança e economia para construção civil. Esse estudo, vem para aprofundar o conhecimento nas tipologias de fundações abordadas, possibilitando uma análise de um caso específico, que é a construção da residência em Mossoró, e encerrando dúvida que ainda persiste, quanto a escolha da fundação com menor custo, mas que garante o desempenho desejado, isto é, o método que melhor satisfaz a relação custo-benefício.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo realizar um comparativo econômico entre dois tipos de fundações rasas (sapata e radier) considerando seu desempenho e custo de execução. Para enfim, determinar a fundação mais viável para executar na construção de uma residência em Mossoró – RN.

1.2 Objetivos específicos

- Dimensionar as fundações radier e sapata de acordo com o projeto específico;
- Elaborar planilha orçamentária para execução das fundações;
- Comparar os resultados para determinar qual possui menor custo garantindo eficiência.

2 REVISÃO DE LITERATURA

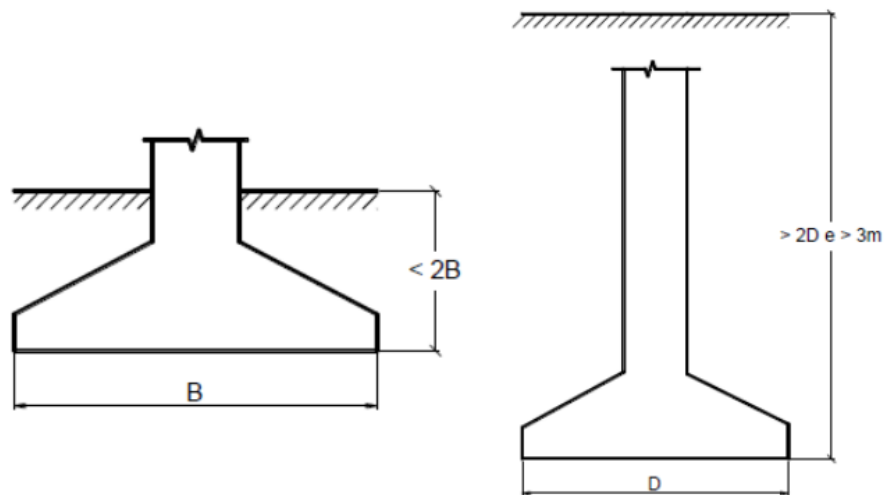
2.1 Fundações

As fundações são estruturas responsáveis por transmitir todas as cargas geradas pelas superestruturas, sem sofrer grandes deformações, como afirma Santana (2011) não podem ocorrer recalques diferenciais de ampla significância, pois pode levar a estrutura a sofrer danos.

De acordo com Velloso e Lopes (2004), são necessários vários elementos para se projetar uma fundação, como os dados geotécnicos, investigação do subsolo, topografia da área, dados da estrutura que será construída, tipo da obra, sistema estrutural e até dados sobre construções vizinhas. Com todos esses dados o engenheiro responsável fará a escolha da fundação mais adequada.

Existem diversos tipos de fundações e a escolha mais adequada deve-se levar em consideração principalmente a segurança e economia da obra. De acordo com a norma NBR 6122 (2010) as fundações são classificadas em dois grupos: fundações rasas ou superficiais e fundações profundas. Na Figura 1 pode ser observado exemplos dos dois tipos de fundações.

Figura 1: Fundação rasa e profunda



Fonte: Bastos (2016)

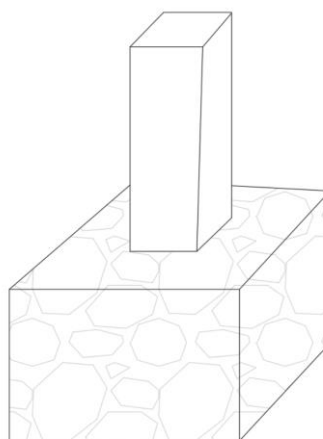
2.1.1 Fundações Rasas

Segundo a NBR 6122 (2010) as fundações rasas, também conhecidas como fundação superficial ou direta, é definida como elemento de fundação em que suas cargas são transmitidas ao terreno sob a base do elemento estrutural, além disso, sua profundidade de assentamento em relação ao terreno deve ser inferior a duas vezes a menor dimensão da base da fundação e a no máximo 3,00 m. Alguns exemplos de fundação rasa: sapata, sapata corrida, sapata associada, bloco, grelha, viga de fundação e radier.

2.1.1.1 Bloco de fundação

De acordo com Alonso (1983) os blocos de fundação são elementos executados com concreto simples ou ciclópico, sem a presença de armadura. Possuem grande rigidez e são dimensionados de modo que as tensões de tração neles produzidas sejam absorvidas pelo próprio concreto (Figura 2).

Figura 2: Bloco de fundação



Fonte: Adaptado Velloso e Lopes (2010)

2.1.1.2 Fundação Radier

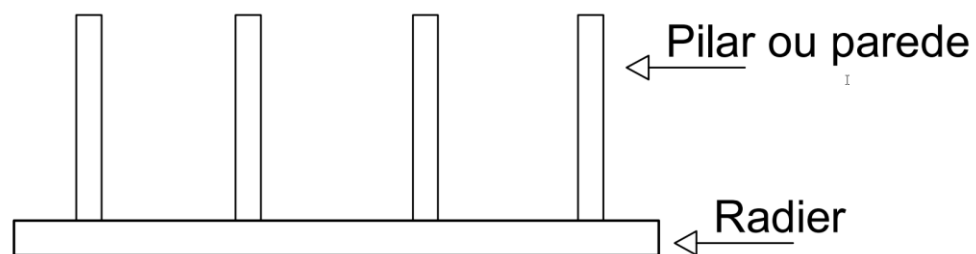
O radier é uma fundação em forma de placa, trabalha como uma laje invertida, recebe todas as cargas dos pilares e alvenaria e distribui de forma uniforme no solo. Segundo Caputo (1982) ela pode ser executada em concreto armado ou protendido, mas é recomendado que seja

realizado quando o solo possuir baixa capacidade de carga, quando a soma das áreas das sapatas for maior que a metade da área de construção e quando existir possibilidade de deixar os recalques uniformes.

O radier pode ser dividido em quatro formas de acordo com a sua geometria, são elas:

- Radiers lisos: Muito utilizado em edificações de baixa renda devido sua grande facilidade de execução e economia como pode ser visto na Figura 3 (PACHECO, 2010).

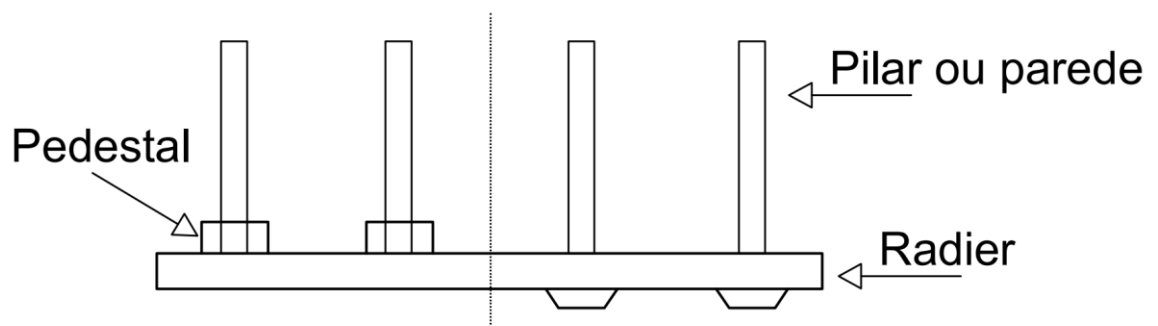
Figura 3: Radier Liso



Fonte: Adaptado Dória (2007)

- Radier com pedestais ou cogumelos: Possuem maior espessura sob os pilares, melhorando a resistência a flexão e o esforço cortante. Além disso, os pedestais manter-se tanto superiores com inferiores, da qual essa última deixa a estrutura mais limpa, conforme mostrado na Figura 4 (RIBEIRO, 2010).

Figura 4: Radier com pedestais ou cogumelos

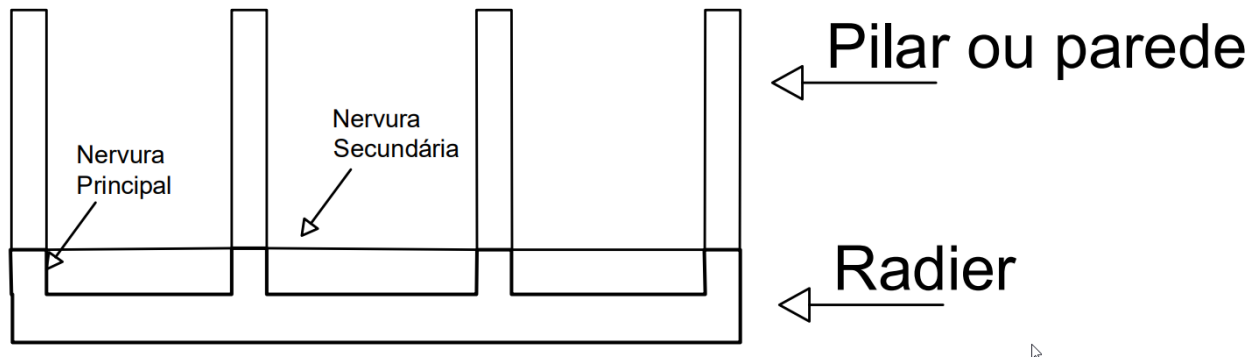


Fonte: Adaptado Dória (2007)

- Radier nervurado: Sua execução pode ser tanto superior quanto inferior, sendo a inferior executada sobre a escavação. Na superior é necessário que a superfície do piso

fique plano, com a aplicação de agregado. A Figura 5 mostra um exemplo de radier nervurado (HACHICH, 1998).

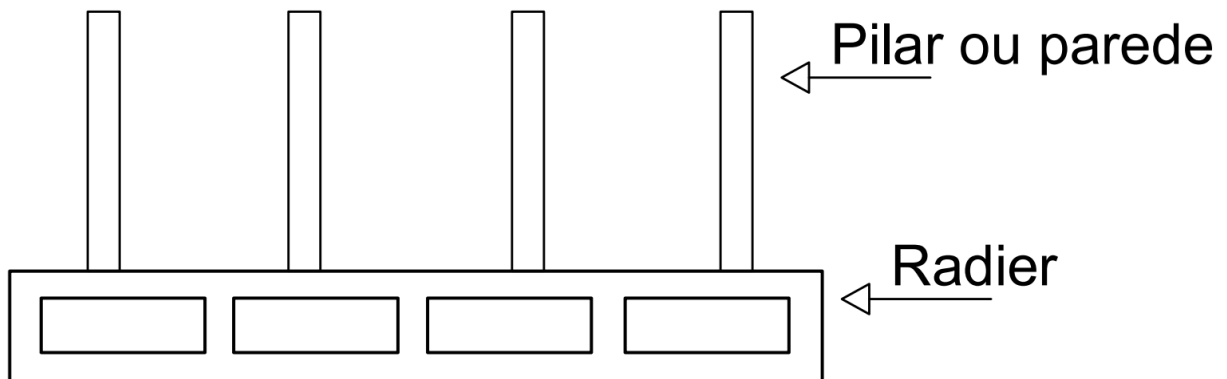
Figura 5: Radier nervurado



Fonte: Adaptado Dória (2007)

- Radier em caixão: É mais utilizado em reservatórios e fundações flutuantes, locais onde os recalques diferenciais e fissuras são indesejáveis. É composto por duas lajes paralelas e perpendiculares aos pilares, podendo ser executados com vários pisos, conforme mostrado na Figura 6 (VELLOSO E LOPES, 2011).

Figura 6: Radier em caixão



Fonte: Adaptado Dória (2007)

A fundação radier também pode ser classificada quanto a sua rigidez e flexão, dividindo-se em duas categorias: Rígidas e Flexíveis. De acordo com Dória (2007) o radier do tipo rígido é classificado por sua rigidez e flexão relativamente grandes, já o radier do tipo elástico possui uma rigidez menor, além disso, os deslocamentos da placa não são desprezíveis.

2.1.1.3 Fundação Sapata

De acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2010) as sapatas isoladas são elementos de fundação superficial de concreto armado, dimensionadas de modo que as tensões de tração sejam resistidas pela armadura nela disposta e não pelo emprego do concreto.

Segundo Ferreira (2017), as sapatas isoladas tem a função de transmitir ao solo a carga de um único pilar, logo ela pode ter diversos formatos, mas o mais usual é o retangular, pois é o mesmo formato dos pilares, permitindo assim a redução de tempo do trabalho com as formas e reduzindo o consumo de concreto.

As sapatas podem ser classificadas quanto a sua rigidez e forma. Além disso, de acordo com a NBR 6118 (2014) uma sapata também pode ser classificada como rígida ou flexível, se atender às seguintes expressões:

$$\text{Sapata rígida: } h \geq \frac{B-b}{3}$$

$$\text{Sapata flexível: } h < \frac{B-b}{3}$$

Onde:

h - Altura da sapata;

B - Dimensão da sapata em uma determinada direção;

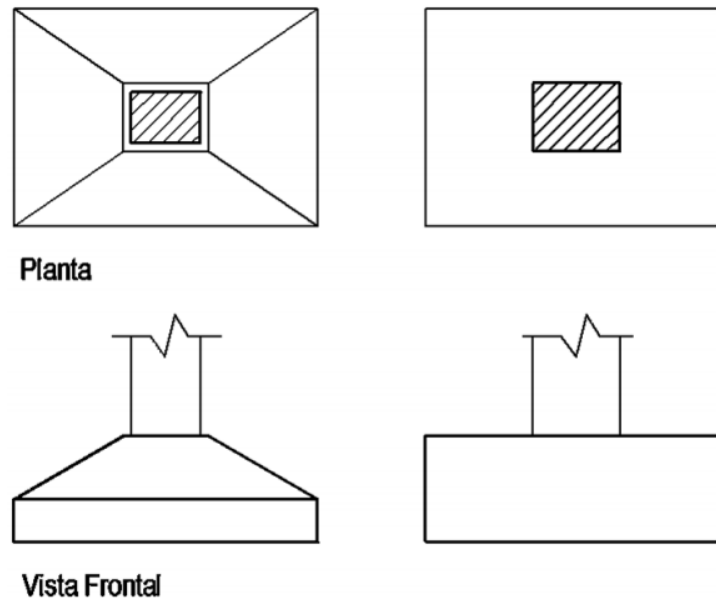
b - Dimensão do pilar na mesma direção;

As sapatas flexíveis são empregadas em fundações sujeitas a pequenas cargas e com solos fracos, já as sapatas rígidas, são normalmente utilizadas em solos de boa resistência com camadas próximas da superfície (NBR 6118, 2014, item 19.5.3.1).

Para Rebello (2008), as sapatas podem ser classificadas em diversas formas. São elas:

- Sapata isolada: É usada quando as cargas transmitidas pela superestrutura são pontuais ou concentradas, como as cargas de pilares. Suas dimensões são determinadas de acordo com a carga aplicada e resistência do solo, como pode ser visto na Figura 7 (Rebello, 2008).

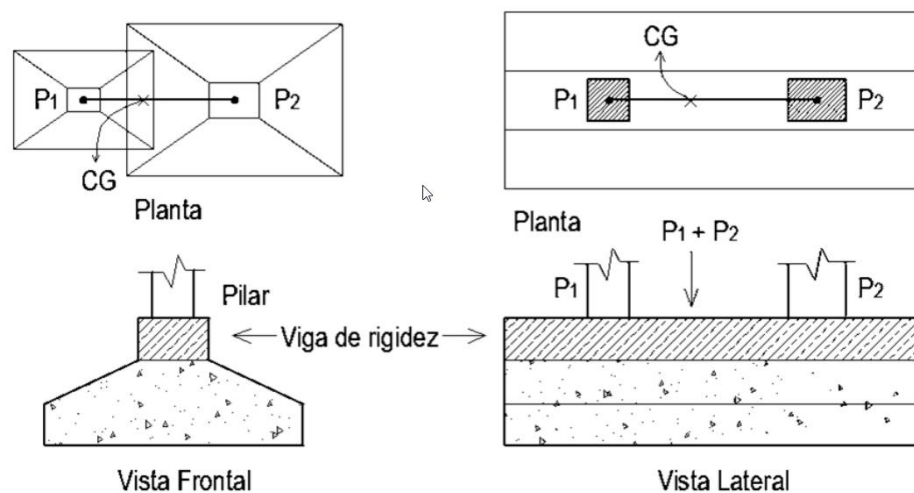
Figura 7: Sapata isolada



Fonte: Carvalho (2015)

- Sapata associada: São utilizadas quando não é possível construir a sapata isolada, por estarem próximas umas das outras, resultando na sobreposição das suas bases. Suportam as cargas de dois ou mais pilares, mas é necessário que o centro de gravidade da carga e sapata sejam coincidentes. A Figura 8 mostra um exemplo de sapata associada (Rebello, 2008).

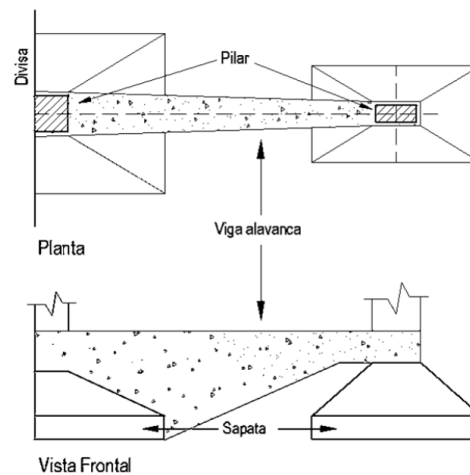
Figura 8: Sapata associada



Fonte: Carvalho (2015)

- Sapata em divisa: É capaz de suportar a carga de apenas um pilar de forma excêntrica, isto é, fora do centro de gravidade da sapata, isso acaba provocando uma distribuição não uniforme de tensão no solo, além de gerar um momento fletor no pilar, conforme mostrado na Figura 9 (Rebello, 2008).

