

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA**

**HERNANI MAGELA DUARTE JÚNIOR**

***DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS DE  
FUNDAÇÃO ATRAVÉS DO SOFTWARE  
MATHCAD***

**OURO BRANCO – MG**

**JULHO DE 2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI**  
**CAMPUS ALTO PARAPEBA**

**HERNANI MAGELA DUARTE JÚNIOR**

***DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS DE***  
***FUNDAÇÃO ATRAVÉS DO SOFTWARE***  
***MATCAD***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil com Ênfase em Estruturas Metálicas, da Universidade Federal de São João Del-Rei, Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof. Me. Tales Moreira de Oliveira

**OURO BRANCO – MG**

**JULHO DE 2016**

HERNANI MAGELA DUARTE JÚNIOR

***DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS DE  
FUNDAÇÃO ATRAVÉS DO SOFTWARE  
MATHCAD***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil com Ênfase em Estruturas Metálicas, da Universidade Federal de São João Del-Rei, Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Data da defesa: 01 de Julho de 2016.

Conceito Final: \_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Me. Tales Moreira de Oliveira  
Orientador / UFSJ

---

Prof. Dr. Leandro Neves Duarte  
Avaliador / UFSJ

---

Prof. Me. Lucas Roquete Amparo  
Avaliador / UFSJ

Dedico este trabalho aos meus pais, pela confiança que depositaram em mim, e por todo o incentivo e ajuda para que isso fosse possível.

## **AGRADESCIMENTOS**

Agradeço a Deus, por me conceder grandes oportunidades, além de disposição e saúde para que eu pudesse enfrentar todas as barreiras impostas.

Agradeço ao professor orientador Tales Moreira de Oliveira, por todo incentivo e pela confiança depositada na certeza de que eu seria capaz de superar minhas próprias limitações e concluir mais este trabalho.

Agradeço ao professor Leandro Neves Duarte pelo incentivo e auxílio prestado durante todas as etapas deste trabalho.

Agradeço a todos os meus familiares e amigos, que contribuíram de forma direta e indireta para a conclusão de mais esta etapa de minha vida.

*“Há apenas uma maneira de evitar críticas: não faça nada, não diga nada, e não seja nada. ”*

*(Aristóteles)*

## RESUMO

O presente trabalho procurou desenvolver de forma rápida e eficiente com o uso do *software* Mathcad, um algoritmo capaz de realizar os cálculos necessários ao dimensionamento completo de sapatas isoladas submetidas à carregamento centrado, contemplando a elaboração de rotinas para cálculo das tensões admissíveis e dos recalques advindos da interação sapata-solo, assim como para o dimensionamento geométrico e estrutural do elemento de fundação. Para a avaliação desse algoritmo, fez-se uma comparação entre os resultados gerados por ele, e outros obtidos através de cálculos manuais, ambos para um mesmo exemplo prático. Em ambas as soluções foram utilizados resultados de parâmetros característicos do solo obtidos através de estudos científicos, didáticos e testes experimentais. Os resultados obtidos pela resolução via *software* foram, em sua maioria, iguais aos calculados analiticamente, diferindo-se em todos os casos por questões de arredondamento de casas decimais, o que demonstrou a eficiência e a precisão do programa. Ao final das análises comparativas chegou-se à conclusão de que essas discrepâncias obtidas entre alguns resultados da utilização do *software* e do cálculo analítico, possuíam ordem de grandeza tal, que poderiam ser desprezadas devido à existência de fatores de segurança implícitos em todas as etapas do dimensionamento do elemento de fundação. Concluiu-se também, que o uso do *software* demonstrou maior velocidade e eficiência em relação aos cálculos analíticos, e que devido ao fato de o Mathcad possibilitar uma fácil manipulação de textos, figuras e equações, assim como a criação de arquivos em formato PDF, este *software* possa ter uma grande aplicabilidade na produção de memoriais descritivos e de cálculo, tanto para fins didáticos, quanto para fins profissionais.

# SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	12
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.2.1 OBJETIVO GERAL .....	13
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
2.1 FUNDAÇÕES .....	14
2.2 TIPOS DE FUNDAÇÕES .....	14
2.2.1 INTRODUÇÃO.....	14
2.2.2 FUNDAÇÕES RASAS .....	15
2.2.3 FUNDAÇÕES PROFUNDAS.....	19
2.3 DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS ISOLADAS .....	23
2.3.1 CÁLCULO GEOTÉCNICO .....	23
2.3.2 DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO.....	24
2.3.3 ANÁLISE DE RECALQUES.....	25
2.3.4 CÁLCULO ESTRUTURAL.....	27
2.4 O USO DE <i>SOFTWARES</i> NA ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES.....	28
2.5 O <i>SOFTWARE</i> MATHCAD .....	29
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>30</b>
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	30
3.2 METODOLOGIA APLICADA.....	30
3.2.1 INTRODUÇÃO.....	30

3.2.2	<i>CÁLCULO GEOTÉCNICO</i>	30
3.2.3	<i>DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO</i>	32
3.2.4	<i>ANÁLISE DE RECALQUES</i>	33
3.2.5	<i>CÁLCULO ESTRUTURAL</i>	35
3.3	MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO PROGRAMA	43
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÕES</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>49</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS POR MEIO DO USO DO SOFTWARE</b>	
	<b>MATCAD</b>	<b>53</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Blocos de Fundação .....	16
Figura 2 – Ilustração de sapatas isoladas .....	17
Figura 3 – Ilustração de uma sapata corrida .....	17
Figura 4 – Ilustração de uma sapata associada .....	18
Figura 5 – Ilustração de uma sapata alavancada.....	18
Figura 6 – Fotos ilustrativas de um radier .....	19
Figura 7 – Fundações profundas.....	20
Figura 8 – Demonstração de um estaqueamento .....	22
Figura 9 – Tubulões: (a) em perfil, sem e com alargamento da base e formas de base usuais: (b) circular e (c) “falsa elipse” .....	23
Figura 10 – Detalhamento das armaduras de uma sapata isolada .....	28
Figura 11 – Tabela utilizada para estimar a tensão admissível do solo.....	32
Figura 12 - Integração das expressões de Mindlin para a obtenção do coeficiente de profundidade .....	35
Figura 13 - Seção para a verificação da força cortante.....	42
Figura 14 – Perfil representativo do terreno para resolução do exemplo prático.....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais tipos de estaca na classificação segundo o efeito provocado no solo....	21
Tabela 2 - Estimativa do coeficiente de Poisson .....	34
Tabela 3 - Estimativa do módulo de deformabilidade do solo .....	34
Tabela 4 - Coeficientes dependentes da rigidez e da forma da placa .....	35
Tabela 5 – Resumo dos valores obtidos pelo dimensionamento da sapata do exemplo prático manualmente e através do <i>software</i> Mathcad.....	45

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A infraestrutura, ou fundação, é a parte de uma estrutura composta por elementos geralmente construídos abaixo do nível do terreno, e que são os responsáveis por transmitir ao solo todas as ações (cargas verticais, forças do vento, etc.) que atuam na edificação. Já os elementos estruturais que se apoiam sobre a infraestrutura compõem a parte chamada de superestrutura.

As cargas que atuam na superestrutura das edificações são transferidas na direção vertical por pilares ou paredes. Como o solo geralmente tem resistência muito inferior à do material constituinte do pilar, é necessário projetar algum outro tipo de elemento estrutural com a função receber essas cargas e transmiti-las ao solo em menor intensidade. Essas estruturas são as fundações, e são divididas em dois grupos: fundações rasas (diretas) e fundações profundas.

Segundo Bastos (2016), as fundações diretas são indicadas para os casos onde o solo apresenta resistência suficiente em baixa profundidade, já as profundas são projetadas para os casos onde o solo apresenta a resistência necessária somente em profundidades maiores. A Norma Brasileira (NBR) 6122 menciona que as fundações profundas são realizadas através de estacas, caixões ou de tubulões, já as rasas por blocos ou sapatas, sendo o segundo tipo o objeto de estudo deste trabalho (ABNT, 2010).

O uso de *softwares* em empresas de engenharia vem sendo cada vez mais comum, isso devido ao fato de eles proporcionarem, por vezes, a criação de projetos sofisticados e bem planejados. Esse aumento da utilização de softwares vem unindo conhecimentos tecnológico, teórico e prático para a criação de programas que gerem eficiência e praticidade na resolução de casos que demandariam mais tempo para serem resolvidos manualmente.

De acordo com Ferreira *et al.* (2006), o Mathcad é um programa que apresenta características singulares: facilidade de elaboração de gráficos, as equações são apresentadas como se escreve no papel ou como aparecem nos livros e facilidade de elaboração de rotinas computacionais. Todas essas facilidades permitem aplicações pedagógicas de comportamento e de dimensionamento em disciplinas da área de estruturas do curso de engenharia civil.

Matos (2009) alega que as inovações tecnológicas proporcionam grandes facilidades em métodos de cálculos de engenharia civil, cálculos complexos que por muito tempo foram elaborados por engenheiros de forma analítica e trabalhosa. Esse fato, serviu de motivação para a elaboração do presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), que objetiva à criação e implementação utilizando o *software* Mathcad, de uma rotina de cálculo para o dimensionamento geotécnico, geométrico e estrutural de sapatas rígidas isoladas e retangulares, submetidas à carregamento centrado.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver um algoritmo direcionado ao dimensionamento geotécnico, geométrico e estrutural de sapatas de fundação retangulares, rígidas e isoladas por meio do *software* Mathcad.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Como objetivos específicos citam-se:

- Desenvolver uma rotina de cálculo (algoritmo) para execução do dimensionamento supracitado;
- Implementação do algoritmo no *software* Mathcad;
- Avaliação do programa por comparação com resultados práticos.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 FUNDAÇÕES**

Fundação é o elemento ou peça de um conjunto estrutural responsável por transmitir as cargas para o terreno, devendo essa transmissão ser feita de forma adequada, ou seja, sem gerar problemas para a estrutura, de qualquer natureza. Segundo Danziger (2007), conceituar fundações como elementos de transferência de carga é fundamental, visto que vários alunos trazem a ideia, errada, de que elas devem aguentar ou reter a carga e, não, transmiti-la ao solo.

A forma adequada de transmissão de cargas ao terreno deve atender a dois requisitos: (i) segurança com relação à ruptura e (ii) recalques compatíveis com a estrutura. O primeiro conceito significa que o solo de fundação não pode entrar em colapso, ou ruptura. Já o segundo que mesmo que as fundações apresentem segurança em relação à ruptura do solo, os recalques à que elas estarão sujeitas devido às cargas aplicadas precisam ser compatíveis com aqueles tolerados pela estrutura (DANZIGER, 2007).

De acordo com Velloso e Lopes (2011), o projeto e a execução das fundações, em outras palavras, a engenharia de fundações, requer conhecimentos de Geotecnia e Cálculo Estrutural, sendo que a primeira abrange a Geologia de Engenharia, a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas, já a segunda engloba a análise estrutural e o dimensionamento dos elementos estruturais.

Segundo Milititsky, Consoli e Schnaid (2008), o comportamento de uma fundação a longo prazo pode ser afetado por diversos fatores, dentre os quais se encontram aqueles decorrentes do projeto propriamente dito que envolvem o conhecimento do solo, os procedimentos construtivos e os efeitos de acontecimentos pós implantação, o que inclui sua possível degradação.

