

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS
ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Daniel Moraes Lana de Oliveira

**VALIDAÇÃO DE PROGRAMAS COMPUTACIONAIS PARA CÁLCULO DE
TENSÕES DE CONTATO EM SAPATAS ISOLADAS**

Belo Horizonte
2025

Daniel Moraes Lana de Oliveira

**VALIDAÇÃO DE PROGRAMAS COMPUTACIONAIS PARA CÁLCULO DE
TENSÕES DE CONTATO EM SAPATAS ISOLADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia da
Universidade Federal de Minas Gerais, como
requisito parcial à obtenção do título de
Especialista em Estruturas.

Prof. Orientador: Élvio Mosci Piancastelli

Belo Horizonte

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA/TCC

:Aos **doze dias** do mês de **fevereiro de 2025**, às 19:30h, em ambiente virtual, o estudante **Daniel Moraes Lana de Oliveira**, matrícula 2022682712, defendeu o Trabalho intitulado “**Validação de Programas Computacionais para Cálculo de Tensões de Contato em Sapatas Isoladas**”.

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, após finalizada a apresentação do aluno passaram para a fase de arguição. Os membros da banca consideraram o aluno aprovado e assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: (80)

Orientador(a): Prof. Élvio Mosci Piancastelli

Nota: (70)

Examinador(a): Profa. Jacqueline Maria Flor



Documento assinado eletronicamente por **Elvio Mosci Piancastelli, Professor do Magistério Superior**, em 13/02/2025, às 13:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jacqueline Maria Flor, Professora do Magistério Superior**, em 13/02/2025, às 13:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3963796** e o código CRC **8DEA23EB**.

INSTRUÇÕES

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

RESUMO

A solução de fundação em sapata é uma das filosofias mais utilizadas no Brasil e por isso o conhecimento sobre este tema é fundamental para o bom exercício da engenharia. Este trabalho tem o objetivo de aferir a assertividade de programas computacionais frente ao cálculo manual de tensão na base de sapatas (tensão de contato). Pode servir, futuramente, como referência para o dimensionamento de fundações rasas utilizando-se dos programas e métodos a serem explorados ao longo do trabalho. A metodologia se dá por pesquisas em fontes bibliográficas reconhecidas na área de fundações, com autores renomados da engenharia civil, além de apresentar um conteúdo prático, com a visão operacional. O resultado obtido vai servir também para comparações com pesquisas similares, reforçando ou divergindo de teorias debatidas. É um desafio para o engenheiro escolher qual método de cálculo utilizará para obter a tensão na base da sapata projetada, sendo que, por muitas vezes, utiliza programas computacionais. Portanto esta pesquisa tem como propósito validar dois programas, dos mais utilizados em Minas Gerais: o da empresa Mudados e o elaborado por Dílio e Élvio, este último, orientador deste trabalho.

Palavras-chave: fundação; sapatas; programas; métodos; cálculo; tensões; contato.

ABSTRACT

The footing foundation solution is one of the most widely used philosophies in Brazil, and therefore, knowledge on this topic is fundamental for the good practice of engineering. This work aims to assess the accuracy of computational programs compared to the manual calculation of stress at the base of footings (contact stress). It can serve, in the future, as a reference for the design of shallow foundations using the programs and methods to be explored throughout the work. The methodology is based on research from recognized bibliographic sources in the field of foundations, with renowned authors in civil engineering, in addition to presenting practical content with an operational view. The result obtained will also serve for comparisons with similar research, reinforcing or diverging from debated theories. It is a challenge for the engineer to choose which calculation method to use to obtain the stress at the base of the designed footing, as they often use computational programs. Therefore, this research aims to validate two of the most used programs in Minas Gerais: one from the company Mudados and the other developed by Dílio and Élvio, the latter being the advisor of this work.

Keywords: foundation; footings; software; methods; calculation; stresses; contact.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo esquemático de Sondagem SPT	13
Figura 2 - Amostrador padrão	15
Figura 3 - Exemplo de um Boletim de Sondagem	17
Figura 4 - Solo arenoso	21
Figura 5 - Solo argiloso	22
Figura 6 - Solo siltoso	22
Figura 7 - Esquema da resistência de uma estaca	23
Figura 8 - Assentamento de sapatas isoladas	24
Figura 9 - Distribuição de pressão no solo em sapata sob carga centrada	26
Figura 10 - Sapata sob carga excêntrica	27
Figura 11 - Formula para obtenção da tensão na base de uma sapata	27
Figura 12 - Dinâmica de carregamentos em sapatas	28
Figura 13 - Inequação do núcleo central.....	28
Figura 14 - Limites do núcleo central	29
Figura 15 - Dinâmica dos carregamentos em um eixo	30
Figura 16 - Gráfico das regiões de excentricidade na base de uma sapata ...	31
Figura 17 - Equações da Região 1	32
Figura 18 - Equações da região 2.....	33
Figura 19 - Equações da Região 3	34
Figura 20 - Inequação do limite para Região 4	35
Figura 21 - Planta da sapata em estudo	37
Figura 22 - Corte da Sapata	37
Figura 23 - Combinações de carregamento geral – Planilha Dílio	38
Figura 24 - Combinações de carregamento ampliado – Planilha Dílio	39
Figura 25 - Combinações de carregamento ampliado – Planilha Dílio	40

Figura 26 - Combinação 1 Mudados.....	41
Figura 27 - Combinação 2 Mudados.....	42
Figura 28 - Combinação 3 Mudados.....	43
Figura 29 - Combinação 4 Mudados.....	43
Figura 30 - Combinação 5 Mudados.....	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos Solos em função do SPT (Fonte: Ernani, 2003).	18
Quadro 2 - Parâmetros de resistência (Fonte: Ernani, 2003).	19
Quadro 3 - Parâmetros de compressibilidade (Fonte: Ernani, 2003).....	19
Quadro 4 - Carregamentos e Hipóteses	36
Quadro 5 - Comparação dos resultados dos cálculos de tensão na base	45
Quadro 6 - Comparação entre os resultados dos cálculos de área comprimida	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. FUNDAÇÕES	12
3. SONDAGEM.....	12
3.1 Investigações geotécnicas – Sondagem à percussão	13
3.1.2 Relatório	16
3.1.3 Estimativa dos parâmetros do solo com base no SPT	17
4. SOLOS	20
4.1 Solo arenoso	20
4.2 Solo argiloso:.....	21
4.3 Solo siltoso:	22
5. TIPOS DE FUNDAÇÕES.....	23
5.1 Fundações profundas.....	23
5.2 Fundações rasas	24
6. DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS.....	25
6.1 Cálculo da tensão na base da sapata	27
6.2. Excentricidade em Relação a Apenas um dos Eixos Principais de Inércia	29
6.3 Excentricidades em Relação aos Dois Eixos Principais de Inércia	30
6.3.1 Região 1	31
6.3.2 Região 2	32
6.3.3 Região 3.....	33
6.3.4 Região 4	34
6.4 – Programas computacionais para cálculo de tensões sob sapatas	35
6.4.1 – Mudados	35
6.4.2 Programa Do Engenheiro Dílio, orientado pelo Prof. Élvio.....	36
7. EXEMPLO PRÁTICO DO CÁLCULO DE SAPATAS.....	36
7.1 – Resultados do programa do Eng. Dílio	38
7.2 Resultados extraídos pelo Mudados	41
7.3 Resultados via Cálculo manual das hipóteses	44
7.3.1 Hipótese 1	44

7.3.2 Hipótese 2	44
7.3.3 Hipótese 3	45
7.3.4 Hipótese 4	45
7.3.5 Hipótese 5	45
7.4 Apresentação do resumo dos resultados	45
8. CONCLUSÃO	47
9. ANEXO – CÁLCULO MANUAL	48
REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

A sapata é uma solução de fundação rasa, onde as tensões de tração são resistidas por armação. Trata-se de uma solução de fundação amplamente empregada no Brasil, na qual o seu correto dimensionamento é imprescindível para a segurança da estrutura, bem como a economia gerada pelo seu uso na fase executiva.

A fundação rasa é aplicada preferencialmente na condição de solo com alta capacidade de suporte, sobretudo nas camadas mais superficiais. Os esforços solicitantes na sapata são inteiramente transmitidos para o solo através do contato da base, gerando uma tensão de apoio. Para tanto, o estudo desta pressão de contato da área da base de uma sapata é o item mais importante no dimensionamento da mesma e requer a análise de alguns fatores, tais como a rigidez da fundação, características do solo e natureza dos carregamentos. (BASTOS, 2023).

A determinação da capacidade de carga do solo é o ponto de partida para o dimensionamento de uma sapata, pois desta informação será definido a tensão máxima que a sapata poderá distribuir ao solo, por consequência, a sua real dimensão.

Existem inúmeros trabalhos indicativos para dimensionamento e capacidade de carga do solo. A tensão admissível do solo pode ser atribuída de forma teórica, utilizando-se de critérios de ruptura ou recalque, ou por processos práticos, os quais envolvem prova de carga. (ERNANI, 2003).

As fórmulas que determinam as cargas admissíveis do solo são denominadas teóricas uma vez que são pautadas na experiência dos autores diante da análise do comportamento de várias fundações já realizadas, aliadas às provas de carga de comprovação. Sendo assim, métodos teóricos e experimentais e ensaios laboratoriais são fundamentais para estabelecer a influência relativa de todos os parâmetros envolvidos nos cálculos de capacidade de carga (W. HACHICH, F. FALCONI, et al., 1998, p. 273.)

No entanto este trabalho não aprofundará o estudo da capacidade de carga do solo e sim das de fundações rasas. Este adentrará na análise dos cálculos para determinação das tensões solicitantes na base de uma sapata, por meio de um estudo

de caso. A partir de dados fornecidos, será feita uma análise comparativa dos resultados obtidos via o software da empresa Mudados, e o programa do Eng. Dílio, assim como aferição com o cálculo manual, no intuito de comprovar se os resultados convergem.

A utilização de softwares tem como objetivo, neste caso, facilitar o cálculo da tensão atuante na base de uma dada geometria da sapata, auxiliando o projetista na escolha da melhor forma a ser adotada. Contudo, a escolha do programa e o método de cálculo mais apropriado a ser utilizado ainda se mostra um desafio, tendo em vista que os resultados entre os diferentes métodos, e programas, podem ser divergentes.

A natureza dos carregamentos deve estar bem clara para o projetista, no que diz respeito da existência/atuação de esforços horizontais, momentos, cargas estáticas advindos da superestrutura. Portanto, infere-se que são muitas as variáveis para projetar uma sapata, o que se torna um importante desafio nas obras, já que esta pode ser “superdimensionada”, acarretando custos maiores, ou pode ser projetada com uma geometria que não atende a segurança.

Sendo assim, este trabalho visa analisar a metodologia e sua aplicação nos programas Mudados e do Eng. Dílio, além de determinar os pontos positivos e negativos, para que, futuramente, possa ser usado como referência para obras similares que irão utilizar sapatas como fundação.

Esta pesquisa será básica, pois, através da coleta de informações e conhecimento existentes, visa justificar a escolha de um método para a determinação da tensão admissível em sapatas estudadas. Esta pesquisa também será quantitativa em razão do desenvolvimento numérico dos métodos de dimensionamento.

Contudo, o trabalho terá um caráter exploratório, porque busca um maior entendimento do tema, sendo elaborado com base em um estudo de caso e pesquisas bibliográficas. Também será documental pois utilizará materiais publicados previamente por autores da área de engenharia de estruturas, fundações e mecânica dos solos, além de normas publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e de projetos fornecidos pelas empresas que atuaram no desenvolvimento do empreendimento em estudo.

A pesquisa será dividida em 7 capítulos, a qual se dará início com a parte técnica do trabalho, situando os tipos de fundações mais usuais, aprofundando na

solução em sapata, além de falar dos parâmetros essenciais para o dimensionamento, que são a sondagem e a caracterização dos solos. A seguir serão apresentados os métodos de cálculo de tensões de contato de sapatas, bem como a conceituação básica e suas formulações. Uma análise quantitativa será conduzida em cada método. Após todos os resultados obtidos via cálculo manual, será feita a comparação com programas computacionais amplamente utilizados, evidenciando o mais adequado e, ou, confirmando a sua eficácia para determinadas situações.

2. FUNDAÇÕES

As fundações são elementos estruturais que tem como objetivo principal transmitir cargas de alguma superestrutura para uma camada resistente do solo. Entretanto, esta definição pode ser muito simples para entender a dimensão do termo “fundações” na história da sociedade. Isto se deve ao fato de este elemento ter sido utilizado desde a Pré-História até os dias de hoje e ter passado, durante esse tempo, por diversos aprimoramentos de conceitos, avanços e experiências construtivas. “História da técnica das fundações deve ser mais conceitual do que factual; no sentido que, ligado à cultura do homem desde a Pré-História, foi formando seus conceitos como sínteses de uma vasta e multimilenária experiência construtiva” (DIAS, Fundações: Teoria e prática, p. 17, 1998), A partir daí, é possível entender melhor a importância das fundações, atualmente.