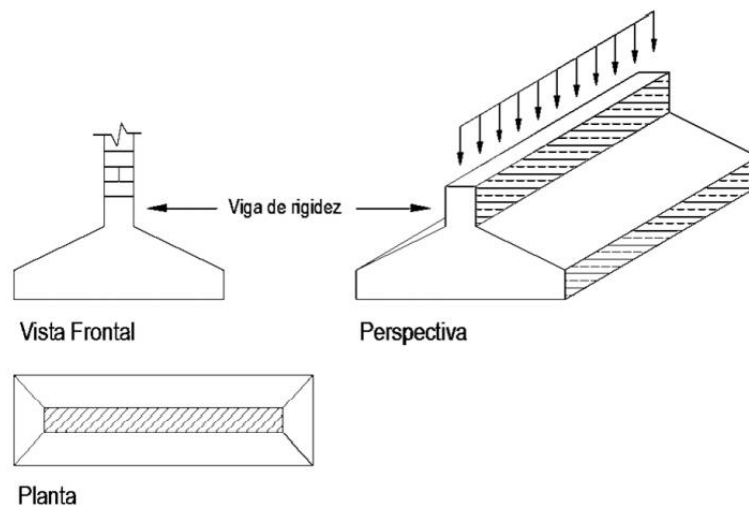
Figura 9: Sapata em divisa



Fonte: Carvalho (2015)

- Sapata corrida: Possuem um comportamento idêntico a uma laje, com balanços em suas duas faces separadas por parede ou viga de rigidez. São capazes de suportar cargas lineares distribuídas em uma dimensão muito maior que a outra, conforme mostrado na Figura 10 (Rebello, 2008).

Figura 10: Sapata corrida



Fonte: Carvalho (2015)

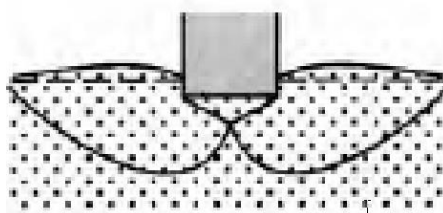
2.2 Capacidade de carga

Toda ação existe uma reação, portanto a fundação aplicará uma tensão ao solo e o mesmo irá responder, como o aumento dessa carga aplicada sobre a sapata causará o aparecimento de uma superfície de ruptura. Na proximidade do rompimento o solo trabalhará em sua resistência máxima, essa resistência na proximidade do rompimento é conhecida como a capacidade de carga do solo.

De acordo com Cintra (2014) existem três modos de rupturas. São elas:

- i) Ruptura geral, acontece de forma repentina, partindo da base até a superfície do terreno, onde a sapata pode rotacionar levantando uma parte do solo para cima do terreno. Ocorre nos solos mais rígidos, como areias compactas e muito compactas e argilas rijas e duras. Em geral pode causar tombamento da estrutura, como pode ser visto na Figura 11.

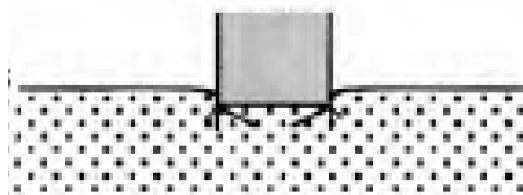
Figura 11: Ruptura geral



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

- ii) Ruptura por punção, em que a sapata afunda sem inclinar no momento em que a carga é aplicada. Com o aumento da carga o solo tende a cisalhar no contorno da fundação (Figura 12). Ocorre em solos menos resistentes, como areias fofas e argilas médias e moles.

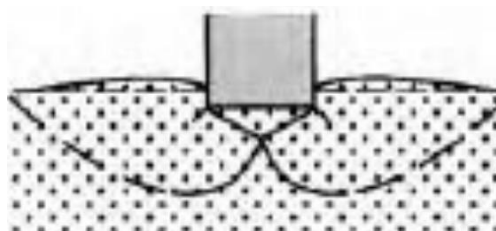
Figura 12: Ruptura por punção



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

- iii) Ruptura localizada, se define por obter uma curva tangente mais abatida em relação a ruptura geral (Figura 13). Ocorre também em solos menos resistentes. Não ocorre risco de tombamento.

Figura 13: Ruptura localizada



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

Segundo a norma técnica NBR 6122 (2010), a determinação da capacidade de carga dos solos deve ser realizada utilizando um dos seguintes métodos: Métodos semi-empíricos (como correlações com ensaio SPT), analíticos (exemplo Terzaghi) e provas de carga.

2.2.1 Método analítico: Teoria de Terzaghi

Segundo Carvalho (2015) o método analítico de Terzaghi (1943) é o mais mencionado para determinação de capacidade de carga em fundações rasas. Nesse método aplica-se somente para fundações rasas onde a profundidade de assentamento é menor que a largura da fundação, além disso, ele se aplica em solos de diversas categorias, como coesivos, friccionais, solos não coesivos e puramente coesivos.

Conforme o método de Terzaghi (1943) a tensão de ruptura do solo (σ_r) encontrada não pode ser aplicada diretamente no cálculo, ela deve ser minorada aplicando um fator de segurança global ($F_s=3,0$), valor esse determinado pela NBR 6122 (ABNT, 2010) como pode ser visto na Equação 1.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_r}{3} \text{ (MPa)} \quad \text{Equação 1}$$

A formula geral de Terzaghi (1943) para a capacidade de carga na ruptura geral (σ_r) é dada pela Equação 2:

$$\sigma_r = C N_c S_c + q \cdot N_q S_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma \text{ (MPa)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

σ_r = Tensão de ruptura do solo;

c = Coesão do solo;

q = Sobrecarga ($q = \gamma h$), onde h representa a profundidade de assentamento;

γ = Peso específico efetivo do solo;

B = Largura total da fundação;

N_c , N_q e N_γ = Fatores de capacidades de carga referentes à coesão, sobrecarga e ao peso do solo.

S_c , S_q e S_γ = Fatores de forma.

A coesão do solo pode ser obtida por meio da Equação 3.

$$c = 10 \times N_{sPT} \quad \text{Equação 3}$$

Para o cálculo da capacidade de carga na ruptura por punção, segundo Cintra (2011), Terzaghi (1943) propôs a mesma equação da ruptura geral, mas com a redução dos parâmetros de resistência do solo, coesão (c') e ângulo de atrito interno (ϕ'), como pode ser visto na seguinte equação 4 e 5:

$$c' = \frac{2}{3c} \quad \text{Equação 4}$$

$$\text{tg}\phi' = \frac{2}{3\text{tg}\phi} \quad \text{Equação 5}$$

Os fatores de carga referente a coesão (N_c), a sobrecarga (N_q) e ao peso do solo (N_γ) dependem unicamente do ângulo de atrito ϕ do terreno, sob a base de fundação, além disso Vesic (1975 apud AOKI & CINTRA, 2012, p. 33) recomenda que na equação geral de Terzaghi seja utilizado os fatores de forma De Beer. Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os fatores de capacidade de carga e de forma respectivamente.

Tabela 1: Fatores de capacidade de caga

ϕ°	Nc	Nq	Ny	Nq/Nc	tg ϕ	ϕ°	Nc	Nq	Ny	Nq/Nc	tg ϕ
0	5,14	1,00	0,00	0,20	0,00	26	22,25	11,85	12,54	0,53	0,49
1	5,38	1,09	0,07	0,20	0,02	27	23,94	13,20	14,47	0,55	0,51
2	5,63	1,20	0,15	0,21	0,03	28	25,80	14,72	16,72	0,57	0,53
3	5,90	1,31	0,24	0,22	0,05	29	27,86	16,44	19,34	0,59	0,55
4	6,19	1,43	0,34	0,23	0,07	30	30,14	18,40	22,40	0,61	0,58
5	6,49	1,57	0,45	0,24	0,09	31	32,67	20,63	25,99	0,63	0,60
6	6,81	1,72	0,57	0,25	0,11	32	35,49	23,18	30,22	0,65	0,62
7	7,16	1,88	0,71	0,26	0,12	33	38,64	26,09	35,19	0,68	0,65
8	7,53	2,06	0,86	0,27	0,14	34	42,16	29,44	41,06	0,70	0,67
9	7,92	2,25	1,03	0,28	0,16	35	46,12	33,30	48,03	0,72	0,70
10	8,35	2,47	1,22	0,30	0,18	36	50,59	37,75	56,31	0,75	0,73
11	8,80	2,71	1,44	0,31	0,19	37	55,63	42,92	66,19	0,77	0,75
12	9,28	2,97	1,69	0,32	0,21	38	61,35	48,93	78,03	0,80	0,78
13	9,81	3,26	1,97	0,33	0,23	39	67,87	55,96	92,25	0,82	0,81
14	10,37	3,59	2,29	0,35	0,25	40	75,31	64,20	109,41	0,85	0,84
15	10,98	3,94	2,65	0,36	0,27	41	83,86	73,90	130,22	0,88	0,87
16	11,63	4,34	3,06	0,37	0,29	42	93,71	85,38	155,55	0,91	0,90
17	12,34	4,77	3,53	0,39	0,31	43	105,11	99,02	186,54	0,94	0,93
18	13,10	5,26	4,07	0,40	0,32	44	118,37	115,31	224,64	0,97	0,97
19	13,93	5,80	4,68	0,42	0,34	45	133,88	134,88	271,76	1,01	1,00
20	14,83	6,40	5,39	0,43	0,36	46	152,10	158,51	330,35	1,04	1,04
21	15,82	7,07	6,20	0,45	0,38	47	173,64	187,21	403,67	1,08	1,07
22	16,88	7,82	7,13	0,46	0,40	48	199,26	222,31	496,01	1,12	1,11
23	18,05	8,66	8,20	0,48	0,42	49	229,93	265,51	613,16	1,15	1,15
24	19,32	9,60	9,44	0,50	0,45	50	266,89	319,07	762,89	1,20	1,19
25	20,72	10,66	10,88	0,51	0,47						

Fonte: Adaptado Cintra (2014)

Tabela 2: Fatores de forma de Beer

Sapata	S _c	S _q	S _y
Corrida	1,00	1,00	1,00
Retangular	$1+(B/L)(N_q/N_c)$	$1+(B/L)tg\phi$	$1 - 0,4(B/L)$
Circular ou Quadrada	$1+(N_q/N_c)$	$1+tg\phi$	0,60

Fonte: Adaptado Cintra (2014)

2.2.2 Método semi-empírico: Correlação com SPT

De acordo com Cintra (2014) uma formula bastante usual no meio técnico brasileiro para calcular as tensões admissíveis do solo em fundações do tipo sapata é a Equação 6, ela é dada em função do índice de resistência à penetração (N_{SPT}) do ensaio SPT (Standard Penetration Test). Esse ensaio é executado em um trecho de solo, durante uma sondagem a percussão ou sondagem mista, onde o objetivo é obter índices de resistência a penetração do solo.

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{spt}}{50} + q \text{ (MPa)} \quad \text{Equação 6}$$

Onde o valor de q é a parcela correspondente à sobrecargas, que podem ser consideradas ou não e N é a média dos valores de N_{spt} medidos na profundidade compreendida pelo bulbo de tensões. Geralmente essa equação é válida somente para solos naturais com valores de N_{spt} entre 5 e 20.

Uma segunda equação muito utilizada é a Equação 7, que segue os mesmos parâmetros citados acima.

$$\sigma_{adm} = 0,02 N \text{ (MPa)} \quad \text{Equação 7}$$

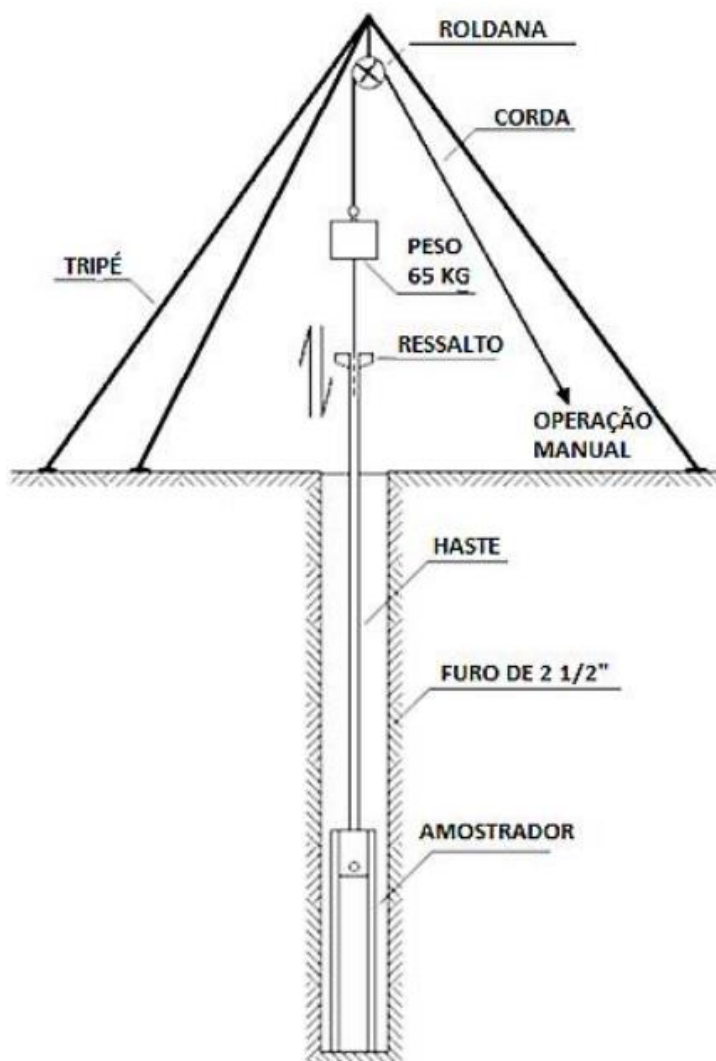
2.3 Análise Geotécnica

De acordo com Botelho (2016) mais de 90% das construções térreas brasileiras não fazem nenhum tipo de sondagem do terreno. O conhecimento das condições do subsolo é uma condição fundamental para elaboração de projetos geotécnicos seguros e econômicos. É necessário a realização da investigação do solo através de sondagens, pois só com ela haverá a possibilidade de obter os parâmetros que possibilitarão a realização de um dimensionamento da fundação.

Para Botelho (2016) o método de sondagem SPT (Standard Penetration Test) é o mais comum e prestigiado ensaio de campo. Ele é normatizado pela NBR 6484:2011, executado de forma simples e rápida, com o objetivo de identificar os tipos de solos e suas profundidades, nível do lençol freático e o índice de resistência à penetração (N_{spt}) a cada 1,5m. Consiste em realizar penetrações no solo com um amostrador padrão de diâmetro 3/8" e externo 2", a cada metro de profundidade é executado um furo a trado, lavagem ou rotativa. Essa penetração no

solo é realizada por meio de golpes de um peso de 65 kg, que cai em queda livre de 75 cm de altura, faz-se anotação do número de golpes que foi necessário para cravar 15 cm do amostrador até a penetração total de 45 cm do mesmo. A Figura 14 ilustra o ensaio SPT.

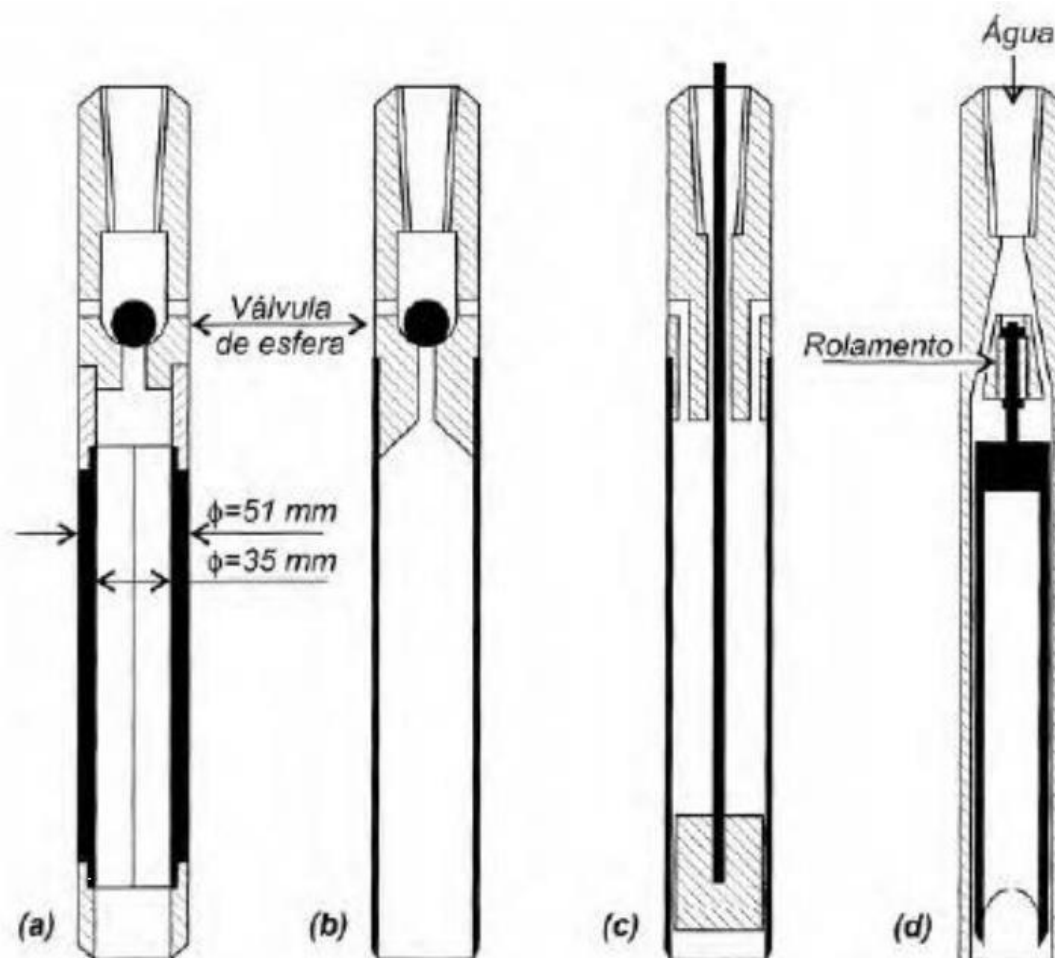
Figura 14: Esquema do equipamento para sondagem do SPT



Fonte: Pinto (2013)

As amostras de solos são retiradas através de amostradores. O primeiro é o amostrador Raymond-Terzaghi onde a amostra é deformada, o segundo é o amostrador Shelby que é empregado quando se é necessário retirar amostras indeformáveis, se plica em argilas por possuir paredes finas. O terceiro amostrador é a troca das válvulas que possuem no amostrador de Raymond-Terzaghi e Shelby utilizando um pistão. E o ultimo amostrador é o Denison, é utilizado em solos mais resistente ou que tenha a presença de algumas rochas. Na Figura 15 pode ser visto todos os amostradores na sequência citada.

Figura 15: Amostradores



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

Segundo a NBR 8036 (1983) o número de furos a ser realizado no terreno depende da área de projeção da construção, como pode ser visto na Tabela 3. Além disso, os furos não podem ter distância entre si maiores do que 30 m.