### **2.2 TIPOS DE FUNDAÇÕES**

#### **2.2.1 INTRODUÇÃO**

De acordo com Rodarte (2007), dois tipos de fundações são adotados em edificações considerando-se critérios técnicos e econômicos, sendo o primeiro tipo o das fundações rasas,

no qual estão inseridos os blocos e as sapatas. O outro tipo, também muito difundido, é o das fundações profundas, que são as estacas e os tubulões.

Segundo a ABNT NBR 6122 (2010), fundações rasas são aquelas em que a carga é transmitida ao terreno por meio das tensões distribuídas sob a base da fundação, além disso, a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente deve ser inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. Já as fundações profundas, são aquelas que transmitem a carga ao solo ou pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou através da combinação das duas, devendo sua ponta estar assentada em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3,0 m.

### 2.2.2 FUNDAÇÕES RASAS

As fundações rasas são as que se apoiam logo abaixo da infraestrutura e se caracterizam pela transmissão da carga ao solo através das pressões distribuídas sob sua base. Neste grupo incluem-se os blocos de fundação e as sapatas (ALONSO, 2010, p. 1). Outros autores fazem uma definição um pouco mais abrangente, como é o caso de Bastos (2016), que subdivide o grupo das fundações superficiais em três tipos: bloco, sapata e radier.

#### **Blocos:**

De acordo com Silva (1998), os blocos são elementos de grande rigidez executados em concreto simples ou ciclópico, além disso, são dimensionados de maneira a fazer com que as tensões de tração neles produzidas sejam resistidas pelo concreto. Esses elementos de fundação apresentam normalmente em planta, seção quadrada ou retangular e podem ter suas faces verticais, inclinadas ou escalonadas, como pode ser observado na Figura 1.

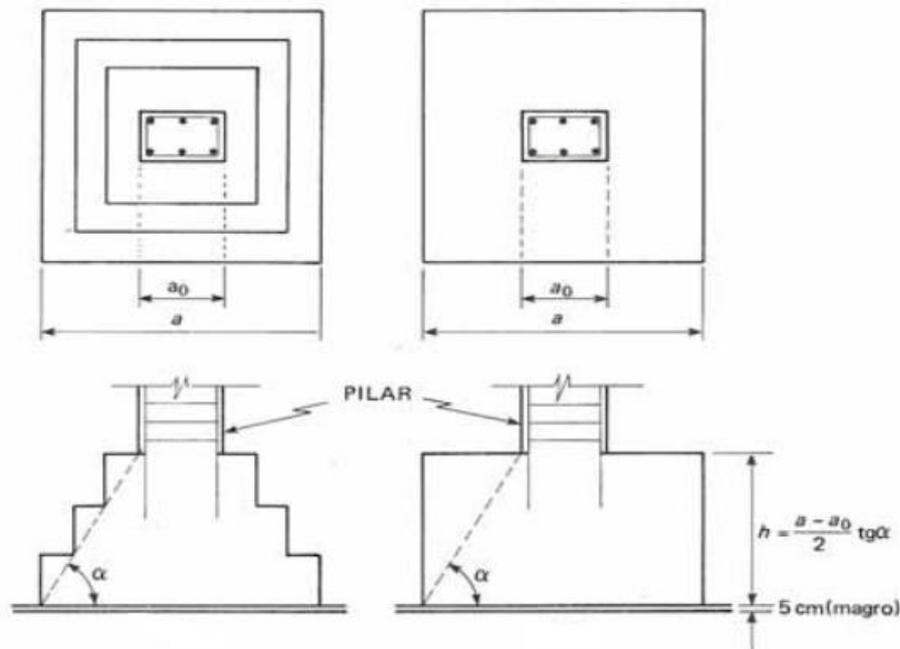
Velloso e Lopes (2011), esclarecem que, em geral, o dimensionamento de blocos é feito simplesmente adotando o valor do ângulo  $\alpha$  igual a  $60^\circ$ , ou levando-se em conta as pressões de contato no solo ( $\sigma_{adm}$ ) através da seguinte relação:

$$\frac{\tan \alpha}{\alpha} = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{adm,t}} + 1$$

Onde  $\sigma_{adm,t}$  é a tensão admissível à tração do concreto, geralmente tomada como:

$$\sigma_{adm,t} \approx \frac{\sigma_{adm,c}}{10}$$

**Figura 1 – Blocos de Fundação**



Fonte: ALONSO (1983).

### Sapatas:

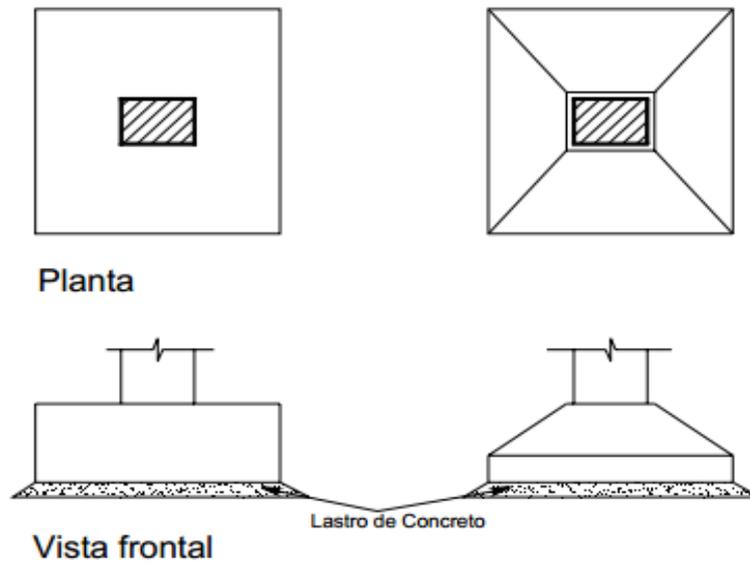
Ao contrário dos blocos, as sapatas não trabalham apenas à compressão simples, mas também à flexão, o que faz com que elas sejam executadas com a inserção de um material resistente à tração, neste caso o aço das armaduras (BRITO, 1987).

Devido à grande variabilidade possível da forma do elemento estrutural que se apoia na sapata, existem diversos tipos e configurações, sendo por isso as sapatas classificadas em isolada, corrida, associada, de divisa, com viga de equilíbrio, etc (BASTOS, 2016). Como as sapatas isoladas fazem parte do objetivo principal deste trabalho, elas serão estudadas separadamente e com maiores detalhes no item 2.3.

Brito (1987, *apud* MELHADO *et al.*, 2002) classifica o grupo das sapatas da seguinte maneira:

- “*Sapatas Isoladas*”: São aquelas que transmitem a carga de uma coluna, ou um conjunto de colunas, para o solo por meio de sua base (Figura 2);

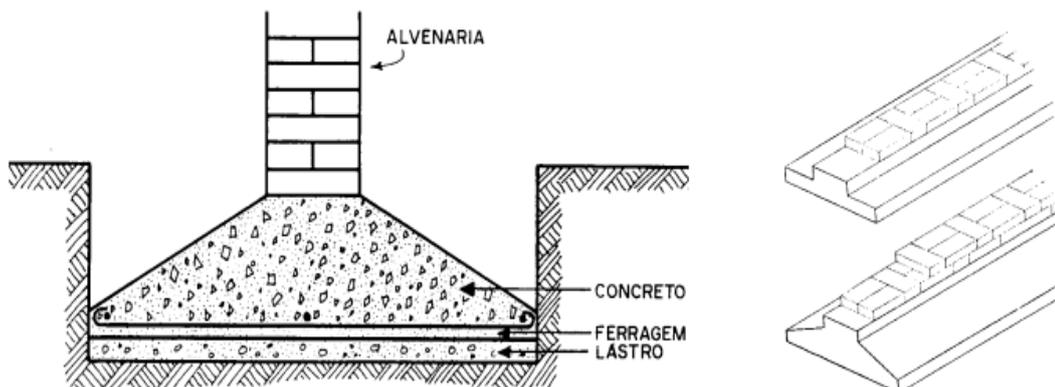
**Figura 2** – Ilustração de sapatas isoladas



Fonte: ALVA (2007).

- “*Sapatas Corridas*”: São elementos contínuos que acompanham o alinhamento de paredes, que lhes transmitem a carga por metro linear (Figura 3);

**Figura 3** – Ilustração de uma sapata corrida

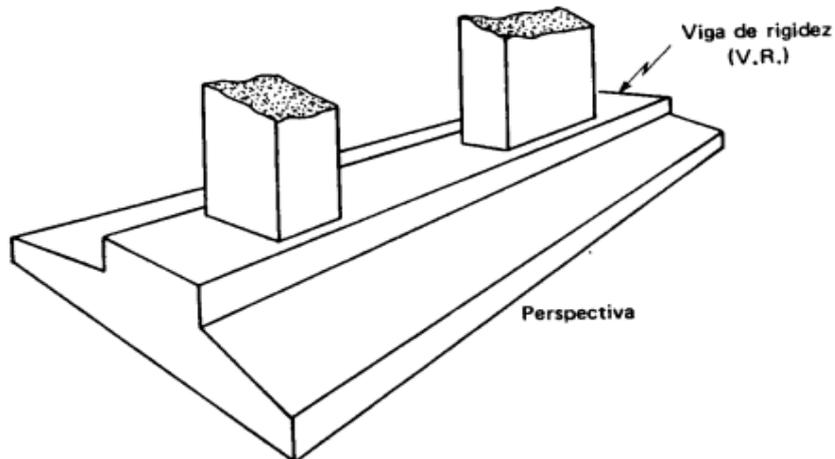


Fonte: BARROS (1996).

- “*Sapatas Associadas*”: Em casos onde a proximidade entre dois ou mais pilares seja tal que as sapatas isoladas se superponham, deve-se executar uma sapata associada (Figura

4). Os dois pilares são unidos por um elemento denominado *viga de rigidez*, que tem a função de permitir que a sapata trabalhe com tensão constante;

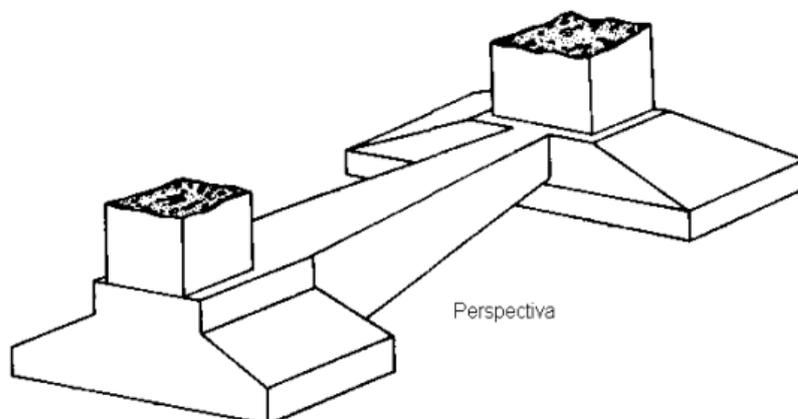
**Figura 4** – Ilustração de uma sapata associada



Fonte: BARROS (1996).

- “*Sapatas Alavancadas*”: No caso de sapatas de pilares de divisa ou próximos a obstáculos onde não seja possível fazer com que o centro de gravidade da sapata coincida com o centro de carga do pilar, cria-se uma viga alavanca ligada entre duas sapatas, de modo que um pilar absorva o momento resultante da excentricidade da posição do outro (Figura 5);

**Figura 5** – Ilustração de uma sapata alavancada



Fonte: BARROS (1996).

