



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



**ELABORAÇÃO DE ROTINAS DE CÁLCULO NO SOFTWARE SMATH
STUDIO: Dimensionamento de sapatas rígidas e análise
comparativa com os resultados processados pelo software AltoQi
Eberick**

Gabriel de Carvalho Neves – 201806740027

Henrique Silva Moraes Filho – 201806740020

Belém - PA
Julho/2023

Gabriel de Carvalho Neves – 201806740027
Henrique Silva Moraes Filho – 201806740020

**ELABORAÇÃO DE ROTINAS DE CÁLCULO NO SOFTWARE SMATH
STUDIO: Dimensionamento de sapatas rígidas e análise
comparativa com os resultados processados pelo software AltoQi
Eberick**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil do Campus Universitário do Guamá, da Universidade Federal do Pará como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Dra. Nívea Gabriela Benevides de Albuquerque
Co-orientador: Dr. Gérson Jacques Miranda dos Anjos

Belém - PA
Julho/2023

**GABRIEL DE CARVALHO NEVES
HENRIQUE SILVA MORAES FILHO**

**ELABORAÇÃO DE ROTINAS DE CÁLCULO NO SOFTWARE
SMATH STUDIO: Dimensionamento de sapatas rígidas e análise
comparativa com os resultados processados pelo software AltoQi
Eberick**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Belém, ____ / ____ / ____

Examinadores

Professora Dr(a). Nívea Gabriela Benevides de Albuquerque
Universidade Federal do Pará | UFPA
Orientadora

Professor Dr. Rodrigo da Cruz de Araújo
Universidade Federal do Pará | UFPA
Membro da banca

M.Sc. João Felipe Amintas Seráfico de Assis Carvalho Melo
Membro da banca

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho à nossa família,
que sempre esteve nos apoiando e dando
todo o suporte necessário para chegarmos
até aqui, bem como durante esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a DEUS, Todo Poderoso, aquele que já havia traçado a nossa caminhada até aqui desde antes de sequer imaginarmos. Ele que sempre está presente, e ilumina a saída dos momentos mais difíceis, se mostrando a solução de tudo que precisamos.

Somos gratos aos nossos pais Henrique Silva Moraes, Heliana da Rosa Moraes, Calixto de Freitas Neves e Orlandira de Carvalho Neves. Que em toda nossa graduação e nossa vida estiveram dando apoio, nos ajudando a superar os obstáculos, comemorando cada conquista e que sempre estiveram orando por nós. Com toda certeza não chegaríamos até aqui sem vocês. Amamos vocês.

Aos nossos irmãos Emanuelle da Rosa Moraes e Fernando José de Carvalho Neves, que foram sinônimos de companheirismo e irmandade. Torcendo sempre por nós, pelo nosso sucesso e vibrando por cada conquista que fomos alcançando. Obrigado por sonharem junto conosco.

Aos nossos orientadores, professores Dra. Nívea Gabriela Benevides de Albuquerque e Dr. Gérson Jacques Miranda dos Anjos, que sempre estavam dispostos a nos ajudar e tornar esse trabalho cada vez melhor e eficiente. Somos muito gratos por todas as orientações no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

Somos gratos ao engenheiro João Felipe Amintas Seráfico de Assis Carvalho Melo, pelo suporte técnico e imenso conhecimento e experiência repassados ao longo desta trajetória.

Agradecemos ao grupo PET Civil UFPA e a cada um dos seus integrantes durante toda a nossa passagem por esse grupo, formamos amigos que levaremos para a nossa vida toda.

A todos os nossos amigos do curso e das nossas igrejas, os quais com certeza fizeram parte da nossa caminhada, nos apoiando das mais variadas formas.

O nosso muito obrigado!

EPÍGRAFE

Irmãos, não penso que eu mesmo já o tenha alcançado, mas uma coisa faço: esquecendo-me das coisas que ficaram para trás e avançando para as que estão adiante, prossigo para o alvo, a fim de ganhar o prêmio do chamado celestial de Deus em Cristo Jesus.

(Apóstolo Paulo de Tarso)

RESUMO

NEVES, G. C.; MORAES FILHO, H. S. **Elaboração de rotinas de cálculo no software SMath studio: dimensionamento de sapatas rígidas e análise comparativa com os resultados processados pelo software AltoQi Eberick**. 2023. 55f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém.

Este trabalho possui foco no problema de dimensionamento de sapatas de concreto armado e a consequente verificação de recalques, dado que imprecisões de cálculo de deslocamento podem conduzir a diferentes prognósticos desfavoráveis à vida útil da estrutura. A abordagem proposta para validação de métodos traz uma alternativa ao uso de softwares comerciais que dominam a indústria de projetos estruturais com o uso de ferramentas tecnológicas como programas-fonte abertos que permitem a verificação e descrição dos códigos e funcionalidades programados. Optou-se pelo software livre SMath Studio por facilitar a apresentação das equações adotadas e a elaboração de rotinas computacionais, sendo selecionadas referências consolidadas na área de geotecnia que permitem um espectro qualitativamente variado sobre usos das equações tradicionalmente adotadas nesses cálculos para aplicações em contextos profissionais, tomando-se como contraponto, o tradicional software Eberick, desenvolvido pela empresa AltoQi. Das simulações computacionais desenvolvidas, atestou-se que o script apresentou desempenho satisfatório, o que garantiu resultados seguros do ponto de vista de cálculo, uma vez que as tensões resistentes da armadura superam os valores dos esforços de tração na base da sapata, bem como não há esmagamento das bielas de compressão nem recalques maiores que os limites adotados na literatura. A revisão dos conceitos para o desenvolvimento do trabalho permitiu inserir aprendizados que auxiliam na compreensão do fenômeno, diminuem significativamente a possibilidade de erros de entrada e incorporam o conhecimento formal devido ao desenvolvimento iterativo e incremental, possibilitando melhores práticas de projeto.

Palavras-chave: Dimensionamento. Fundação. Sapatas. SMath Studio. Eberick.

ABSTRACT

NEVES, G. C.; MORAES FILHO, H. S. **Development of calculation routines in SMath studio software: design of rigid footings and comparative analysis with results processed by AltoQi Eberick software** 2023. 55p. Diploma Work (Graduate in Civil Engineering) - Faculty of Civil Engineering, Federal University of Pará, Belém.

This work focuses on the design problem of reinforced concrete footings and the consequent verification of settlements, given that displacement calculation inaccuracies can lead to different unfavorable prognoses for the useful life of the structure. The proposed approach for method validation brings an alternative to the use of paid commercial software that dominates the structural design industry with the use of technological tools with open-source programs that describe the codes and functionalities. The free software SMath Studio was chosen to facilitate the presentation of the adopted equations and the elaboration of computational routines, being selected consolidated references in the area of geotechnics that allow a qualitatively varied spectrum on uses of the equations traditionally adopted in these calculations for applications in professional contexts, using the traditional Eberick software, developed by AltoQi, as a counterpoint. From the computational simulations developed, it was attested that the variation of responses presented satisfactory performance that guaranteed safe results from the calculation point of view, since the resistant stresses of the reinforcement exceed the values of the tensile efforts at the base of the shoe, as well as there is no crushing of the compression struts nor settlements greater than the limits adopted in the literature. The revision of the concepts for the development of the work allowed to insert learning that helps in the understanding of the phenomenon, significantly reduces the possibility of input errors and incorporates the formal knowledge to the iterative and incremental development, allowing for better design practices.

Key words: Design. Foundation. Shoes. SMath Studio. Eberick.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de tensões ao longo do solo.....	21
Figura 2 - Consideração de Campos (2022) para profundidade do bulbo de tensões.....	21
Figura 3 - Dimensões da sapata e do pilar.....	23
Figura 4 - Quadro de parâmetros de aço.....	26
Figura 5 - Métodos de cálculo de Anagnostopoulos et al (1991) com fator de correção por Anjos (2019).....	27
Figura 6 - Regiões de ensaio de simples reconhecimento - Belém/PA.....	29
Figura 7 - Estrutura de análise e comparação.....	30
Figura 8 - Parâmetros para comparação.....	31
Figura 9 - Interface do SMath Studio com expressões matemáticas aplicadas no dimensionamento estrutural de sapatas.....	32
Figura 10 - Interface do SMath Studio com campos de input de informações.....	33
Figura 11 - Interface do AltoQi Eberick mostrando um modelo tridimensional.....	34
Figura 12 - Interface do AltoQi Eberick com resultados do dimensionamento de sapatas....	34
Figura 13 - Fluxograma do funcionamento do script de dimensionamento de sapatas.....	36
Figura 14 - Aba de parâmetros de dimensionamento da estrutura (Eberick).....	37
Figura 15 - Critérios de disposição das armadura (Eberick).....	38
Figura 16 - Resultados do dimensionamento script SMath - Cenário 1.....	41
Figura 17 - Resultados do dimensionamento Eberick - Cenário 1.....	42
Figura 18 - Resultados do dimensionamento script SMath - Cenário 2.....	43
Figura 19 - Resultados do dimensionamento Eberick - Cenário 2.....	43
Figura 20 - Resultados do dimensionamento script SMath - Cenário 3.....	44
Figura 21 - Resultados do dimensionamento Eberick - Cenário 3.....	45
Figura 22 - Relação σ_{adm} e dimensões em planta.....	46
Figura 23 - Relação entre σ_{adm} e áreas das sapatas.....	46
Figura 24 - Resumo da área de aço total calculada para cada cenário.....	48
Figura 25 - Resumo do recalque imediato para cada cenário.....	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Cenários idealizados neste trabalho.....	30
Quadro 2 - Validação do Script quanto ao dimensionamento geotécnico.....	39
Quadro 3 - Validação do Script quanto ao dimensionamento estrutural.....	40
Quadro 4 - Resumo da área de aço total calculada para cada cenário.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Ap. ou Apud – citado por, segundo

Cap. – capítulo

CD-ROM – Disco compacto com memória somente para leitura e impressão

COMUT – Programa de Comutação Bibliográfica

Coord. – coordenador

ed. editor

et al. – e outros

id ou idem – do mesmo autor

ISO – International Organization Standardization

Loc. cit. (loco citato) – Na obra citada

n. – número do fascículo

n.p. – não paginado

NBR - Norma Brasileira

op. cit. (opus citatum) – na obra citada

org. – organizador

p. – página

RENPAAC – Rede Pública de Comunicação de Dados por Comutação de Pacotes

s.d. – sem data

s.ed. – sem editor

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	13
1.2 HIPÓTESE.....	13
1.3 OBJETIVOS.....	14
1.3.1 Objetivo Geral.....	14
1.3.2 Objetivo Específico.....	14
1.4 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	14
1.4.1. Caráter acadêmico:.....	14
1.4.2. Caráter comercial e profissional (validação):.....	15
1.5 LIMITAÇÕES.....	16
1.6 METODOLOGIA.....	16
1.7 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 MÉTODOS E TEORIAS CLÁSSICAS NO DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS	18
2.1.1 Tensão Admissível do Solo.....	18
2.1.2 Bulbo de Tensões e NSPT.....	20
2.1.3 Dimensionamento Geotécnico.....	22
2.1.4 Dimensionamento Estrutural.....	24
2.1.5 Recalque.....	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1 CENÁRIOS SOB ANÁLISES.....	28
3.1.1 Regiões de estudo.....	28
3.1.2 Estrutura modelo.....	30
3.2 DESCRIÇÃO DOS SOFTWARES UTILIZADOS.....	31
3.2.1 SMath Studio.....	31
3.2.2 AltoQi Eberick.....	33
3.3 COMPARATIVO PROPOSTO NO ESTUDO.....	35
3.3.1 Script de Dimensionamento Geotécnico e Estrutural de Sapatas (SMath).....	35
3.3.2 Método de cálculo das fundações pelo Software AltoQi Eberick.....	36
3.4 VALIDAÇÃO DO SCRIPT DESENVOLVIDO NO SOFTWARE SMATH STUDIO...	39
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1 CENÁRIO 1 - CABANAGEM.....	40

4.2 CENÁRIO 2 - VAL DE CÃES.....	42
4.3 CENÁRIO 3 - TERRA FIRME.....	44
4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	45
5. CONCLUSÃO.....	49
5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	50
REFERÊNCIAS.....	51
APÊNDICE A - SCRIPT DE DIMENSIONAMENTO ATRAVÉS DO SOFTWARE SMATH.....	53
APÊNDICE B - RELATÓRIOS GERADOS PELO SOFTWARE ALTOQI.....	62
ANEXO A - LAUDOS DE SONDAgens SPT.....	63

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A subestrutura, ou fundação, é a parte de uma estrutura composta por elementos estruturais, geralmente construídos abaixo do nível final do terreno, responsável por transmitir ao solo todas as ações (cargas verticais, forças do vento, etc.) que atuam na edificação (BASTOS, 2019).

Classifica-se as fundações superficiais, rasas ou diretas segundo o item 3.1 da NBR 6122 como *“elemento de fundação em que a carga é transmitida ao terreno pelas tensões distribuídas sob a base da fundação e a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente à fundação é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação.”* O elemento mais utilizado e comum nesse tipo de fundação é a sapata, cujo dimensionamento é o objeto de estudo deste trabalho. Com as definições explicitadas acima, pode-se perceber a importância do estudo desses elementos em todas as construções do âmbito civil, industrial, comercial, etc. A fundação é a base de sustentação da obra, então a precisão e efetividade na elaboração dela é imprescindível.

Em função da alta complexidade que pode surgir no cálculo de fundações superficiais (devido ao solo, teorias utilizadas no cálculo, falta de estudos sobre o terreno, etc), é importante analisar os métodos de cálculo utilizados e se ter o conhecimento de sua aplicação, a fim de torná-los mais precisos e efetivos.

Por isso, foi desenvolvido um script de dimensionamento geotécnico e estrutural de sapatas no software livre SMath Studio de acordo com diversas teorias clássicas. Além disso, foi feito o mesmo dimensionamento de sapatas no tradicional software Eberick, a fim de verificar a relação entre os métodos aplicados na prática da engenharia e os métodos teóricos.

1.2 HIPÓTESE

Diante da relação custo / benefício entre diferentes softwares voltados aos projetos de engenharia, onde, por um lado, o aprendizado de um novo programa pode ser trabalhoso e demorado, além de não ser gratuito. Com isso, partiu-se da premissa de que o desenvolvimento do próprio algoritmo de cálculo traz benefícios acompanhados do ganho de experiência e conhecimento sobre o assunto. Como exemplo disso, tem-se que a rotina de

cálculo desenvolvida permite ao usuário o completo entendimento das interações entre as variáveis em estudo.

Outro ponto, deveras importante a ser levantado como hipótese é que o uso do próprio algoritmo de cálculo mediante o uso de um software livre como o SMath Studio traz benefícios como a utilização acessível devido a gratuidade de licença e a interface de simples entendimento.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um script de dimensionamento geotécnico e estrutural de sapatas que valide os métodos utilizados na prática da engenharia através de softwares comerciais já bastante difundidos no mercado.

1.3.2 Objetivo Específico

Para o objetivo geral ser alcançado, alguns objetivos específicos foram realizados:

- Produzir uma ferramenta que auxilie o engenheiro civil no cálculo de sapatas isoladas com carga centrada em um fluxo que proporcione, ao final do dimensionamento, todas as informações necessárias à elaboração de projetos estruturais.
- Difundir ferramentas computacionais com programas-fonte abertos que descrevem os códigos e funcionalidades utilizados.

1.4 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

1.4.1. Caráter acadêmico:

No Brasil, o uso de software gratuito para aplicação no ensino tem se tornado cada vez mais comum e relevante. Existem várias iniciativas e programas que visam promover o acesso

a tecnologias educacionais de forma gratuita, tanto para escolas públicas quanto para instituições de ensino privadas.

O Ministério da Educação (MEC) e o Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) têm investido em projetos e parcerias para disponibilizar softwares educacionais gratuitos, especialmente por meio do programa "Educação Conectada". Essa iniciativa busca promover a inclusão digital nas escolas brasileiras, oferecendo infraestrutura tecnológica, conteúdos digitais e soluções educacionais de software.