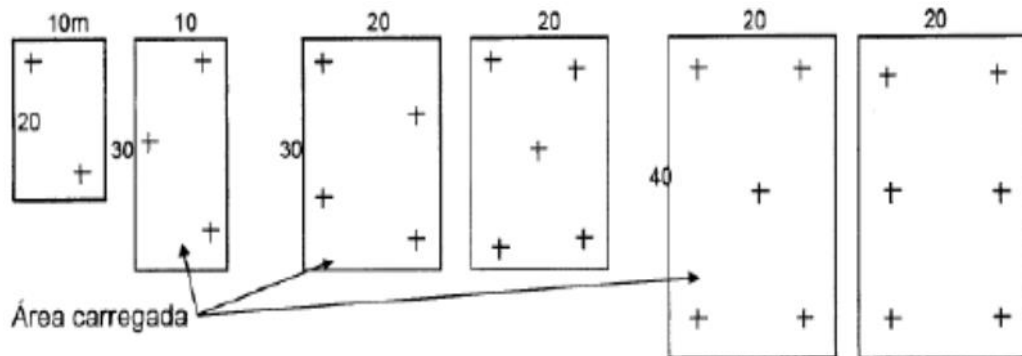
Tabela 3: Número mínimo de sondagens

Área de projeto de construção (m ²)	Nº mínimos de furos
<200	2
200 a 600	3
600 a 800	4
800 a 1000	5
1000 a 1200	6
1200 a 1600	7
1600 a 2000	8
2000 a 2400	9
>2400	a critério

Fonte: NBR 8036 (1983)

Quanto a posição dos pontos onde devem ser realizados a sondagem, a Figura 16 mostra como deve ser a distribuição dos furos em terrenos.

Figura 16: Posições das sondagens



Fonte: Gonçalves (2014)

2.4 Recalque diferencial

De acordo Botelho (2016) toda obra recalca, ou seja, todos os solos comprimidos por cargas verticais, resultante de obras que sustentam, sofrem alguma deformação, em outras palavras, afundam um pouco. Apesar disso, toda obra deve suportar o recalque admissível. Caso algum ponto afunde mais que os outros ocorrerá o recalque diferencial, logo a deformação deve ser igual em todos os pontos.

Segundo Botelho (2016) o recalque diferencial é o mais temido, pois além de afundar a estrutura, acaba transmitindo esforços não previstos, podendo causar o rompimento de partes e até mesmo inviabilizar seu uso. A fundação é o elemento que suportará o inevitável recalque.

Afim de calcular os recalques diferenciais, deve-se analisar o recalque que cada elemento sofrerá, para isso, existem diversos meios de calcular o recalque de cada elemento. O calculo do recalque depende do tipo de solo em que a fundação será assentada, se o solo for argiloso pode-se usar o método de recalque imediato em meio elástico onde o recalque é dado pela Equação 8:

$$\rho = \tau \times B \times \left[\frac{1 - \nu^2}{E_s} \right] \times I_p \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

ρ = recalque;

τ = Tensão aplicada no solo;

B = Largura da sapata;

ν = Coeficiente de Poisson;

E_s = Módulo de Elasticidade do solo;

I_p = Fator de influência;

A Tabela 4 mostra como obter o fator de influência, que depende da forma e posição das sapatas.

Tabela 4: Fator de influência I_p

Forma	Sapata Flexível			Rígida
	Centro	Canto	Médio	
Circular	1,00	0,64	0,85	0,79
Quadrada	1,12	0,56	0,95	0,99
L/B = 1,5	1,36	0,67	1,15	
2	1,52	0,76	1,30	
3	1,78	0,88	1,52	
5	2,10	1,05	1,83	
10	2,53	1,26	2,25	
100	4,00	2,00	3,70	

Fonte: Adaptado Perloff e Baron (1976)

O coeficiente de Poisson depende do tipo de solo e pode ser obtido por meio da Tabela 5.

Tabela 5: Coeficiente de Poisson (ν)

Tipo de solo		Coeficiente de Poisson (ν)
Argila	Saturada	0,4 a 0,5
	Não saturada	0,1 a 0,3
	Arenosa	0,2 a 0,3
Silte		0,3 a 0,35
Areia	Compacta	0,2 a 0,4
	Grossa ($e= 0,4$ a $0,7$)	0,15
	Fina ($e=0,4$ a $0,7$)	0,25
Rocha	Depende do tipo	0,1 a 0,4

Fonte: Teixeira & Godoy (1996)

O módulo de elasticidade (E_s) é calculado por meio da Equação 9.

$$E_s = \alpha \times K \times N_{spt}$$

Equação 9

Onde:

α = Coeficiente dado pela Tabela 6;

K = Coeficiente dado pela Tabela 7;

N_{spt} = Spt médio do bulbo.

Tabela 6: Coeficiente α

Solo	α
Areia	3
Silte	5
Argila	7

Fonte: Teixeira & Godoy (1996)

Tabela 7: Coeficiente K

Solo	K (Mpa)
Areia com pedregulhos	1,10
Areia	0,90
Areia siltosa	0,70
Areia argilosa	0,55
Silte arenoso	0,45
Silte	0,35
Argila arenosa	0,30
Silte argiloso	0,25
Argila siltosa	0,20

Fonte: Teixeira & Godoy (1996)

A Tabela 8 mostra a tolerância a recalques máximos para solos argiloso e arenosos.

Tabela 8: Tolerância a recalque

Recalque diferencial máximo	
Em areia	25 mm
Em argila	40 mm
Recalque total máximo	
Sapata isolada em areia	40 mm
Sapata isolada em argila	65 mm
Radier em areia	40 - 65 mm
Radier em argila	65 - 100 mm
Distorção angular máxima	1/300

Fonte: Adaptado Skempton-MacDonald (1956)

2.5 Método de dimensionamento das fundações

2.5.1 Método de dimensionamento da fundação sapata

As sapatas isoladas podem ser dimensionadas pelo método das bielas, esse método foi proposto por Lebellet em 1936, com base nos resultados de uma bateria de ensaios experimentais. Nessa metodologia, a carga é transferida do pilar para a base da sapata a partir das bielas de concreto comprimido, induzindo tensões de tração na base da sapata, que são suportadas por armaduras, sendo capaz de ser aplicado tanto para sapas isoladas como corridas.

Alonso (2013) define o seguinte roteiro de cálculo para o dimensionamento das sapatas:

- i) Encontrar a área da sapata (A_{sap}), utilizando a Equação 10:

$$A_{sap} = a \times b = \frac{P + pp}{\sigma_{adm}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

P = Carga do pilar (KN);

PP =Peso próprio da sapata;

σ_{adm} = Tensão admissível (MPa);

Como o peso próprio da sapata não é conhecido nessa fase do dimensionamento, é necessário estimar um valor. Segundo a NBR 6122 (2010) deve-se utilizar o valor de no mínimo 5% da carga vertical permanente para o cálculo do peso próprio da sapata.

ii) Calcular os balanços iguais nas duas direções satisfazendo a Equação 11:

$$a - b = a_o - b_o \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

a = Maior direção da sapata;

a_o = Maior direção do pilar;

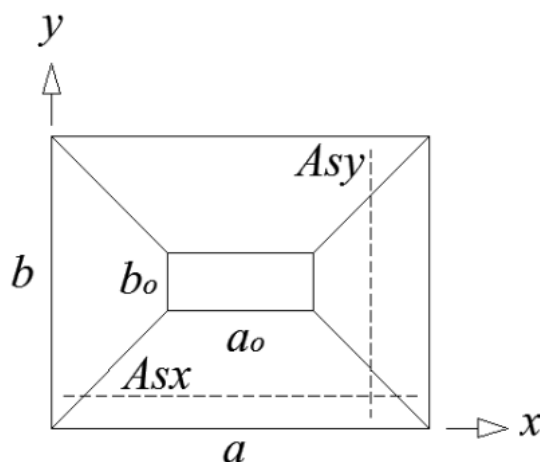
b = Menor direção da sapata;

b_o = Menor direção do pilar;

De acordo com Alonso (2013) para escolher os valores das dimensões a e b da sapata (Figura 17) é necessário definir alguns requisitos:

- O centro de gravidade do pilar e da sapata devem ser coincidentes;
- A menor dimensão da sapata não deve ser menor que 60 cm;
- Preferencialmente a relação entre de a e b deve ser de no máximo 2,5;
- Os valores de a e b devem ser escolhidos de forma que os balanços da sapata sejam iguais, nas duas direções.

Figura 17: Dimensões da sapata



Fonte: Tizotti (2013)

iii) Calcular a altura útil da sapata (d), empregando a Equação 12:

$$d \geq \begin{cases} \frac{a - a_o}{4} \\ \frac{b - b_o}{4} \\ 1,44 \sqrt{\frac{P}{\sigma}}; \sigma_c = 0,85 \frac{F_{CK}}{1,96} \end{cases} \quad \text{Adota-se o maior valor} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

F_{CK} = valor característico da resistência à compressão do concreto;

σ_c = Tensão resistente do concreto;

iv) Com a Equação 13 encontrar a altura total da sapata.

$$h = d - c' \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

h = Altura da sapata;

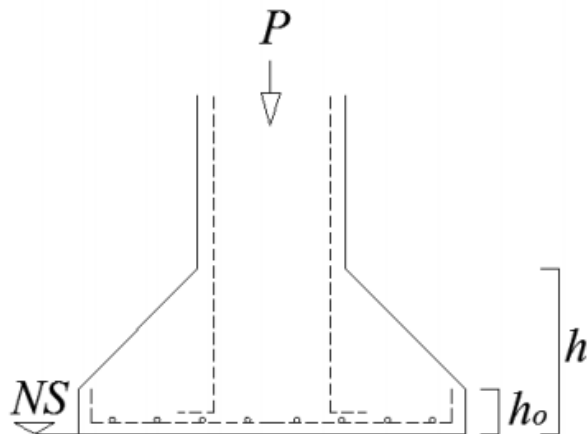
d = Altura útil da sapata;

c' = Cobrimento.

Alonso (1983) recomenda um cobrimento de 5 cm no contato do solo com a sapata. A altura da base da sapata (h_o) deve ser um valor que permita um plano de concretagem sem armadura. Calcula-se a altura da base da sapata com a Equação 14:

$$h_o \geq \begin{cases} \frac{h}{3} \\ 20 \text{ cm} \end{cases} \quad \text{Equação 14}$$

Figura 18: Sapata em perfil



Fonte: Tizott (2013)

- v) Calcular as tensões de tração das armaduras nas direções dos eixos x e y com as Equações 15 e 16 respectivamente:

$$T_x = \frac{P (a - a_o)}{8d} \quad \text{Equação 15}$$

$$T_y = \frac{P (b - b_o)}{8d} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

T_x = Força de tração na direção x;

T_y = Força de tração na direção y;

$(a - a_o)$ = Distância do balanço da sapata na direção x;

$(b - b_o)$ = Distância do balanço da sapata na direção y;

- vi) Calcular a área da armadura necessária para resistir os esforços de tração com as Equações 17 e 18.

$$A_{sx} = \frac{1,61 \cdot T_x}{f_{yk}} \quad \text{Equação 17}$$

$$A_{sy} = \frac{1,61 \cdot T_y}{f_{yk}} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

A_{sx} = Área de armadura paralela ao lado a;

A_{sy} = Área de armadura paralela ao lado b;

F_{yk} = Tensão de escoamento do aço.

vii) Com a Equação 19 calcula-se o volume de concreto das sapatas.

$$V = A_{SAP} * h_0 + \frac{A_{SAP}(H - h_0)}{3} - A_{PILAR} * H \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

A_{SAP} = Área da sapata;

A_{PILAR} = Área do pilar;

H = Altura da sapata;

h_0 = Altura da base da sapata.

viii) Realizar a verificação da ruptura por compressão diagonal do concreto na ligação sapata-pilar.

De acordo com a NBR 6118 (2014) é recomendada essa verificação onde a tensão atuante de cisalhamento (σ_{sd}) determinada pela Equação 20, deve ser menor que a tensão resistente de compressão diagonal (σ_{Rd2}) calculada através da Equação 21.

$$\sigma_{sd} = \frac{F_{sd}}{U_0 * d} \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

σ_{sd} = Tensão atuante de cisalhamento em MPa;

F_{sd} = Força concentrada de cálculo ($F_{sd} = N * \gamma f$), onde, N representa a carga atuante e γf fator de majoração igual a 1,4;

U_0 = Perímetro do pilar;

d = Altura útil da sapata.

$$\sigma_{Rd2} = 0,27 \left(1 - \frac{F_{CK}}{250(MPa)}\right) F_{cd} \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

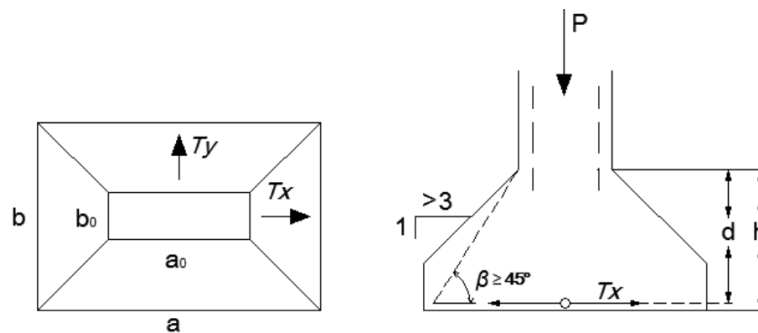
σ_{Rd2} = Tensão resistente de compressão diagonal;

F_{CK} = Resistência característica do concreto a compressão em MPa;

F_{cd} = Resistência de cálculo do concreto a compressão ($F_{CK}/1,4$) em MPa;

Segundo Bastos (2016) essas tensões de tração na base da sapata são devidas as cargas atuantes, dimensões do pilar e sapata, e da altura útil da sapata, pois essas tensões devem ser resistidas pelas armaduras nas duas direções. Na Figura 19 pode ser visto as tensões atuantes na sapata isolada.

Figura 19: Tensões de tração atuantes na sapata



Fonte: Carvalho (2015)

2.5.2 Dimensionamento do Radier

Como foi mencionado anteriormente, o radier é mais que uma laje maciça sobre o solo e de acordo com Velloso e Lopes (2004) os métodos de cálculo para dimensionar a fundação radier são: Sistema de vigas sobre base elástica, Método estático, método da placa sobre solo de Winkler, Método das diferenças finitas, métodos dos elementos finitos, Método do american concrete institute. Neste trabalho será utilizado o método da placa sobre solo de Winkler.

De acordo com Velloso e Lopes (2011) na interação solo-estrutura, o coeficiente de reação vertical (K_v), que é utilizado para simular a rigidez da mola que representa o solo, pode ser calculado considerando a hipótese proposta por Winkler, em que as pressões de contato (q_s) solo-estrutura são proporcionais aos recalques (W) como pode ser visto na Equação 22.

$$q_s = K_v W \quad \text{Equação 22}$$

A determinação do coeficiente de reação vertical (K_v) é de extrema importância para se obter um modelo compatível ao real da obra, sendo que esse valor interfere diretamente no comportamento da estrutura. De acordo com Velloso e Lopes (2011) este parâmetro pode ser obtido de diversas formas como cálculos, ensaios realizados com o solo disponível e ensaio de placa. Na ausência destes ensaios pode-se aplicar tabelas de valores típicos ou correlações empíricas.

O coeficiente de reação vertical (K_v) pode ser determinado por meio da divisão entre a pressão de contato aplicada no solo (q_s) e recalque da fundação (W), como é mostrado na Equação 23.

$$K_v = \frac{q_s}{W} \quad \text{Equação 23}$$

Onde a pressão de contato aplicada no solo (q_s) é calculado pelo somatório das forças verticais dividido pela área de contato, como pode ser visto na Equação 24.

$$q_s = \frac{\sum V}{A} \text{ em MPA} \quad \text{Equação 24}$$

Segundo Hachich (1998) o valor do recalque pode ser estimado através de uma relação dos números de golpes do ensaio de SPT, como mostra a Equação 25:

$$W = 27 * \frac{q_s B^{0,7}}{N_{SPT}} \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

W = Recalque em cm;

B = A menor dimensão em planta (m);

q_s = Pressão de contato aplicada no solo em MPa;

N_{SPT} = Número de golpes em ensaio de SPT.

De acordo com Moraes (1976) na ausência de ensaios laboratoriais para a determinação dos valores do coeficiente de reação vertical (K_v), recomenda-se utilizar os dados da Tabela 9.