## **Radiers:**

Segundo Constancio (2004), o radier é um tipo de fundação associada, rígida ou flexível, em que todos os pilares da superestrutura se apoiam nessa única fundação, encarregada de transferir os esforços para o solo de apoio. De acordo com Barros (2011), por consumir um volume de concreto relativamente alto, o uso desse tipo de fundação é mais viável em obras com grande concentração de cargas, a autora alega, ainda, que o consumo de concreto pode ser diminuído com o emprego de protensão. A Figura 6 ilustra a execução de radier em um canteiro de obras.

**Figura 6** – Fotos ilustrativas de um radier



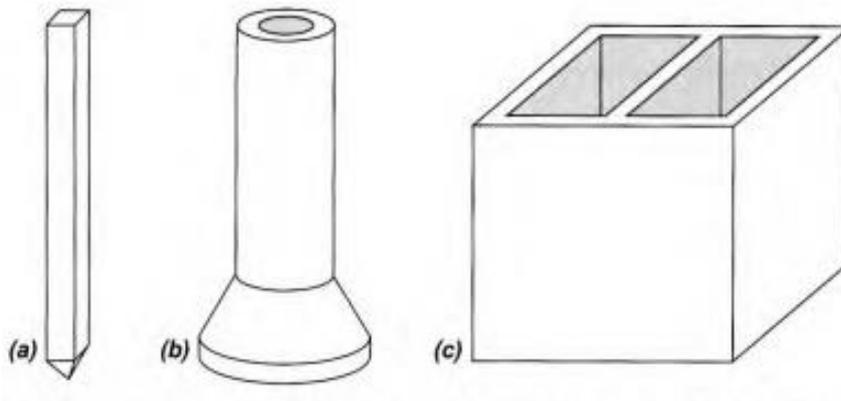
Fonte: BARROS (2011).

### **2.2.3 FUNDAÇÕES PROFUNDAS**

As fundações profundas são aquelas que possuem comprimento preponderante sobre a seção e, podem ser divididas em dois grupos: o das estacas e o dos tubulões (AZEREDO, 1977). A ABNT NBR 6122 (2010) menciona um terceiro tipo de fundação indireta, os caixões (Figura 7c), e explica sobre a subdivisão do grupo das fundações profundas, que as estacas (Figura 7a) se distinguem dos tubulões (Figura 7b) e caixões apenas pelo modo de execução, que se dá por

meio de ferramentas e equipamentos que não exigem a descida de um operário em seu interior. Já os tubulões e os caixões se distinguem um do outro pela geometria: o primeiro é cilíndrico e o último, prismático.

**Figura 7** – Fundações profundas



Fonte: VELLOSO; LOPES (2010).

### **Estacas:**

Segundo Velloso e Lopes (2010), as estacas podem ser classificadas por meio de diferentes critérios, um deles é de acordo com o material empregado em sua estrutura, que pode ser madeira, concreto, aço ou mistas. Outro critério seria classificá-las de acordo com o processo executivo, separando-as segundo o efeito que provocam no solo (ou tipo de deslocamento) ao serem executadas, sendo assim, classificadas em:

- “*De deslocamento*”: são as estacas cravadas em geral, pois o solo no espaço que a estaca vai ocupar é deslocado na horizontal;
- “*De substituição*”: são as estacas escavadas em geral, pois o solo no espaço onde a estaca será alocada é removido;
- “*Sem deslocamento*”: terminologia empregada quando se utiliza estacas escavadas, mas no processo de escavação não há praticamente remoção de solo, ou toma-se medidas para restabelecer as tensões geostáticas no solo (ao menos parcialmente) durante a concretagem.

Dentro das classificações acima mencionadas, os principais tipos de estaca executados no país são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1** – Principais tipos de estaca na classificação segundo o efeito provocado no solo

<b>Tipo de execução</b>	<b>Estacas</b>
De deslocamento	Grande
	Pequeno
Sem deslocamento	
De substituição	

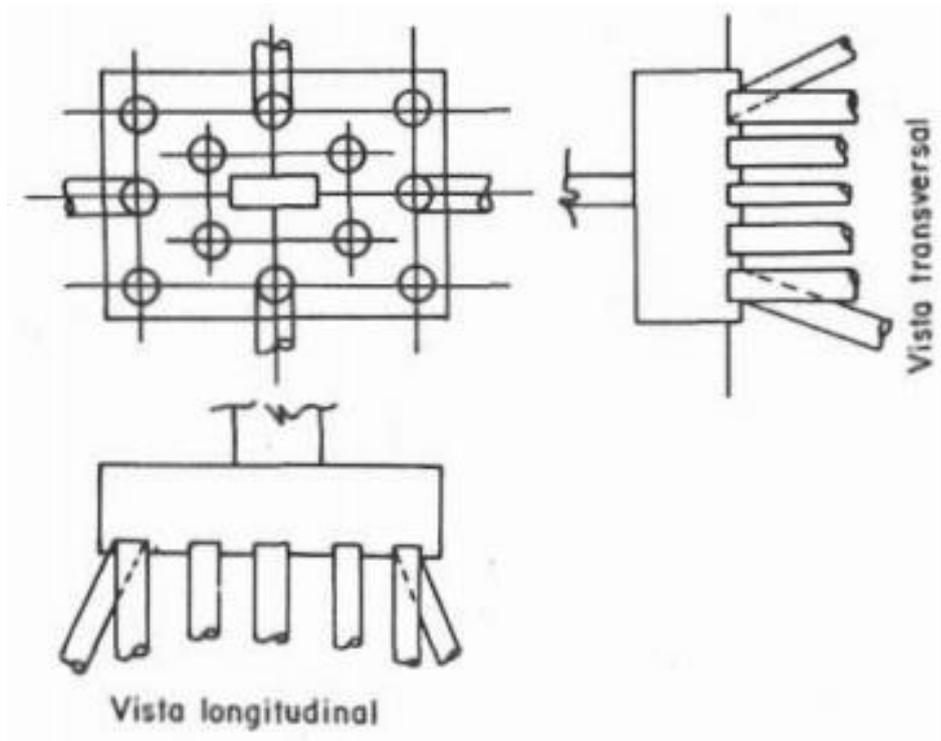
Fonte: VELLOSO; LOPES (2010), adaptado pelo Autor.

Segundo Barros (2011), no geral, as estacas tanto moldadas em loco quanto pré-moldadas podem ser classificadas como:

- “*Estacas de atrito*”: são todas aquelas que não chegam a penetrar em uma camada mais firme do solo, transmitindo as cargas a ele por meio do atrito lateral;
- “*Estacas de suporte*”: são aquelas que se apoiam em uma camada resistente de solo, transferindo as cargas a ele por meio desse contato.

Para se distribuir as cargas provenientes da estrutura às estacas, há a necessidade de se criar um bloco de coroamento. Ao conjunto de estacas assim solidarizadas por esse bloco denomina-se *estaqueamento*, podendo o mesmo ser constituído por estacas verticais, inclinadas ou por ambas, como pode ser visto na Figura 8 (ALONSO, 1989).

**Figura 8** – Demonstração de um estaqueamento



Fonte: ALONSO (1989).

### **Tubulões:**

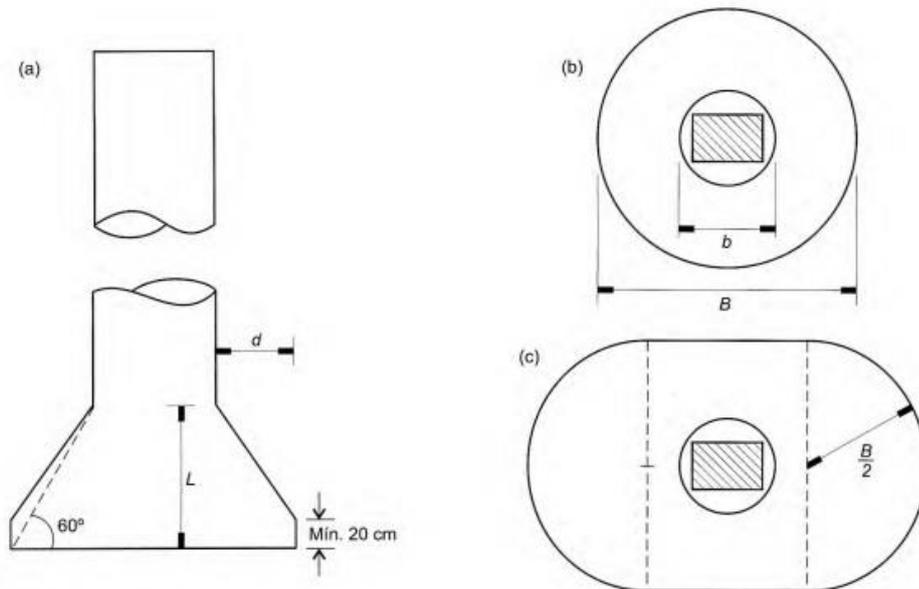
Os tubulões são elementos estruturais de fundação que transferem as cargas ao solo resistente por compressão, via escavação de um fuste cilíndrico e uma base alargada tronco-cônica a uma profundidade igual ou maior do que três vezes o seu diâmetro (BRITO, 1987). Esses elementos de fundação têm sempre o fuste cilíndrico, porém a base pode ser alargada ou não, o que determina se o tubulão terá uma base circular ou elíptica. A Figura 9 ilustra esses dois tipos de base.

Segundo Brito (1987, *apud* BARROS, 1996), de acordo com os métodos aplicados em sua escavação, os tubulões podem ser classificados em:

- “*Tubulões a céu aberto*”: Consiste em um poço aberto manualmente ou mecanicamente em solos coesivos e acima do nível d’água, de modo que não haja desmoronamento durante a escavação. Havendo tendência de desmoronamento das paredes, deve-se revestir o furo com um tubo de concreto ou de aço, ou com alvenaria de tijolo;

- “*Tubulão a ar comprimido*”: É utilizado quando existe água, perigo de desmoronamento das paredes e ou exige-se grandes profundidades. A injeção de ar comprimido no interior dos tubulões impede a entrada de água, mas a pressão máxima empregada é de 3 atm, o que limita a profundidade em 30 m abaixo do nível d’água.

**Figura 9** – Tubulões: (a) em perfil, sem e com alargamento da base e formas de base usuais: (b) circular e (c) “falsa elipse”



Fonte: VELLOSO; LOPES (2010).

## 2.3 DIMENSIONAMENTO DE SAPATAS ISOLADAS

### 2.3.1 CÁLCULO GEOTÉCNICO

A ABNT NBR 6122 (2010) estabelece para o projeto de fundações diretas como grandeza fundamental a tensão admissível, quando se utiliza a filosofia que aplica o fator de segurança global, ou a tensão resistente de projeto, quando se emprega a filosofia dos fatores de segurança parciais. Neste trabalho, será aplicado o conceito das tensões admissíveis.