Programas de acesso aberto permitem que qualquer estudante de engenharia tenha ferramentas de projeto e cálculo para resolver problemas complexos, trabalhando online ou offline em suas versões desktop. Desta forma, recursos educacionais que utilizam software livre não só facilitam o acesso a ferramentas de trabalho profissional para todos os alunos, mas também reduzem os custos de educação e permitem que a qualidade do conteúdo seja melhorada diariamente graças às contribuições da comunidade acadêmica e profissional que os usa (DIAZ *et al*, 2022).

Com isso o uso do SMath Studio pode vir a proporcionar acessibilidade a todos os estudantes do curso de engenharia, por conta do software ser gratuito e acessível, e uma vez conhecido, o software se torna uma ferramenta ideal para ensinar ou escrever artigos de pesquisa que exijam uma aparência visual atraente que facilite a disseminação do conhecimento.

1.4.2. Caráter comercial e profissional (validação):

Embora o SMath Studio não seja um software específico para engenharia civil, ele oferece recursos matemáticos e de cálculo avançados que podem ser úteis para profissionais e estudantes dessa área. Alguns dos meios em que ele pode ser utilizado pelos profissionais da área e âmbito comercial, são os seguintes:

- **Cálculos Estruturais:** O SMath Studio permite realizar cálculos complexos de análise estrutural, como determinação de forças, momentos, deformações e tensões em elementos estruturais, como vigas, pilares e lajes. Ele oferece funções matemáticas avançadas e a capacidade de escrever equações personalizadas para resolver problemas estruturais específicos.
- **Análise de Vigas e Pórticos:** Com o SMath Studio, é possível realizar análises de vigas e pórticos, determinando as reações de apoio, às forças internas e as

deflexões nessas estruturas. O software pode auxiliar no projeto e dimensionamento de estruturas de suporte, como pontes e edifícios.

- Geotecnia e Mecânica dos Solos: O SMath Studio pode ser utilizado para realizar cálculos relacionados à geotecnia e mecânica dos solos, como a determinação de capacidade de carga de fundações, cálculos de estabilidade de taludes e análise de consolidação do solo. Ele permite a modelagem matemática de fenômenos geotécnicos e a resolução de equações diferenciais aplicadas à geotecnia.

Logo com a existência de diferentes métodos amplamente utilizados, o uso do SMath Studio possibilitaria um outro meio para validação dos cálculos de dimensionamento das sapatas. Além disso, o script acrescenta mais uma opção metodológica de cálculo completo de fundações diretas (sapatas).

1.5 LIMITAÇÕES

O script elaborado no SMath Studio possui algumas simplificações no que concerne à organização e sequência do algoritmo de cálculo escolhido para ser produzido, ou seja, ao escolher o tipo de cálculo a ser realizado é necessário seguir as etapas que o constituem no decorrer do seu desenvolvimento, pois as definições das variáveis estarão atreladas às equações que as utilizam, não será possível realizar e detalhar as definições posteriormente nas equações que as utilizam.

Além disso, recursos visuais não são gerados pelo software, como a estrutura dimensionada, os desenhos de saída após o processamento dos cálculos e vídeos demonstrativos da influência das cargas na estrutura. No entanto, essa limitação afeta apenas a questão visual do que está sendo dimensionado e uma exemplificação do que resultou o cálculo.

1.6 METODOLOGIA

Este estudo é uma pesquisa qualitativa, pois o dimensionamento das sapatas é feito, tanto por um software livre (SMath Studio) quanto por um software comercial (AltoQi Eberick) e em diferentes cenários de estudo. E é também quantitativo, pois são feitas

comparações entre os dados obtidos, verificando as dimensões encontradas e a área de aço dos métodos utilizados nos softwares.

Inicialmente, com base em três diferentes cenários reais da cidade de Belém-PA, os quais contemplam a influência das variações de rigidez do solo no dimensionamento de sapatas de concreto armado, buscou-se iniciar o desenvolvimento do script. Com os dados obtidos dos laudos de sondagem de cada um dos solos dessas cenários (Cabanagem, Val de Cães e Terra Firme), foram inseridos no script cada um dos NSPT conforme a NBR 6484:2001. Com isso, foi dado prosseguimento no método pelo SMath, que visa avaliar e interpretar os principais aspectos considerados no comportamento das fundações superficiais com cargas centradas.

Posteriormente, foram obtidos os resultados das variáveis de interesse para cada um dos cenários escolhidos por meio do script elaborado a fim de comparar com o software comercial Eberick.

Após a determinação dos parâmetros do solo de cada cenário, também foi realizado o dimensionamento da sapata para cada um deles com o auxílio do software Eberick. Múltiplas comparações e análises foram realizadas através das informações fornecidas pelo programa.

A primeira análise refere-se à validação dos resultados do Eberick comparando com os obtidos pelo script elaborado com base nas teorias clássicas, deste modo observando se o software atende todas as normas, realiza todas as verificações necessárias e resulta em valores próximos aos encontrados pelo script.

A segunda análise envolve a comparação dos resultados, verificando se os dados de dimensionamento e de área de aço calculados pelo programa Eberick superam os requisitos da norma e da teoria clássica utilizados pelo script desenvolvido no SMath. Para isso, o cálculo do dimensionamento da sapata foi calculado pelo script e comparado com os resultados obtidos pelo software Eberick.

1.7 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Após essa introdução, segue o capítulo 2 relacionando os métodos e teorias clássicas no dimensionamento de sapatas, os quais são tensão admissível do solo, bulbo de tensões e N_{SPT} , dimensionamento geotécnico, dimensionamento estrutural e recalque e suas respectivas

equações de cálculo, descrevendo os trabalhos relacionados e métodos clássicos desenvolvidos por autores consagrados. O capítulo 3 apresenta a proposta de modelagem no software livre SMath Studio e no software comercial Eberick empregados. Finalmente, no capítulo 4 aborda os principais resultados obtidos e as análises comparativas, finalizando com as conclusões no capítulo 5.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo em questão tem a finalidade de abordar os conceitos consolidados de dimensionamento de fundações superficiais (sapatas) tanto nos quesitos estruturais como nos quesitos geotécnicos, mas também a utilização dos softwares já mencionados, com o foco no SMath Studio e esses conceitos serão mencionados no decorrer dos capítulos.

2.1 MÉTODOS E TEORIAS CLÁSSICAS NO DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS

A fim de embasar o desenvolvimento do trabalho, são apresentadas as equações e metodologias de dimensionamento estudadas.

2.1.1 Tensão Admissível do Solo

A Tensão admissível do solo é o parâmetro que permite a obtenção das dimensões mínimas da sapata. É um parâmetro que leva em consideração as características do solo e fatores de segurança que permitem sua utilização de forma segura. Para fundações por sapatas, a NBR 6122 (ABNT, 2010) permite obter os valores de tensão admissível do solo através de uma ou mais das seguintes maneiras: provas de carga em placa, métodos teóricos e métodos semi-empíricos. Neste trabalho, em função dos objetivos e da consolidação do ensaio SPT no meio técnico brasileiro, serão utilizados métodos semi-empíricos para obtenção dos valores de tensão admissível do solo.

Uma correlação bastante conhecida no meio técnico brasileiro é apresentada na Equação 1:

$$\sigma_{adm} = \frac{spt_m}{50} \quad (1)$$

Onde:

σ_{adm} = tensão admissível do solo (MPa)

spt_m = índice de resistência à penetração SPT

Em que o σ_{adm} é definido em função do índice de resistência à penetração SPT. Um de seus demonstradores foi Alonso (1983), que aplicou a estimativa para N_{SPT} (1) menores que 20. Esta correlação também foi demonstrada por Teixeira (1996) em solos puramente argilosos e SPT entre 5 e 20. Skempton (1951) havia definido uma correlação idêntica. Suas definições envolviam $N/50$ e o resultado era dado em MPa.

É interessante ressaltar que, por mais que a NBR 6122 (ABNT, 2010) apresente fatores de segurança a serem aplicados na definição da tensão admissível do solo, as correlações utilizadas nos métodos semi-empíricos já fornecem diretamente o valor da tensão com segurança implícita, dispensando os fatores de segurança. Entretanto, Mello (1975) alerta que

“É preciso analisar a origem e validade de tais formulários de bolso antes de passar a aplicá-los inconscientemente e mesmo prejudicialmente em condições que extravasam do campo experimental do qual decorreram.” (Mello, 1975, p. 61)

Meyerhof (1956) chegou em equações conservadoras a partir das equações desenvolvidas por Terzaghi. Suas equações levam em consideração o N_{spt} (spt_m), a menor dimensão da sapata (B_i) e a cota de assentamento da sapata (z_b), além do tipo de solo ao qual a fundação está aplicada:

$$\sigma_{adm} = \frac{spt_m}{90} \cdot (B_i + z_b) \quad \text{Meyerhof (1956) - Solos Arenosos} \quad (2)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{spt_m}{180} \quad \text{Meyerhof (1956) - Solos Argilosos} \quad (3)$$

Onde:

σ_{adm} = tensão admissível do solo (MPa)

spt_m = índice de resistência à penetração SPT

B_i = menor dimensão da sapata

z_b = cota de assentamento da sapata

Mello (1975) relata o uso, na prática profissional, de outra correlação, sem distinção do tipo de solo:

$$\sigma_{adm} = 0,1 \cdot \left(\sqrt{spt_m} - 1 \right) \quad (4)$$

Onde:

σ_{adm} é a tensão admissível do solo (MPa)

spt_m é a índice de resistência à penetração SPT

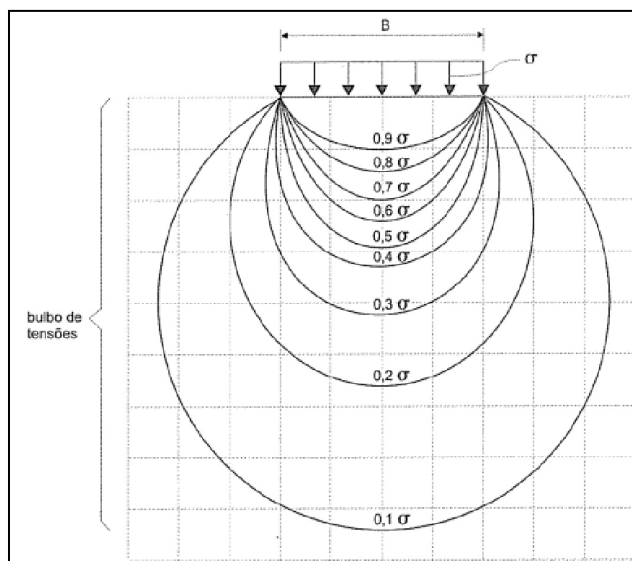
com spt_m recomendado entre 4 e 16.

2.1.2 Bulbo de Tensões e N_{SPT}

É interessante notar que a tensão admissível do solo é definida através do valor de resistência à penetração (N_{SPT}) dos ensaios de sondagem a percussão do solo (*Standard Penetration Test* - SPT). Os procedimentos de sondagem a percussão são definidos pela NBR 6484 (ABNT, 2020) e resultam no número de resistência à penetração a cada metro - o próprio N_{SPT} .

Os N_{SPT} de cada profundidade do solo servem para que seja calculado o $N_{SPT,médio}$, que é o valor médio de resistência à penetração na extensão do bulbo de tensões da sapata. Esse valor médio é calculado entre as cotas de assentamento da sapata e a profundidade de extensão do bulbo de tensões. Essa profundidade não é definida com um valor exato, mas mostra que a distribuição de tensões ao longo do solo segue conforme a Figura 1, extraída do livro de Rebello (2008).

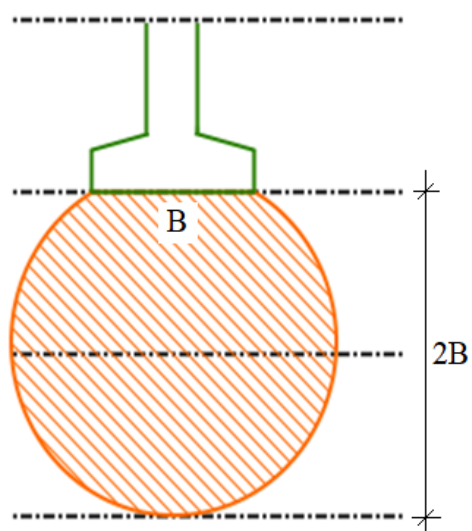
Figura 1 - Distribuição de tensões ao longo do solo



Fonte: Rebello (2008)

A maneira como as tensões de fundações rasas se dissipam no solo implica em uma ampla faixa de valores a se utilizar no cálculo das tensões admissíveis do solo. Entretanto, para efeitos de cálculo, Campos (2022) propõe que o bulbo de tensões pode ser considerado como a profundidade de duas vezes a menor dimensão da sapata, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Consideração de Campos (2022) para profundidade do bulbo de tensões



Fonte: Autores

É interessante notar que um bulbo de tensões geralmente atua em fundações rasas, que transmitem carga para o solo de maneira equilibrada. Uma fundação rasa é definida pela NBR 6122 (ABNT, 2019) como “elemento de fundação cuja base está assentada em profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação, recebendo aí as tensões distribuídas que equilibram a carga aplicada”.

2.1.3 Dimensionamento Geotécnico

O dimensionamento geotécnico consiste na compatibilização da carga que a sapata precisa dissipar no solo. O método de cálculo utilizado é o de tensões (Equação 5), em que a tensão utilizada é a tensão admissível do solo e as forças são as provenientes da estrutura a que se deseja suportar.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Onde:

σ é a Tensão

F é a Força

A é a Área

Alonso (2010) menciona que geralmente se aplicam valores de 5% do carregamento como estimativa para o peso próprio da sapata. A NBR 6118 (ABNT, 2014) aponta 5% do carregamento vertical aplicado como o valor mínimo de peso próprio a se considerar. Desse modo, pode-se reescrever a Equação 5 a fim de se obter a área da sapata da seguinte maneira:

$$A_{sap} = \frac{P \times pp}{\sigma_{adm}} \quad (6)$$

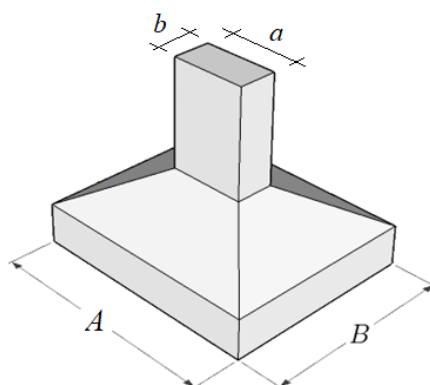
Onde:

P é a Carga vertical atuante;

pp é o Peso próprio da sapata como fator multiplicativo (mínimo de 5% (1,05)).

Rebello (2008) sugere que a relação mais econômica para sapatas quando estas são retangulares é dimensioná-las com abas iguais. As abas são a relação entre o lado da sapata e o lado do pilar (Figura 3), de acordo com o sistema elaborado através da Equação 7 e da Equação 8.

Figura 3 - Dimensões da sapata e do pilar



Fonte: Autores

$$A - a = B - b \quad (7)$$

e

$$A_{sap} = A \times B \quad (8)$$

Em que A_{sap} corresponde à área da sapata. Desse modo, conhecendo a área da base e as dimensões do pilar que a transfere cargas, obtêm-se as dimensões da sapata, dispostas da maneira mais econômica.

Quanto à altura, é ela um dos principais parâmetros que definem se a sapata é considerada como rígida ou flexível. Este trabalho busca trabalhar com sapatas rígidas, que são definidas como aquelas que transmitem ações de um único pilar centrado diretamente ao solo (CAMPOS, 2022). Para isso, considera-se que a sapata tenha uma altura mínima que permita esse comportamento sem que haja flexão de sua base ou cisalhamento. Estas considerações foram adotadas por serem seguidas pela ampla maioria dos profissionais da área de geotecnia. Segundo a NBR 6118 (2014), uma sapata é considerada rígida quando satisfaz as seguintes relações:

$$h \geq \frac{A-a}{3} \wedge h \geq \frac{B-b}{3} \quad (9)$$

Em que h corresponde à altura da sapata

2.1.4 Dimensionamento Estrutural

Para sapatas rígidas, de acordo com a NBR 6118, o dimensionamento estrutural pode partir do princípio de bielas e tirantes (ABNT, 2014). Este princípio foi pioneiramente estudado por Lebellet em 1935 e aprimorado por Blévyot e Frémy em 1967, e trata das diretrizes fundamentais da concepção dos modelos de bielas e tirantes à elementos estruturais (PRADO *et al*, 2014).