Tabela 9: Valores de K_v de acordo com o tipo de solo

Valores de K_v em (kgf/cm³)	
Turfa leve – solo pantanoso	0,5 - 1,0
Turfa pesada – solo pantanoso	1,0 - 1,5
Areia fina de praia	1,0 - 1,5
Aterro de silte, de areia e cascalho	1,0 - 2,0
Argila molhada	2,0 - 3,0
Argila úmida	1,0 - 5,0
Argila seca	1,0 - 8,0
Argila seca endurecida	10
Silte compactado com areia e pedra	8,0 - 10,0
Silte compactado com areia e muita pedra	10,0 - 12,0
Cascalho miúdo com areia fina	8,0 - 12,0
Cascalho médio com areia fina	10,0 - 12,0
Cascalho grosso com areia grossa	12,0 - 15,0
Cascalho grosso com pouca areia	15,0 - 20,0
Cascalho grosso com pouca areia compactada	20,0 - 25,0

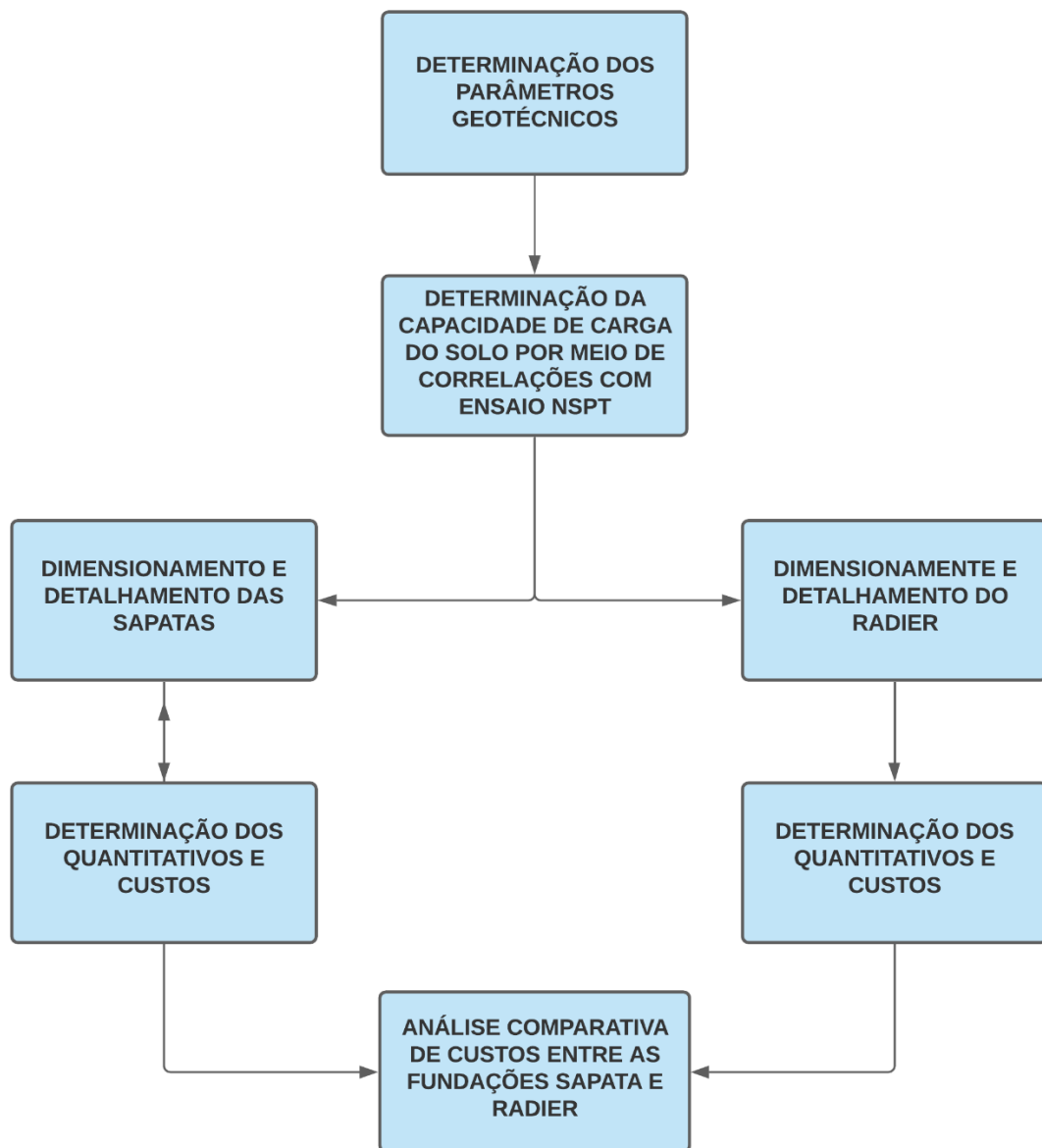
Fonte: Béton – Kalender (1962, apud MORAES, 1976)

3 METODOLOGIA

A pesquisa apresenta caráter qualitativo e quantitativo. Qualitativo pelo fato de avaliar qual fundação é ideal para uma residência e quantitativa por fazer essa análise em função dos custos de execução da mesma. Além disso, pode ser classificada como um estudo de caso, pois se baseia em modelo de residência específico adotado.

Os processos para execução desse trabalho podem ser vistos na Figura 20.

Figura 20: Fluxograma para execução



Fonte: Autoria própria (2020)

3.1 Determinação dos parâmetros Geotécnicos

Utilizou-se correlações através de um ensaio SPT (Standard Penetration Test) para determinação dos parâmetros geotécnicos. A capacidade de carga do solo e tensão admissível foram obtidas por métodos teóricos e formulações proposto por Terzaghi. Para facilitar o processo foi utilizado o *software Microsoft Office Excel 2019*.

3.2 Dimensionamento e detalhamento das sapatas

Para o dimensionamento e detalhamento das sapatas foi utilizado o método das bielas e roteiro de cálculo proposto por Alonso (2013). Além disso, foi usado o *software Microsoft Office Excel 2019* para um melhor entendimento e agilidade nos cálculos. Já o restante da estrutura foi dimensionada com o auxílio do software de cálculo estrutural *Eberick 2020*.

3.3 Dimensionamento e detalhamento do radier

Para o dimensionamento e detalhamento do radier foi utilizado o software de cálculo estrutural *Eberick 2020*, por apresentar em seus cálculos a admissão do coeficiente de mola (K_v) proposto pelo método de Winkler. Ainda foi usado o software *AutoCAD 2018* para auxiliar no detalhamento das armaduras.

3.4 Determinação dos quantitativos e custos

Os orçamentos para construção das fundações sapata e radier, foram elaborados com base nas composições de custos presentes no SINAPI da Caixa Econômica Federal e SEINFRA - Ceará, na vigência de novembro de 2020. Também foi considerado a porcentagem de 20% para os valores de Benefícios e Despesas Indiretas (BDI).

3.5 Definição estrutural

O modelo estudado nesse trabalho é de um projeto arquitetônico já existente, em que teve sua execução no Condomínio Ninho Residencial no município de Mossoró do estado de Rio Grande do Norte. Trata-se de uma residência térrea, com garagem, 2 quartos, 2 suítes, 1

banheiro, sala, cozinha, área de serviço, dispensa e varanda gourmet, com uma área construída de 170,00 m² e com altura do pé direito de 3,00 m. O projeto arquitetônico pode ser visto no Anexo A, (arquivo cedido pelo Engenheiro Civil Diego Alberto Bezerra Silva).

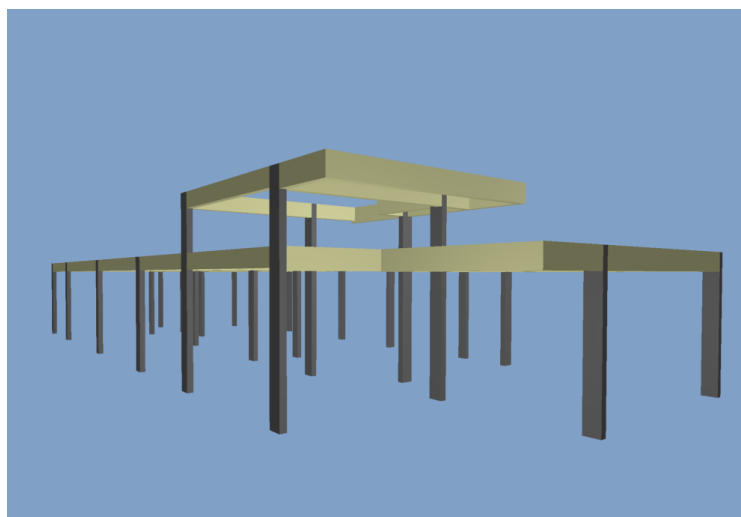
A residência tem sua geometria retangular e a configuração dos pilares pode ser visto no Anexo B.

Foram adotados os seguintes parâmetros para o cálculo das cargas nas fundações no software *Eberick 2020*:

- Concreto: Fck 25 MPa;
- Aços: CA 50 e CA 60;
- Laje treliçada com lajotas cerâmicas;
- Revestimento: $g1 = 1,8 \text{ kN/m}^2$;
- Sobrecarga Piso: $q1 = 1,5 \text{ kN/m}^2$;
- Carga permanente telhado: $g2 = 0,5 \text{ kN/m}^2$;
- Sobrecarga no telhado: $q2 = 0,5 \text{ kN/m}^2$;
- Abrigo de caixa d'água: $g3 = 1,0 \text{ kN/m}^2$;
- Parede: $[(0,15 \times 13) + (0,03 \times 19)] \times 3 = 7,60 \text{ kN/m}$;

A Figura 21 mostra a proposta do software *Eberick 2020* para o lançamento da estrutura da residência sem as fundações.

Figura 21: Estrutura da residência



Fonte: Autoria própria (2020)

A estrutura da residência conta com lajes, vigas e pilares, sendo 14 pilares com seção 14x26 cm, 10 pilares com seção 14x30 cm e 1 pilar com seção 14x34 cm. Os valores das cargas

máximas dos pilares nas fundações foram dimensionados com o software *Eberick 2020* assim como as vigas da fundação sapata. A Tabela 10 classifica os pilares de acordo com as cargas máximas.

Tabela 10: Cargas na fundação

PILAR	CARGA DE FUNDAÇÃO	
	Seção (cm)	Carga Máxima (KN)
P1	14x26	73
P2	14x26	76
P3	14x26	77
P4	14x26	55
P5	14x30	77
P6	14x30	68
P7 = P8	14x26	52
P9	14x34	78
P10	14x26	88
P11	14x26	92
P12 = P22	14x26	91
P13	14x30	100
P14	14x30	196
P15	14x30	101
P16	14x26	87
P17	14x26	111
P18	14x30	94
P19	14x30	116
P20	14x26	42
P21	14x26	78
P23	14x30	79
P24	14x30	73
P25	14x30	72
TOTAL N (KN)		2119
CARGA MÉDIA (KN)		85
AREA RADIER (m ²)		204
qs = N/A (KN/m ²)		10,39

Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 23: Perfil individual do furo 01

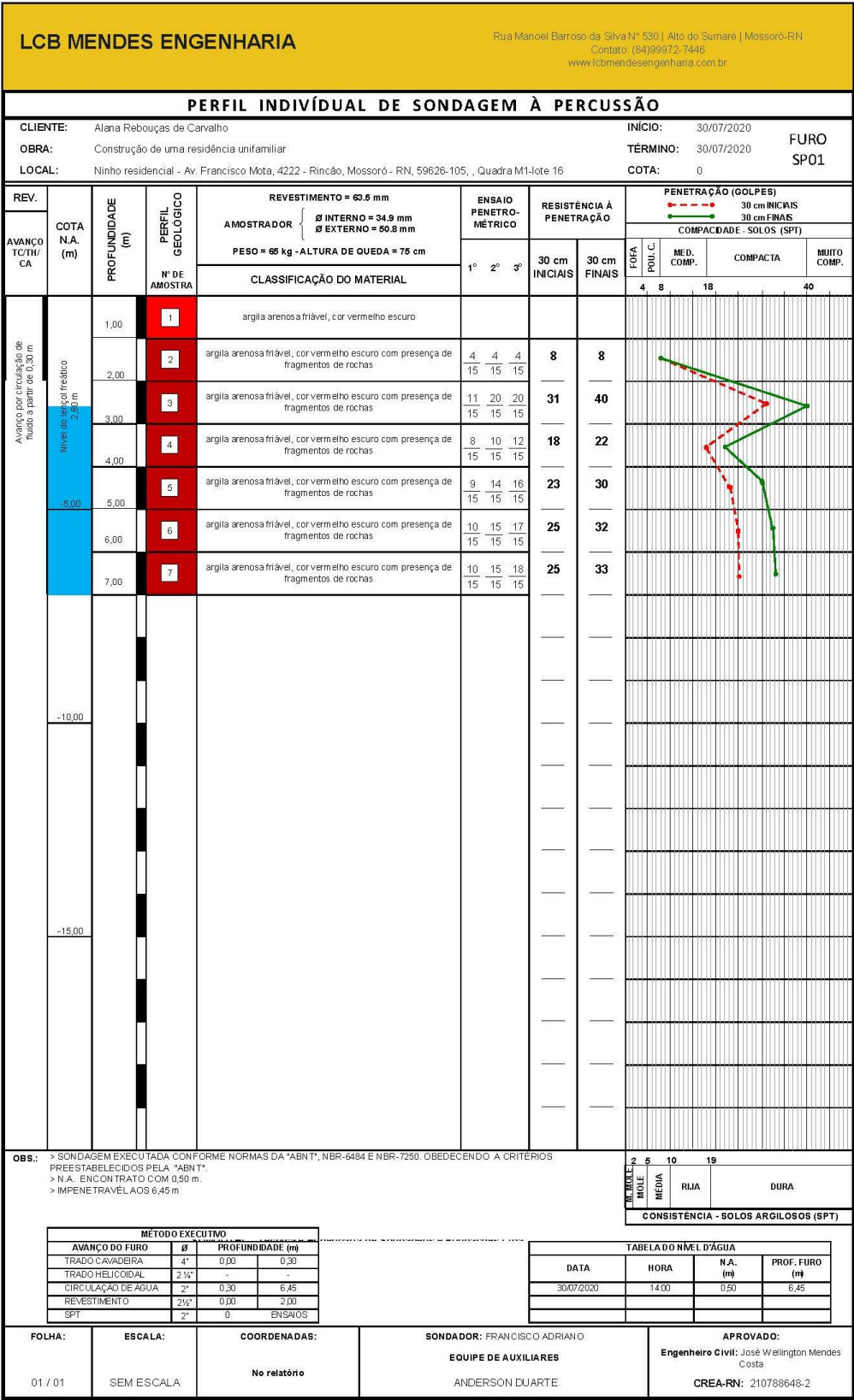


Figura 24: Perfil individual do furo 02

LCB MENDES ENGENHARIA										Rua Manoel Barroso da Silva N° 530 Alto do Sumaré Mossoró-RN Contato: (84)99972-7446 www.lcbmendesengenharia.com.br												
PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAGEM À PERCUSSÃO																						
CLIENTE:		Alana Rebouças de Carvalho								INÍCIO:		30/07/2020			FURO SP02							
OBRA:		Construção de uma residência unifamiliar								TÉRMINO:		30/07/2020										
LOCAL:		Ninho residencial - Av. Francisco Mota, 4222 - Rincão, Mossoró - RN, 59626-105, Quadra M1-lote 16								COTA:		0										
REV.	AVANÇO TC/TH/ CA	COTA N.A. (m)	PROFUNDIDADE (m)	PERFIL GEOLOGICO N° DE AMOSTRA	REVESTIMENTO = 60,5 mm AMOSTRADOR { Ø INTERNO = 34,9 mm Ø EXTERNO = 50,8 mm PESO = 65 kg - ALTURA DE QUEDA = 75 cm	ENSAIO PENETRO- MÉTRICO			RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO		PENETRAÇÃO (GOLPES) 30 cm INICIAIS 30 cm FINAIS COMPACTAÇÃO - SOLOS (SPT)											
						1º	2º	3º	30 cm INICIAIS	30 cm FINAIS	FOFA POU. C.	MED. COMP.	COMPACTA	MUITO COMP.								
					CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL																	
			1,00	1	argila arenosa friável, cor vermelho escuro																	
			2,00	2	argila arenosa friável, cor vermelho escuro com presença de fragmentos de rochas	10	16	20	26	36												
			3,00	3	argila arenosa friável, cor vermelho escuro com presença de fragmentos de rochas	7	11	10	18	21												
			4,00	4	argila arenosa friável, cor vermelho escuro com presença de fragmentos de rochas	7	10	13	17	23												
			5,00	5	argila arenosa friável, cor vermelho escuro com presença de fragmentos de rochas	9	16	16	25	32												
			6,00	6	argila arenosa friável, cor vermelho escuro com presença de fragmentos de rochas	11	15	18	26	33												
			7,00	7	argila arenosa friável, cor vermelho escuro com presença de fragmentos de rochas	12	15	20	27	35												
			-10,00																			
			-15,00																			
OBS.: > SONDAGEM EXECUTADA CONFORME NORMAS DA "ABNT", NBR-6484 E NBR-7250, OBEDECENDO A CRITÉRIOS PREESTABELECIDOS PELA "ABNT". > N.A. ENCONTRATO COM 0,50 m. > IMPENETRÁVEL AOS 6,45 m											<table border="1"> <tr> <td>2</td> <td>5</td> <td>10</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>MOLE</td> <td>MEDIA</td> <td>RIJA</td> <td>DURA</td> </tr> </table>				2	5	10	19	MOLE	MEDIA	RIJA	DURA
2	5	10	19																			
MOLE	MEDIA	RIJA	DURA																			
MÉTODO EXECUTIVO																						
AVANÇO DO FURO		Ø	PROFUNDIDADE (m)																			
TRADO CAVADEIRA		4"	0,00	0,30																		
TRADO HELICOIDAL		2 1/4"	-	-																		
CIRCULAÇÃO DE ÁGUA		2"	0,30	6,45																		
REVESTIMENTO		2 1/2"	0,00	2,00																		
SPT		2"	0	ENSAIOS																		
TABELA DO NÍVEL D'ÁGUA																						
DATA		HORA		N.A. (m)	PROF. FURO (m)																	
30/07/2020		15:40		0,50	6,45																	
FOLHA: 01 / 01																						
ESCALA: SEM ESCALA																						
COORDENADAS: No relatório																						
SONDADOR: FRANCISCO ADRIANO																						
EQUIPE DE AUXILIARES: ANDERSON DUARTE																						
APROVADO: Engenheiro Civil: José Wellington Mendes Costa																						
CREA-RN: 210788648-2																						

Fonte: Autoria própria (2020)

Será apresentado o procedimento de cálculo para o dimensionamento da tensão admissível, para isso, foram aplicadas correlações com N_{SPT} para determinar a capacidade de carga conforme o método de Terzaghi (1943).

Adotou-se uma sapata rígida que suportará o pilar com a carga média de 85 kN conforme a Tabela 6, com suas dimensões arbitradas igual a 1,00x1,00 m. Como pode ser visto no ensaio de SPT, o terreno contém a presença de lençol freático a partir da cota 2,80 m, com isso, adotou-se para o assentamento da fundação sapata a profundidade de 1 metro. Para garantir a eficiência e segurança nos cálculos foi adotado o número menor de golpes, referente ao N_{SPT} mínimo de cada camada, sendo esse valor igual a 8.

O primeiro passo para calcular a tensão admissível é determinar o modo de ruptura do solo. O solo em questão apresenta basicamente argila arenosa com presença de fragmentos de rocha, como medida de segurança, o modo de ruptura será localizado.

De acordo com Vesic (1975 apud AOKI & CINTRA, 2012, p. 23), o modo de ruptura localizado é de difícil caracterização, considerado um caso intermediário entre o módulo de ruptura geral e por puncionamento. Dessa forma, o dimensionamento da tensão de ruptura localizado será a média entre os valores encontrados nos módulos de ruptura geral e ruptura por puncionamento.