De acordo com Cintra, Aoki e Albiero (2011), a superfície potencial de ruptura se desenvolve toda no interior do bulbo de tensões e, portanto, para adotar os parâmetros característicos do maciço de solo situado sob a base da fundação, deve-se considerar apenas a espessura atingida por ele. Para efeitos práticos em sapatas, pode-se considerar:

- Sapata circular ou quadrada ( $L = B$ ):  $z = 2B$ ;
- Sapata retangular ( $L = 2$  a  $4B$ ):  $z = 4B$ ;
- Sapata corrida ( $L \geq 5B$ ):  $z = 4B$ .

Para a verificação dos Estados Limites de Serviço (ELS), a ABNT NBR 6122 (2010) preconiza que a tensão admissível é o valor máximo da tensão aplicada ao terreno que atenda às limitações de recalque ou deformação da estrutura. Quanto a verificação dos Estados Limites Últimos (ELU), ela prescreve para a determinação da tensão admissível em fundações por sapatas, a utilização de um ou mais procedimentos dentre os seguintes:

- *Métodos teóricos*: podem ser empregados métodos analíticos nos domínios de validade de sua aplicação, que contemplam todas as particularidades do projeto, inclusive a natureza do carregamento (drenado ou não drenado);
- *Métodos semiempíricos*: relacionam resultados de ensaios, tais como o SPT e o CPT, com tensões admissíveis;
- *Prova de carga em placa*: ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR 6489 (1984), cujos resultados devem ser interpretados de forma a considerar as camadas influenciadas de solo, bem como a relação modelo-protótipo.

Neste trabalho será utilizado para o cálculo da tensão admissível, o método semiempírico de Teixeira (1996), o qual será exposto mais adiante.

### 2.3.2 DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO

Segundo Alva (2007), embora dependam, também, de outros fatores como a interferência com as fundações mais próximas, as dimensões em planta das sapatas são definidas basicamente em função da tensão admissível do solo. Como na grande maioria dos casos as sapatas estão submetidas a cargas excêntricas, especialmente em virtude das ações do vento, as dimensões em planta devem ser tais que as tensões de compressão máximas no solo (calculadas com as expressões da flexão composta reta ou oblíqua) não superem a tensão admissível do mesmo.

Considerando-se uma sapata de lados A e B, Alonso (2010) alega que a escolha desse par de valores deve ser feita de modo que:

- O centro de gravidade da sapata deve coincidir com o centro de carga do pilar;
- A sapata não deverá ter nenhuma dimensão menor que 60 cm;
- A relação entre os lados A e B deverá, sempre que possível, ser menor ou, no máximo, igual a 2,5;
- Os valores de A e B devem ser escolhidos, sempre que possível, de modo que os balanços da sapata, em relação às faces do pilar sejam iguais nas duas direções.

### 2.3.3 ANÁLISE DE RECALQUES

Os recalques de uma sapata são definidos como o deslocamento vertical para baixo, de sua base, em relação a uma referência fixa. Eles resultam, basicamente, das deformações por redução de volume e/ou mudança de forma que ocorrem no maciço de solo sob a ação das cargas atuantes (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011). Os recalques são classificados em:

- *Recalque total ou absoluto ( $\rho$ )*: deslocamento total e individual da fundação;
- *Recalque diferencial ou relativo ( $\delta$ )*: diferença entre os recalques totais de dois elementos de fundação circunvizinhos;
- *Distorção angular ou recalque diferencial específico ( $\delta/l$ )*: calculado como a razão entre o recalque diferencial entre dois elementos de fundação e a distância ( $l$ ) entre eles.

A previsão dos recalques é uma das tarefas mais difíceis da Geotecnia, pois por mais sofisticados que possam ser os modelos de previsão, estes somente poderão ser encarados como estimativa (VELLOSO; LOPES, 2011).

De acordo com Teixeira (1996), se uma estrutura sofresse recalques totais igualmente ao longo de toda a sua extensão, essa estrutura não sofreria nenhum tipo de dano, mesmo para valores elevados de recalque. No entanto, como a ocorrência de recalques totais uniformes é considerada desprezível, torna-se necessário limitá-lo em uma fundação. Além disso, limitando-se o recalque total, limita-se também os recalques diferenciais.

Burland *et al.* (1977, *apud* CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2011) consideram aceitáveis como valores limites para estruturas usuais de aço ou concreto, em casos rotineiros, os seguintes

valores de recalques totais limites e de recalques diferenciais, recomendados por Skempton-MacDonald:

- *Para areias:*
  - Recalque diferencial máximo ( $\delta_{\text{máx}}$ ) = 25 mm;
  - Recalque total máximo ( $\rho_{\text{máx}}$ ) = 40 mm para sapatas isoladas;
  - Recalque total máximo ( $\rho_{\text{máx}}$ ) = 40 a 65 mm para radiers.
- *Para argilas:*
  - Recalque diferencial máximo ( $\delta_{\text{máx}}$ ) = 40 mm;
  - Recalque total máximo ( $\rho_{\text{máx}}$ ) = 65 mm para sapatas isoladas;
  - Recalque total máximo ( $\rho_{\text{máx}}$ ) = 65 a 100 mm para radiers.

De acordo com Skempton-MacDonald (*apud* TEIXEIRA; GODOY, 1996), os danos causados por movimentos de fundações são agrupados em três categorias principais:

- *Danos arquitetônicos:* são visíveis ao observador comum e causam algum tipo de desconforto, como por exemplo o desaprumo de um edifício;
- *Danos à funcionalidade:* o desaprumo de um edifício pode ocasionar problemas de desgaste excessivo de elevadores e inverter declividades de pisos e tubulações;
- *Danos estruturais:* ocorrem na estrutura propriamente dita e podem comprometer sua estabilidade.

O recalque absoluto ( $\rho$ ), que dá origem ao recalque diferencial e aos movimentos do edifício, pode ser dividido em duas partes:

$$\rho = \rho_i + \rho_c$$

Onde  $\rho_c$  é o recalque por adensamento e  $\rho_i$  é o recalque imediato, que é a parte que será estudada no decorrer deste trabalho.

Existem dezenas de métodos para determinação de recalques imediatos, dentre os quais se encontram métodos teóricos, semi-empíricos e de prova de carga em placa. Neste trabalho serão

aplicados dois métodos semiempíricos, o de Décourt (1992) e o de Barata (1984, 1986), os quais serão apresentados mais adiante.

#### **2.3.4 CÁLCULO ESTRUTURAL**

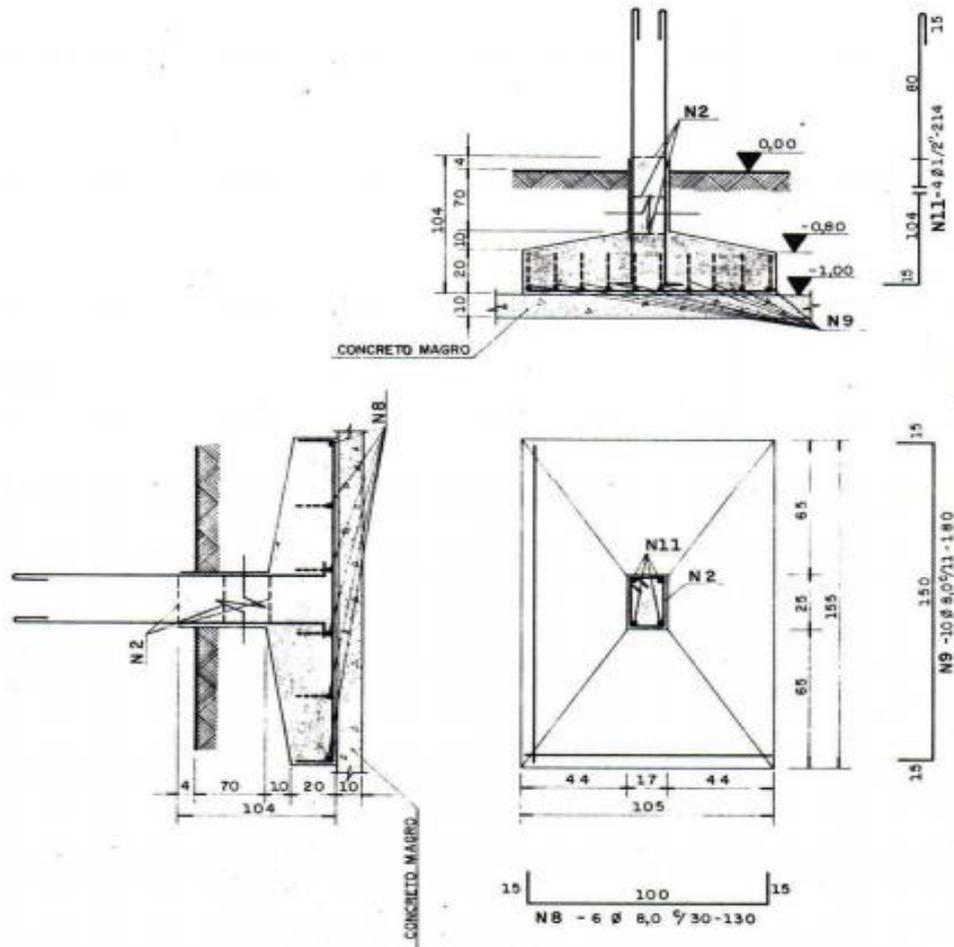
As sapatas são elementos de fundação superficial de concreto armado, dimensionadas de tal forma que as tensões de tração nelas produzidas não sejam resistidas pelo concreto, mas sim pelas armaduras empregadas (SILVA, 1998).

De acordo com Marangon (2012), o cálculo estrutural das sapatas para pilares isolados deve ser feito de maneira a atender às normas estruturais brasileiras e podem ser calculadas como placas, seja pelo método de linhas de ruptura, por método baseado na teoria da elasticidade ou pelo método das bielas. Em qualquer caso deve-se considerar que:

- Quando calculadas como placas, não se pode deixar de considerar o puncionamento;
- Para efeito de cálculo estrutural, as pressões na base das fundações podem ser admitidas como uniformemente distribuídas, exceto nos casos das fundações apoiadas sobre rocha;
- Quando a sapata for submetida a cargas excêntricas, pode-se, na falta de um processo mais rigoroso, uniformizar a pressão, adotando-se a maior dos seguintes valores: dois terços do valor máximo ou a média dos valores extremos;

Após o término do dimensionamento estrutural da fundação, é necessário que se faça o detalhamento das armaduras, conforme pode ser visto na Figura 10.

**Figura 10** – Detalhamento das armaduras de uma sapata isolada



Fonte: MARANGON (2012).

## 2.4 O USO DE *SOFTWARES* NA ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES

De acordo com Chaves e Junior (2015), a dependência tecnológica da Engenharia para o avanço de seus estudos e o desenvolvimento de seus problemas mais frequentes, tem acarretado o aumento da utilização de *softwares*. Além disso, os mesmos vêm se tornando instrumentos cruciais para a maioria das grandes e pequenas empresas existentes atualmente, isso, pelo fato de serem capazes de solucionar problemas de soluções complexas e que necessitam de uma alta precisão para diminuir a incidência de erros, também pela praticidade e agilidade que eles conferem aos serviços cotidianos.

Mais conhecido como “programa de computador” o *software* é um conjunto informações lógicas que, aliado ao computador, é o mecanismo capaz de realizar, através de bancos de dados

e estrutura operacional já determinada, diversas funções pré-programadas (MATOS, 2009, p. 18).