É importante frisar que a fundação está ligada diretamente com o comportamento do solo, pelo fato de existirem variações entre as camadas e por elas responderem de forma diferente diante das solicitações de cargas. Com isso, torna-se necessário o conhecimento da Geotecnia, importante para a Engenharia de Fundações para entender melhor as propriedades do solo e assim atentar sobre suas peculiaridades. “Todo desenvolvimento de técnicas de projeto e de execução das fundações depende do entendimento dos mecanismos de comportamento dos solos”. (PINTO, Fundações: Teoria e prática, p. 51, 1998)

3. SONDAGEM

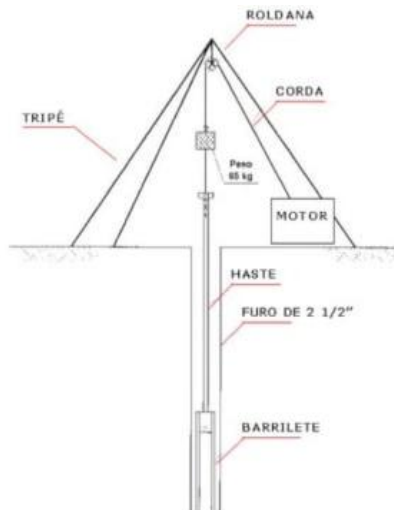
Para qualquer projeto de fundação, exige-se um conhecimento do subsolo do local da obra, definindo-se as camadas de solos que o compõem e suas propriedades,

a fim de se elaborar um projeto de forma adequada. Há vários tipos de investigação do solo, dentre elas a sondagem de simples reconhecimento à percussão (SPT), sendo a mais empregada, e sondagens rotativas e mistas. (ERNANI, 2003)

3.1 Investigações geotécnicas – Sondagem à percussão

Sondagem de simples reconhecimento à percussão, conforme figura a seguir, é uma técnica normatizada pela ABNT NBR 6484:2020 (ABNT, 2020), que se baseia na perfuração do terreno onde será locada a obra. Dessa forma, obtém-se a resistência do solo, além de se retirar amostras, com o objetivo de se realizar a classificação tátil-visual. Sondagem rotativa é um procedimento capaz de perfurar materiais impenetráveis, os quais a sondagem à percussão é incapaz de perfurar, tais como rochas, matacões e até concreto. Na sondagem mista utiliza-se ambos os procedimentos, para se obter as amostras necessárias.

Figura 1 - Exemplo esquemático de Sondagem SPT



Fonte: Escola Engenharia, 2018.

Através da perfuração do solo, obtida por tradagem e circulação de água, utiliza-se um trépano para a quebra da camada de solo resistente para a continuidade da escavação. São coletadas amostras desse solo por cada metro de profundidade escavado, por meio de uma amostrador padrão de 50 mm de diâmetro. Com a finalidade de determinar os tipos de solos nas profundidades de ocorrência, posição do nível de água e os índices de resistência à penetração de cada metro.

Os equipamentos necessários para se constituir um sistema de sondagem SPT são (a) amostrador; (b) hastes; (c) martelo; (d) torre a tripé de sondagem; (e) cabeça de bater; (f) conjunto de perfuração.

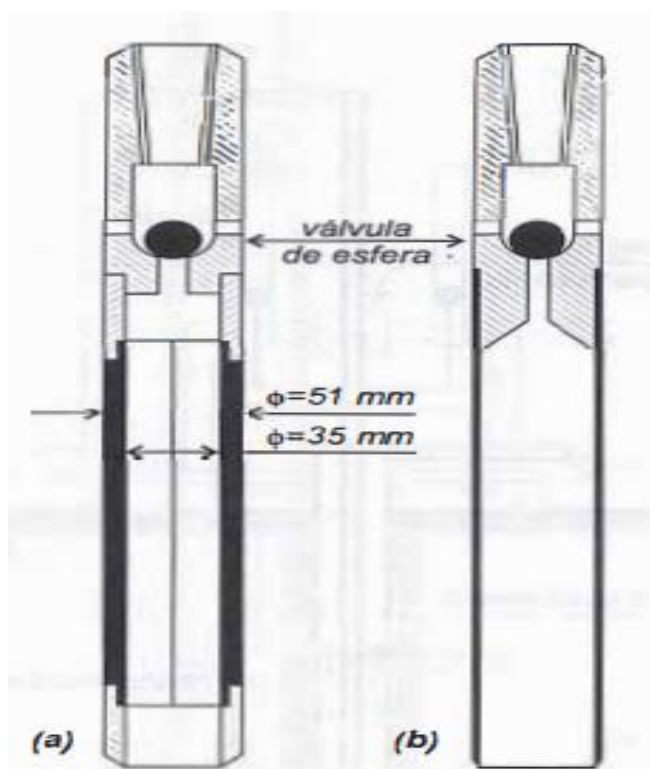
- Amostrador: É constituído por três partes: cabeça, corpo e sapata. A cabeça do amostrador possui um orifício que permite a drenagem da água das hastes e a retenção da amostra do solo. O corpo do amostrador é constituído por um tubo bipartido para que possa ser aberto e permita que a amostra recuperada do solo seja coletada. Após a amostra ser retirada do amostrador, deve ser armazenada corretamente em um recipiente hermético e enviada para testes em laboratório e assim obter a classificação completa do solo, como: granulometria, cor, presença de matéria orgânica e origem.
- Haste: São tubos mecânicos que fazem a ligação entre as extremidades por meio do uso de luva. De acordo com a ABNT NBR6484:2001 (ABNT, 2001), as hastes devem possuir no máximo $3,23 \text{ kg.m}^{-1}$.
- Martelo: É constituído por uma massa de ferro de 65 kgf utilizado para a cravação do amostrador padrão, que irá aplicar os golpes sobre a composição.
- Cabeça de bater: Tem como finalidade receber o impacto do martelo de 65 kgf e transmitir a energia do golpe para a haste. Ela é constituída por tarugo de aço de 83 mm de diâmetro, 90 mm de altura e massa nominal de 3,5 a 4,5 kg, de acordo com a ABNT NBR6484:2001 (ABNT, 2001).
- Sistema de perfuração: Os equipamentos utilizados para abertura do furo de sondagem. São eles os trados manuais, tipo helicoidal e concha. No sistema mecanizado é introduzido um tubo de formato helicoidal na parte externa com o objetivo de facilitar a perfuração dos solos não coesivos ou não cimentados.

O procedimento de ensaio de SPT consiste na cravação do amostrador padrão denominado *Raymond-Terzaghi*, que é praticado a cada metro na sondagem à percussão. Através do impacto sobre a composição do hasteamento de um martelo de 65 kg caindo livremente de uma altura de 75 cm. Anota-se o número de golpes necessários para cravar 45 cm do amostrador padrão em três conjuntos de 15 cm. O resultado do ensaio equivale ao número de golpes dos 30 cm finais, desconsiderar os 15 cm iniciais, determinando assim o NSPT daquele metro sondado. Após esse procedimento é necessário retirar o amostrador e coletar a amostra para

exames posteriores. Em caso do material do solo se tratar de argila será necessário o uso do tubo Shelby.

Em seguida deve-se perfurar 55 cm restantes com um trépano para atingir a próxima camada, e continuar o ensaio. Sendo assim, retira-se o trépano e coloca novamente o amostrador e repetir o processo de cravação do solo.

Figura 2 - Amostrador padrão



Fonte: Velloso e Lopes, 2002.

A cravação deverá ser interrompida quando se obtiver penetração inferior a 5 cm por 10 golpes consecutivos, ou quando o valor de SPT ultrapassar 50 golpes, em um mesmo ensaio.

Na realização da sondagem à percussão é possível determinar a profundidade do NA (Nível d'Água) freático, informação valiosa ao projetista para a determinação do tipo de fundação a ser aplicada para aquela estrutura.

Durante a perfuração com trado helicoidal o operador deve estar atento para qualquer sinal de solo úmido ou água. Caso aconteça, deve-se interromper a perfuração e observa-se a elevação do nível d'água do furo, sendo assim efetuar a leitura a cada 5 min, durante 15 min no mínimo.

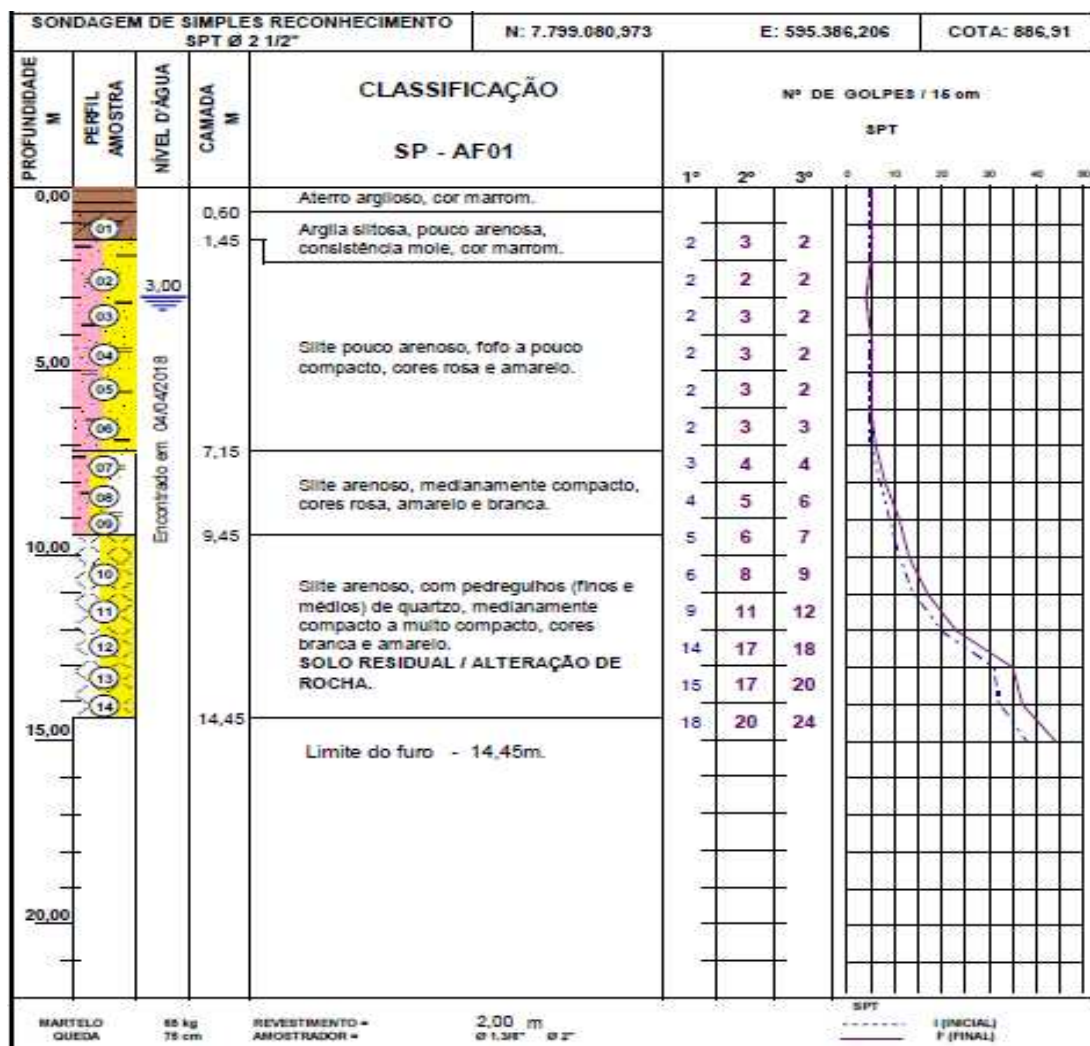
Após a sondagem, deve-se retirar o revestimento e observar até que o nível de água estabilize ou aguardar em um período de 24 h. Para se ter o nível de lençol freático com maior precisão é necessário instalar um piezômetro no próprio furo da sondagem. Pode-se também aproveitar este furo de sondagem para verificar o nível freático ao longo do tempo, principalmente em períodos de chuva, instalado um medidor de nível de água.

3.1.2 Relatório

Os resultados das sondagens são apresentados em planilhas padrão ou em boletim de sondagem em formato A4, que devem ser numeradas, datadas e assinadas pelo responsável técnico da obra, perante o CREA (Conselho Regional de Engenharia e Agronomia). E deverá conter as seguintes informações como mostrado na Figura 3.

- Nome do interessado;
- Local e natureza da obra;
- Descrição dos métodos e equipamentos utilizados na realização da sondagem;
- Cota do furo;
- Posição das camadas constituintes do subsolo até o fim da sondagem;
- Classificação tátil-visual das camadas constituintes do solo;
- Conversão gráfica dos solos constituintes das camadas.

Figura 3 - Exemplo de um Boletim de Sondagem



Fonte: Empresa executora, 2018.

3.1.3 Estimativa dos parâmetros do solo com base no SPT

O dimensionamento de fundações não exige apenas os parâmetros dos solos relacionados diretamente com as sondagens, mas, também, a correlação entre os valores obtidos do SPT. Essa correlação permitiu que estimativas mais confiáveis pudessem ser feitas. Essas estimativas, mesmo não sendo valores exatos, são a base para a grande maioria dos dimensionamentos de fundações executados na prática da engenharia.

As principais correlações empregadas, tomando-se como base os valores do SPT, são: peso específico do solo, parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito interno) e parâmetros de compressibilidade.

3.1.3.1 Peso Específico:

O peso específico é uma forma de se caracterizar os materiais constituintes do solo, que se determina através da relação de peso das partículas de uma quantidade de solo e o volume ocupado por ele.

Quando não há possibilidade de se fazer o ensaio de laboratório, pode-se adotar o peso específico do solo a partir de valores aproximados, em função da consistência da argila e da compactidade da areia. Dessa forma, os valores de consistência dos solos finos e compactidade dos solos grossos, são obtidos em função do índice de resistência à penetração (NSPT), de acordo com a ABNT NBR6484:2001 (ABNT, 2001).

Essa correlação entre o índice resistência à penetração do solo e peso específico do solo (γ) está estimado os valores no Quadro abaixo.