Vale destacar também que a NBR 6118 não especifica uma armadura mínima de flexão para as sapatas. Alguns autores aplicam a armadura mínima especificada pela norma para as vigas, o que geralmente resulta em uma armadura mínima maior que a calculada no caso das sapatas rígidas, devido à sua grande altura (BASTOS, 2019). A partir disso, não é interessante utilizar valores das armaduras mínimas referentes a outros elementos distintos das sapatas, visto que eles terão comportamentos específicos. Desse modo, não será aplicada a armadura mínima até que a NBR 6118 defina o seu valor.

De acordo com Santos (2021), “um modelo de bielas e tirantes é uma idealização estrutural na qual a estrutura real se assemelha a uma treliça equivalente onde se calculam, dadas as ações, os esforços axiais de cada elemento”. Assim, aplicado a fundações rasas, o sistema estrutural pode ser discretizado para trabalhar separadamente nas duas direções, tanto à flexão quanto ao cisalhamento, sendo admitida tração uniformemente distribuída ao longo da largura correspondente da sapata (CAMPOS, 2022). Desse modo, calcula-se a área de aço necessária para cada direção da sapata, de modo que se torne possível determinar as bitolas de aço a serem utilizadas, bem como seu espaçamento.

O método das bielas permite que se obtenham as equações que possibilitam determinar os esforços que atuam no elemento. Estas equações partem da definição da altura útil da sapata e dos esforços atuantes na base para se obter a área de aço necessária para equilibrar o sistema. Através do método das bielas (apud Alonso, 2010), tem-se que a altura da sapata (d) se dá conforme mostra a Equação 10.

$$d \geq \frac{A-a}{4} \vee d \geq \frac{B-b}{4} \vee d \geq 1,44 \sqrt{\frac{P \times 1,96}{0,85 \times f_{ck}}} \quad (10)$$

É interessante observar que, para o dimensionamento de sapatas rígidas, os requisitos de altura da NBR 6118 apresentados na Equação 9 sempre contemplarão os limites definidos

pelo método das bielas (Equação 10). Desse modo, todas as sapatas rígidas pela NBR 6118 (2014) atendem aos critérios de dimensionamento do método das bielas.

A partir da altura da sapata, pode-se obter os resultados dos esforços de tração na base da sapata a partir das seguintes equações:

$$T_x = \frac{P(A-a)}{8 \times d} \quad (11)$$

e

$$T_y = \frac{P(B-b)}{8 \times d} \quad (12)$$

Onde:

$T_x = T_y$ = Esforço de tração na base da sapata em sua respectiva direção

Com os esforços de tração, determina-se a área de aço nas direções da sapata através das seguintes equações:

$$A_{sx} = \frac{1,61 \times T_x}{f_{yk}} \quad (13)$$

e

$$A_{sy} = \frac{1,61 \times T_y}{f_{yk}} \quad (14)$$

A partir da área de aço, pode-se determinar facilmente as bitolas comerciais a serem utilizadas no projeto executivo. Tabelas de bolso como a apresentada na Figura 4 auxiliam na escolha da bitola por apresentar dados referentes a área de uma única barra e peso linear.

Figura 4 - Quadro de parâmetros de aço

Bitola		TIPO	Área de Aço	Peso Linear
mm	pol.	-	cm ²	kg/m
4.2		CA-60	0,14	0,109
5.0	3/16"	CA-60	0,196	0,154
6.3	¼"	CA-50	0,31	0,245
8.0	5/16"	CA-50	0,5	0,395
10.0	⅜"	CA-50	0,785	0,617
12.5	½"	CA-50	1,22	0,963
16.0	⅝"	CA-50	2,01	1,578
20.0	¾"	CA-50	3,14	2,466
25.0	1"	CA-50	4,91	3,853
32.0	1 ¼"	CA-50	8,04	6,313

Fonte: Autores

Para as bielas de compressão diagonal da sapata, parte-se de uma verificação da NBR 6118 (ABNT, 2014) que leva em consideração as tensões de cisalhamento e as características do concreto utilizado. Esta verificação consiste em avaliar se haverá esmagamento das bielas de compressão do concreto e se dá de acordo com as seguintes equações:

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd2} \quad (15)$$

$$\tau_{Sd} = \frac{P}{u_p \times d} \quad (16)$$

$$\tau_{Rd2} = 0,27 \times \alpha_v \times f_{cd} \quad (17)$$

$$\alpha_v = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (f_{ck} \text{ em MPa}) \quad (18)$$

Onde:

τ_{Sd} é a tensão de cisalhamento solicitante de cálculo

τ_{Rd2} é a tensão de cisalhamento resistente de cálculo

u_p é a perímetro ao longo do contorno do pilar

2.1.5 Recalque

O Recalque é inevitável em uma estrutura, já que toda matéria existente, por mais rígida que seja, deforma em algum nível. Estruturas que sofrem carregamentos variados e seu apoio é um material completamente heterogêneo e deformável como o solo estão mais sujeitas

a essas deformações. Cintra *et al* (1983) definem o recalque como sendo o deslocamento vertical, para baixo, da base da fundação em relação ao indeformável. Esse deslocamento é resultante da deformação do solo, quer seja por diminuição do seu volume e/ou mudança de forma.

Teixeira e Godoy (1996, apud Cintra *et al*, 1983) destacam que, teoricamente, uma estrutura que sofresse recalques uniformes não sofreria danos, mesmo para valores exagerados de recalque total. Entretanto, o que há na prática são recalques diferenciais, e a limitação do recalque total é uma boa maneira de limitar os recalques diferenciais.

Burland *et al* (1977) definem limites de recalques imediatos para sapatas isoladas de acordo com as recomendações de Skempton-MacDonald, sendo estes de até 40 mm para sapatas isoladas assentes em areias e 65 mm para sapatas isoladas assentes em argilas. Terzaghi e Peck (1967) também alertam para a questão da distorção angular entre fundações, e sugerem um limite para recalque total de 25 mm para sapatas isoladas e 20 mm em caso de recalques diferenciais.

Quanto às formas de se calcular o recalque imediato, destaca-se o método de Anjos (2019). Ao realizar uma revisão sistemática da literatura sobre determinação de recalques imediatos em sapatas, determinou um fator de correção para o método de cálculo de Anagnostopoulos *et al* (1991). Tal metodologia leva em consideração a tensão admissível do solo, as dimensões da sapata em planta e os valores de N_{spt} obtidos no solo em questão. O formulário de cálculo pode ser verificado através das equações contidas na Figura 5.

Figura 5 - Métodos de cálculo de Anagnostopoulos *et al* (1991) com fator de correção por Anjos (2019)

Settlements are calculated as:

$s = [0.57 (q)^{0.94} (B)^{0.90}] / N^{0.87}$	for zero < N ≤ 10	(x 0,86)
$s = [0.35 (q)^{1.01} (B)^{0.69}] / N^{0.94}$	for 10 < N ≤ 30	
$s = [604 (q)^{0.90} (B)^{0.76}] / N^{2.82}$	for N > 30	
$s = [1.90 (q)^{0.77} (B)^{0.45}] / N^{1.08}$	for B ≤ 3 m	
$s = [1.64 (q)^{1.02} (B)^{0.59}] / N^{1.37}$	for B > 3 m	

where:

s = settlement (in mm)
q = footing stress (in kPa)
B = footing width (in meters)
N = uncorrected blowcount

Fonte: Anjos (2019)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como mencionado, além do desenvolvimento de um script de dimensionamento de sapatas, este trabalho visa avaliar o dimensionamento geotécnico e estrutural dessas através de duas ferramentas: o cálculo advindo da teoria clássica roteirizado no SMath e o cálculo através do software amplamente difundido no âmbito da engenharia civil, o Eberick. Para isso, foram adotados cenários de análise através da definição de uma estrutura modelo simples que servirá para a comparação de resultados.

3.1 CENÁRIOS SOB ANÁLISES

3.1.1 Regiões de estudo

O solo é parte fundamental no dimensionamento das fundações. Para o estudo em questão, a estrutura escolhida foi simulada nos dois softwares de comparação em três localidades diferentes da cidade de Belém-PA. O intuito é verificar as nuances de dimensionamento quando deparados com diferentes tipos de solo. As localidades abrangem todo o território da cidade de acordo com a Figura 6.

1. Travessa Perimetral, Cabanagem, Belém-PA
2. Conjunto Residencial Marex, Val de Cães, Belém-PA
3. Av. Perimetral, Terra Firme, Belém-PA

Figura 6 - Regiões de ensaio de simples reconhecimento - Belém/PA



Fonte: Autores

Nas três regiões escolhidas, foram realizados ensaios de simples reconhecimento (*Standard Penetration Test* - SPT), cujos resultados dos furos estão no Anexo A. Estes resultados serão utilizados a fim de se obterem valores suficientes de dimensões da sapata, área de aço e recalque para uma boa análise de dados e discussão.

Os cenários previstos foram descritos a seguir no Quadro 1. Onde o cenário 1 é referente ao bairro da Cabanagem, o cenário 2 ao bairro de Val de Cães e o cenário 3 ao bairro de Terra Firme.

Quadro 1 - Cenários idealizados neste trabalho

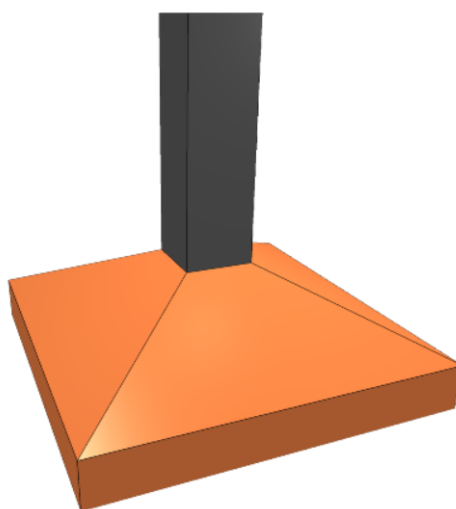
CENÁRIO	CARACTERÍSTICAS	σ_{adm} (kgf/cm ²)
1	Areia siltosa com pedregulho seguido de rocha em forma de cascalho	10,20
2	Silte areno argiloso de resistência crescente	2,04
3	Silte argilo arenoso seguido de argila siltosa de alta resistência	3,47

Fonte: Autores

3.1.2 Estrutura modelo

Para o estudo, foi definida uma estrutura modelo simples que servirá para a comparação de resultados entre o script do SMath e os resultados do Eberick. A estrutura idealizada (Figura 7) teve por objetivo repassar carregamentos pré-definidos às sapatas de maneira que se possa controlar os carregamentos para fins de manipulação das condições de contorno do problema. Tal estrutura é composta de um pilarete que receberá os carregamentos e a sapata propriamente dita, que estará assente a uma profundidade de 1,5m, sendo considerada fundação rasa pela NBR 6122 (ABNT 2019) para todos os casos estudados.

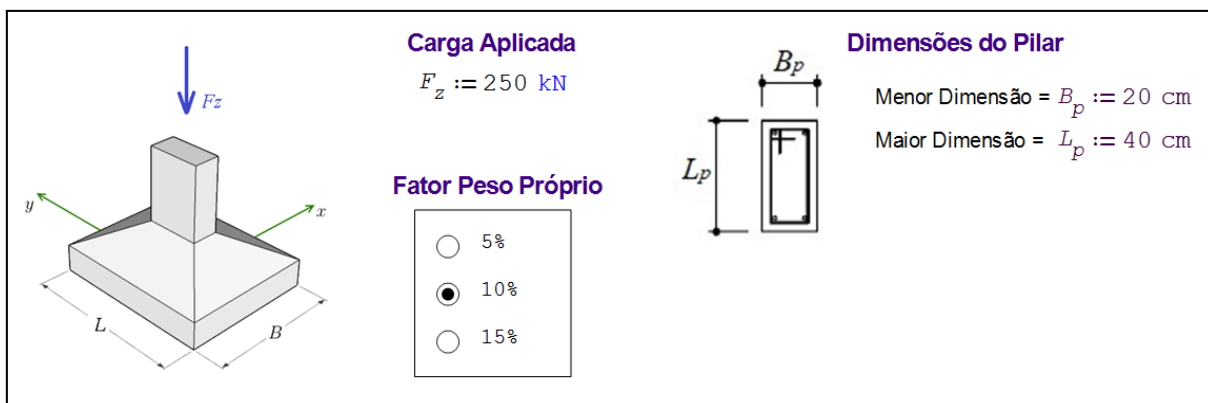
Figura 7 - Estrutura de análise e comparação



Fonte: AltoQi Eberick

O carregamento atuante, dimensões do pilarete e o fator do peso próprio da sapata para o estudo de comparação são mostrados na Figura 8.

Figura 8 - Parâmetros para comparação



Fonte: Autores

A classe de concreto adotada é C25 ($f_{ck} = 25\text{MPa}$) e o cobrimento adotado é de 5 cm.

3.2 DESCRIÇÃO DOS SOFTWARES UTILIZADOS

3.2.1 SMath Studio

SMath Studio é um software matemático gratuito que permite aos usuários criar, editar e operar expressões matemáticas, gráficos e tabelas de maneira fácil e eficiente. Semelhante a um caderno virtual, ele foi desenvolvido para atender às necessidades de estudantes, professores, engenheiros e outros profissionais que precisam trabalhar com cálculos matemáticos em sua rotina diária.

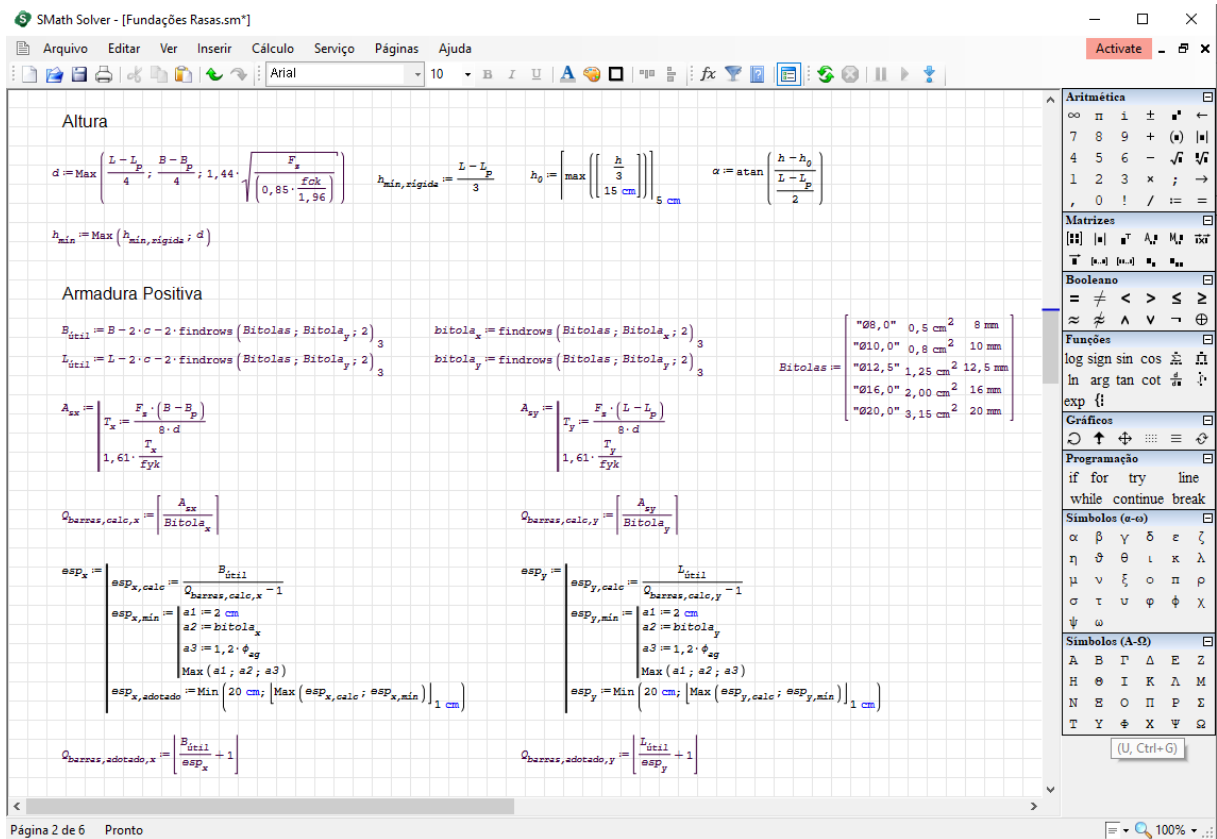
O software inclui uma ampla variedade de recursos matemáticos, incluindo suporte para equações diferenciais, matrizes, sistemas lineares, análise de dados, operações de programação, além de ter uma interface amigável e intuitiva, que torna a criação de expressões matemáticas e gráficos fácil e agradável. Além disso, o software possibilita a criação de programas executáveis (.exe) para utilização posterior independente.