Medeiros (2006), alega que o estudo da interação solo-estrutura em fundações é um assunto que necessita de estudos mais aprofundados, pois as soluções empíricas, semi-empíricas e até mesmo as analíticas disponíveis na literatura têm suas aplicabilidades muito limitadas. Por outro lado, os modelos computacionais têm a característica intrínseca de abrirem o leque de possibilidades de análise, segundo as mais diversas situações, e da forma mais abrangente possível.

Há muito tempo a hipótese de apoios rígidos vem sendo utilizadas nas condições de vinculação de edifícios em concreto armado pelos engenheiros de estruturas. Isso se deve, principalmente, à grande dificuldade que se tinha no passado em analisar analiticamente edifícios sobre apoios flexíveis. No entanto, a chegada dos microcomputadores e, conseqüentemente, o desenvolvimento de diversos *softwares* possibilitou usufruir de análises mais realistas, que levam em consideração a deformabilidade do solo adjacente à fundação (SOUZA; REIS, 2008).

## **2.5 O SOFTWARE MATHCAD**

O *software* Mathcad é um ambiente de trabalho baseado em Álgebra Computacional, dirigido a profissionais técnicos, educadores e estudantes. Permite a escrita de expressões matemáticas com o uso também de textos, gráficos e animação. Sua interface é semelhante à de um processador de textos do tipo “WYSIWYG”, ou seja, “*What you see is what you get* (o que você vê é o que você faz) ”.

O Mathcad possibilita a avaliação numérica e simbólica de expressões matemáticas, a construção de gráficos, a construção de algoritmos para a realização de tarefas matemáticas, a avaliação de integrais e derivadas de funções, a resolução de sistemas lineares, além de outras tarefas (FERREIRA *et al.*, 2006).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 MATERIAIS UTILIZADOS**

Para a aplicação da metodologia que será exposta no item 3.2 deste trabalho, serão utilizados os seguintes recursos:

- *Software* PTC Mathcad Prime 3.1;
- Notebook DELL Inspiron 14, cujas propriedades estão listadas abaixo:
  - Sistema:
    - Classificação: 4,6 Índice de Experiência do Windows;
    - Processador: Intel® Core™ i3 CPU M380 @ 2.53GHz 2.53 GHz;
    - Memória instalada (RAM): 8,00 GB (utilizável: 7,80 GB);
    - Tipo de sistema: Sistema Operacional de 64 bits;
    - Caneta e Toque: Nenhuma entrada à caneta ou toque.
  - Windows Edition:
    - Windows 7 Ultimate;
    - Copyright © 2009 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados;
    - Service Pack 1.

#### **3.2 METODOLOGIA APLICADA**

##### **3.2.1 INTRODUÇÃO**

Neste item será apresentada a toda a metodologia utilizada na produção do algoritmo (rotina de cálculo) para o dimensionamento de sapatas retangulares, rígidas e isoladas que foi implementado no *software* Mathcad.

##### **3.2.2 CÁLCULO GEOTÉCNICO**

A parte de dimensionamento geotécnico do presente trabalho, consiste na elaboração de uma rotina de cálculo para se encontrar a tensão admissível do solo ( $\sigma_{adm}$ ), assim como o recalque

imediate ( $\rho_i$ ) a que a fundação estará submetida. Sabendo-se que para se fazer a estimativa do recalque é necessário conhecer as dimensões da sapata, esse assunto será tratado mais adiante, mais precisamente após o dimensionamento geométrico.

A metodologia a ser aplicada para o cálculo da tensão admissível, conforme exposto no final do item 2.3.1, será o método semiempírico de Teixeira (1996). Os métodos semi-empíricos determinam o valor da tensão admissível de fundações diretas por meio de correlações com valores do índice de resistência à penetração médio ( $N_{SPT}$ ) do SPT. Para a condição particular de sapatas retangulares apoiadas na superfície de terrenos argilosos, o autor supracitado demonstrou a seguinte equação:

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{SPT}}{50} + q \quad (MPa)$$

Em que  $N_{SPT}$  é o valor médio no bulbo de tensões e deve estar entre os limites  $5 \leq N_{SPT} \leq 20$ , e a parcela correspondente à sobrecarga “ $q$ ” pode ou não ser considerada. Para areias, ele desenvolveu a seguinte formulação:

$$\sigma_{adm} = 0,05 + (1 + 0,4B) \frac{N_{SPT}}{100} \quad (MPa)$$

Onde B é o menor lado da sapata.

Para se calcular o valor do  $N_{SPT}$  é necessário que se faça uma estimativa da profundidade a que o bulbo de tensões abaixo da sapata estará sujeito. Estudos mostram que este bulbo se encontra a uma profundidade de, aproximadamente, 2B (sapatas quadradas) e 3B (sapatas retangulares), sendo B o menor lado da sapata, como já foi visto. Dessa forma, será utilizada a tabela 4 (já extinta em normas mais recentes) da ABNT NBR 6122 (1996) para se adotar um valor de pressão básica ( $\sigma_0$ ), para que possamos fazer um cálculo aproximado do menor lado da sapata e, assim, da profundidade atingida pelo bulbo de tensões.

A tabela mencionada acima pode ser vista na Figura 11.

**Figura 11** – Tabela utilizada para estimar a tensão admissível do solo

Classe	Descrição	Valores (MPa)
1	Rocha sã, maciça, sem laminação ou sinal de decomposição	3,0
2	Rochas laminadas, com pequenas fissuras, estratificadas	1,5
3	Rochas alteradas ou em decomposição	ver nota c)
4	Solos granulares concrecionados - conglomerados	1,0
5	Solos pedregulhosos compactos a muito compactos	0,6
6	Solos pedregulhosos fofos	0,3
7	Areias muito compactas	0,5
8	Areias compactas	0,4
9	Areias medianamente compactas	0,2
10	Argilas duras	0,3
11	Argilas rijas	0,2
12	Argilas médias	0,1
13	Siltes duros (muito compactos)	0,3
14	Siltes rijos (compactos)	0,2
15	Siltes médios (medianamente compactos)	0,1

Fonte: ABNT NBR 6122 (1996).

### 3.2.3 DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO

De acordo com Alonso (2010), é comum desprezar-se o valor do peso próprio das sapatas, pois na grande maioria dos casos, esse valor é pouco significativo, e sua não utilização está dentro das imprecisões da estimativa do valor de  $\sigma_{adm}$ . Dessa forma, com o valor da tensão admissível e da carga do pilar ( $P$ ) é possível determinar a área da sapata ( $S$ ) através da seguinte relação:

$$S = \frac{P}{\sigma_{adm}}$$

Com isso, determina-se as dimensões da sapata através das seguintes equações:

$$B = \frac{(b - a)}{2} + \sqrt{(S + 0,25(b - a)^2)}$$

$$A = \frac{S}{B}$$

Onde A e B, a e b são o comprimento e a largura da sapata e do pilar, respectivamente.

### 3.2.4 ANÁLISE DE RECALQUES

Os métodos para cálculo do recalque em solos argilosos requerem uma avaliação mais complexa do que em solos arenosos, como por exemplo, a análise do adensamento em camadas compressíveis. Quanto a utilização desses métodos em solos argilosos, verificou-se que na prática eles são utilizados, uma vez que, os solos são, quase que na totalidade, heterogêneos, formados por areia e argila (CHAVES; JUNIOR, 2015).

Conforme já foi introduzido no item 2.3.3 deste trabalho, serão utilizados para a estimativa dos recalques imediatos os métodos semiempíricos de Décourt (1992) e de Barata (1984, 1986),

- *Método de Décourt (1992):*

$$\rho = 27 \cdot \sigma_{adm} \cdot \frac{B^{0,7}}{N_{SPT}}$$

Onde:

- $\rho$  = Recalque imediato da sapata em centímetros;
  - $\sigma_{adm}$  = Tensão admissível do sistema sapata-solo em MPa;
  - B = Largura da sapata em metros.
- *Método da Barata (1984, 1986):*

$$\rho = \sigma_{adm} \cdot B \cdot \frac{(1 - \nu^2)}{E_s} \cdot c_{\Delta} \cdot \lambda$$

Onde:

- $\nu$ : coeficiente de Poisson;
- $E_s$ : módulo de deformabilidade do solo;
- $c_{\Delta}$ : coeficiente dependente da forma e rigidez da sapata;

- $\lambda$ : coeficiente de profundidade.

Os valores de  $\nu$  e de  $E_s$  a serem utilizados para o cálculo do recalque pelo método de Barata (1984, 1986) podem ser obtidos através de ensaios triaxiais ou, conhecendo-se o tipo de solo em que a fundação será aplicada, pode-se estima-los utilizando-se as Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente.

**Tabela 2 - Estimativa do coeficiente de Poisson**

<b>Tipo de Solo</b>		<b>Coefficiente de Poisson</b>
<b>Argila</b>	Saturada	0,4 a 0,5
	Não saturada	0,1 a 0,3
	Arenosa	0,2 a 0,3
<b>Silte</b>		0,3 a 0,35
<b>Areia</b>	Compacta	0,2 a 0,4
	Grossa (e = 0,4 a 0,7)	0,15
	Fina (e = 0,4 a 0,7)	0,25
<b>Rocha</b>	Depende do tipo	0,1 a 0,4

Fonte: MARANGON (2011), adaptado pelo autor.

**Tabela 3 - Estimativa do módulo de deformabilidade do solo**

<b>Tipo de Solo</b>		<b>Es (kPa)</b>
<b>Argila</b>	Muito mole	300 a 3000
	Mole	2000 a 4000
	Média	4000 a 9000
	Dura	7000 a 18000
	Arenosa	30000 a 42000
<b>Areia</b>	Siltosa	7000 a 20000
	Fofa	10000 a 25000
	Compacta	50000 a 85000
	(pedregulho + areia compacta)	98000 a 200000

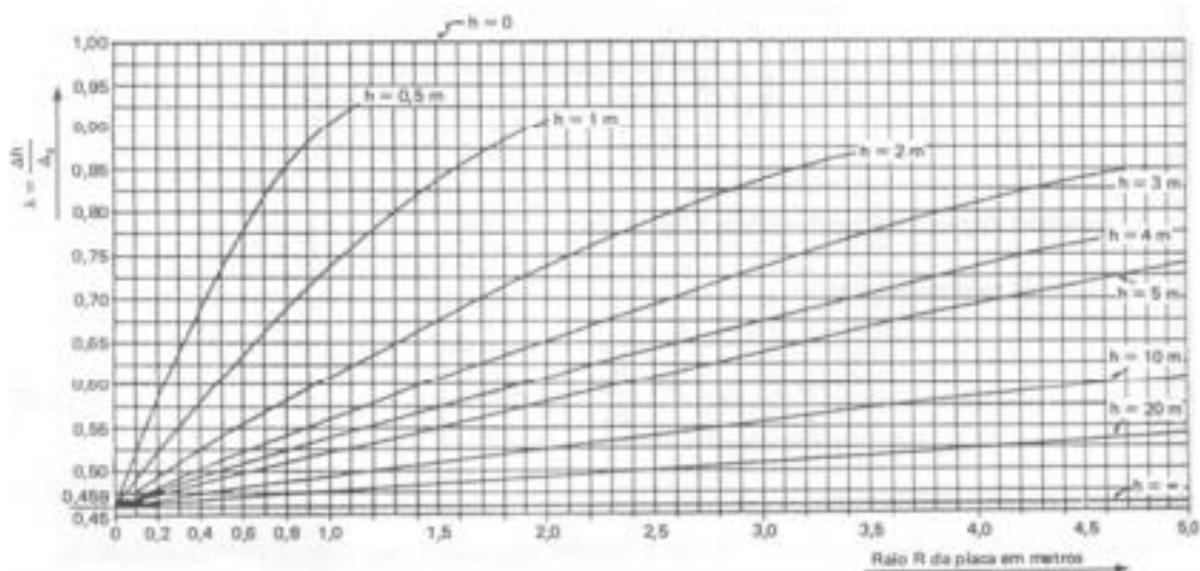
Fonte: MARANGON (2011), adaptado pelo autor.