Quadro 1 - Classificação dos Solos em função do SPT (Fonte: Ernani, 2003).

Solos arenosos (areias e siltes arenosos)					
NSPT	0 a 4	5 a 8	9 a 18	10 a 40	> 40
COMPACIDADE	Fofo	Pouco compacto	Medianamente compacto	Compacto	Muito Compacto
γ (tf/m ³)	1,6	1,8	1,9	2,0	2,1
Solos argilosos (argilas e siltes argilosos)					
SPT	0 a 2	3 a 5	6 a 10	11 a 19	> 19
COMPACIDADE	Muito mole	Mole	Médio	Rijo	Duro
γ (tf/m ³)	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0

3.1.3.2 Parâmetros de Resistência:

Para estimar os parâmetros de resistência do solo através do SPT, utiliza-se a coesão para solos argilosos e os ângulos de atrito para solos arenosos. Estes valores são obtidos através das correlações empíricas apresentadas no Quadro.

Quadro 2 - Parâmetros de resistência (Fonte: Ernani, 2003).

Solos argilosos (argilas e siltes argilosos)	$c = N \text{ (tf/m}^2\text{)} - \phi = 0$
Solos arenosos (areias e siltes arenosos)	$c = 0 - \phi = 15 + (20 \cdot N)^{1/2} \text{ (}^\circ\text{)}$

Onde: N = valor do SPT;

ϕ = Ângulo de atrito do solo.

3.1.3.3 Parâmetros de compressibilidade:

Os parâmetros de compressibilidade devem ser feitos para se analisar o comportamento de deformação do solo que está diretamente ligado ao recalque das fundações. Que pode ser estimado através dos resultados de SPT.

Quadro 3 - Parâmetros de compressibilidade (Fonte: Ernani, 2003).

Módulo de deformabilidade ou elasticidade (E) expresso em tf/m ²		Módulo de Poisson (μ)	
Areia com pedregulhos	330*N	Areia pouco compacta	0,2
Areia	270*N	Areia medianamente compacta	0,3
Areia siltosa	210*N	Areia compacta	0,4
Silte argilosa	165*N	Silte	0,3 a 0,5
Silte arenoso	225*N	Argila saturada	0,4 a 0,5
Silte	175*N	Argila não saturada	0,1 a 0,3
Silte argiloso	125*N		
Argila arenosa	210*N		
Argila siltosa	100*N		

4. SOLOS

Temos que frisar que a Fundação está ligada diretamente com o comportamento do solo, pelo fato de existirem variações de solos e por elas responderem de forma diferente, diante das solicitações de cargas. Com isso, torna-se o conhecimento da Geotecnia, importante para a Engenharia de Fundações para entendermos melhor as propriedades do solo e assim atentar sobre suas peculiaridades.

Os solos são formados por partículas sólidas, espaços vazios de ar e água podendo se mover, alterar suas propriedades, deformar, entre outras características. Com tanta complexidade, os solos se tornaram alvo de muito estudo, principalmente estudos ligados a engenharia. (PINTO, Fundações: Teoria e prática, 1998). Os principais tipos de solo são: arenoso, siltoso e argiloso.

4.1 Solo arenoso

Esse tipo de solo também conhecido como solo leve tem a tendência em ser muito permeável e solto, pois é composto em grande parte por areia, com isso facilita a passagem de água entre os grãos. Sua textura normalmente é leve, áspera e granulosa com componentes de areia que tem diâmetros variando entre 0,05 e 4,8mm. Tende a ser muito suscetível a erosão, pobre em cálcio, possuir pH ácido e baixo teor de matéria orgânica. (CURADO, 2019)

É um solo normalmente com baixa retenção de água, coloração clara, aquece rapidamente, muitas vezes é um solo bem drenado, com macroporosidade e com alta evaporação de água. O solo arenoso frequentemente possui baixo índice de coesão, então ele tende a ter capacidade de se movimentar com muita facilidade. Na figura 4 pode-se observar esse tipo de solo.

Figura 4 - Solo arenoso



Fonte: Beduka, 2019.

4.2 Solo argiloso:

O solo argiloso é muito comum no Brasil, ele normalmente é impermeável, pegajoso e denso. Muitas vezes tem uma grande área superficial específica, com isso tende a ter grande capacidade de adsorção. A adsorção é o processo reversível em que ocorre a retenção dos íons presentes na solução do solo. (ZUCUNI, 2015)

Os poros entre as partículas quase sempre são muito pequenos e irregulares o tornando microporoso, fazendo com que a água e o ar presentes no solo se locomovam de forma mais lenta. Apesar dessas características esse solo frequentemente possui uma grande quantidade de poros, facilitando a retenção de água. (LIMA, 2007)

O solo argiloso na maior parte das vezes tem coloração escura, é mal drenado, tem boa coesão e plasticidade, é pesado e lenta evaporação de água.

Quando possui essas características esse solo necessita de muitos cuidados, pois ele pode se tornar muito maleável com a adição de água, sendo assim sua resistência pode variar. Isso pode prejudicar as fundações de uma construção. Na figura 5 mostra a imagem de um solo argiloso.

Figura 5 - Solo argiloso



Fonte: Medium, 2017.

4.3 Solo siltoso:

Esse solo é considerado o intermediário entre o arenoso e o argiloso. Tem a tendência em se transformar em lama muito rapidamente quando entra em contato com a água, dificultando muito a execução de construções sobre ele.

Esse solo possui muitas vezes tem baixa plasticidade, é pouco coeso na ausência de água e com o excesso dela. (CARVALHO, 2005)

Cortes realizados nesse solo tem estabilidade muitas vezes curta, podendo resultar em erosão, entre outros problemas, logo necessitam de mais atenção e manutenções. A seguir, na figura 6 pode-se ver como é o solo siltoso.

Figura 6 - Solo siltoso



Fonte: Costa Matoso engenharia, 2019.

Com a mecânica dos solos foi possível classificar os solos, facilitando os testes sobre ele, pois assim se tornou possível estimar os prováveis comportamentos do solo. Devido a estas características sobre o solo é possível determinar a melhor fundação para determinado lugar e assim a obra se tornar mais segura e eficiente.

Comumente o solo é composto por mais de uma categoria e no âmbito das fundações as interações são designadas assim: Argila Siltosa (ARGS), Argila Arenosa (ARGA), Silte Arenoso (SAR), Silte Argiloso (SAG), Areia (ARE), Areia com pedregulhos (ARP), Areia Argilosa (AREA) e Areia siltosa (ARS).

Com o tempo, a quantidade de inovações sobre o tema foi crescendo, vários tipos de fundações foram sendo desenvolvidas, como sapata isolada, radier, viga baldrame, estacas entre outros. A organização das fundações também foi sendo melhorada, havendo classificações quanto ao tipo, podendo ser direta (rasa) ou profunda. (VARGAS, Fundações: Teoria e prática, p. 17, 1998).

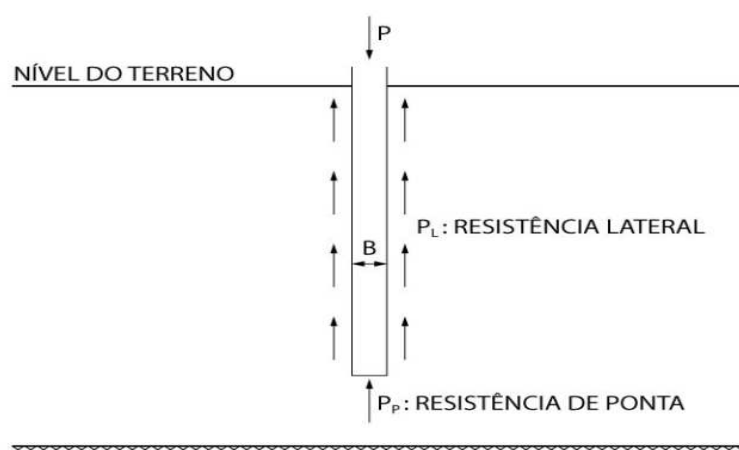
5. TIPOS DE FUNDAÇÕES

Segue agora os principais tipos de fundação, categorizados por serem rasas ou profundas.

5.1 Fundações profundas

Segundo a norma de fundações ABNT NBR6122:2019 (ABNT, 2019), fundação profunda é o elemento de fundação cuja transmissão de cargas ao terreno se dá pela base, denominada resistência de ponta, pela superfície lateral, denominada resistência de fuste, ou por uma combinação das duas, devendo a base ou ponta estar assente em uma profundidade de no mínimo 3,0 m e superior a oito vezes sua menor dimensão em planta. Exemplos de fundações profundas são os tubulões e estacas. A resistência lateral é nada menos que o atrito da fundação com o solo ao longo de sua superfície lateral, chamada de fuste, a partir de uma carga atuante, seja ela de compressão ou tração. Esta resistência lateral pode ou não ser somada à resistência de ponta, que é a reação do solo na base de sua seção inferior, conforme figura abaixo, que representa uma estaca submetida a um esforço de compressão:

Figura 7 - Esquema da resistência de uma estaca



Fonte: Guia da engenharia, 2019.

Seguindo a figura como exemplo, a partir de uma carga P aplicada em sua base superior, reações do fuste e da base resistem ao carregamento, compondo sua capacidade de carga total.

5.2 Fundações rasas

A norma de fundações ABNT NBR6122:2019 (ABNT, 2019) determina que fundações rasas (diretas ou superficiais) são aquelas cuja base está assentada em profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão da base da fundação em planta.

Quanto ao tipo, Velloso e Lopes (2010) classificam as fundações superficiais em: bloco, sapata, grelha e radier.

Bloco: elemento constituído de concreto simples, que não necessita de armadura. Para tanto, sua altura é dimensionada de tal forma que as tensões de tração resultantes sejam suficientemente resistidas pelo concreto.

Sapata: elemento de concreto armado, de pequena altura, em que as tensões de tração resultantes são resistidas pelo aço. As formas mais comuns são as quadradas, retangulares e corridas, conforme figura a seguir. Quando submetida à ação de um carregamento distribuído ou de pilares em um mesmo alinhamento, é denominada sapata corrida. Quando mais de um pilar descarrega sobre a mesma sapata, denomina-se sapata associada.

Figura 8 - Assentamento de sapatas isoladas



Fonte: Escola Engenharia, 2019.

Radier: é denominado radier geral quando todos os pilares de uma estrutura descarregam sobre uma única base. Quando parte dos pilares descarregam sobre a mesma base, esta recebe o nome de radier parcial, ou sapata associada.

6. DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS

A sapata pode ser classificada como flexível ou rígida, e esta condição é importante para analisar a distribuição de tensões que a base da sapata transmite ao solo. O mais comum é que a sapata seja dimensionada como rígida, pois assim é possível estimar com mais assertividade a uniformidade do carregamento, além de ser menos suscetível à punção, facilitando assim o seu dimensionamento. Nas sapatas flexíveis, que tem como característica a pequena altura da base, as tensões distribuídas na base não são tão homogêneas, dependendo de fatores como deformação do solo e da estrutura, sendo, portanto, difícil de mensurar. A norma ABNT NBR 6118:2014 (item 22.6.1) determina que para uma sapata ser considerada rígida ela deverá atender ao seguinte critério:

$$h \geq \frac{A - a_p}{3}$$

h = altura da sapata;

A = dimensão da sapata em uma determinada direção;

a_p = dimensão do pilar na mesma direção;

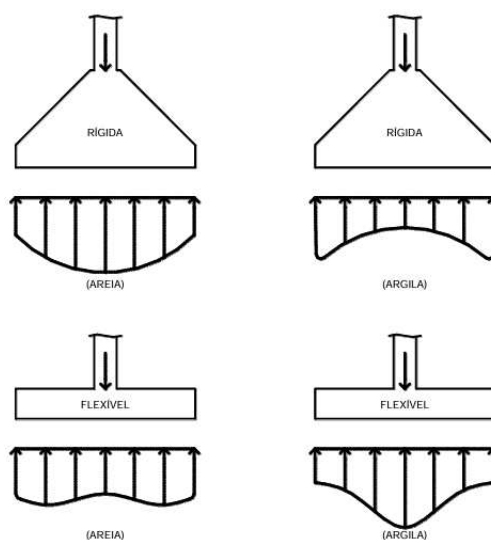
Para a análise da distribuição das tensões no solo, também é necessário levar em consideração a natureza dos carregamentos, se existem momentos fletores

significativos, e considerar as propriedades do solo em que a fundação está assente. (BASTOS, 2023)

A norma ABNT NBR 6118:2014 também cita que poderá ser admitida uma distribuição plana das tensões em caso de sapata rígida sob esforço de cargas centradas, já em caso de sapata flexível essa hipótese deverá ser revista.

As sapatas apoiadas sobre solos arenosos apresentam uma distribuição de tensão maior no centro, já nos solos argilosos a pressão é maior nas bordas da estrutura (BASTOS, 2023). É possível notar estas características, conforme figura abaixo:

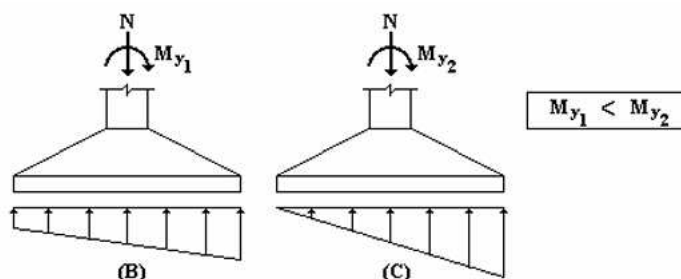
Figura 9 - Distribuição de pressão no solo em sapata sob carga centrada



Fonte: Bastos, 2023

Já a influência dos momentos fletores e cargas horizontais na sapata podem nos remeter a um diagrama de tensões no solo concentrado nas bordas da sapata, a qual é mais influente do que as propriedades do solo, conforme figura abaixo:

Figura 10 - Sapata sob carga excêntrica



Fonte: Piancastelli, 2018

É possível perceber que a distribuição de tensões em uma sapata solicitada por cargas excêntricas, ou seja, momentos fletores, não é uniforme, sendo possível que uma parcela da base esteja submetida a tração. Faz-se necessário avaliar a parcela de área comprimida e tracionada na base da sapata, conforme a norma ABNT NBR 6122:2019. O item 7.6.2, da norma de fundações impõe que a base de uma fundação rasa deverá ter uma área igual ou maior a 2/3 da área total sendo solicitada a compressão.