Primeiro será calculado o módulo de ruptura geral. Por se tratar de um solo argiloso o ângulo de atrito pode ser desconsiderado, logo a coesão pode ser calculada com a Equação 3.

$$c = 10 \times N_{SPT} \rightarrow c = 10 \times 8 = 80,00 \text{ KPa} \quad \text{Equação 3}$$

Como o ângulo de atrito é zero, os fatores de capacidade de carga são extraídos da Tabela 1.

$$\Phi = 0$$

$$N_c = 5,14$$

$$N_q = 1,00$$

$$N_\gamma = 0,00$$

Calcula-se os fatores de forma conforme as formulas da Tabela 2.

$$S_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} = 1 + \frac{1,00}{5,14} = 1 + 0,20 = 1,20$$

$$S_q = 1 + tg\Phi = 1 + 0 = 1,00$$

$$S_y = 0,60$$

Com esses dados calcula-se a ruptura geral utilizando a Equação 2.

$$\sigma_r \text{ geral} = C N_c S_c + q \cdot N_q S_q + \frac{1}{2} \gamma B N_y S_y \text{ (KPa)} \quad \text{Equação 2}$$

$$\sigma_r \text{ geral} = 80 \times 5,14 \times 1,20 + (21 \times 1,00) \times 1,00 \times 1,00 + \frac{1}{2} \times 17 \times 1,00 \times 0 \text{ (KPa)}$$

$$\sigma_r \text{ geral} = 514,44 \text{ KPa}$$

Para o cálculo da ruptura por punção a coesão e ângulo de atrito devem ser reduzidos conforme as Equações 4 e 5:

$$c' = \frac{2}{3} \times c \rightarrow c' = \frac{2}{3} \times 80 = 53,33 \text{ KPa} \quad \text{Equação 4}$$

$$\text{tg} \Phi' = \frac{2}{3} \times \text{tg} \Phi \rightarrow \Phi' = \text{arc tg} \left(\frac{2}{3} \times \text{tg} 0 \right) = 0,00 \text{)} \quad \text{Equação 5}$$

Já que o ângulo de atrito é igual a 0, os fatores de carga e forma permanecem os mesmos, com isso a ruptura por punção será calculada da seguinte forma:

$$\sigma_r \text{ punção} = C' N_c' S_c' + q \cdot N_q' S_q' + \frac{1}{2} \gamma B N_y' S_y' \text{ (KPa)}$$

$$\sigma_r \text{ punção} = 53,33 \times 5,14 \times 1,20 + (21 \times 1,00) \times 1,00 \times 1,00 + \frac{1}{2} \times 17 \times 1,00 \times 0,00 \times 0,60$$

$$\sigma_r \text{ punção} = 349,94 \text{ KPa}$$

Logo a ruptura localizada será a média entre a ruptura geral e a ruptura de punção.

$$\sigma_r \text{ local} = \frac{\sigma_r \text{ geral} + \sigma_r \text{ punção}}{2}$$

$$\sigma_r \text{ local} = \frac{514,44 + 349,94}{2} = 432,19 \text{ KPa}$$

De acordo com a NBR 6122 (2010) a tensão de ruptura deve ser reduzida por um fator de segurança para que ela se torne admissível. Conforme Equação 1 foi utilizado um fator de redução igual a 3.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{FS} \rightarrow \sigma_a = \frac{432,19}{3} = 144,06 \text{ KPa} = 1,44 \text{ Kg/cm}^2 \quad \text{Equação 1}$$

4.2 Dimensionamento da fundação em sapata

Depois do cálculo da tensão admissível do solo, foi possível realizar o dimensionamento das sapatas rígidas, por meio do roteiro de cálculo para cargas centradas e de acordo com o Método das Bielas. Foi elaborado uma planilha de cálculo utilizando o software *Microsoft Excel 2019* para auxiliar no dimensionamento das sapatas isoladas da residência. Além disso, as cargas de fundação foram majoradas em 10%, por estimativa do peso próprio da fundação.

Na Tabela 11 é apresentado a planilha elaborada no software *Microsoft Excel 2019* para o dimensionamento das sapatas, de acordo os métodos de cálculo de Alonso (2013).

Tabela 11: Dimensionamento da fundação sapata

SAPATA RÍGIDA MÉTODO DAS BIELAS	σ_{adm} (kgf/cm²) =	1,44		DIMENSIONAMENTO DAS SAPATAS									
	Fck (Mpa) =	25											
	Carga (KN) +10%	Pilar (cm)		DADOS DA SAPATA (cm)						ESFORÇO (KN)		Asd (cm²/m)	
b		a	B	L	d	H	h ₀	T _x	T _y	As _x	As _y		
S1	80,3	14	26	70	80	25	30	20	21,96	22,77	2,25	2,25	0,120
S2	83,6	14	26	70	85	25	30	20	24,98	23,71	2,25	2,25	0,128
S3	84,7	14	26	70	85	25	30	20	25,31	24,02	2,25	2,25	0,128
S4	60,5	14	26	60	75	25	30	20	15,01	14,09	2,25	2,25	0,094
S5	84,7	14	30	70	90	25	30	20	25,73	24,02	2,25	2,25	0,134
S6	74,8	14	30	70	90	25	30	20	22,73	21,21	2,25	2,25	0,134
S7, S8	57,2	14	26	60	75	25	30	20	14,19	13,32	2,25	2,25	0,094
S9	85,8	14	34	70	90	25	30	20	24,33	24,33	2,25	2,25	0,133
S10	96,8	14	26	75	90	25	30	20	31,37	29,9	2,25	2,25	0,147
S11	101,2	14	26	80	95	25	30	20	35,36	33,82	2,25	2,25	0,166
S12, S22	100,1	14	26	80	95	25	30	20	34,98	33,45	2,25	2,25	0,166
S13	110	14	30	80	100	25	30	20	38,99	36,76	2,25	2,25	0,174
S14	215,6	14	30	120	140	35	40	20	85,47	82,36	2,752	2,65	0,431
S15	111,1	14	30	80	100	25	30	20	39,38	37,13	2,25	2,25	0,174
S16	95,7	14	26	80	95	25	30	20	33,44	31,98	2,25	2,25	0,166
S17	122,1	14	26	90	105	25	30	20	48,84	46,99	2,25	2,25	0,210
S18	103,4	14	30	80	100	25	30	20	36,65	34,56	2,25	2,25	0,174
S19	127,6	14	30	90	110	25	30	20	51,69	49,11	2,25	2,25	0,218
S20	46,2	14	26	60	75	25	30	20	11,46	10,76	2,25	2,25	0,094
S21	85,8	14	26	75	90	25	30	20	27,81	26,5	2,25	2,25	0,147
S23	86,9	14	30	70	90	25	30	20	26,4	24,64	2,25	2,25	0,134
S24	80,3	14	30	70	90	25	30	20	24,4	22,77	2,25	2,25	0,134
S25	79,2	14	30	70	90	25	30	20	24,06	22,46	2,25	2,25	0,134

Fonte: Autoria própria (2020)

Após o dimensionamento das sapatas, como recomenda a NBR 6118 (2014) foi realizado a verificação da tensão de compressão diagonal do concreto (Tabela 12), isto é, a tensão de cisalhamento na ligação sapata-pilar e a verificação de recalque, onde o mesmo deve ser menor que 65 mm.

Tabela 12: Verificação da tensão de cisalhamento e recalque

Fck (Mpa) = 25	VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO							Recalque (mm)	Recalque < 65 mm
SAPATAS	CARGA (KN)	Sapata d (cm)	Pilar (cm)		σ_{sd} (Mpa)	σ_{Rd2} (Mpa)	$\sigma_{sd} < \sigma_{Rd2}$		
S1	80,3	25	14	26	0,57	4,34	OK	5,55	OK
S2	83,6	25	14	26	0,59	4,34	OK	5,43	OK
S3	84,7	25	14	26	0,60	4,34	OK	5,51	OK
S4	60,5	25	14	26	0,43	4,34	OK	4,46	OK
S5	84,7	25	14	30	0,55	4,34	OK	5,20	OK
S6	74,8	25	14	30	0,48	4,34	OK	4,59	OK
S7, S8	57,2	25	14	26	0,41	4,34	OK	4,21	OK
S9	85,8	25	14	34	0,51	4,34	OK	5,27	OK
S10	96,8	25	14	26	0,69	4,34	OK	5,94	OK
S11	101,2	25	14	26	0,72	4,34	OK	5,89	OK
S12, S22	100,1	25	14	26	0,71	4,34	OK	5,82	OK
S13	110	25	14	30	0,71	4,34	OK	6,08	OK
S14	215,6	35	14	30	0,99	4,34	OK	8,51	OK
S15	111,1	25	14	30	0,72	4,34	OK	6,14	OK
S16	95,7	25	14	26	0,68	4,34	OK	5,57	OK
S17	122,1	25	14	26	0,87	4,34	OK	6,42	OK
S18	103,4	25	14	30	0,67	4,34	OK	5,71	OK
S19	127,6	25	14	30	0,82	4,34	OK	6,41	OK
S20	46,2	25	14	26	0,33	4,34	OK	3,40	OK
S21	85,8	25	14	26	0,61	4,34	OK	5,27	OK
S23	86,9	25	14	30	0,56	4,34	OK	5,33	OK
S24	80,3	25	14	30	0,52	4,34	OK	4,93	OK
S25	79,2	25	14	30	0,51	4,34	OK	4,86	OK

Fonte: Autoria própria (2020)

Em seguida foi realizado o detalhamento das armaduras das sapatas, a NBR 6118 (2014) não estabelece armadura mínima de flexão para sapata, mas alguns autores recomendam utilizar 2,25 cm² como área de aço mínima. Seguindo a mesma norma, o espaçamento entre as barras

deve ficar entre 10 e 20 cm, por fim, foi adotado a espessura de 5 cm para o cobrimento da armadura, protegendo-a da agressividade ambiental e de intemperes.

Na Tabela 13 são apresentadas as armaduras empregadas nas sapatas em ambas as direções, com suas quantidades, diâmetros e espaçamento entre barras.

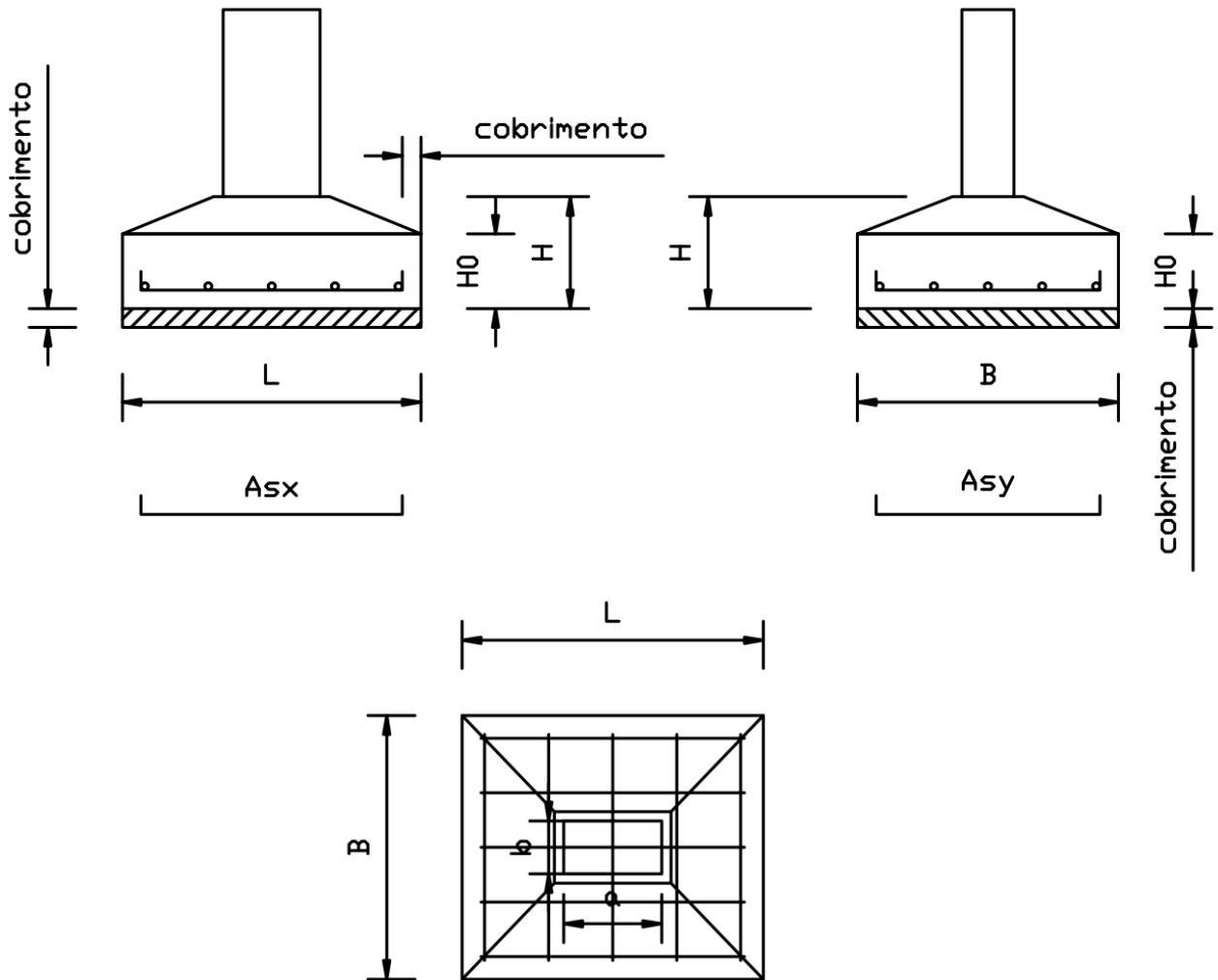
Tabela 13: Armadura empregadas nas sapatas

SAPATAS	Armadura na direção L		Armadura na direção B	
	Asx cm ² /m	Armadura	Asy cm ² /m	Armadura
S1	2,25	5 Φ 8 c/17	2,25	5 Φ 8 c/14
S2	2,25	5 Φ 8 c/18	2,25	5 Φ 8 c/14
S3	2,25	7 Φ 6,3 c/12	2,25	5 Φ 8 c/14
S4	2,25	5 Φ 8 c/16	2,25	5 Φ 8 c/12
S5	2,25	5 Φ 8 c/19	2,25	5 Φ 8 c/14
S6	2,25	5 Φ 8 c/19	2,25	5 Φ 8 c/14
S7, S8	2,25	5 Φ 8 c/16	2,25	5 Φ 8 c/12
S9	2,25	5 Φ 8 c/19	2,25	5 Φ 8 c/14
S10	2,25	5 Φ 8 c/19	2,25	5 Φ 8 c/16
S11	2,25	8 Φ 6,3 c/12	2,25	5 Φ 8 c/17
S12, S22	2,25	8 Φ 6,3 c/12	2,25	5 Φ 8 c/17
S13	2,25	8 Φ 6,3 c/13	2,25	5 Φ 8 c/17
S14	2,75	9 Φ 6,3 c/16	2,65	9 Φ 6,3 c/14
S15	2,25	8 Φ 6,3 c/13	2,25	5 Φ 8 c/17
S16	2,25	8 Φ 6,3 c/12	2,25	5 Φ 8 c/17
S17	2,25	8 Φ 6,3 c/13	2,25	5 Φ 8 c/19
S18	2,25	8 Φ 6,3 c/13	2,25	5 Φ 8 c/17
S19	2,25	8 Φ 6,3 c/14	2,25	5 Φ 8 c/19
S20	2,25	5 Φ 8 c/16	2,25	5 Φ 8 c/12
S21	2,25	5 Φ 8 c/19	2,25	5 Φ 8 c/16
S23	2,25	5 Φ 8 c/19	2,25	5 Φ 8 c/14
S24	2,25	5 Φ 8 c/19	2,25	5 Φ 8 c/14
S25	2,25	5 Φ 8 c/19	2,25	5 Φ 8 c/14

Fonte: Autoria própria

Na Figura 25 é apresentado um esquema demonstrando o significado das variáveis mencionadas nas tabelas acima. O detalhamento de todas as sapatas pode ser visto no Anexo C.

Figura 25: Detalhamento sapatas



Fonte: Autoria própria

4.2.1 Custos para construção da fundação sapata isolada

Após o detalhamento das sapatas, foi realizado o quantitativo de todos os materiais necessários para a execução da fundação, como o concreto, formas e aço. Nesse quantitativo também foi considerado os pilares do pavimento térreo e as vigas de fundação, sendo que os materiais dos pilares foram incorporados aos valores das sapatas. O aço foi quantificado em peso (kg), através do produto da área da seção nominal pelo peso específico do aço (7850 kg/m³). Na Tabela 14 é apresentado todos os dados quantificados para execução da sapata isolada em concreto armado.

Tabela 14: Materiais para fundação sapata

SAPATAS	Concreto (m ³)	Forma (m ²)	Aço (kg)	VIGAS	Concreto (m ³)	Forma (m ²)	Aço (kg)
S1	0,16	0,96	4,99	V1	0,48	4,09	8,45
S2	0,16	0,99	5,10	V2	0,84	7,24	14,96
S3	0,16	0,99	5,10	V3	0,58	4,96	10,25
S4	0,13	0,87	4,67	V4	0,92	7,85	16,22
S5	0,18	1,02	5,21	V5	0,26	2,22	4,58
S6	0,18	1,02	5,21	V6	0,25	2,18	4,50
S7, S8	0,13	0,87	4,67	V7	0,19	1,60	3,32
S9	0,18	1,02	5,21	V8	0,19	1,61	3,32
S10	0,18	1,05	5,32	V9	0,17	1,42	2,04
S11	0,20	1,11	5,52	V10	0,25	2,18	5,78
S12, S22	0,20	1,11	5,52	V11	0,18	1,52	3,15
S13	0,22	1,14	5,63	V12	0,19	1,59	3,28
S14	0,47	2,16	8,36	V13	0,22	1,92	5,09
S15	0,22	1,14	5,63	V14	0,19	1,66	3,44
S16	0,20	1,11	5,52	V15	0,22	1,92	3,98
S17	0,25	1,23	5,95	V16	0,23	1,96	5,18
S18	0,22	1,14	5,63	V17	0,22	1,91	3,95
S19	0,26	1,26	6,06	V18	0,29	2,45	4,52
S20	0,13	0,87	4,67	V19	0,40	3,32	7,86
S21	0,18	1,05	5,32	V20	0,25	2,10	4,96
S23	0,18	1,02	5,21	V21	0,21	1,73	3,20
S24	0,18	1,02	5,21	V22	0,24	1,99	3,68
S25	0,18	1,02	5,21	V23	0,30	2,53	5,98
				V24	0,09	0,72	1,34
				V25	0,28	2,32	4,28
				V26	0,07	0,59	1,09

Fonte: Autoria própria

Com os quantitativos dos materiais, foi realizado uma nova tabela com os preços das composições para realização de cada serviço. Foi utilizado os dados da tabela de composição do SINAPI 09/2020 Rio Grande do Norte. A Tabela 15 apresenta todos os dados das composições para execução da fundação.