Para a obtenção de  $\lambda$  será utilizado o ábaco da Figura 12, para isso deve-se entrar com o valor da profundidade de assentamento da sapata ( $h$ ). Este ábaco foi construído para análises de placas circulares, neste caso, será feita uma equivalência entre a área da fundação e a área de uma placa circular a fim de encontrar-se um raio equivalente ( $R$ ) para a sapata.

$$R = \sqrt{A \cdot B / \pi}$$

O valor de  $c_{\Delta}$  pode ser obtido da Tabela 4 de acordo com o tipo de sapata utilizada.

**Figura 12** - Integração das expressões de Mindlin para a obtenção do coeficiente de profundidade



Fonte: RODARTE (2007).

**Tabela 4** - Coeficientes dependentes da rigidez e da forma da placa

Características da placa carregada			Valor teórico de $c_{\Delta}$	Valor médio de $c_{\Delta}$
Forma	Tipo de carga	Localização do recalque		
Circular	carga uniforme	centro	1	0,85
	carga uniforme	periferia	0,636	
	placa rígida	área inteira	0,785	
Quadrada	carga uniforme	centro	1,12	0,95
	carga uniforme	meio do lado	0,78	
	carga uniforme	vértice	0,56	
	placa rígida	área inteira	0,85	

Fonte: RODARTE (2007), adaptado pelo autor.

### 3.2.5 CÁLCULO ESTRUTURAL

A ABNT NBR 6122 (2010) estabelece que o dimensionamento estrutural da fundação deve ser realizado de maneira a atender aos Estados Limites Últimos e aos Estados Limites de Serviço, assim como às exigências da ABNT NBR 6118 (2014).

Neste item será descrita toda a metodologia utilizada para a implementação do algoritmo para o cálculo estrutural. Todas as fórmulas e equações que serão apresentadas aqui, se referem ao maior lado da sapata (quando ela não for quadrada), porém, analogamente, utiliza-se as mesmas equações e fórmulas para o dimensionamento da outra dimensão da fundação. Além disso, será considerado carregamento centrado, logo, serão desconsideradas as ações dos momentos sobre a sapata.

### **Cobrimento Nominal ( $c_{nom}$ ):**

Toda fundação superficial deve ser executada sobre uma camada de lastro de no mínimo 5 cm de espessura. De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014), o cobrimento nominal das armaduras deve ser verificado conforme item 7.4.7 da NBR 6118, que apresenta:

- $c_{nom} = 30$  mm, para classe I e II de agressividade;
- $c_{nom} = 40$  mm, para classe III de agressividade;
- $c_{nom} = 50$  mm, para classe IV de agressividade.

### **Parâmetros para definição da altura da sapata ( $h$ ):**

Essencialmente são três os condicionantes que definem a altura da sapata:

- *Rigidez da sapata*: a menos que uma baixa resistência do solo torne mais indicado o uso de uma sapata flexível, as sapatas são projetadas como rígidas e, nesse caso devem atender à inequação:

$$h \geq \frac{(A - a)}{3}$$

- *Comprimento de ancoragem necessário às barras longitudinais do pilar*: é necessário que a sapata tenha altura suficiente para que as forças nas armaduras do pilar sejam transferidas ao concreto da fundação, incluindo um cobrimento mínimo para a proteção das armaduras, logo:

$$h \geq l_b + c$$

Onde  $l_b$  é o comprimento de ancoragem e  $c$  é o cobrimento das armaduras;

- *Verificação do cisalhamento por força cortante:* é usual e desejável evitar a colocação de armadura transversal para força cortante em sapatas.

### **Cálculo da altura da sapata ( $h$ ):**

A altura da sapata deve ser tal que possibilite a ancoragem do pilar, além disso, será obtida de forma a garantir que a fundação seja considerada rígida.

- *Cálculo da tensão resistente de cálculo ( $f_{ctd}$ ):*

$$f_{ctd} = \frac{0,7 \cdot 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}}{\gamma_c}$$

Sendo:

- $f_{ck}$  = resistência característica à compressão do concreto;
- $\gamma_c$  = coeficiente de ponderação da resistência do concreto;
- *Cálculo da resistência de aderência de cálculo das armaduras ( $f_{bd}$ ):*

$$f_{bd} = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot f_{ctd}$$

Onde:

- $n_1 = 1,0$  para barras lisas;
- $n_1 = 1,4$  para barras entalhadas;
- $n_1 = 2,25$  para barras nervuradas;
- $n_2 = 1,0$  para situações de boa aderência;
- $n_2 = 0,7$  para situações de má aderência;
- $n_3 = 1,0$  para  $\varnothing < 32mm$ ;
- $n_3 = (132 - \varnothing)/100$ , para  $\varnothing \geq 32mm$ .

Em que  $\varnothing$  é o diâmetro das armaduras do elemento de fundação.

- *Comprimento de ancoragem básico ( $l_b$ ):*

$$l_b = \frac{\Phi_{pilar} \cdot f_{yd}}{4 \cdot f_{bd}}$$

Sendo:

- $f_{yd}$  = resistência de cálculo ao escoamento do aço de armadura passiva;
  - $\Phi_{pilar}$  = diâmetro das armaduras do pilar.
- *Comprimento de ancoragem necessário ( $l_{b,nec}$ ):*

$$l_{b,nec} = \alpha \cdot l_b \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}}$$

Em que:

- $A_{s,calc}$  = área de armadura calculada para o pilar;
- $A_{s,ef}$  = área de armadura efetiva do pilar.

E  $\alpha$  deve ser adotado de acordo com os valores abaixo:

- $\alpha$  é 1,0 para barras sem gancho;
  - $\alpha$  é 0,7 para barras tracionadas com gancho, com cobrimento no plano normal ao do gancho maior ou igual a  $3 \Phi$ ;
  - $\alpha$  0,7 quando houver barras transversais soldadas conforme 9.4.2.2 da NBR 6118/2014;
  - $\alpha$  0,5 quando houver barras transversais soldadas conforme 9.4.2.2 da NBR 6118/2014 e gancho, com cobrimento no plano normal ao do gancho maior ou igual a  $3 \Phi$ ;
- *Comprimento de ancoragem mínimo ( $l_{b,mín}$ ):*

O comprimento de ancoragem mínimo será o menor valor dentre os três conforme abaixo:

$$l_{b,min} \leq \begin{cases} 0,3 \cdot l_b \\ 10 \cdot \Phi_{pilar} \\ 100 \text{ mm} \end{cases}$$

### **Altura da base da sapata:**

O valor prático comumente adotado é o maior dentre  $h/3$  e 20 cm.

### **Tração nas armaduras:**

- *Cálculo da altura útil ( $d$ ):*

$$d = h - c_{nom}$$

- *Tração nas armaduras paralelas ao lado  $A$  da sapata:*

$$T_A = P \cdot \frac{(A - a)}{8 \cdot d}$$

Onde  $P$  é a carga de compressão transferida do pilar para a fundação.

### **Área de armadura calculada:**

- *Área necessária para as armaduras paralelas ao lado  $A$  da sapata:*

$$A_{SA} = \frac{(T_A \cdot \gamma_f)}{f_{yd}}$$

Em que  $\gamma_f$  é o coeficiente de ponderação das ações atuantes sobre a fundação.

### **Armaduras mínimas:**

- *Critério adotado:*

Apesar da norma fazer distinção entre armaduras positivas e negativas, e de lajes armadas em uma ou duas direções, pode-se admitir, para todos esses casos, uma taxa de armadura mínima igual a 0,15% (em relação a área bruta).

- *Área de armadura mínima paralela ao lado  $A$  da sapata:*

$$A_{SA,min} = 0,0015 \cdot B \cdot h$$

### **Armaduras máximas:**

- *Critério adotado:*

Item 17.3.5.3.2 da NBR 6118/2014.

- *Área de armadura máxima paralela ao lado A da sapata:*

$$A_{SA,m\acute{a}x} = 0,08. B. h$$

#### **Detalhamento das armaduras:**

- *Cálculo do número de barras a adotar:*

Nesta etapa define-se o diâmetro das barras a serem usadas para as armaduras longitudinais. Feito isso, calcula-se o número de barras necessárias para que a área de armadura seja atendida através da seguinte equação:

$$N_A = \frac{4. A_{SA}}{\pi. \phi_l^2}$$

Onde  $\phi_l$  é o diâmetro adotado para as armaduras da sapata.

- *Verificação da área efetiva de armadura:*

A área efetiva de armadura de flexão, tanto paralela à direção A quanto à B devem se encontrar dentro dos limites de armaduras máximas e mínimas. Adota-se um número inteiro de barras para as duas direções, e aplica-se a equação abaixo:

$$A_{SA,ef} = N_A. \pi. \frac{\phi_l^2}{4}$$

- *Verificação do cobrimento nominal:*

O cobrimento das armaduras deve atender às especificações do item 7.4.7 na NBR 6118/2014 que alega, para este caso, que o cobrimento nominal de uma determinada barra deve ser maior ou igual ao diâmetro dessa barra. Além disso, a dimensão máxima característica do agregado graúdo utilizado no concreto não pode superar em 20% a espessura nominal do cobrimento.

- *Cálculo e verificação do espaçamento entre barras:*

Na região das tensões de tração máximas, as barras da armadura principal de tração devem ser espaçadas no máximo igual a 2h ou 20cm, prevalecendo o menor dentre esses dois valores, ou seja:

$$S_{m\acute{a}x} \leq \begin{cases} 2 \cdot h \\ 20cm \end{cases}$$

Para o cáculo dos espaçamentos entre as armaduras para as direções de A e de B, utiliza-se a seguinte equação:

$$S_A = \frac{(A - 2 \cdot c_{nom} - \phi_l)}{N_A - 1}$$

### **Dimensionamento ao cisalhamento:**

- *Verificação da ruptura por compressão diagonal:*

Essa verificação deve ser realizada no contorno c, em lajes submetidas à punção, com ou sem armadura, e é feita do seguinte modo:

$$\tau_{Rd2} \geq \tau_{Sd}$$

Em que:

- $\tau_{Rd2}$  = tensão de cisalhamento resistente de cáculo limite para verificação da compressão diagonal do concreto na ligação sapata-pilar;
- $\tau_{Sd}$  = tensão de cisalhamento solicitante de cáculo.