6.1 Cálculo da tensão na base da sapata

A tensão na base de uma sapata pode ser calculada utilizando-se da equação da resistência dos materiais, que contempla a característica da flexão. A condição para aplicação desta equação é que a fundação seja rígida. Neste trabalho será abordado apenas cálculo para as fundações rígidas.

Figura 11 - Formula para obtenção da tensão na base de uma sapata

$$\sigma_{(x,y)} = \frac{N}{A} \pm \frac{|M_x|}{I_x} \cdot |y| \pm \frac{|M_y|}{I_y} \cdot |x|$$

Fonte: Piancastelli, 2018

Onde:

$\sigma(x, y)$ = tensão de contato no ponto de coordenadas “x” e “y”;

N = carga normal aplicada no centro de gravidade da superfície de contato - compressão (+) ;

A = área da base (base retangular $\Rightarrow a \times b$ - onde “a” é a maior dimensão);

M_x = momento fletor em relação ao eixo “x”, aplicado no centro de gravidade da superfície de contato;

M_y = momento fletor em relação ao eixo “y”, aplicado no centro de gravidade da superfície de contato;

I_x = momento de inércia da seção da base em relação ao eixo “x”;

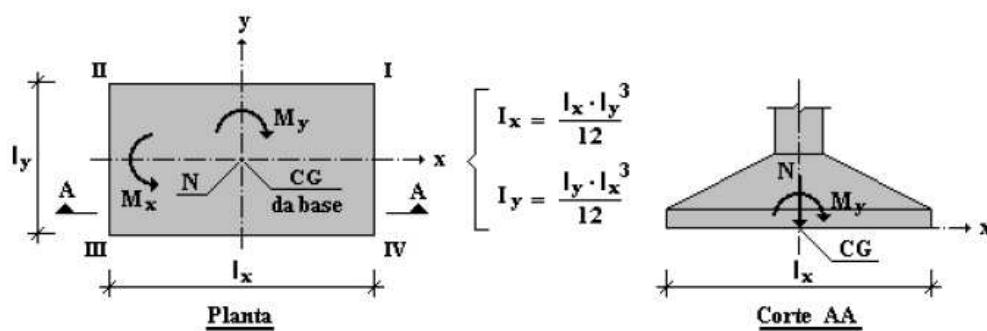
I_y = momento de inércia da seção da base em relação ao eixo “y”;

$x \cdot e \cdot y$ = módulo das coordenadas do ponto estudado, em relação aos eixos principais de inércia da seção da base.

sinal (+ou -) = em função dos momentos provocarem, no ponto estudado, tensões de compressão (+) ou de tração (-).

Abaixo segue a figura que ilustra a dinâmica dos carregamentos em uma sapata:

Figura 12 - Dinâmica de carregamentos em sapatas



(Piancastelli, 2018)

Para que a equação demonstrada seja aplicável, também é necessário que atenda à inequação abaixo:

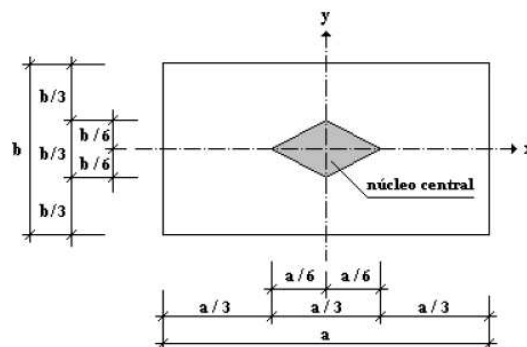
Figura 13 - Inequação do núcleo central

$$\frac{|e_x|}{l_x} + \frac{|e_y|}{l_y} \leq \frac{1}{6}$$

Fonte: Piancastelli, 2018

Esta inequação retrata o fato da equação da figura 11 só ser aplicável na condição de sapata com tensões de compressão, ou seja, que as excentricidades se limitam apenas no núcleo central da sapata conforme figura abaixo:

Figura 14 - Limites do núcleo central

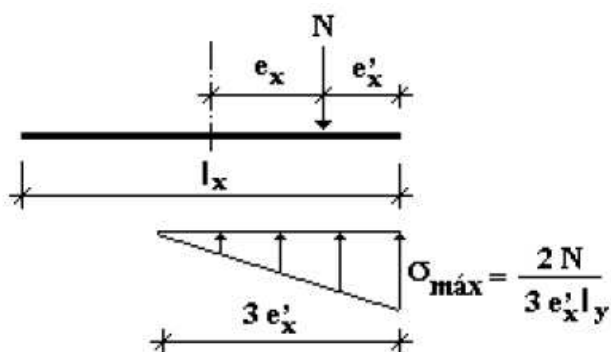


Se as excentricidades não satisfizerem a equação da figura 13, ou seja, se a equação da figura 11 resultar em tensões de tração, as tensões no solo devem ser calculadas das maneiras demonstradas nos subitens abaixo.

6.2. Excentricidade em Relação a Apenas um dos Eixos Principais de Inércia

Quando há momento em apenas um sentido da sapata, ou seja, excentricidade só no eixo X ou Y. Desta maneira o cálculo da tensão na sapata se dá conforme o exposto abaixo, a exemplo de ocorrer no eixo X:

Figura 15 - Dinâmica dos carregamentos em um eixo



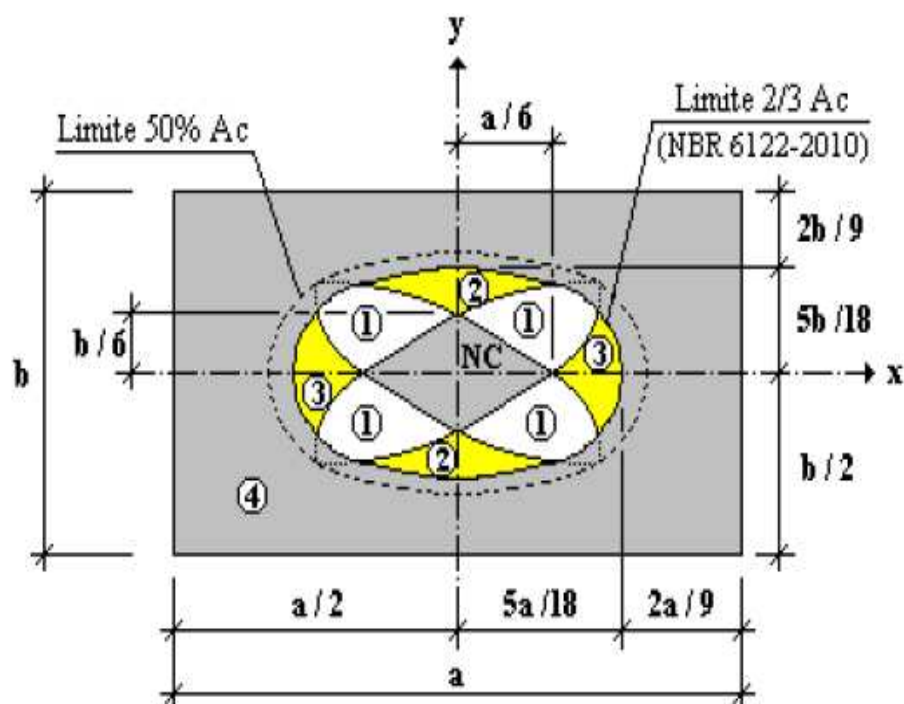
Fonte: Piancastelli, 2018

6.3 Excentricidades em Relação aos Dois Eixos Principais de Inércia

Esta condição de dupla excentricidade ocorre quando existem momentos atuando nos dois sentidos da sapata, gerando duas excentricidades. Desta maneira podem ocorrer 4 situações distintas dependendo da posição onde a resultante das excentricidades estiver localizada. Desta forma é permeado um gráfico onde o limite é a imposição da NBR 6122, que a partir do ano de 2010, limitou-se a condição de que uma sapata deverá ter no mínimo 2/3 de sua área sendo comprimida.

A figura abaixo perfaz as 4 condições de excentricidades.

Figura 16 - Gráfico das regiões de excentricidade na base de uma sapata



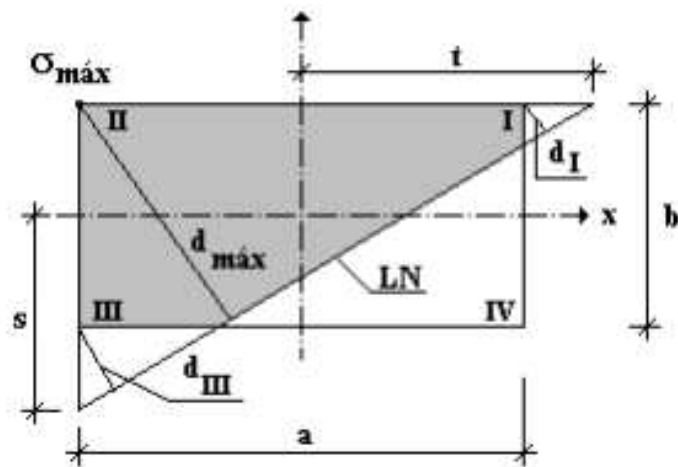
Para limite de 2/3 da sapata comprimida - NBR-6122/2010

Fonte: Piancastelli, 2018

6.3.1 Região 1

É possível traçar uma linha neutra conforme as excentricidades em questão. Para tanto, na região 1, a situação é retratada conforme abaixo:

Figura 17 - Equações da Região 1



- Região 1 - Posição da Linha Neutra

$$t = \frac{a}{12} \left(\frac{a}{e_x} + \sqrt{\frac{a^2}{e_x^2} - 12} \right)$$

$$s = \frac{b}{12} \left(\frac{b}{e_y} + \sqrt{\frac{b^2}{e_y^2} - 12} \right)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{a \cdot b} \cdot \eta \cdot [12 - 3,9(6\eta - 1)(1 - 2\eta)(2,3 - 2\eta)]$$

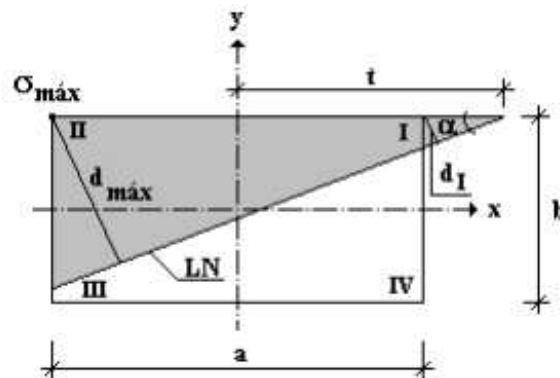
$$\eta = \frac{e_x}{a} + \frac{e_y}{b}$$

Fonte: Piancastelli, 2018

6.3.2 Região 2

Diferente posição da L.N.

Figura 18 - Equações da região 2



Região 2 - Posição da Linha Neutra

$$t = \frac{a}{12} \left(\frac{a}{e_x} + \sqrt{\frac{a^2}{e_x^2} - 12} \right)$$

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{b - 2e_y}{t + e_x} \right)$$

A **tensão máxima** é dada pela expressão:

$$\sigma_{\max} = \frac{12N}{a \cdot \operatorname{tg} \alpha} \cdot \frac{a + 2t}{a^2 + 12t^2}$$

A **tensão** no ponto **I** pode ser obtida através da relação:

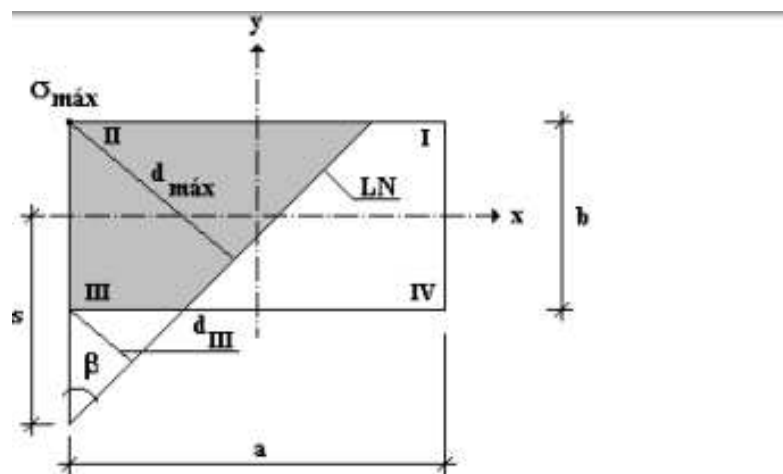
$$\frac{\sigma_I}{d_I} = \frac{\sigma_{\max}}{d_{\max}}$$

Fonte: Piancastelli, 2018

6.3.3 Região 3

Outra diferente posição da L.N.