Tabela 15: Orçamento fundação sapata

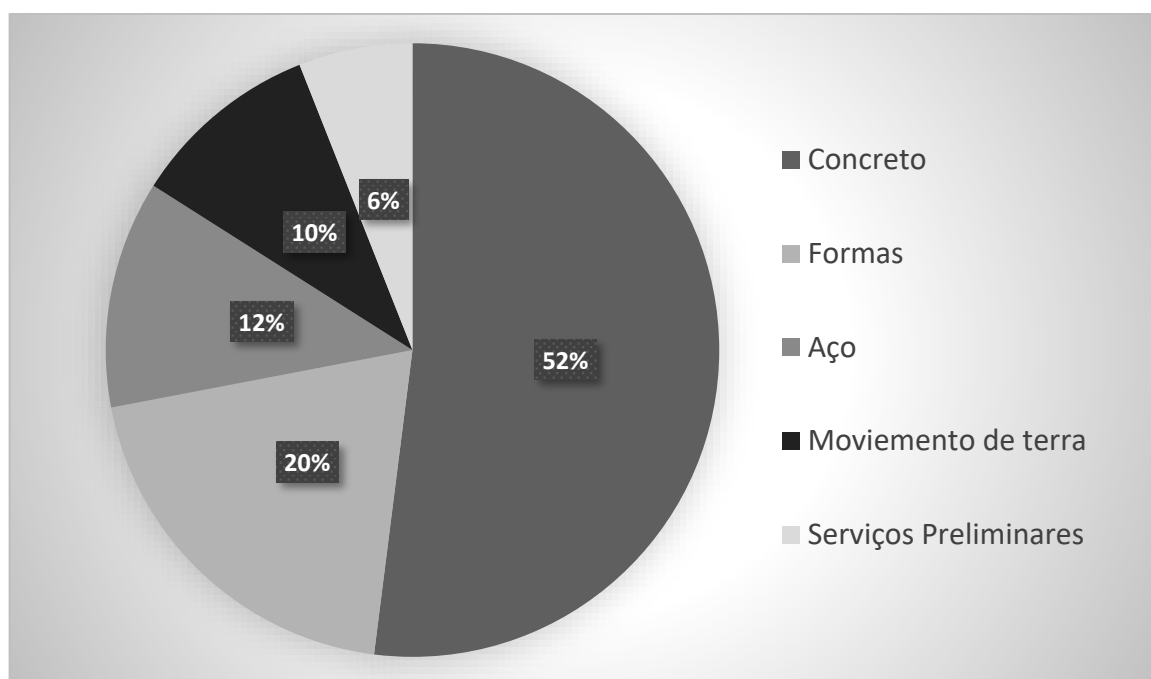
TABELA ORÇAMENTÁRIA FUNDAÇÃO SAPATA						
Código	Banco	Descrição	Und	Quant	Valor Unit (R\$)	Total (R\$)
SERVIÇOS PRELIMINARES						R\$ 1.665,12
73859/002	SINAPI	CAPINA E LIMPEZA MANUAL DE TERRENO	m²	204	1,40	285,60
99059	SINAPI	LOCACAO CONVENCIONAL DE OBRA, UTILIZANDO GABARITO DE TÁBUAS CORRIDAS PONTALETADAS A CADA 2,00M - 2 UTILIZAÇÕES. AF_10/2018	M	32	43,11	1379,52
MOVIMENTO DE TERRA						R\$ 2.519,79
93358	SINAPI	ESCAVAÇÃO MANUAL DE VALA COM PROFUNDIDADE MENOR OU IGUAL A 1,30 M. AF_03/2016	m³	25,73	69,63	1791,57
93382	SINAPI	REATERRO MANUAL DE VALAS COM COMPACTAÇÃO MECANIZADA. AF_04/2016	m³	21,18	30,34	642,60
94097	SINAPI	PREPARO DE FUNDO DE VALA COM LARGURA MENOR QUE 1,5 M, EM LOCAL COM NÍVEL BAIXO DE INTERFERÊNCIA. AF_06/2016	m²	16,53	5,18	85,62
INFRAESTRUTURA						R\$ 21.802,73
95241	SINAPI	LASTRO DE CONCRETO MAGRO, APLICADO EM PISOS OU RADIER, ESPESSURA DE 5 CM. AF_07/2016	m²	16,53	26,73	441,84
96620	SINAPI	LASTRO DE CONCRETO MAGRO, E=8 CM	m³	204	31,20	6364,80
94965	SINAPI	CONCRETO FCK = 25MPA, TRAÇO 1:2,3:2,7 (CIMENTO/ AREIA MÉDIA/ BRITA 1) - PREPARO MECÂNICO COM BETONEIRA 400 L. AF_07/2016	m³	12,24	434,06	5312,89
74157/004	SINAPI	LANCAMENTO/APLICACAO MANUAL DE CONCRETO EM FUNDACOES	m³	12,24	115,70	1416,16
92917	SINAPI	ARMAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO, EXCETO VIGAS, PILARES, LAJES E FUNDAÇÕES, UTILIZANDO AÇO CA-50 DE 8,0 MM - MONTAGEM. AF_12/2015	KG	263,29	11,54	3038,36
96535	SINAPI	FABRICAÇÃO, MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA PARA SAPATA, EM MADEIRA SERRADA, E=25 MM, 4 UTILIZAÇÕES. AF_06/2017	m²	45,38	115,22	5228,68
VALOR TOTAL =						R\$ 25.987,64

Fonte: Autoria própria

A fundação em radier já deixa a estrutura da residência pronta para iniciar a construção das alvenarias e outros elementos estruturais, com isso, para a fundação em sapata isolada chegar a mesma etapa do radier, deve-se realizar um contrapiso, por esse motivo foi considerado um lastro de concreto magro de 8 cm nos quantitativos. O cálculo para a composição escavação manual de vala foi obtido pelo somatório das áreas das sapatas, somado a uma folga de 40 cm nas extremidades, multiplicado pela profundidade de 1 metro, ainda foi considerado as escavações das vigas de fundação. Já o item reaterro manual de valas com compactação mecanizada foi obtido pela diferença entre o volume de escavação de valas e o volume do concreto das sapatas e vigas.

Com isso, o custo para executar a fundação sapata da residência de 170 m² foi calculado em R\$ 25.987,64 esse valor aponta um custo por metro quadrado de R\$ 152,87/m². Os principais serviços e materiais necessários para execução das sapatas com seus respectivos percentuais de influência são apresentados na Figura 26.

Figura 26: Influência dos serviços e materiais na fundação sapata



Fonte: Autoria própria

4.3 Dimensionamento da fundação em radier

Para o dimensionamento do radier, foi utilizado o modelo baseado na hipótese de Winkler para determinar os esforços na fundação. Para isso, foi necessário calcular o coeficiente de reação vertical. Esse coeficiente simula a rigidez do solo como se fosse molas no sistema de grelha. Mas antes de determinar o coeficiente de reação vertical (K_v), é necessário calcular a pressão de contato no solo (q_s) utilizando a Equação 24 e a estimativa de recalque (W), com a Equação 25, conforme a seguir:

$$q_s = \frac{\Sigma V}{A} \rightarrow q_s = \frac{2119}{204} = q_s = 10,39 \text{ kN/m}^2 \quad \text{Equação 24}$$

$$W = 27 \times \frac{qB^{0,7}}{N_{spt}} \rightarrow W = 27 \times \frac{(10,39 \times 8,85^{0,7})}{8} = W = 1,61 \text{ cm}^2 \quad \text{Equação 25}$$

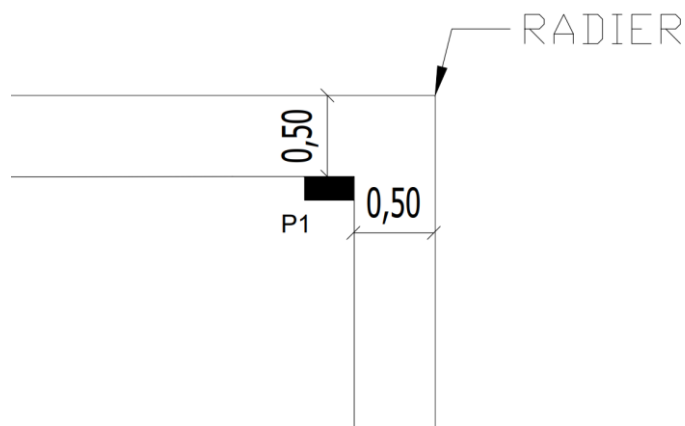
Após calcular a pressão de contato do solo (q_s) e a estimativa de recalque (W) pode-se determinar o coeficiente de reação vertical (K_v), com a Equação 23:

$$K_v = \frac{q_s}{W} \rightarrow K_v = \frac{10,39}{16,1} = K_v = 0,645 \text{ kgf/cm}^3 \quad \text{Equação 23}$$

O coeficiente de reação vertical no valor de 0,645 kgf/cm³ e a tensão admissível no valor de 1,44 kgf/cm² serão aplicados no programa de cálculo estrutural *Eberick 2020* para dimensionar a fundação radier.

O radier envolve todos os pilares e paredes da residência, logo, todas as cargas da edificação foram lançadas sobre ele, como os pilares que nascem no pavimento gerando cargas concentradas e as paredes com cargas lineares. Com isso, existem elevadas concentrações de momentos fletores e esforços de punção nas bordas do radier, por esse motivo, foi adotado um aumento de 50 cm nas extremidades como pode ser visto na Figura 27.

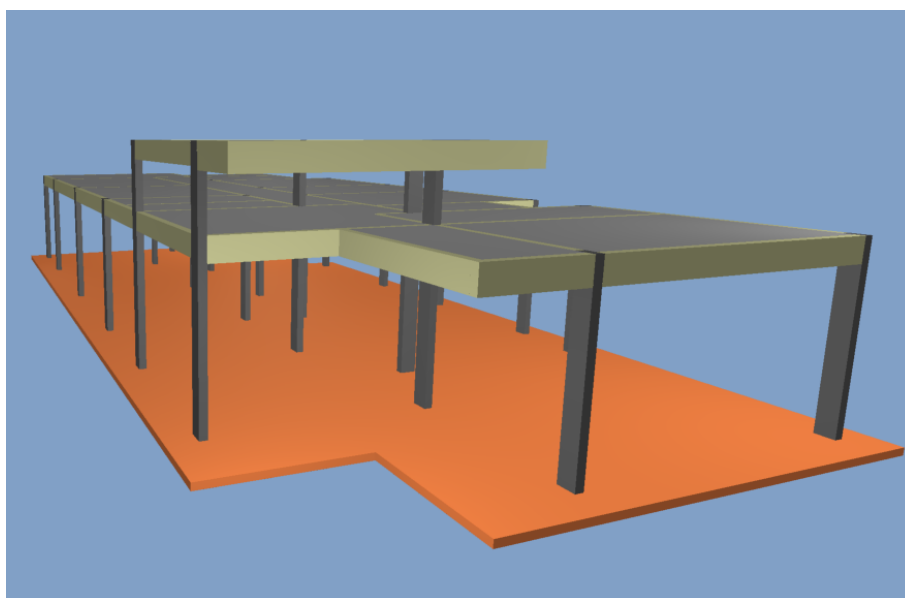
Figura 27: Extremidade da fundação radier



Fonte: Autoria própria

A princípio foi adotado 16 cm para altura do radier, como recomenda a NBR 6118 (2007). Após realizar diversos processos no lançamento do radier no programa de cálculo, foi possível obter resultados satisfatórios para o detalhamento da fundação. A espessura mínima atribuída inicialmente de 16 cm em conjunto do concreto de 25 Mpa, foi suficiente para obter os melhores resultados contra os momentos fletores e esforços de punção. Na Figura 28 pode ser visto como ficou o lançamento da fundação radier.

Figura 28: Lançamento da fundação radier



Fonte: Autoria própria

O programa *Eberick 2020* detalhou uma malha inferior de CA-60 com diâmetro de $\Phi 4,3$ mm e espaçamento de 10 x 10 cm e uma malha superior CA-60 de $\Phi 4,3$ mm com espaçamento 8 x 8 cm. Além disso, foi adicionado um conjunto de armaduras nos pontos dos pilares com diâmetro de 8,00 mm e espaçamento de 12,5 cm (Anexo D).

4.3.1 Custos para construção da fundação radier

Após o detalhamento da fundação radier, é preciso quantificar todos os materiais necessários para a execução da fundação, como o concreto, tijolo e aço. Na Tabela 16 é apresentado o quantitativo de materiais para execução da fundação radier.

Tabela 16: Materiais para fundação radier

RADIER		Espessura = 16 cm		
Concreto (m³)	Aço (Kg)	Formas (m²)		
32,65	728,51	18,60		
DETALHAMENTO DA ARMADURA				
TIPO	Bitola (mm)	Kg/m²	AREA (m²)	Peso + 10% (Kg)
CA60	4,3	2,2	204,083	493,88
TIPO	Bitola (mm)	Kg/m	Comprimento (m)	Peso + 10% (Kg)
CA50	8	0,395	540	234,63

Fonte: Autoria própria

Depois de realizar o quantitativo de materiais foi desenvolvida uma nova tabela com os preços das composições para realização de cada serviço da fundação. Foram utilizados os dados do SINAPI 09/2020 Rio Grande do Norte e SEINFRA 026 Ceará. A Tabela 17 apresenta todos os custos das composições para execução do radier.

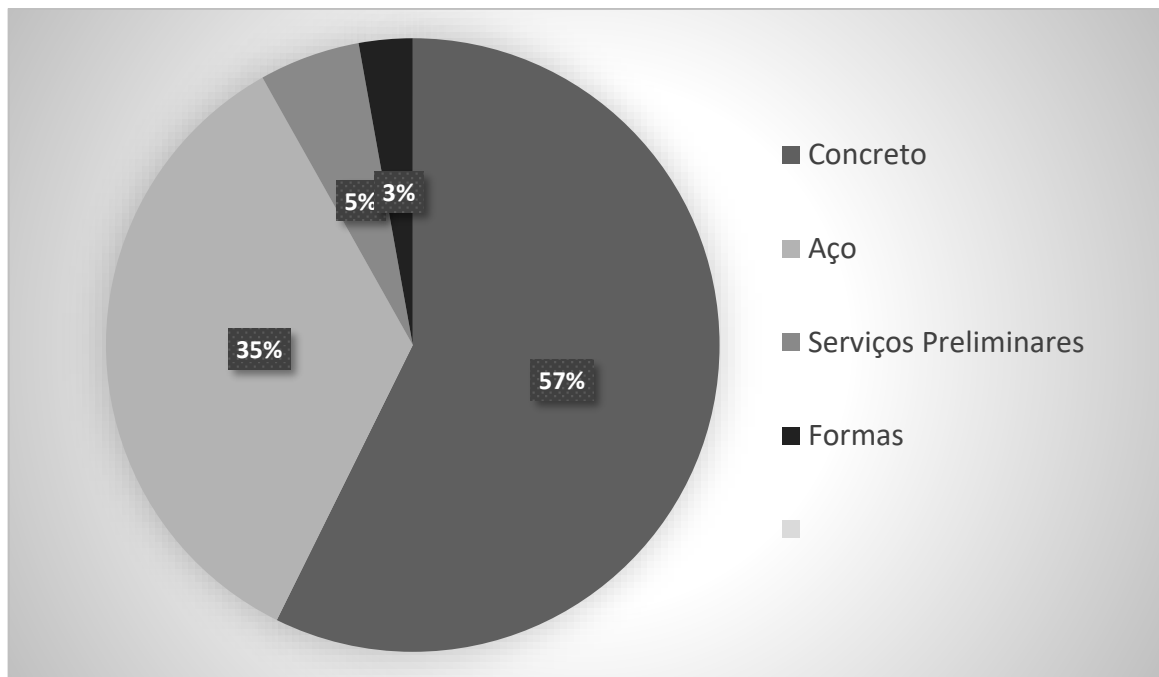
Tabela 17: Orçamento fundação radier

TABELA ORÇAMENTÁRIA FUNDAÇÃO RADIER						
Código	Banco	Descrição	Und	Quant.	Valor Unit (R\$)	Total (R\$)
SERVIÇOS PRELIMINARES						R\$ 1.665,12
73859/002	SINAPI	CAPINA E LIMPEZA MANUAL DE TERRENO	m ²	204	1,40	285,60
99059	SINAPI	LOCACAO CONVENCIONAL DE OBRA, UTILIZANDO GABARITO DE TÁBUAS CORRIDAS PONTALETADAS A CADA 2,00M - 2 UTILIZAÇÕES. AF_10/2018	M	32	43,11	1379,52
MOVIMENTO DE TERRA						
94342	SINAPI	ATERRO C/COMPACTAÇÃO MECÂNICA E CONTROLE, MAT. DE AQUISIÇÃO	m ³	-	-	-
INFRAESTRUTURA						R\$ 29.653,40
C4592	SEINFRA	FORMA TABUA P/ CONCRETO EM FUNDAÇÃO RADIER C/ REAPROVEITAMENTO 3X	m ²	18,6	47,6	885,36
94965	SINAPI	CONCRETO FCK = 25MPA, TRAÇO 1:2,3:2,7 (CIMENTO/ AREIA MÉDIA/ BRITA 1) - PREPARO MECÂNICO COM BETONEIRA 400 L. AF_07/2016	m ³	32,65	434,06	14172,05
94965	SINAPI	ARMAÇÃO DE LAJE DE UMA ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO EM UMA EDIFICAÇÃO TÉRREA OU SOBRADO UTILIZANDO AÇO CA-60 DE 4,2 MM - MONTAGEM. AF_12/2015	KG	728,51	14,85	10818,38627
94965	SINAPI	LANCAMENTO/APLICACAO MANUAL DE CONCRETO EM FUNDACOES	m ³	32,65	115,7	3777,6
VALOR TOTAL =						R\$ 31.318,52

Fonte: Autoria própria

O valor total para construir o radier da residência de 170 m² é de R\$ 31.318,52, o que indica o preço do metro quadrado no valor de R\$ 184,23/m². Os principais serviços e matérias necessários para execução do radier com seus respectivos percentuais de influência são apresentados na Figura 29.

Figura 29: Influência dos serviços e materiais na fundação radier

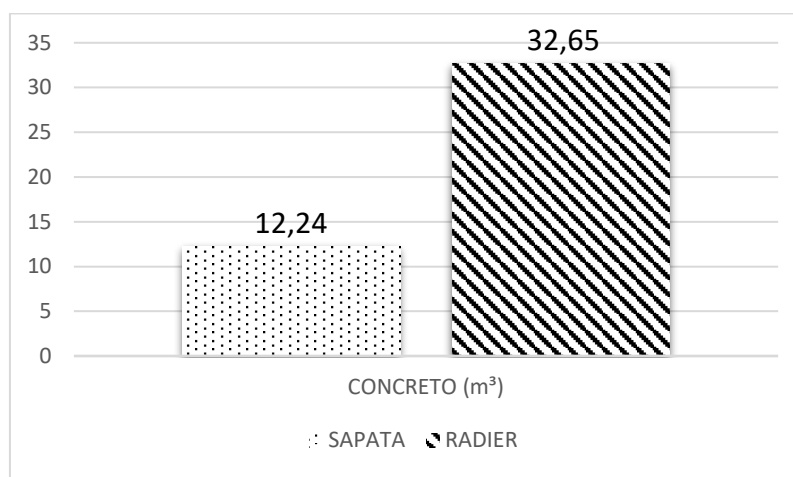


Fonte: Autoria própria

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Para realizar a comparação dos resultados, foram criados gráficos com os dados dos principais serviços e materiais utilizados para construção de ambas as fundações. Esses serviços e materiais são os que causam maior impacto no processo construtivo das fundações idealizadas para a residência específica em estudo.