A facilidade na escrita de um roteiro de cálculo complexo, a disponibilidade gratuita do software e a interface amigável são os principais fatores na escolha do SMath Studio para este trabalho. Com ele, será possível reproduzir os cálculos da teoria clássica tanto de dimensionamento geotécnico quanto de dimensionamento estrutural.

Uma de suas principais características é o suporte a unidades físicas, que permitem a interação entre variáveis de maneira muito mais fluida e simplificada. Outra característica relevante é o suporte a cálculos vetoriais e matriciais, o que viabiliza sua utilização no ramo

da engenharia. Também há a questão de sua metodologia “What you see is what you get”, que implica em uma programação mais limpa e de fácil entendimento. Por fim, há uma extensa quantidade de plugins disponíveis no próprio site da fornecedora.

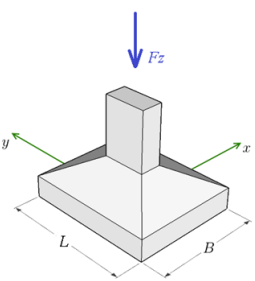
Figura 9 - Interface do SMATH Studio com expressões matemáticas aplicadas no dimensionamento estrutural de sapatas



Fonte: Autores

Figura 10 - Interface do SMath Studio com campos de input de informações

DEFINIÇÕES SAPATA



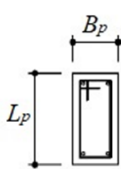
Carga Aplicada

 $F_z := 250 \text{ kN} = 28,1011 \text{ tonf}$

Dimensões do Pilar

Menor Dimensão = $B_p := 20 \text{ cm}$

Maior Dimensão = $L_p := 40 \text{ cm}$



Fator Peso Próprio

5%

10%

15%

Dimensões Mínimas Calculadas

$L_{min} = 105 \text{ cm}$ $B_{min} = 85 \text{ cm}$

L Adotado (Maior Lado)

60 300

105

$L := L \text{ cm}$

B Adotado (Menor Lado)

60 250

85

$B := B \text{ cm}$

Fonte: Autores

3.2.2 AltoQi Eberick

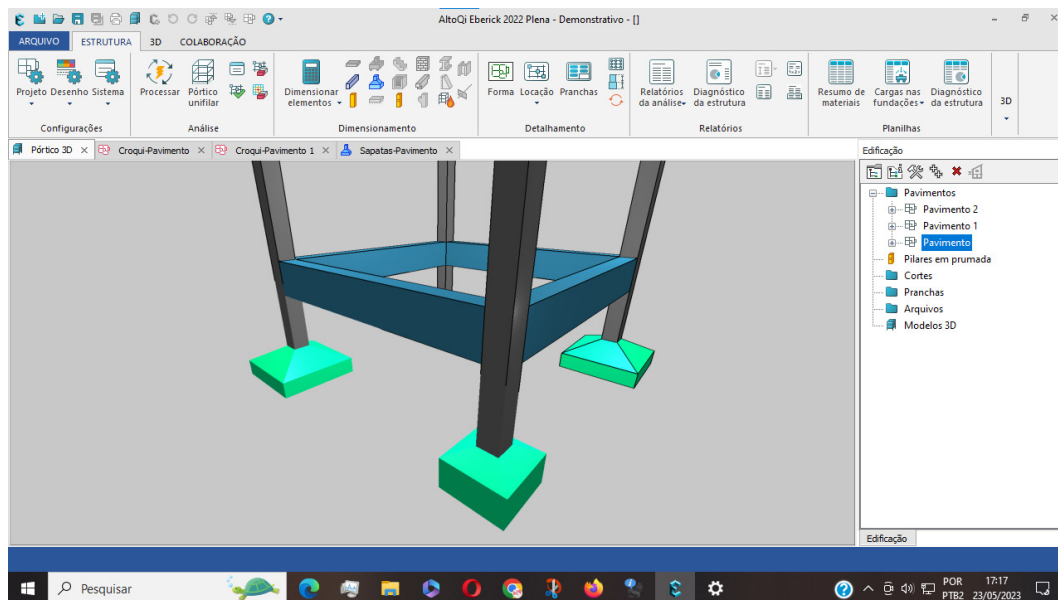
O Eberick é um software de análise estrutural e dimensionamento de estruturas com foco em concreto armado e protendido. Desenvolvido pela empresa AltoQi Tecnologia, ele possui recursos avançados para análise e dimensionamento de elementos de concreto armado, como lajes, vigas, pilares e fundações. Uma de suas principais características é a capacidade de analisar e dimensionar estes elementos de acordo com especificações técnicas normativas, como a NBR 6118, colaborando com a segurança e adequação dos projetos aos critérios normativos.

O Eberick apresenta uma interface simples e prática, além de permitir que o usuário modele e visualize estruturas em 3D e obtenha resultados precisos de análise e dimensionamento, considerando diversos fatores, como cargas, combinações de cargas, propriedades dos materiais, entre outros. Além disso, o software oferece recursos avançados de análise, como a análise de comportamento não-linear de materiais e grelha.

No que tange suporte, o Eberick conta com inúmeras páginas de ajuda no seu website - QiSuporte. Bem mais que fornecer tutoriais sobre o programa, o suporte mostra e exemplifica gradativamente todos os cálculos e teorias utilizadas em seus resultados de dimensionamento. Desse modo, é possível entender exatamente como o programa chegou até os resultados obtidos, bem como avaliar cada caso especificamente.

O Eberick foi escolhido para este trabalho por sua simplicidade de dimensionamento, pelo seu amplo material de suporte e por ter um foco de atuação que abrange perfeitamente todo o escopo deste trabalho.

Figura 11 - Interface do AltoQi Eberick mostrando um modelo tridimensional



Fonte: Autores

Figura 12 - Interface do AltoQi Eberick com resultados do dimensionamento de sapatas

	Nome	Igual	As Inferior B	As Inferior H	Estribo horizontal	As Superior B	As Superior H	Status
1	S1		9 e 8.0 c/10	9 e 8.0 c/10				calculado
2	S2		7 e 8.0 c/8	7 e 8.0 c/8				calculado
3	S3	=S1	9 e 8.0 c/10	9 e 8.0 c/10				calculado
4	S4	=S2	7 e 8.0 c/8	7 e 8.0 c/8				calculado
5								
6								
7								
8								
9								

Situação da sapata:
 $F_d = 3,31 \text{ tf}$
 $M_B = -146,46 \text{ kgf.m}$
 $M_H = -146,15 \text{ kgf.m}$
 Armadura inferior:
 $A_{sx} = 7 \text{ e } 8,0 \text{ c/8}$
 $A_{sy} = 7 \text{ e } 8,0 \text{ c/8}$

Fonte: Autores

3.3 COMPARATIVO PROPOSTO NO ESTUDO

3.3.1 Script de Dimensionamento Geotécnico e Estrutural de Sapatas (SMath)

O script de dimensionamento utilizado é basicamente uma rotina de cálculo em que há um *input* de dados que gera os resultados desejados. Os dados inseridos, após tratados e correlacionados, fornecem os resultados necessários de dimensionamento de sapatas.

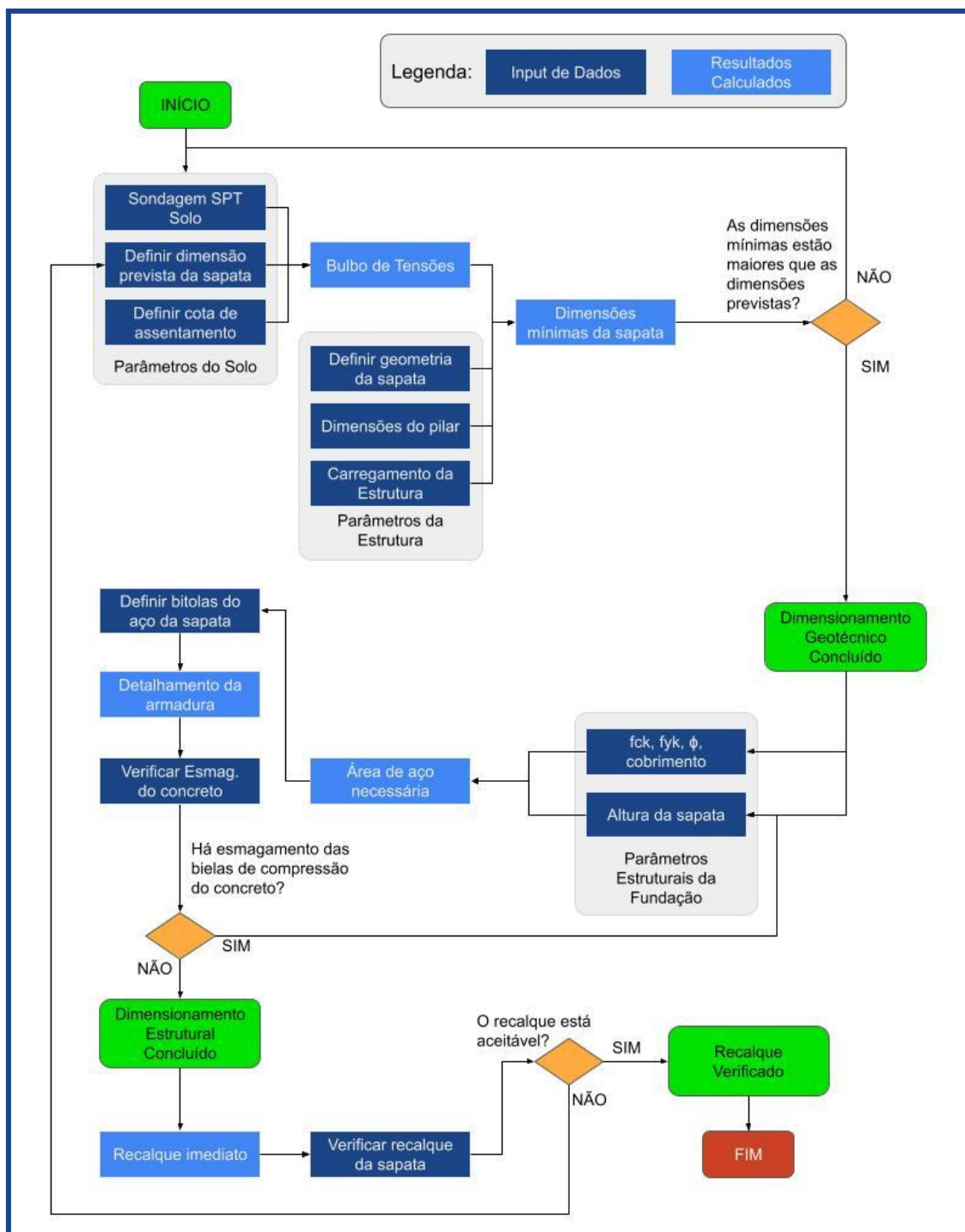
O cálculo e dimensionamento das sapatas é dividido em três etapas: dimensionamento geotécnico, dimensionamento estrutural e verificação de recalque (ver Figura 13).

Na primeira etapa, há o *input* de dados referentes ao solo e à estrutura que se deseja dimensionar. Informações como sondagem do solo, cota de assentamento, carregamentos atuantes, etc, são necessários para se obter as dimensões mínimas da sapata. Quanto à altura, cabe destacar que o escopo deste trabalho avalia sapatas rígidas, cuja relação entre dimensões satisfazem a Equação 19.

Após o dimensionamento geotécnico, faz-se o dimensionamento estrutural. Nele, se alimenta o script com informações referentes ao concreto e ao aço a serem utilizados. Com isso, são calculadas as armaduras da sapata, podendo ser definidas suas bitolas e espaçamentos de maneira intuitiva pelo programa.

Por fim, há a verificação de recalque, que nada mais é que o cálculo do recalque imediato experimentado pela sapata. Esse valor leva em consideração as dimensões da sapata e as características do solo. Deve-se atentar que o recalque direto de uma sapata apenas não é suficiente para verificar a estrutura como um todo (MELLO, 1975). O ideal é que haja dados de recalque de todas as sapatas do projeto, de modo a permitir o cálculo do recalque diferencial entre elas. Esse sim é parâmetro de projeto para segurança da estrutura e estabilidade global (BURLAND *et al*, 1977).

Figura 13 - Fluxograma do funcionamento do script de dimensionamento de sapatas.



Fonte: Autores

3.3.2 Método de cálculo das fundações pelo Software AltoQi Eberick

O método para o cálculo do dimensionamento de sapatas pelo software Eberick ocorre pelo método dos elementos finitos, representando a fundação por meio de uma grelha e os valores de pressão são atribuídos aos espaços de acordo com a distribuição das pressões

provenientes do elemento de fundação. Uma vez calculado o momento nas seções imposto pelo método CEB-70, a superfície do aço segue o mesmo procedimento, sendo calculado por:

$$A_s = \frac{M_d}{0,85.d.f_{yd}} \quad (19)$$

De acordo com Alto Qi (2021), pode-se confirmar que

“Este é um processo iterativo que compreende etapas distintas, de modo a garantir que as verificações necessárias, como pressão admissível, deslizamento e tombamento, sejam atendidas. Pois, ao invés de obter um formato definido a partir das verificações, o programa define um formato de sapata e executa todo o dimensionamento para determinar se o formato específico é suficiente para a configuração atual de esforços e resistências. Caso não seja, a sapata é redimensionada e o programa realiza as verificações novamente”.

Acessando o menu Estrutura > Projeto > Dimensionamento > Sapatas, a aba de parâmetros de dimensionamento das sapatas será aberta, onde serão inseridos todos os parâmetros desejados pelo projetista, cumprindo sempre os requisitos estabelecidos pela regulamentação em vigor. A aba onde os valores são inseridos pode ser vista na Figura 14.

Figura 14 - Aba de parâmetros de dimensionamento da estrutura (Eberick)

Fonte: Alto Qi (2021)

Cabe-se destacar que, no quesito armadura, o Eberick não nos apresenta um valor mínimo tolerável, ficando a cargo do projetista a definição que melhor atenda às condições de segurança de seu projeto no que tange a quantidade de barras utilizadas, espaçamentos mínimos e máximos, bitolas de armadura e todas as outras configurações pertinentes. Bastos (2019) informa que não há valores mínimos normativos de armadura inferior de sapatas, e conclui, através de seus exemplos, que todos os métodos de definição de armadura mínima adotados por outros autores são muito conservadores, sugerindo a não adoção de armadura mínima até que a NBR 6118 defina seu valor de fato.

No decorrer deste trabalho zerou-se os momentos atuantes. Para isso, foi colocado na aba dos parâmetros do dimensionamento de sapatas o valor de momento mínimo igual a zero, pois foram consideradas as recomendações de Bastos (2019), que definem que considerar tais momentos como se considera em sapatas aumenta muito a área de aço das sapatas.

Por fim, são definidos os critérios referentes ao tipo de ligação pilar/sapata e a altura de assentamento das sapatas, como mostra a Figura 15.