Figura 19 - Equações da Região 3



Região 3 - Posição da Linha Neutra

$$s = \frac{b}{12} \left(\frac{b}{e_y} + \sqrt{\frac{b^2}{e_y^2} - 12} \right)$$

$$\beta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{a - 2e_x}{s + e_y} \right)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{12N}{b \cdot \operatorname{tg} \beta} \cdot \frac{b + 2s}{b^2 + 12s^2}$$

Fonte: Piancastelli, 2018

6.3.4 Região 4

Caso as excentricidades pertencerem à região 4, significa que menos de 67% da área da sapata está sendo comprimida, portanto o dimensionamento deverá ser revisto.

De maneira a garantir que a resultante das excentricidades não caia na região 4 é feita a seguinte verificação:

Figura 20 - Inequação do limite para Região 4

$$\left(\frac{e_x}{I_x}\right)^2 + \left(\frac{e_y}{I_y}\right)^2 \leq \frac{1}{12,96}$$

Fonte: Piancastelli, 2018

6.4 – Programas computacionais para cálculo de tensões sob sapatas

6.4.1 – Mudados

O programa da Mudados é uma ferramenta essencial para engenheiros civis, especialmente quando se trata de análises estruturais de fundações superficiais, como sapatas. Com uma interface intuitiva, o programa facilita a entrada de dados geométricos e de carregamentos, além de fornecer resultados precisos que atendem às normas técnicas.

Uma das funcionalidades mais notáveis do Mudados é a “SecPlan”. Esta ferramenta é projetada para calcular as tensões nos vértices de sapatas e outras bases planas submetidas a carregamentos excêntricos. Com a SecPlan, você pode calcular Tensões nos Vértices para uma geometria específica de sapata, a SecPlan determina as tensões individuais em cada vértice, considerando os esforços normais (N) e os momentos fletores (Mx e My). Além disso, é possível identificar a área comprimida da sapata, levando em conta a distribuição de tensões devido aos carregamentos excêntricos.

A grande vantagem da SecPlan no Mudados está na sua capacidade de realizar cálculos complexos, como a posição da linha neutra e a variação dos esforços em diferentes regiões da sapata de forma expedita. Isso ajuda o engenheiro a visualizar o comportamento da fundação sob diversas condições de carregamento, otimizando o dimensionamento e garantindo uma análise consistente.

6.4.2 Programa Do Engenheiro Dílio, orientado pelo Prof. Élvio

O Programa do Engenheiro Dílio, orientado pelo Prof. Élvio, é uma ferramenta desenvolvida em Excel, projetada para facilitar o cálculo das tensões nos vértices de uma sapata e determinar sua área comprimida. Com uma interface de fácil compreensão, o programa permite que os usuários insiram dados diretamente na planilha, automatizando os cálculos necessários para análises estruturais precisas. Ideal para engenheiros civis, o Programa do Engenheiro Dílio otimiza o processo de dimensionamento de fundações, garantindo resultados confiáveis e conformidade com as normas técnicas

7. EXEMPLO PRÁTICO DO CÁLCULO DE SAPATAS

Serão apresentados a seguir 5 hipóteses de carregamento em uma sapata, demonstrando as 5 situações de excentricidade. Será calculado as tensões na base da sapata através dos Programa Mudados, Programa do Eng. Dílio e via cálculo manual.

Desta forma será possível mensurar a eficiência de tais programas.

Quadro 4 - Carregamentos e Hipóteses

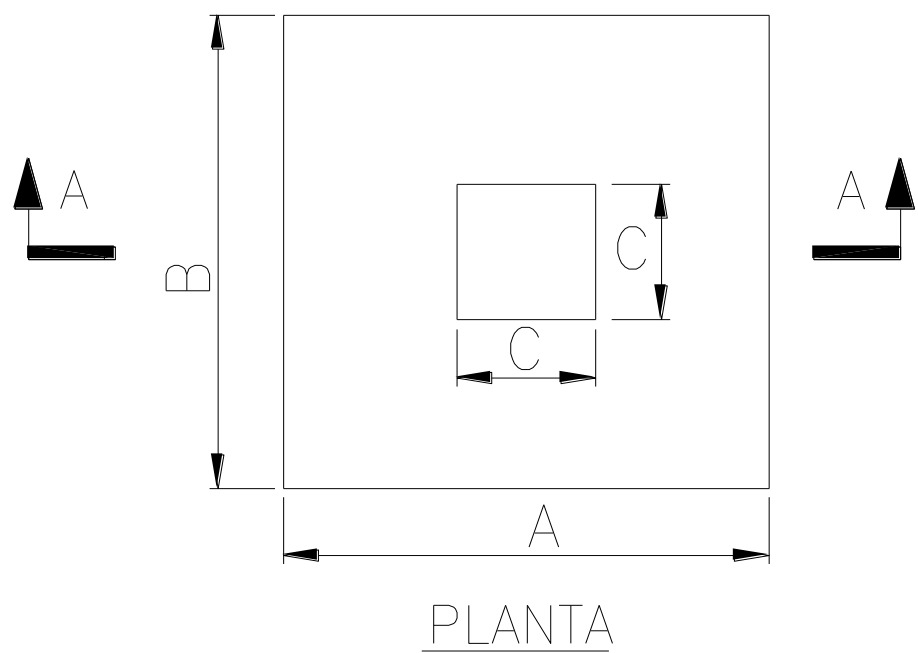
Carregamentos e Hipóteses			
Hipótese	N (tf)*	Mx (tf x m)	My (tf x m)
1	34,5	5	3
2	34,5	10	6
3	34,5	16	1
4	34,5	1	17
5	34,5	16	8

*A carga normal N já considera o peso da sapata e seu reaterro.

Sapata em estudo:

Base: 1,80m x 1,80m; Altura da base = 0,60m; Fuste = 0,80m x 0,80m

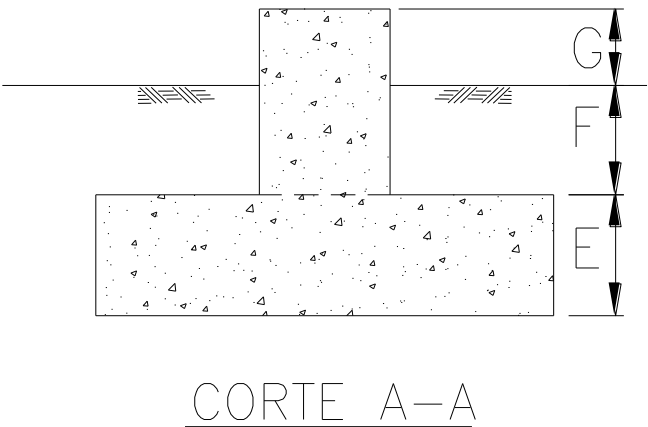
Figura 21 - Planta da sapata em estudo



Fonte: O autor, 2025.

A (m)	B (m)	C (m)	E (m)	F (m)	G (m)
1,80	1,80	0,80	0,60	0,70	0,15

Figura 22 - Corte da Sapata



Fonte: O autor, 2025

7.1 – Resultados do programa do Eng. Dílio

Figura 23 - Combinações de carregamento geral – Planilha Dílio

TENSÕES DE CONTATO SOB FUNDAÇÕES DIRETAS

Trabalho Final de Graduação – TIM III

Aluno: Dílio Rodrigues Júnior

Orientador: Prof. Élvio Mosci Piancastelli

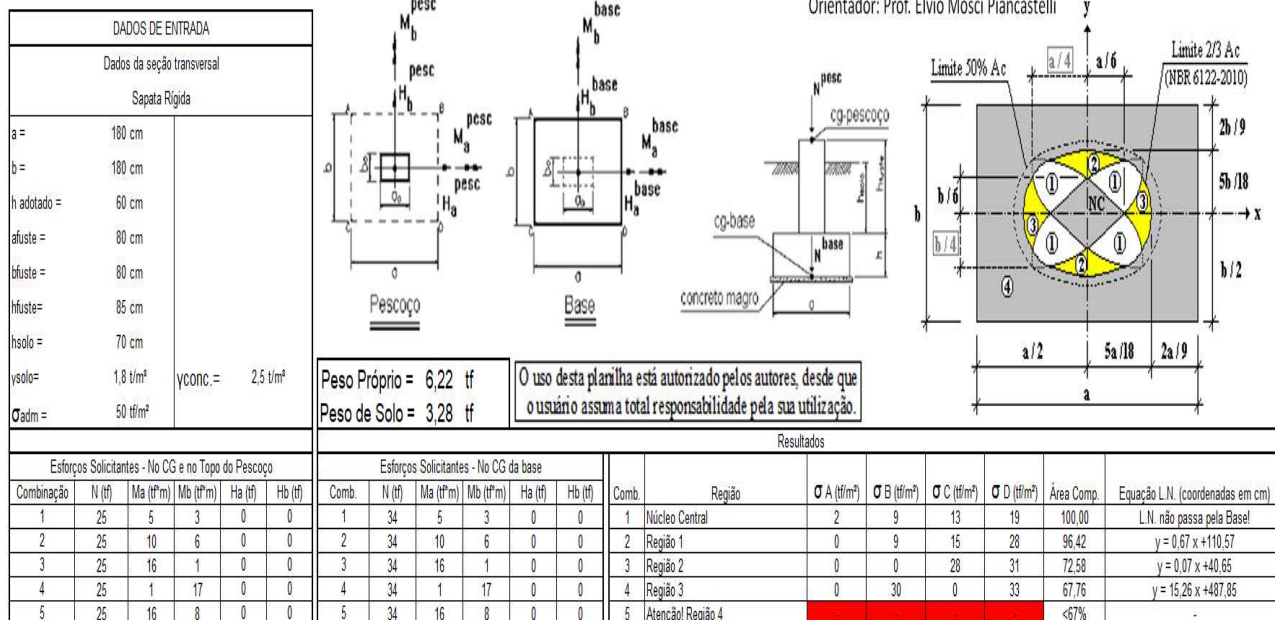
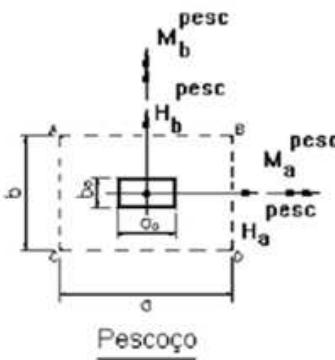
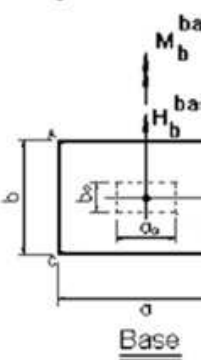


Figura 24 - Combinações de carregamento ampliado – Planilha Dílio

TENSÕES DE CONTATO SOB FUNDAÇÕES

DADOS DE ENTRADA					
Dados da seção transversal					
Sapata Rígida					
a =	180 cm				
b =	180 cm				
h adotado =	60 cm				
afuste =	80 cm				
bfuste =	80 cm				
hfuste =	85 cm				
hsolo =	70 cm				
γ_{solo} =	1,8 t/m ³	$\gamma_{\text{conc.}}$ =	2,5 t/m ³		
σ_{adm} =	50 tf/m ²				

Peso Próprio = 6,22 tf

Peso de Solo = 3,28 tf

O uso desta planilha é de responsabilidade do usuário assumido.

Esforços Solicitantes - No CG e no Topo do PESCOÇO					
Combinação	N (tf)	Ma (tf·m)	Mb (tf·m)	Ha (tf)	Hb (tf)
1	25	5	3	0	0
2	25	10	6	0	0
3	25	16	1	0	0
4	25	1	17	0	0
5	25	16	8	0	0
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					

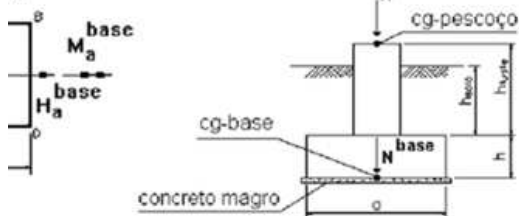
Esforços Solicitantes - No CG da base					
Comb.	N (tf)	Ma (tf·m)	Mb (tf·m)	Ha (tf)	Hb (tf)
1	34	5	3	0	0
2	34	10	6	0	0
3	34	16	1	0	0
4	34	1	17	0	0
5	34	16	8	0	0
6	9	0	0	0	0
7	9	0	0	0	0
8	9	0	0	0	0
9	9	0	0	0	0
10	9	0	0	0	0
11	9	0	0	0	0
12	9	0	0	0	0
13	9	0	0	0	0
14	9	0	0	0	0
15	9	0	0	0	0
16	9	0	0	0	0
17	9	0	0	0	0
18	9	0	0	0	0
19	9	0	0	0	0
20	9	0	0	0	0

Figura 25 - Combinações de carregamento ampliado – Planilha Dílio

DIRETAS

se

ie

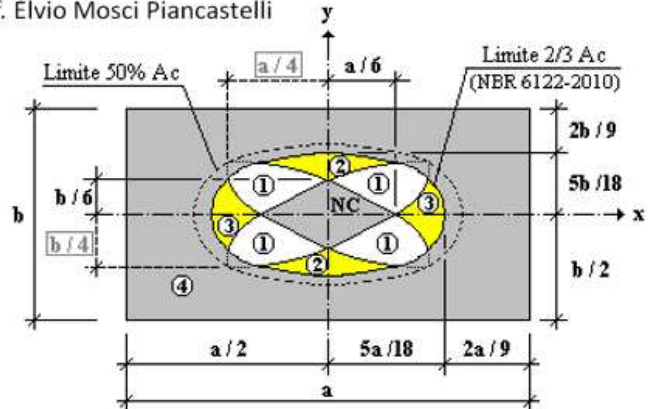


ilha está autorizado pelos autores, desde que
na total responsabilidade pela sua utilização.