Onde a tensão resistente  dada por:

$$\tau_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_v \cdot f_{cd}$$

Com:

- $f_{cd}$  = resistência de cáculo  compressão do concreto;
- $\alpha_v$  é dado pela expressão abaixo:

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

A tensão solicitante de cálculo é dada por:

$$\tau_{sd} = \frac{P}{u_0 \cdot d_u}$$

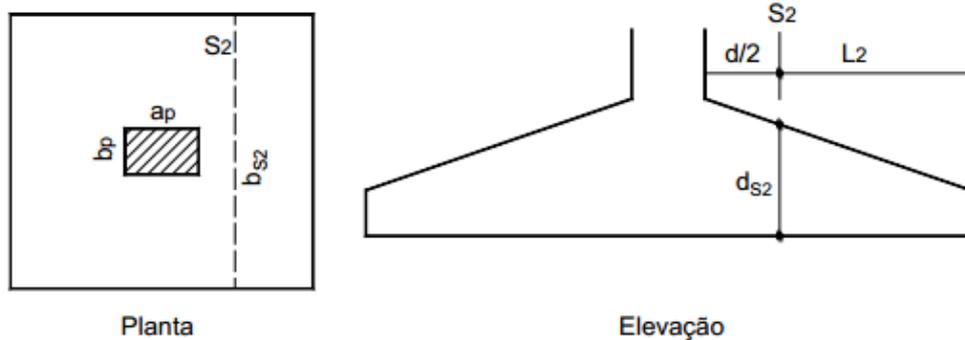
Onde:

$$d_u = \frac{(d_x + d_y)}{2}$$

- *Verificação da dispensa de armadura transversal:*

Segundo Alva (2007), armaduras transversais para resistir à força cortante raramente são utilizadas nas sapatas. Portanto, as sapatas são dimensionadas de maneira que os esforços cortantes sejam resistidos apenas pelo concreto, dispensando a armadura transversal. Usualmente, a verificação da força cortante é feita numa seção de referência S2, onde considera-se  $d$  como a altura útil média da sapata junto à face do pilar, conforme ilustra a Figura 13.

**Figura 13** - Seção para a verificação da força cortante



Fonte: ALVA (2007).

Conforme definido no item 19.4 da NBR 6118, para dispensar a armadura transversal, a força cortante solicitante de cálculo  $V_{sd}$  na seção  $S_2$  não deve superar a força resistente ao cisalhamento  $V_{rd1}$  (ABNT, 2014), logo:

$$V_{rd1} \geq V_{sd}$$

Verificação em relação à maior dimensão da sapata (lado A):

$$V_{rd1} = \tau_{rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40\rho_1) \cdot b_{s2} \cdot d_{s2}$$

Onde:

- $\tau_{Rd} = 0,0375 \cdot f_{ck}^{2/3}$  com  $f_{ck}$  em MPa;
  - $k = |1,6 - d_{s2}| \geq 1,0$  com  $d_{s2}$  em metros;
  - $\rho_1 = \frac{A_s}{b_{s2} \cdot d_{s2}} \leq 0,02$ ;
  - $A_s$  é a área de armadura longitudinal de flexão na direção analisada.
- *Verificação das tensões de aderência:*

Um dos tipos de ruína nas sapatas é o deslizamento excessivo das armaduras longitudinais. Isso impede que as tensões de tração necessárias ao equilíbrio sejam mobilizadas integralmente. Nas sapatas rígidas, pode-se obter a tensão de aderência solicitante com base no método das bielas, a partir da seguinte expressão:

$$\tau_{bd} = \frac{p \cdot (A - a)}{2 \cdot d \cdot (N_B \cdot \pi \cdot \emptyset) \cdot A}$$

A tensão de aderência solicitante não deve ultrapassar a resistência de aderência de cálculo  $f_{bd}$ :

$$\tau_{bd} \leq f_{bd}$$

### 3.3 MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO PROGRAMA

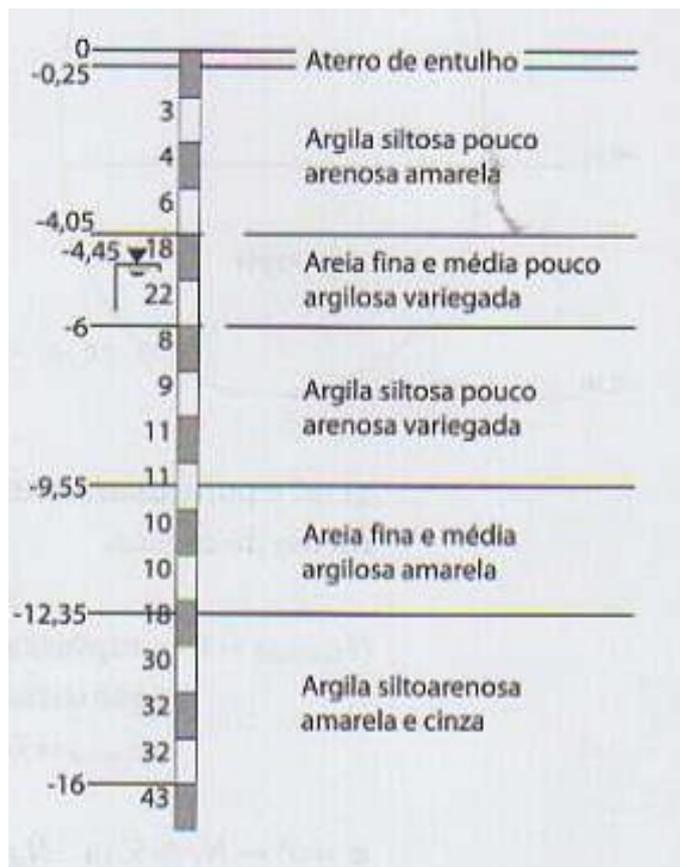
Com o intuito de se analisar os resultados apresentados pelo algoritmo implementado no *software* Mathcad, elaborou-se também, um exemplo prático para ser resolvido tanto analiticamente, quanto através da aplicação do programa, possibilitando assim, uma comparação de resultados.

#### **Exemplo Prático:**

Dado o perfil representativo do terreno a seguir (Figura 14), fazer o dimensionamento geotécnico, geométrico e estrutural de uma sapata que recebe um pilar retangular de 25 x 40 cm com carga característica axial ( $N_k$ ) centrada de 1000 kN, para um edifício residencial com um subsolo.

- *Passos para o dimensionamento da sapata:*
  - Calcular a tensão admissível pelo método de Teixeira (1996);
  - Calcular o recalque imediato pelos métodos semiempíricos de Décourt (1992) e Barata (1984, 1986);
  - A sapata estará apoiada à cota -4 m;
  - Utilizar aço CA-50 e Concreto C-20;
  - Armaduras: barras nervuradas com  $\varnothing = 12,5$  mm;
- *Dados do pilar:*
  - Armaduras: barras nervuradas com 10  $\varnothing = 12,5$  mm;

**Figura 14** – Perfil representativo do terreno para resolução do exemplo prático



Fonte: CINTRA; AOKI; ALBIERO (2011).

## 4 RESULTADOS

Após a resolução do exemplo prático por meio dos dois métodos expostos anteriormente, tabelou-se os principais dados a fim de facilitar uma análise comparativa dos resultados. Esses valores encontram-se na Tabela 5.

O algoritmo implementado no software Mathcad assim como os resultados obtidos para o exemplo prático via sua aplicação podem ser observados no APÊNDICE A.

**Tabela 5** – Resumo dos valores obtidos pelo dimensionamento da sapata do exemplo prático manualmente e através do *software* Mathcad

Símbolo	Descrição	Método		Unidade
		Manual	Mathcad	
$\sigma_{adm}$	Tensão admissível	0,27	0,27	MPa
S	Área da sapata	3,70	3,69	m <sup>2</sup>
A	Maior lado da sapata	2,00	2,00	m
B	Menor lado da sapata	1,85	1,85	m
R	Raio equivalente	1,08	1,08	m
$\rho_{iD}$	Recalque por Décourt	8,63	8,70	mm
$\rho_{iB}$	Recalque por Barata	11,87	11,90	mm
$l_b$	Comp. de ancoragem básico	54,57	54,64	cm
$l_{b,nec}$	Comp. de ancoragem necessário	38,20	38,25	cm
ASA,nec	Área de armadura nec. em A	11,28	11,28	cm <sup>2</sup>
ASB,nec	Área de armadura nec. em B	11,28	11,28	cm <sup>2</sup>
ASA,mín	Área de armadura mín. em A	16,65	16,62	cm <sup>2</sup>
ASB,mín	Área de armadura mín. em B	18,00	17,97	cm <sup>2</sup>
ASA,máx	Área de armadura máx. em A	888,00	886,56	cm <sup>2</sup>
ASB,máx	Área de armadura máx. em B	960,00	958,56	cm <sup>2</sup>
NA	Nº de barras na direção A	13,57	13,55	unidade
NB	Nº de barras na direção B	14,67	14,65	unidade
$\tau_{Sd}$	Tensão cisalhante solicitante	1,89	1,89	MPa
$\tau_{Rd2}$	Tensão resistente ao cisalhamento	3,55	3,55	MPa
$\tau_{Rd}$	Tensão resistente ao cisalhamento	0,28	0,28	MPa
$V_{Rd1;A}$	Resistência de projeto (lado A)	289,05	287,00	kN
$V_{Sd;A}$	Força cortante solicitante (lado A)	255,80	257,13	kN
$V_{Rd1;B}$	Resistência de projeto (lado B)	312,49	312,34	kN
$V_{Sd;B}$	Força cortante solicitante (lado B)	276,54	278,02	kN
$\tau_{b d;A}$	Tensão solicitante (lado A)	1,67	1,67	MPa
$\tau_{b d;B}$	Tensão solicitante (lado B)	1,93	1,93	MPa

## 5 DISCUSSÕES

Os parâmetros de entrada necessários para que se fizesse a resolução do exemplo prático via *software* Mathcad foram os mesmos utilizados para o cálculo de forma analítica. Por conseguinte, ambas as maneiras de resolução se fizeram segundo as mesmas metodologias, ou seja, cálculo da tensão admissível do solo pelo método de Teixeira (1996), dos recalques imediatos pelos métodos de Barata (1984, 1986) e de Décourt (1992), dimensionamento geométrico seguindo considerações feitas por Alonso (2010) e cálculo estrutural segundo a ABNT NBR 6118 (2014). Considerou-se em todos os casos, também, as prescrições estabelecidas pela ABNT NBR 6122 (2010).

Numa análise comparativa dos dados tabelados no item 4 deste trabalho, observou-se que os resultados obtidos pela resolução através *software* são, em sua pluralidade, iguais aos calculados analiticamente, diferindo-se em todos os casos por questões de arredondamento de casas decimais, o que demonstra eficiência e precisão do programa. Em alguns casos onde houveram essas diferenças entre resultados, elas foram tão pequenas a ponto de poderem ser desprezadas.

Os casos onde houveram as maiores discrepâncias entre resultados foram nos cálculos dos valores das resistências à força cortante de projeto e das forças cortantes solicitantes, tanto para o lado A, quanto para o lado B da sapata. Em relação ao maior lado da sapata, a utilização do *software* gerou uma diminuição de 2,05 kN na resistência de projeto e um acréscimo de 1,33 kN para a força solicitante, e para o menor lado, uma diminuição de 0,15 kN no valor da resistência de projeto e um acréscimo de 1,48 kN no da força solicitante. Pode-se observar que em ambos os casos citados houve diminuição da resistência e aumento da solicitação, porém, não se pode garantir que isso ocorrerá em quaisquer outras configurações de sapatas que venham a ser dimensionadas a partir do algoritmo elaborado, pois para cada caso pode haver um arredondamento de unidades diferente, tanto para um número maior quanto para um menor.