Figura 15 - Critérios de disposição das armadura (Eberick)

Pilar de fundação

Pilar
Nome Ambiente

Modelo
Altura barra cm Vínculo pilar
Vínculo apoio

Seção do pilar
Tipo
b cm h cm
b1 cm h1 cm
Ângulo de abertura °
Ângulo de rotação °
Elevação cm Manter seção constante na prumada

Fundação
 Bloco Sapata Divisa Tubulão
Associação
Rotação
Ângulo °
Profundidade (df) cm
Altura do arranque (ha) cm

Capitel
 Usar capitel
Ângulo de rotação ° b cm
Espessura cm h cm

Fonte: Autores

Após o processamento da estrutura, foram obtidos os valores das dimensões e da área de aço da sapata. Tais valores serão usados como base comparativa com os resultados obtidos pelo dimensionamento realizado pelo software SMATH Studio, de acordo com o método das Bielas e Tirantes.

3.4 VALIDAÇÃO DO SCRIPT DESENVOLVIDO NO SOFTWARE SMATH STUDIO

O script desenvolvido tem seus fundamentos na teoria clássica, e aplica equações e conceitos demonstrados na revisão bibliográfica deste trabalho. Entretanto, faz-se pertinente que seja validado. Essa validação pode ocorrer com a aplicação do script sobre exemplos de dimensionamento que já sejam conhecidos no meio científico.

Com relação ao dimensionamento geotécnico, pôs-se o script em prova através de uma resolução de Bastos (2019), página 30, em que uma sapata de fundação superficial para um pilar com seção transversal de 20 x 80 cm que transfere a fundação uma carga característica de 1250 kN. A tensão admissível do solo é de $\sigma_{adm} = 0,26$ MPa, concreto C25 e aço CA-50.

A comparação de validação entre os resultados obtidos através do script desenvolvido no SMATH e os resultados de Bastos se apresentam no Quadro 2.

Quadro 2 - Validação do Script quanto ao dimensionamento geotécnico

Parâmetros	Bastos (2019)	Script SMATH
Área (A_{Sap})	54.325 cm ²	54.325 cm ²
Maior lado (L)	265 cm	265 cm
Menor Lado (B)	205 cm	205 cm
Altura (h)	61.7 cm	61.7 cm
Altura rodapé (h_0)	25 cm	25 cm
Ângulo superfície inclinada (α)	25.9°	25.9°

Fonte: Autores

Quanto ao dimensionamento estrutural pelo método das bielas e tirantes, Alonso (2010) propõe um dimensionamento de sapata quadrada com 2,30 m de lado e pilar de 45 cm também quadrado. A carga atuante é de 1000 kN, concreto C15 e aço CA-50

A comparação de validação entre os resultados obtidos através do script desenvolvido no SMath e os resultados de Alonso se apresentam no Quadro 3

Quadro 3 - Validação do Script quanto ao dimensionamento estrutural

Parâmetros	Alonso (2010)	Script SMath
Altura útil (d)	$\cong 60$ cm	56 cm
Esforços de Tração (T_x e T_y)	385 kN	385.42 kN
Área de aço (A_{sx} e A_{sy})	12.5 cm ²	12.41 cm ²
Bitolas adotadas	16 Ø10.0	16 Ø10.0 c/14

Fonte: Autores

Constatou-se que Alonso (2010) utilizou alguns arredondamentos em seus cálculos para fins didáticos, o que causou as imprecisões vistas no Quadro 3. Ainda assim, o script é validado no quesito estrutural.

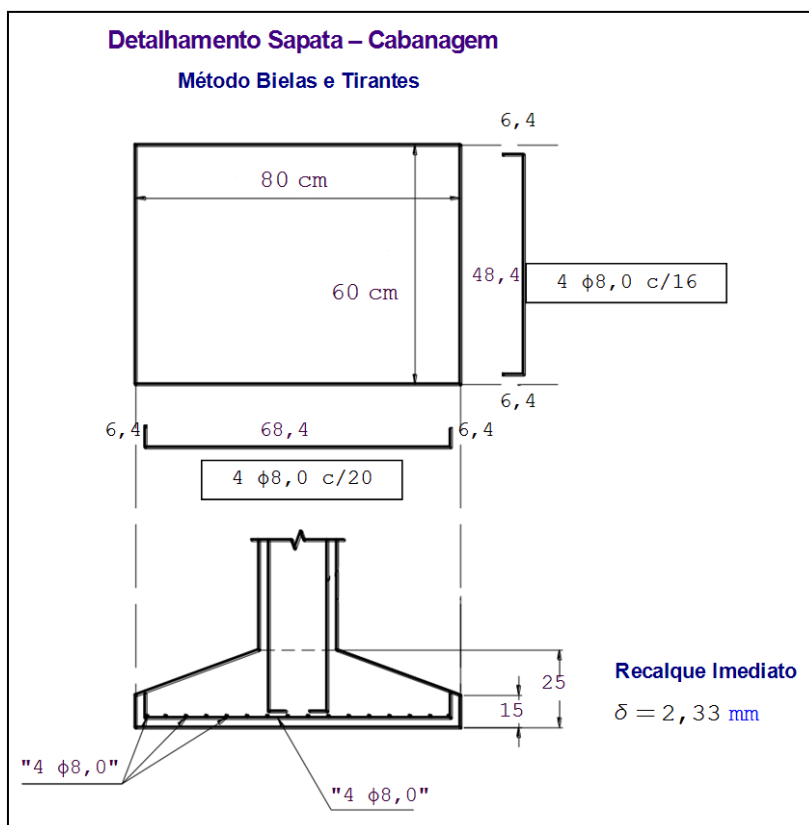
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o dimensionamento da sapata realizado em cada um dos softwares, obteve-se o resultado das variáveis de interesse, para os três diferentes cenários, sendo elas: dimensões da sapata, quantitativo de barras, bitolas, área de aço e recalque imediato. Todos os resultados obtidos por cada software em cada um dos cenários serão descritos nos subtópicos abaixo.

4.1 CENÁRIO 1 - CABANAGEM

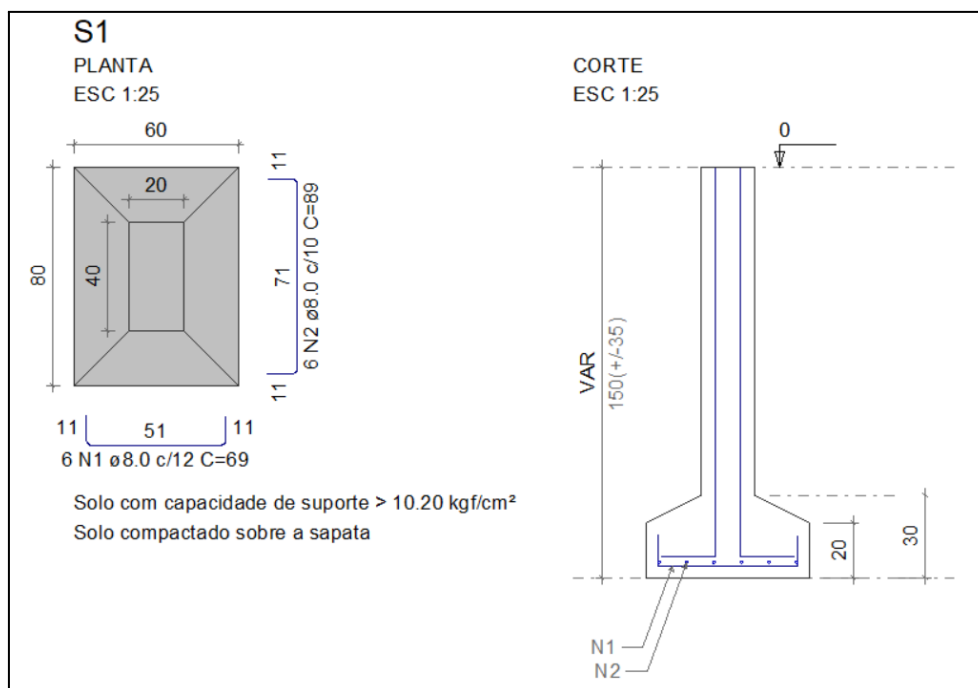
O dimensionamento da sapata do cenário 1 obteve as dimensões mínimas normativas para sapatas tanto no cálculo do script do SMath quanto no software Eberick. Isso se deu em função do solo extremamente resistente constatado através do laudo de sondagem (Anexo A). É interessante destacar que o Eberick dimensionou esta sapata com um mínimo de seis barras, independente da bitola de aço utilizada, demonstrando que o software utiliza uma quantidade mínima de barras a serem utilizadas em sapatas. A Figura 16 e a Figura 17 mostram o resultado de dimensionamento no SMath e no Eberick, respectivamente.

Figura 16 - Resultados do dimensionamento script SMath - Cenário 1



Fonte: Autores

Figura 17 - Resultados do dimensionamento Eberick - Cenário 1

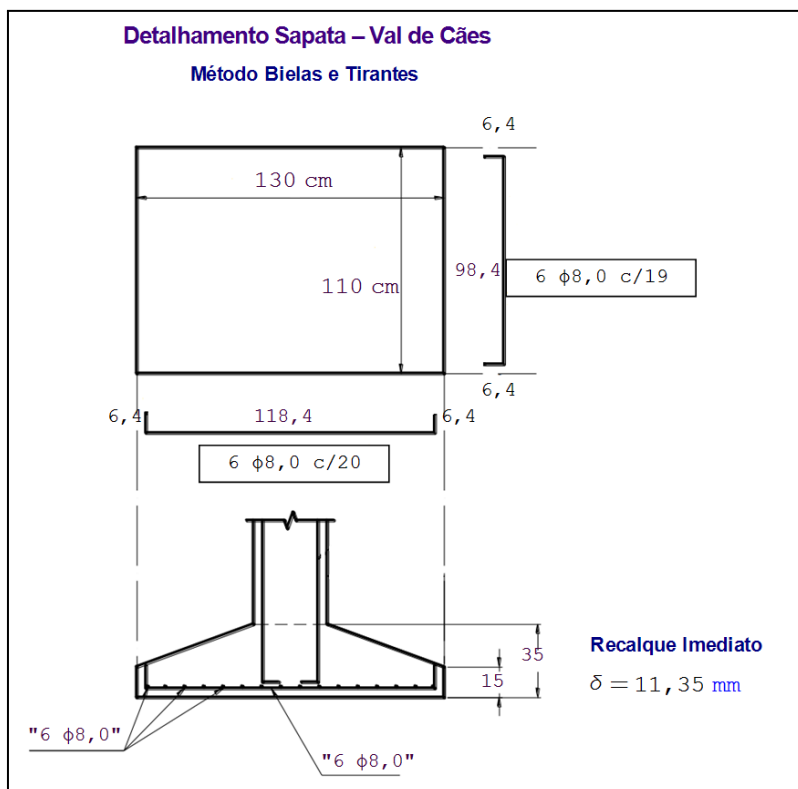


Fonte: Eberick, 2023

4.2 CENÁRIO 2 - VAL DE CÃES

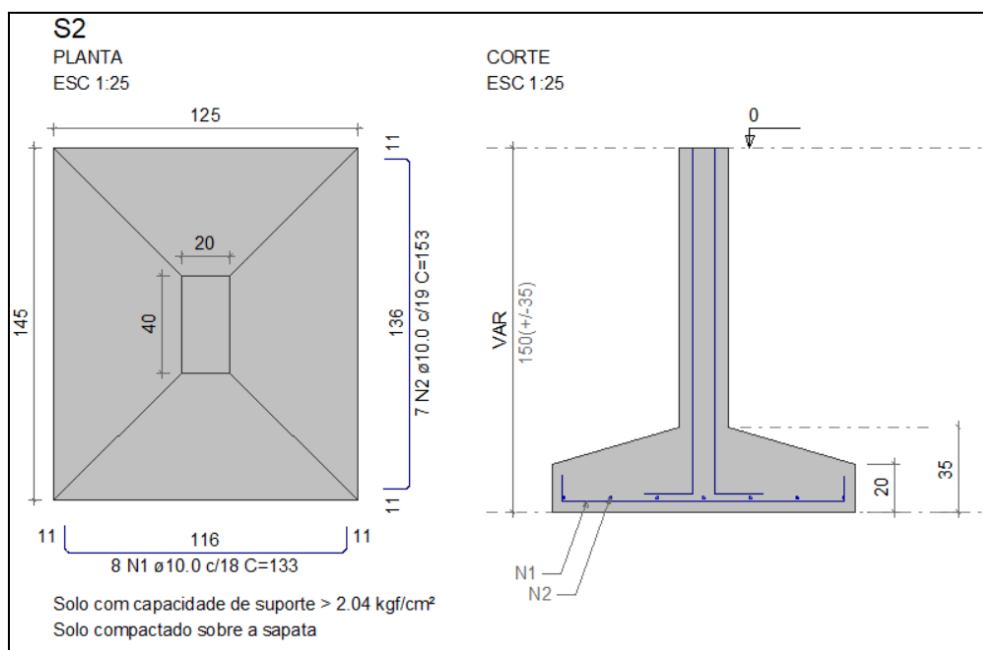
O cenário 2 apresentou os resultados de maiores dimensões por se tratar do solo com propriedades inferiores de resistência em comparação aos demais utilizados no estudo. A Figura 18 e a Figura 19 mostram o resultado de dimensionamento no SMath e no Eberick, respectivamente.

Figura 18 - Resultados do dimensionamento script SMath - Cenário 2



Fonte: Autores

Figura 19 - Resultados do dimensionamento Eberick - Cenário 2

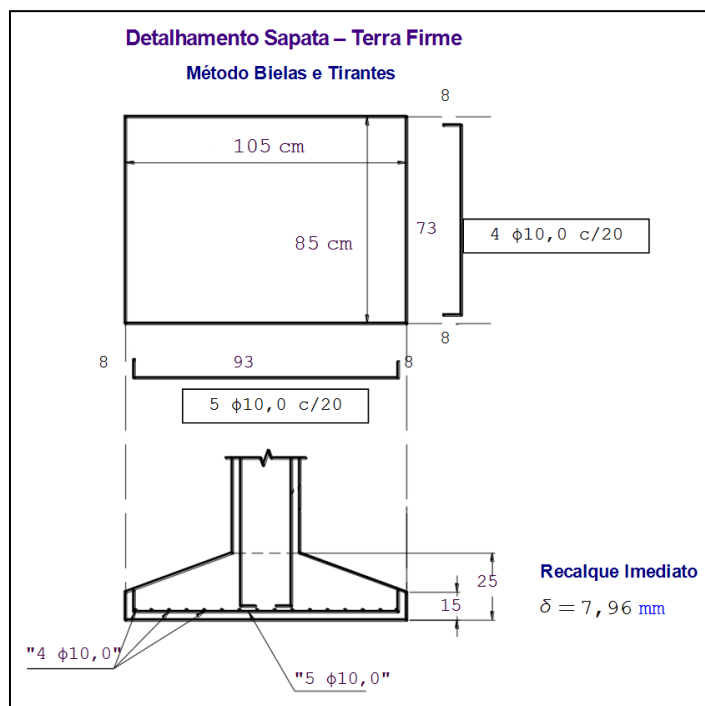


Fonte: Eberick, 2023

4.3 CENÁRIO 3 - TERRA FIRME

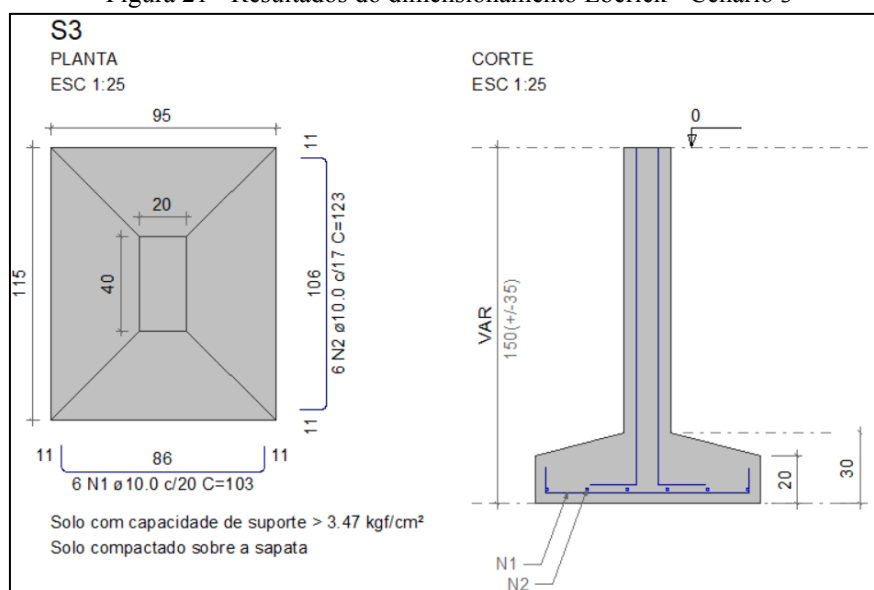
O cenário correspondente ao bairro da Terra Firme apresentou resultados intermediários de dimensionamento. A Figura 20 e a Figura 21 mostram o resultado de dimensionamento no SMath e no Eberick, respectivamente.