Trabalho Final de Graduação – TIM III

Aluno: Dílio Rodrigues Júnior

Orientador: Prof. Élvio Mosci Piancastelli



Resultados							
Comb.	Região	σA (tf/m ²)	σB (tf/m ²)	σC (tf/m ²)	σD (tf/m ²)	Área Comp.	Equação L.N. (coordenadas em cm)
1	Núcleo Central	2	9	13	19	100,00	L.N. não passa pela Base!
2	Região 1	0	9	15	28	96,42	$y = 0,67 x + 110,57$
3	Região 2	0	0	28	31	72,58	$y = 0,07 x + 40,65$
4	Região 3	0	30	0	33	67,76	$y = 15,26 x + 487,85$
5	Atenção! Região 4	-	-	-	-	<67%	-
6	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!
7	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!
8	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!
9	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!
10	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!
11	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!
12	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!
13	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!
14	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!
15	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!
16	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!
17	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!
18	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!
19	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!
20	Núcleo Central	3	3	3	3	100,00	L.N. não passa pela Base!

Os pontos nodais A,B,C,D da planilha do Eng. Dílio são equivalentes aos pontos numéricos 4,3,1,2 no programa Mudados respectivamente.

7.2 Resultados extraídos pelo Mudados

Figura 26 - Combinação 1 Mudados

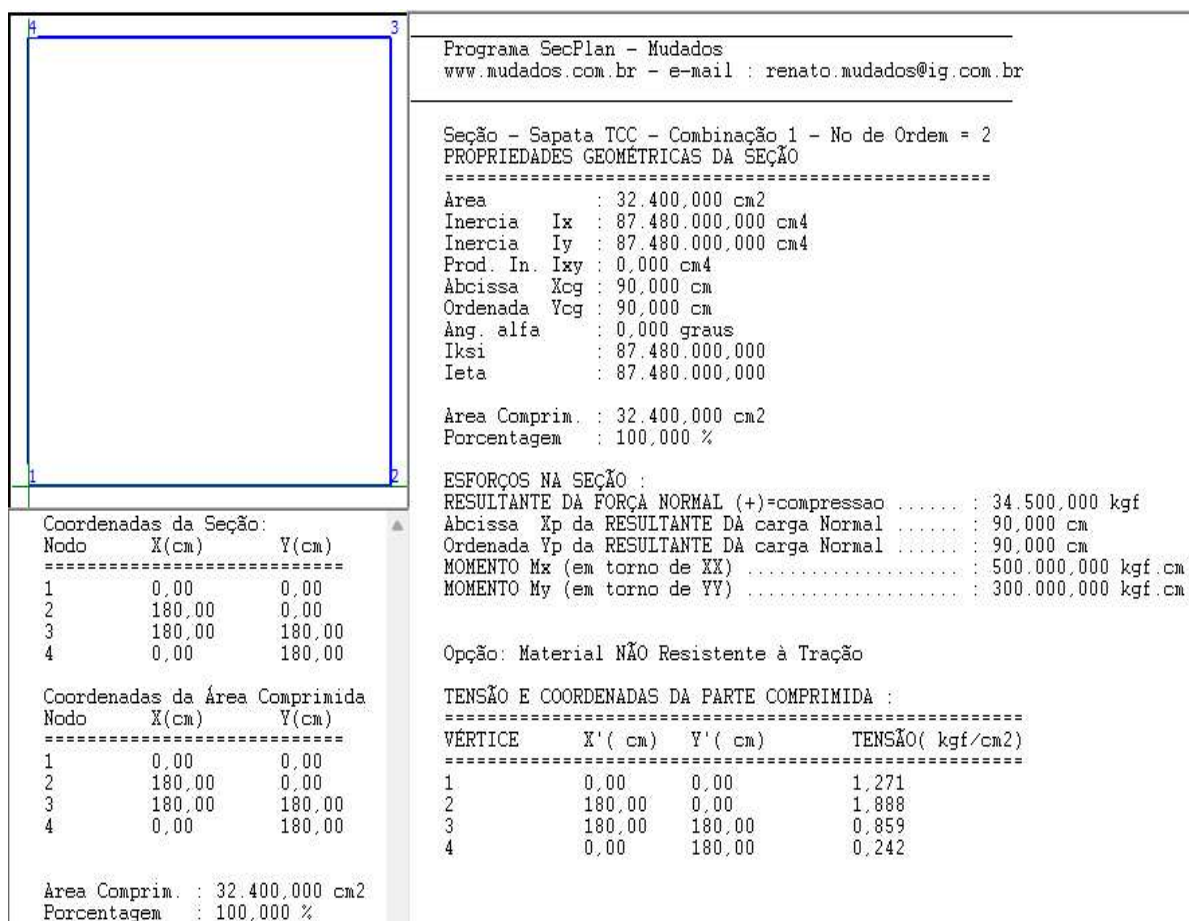


Figura 27 - Combinação 2 Mudados

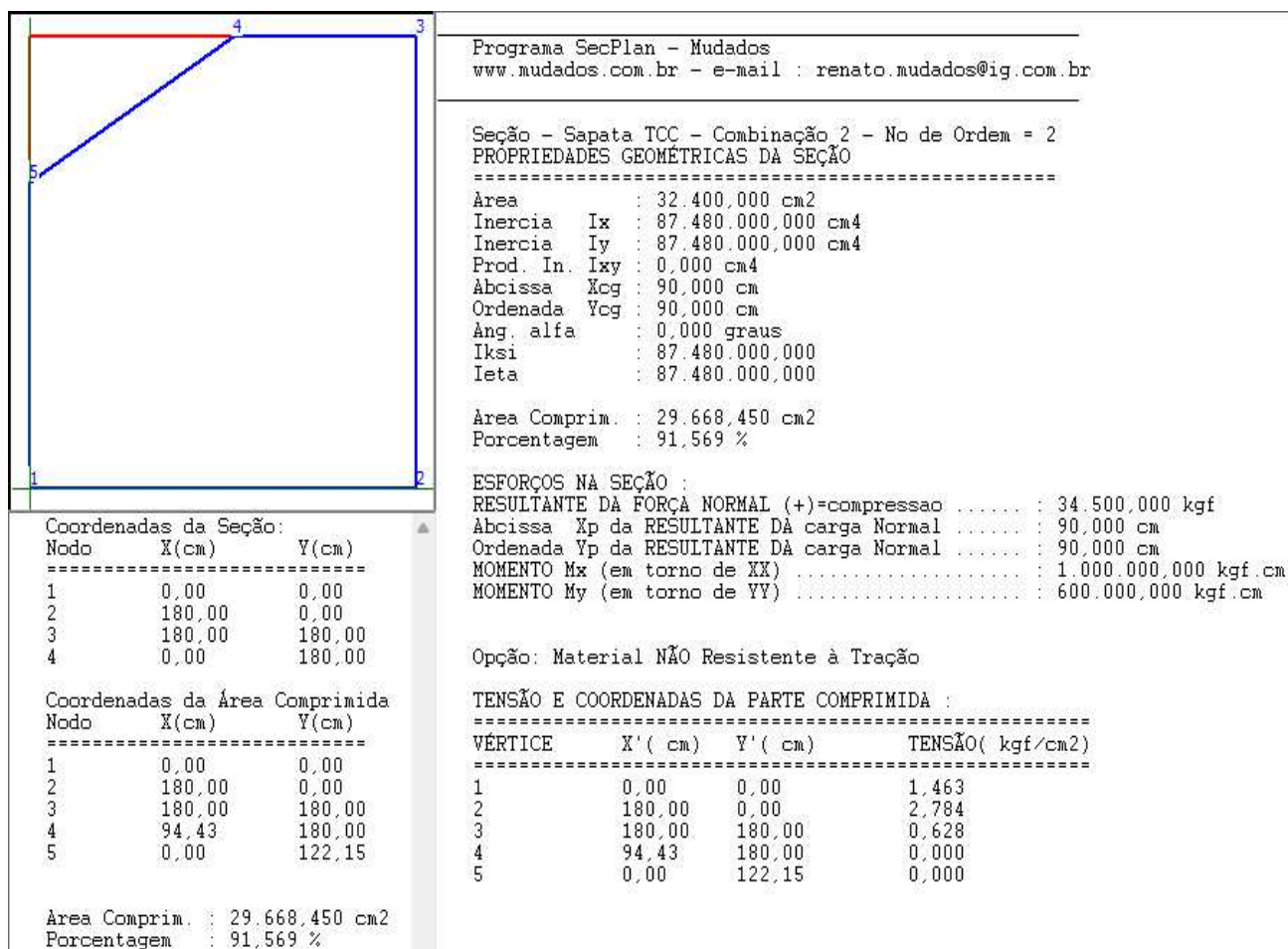


Figura 28 - Combinação 3 Mudados

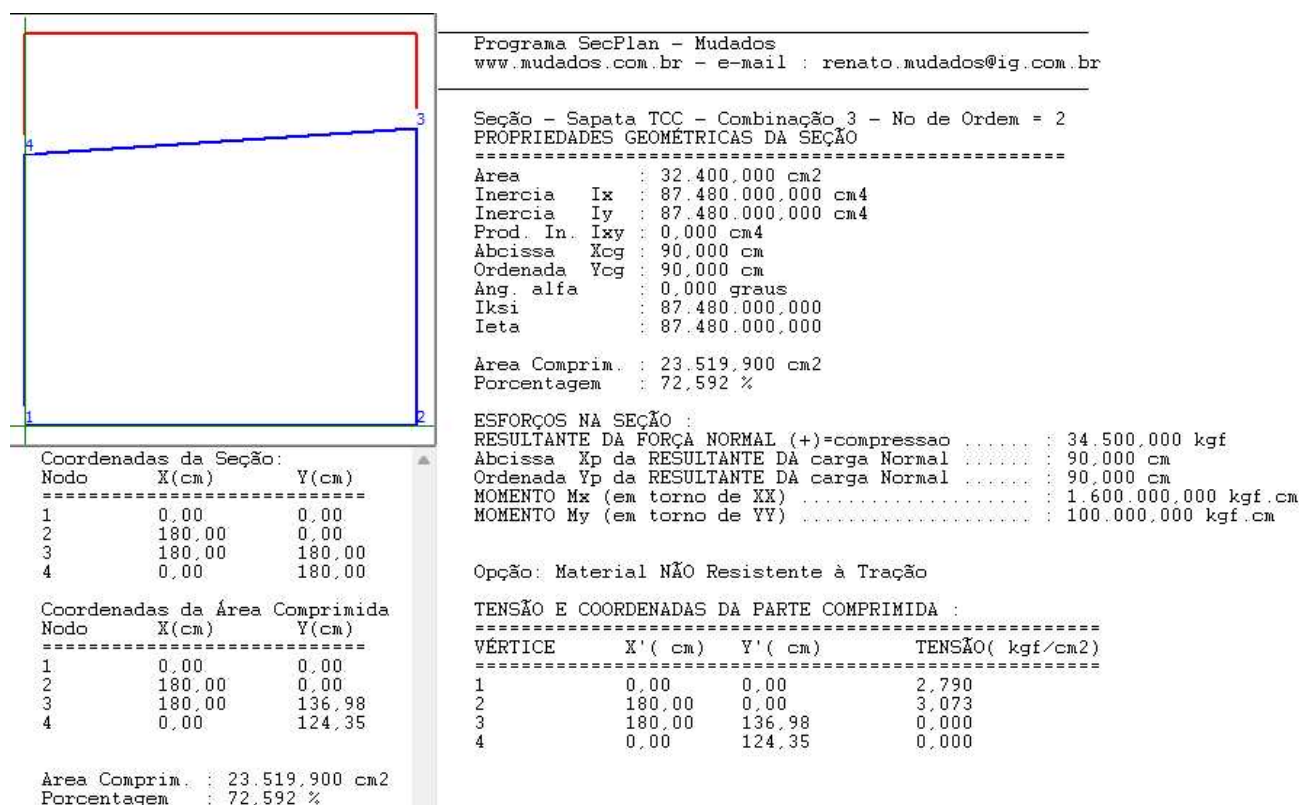


Figura 29 - Combinação 4 Mudados

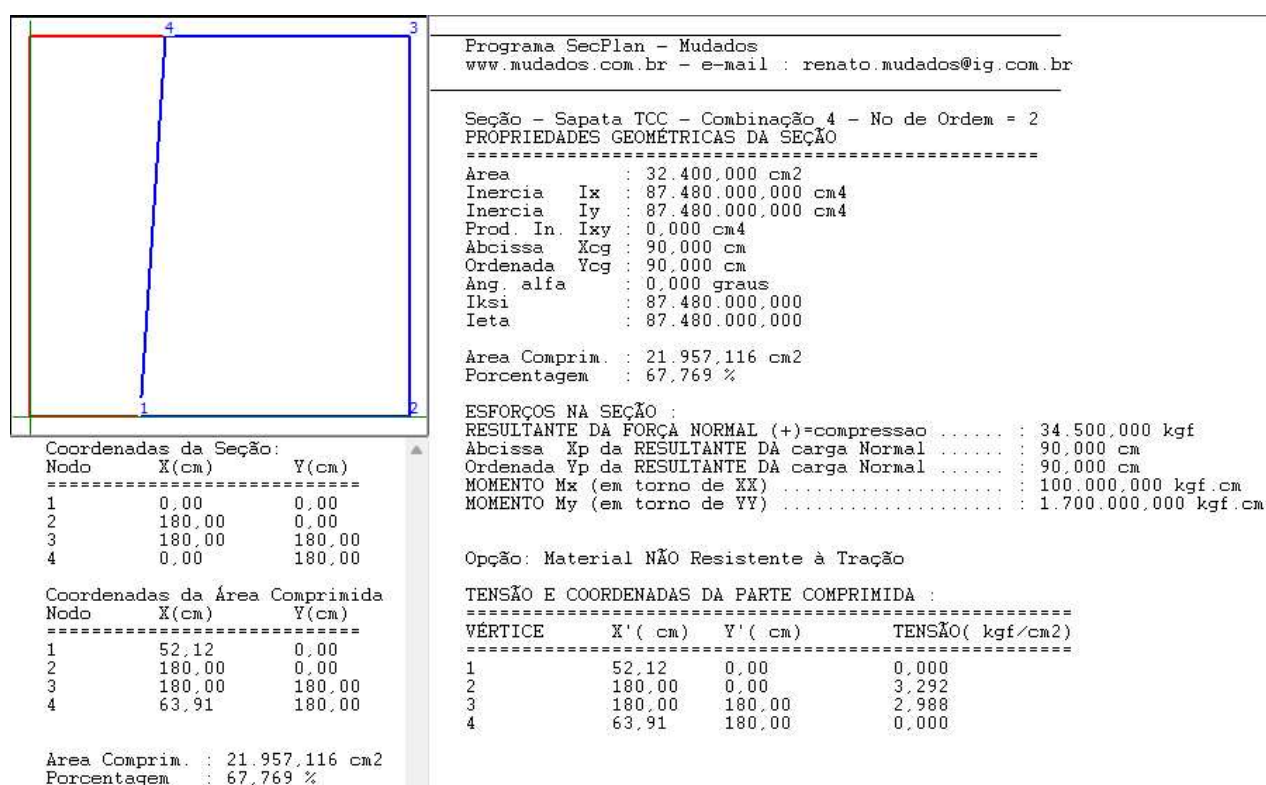
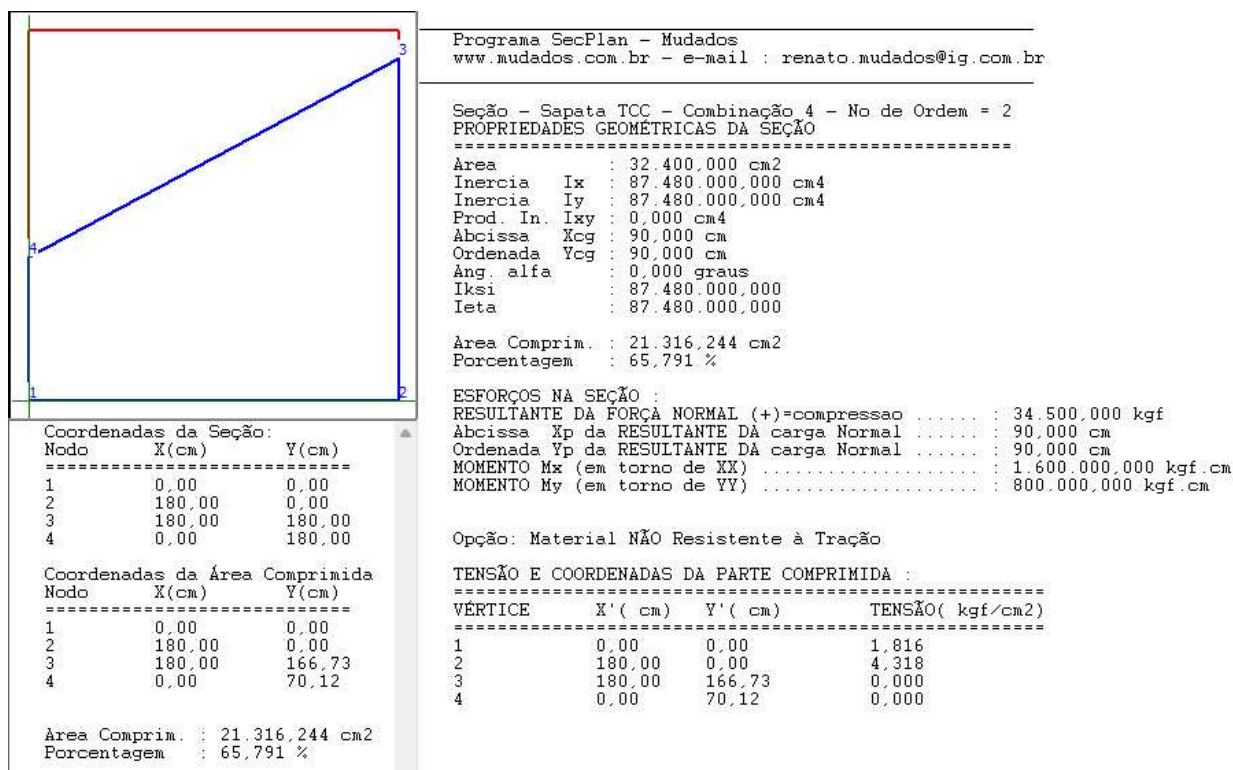


Figura 30 - Combinação 5 Mudados



7.3 Resultados via Cálculo manual das hipóteses

Para maior detalhamento dos cálculos manuais, ver Anexo 1, ao final do trabalho.

7.3.1 Hipótese 1

$$\sigma_1 = 1,271 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_2 = 1,888 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_3 = 0,859 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_4 = 0,242 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{Área Comprimida} \leq 100\%$$

7.3.2 Hipótese 2

$$\sigma_1 = 1,506 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_2 = 2,787 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_3 = 0,861 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_4 = 0,00 \text{ kgf/cm}^2$$

Área Comprimida $\leq 90\%$

7.3.3 Hipótese 3

$$\sigma_1 = 2,79 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_2 = 3,07 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_3 = 0,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_4 = 0,00 \text{ kgf/cm}^2$$

Área Comprimida $\leq 67\%$

7.3.4 Hipótese 4

$$\sigma_1 = 0,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_2 = 3,292 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_3 = 2,988 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_4 = 0,000 \text{ kgf/cm}^2$$

Área Comprimida $\leq 67\%$

7.3.5 Hipótese 5

Área Comprimida $\leq 67\%$

7.4 Apresentação do resumo dos resultados

Quadro 5 - Comparação dos resultados dos cálculos de tensão na base

Comparação entre os resultados dos cálculos de tensão na base						
HIP.	Tensão	Mudados	Dílio	Cálculo Manual	Desvio Dílio	Desvio Mudados
Hipótese 1	σ_1	1,27 kgf/cm ²	1,30 kgf/cm ²	1,27 kgf/cm ²	2,28%	0,00%

	$\sigma 2$	1,88 kgf/cm ²	1,90 kgf/cm ²	1,88 kgf/cm ²	1,06%	0,00%
	$\sigma 3$	0,86 kgf/cm ²	0,90 kgf/cm ²	0,86 kgf/cm ²	4,77%	0,00%
	$\sigma 4$	0,24 kgf/cm ²	0,20 kgf/cm ²	0,24 kgf/cm ²	17,36%	0,00%
Hipótese 2	$\sigma 1$	1,47 kgf/cm ²	1,50 kgf/cm ²	1,51 kgf/cm ²	0,40%	2,39%
	$\sigma 2$	2,78 kgf/cm ²	2,80 kgf/cm ²	2,79 kgf/cm ²	0,36%	0,22%
	$\sigma 3$	0,63 kgf/cm ²	0,90 kgf/cm ²	0,86 kgf/cm ²	4,53%	26,83%
	$\sigma 4$	0,00 kgf/cm ²	0,00 kgf/cm ²	0,00 kgf/cm ²	-	-
Hipótese 3	$\sigma 1$	2,79 kgf/cm ²	3,10 kgf/cm ²	2,79 kgf/cm ²	11,11%	0,00%
	$\sigma 2$	3,07 kgf/cm ²	2,80 kgf/cm ²	3,07 kgf/cm ²	8,79%	0,10%