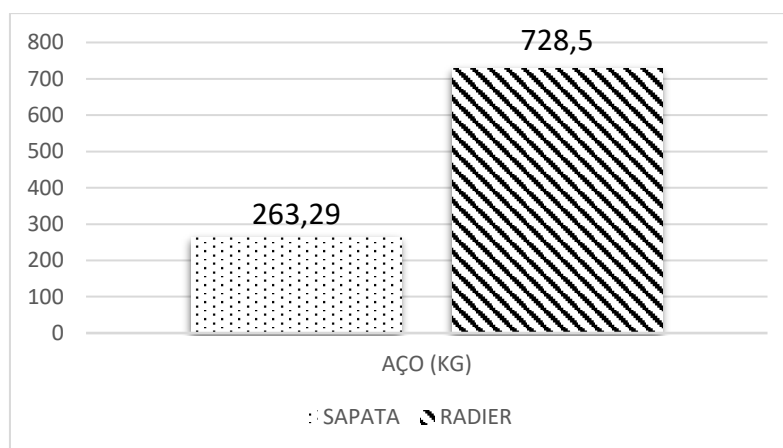
Figura 30: Consumo de concreto



Fonte: Autoria própria

Como pode ser visto na Figura 30 a fundação radier apresenta um consumo de concreto mais elevado que a fundação sapata, isso acontece pois o radier é uma laje apoiada ao solo, logo, deve-se ocupar toda a área da edificação. Já a fundação sapata situa-se apenas nos pontos dos pilares e no comprimento da alvenaria, consumindo menos concreto.

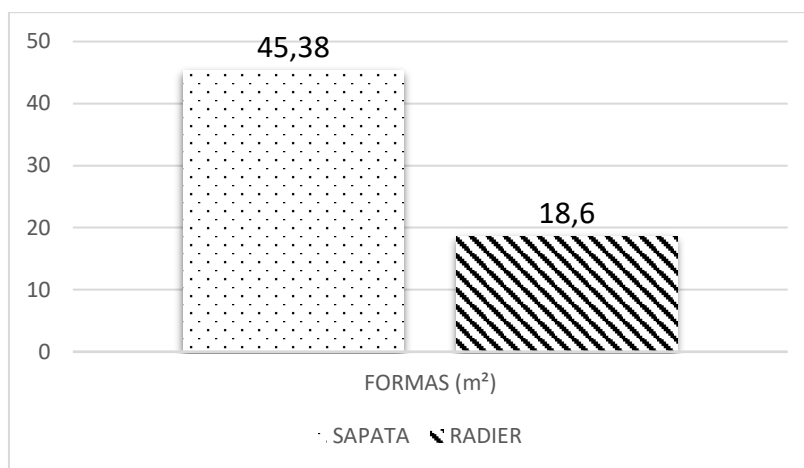
Figura 31: Consumo de aço



Fonte: Autoria própria

Verifica-se na Figura 31 que a fundação radier mostrou maior consumo de aço, acontece que, o radier deve suportar elevados esforços de punção e flexão aproximado de todos os pilares, com isso é necessário maior quantidade de armadura para combater tais esforços. Já as sapatas, por se tratar de uma estrutura mais rígida e com função de receber a carga de um único pilar, possibilita uma menor quantidade de armaduras.

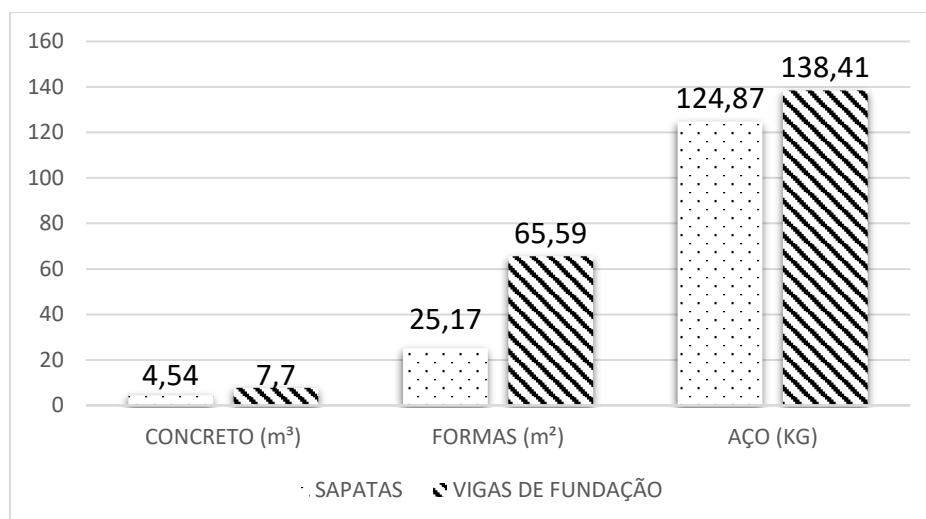
Figura 32: Consumo de formas



Fonte: Autoria própria

Como pode ser visto na Figura 32 a fundação sapata apresenta maior consumo de formas, isso ocorre devido as vigas baldrame que é o elemento que mais consumiu material no processo construtivo da fundação sapata. O gráfico da Figura 33 mostra a comparação do consumo de materiais entre as sapatas e as vigas de fundação.

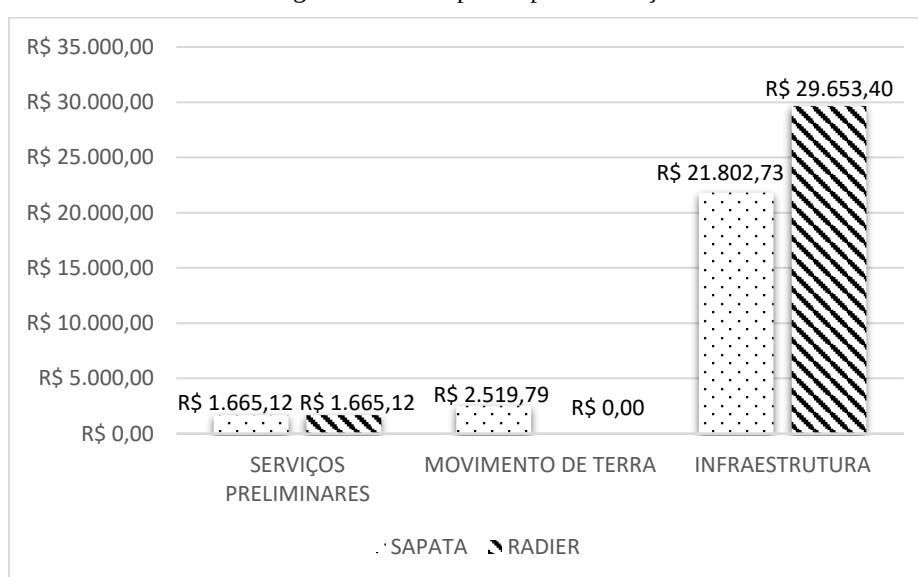
Figura 33: Materiais da sapata e viga de fundação



Fonte: Autoria própria

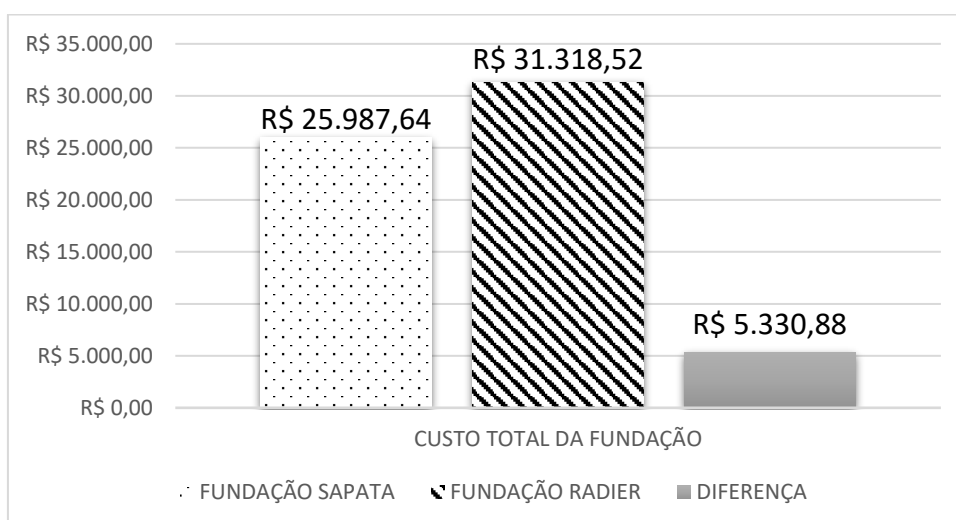
A Figura 34 apresenta os custos para execução das fundações por etapa de serviços, sendo elas, serviços preliminares, movimento de terra e infraestrutura. Nota-se que a fase que apresenta maior custo na obra é a infraestrutura, isso acontece pois é nessa etapa que ocorre o maior consumo de materiais, como o aço, concreto e formas, além do custo da mão de obra especializada. O custo da etapa de serviços preliminares é o mesmo para ambas as fundações, já para os serviços de movimentação de terra é necessário apenas para a fundação sapata, pois o processo construtivo difere da fundação radier.

Figura 34: Custo por etapa de serviço



Fonte: Autoria própria

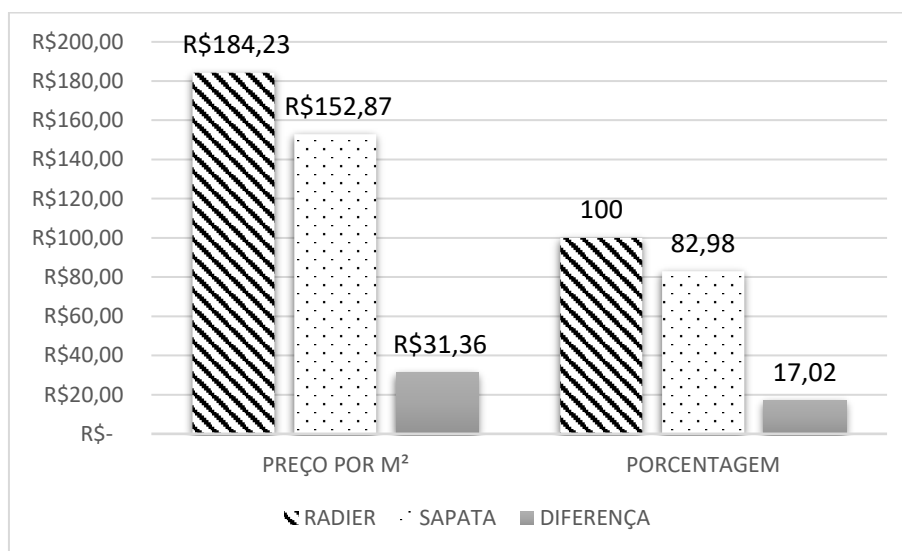
Figura 35: Custo total das fundações



Fonte: Autoria própria

Como mostrado na Figura 35, a fundação em radier apresentou um custo total de R\$ 31.318,52, valor este superior ao custo da fundação em sapata que é de R\$25.987,64, totalizando uma diferença de preço no valor de R\$5.330,88 entre as fundações.

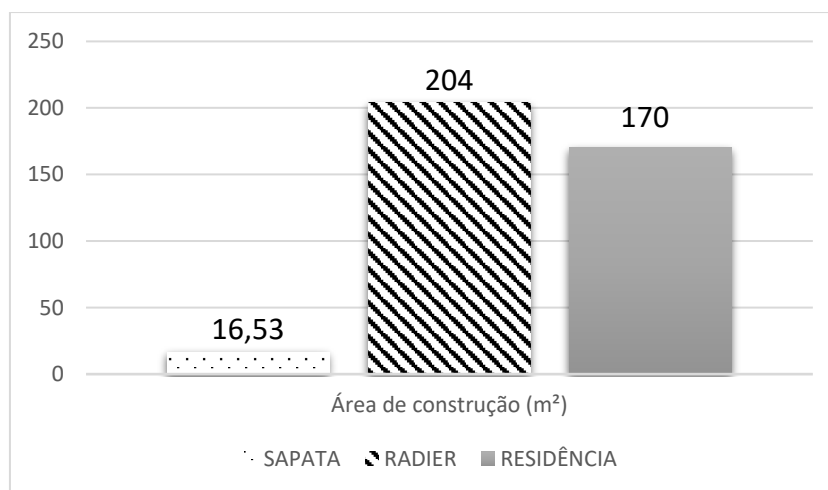
Figura 36: Custo por metro quadrado



Fonte: Autoria própria

Conforme a Figura 36, o custo por metro quadrado da fundação radier para o caso estudado foi de R\$ 184,23, já a fundação em sapata apresentou um custo de R\$ 152,87, diferença de 17,02% por metro quadrado da construção.

Figura 37: Área de construção



Fonte: Autoria própria

Considerando apenas essa análise, não seria recomendando a execução da fundação em radier, pois como pode ser visto na Figura 37 o somatório das áreas das sapatas equivale a 16,53m², valor distante a metade da área da construção da residência, que é de 85 m².

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram abordados aspectos referentes as características do solo, características de cargas, dos tipos de fundações rasas, dimensionamento das sapatas e radier, verificações, detalhamento e análise do custo de execução.

Foi possível realizar o dimensionamento das sapatas por meio de cálculos de acordo com o método das bielas e da fundação radier através de software de cálculo estrutural, seguindo recomendações normativas, onde ambas as fundações garantem estabilidade e segurança para residência estudada.

Ao se comparar os resultados obtidos por tabelas orçamentárias, verificou-se que a fundação em sapata teve um custo de execução inferior a fundação em radier, representando uma diferença percentual de 17,02% para edificação específica. Isso ocorre pois o radier consome 277% e 267% mais aço e concreto respectivamente em comparação a fundação do tipo sapata.

Os resultados demonstram que para a edificação estudada em Mossoró, a fundação em radier teve um custo total de R\$ 31.318,52, valor superior ao custo da fundação em sapata que foi de R\$25.987,64. Pode-se concluir que neste caso, torna-se mais viável economicamente a execução da fundação em sapata, por proporcionar a economia de R\$5.330,88. Mas

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar a mesma comparação entre as duas fundações, mas para uma edificação de maior porte, com cargas superiores as da residência adotada.

Outro estudo interessante, seria uma análise custo x benefícios das mesmas fundações, considerado fatores como o número de funcionários, tempo de execução, necessidade de mão-de-obra especializada, entre outros.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações**. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios**. Rio de Janeiro, 1983.
- ALONSO, U.R. **Exercícios de fundações**, 2. Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.
- ALONSO, U. R. **Exercício de Fundações**. 3. Ed. São Paulo: Editora Edgard, 2013.
- BASTOS, P.S. **Notas de aula de sapatas de fundação**. Curso de graduação em engenharia civil. Universidade Estadual Paulista. São Paulo, 2016.
- BOTELHO, M.R. **Princípios da mecânica dos solos e fundações para construção civil**, 2 Ed. São Paulo. Edgard Blücher, 2016
- BRITO, J. L. W. **Fundações de edifício**. São Paulo: Epusp, 1987.
- CAPUTO, H. P **Mecânica dos solos e suas aplicações**, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1982.
- CARVALHO, M. D. **Análise comparativa entre fundações superficial do tipo sapata isolada e radier liso em obra de edificação**. Faculdade Santa Rita – FaSaR. Conselheiro Lafaiete, 2015.
- CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson; ALBIERO, José Henrique. **Fundações Diretas: projeto geotécnico**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2014.
- DÓRIA, L.E.S. **Projeto de Estrutura de Fundação em concreto do tipo radier**. 2007. Tese (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Centro de tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió.
- FERREIRA, R. A. **Estudo comparativo de técnica e de custo entre fundações rasas: Estudo de caso entre radier e sapata isolada**. Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG. Varginha, 2017.
- GODOY, N. S.; TEIXEIRA, A.T. **Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas. Fundação: Teoria e Prática**. Hachich et al. (eds), Ed. Pini Ltda., São Paulo, 1996.
- GONÇALVES, H.H; MARINHO, F.A; FUTAI, M.M. **Notas de aula de mecânica dos solos e fundações**. Curso de graduação em engenharia civil. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

HACHICH, Waldemar. **Fundações: teoria e prática**. São Paulo: Pini, 1998.

JOPPERT, Ivan Jr.. **Fundações e Contensões de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução**. São Paulo: PINI, 2007. 221 p.

PACHECO, Thiago Mendonça. **Análise comparativa de custos entre o radier e fundação em sapata corrida utilizadas em obras de padrão popular de quatro pavimentos no município de feira de Santana, Bahia. 2010**. 91 p. Monografia – Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia, 2010.

PERLOFF, W.H.; BARON, W. **Soil mechanics: principles and applications**. Jonh Wiley and Sons Co. 745p, New York, 1976.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3ª edição. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2013.

REBELLO, Yopanan. C. P. **Fundações: Guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. 4. Ed. São Paulo: Editora ZIGURATE, 2008.

RIBEIRO, Marco Antônio Amâncio. **Análise comparativa de métodos utilizados no cálculo da interação solo-radier**. 2010. 101 p. Monografia – Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SANTANA, Osvaldo Soares de. **Fundações rasas para residências populares**. 2011. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2011.

SKEMPTON, A. W.; MACDONALD, D.H. Allowable Settlements of buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers Design and Construction**, London, 1956.

TIZOTT, R.M. **Comparação do custo benefício entre dois tipos de fundações: sapata rígida e radier**. Dissertação (Graduação em engenharia civil) – Universidade regional do noroeste do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2013.