Figura 20 - Resultados do dimensionamento script SMath - Cenário 3



Fonte: Autores

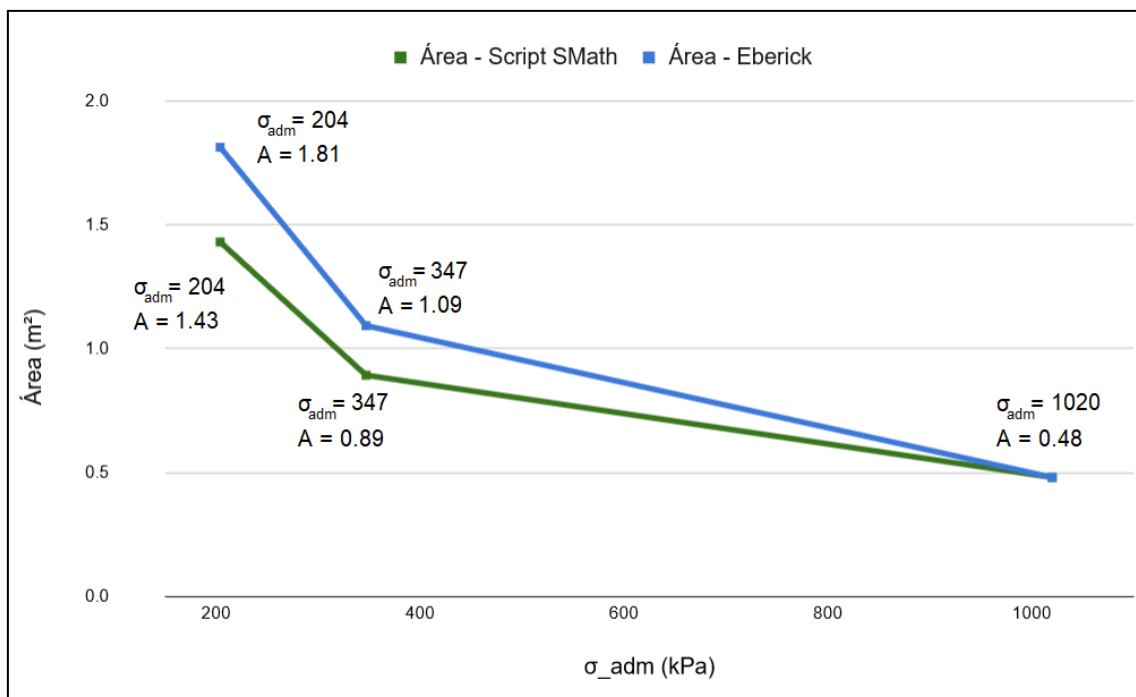
Figura 21 - Resultados do dimensionamento Eberick - Cenário 3



Fonte: Eberick, 2023

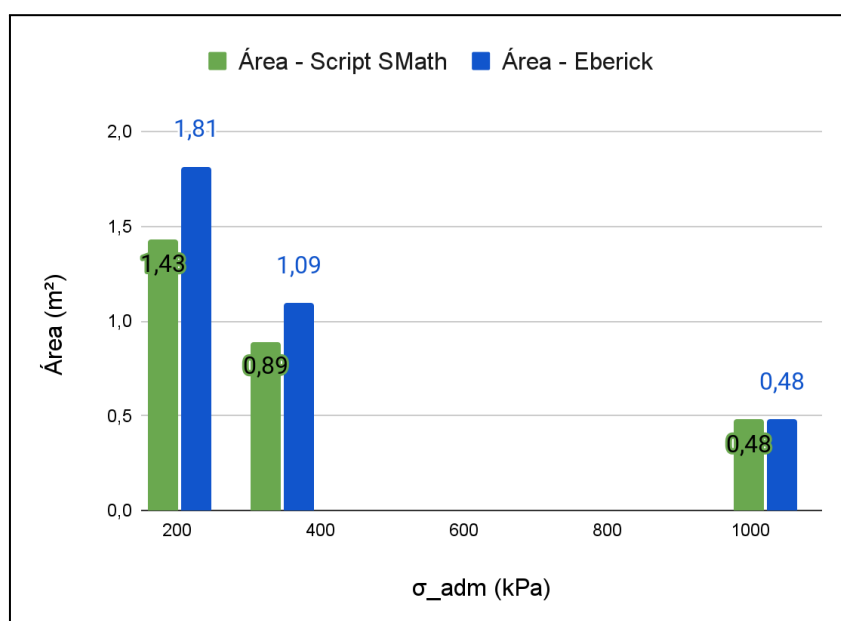
4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Após as descrições feitas acerca de cada cálculo realizado pelos softwares nos distintos cenários, podemos perceber que existem algumas discordâncias entre os resultados obtidos. Com relação às dimensões em planta, houve distinções sensíveis entre os métodos de dimensionamento, tendo o Eberick apresentado resultados maiores que o script do SMath a medida que as resistências do solo iam diminuindo, conforme mostra a Figura 22. Percebe-se, então, que quanto menor a resistência do solo, maiores as discrepâncias entre os resultados geométricos.

Figura 22 - Relação σ_{adm} e dimensões em planta

Fonte: Autores

Esta relação linear entre a resistência do solo e as áreas da sapata está de acordo com a Equação 5, sendo que quanto maiores as resistências do solo, menores as áreas das sapatas obtidas pelos métodos de dimensionamento estudados. A Figura 23 mostra esta relação.

Figura 23 - Relação entre σ_{adm} e áreas das sapatas

Fonte: Autores

Quanto à altura das sapatas, houveram poucas diferenças entre os métodos de dimensionamento. Pôde-se perceber que as alturas sempre estavam muito próximas, sendo a diferença entre elas relacionadas a definição de arredondamento de 5 em 5 cm.

Já com relação à área de aço total calculada pelos softwares para cada cenário, os resultados se encontram no Quadro 4. E resumidamente pode-se dizer que o método utilizado pelo script do SMath é mais econômico, visto que o método utilizado pelo Eberick resultou em áreas de aço 51% maior no cenário 1, 117,7% maior no cenário 2 e 50% maior no cenário 3, sendo este método mais conservador. Essa diferença das áreas está demonstrada na Figura 24.

Quadro 4 - Resumo da área de aço total calculada para cada cenário

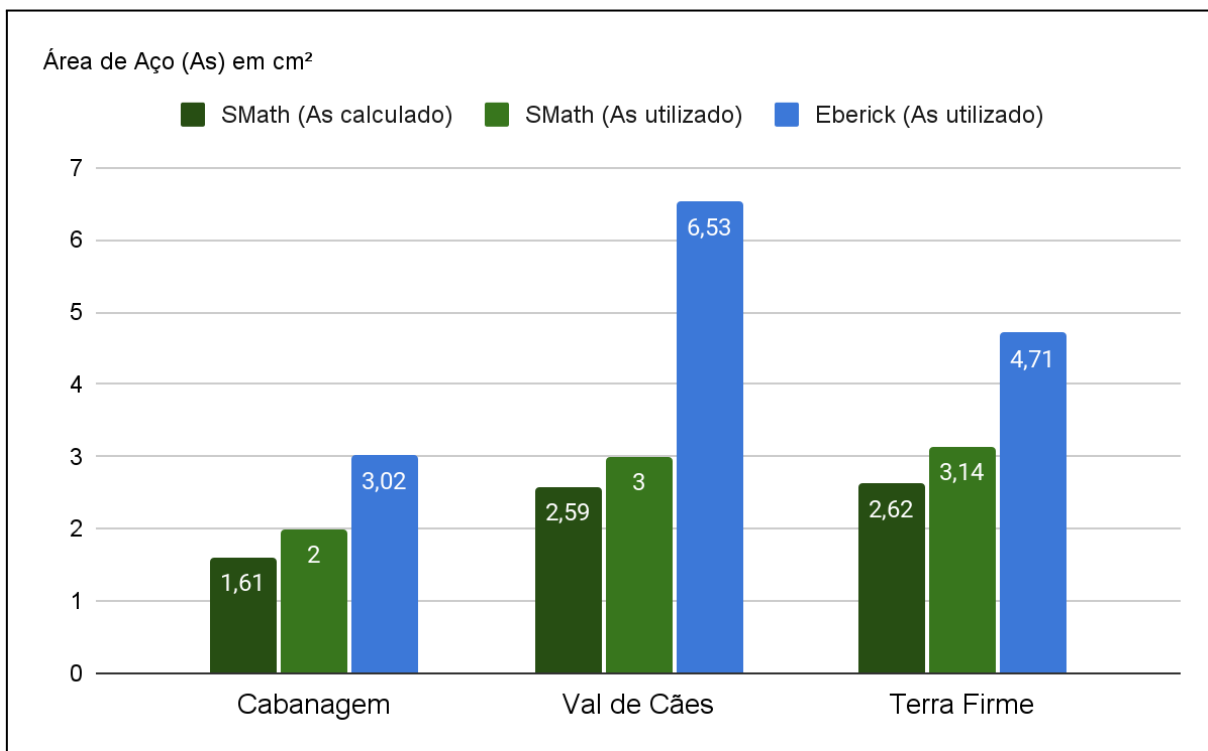
SOFTWARE		CABANAGEM		VAL DE CÃES		TERRA FIRME	
		L	B	L	B	L	B
SMath	A _s calculado	1,61cm ²	1,61cm ²	2,59cm ²	2,59cm ²	2,62cm ²	2,62cm ²
	A _s utilizado	2cm ²	2cm ²	3cm ²	3cm ²	3,93cm ²	3,14cm ²
Eberick	A _s utilizado	3,02cm ²	3,02cm ²	6,53cm ²	5,03cm ²	4,71cm ²	4,71cm ²
Obs.: L e B são referentes à maior e menor dimensão da sapata em planta, respectivamente							

Fonte: Autores

É interessante notar que o Eberick não fornece ao usuário a informação da área de aço calculada, informando apenas a área de aço utilizada de fato na armadura da sapata, sendo esta definida em função da bitola das barras e da quantidade de barras utilizadas. Outra questão relacionada à área de aço utilizada é que em duas das três aplicações deste estudo houveram áreas diferentes entre as duas dimensões da sapata. Isto ocorre em função da quantidade de barras utilizadas, sendo que, quanto mais barras são utilizadas em determinada direção, maior é a área de aço utilizada nela.

Na Figura 24, os dados usados nos cenários em que o cálculo da área de aço foi diferente para as duas direções foi escolhido em função do valor que proporciona maior diferença entre eles. Isso é possível pois nos dois casos em que houve essa ocorrência pelo menos um dos métodos de dimensionamento apresentou a mesma área de aço para ambas as direções.

Figura 24 - Resumo da área de aço total calculada para cada cenário

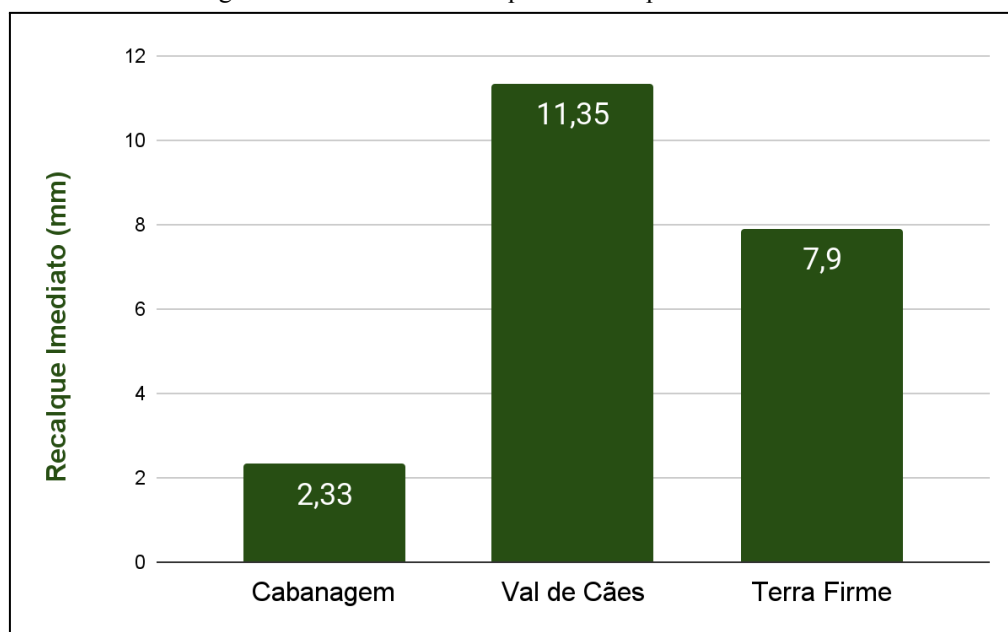


Fonte: Autores

Com relação ao recalque, constatou-se que o Eberick verifica os deslocamentos do modelo apenas através da interação solo-estrutura. Essa interação é realizada adotando coeficientes de mola (vínculos elásticos) para as fundações do projeto (Alto Qi, 2021). Entretanto, caso não sejam definidos estes coeficientes, o software assume que a fundação está engastada ao solo, desconsiderando, assim, qualquer valor de deslocamento vertical. Portanto, em função da delimitação do tema deste trabalho, não serão analisados os valores de recalque advindos do Eberick.

Para conhecimento, o script do SMath obteve o recalque imediato por meio do método de Anjos (2019). A partir desse resultado, verificou-se que os valores para cada cenário de estudo (Figura 25) estão dentro dos limites prescritos pelos autores mais renomados da área, a exemplo de Terzaghi e Peck (1967), que são os mais desfavoráveis à segurança dentre os limites estudados (25 mm para recalques imediatos). Tem-se, assim, uma estimativa de recalque imediato para as sapatas. Cabe ressaltar que o recalque imediato não deve ser analisado isoladamente, sendo recomendada a verificação de distorções angulares e recalque diferencial ao longo de toda a estrutura.

Figura 25 - Resumo do recalque imediato para cada cenário



Fonte: Autores

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos e da comparação realizada entre os métodos de dimensionamento, pode-se concluir que o script produzido por meio do SMATH verifica e valida os resultados obtidos mediante o uso do software comercial Eberick. Isto é verificado pois os resultados do Eberick sempre se apresentavam próximos e maiores que os advindos da teoria clássica, visto que resultados menores implicariam na perda da confiabilidade estrutural.

É importante destacar que, no decorrer do desenvolvimento dos cálculos do dimensionamento da sapata isolada com carga centrada, os resultados encontrados nos softwares foram distintos, visto que pelo script produzido, o calculista sabe exatamente as decisões tomadas e cada uma das definições dos termos usados e das equações calculadas. Já pelo Eberick, o calculista não consegue ter a visão de todo o processo, pois parte dos cálculos realizados pelo programa ficam ocultos ao usuário.

Quanto a fatores tão somente geométricos, como as dimensões da sapata em planta ou a altura do rodapé, as pequenas discrepâncias entre os métodos revelam que o Eberick mantém a coerência com a teoria clássica de dimensionamento. Entretanto, quando se analisam fatores estruturais, como as armaduras dimensionadas, percebe-se que o Eberick retorna resultados com maiores margens de segurança.

Ademais, verificou-se que o Eberick não reajusta a tensão admissível de acordo com a variação nas dimensões da sapata. Como apenas a tensão admissível do solo é inserida no software e não o laudo completo de sondagem, caso o bulbo de tensões venha a aumentar (em função das dimensões da sapata) e existam camadas de solo de resistência inferior na zona de atuação do bulbo, as tensões admissíveis apresentariam valores bem menores e a estrutura estaria comprometida. Diante disso, recomenda-se a devida atenção na verificação de possíveis variações nas tensões admissíveis do solo. É necessário que se atue no dimensionamento de sapatas através de um processo iterativo que leve em consideração as questões apresentadas.