	$\sigma 3$	0,00 kgf/cm ²	0,00 kgf/cm ²	0,00 kgf/cm ²	-	-
	$\sigma 4$	0,00 kgf/cm ²	0,00 kgf/cm ²	0,00 kgf/cm ²	-	-
Hipótese 4	$\sigma 1$	0,00 kgf/cm ²	0,00 kgf/cm ²	0,00 kgf/cm ²	-	-
	$\sigma 2$	3,29 kgf/cm ²	3,30 kgf/cm ²	3,29 kgf/cm ²	0,24%	0,06%
	$\sigma 3$	2,99 kgf/cm ²	3,00 kgf/cm ²	2,99 kgf/cm ²	0,40%	0,07%
	$\sigma 4$	0,00 kgf/cm ²	0,00 kgf/cm ²	0,00 kgf/cm ²	-	-
Hipótese 5	$\sigma 1$	-	-	-	-	-
	$\sigma 2$	-	-	-	-	-

	$\sigma 3$	-	-	-	-	-
	$\sigma 4$	-	-	-	-	-

Média desvio Dílio: 4,66%

Média desvio Mudados: 2,70%

Quadro 6 - Comparação entre os resultados dos cálculos de área comprimida

Comparação entre os resultados dos cálculos de área comprimida			
HIP.	Mudados	Dílio	Cálculo Manual
Hipótese 1	100,00%	100,00%	100,00%
Hipótese 2	92,00%	96,00%	≥90%
Hipótese 3	72,50%	72,50%	≥67%
Hipótese 4	67,80%	67,80%	≥67%
Hipótese 5	65,80%	<67%	<67%

8. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a assertividade de diferentes abordagens para o cálculo de tensão na base de

sapatas, utilizando o programa Mudados (conforme a seção SecPlan), o Programa do Engenheiro Dílio e o cálculo manual, por meio de um estudo comparativo de cinco hipóteses de carregamento. Os resultados obtidos demonstraram uma convergência satisfatória entre as diferentes metodologias, reforçando a confiabilidade dos

softwares empregados, desde que utilizados de maneira adequada e considerando os limites impostos por suas formulações.

Possíveis discrepâncias entre os resultados podem ser atribuídas a fatores como arredondamentos durante os cálculos e diferenças inerentes aos algoritmos empregados pelos softwares. Essas pequenas variações não comprometem as conclusões gerais e são esperadas dentro do contexto prático do dimensionamento de fundações.

A análise evidenciou que tanto o Mudados quanto o Programa do Engenheiro Dílio oferecem ferramentas robustas para o dimensionamento de sapatas, cada um com suas vantagens. O Mudados se destacou pela capacidade de lidar com geometrias mais complexas e visualização de tensões em diferentes regiões da base, enquanto o Programa do Engenheiro Dílio se mostrou eficiente para cálculos rápidos e análises diretas.

Adicionalmente, o cálculo manual permanece uma abordagem essencial para validação e compreensão dos fenômenos físicos envolvidos, sendo indispensável para engenheiros em formação e para o desenvolvimento de uma base sólida de conhecimento.

Por fim, este trabalho contribui para a validação das ferramentas computacionais analisadas e destaca a importância de uma abordagem crítica e fundamentada na escolha e aplicação de métodos de cálculo para o dimensionamento de fundações rasas. Futuramente, estudos adicionais poderiam explorar a integração entre diferentes ferramentas, bem como a análise de casos com condições de carregamento ainda mais complexas, promovendo um avanço contínuo no campo da engenharia de fundações.

9. ANEXO – CÁLCULO MANUAL

Hipótese 1

Condição para que a excentricidade esteja localizada no núcleo central:

$$\frac{|e_x|}{l_x} + \frac{|e_y|}{l_y} \leq \frac{1}{6}$$

$$Ex1 = 3tfxm/34,5tf = 0,087m$$

$$Ey1 = 5tfxm/34,5tf = 0,145m$$

$$Lx = 1,80m$$

$$Ly = 1,80m$$

$$\text{Portanto a inequação será } = (0,087/1,80) + (0,145/1,80) \leq 1/6$$

0,13 ≤ 0,17 – OK, carga normal dentro do núcleo central, portanto será utilizada a equação xx para cálculo das tensões nos vértices:

$$\sigma(x,y) = (N/A) + ((Mx*y)/Ix) + ((My*x)/Iy)$$

$$Ix = Iy = (Lx * Ly^3) / 12 = (1,80 * (1,80^3)) / 12 = 0,8748m^4$$

Vértice V1(-0,90;-0,90)

$$\sigma V1 = (N/A) + ((Mx * -0,90)/Ix) + ((My * -0,90)/Iy)$$

$$\sigma 1 = (34,5/3,24) + ((5 * -0,90)/0,8748) + ((3 * -0,90)/0,8748) = 2,42tf/m^2 = 0,242kgf/cm^2$$

Vértice V2(0,90;-0,90)

$$\sigma 2 = (34,5/3,24) + ((5 * -0,90)/0,8748) + ((3 * 0,90)/0,8748) = 8,59tf/m^2 = 0,859kgf/cm^2$$

Vértice V3(0,90;0,90)

$$\sigma 3 = (34,5/3,24) + ((5 * 0,90)/0,8748) + ((3 * 0,90)/0,8748) = 18,88tf/m^2 = 1,888kgf/cm^2$$

Vértice V4(-0,90;0,90)

$$\sigma 4 = (34,5/3,24) + ((5 * 0,90)/0,8748) + ((3 * -0,90)/0,8748) = 12,71tf/m^2 = 1,271kgf/cm^2$$

Todos os vértices apresentaram tensões de compressão, portanto, a área comprimida é igual a 100%.