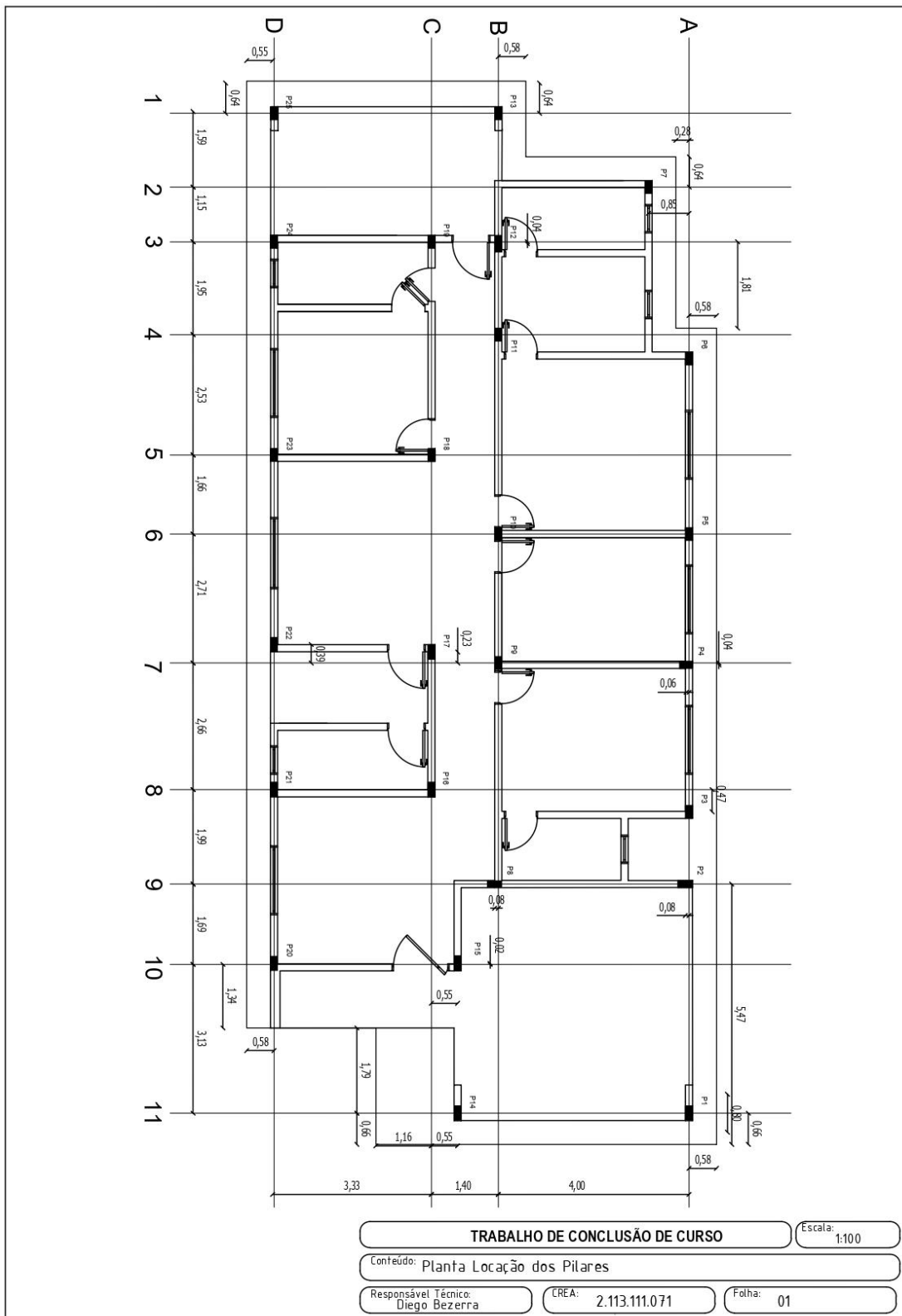
VELLOSO, Dirceu A.. Lopes, Francisco R.. **Fundações, Vol. 1**. Oficina de Textos. São Paulo, 2004.

VELLOSO, D.A: LOPES, F.R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**. São Paulo. Oficina de textos, 2010.

VELLOSO, Dirceu Alencar; LOPES, Francisco de Rezende Waldemar. **Fundações: Critérios de Projeto – Fundações Superficiais**, Nova Edição – São Paulo – 2011. Ed. Oficina de Textos.

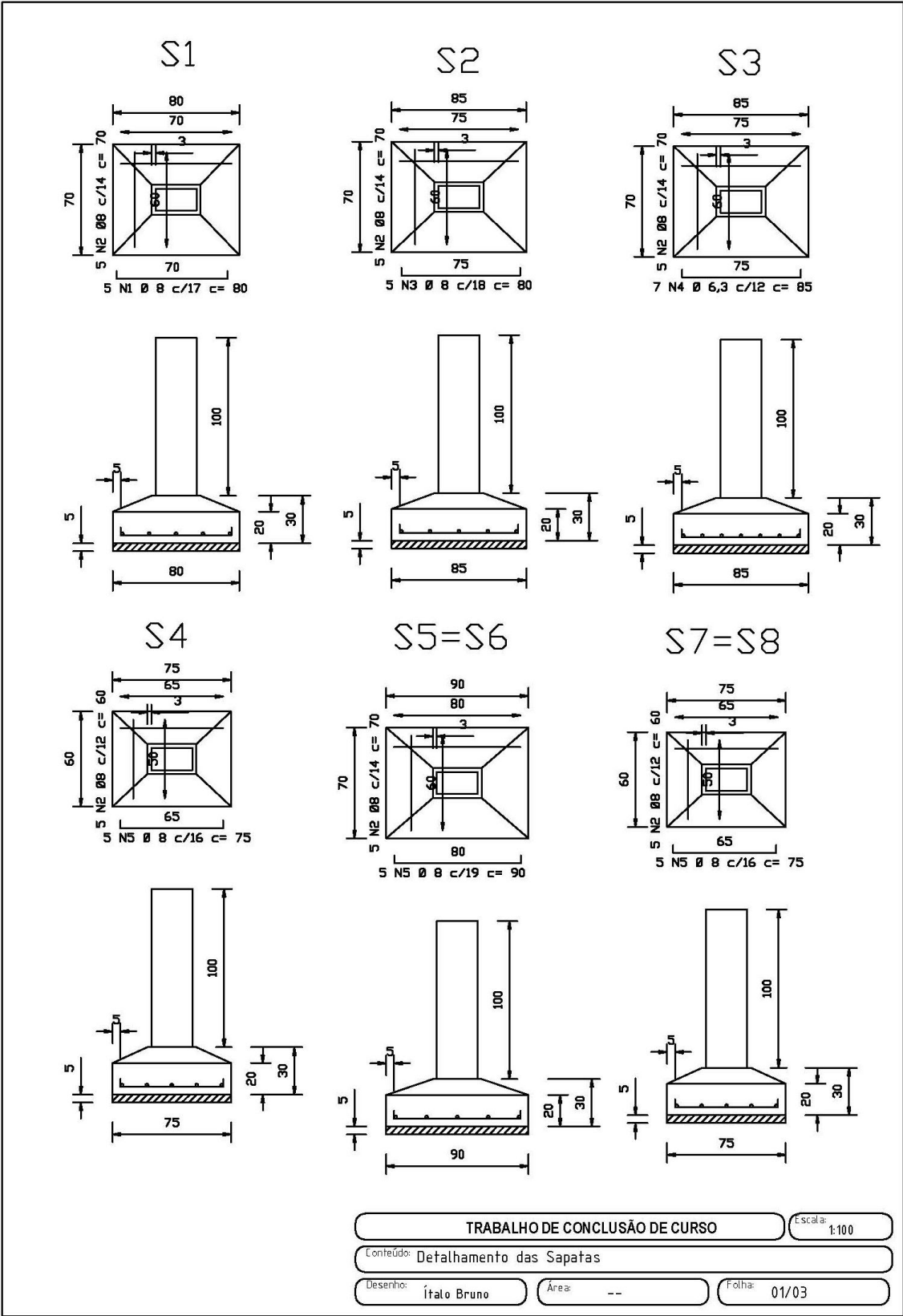


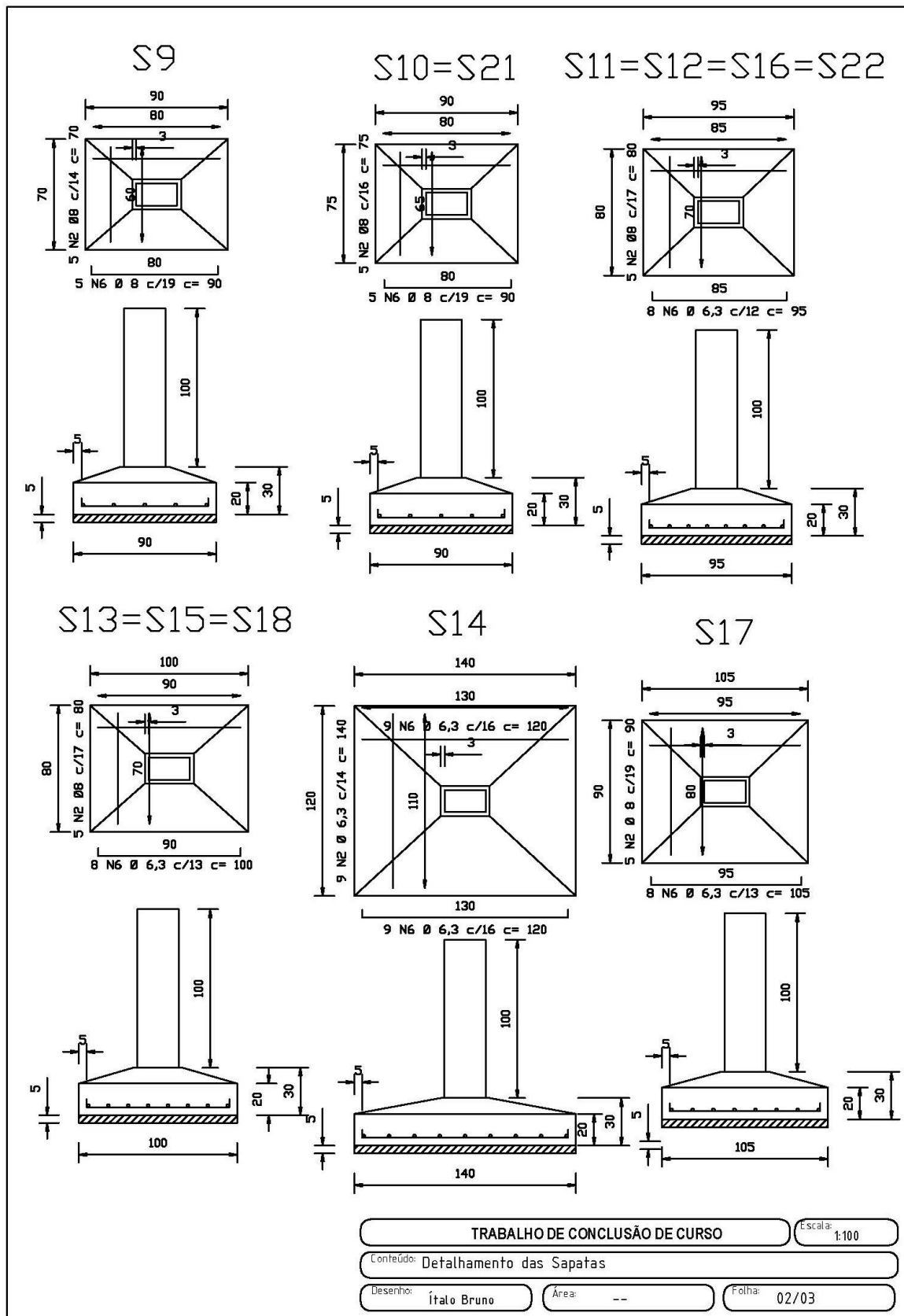
ANEXO B – LOCAÇÃO DOS PILARES



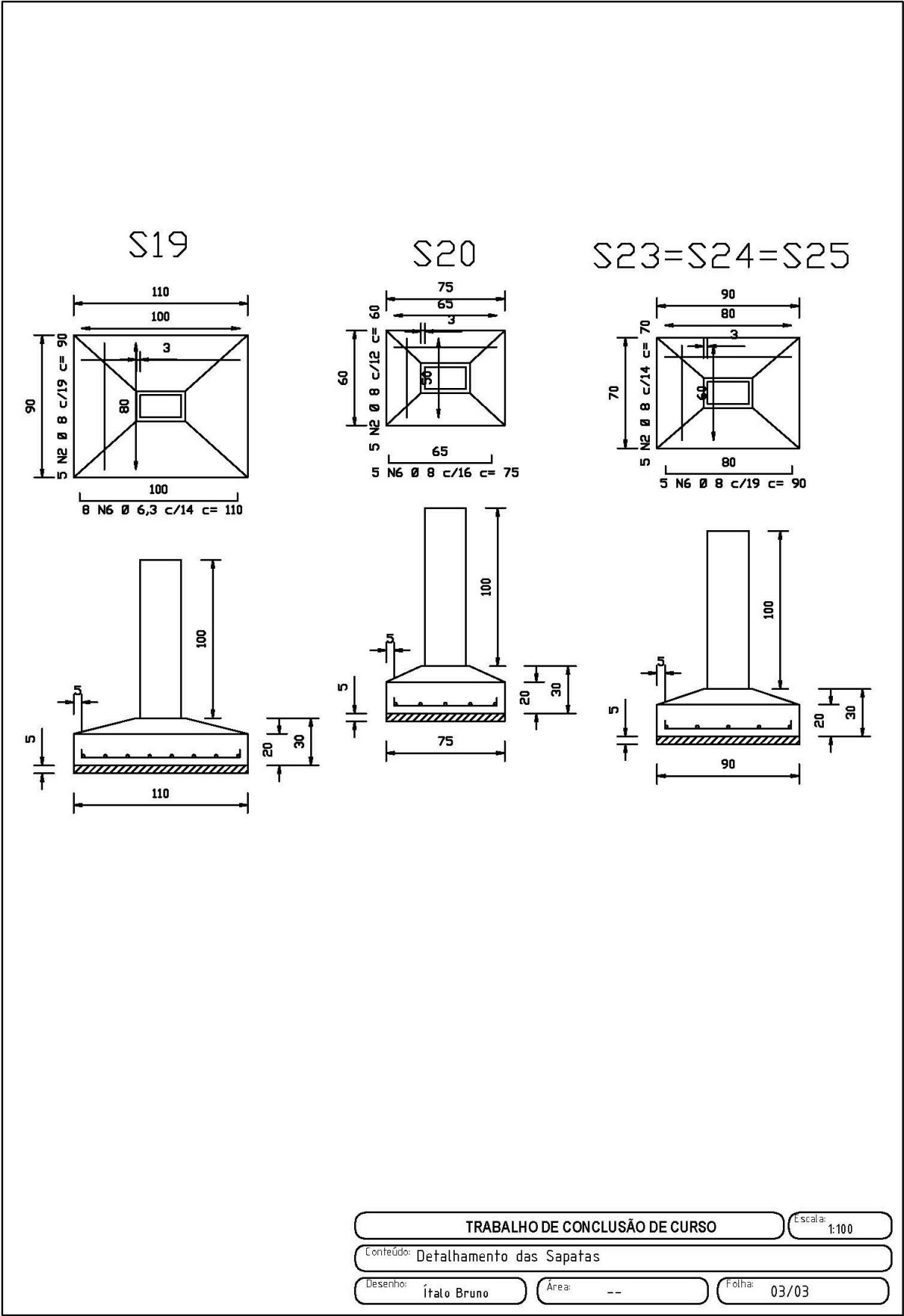
Fonte: Autoria própria

ANEXO C – DETALHAMENTO DAS SAPATAS

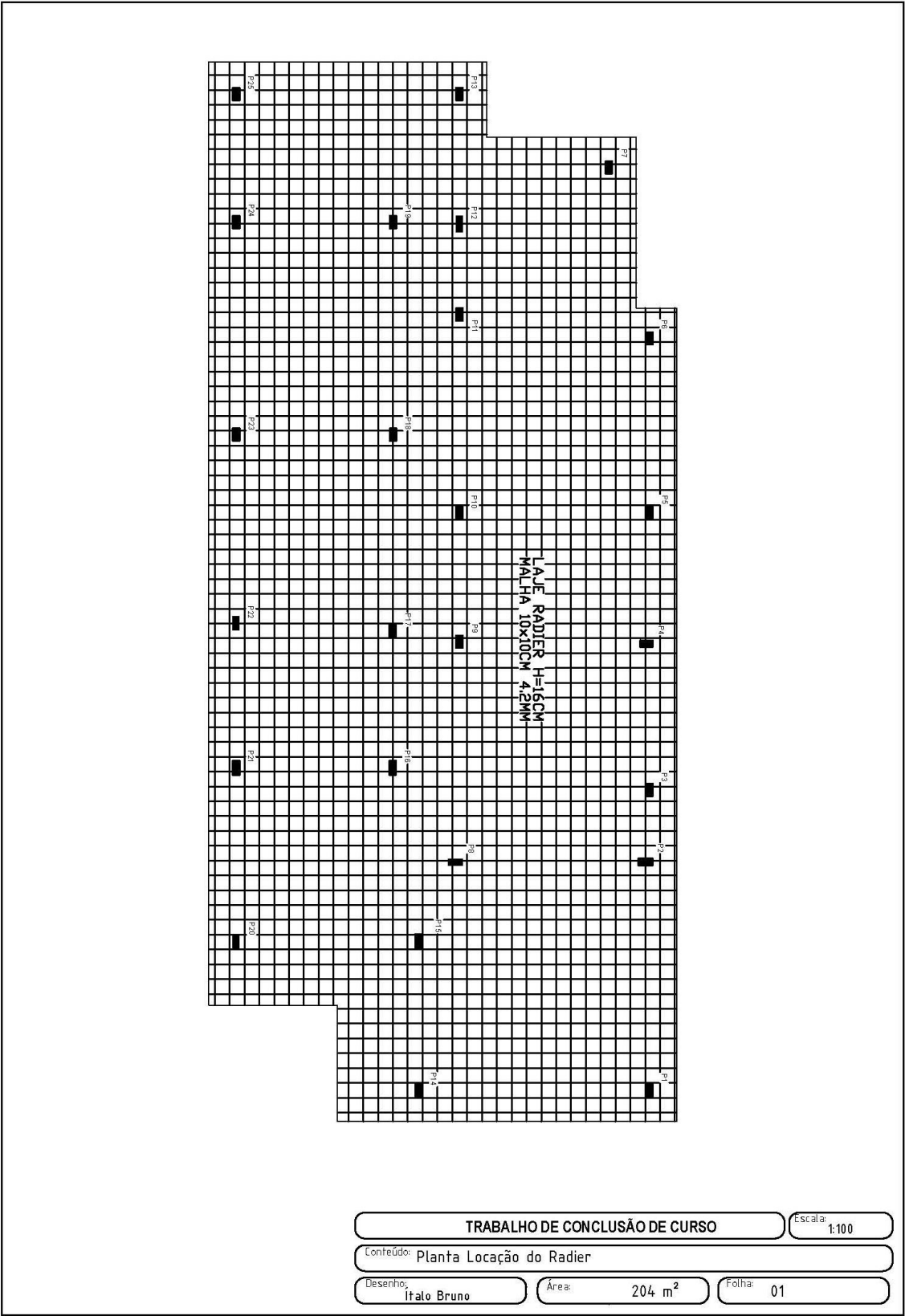




Fonte: Autoria própria



ANEXO D – LOCAÇÃO DA FUDAÇÃO EM RADIER



Fonte: Autoria própria