Com relação ao recalque imediato, tem-se que o Eberick avalia tais deslocamentos através de interação solo-estrutura, sendo, para isso, necessário que se determine coeficientes de mola, que atuarão como vínculos elásticos nos apoios. Esta interação não foi abordada neste trabalho, sendo os resultados de recalques apresentados calculados apenas pelo script do SMath. Dessa forma, não foi possível realizar uma comparação direta de valores entre os softwares. Ainda assim, pôde-se perceber que os resultados do script atendem às recomendações dos autores de referência desta área.

Conclui-se também que a ferramenta desenvolvida pelo software SMath pode ser utilizada pela comunidade acadêmica como auxílio ao entendimento das disciplinas que envolvem o dimensionamento de sapatas. Esse uso se dá pela livre utilização do script, disponibilizado pelos autores através do link abaixo.

<https://drive.google.com/drive/folders/1xG1h0i2e8Yva9W-Moj1bi-N0UmchWsR8>

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto que as análises comparativas realizadas se mantiveram delimitadas a sapatas isoladas com carga centrada, sugere-se aplicar os mesmos métodos utilizados no script para o dimensionamento de sapatas isoladas com outras cargas atuantes, a exemplo dos momentos, onde haverão outras questões para comparação. Além disso, pode-se também realizar atualizações e adições ao script, a fim de torná-lo mais completo no quesito de dimensionamento de fundações. Por fim, pode-se realizar uma análise comparativa dos métodos de cálculo do dimensionamento de sapatas com outros softwares de dimensionamento estrutural, como por exemplo os softwares Multiplus Cypecad ou TQS.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6118. *Projeto de estruturas de concreto — Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT NBR 6120. *Ações para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT NBR 6484. *Solo — Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2020.
- ALONSO, U. R. *Exercícios de fundação*. 2ª edição. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2010.
- ALTO Qi. QiSuporte, c2021. Página Inicial. Disponível em: <<https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br>>. Acesso em: 08 de jul, de 2023.
- ANAGNOSTOPOULOS, A.G.; PAPADOPOULOS, B.P.; KAVVADAS, M.J. *Direct Estimation of Settlements on Sand, Based on SPT Results*. In: Tenth Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (X ECSMFE), Florence/Italia, 1991.
- ANJOS, G. J. M. *Apostila de Fundações II*. Notas de aula. Não paginado. 2019.
- ARAÚJO, J. M. *Curso de concreto armado*. v.4, 4ª edição. Rio Grande do Sul: Editora Dunas, 2014.
- BASTOS, P. S. S. *Estruturas de Concreto III: Sapatas de Fundação*. Notas de aula. 120p. 2019.
- BURLAND, J. B.; BROMS, B. B.; MELLO, V. F. B. *Behaviour of foundations and structures*. Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Tóquio. 2. ed., p. 495-546, 1977.
- CAMPOS, J. C. *Elementos de fundações em concreto*. 2ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. *Fundações diretas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. *Tensão Admissível em Fundações Diretas*. São Paulo: RiMa Editora, 1983.
- DIAZ, JP.; FERRÁNDEZ, D.; YEDRA, E.; MORÓN, C. *Free software for application in teaching: SMath studio as a tool for engineering students*. EDULEARN22 Proceedings, Palma, Espanha, v.14, n. 1, p. 9586-9590, jul. 2022. Disponível em: <<https://library.iated.org/view/DIAZ2022FRE?re=downloadnotallowed>>. Acesso em: 20 mai, 2023.
- GIACOMASSI, T. *Análise do dimensionamento por software das sapatas de um edifício de múltiplos pavimentos*. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia Civil. Coordenação de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, PR. p. 80. 2021.

MELLO, V. F. B. *Deformações como base fundamental de escolha de fundação*, Geotecnia, SPG, nº 12, fev-mar, p. 55-75, 1975.

MEYERHOF, G.G. *Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils*. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Asce, New York, v. 82, n. SM1, p. 1-19, 1956.

PRADO A. B.; DELALIBERA R. G.; GIONGO J. S.; GONÇALVES V. F. *Blocos sobre estacas, de Blévoit & Frémy (1967) – tradução para português - Parte A*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 2014.

REBELLO, Y. C. P. *Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento*. 1ª ed. Rio de Janeiro: Zigurate Editora, 2008.

SANTOS, D. M. *Projeto estrutural por bielas e tirantes*. 1ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

SKEMPTON, A. W. *The bearing capacity of clays*. Building Research Congress, v. 1 p. 180-189, 1951.

TEIXEIRA, A. H. *“Projeto e execução de fundações”*. 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, n. 1, p. 33-50, 1956.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. *Análise, projeto e execução de fundações rasas*. In: HACHICH *et al.* (eds.). *Fundações: teoria e prática*. São Paulo: Pini, 1996.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. *Soil mechanics in engineering practice*. Nova Iorque: John Wiley and Sons, 1967.

APÊNDICE A - SCRIPT DE DIMENSIONAMENTO ATRAVÉS DO SOFTWARE SMATH

Dimensionamento de Sapatas Isoladas com Carga Centrada
Script apresentado como TCC de Engenharia Civil na Universidade Federal do Pará
Autores: Gabriel de Carvalho Neves
Henrique Silva Moraes Filho

Dados referentes ao dimensionamento do Cenário 3 – Terra Firme

☐ – ÍNDICE

Índice

Parâmetros do Solo

- Tensão Admissível do Solo
- Laudo de Sondagem SPT
- Cota Assentamento
- Bulbo de Tensões

Dados Iniciais

- Carga Aplicada
- Geometria do Pilar

Dimensionamento Geométrico

- Dimensões em Planta

Dimensionamento Estrutural

- Altura
- Armadura Positiva
- Esmagamento Concreto

Recalque

☐— CÁLCULOS

☐— Solo

Tensão Admissível

$$\frac{spt_m \text{ MPa}}{50}$$

Alonso (1983)
Teixeira (1996)
Skempton (1951)

$$0,05 + \left(1 + 0,4 \cdot B_i\right) \cdot \frac{spt_m}{100} \quad \text{Teixeira (1996)}$$

$$0,1 \cdot \left(\sqrt{spt_m} - 1\right) \quad \text{Mello (1975)}$$

$$\frac{spt_m}{90} \cdot \left(B_i + z_b\right) \quad \text{Meyerhof (1956) - Solos Arenosos}$$

$$\frac{spt_m \text{ MPa}}{180} \quad \text{Meyerhof (1956) - Solos Argilosos}$$

$$\sigma_{adm,in} := \begin{cases} \text{"Escolher método"} \\ \text{"N/50"} \\ \text{"Teixeira (1996)} \\ \text{"Mello (1975)} \\ \text{"Meyerhof (1956) - Solos Arenosos"} \\ \text{"Meyerhof (1956) - Solos Argilosos"} \end{cases}$$

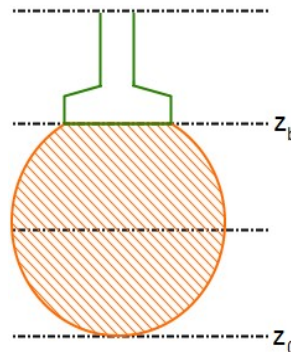
$$\sigma_{adm} := \begin{cases} a_1 := \text{if } \sigma_{adm,out} = \text{"Escolher método"} \\ 0 \\ \text{else if } \sigma_{adm,out} = \text{"N/50"} \\ \frac{spt_m \text{ MPa}}{50} \\ \text{else if } \sigma_{adm,out} = \text{"Teixeira (1996)"} \\ \left(0,05 + \left(1 + 0,4 \cdot \frac{B_i}{m}\right) \cdot \frac{spt_m}{100}\right) \text{ MPa} \\ \text{else if } \sigma_{adm,out} = \text{"Mello (1975)"} \\ 0,1 \cdot \left(\sqrt{spt_m} - 1\right) \text{ MPa} \\ \text{else if } \sigma_{adm,out} = \text{"Meyerhof (1956) - Solos Arenosos"} \\ \left(\frac{spt_m}{90} \cdot \frac{(B_i + z_b)}{m}\right) \text{ MPa} \\ \text{else if } \sigma_{adm,out} = \text{"Meyerhof (1956) - Solos Argilosos"} \\ \frac{spt_m \text{ MPa}}{180} \\ a_2 := 1000 \text{ kPa} \\ \text{Min}(a_1; a_2) \end{cases}$$

Bulbo de Tensões

$$z_0 := \left\lceil z_b + 1 \cdot m + 2 \cdot B_i \right\rceil$$

$$spt_m := \begin{cases} a1 := \text{submatrix} \left(\text{laudo}; \left[\frac{z_b}{m} \right] + 1; \frac{z_0}{m} + 1; 2; 2 \right) \\ a2 := \sum a1 \\ a3 := \text{length}(a1) \\ \left[\frac{a2}{a3} \right] \end{cases}$$

$$\text{bulbo} := \begin{cases} \text{bulbo}_{in} := \text{submatrix} \left(\text{laudo}; \left[\frac{z_b}{m} \right] + 1; \frac{z_0}{m} + 1; 1; 3 \right) \\ a1 := \text{"Prof." "Nspt" "Camadas do solo"} \\ a2 := \text{bulbo}_{in} \\ a3 := spt_m \\ a4 := \frac{\sigma_{adm}}{\text{kPa}} \\ a5 := \left[\text{" " } \text{concat}(\text{"Médio: "}; \text{var2str}(a3; 0)) \text{concat}(\text{"oadm = "}; \text{var2str}(a4; 2); \text{"kPa"}) \right] \\ \text{stack}(a1; a2; a5) \end{cases}$$



☐ — Geométrico

Definições

$$\text{PesoProprio} := \begin{cases} "5%" & 1,05 \\ "10%" & 1,10 \\ "15%" & 1,15 \end{cases}$$

Dimensionamento Geométrico

$$S_{min} := \frac{F_z \cdot PP}{\sigma_{adm}} \quad B_{min} := \begin{cases} a1 := 60 \text{ cm} \\ \text{if } B_p = L_p \\ \quad \text{Max} \left(a1 ; \left\lceil \sqrt{S_{min}} \right\rceil 5 \text{ cm} \right) \\ \text{else} \\ \quad \text{Max} \left(a1 ; \left\lceil \frac{1}{2} \cdot (B_p - L_p) + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot (B_p - L_p)^2 + S_{min}} \right\rceil 5 \text{ cm} \right) \end{cases}$$

$$L_{min} := \begin{cases} a1 := 60 \text{ cm} \\ \text{if } B_p = L_p \\ \quad B_{min} \\ \text{else} \\ \quad \text{Max} \left(L_p - B_p + B_{min} ; a1 + (L_p - B_p) \right) \end{cases}$$

Núcleo Central de Inércia

Tensões devido a momento

$$e_x := \frac{M_y + F_x \cdot z_b}{F_z} \quad e_y := \frac{M_x + F_y \cdot z_b}{F_z}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} := \frac{F_z \cdot PP}{L^2} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot e_x}{L} + \frac{6 \cdot e_y}{L} \right)$$

$$\text{NCI} := \begin{cases} \text{if } (e_x = 0) \wedge (e_y \neq 0) \\ \quad \frac{L}{6} \\ \text{else if } (e_y = 0) \wedge (e_x \neq 0) \\ \quad \frac{B}{6} \\ \text{else if } (e_x \neq 0) \wedge (e_y \neq 0) \\ \quad \left(\frac{e_x}{B} + \frac{e_y}{L} \right) \text{ cm} \\ \text{else} \\ \quad 0 \end{cases}$$

$$\sigma_{m\acute{i}n} := \frac{F_z \cdot PP}{L^2} \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot e_x}{L} - \frac{6 \cdot e_y}{L} \right)$$

$$\sigma_m := \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2}$$

$$e := \begin{cases} \text{if } (e_x = 0) \wedge (e_y \neq 0) \\ \quad e_y \\ \text{else if } (e_y = 0) \wedge (e_x \neq 0) \\ \quad e_x \\ \text{else} \\ \quad 0 \end{cases}$$

☐ — Estrutural

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa} \quad \phi_{ag} := 19 \text{ mm}$$

Altura

$$d := \text{Max} \left(\frac{L - L_p}{4} ; \frac{B - B_p}{4} ; 1,44 \cdot \sqrt{\frac{F_z}{\left(0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{1,96} \right)}} \right) \quad h_{min,rigida} := \frac{L - L_p}{3} \quad h_0 := \left\lceil \max \left(\left[\frac{h}{3} \right] ; 15 \text{ cm} \right) \right\rceil 5 \text{ cm} \quad \alpha := \text{atan} \left(\frac{h - h_0}{\frac{L - L_p}{2}} \right)$$

$$h_{min} := \text{Max} (h_{min,rigida} ; d)$$

Armadura Positiva

$$B_{\text{útil}} := B - 2 \cdot c - 2 \cdot \text{findrows}(\text{Bitolas}; \text{Bitola}_y; 2) \quad 3$$

$$L_{\text{útil}} := L - 2 \cdot c - 2 \cdot \text{findrows}(\text{Bitolas}; \text{Bitola}_x; 2) \quad 3$$

$$\text{bitola}_x := \text{findrows}(\text{Bitolas}; \text{Bitola}_x; 2) \quad 3$$

$$\text{bitola}_y := \text{findrows}(\text{Bitolas}; \text{Bitola}_y; 2) \quad 3$$

$$\text{Bitolas} := \begin{bmatrix} \text{"Ø8,0"} & 0,5 \text{ cm}^2 & 8 \text{ mm} \\ \text{"Ø10,0"} & 0,785 \text{ cm}^2 & 10 \text{ mm} \\ \text{"Ø12,5"} & 1,22 \text{ cm}^2 & 12,5 \text{ mm} \\ \text{"Ø16,0"} & 2,01 \text{ cm}^2 & 16 \text{ mm} \\ \text{"Ø20,0"} & 3,14 \text{ cm}^2 & 20 \text{ mm} \end{bmatrix}$$

$$A_{sx} := \begin{bmatrix} T_x := \frac{F_z \cdot (B - B_p)}{8 \cdot h} \\ 1,61 \cdot \frac{T_x}{f_{yk}} \end{bmatrix}$$

$$A_{sy} := \begin{bmatrix} T_y := \frac{F_z \cdot (L - L_p)}{8 \cdot h} \\ 1,61 \cdot \frac{T_y}{f_{yk}} \end{bmatrix}$$

$$Q_{\text{barras,calc},x} := \left\lceil \frac{A_{sx}}{\text{Bitola}_x} \right\rceil$$

$$Q_{\text{barras,calc},y} := \left\lceil \frac{A_{sy}}{\text{Bitola}_y} \right\rceil$$

$$\text{esp}_x := \begin{bmatrix} \text{esp}_{x,\text{calc}} := \frac{B_{\text{útil}}}{Q_{\text{barras,calc},x} - 1} \\ \text{esp}_{x,\text{min}} := \begin{bmatrix} a1 := 2 \text{ cm} \\ a2 := \text{bitola}_x \\ a3 := 1,2 \cdot \phi_{ag} \\ \text{Max}(a1; a2; a3) \end{bmatrix} \\ \text{esp}_{x,\text{adotado}} := \text{Min}\left(20 \text{ cm}; \left[\text{Max}(\text{esp}_{x,\text{calc}}; \text{esp}_{x,\text{min}}) \right] \right) \quad 1 \text{ cm} \end{bmatrix}$$

$$\text{esp}_y := \begin{bmatrix} \text{esp}_{y,\text{calc}} := \frac{L_{\text{útil}}}{Q_{\text{barras,calc},y} - 1} \\ \text{esp}_{y,\text{min}} := \begin{bmatrix} a1 := 2 \text{ cm} \\ a2 := \text{bitola}_y \\ a3 := 1,2 \cdot \phi_{ag} \\ \text{Max}(a1; a2; a3) \end{bmatrix} \\ \text{esp}_y := \text{Min}\left(20 \text{ cm}; \left[\text{Max}(\text{esp}_{y,\text{calc}}; \text{esp}_{y,\text{min}}) \right] \right) \quad 1 \text{ cm} \end{bmatrix}$$

$$Q_{\text{barras,adotado},x} := \left\lceil \frac{B_{\text{útil}}}{\text{esp}_x} + 1 \right\rceil$$

$$Q_{\text{barras,adotado},y} := \left\lceil \frac{L_{\text{útil}}}{\text{esp}_y} + 1 \right\rceil$$

Bielas de Compressão Concreto

perímetro biela crítica - base pilar

$$u_0 := 2 \cdot L_p + 2 \cdot B_p$$

$$F_{Sd} := 1,4 \cdot F_z$$

$$\alpha_v := 1 - \frac{\left(\frac{f_{ck}}{250} \right)}{\text{MPa}}$$

$$\tau_{Sd} := \frac{F_{Sd}}{u_0 \cdot h}$$

$$\tau_{Rd} := 0,27 \cdot \alpha_v \cdot \frac{f_{ck}}{1,4}$$

Já a compressão diagonal do concreto deve ser verificada, segundo a ABNT NBR 6118:2014 deve atender à condição dada pela Equação 2.45.

$$\tau_{Sd} \leq \frac{V_l}{u_p \cdot d} \leq \tau_{Rd2} = 0,27 \alpha_v f_{cd} \quad (2.45)$$

Sendo que:

τ_{Sd} = tensão de cisalhamento solicitante de cálculo;

V_l = força cortante no perímetro do pilar, que por segurança pode-se utilizar a força normal aplicada no pilar;

u_p = perímetro ao longo do contorno do pilar;

d = altura útil da sapata;

τ_{Rd2} = tensão de cisalhamento resistente de cálculo;

$\alpha_v = 1 - f_{ck}/250$ com f_{ck} em MPa.