Hipótese 2

$$Ex2 = 6tfxm/34,5tf = 0,174m$$

$$e_y = 10t_{fxm}/34,5t_f = 0,29m$$

Inequação:

$$\text{Portanto a inequação será } = (0,174/1,80) + (0,29/1,80) \leq 1/6$$

$0,26 \geq 0,17$ – Carga normal está localizada fora do núcleo central, portanto será necessário estimar em qual região a excentricidade se encontra.

Para garantir que não cai na região 4, basta atender à inequação abaixo

$$\left(\frac{e_x}{I_x}\right)^2 + \left(\frac{e_y}{I_y}\right)^2 \leq \frac{1}{12,96}$$

$$\text{Portanto a inequação será } = (0,174/1,80)^2 + (0,29/1,80)^2 \leq 1/12,96$$

$$0,035 \leq 0,077$$
 – A resultante das forças não está na região 4.

Cálculo da linha neutra:

$$a' = -(((180/2) + 170)/(301,55 + 180/2)) = 0,66$$

$$b' = 1$$

$$c' = +(((180/2) + 170)/(301 + 180/2)) * (180/2) - 170 = -110,6$$

$$d1(90;90) = -(0,66 * (-180/2) + 1 * (-180/2) - 110,6) / \text{RAIZ}(0,66^2 + 1^2) = 117,2\text{cm}$$

$$dmáx(-90;90) = -(-0,66 * (180/2) + 1 * (-180/2) - 110) / \text{RAIZ}(-0,66^2 + 1^2) = 217\text{cm}$$

$$d3(-90;-90) = -(-0,66 * (180/2) + 1 * (180/2) - 110,6) / \text{RAIZ}(-0,66^2 + 1^2) = 67\text{cm}$$

Limites da posição do núcleo central e região 1:

$$= -b/a * e_x + b/6 < e_y = (-180/180) * 17,4 + 180/6 = 12,61\text{cm}$$

$$= (b/3 * a) * e_x + b/6 = 180/3 * 180 * 17,4 + 180/6 = 35,8\text{cm}$$

$$= ((3 * b)/a) * e_x - b/2 = (3 * 180)/180 * 17,4 - 180/2 = -37,83\text{cm}$$

$$= \text{SE}(E(12,61 < e_y; 35,8 > e_y; -37,8 < e_y) = \text{REGIÃO 1}$$

$$12,61\text{cm} < 29\text{cm}; 35,8\text{cm} > 29\text{cm}; -37,8\text{cm} < 29\text{cm} \rightarrow \text{OK para Região 1.}$$

A posição da excentricidade da carga normal se encontra na região 1.

Portanto, se faz necessário aplicar as equações do item xx

$$T = (180/12) * ((180/17,4) + \text{RAIZ}((180^2/17,4^2) - 12)) = 301,5\text{cm}$$

$$S = (180/12) * ((180/29) + \text{RAIZ}((180^2/29^2) - 12)) = 170,5\text{cm}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{a \cdot b} \cdot \eta \cdot [12 - 3,9(6\eta - 1)(1 - 2\eta)(2,3 - 2\eta)]$$

$$\eta = \frac{e_x}{a} + \frac{e_y}{b}$$

$$n = (0,174/1,80) + (0,290/1,80) = 0,258$$

$$\sigma_{\max} = (34500 / (180 \cdot 180)) \cdot 0,258 \cdot (12 - 3,9 \cdot (6 \cdot 0,258 - 1) \cdot (1 - 2 \cdot 0,258) \cdot (2,3 - 2 \cdot 0,258)) = 2,79 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_I}{d_I} = \frac{\sigma_{III}}{d_{III}} = \frac{\sigma_{\max}}{d_{\max}}$$

$$\sigma_1 = 2,79 \cdot 117,2 / 217 = 1,51 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{\max} = 2,79 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_3 = 2,79 \cdot 67 / 217 = 0,861 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_4 = 0 \text{ kgf/cm}^2$$

Área comprimida

$$= (0,174/1,80)^2 + (0,29/1,80)^2 = 0,035 \leq 0,40, \text{ logo a área comprimida é maior do que } 90\%$$

Hipótese 3

$$E_{x3} = 1 \text{ tfxm} / 34,5 \text{ tf} = 0,03 \text{ m}$$

$$E_{y3} = 16 \text{ tfxm} / 34,5 \text{ tf} = 0,46 \text{ m}$$

Inequação:

$$\text{Portanto a inequação será } = (0,03/1,80) + (0,46/1,80) \leq 1/6$$

$0,27 \geq 0,17$ – A Resultante das cargas está localizada fora do núcleo central, portanto será necessário estimar em qual região a excentricidade se encontra.

Para garantir que não caia na região 4, basta atender à inequação xx

$$\left(\frac{e_x}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{e_y}{l_y} \right)^2 \leq \frac{1}{12,96}$$

Portanto a inequação será $= (0,03/1,80)^2 + (0,46/1,80)^2 \leq 1/12,96$

$0,067 \leq 0,077$ – A resultante das forças não está na região 4.

Cálculo da linha neutra:

$$a' = -(((180/2) + 84,48)/(1861 + 180/2)) = 0,09$$

$$b' = 1$$

$$c' = (((180/2) + 84,48)/(1861 + 180/2)) * (180/2) - 84,48 = -76,43$$

$$d1(90;90) = -(0,09 * (-180/2) + 1 * (-180/2) - 76,43) / \text{RAIZ}(0,09^2 + 1^2) = 157,8 \text{ cm}$$

$$dmáx(-90;90) = -(0,09 * (180/2) + 1 * (-180/2) - 76,43) / \text{RAIZ}(0,09^2 + 1^2) = 173,8 \text{ cm}$$

Limites da posição do núcleo central e região 2:

$$=(b/3*a)*ex + b/6 = (180/(3*180))*2,90 + 180/6 = 31 \text{ cm}$$

$$=(-4*b/(3*a^2))*ex + b/3 = (-4*180/3*180^2)*2,90 + 180/3 = 59,98 \text{ cm}$$

$$=SE(E(31 \text{ cm} < ey; 59,98 \text{ cm} > ey)) = \text{REGIÃO 2}$$

$31 \text{ cm} < 46,38 \text{ cm}; 59,98 \text{ cm} > 46,38 \rightarrow \text{OK para Região 2.}$

A posição da excentricidade da carga normal se encontra na região 2.

Portanto, se faz necessário aplicar as equações do item xx

$$t = (180/12) * ((180/2,90) + \text{RAIZ}((180^2/2,90^2) - 12)) = 1861,55 \text{ cm}$$

$$\alpha = \text{ATAN}((3/2) * ((180 - 2*46,38)/(1861 + 2,90))) * 180/\text{PI}() = 4,015$$

$$\sigma_{\max} = \frac{12N}{a \cdot \text{tg}\alpha} \cdot \frac{a + 2t}{a^2 + 12t^2}$$

$$\sigma_{\max} = ((12*34500)/(180*\text{TAN}(4,015*\text{PI}()/180))) * ((180 + 2*1861)/(180^2 + 12*1861^2)) = 3,073 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_I}{d_I} = \frac{\sigma_{\max}}{d_{\max}}$$

$$\sigma_1 = 3,073 \cdot 157,8 / 173,8 = 2,79 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 3,073 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_3 = 0,00 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_4 = 0,00 \text{ kgf/cm}^2$$

Área comprimida =

$$SE(E((0,03/1,80)^2 + (0,46/1,80)^2 > (49/900); (0,03/1,80)^2 + (0,46/1,80)^2$$

$\leq (1/12,96)) \rightarrow$ área comprimida maior que 67% e menor que 80%

$$0,065 > 0,054 ; 0,065 < 0,077$$

Logo a sapata estará com a área comprimida maior que 67% e menor que 80%, conforme hipótese 3.

Hipótese 4

$$Ex_4 = 17 t f x m / 34,5 t f = 0,493 m$$

$$Ey_4 = 1 t f x m / 34,5 t f = 0,03 m$$

Inequação:

$$\text{Portanto a inequação será } = (0,49/1,80) + (0,03/1,80) \leq 1/6$$

$0,29 \geq 0,17$ – Carga normal está localizada fora do núcleo central, portanto será necessário estimar em qual região a excentricidade se encontra.

Para garantir que não caia na região 4, basta atender à inequação abaixo:

$$\left(\frac{e_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{e_y}{l_y}\right)^2 \leq \frac{1}{12,96}$$

$$\text{Portanto a inequação será } = (0,49/1,80)^2 + (0,03/1,80)^2 \leq 1/12,96$$

$0,075 \leq 0,077$ – A resultante das forças não está na região 4.

$$a' = -(((b/2) + 1861) / (72,2 + 180/2)) = -12$$

$$b = 1$$

$$c' = +(((180/2) + 1861) / (72,2 + 180/2)) * (180/2) - 1861 = -778,6$$

$$dm_{\text{máx}}(-90;90) = -(-12 * (180/2) + 1 * (-180/2) - 778,6) / \text{RAIZ}(-12^2 + 1^2) = 161,6 \text{ cm}$$

$$d3(-90;-90) = (-12*(180/2)+1*(180/2)-778,6)/\text{RAIZ}(-12^2+1^2) = 146,7\text{cm}$$

Limites da posição do núcleo central

$$=(3*b/a)*ex-(b/2) = 3*180/180*49,28-(180/2) = 57,83\text{cm}$$

$$=\text{RAIZ}(((a/3)-ex)*((3*b^2)/(4*a))) = \text{RAIZ}(((180/3)-49,28)*((3*180^2)/(4*180))) = 38,05\text{cm}$$

$$\text{SE}(E(57,83\text{cm}>ey;38,05\text{cm}>ey); = \text{REGIÃO 3}$$

$$57,83\text{cm}>2,90\text{cm}; 38,05\text{cm}>2,90\text{cm}; \rightarrow \text{Ok para REGIÃO 3}$$

A posição da excentricidade da carga normal se encontra na região 3.

Portanto, se faz necessário aplicar as equações do item xx

$$s = (180/12)*((180/2,9)+\text{RAIZ}((180^2/2,90^2)-12)) = 1861,55\text{cm}$$

$$\beta = \text{ATAN}((3/2)*((180-2*49,28)/(1861,55+2,90)))*180/\text{PI}() = 3,749$$

$$\sigma_{\text{máx}} = ((12*34500)/(180*\text{TAN}(3,749*\text{PI}()/180)))*((180+2*1861)/(180^2+12*1861^2)) = 3,29 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_{\text{III}}}{d_{\text{III}}} = \frac{\sigma_{\text{máx}}}{d_{\text{máx}}}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 3,292\text{kgf/cm}^2$$

$$\sigma_3 = 3,292*146,7/161,6;0 = 2,988\text{kgf/cm}^2$$

Área comprimida =

$$\text{SE}(E((0,49/1,80)^2+(0,03/1,80)^2>(49/900); (0,49/1,80)^2+(0,03/1,80)^2$$

$$<=(1/12,96)) \rightarrow \text{área comprimida maior que 67\% e menor que 80\%}$$

$$0,075>0,054 ; 0,075 < 0,077$$

Logo a sapata estará com a área comprimida um pouco maior que 67%, conforme hipótese 4.

HIPÓTESE 5

$$E_{x5} = 8tfxm/34,5tf = 0,232m$$

$$E_{y5} = 16tfxm/34,5tf = 0,464m$$

Inequação:

$$\text{Portanto a inequação será} = (0,232/1,80) + (0,464/1,80) \leq 1/6$$

$0,39 \geq 0,17$ – Carga normal está localizada fora do núcleo central, portanto será necessário estimar em qual região a excentricidade se encontra.

Para garantir que não caia na região 4, basta atender à inequação xx

$$\left(\frac{e_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{e_y}{l_y}\right)^2 \leq \frac{1}{12,96}$$

$$\text{Portanto a inequação será} = (0,232/1,80)^2 + (0,464/1,80)^2 \leq 1/12,96$$

$0,083 \leq 0,077$ – A resultante das forças está na região 4, ou seja, menos do que 2/3 da área da sapata está sendo comprimida, portanto, esta geometria não é válida para o carregamento da hipótese 5.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e Execução de fundações**. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2001.

BASTOS, Paulo Sérgio. Apostila de sapatas de fundação. Bauru, SP: Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2023.

PIANCASTELLI, Élvio Mosci. Apostila de fundações superficiais: dimensionamentos geométrico e estrutural. Revisão 2. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, Departamento de Engenharia de Estruturas, 2018.

ERNANI, José. **Curso de Estruturas de Fundação 1ª parte**. 1ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia de Estruturas, UFMG, 2003.

PEREIRA, Caio. **Fundações Rasas**, Escola Engenharia, 2018. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/fundacoes-rasas/>>. Acesso em: 24 de Nov. de 2019

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

W. HARCHICH, F. FALCONI, et al. **Fundações: Teoria e prática**. 2ª Ed. São Paulo: Pini, 1998

CURADO, Adriano. **O que é solo arenoso? Conheça as características e como identificá-lo**, R7, 2019. Disponível em: <<https://conhecimentocientifico.r7.com/o-que-e-solo-arenoso-conheca-as-caracteristicas-e-como-identifica-lo/>> .Acesso em: 23 de jan. de 2019.

SOLOS SILTOSOS, Frank e sustentabilidade, 2012. Disponível em: <<https://engenhafrankweb.wordpress.com/2012/06/26/solos-siltosos/>>. Acesso em: 26 de jun. de 2019.

LIMA, Marcelo. **Principais tipos de solos do Brasil**. Curitiba: Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Universidade federal do Paraná, 2007.

ZUCUNI, Luciano. **SOLOS**. Santa Maria: Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

CARVALHO, Gil. **Caracterização física e classificação dos solos**. Departamento de transportes, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005