Recalque

Recalque Método Anjos (2019) *apud* Anagnostopoulos (1991)

Settlements are calculated as:

$s = [0.57 (q)^{0.94} (B)^{0.90}] / N^{0.87}$	for zero < N ≤ 10
$s = [0.35 (q)^{1.01} (B)^{0.69}] / N^{0.94}$	for 10 < N ≤ 30
$s = [604 (q)^{0.90} (B)^{0.76}] / N^{2.82}$	for N > 30
$s = [1.90 (q)^{0.77} (B)^{0.45}] / N^{1.08}$	for B ≤ 3 m
$s = [1.64 (q)^{1.02} (B)^{0.39}] / N^{1.37}$	for B > 3 m

(x 0,86)

where:

- s = settlement (in mm)
- q = footing stress (in kPa)
- B = footing width (in meters)
- N = uncorrected blowcount

$$s_1 := \begin{cases} \text{if } spt_m \leq 10 \\ 0,86 \cdot \frac{0,57 \cdot \left(\frac{\sigma_{adm}}{kPa}\right)^{0,94} \cdot \left(\frac{L_{min}}{m}\right)^{0,9}}{spt_m^{0,87}} \text{ mm} \\ \text{else if } (10 < spt_m) \wedge (spt_m \leq 30) \\ 0,86 \cdot \frac{0,35 \cdot \left(\frac{\sigma_{adm}}{kPa}\right)^{1,01} \cdot \left(\frac{L_{min}}{m}\right)^{0,69}}{spt_m^{0,94}} \text{ mm} \\ \text{else if } spt_m > 30 \\ 0,86 \cdot \frac{6,04 \cdot \left(\frac{\sigma_{adm}}{kPa}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{L_{min}}{m}\right)^{0,76}}{spt_m^{2,82}} \text{ mm} \end{cases}$$

$$s_2 := \begin{cases} \text{if } L_{min} \leq 3 \text{ m} \\ 1,9 \cdot \frac{\left(\frac{\sigma_{adm}}{kPa}\right)^{0,77} \cdot \left(\frac{L_{min}}{m}\right)^{0,45}}{spt_m^{1,08}} \text{ mm} \\ \text{else} \\ s := \frac{1,64 \cdot \left(\frac{\sigma_{adm}}{kPa}\right)^{1,02} \cdot \left(\frac{L_{min}}{m}\right)^{0,59}}{spt_m^{1,37}} \text{ mm} \end{cases}$$

$$\delta := \frac{s_1 + s_2}{2} \quad \text{Método empírico mais real: Anagnostopoulos (1991) com fator correção 0,86 (ANJOS, 2019)}$$

DEFINIÇÕES SOLO

Perfil do Solo

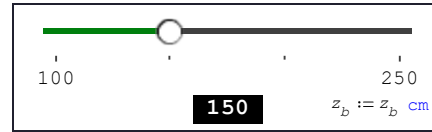
Laudo de Sondagem do Solo

Inserir informações de ensaio SPT

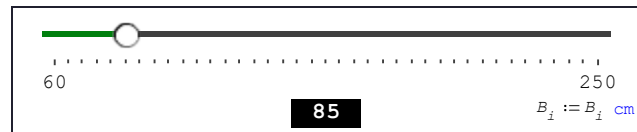
laudo :=

"Prof."	"Nspt"	"Classificação"
1 m	6	"Areia"
2 m	19	"Argila arenosa"
3 m	15	"Argila arenosa"
4 m	17	"Areia"
5 m	52	"Areia argilosa"
6 m	7	"Argila arenosa"
7 m	7	"Argila arenosa"
8 m	11	"Argila arenosa"
9 m	39	"Argila arenosa"
10 m	40	"Argila arenosa"

Cota Assentamento



Dimensão prevista da sapata



Extensão do Bulbo de Tensões

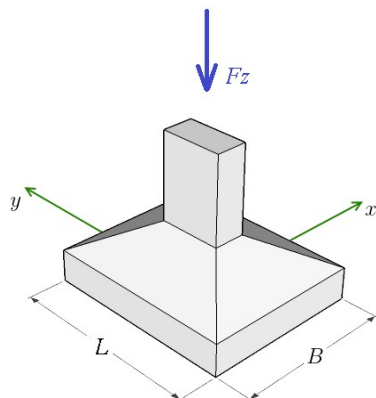
N/50

Extensão do Bulbo de Tensões

Prof.	Nspt	Camadas do solo
2 m	19	Argila arenosa
3 m	15	Argila arenosa
4 m	17	Areia
Médio: 17		$\sigma_{adm} = 340,00\text{kPa}$

bulbo

DEFINIÇÕES SAPATA



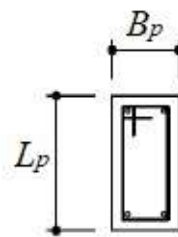
Carga Aplicada

$$F_z := 250 \text{ kN}$$

Fator Peso Próprio

5%
 10%
 15%

Dimensões do Pilar



Menor Dimensão = $B_p := 20 \text{ cm}$

Maior Dimensão = $L_p := 40 \text{ cm}$

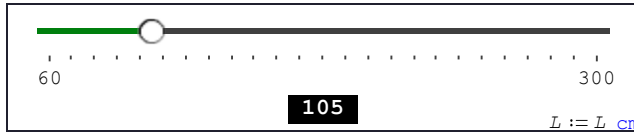
Dimensões Mínimas Calculadas

$$L_{\min} = 105 \text{ cm}$$

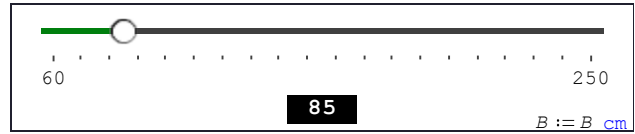
$$B_{\min} = 85 \text{ cm}$$

OK

L Adotado (Maior Lado)



B Adotado (Menor Lado)



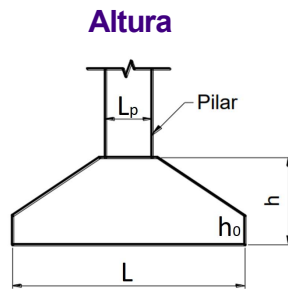
DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

Dimensionamento Estrutural

$$f_{ck} := 25 \text{ MPa}$$

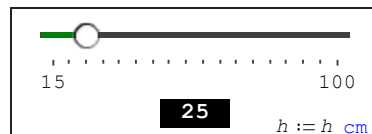
$$c := 5 \text{ cm}$$

Altura



$$\text{Altura M\u00ednima} = h_{\min} = 21,9 \text{ cm}$$

Altura Final



Sapata R\u00edgida

N\u00e3o \u00e9 necess\u00e1rio verifica\u00e7\u00e3o a pun\u00e7\u00e3o

Alturas Finais

$$h = 25 \text{ cm}$$

$$h_0 = 15 \text{ cm}$$

\u00c2ngulo de Inclina\u00e7\u00e3o

$$\alpha = 17,1^\circ$$

$\alpha \leq 60^\circ$. Espreadimento cargas

$\alpha \leq 30^\circ$. \u00c2ngulo do talude natural do concreto fresco

☐— Armadura Positiva

Armadura Positiva – Terra Firme

Método Bielas e Tirantes

Bitola Aço x (Menor lado)

Ø10,0

Bitola Aço y (Maior lado)

Ø10,0

$$A_{sx} = 2,6162 \text{ cm}^2$$

$$esp_x = 20 \text{ cm}$$

$$Q_{barras, adotado, x} = 4$$

4 φ10,0 c/20

$$A_{sy} = 2,6162 \text{ cm}^2$$

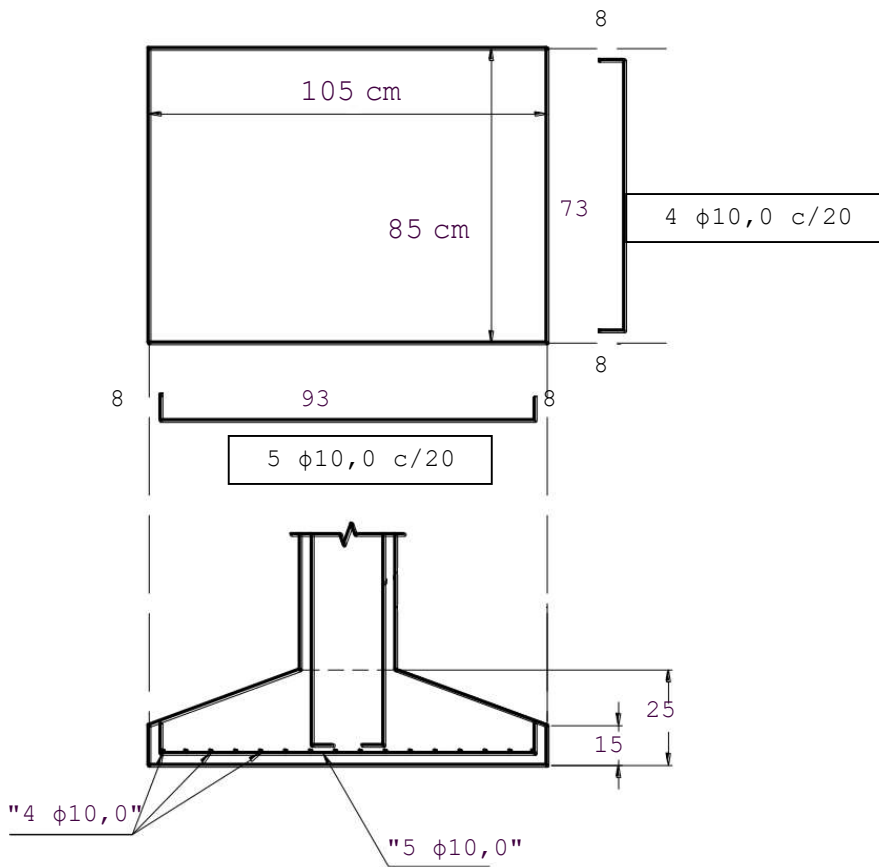
$$esp_y = 20 \text{ cm}$$

$$Q_{barras, adotado, y} = 5$$

5 φ10,0 c/20

Detalhamento Sapata – Terra Firme

Método Bielas e Tirantes



☐—Esmagamento Concreto

Esmagamento Concreto

Método Bielas e Tirantes

$$\tau_{sd} = 1,17 \text{ MPa} < \tau_{Rd} = 4,34 \text{ MPa}$$

Bielas de Concreto OK!


☐—RECALQUE

Recalque

Método Anagnostopoulos (1991) com
fator de correção por Anjos (2019)

$$\delta = 7,96 \text{ mm}$$

APÊNDICE B - RELATÓRIOS GERADOS PELO SOFTWARE ALTOQI

	AltoQi Eberick 2023 Plena - Demonstrativo	
	CENÁRIO 3 – TERRA FIRME	18/7/2023 22:14:51

Relatório de Cálculos das Sapatas

Pavimento	fck = 250.00 kgf/cm ²	E = 241500 kgf/cm ²	Peso Espec = 2500.00 kgf/m ³
Lance 1		cobr = 4.50 cm	

Esforços e pressões

Nome	MB MH (kgf.m)	FB FH (tf)	Carga Carga total (tf)	Pressão Sig1 (kgf/cm ²)	Pressão Sig2 (kgf/cm ²)	Pressão Sig3 (kgf/cm ²)	Pressão Sig4 (kgf/cm ²)
S1	226.04 378.67	0.14 0.14	28.40 31.36	3.18 (lim = 3.47)	2.92 (lim = 3.47)	2.56 (lim = 3.47)	2.82 (lim = 3.47)

Estabilidade

Nome	Tombamento B		Tombamento H		Deslizamento		Arrancamento	
	Mrd Msd (kgf.m)	Mrd / Msd	Mrd Msd (kgf.m)	Mrd / Msd	Frd Fsd (tf)	Frd / Fsd	Nt (tf)	Ns (tf)
S1	14898.08 226.04	65.91 (lim = 1.50)	18034.52 378.67	47.63 (lim = 1.50)	11.48 0.14	80.83 lim = (1.50)		

Dimensionamento

Nome	Armaduras inferiores		Armaduras superiores	
	Dir. B	Dir. H	Dir. B	Dir. H
	Md (kgf.m/m) As (cm ² /m)	Md (kgf.m/m) As (cm ² /m)	Md (kgf.m/m) A's (cm ² /m)	Md (kgf.m/m) A's (cm ² /m)
S1	2515.51 4.01	2556.60 4.04	0.00 0.00	0.00 0.00


Relatório de Resultados das Sapatas

Pavimento	fck = 250.00 kgf/cm ²	E = 241500 kgf/cm ²	Peso Espec = 2500.00 kgf/m ³
Lance 1		cobr = 4.50 cm	

Nome	Dimensões (cm)		Armaduras inferiores		Armaduras superiores	
	B H	H0 H1	Dir. B	Dir. H	Dir. B	Dir. H
S1	95.00 115.00	20.00 30.00	6 ø 10.0 c/20 (4.71 cm ²)	6 ø 10.0 c/17 (4.71 cm ²)		

ANEXO A - LAUDOS DE SONDAGENS SPT

Tv Perimetral, Cabanagem, Belém-PA

		Cliente: 	
		Obra: INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA - SONDAGEM SPT	
		Local: Rua Benjamin, Travessa Perimetral, N.º - BELÉM-PA	
Revestimento		Relatório de Sondagem N° 054/2019	
Método cravação	Cota relação R. N.	Furo SP 1B Cota 0,000	SPT - Standart Penetration Test
NA Inic.	NA Final	0	0 10 20 30 40 50
Índice de SPT iniciais/30cm	Índice SPT finais/30cm	30 cm finais 30 cm iniciais	
Amostras	Prof. Camadas (m)	1,90 2,34	
1,9	CA	Areia média silteosa com pedregulho de cor marrom	
4	6	Rocha em forma de cascalho de cor marrom ↑ Furo terminado e impenetrável	
55	55	Lavagem por 30 min	
-5			
-10			
-15			
-20			
-25			
-30			
-35			
38			
Nível d'água		Amostrador	Revestimento Ø 2 3/8 "
NA Inic.	24/09/2019	Ø interno 1 3/8 "	Peso 65,0 kg
NA Final	24/09/2019	Ø externo 2 "	Altura de queda 75,0 cm
Data de execução: Início 24/09/2019, término 24/09/2019			
Obs: SONDAGEM TIPO SPT			
Digitador		Engº	
			24/09/2019 Folha 01