## 6 CONCLUSÕES

No presente trabalho desenvolveu-se um algoritmo capaz de realizar os cálculos necessários ao dimensionamento completo de sapatas isoladas, o que contemplou a elaboração de uma rotina para cálculo das tensões admissíveis e dos recalques advindos da interação sapata-solo, assim como para o dimensionamento geométrico e estrutural do elemento de fundação, de forma rápida e eficiente com o uso do *software* Mathcad.

Para a avaliação desse algoritmo, tornou-se necessário fazer uma comparação entre os resultados gerados por ele, e outros obtidos através dos cálculos analíticos. Em ambas as soluções se utilizaram dos resultados de parâmetros característicos do solo obtidos através de estudos científicos, didáticos e testes experimentais. A partir da elaboração e implementação da rotina de cálculo no *software* e da análise dos resultados realizada no item 5 deste trabalho, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- O *software* demonstrou uma maior velocidade e eficiência em relação aos cálculos analíticos, comprovando-se dessa forma, que o mesmo possui características almejadas pelo mercado atual, onde se procura eficiência e praticidade, fatores que influenciam diretamente no custo e desempenho de um projeto;
- Haja vista o fato de que o Mathcad além de possibilitar uma fácil manipulação de textos, figuras e equações, ele também pode exportar arquivos em formato PDF, acredita-se que este software pode ter uma grande aplicabilidade na criação de memoriais descritivos e de cálculo, tanto para fins didáticos, quanto para fins profissionais;
- As discrepâncias obtidas entre alguns resultados da utilização do software e do cálculo manual, possuem ordem de grandeza tal, que possam ser desprezadas devido à existência dos fatores de segurança implícitos em todas as etapas do dimensionamento do elemento de fundação.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como recomendação, sugere-se que novos trabalhos de implementação de algoritmos de dimensionamento de elementos estruturais, de fundação ou não, sejam desenvolvidos nesta eficaz ferramenta que foi utilizada neste projeto, tomando-se como exemplos:

- O aprimoramento do algoritmo elaborado neste projeto para que ele possa ser utilizado, também, para dimensionamento de sapatas em casos de cargas excêntricas;
- A implementação de uma rotina de cálculo para outros tipos de sapatas de fundação ou até mesmo para sapatas isoladas, considerando-se seu dimensionamento como flexível;
- Implementação de algoritmos para dimensionamento de fundações profundas, tanto para tubulões quanto para os vários tipos de estacas;
- A elaboração e implementação de rotinas de cálculo para dimensionamento de elementos estruturais como pilares, vigas e lajes, tanto em concreto armado quanto aço ou mistas de aço e concreto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6489: Prova de carga direta sobre terreno de fundação**. Rio de Janeiro, 1984.

ALONSO, U. R. **Dimensionamento de Fundações Profundas**. São Paulo: Edgard Blucher, 1989.

ALONSO, U. R. **Exercícios de Fundações**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

ALONSO, U. R. **Exercícios de Fundações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

ALVA, G. M. S. **Projeto Estrutural de Sapatas**. 2007. 38 p. Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria.

AZEREDO, Hélio Alves de. **O edifício até sua cobertura**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.

BARATA, F. E. **Propriedades mecânicas do solo: uma introdução ao projeto de fundações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1984. 152 p.

BARATA, F. E. **Recalques de edifícios sobre fundações diretas em terrenos de compressibilidade rápida e com a consideração da rigidez da estrutura**. 1986. Tese (Concurso para professor titular) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BARROS, Carolina. **Apostila de Fundações: Técnicas Construtivas – Edificações**. 2011. 22 p. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense, Pelotas.

BARROS, Mércia. **Fundações**. 1996. 30 p. Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

BASTOS, P. S. S. **Sapatas de Fundação**. 2016. 123 p. Notas de aula – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo.

BRITO, José Luiz Wey de. **Fundações do Edifício**. 1987. Escola Politécnica da USP, São Paulo.

CHAVES, J. C.; JUNIOR, J. F. L. R. **Automatização do Cálculo de Fundações Rasas**. 2015. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de São João Del-Rei, Campus Alto Paraopeba, Ouro Branco.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Fundações Diretas: Projeto Geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

CONSTANCIO, Douglas. **Fundações rasas – Sapatas**. 2004. 28 p. Notas de Aula – Disciplina Fundações I, Americana.

DANZIGER, F. A. B. **Fundações**. 2007. 39 p. Notas de Aula – Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro.

DÉCOURT, L. **Fundações Rasas**. Anais da Mesa-Redonda Solos na Cidade de São Paulo. 1992. p. 217 - 228.

FERREIRA, W. G. *et al.* **Ambiente Pedagógico para Engenharia Estrutural com o uso do Software Mathcad**. Anais do XXXIV COBENGE, Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2006.

MARANGON, Márcio. **Considerações Sobre Fundações Diretas**. 2012. 114 p. Notas de Aula – Geotecnia de Fundações, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora.

MARANGON, Márcio. **Parâmetros dos Solos para Cálculo de Fundações**. 2011. 16 p. Notas de Aula – Geotecnia de Fundações, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora.

- MATOS, L. R. **Softwares para Engenharia Civil**. 2009. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo.
- MEDEIROS, D. S. **Análise Tridimensional da Interação Solo-Estrutura em Fundação de Concreto Armado pelo Método dos Elementos Finitos**. 2006. 171 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre.
- MELHADO, S. B. *et al.* **Fundações**. 2002. 31 p. Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.
- MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F. **Patologia das Fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- RODARTE, L. S. **Estimativa de Deslocamentos Verticais de Fundações por Tubulões em Edifícios Assentados no Solo da Cidade de Lavras, MG**. 2007. 55 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras.
- SILVA, E. L. **Análise dos Modelos Estruturais para Determinação dos Esforços Resistentes em Sapatas Isoladas**. 1998. 122 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.
- SOUZA, R. A.; REIS, J. H. C. **Interação solo-estrutura para edifícios sobre fundações rasas**. Revista Acta Scientiarum. Technology, Maringá, v. 30, n. 2, 2008. p. 161 – 171.
- TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. Análise, projeto e execução de fundações rasas, in: HACHICH, W. et al. (ed.) **Fundações: Teoria e Prática**. São Paulo: Pini, Cap. 7, p. 227 – 264, 1996.
- TEIXEIRA, A. H. **Projeto e execução de Fundações**. 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, n. 1, p. 33 – 50, 1996.
- VELLOSO, D. A.; LOPES, F.R. **Fundações – Volume 1: Critérios de Projeto – Investigação do Subsolo – Fundações Superficiais**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F.R. **Fundações – Volume 2: Fundações Profundas**. Nova. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F.R. **Fundações – Volume Único: Critérios de Projeto – Investigação do Subsolo – Fundações Superficiais - Fundações Profundas**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

## APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS POR MEIO DO USO DO SOFTWARE MATHCAD

As figuras a seguir apresentam a interface do *software* utilizado, assim como o algoritmo implementado e os resultados obtidos pela sua utilização.

### "SAPATA RÍGIDA RETANGULAR ISOLADA"

#### 1) DIMENSIONAMENTO GEOTÉCNICO E GEOMÉTRICO

##### 1.1) Tensão Admissível do Solo $\sigma_{adm}$ :

O cálculo da tensão admissível do solo será realizado pelo método semi-empírico de Teixeira (1996), que se aplica quando  $5 \leq N_{SPT} \leq 20$ . Para tanto, é necessário que se faça uma estimativa da profundidade a que o bulbo de tensões abaixo da sapata estará sujeito. Estudos mostram que este bulbo encontra-se a aproximadamente entre 2B (sapatas quadradas) e 3B (sapatas retangulares), sendo B o menor lado da sapata. Dessa forma, adotaremos um valor de pressão básica ( $\sigma_0$ ) da tabela 4 da NBR 6122/1996 contida na Figura 1, para que possamos fazer um cálculo aproximado do menor lado da sapata e, assim, da profundidade atingida pelo bulbo de tensões.

Para iniciar, o projetista deve confirmar o tipo de solo em que a fundação será apoiada:

- se for arenoso: AR = 1;
- se for argiloso: AR = 2.

$A_R = 1$

Classe	Descrição	Valores (MPa)
1	Rocha sã, maciça, sem laminação ou sinal de decomposição	3,0
2	Rochas laminadas, com pequenas fissuras, estratificadas	1,5
3	Rochas alteradas ou em decomposição	ver nota c)
4	Solos granulares concrecionados - conglomerados	1,0
5	Solos pedregulhosos compactos a muito compactos	0,6
6	Solos pedregulhosos fofos	0,3
7	Areias muito compactas	0,5
8	Areias compactas	0,4
9	Areias medianamente compactas	0,2
10	Argilas duras	0,3
11	Argilas rijas	0,2
12	Argilas médias	0,1
13	Sítes duros (muito compactos)	0,3
14	Sítes rijos (compactos)	0,2
15	Sítes médios (medianamente compactos)	0,1

**Figura 1 - Tabela de tensões básicas utilizadas para o cálculo das tensões admissíveis.**

$\sigma_0 = 0.3 \text{ MPa}$

Convenções:

$N_{SPT}$ : média aritmética dos valores de SPT na região localizada entre a cota de apoio das sapatas e o término do bulbo de tensões;

$a$ : maior dimensão do pilar;

$b$ : menor dimensão do pilar;

$P$ : carga que chega do pilar;

$A$ : maior lado da sapata;

$B$ : menor lado da sapata;

$B_0$ : estimativa do menor lado da sapata;

$S$ : área da sapata;

$L_0$ : profundidade estimada do bulbo de tensões.

Dados de entrada:

$$a \quad 40 \text{ cm}$$

$$b \quad 25 \text{ cm}$$

$$N_k \quad 1000 \text{ kN}$$

$$N_{Std} = 1.4 N_k = 1400 \text{ kN}$$

Pré-dimensionamento:

$$S_0 = \frac{N_k}{\sigma_0} = 3.33 \text{ m}^2 \quad B_0 = \frac{(b + a)}{2} + \sqrt[2]{S_0 + 0.25 (b - a)^2} = 1.75 \text{ m}$$

Utilizaremos  $B_0$  para estimar a cota atingida pelo bulbo de tensões ( $L_0$ ). Em seguida, o usuário deve inserir o valor de  $N_{spt}$  fornecido para essa profundidade de acordo com o boletim de sondagem.

$$L_0 = \begin{cases} \text{if } a = b \\ \quad \left\| \begin{array}{l} 2 B_0 \\ \text{else} \\ 3 B_0 \end{array} \right\| \end{cases} = 5.26 \text{ m}$$

$$N_{spt} \quad 13$$

$$\sigma_{adm} = \begin{cases} \text{if } 5 \leq N_{spt} \leq 20 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \text{if } A_R = 1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \sigma_{adm} \leftarrow 0.05 \text{ MPa} + \left( 1 + \frac{0.4}{m} B_0 \right) \frac{N_{spt}}{100} \text{ MPa} \\ \text{else if } A_R = 2 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \sigma_{adm} \leftarrow 20 \text{ kPa} + N_{spt} \\ \text{else} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \text{"Solo Inválido!"} \\ \text{else} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \text{"Nspt Inválido!"} \end{array} \right\| \end{array} \right\| \end{array} \right\| \end{array} \right\| \end{array} \right\| = 0.27 \text{ MPa}$$

## 1.2) Dimensionamento Geométrico:

Para o dimensionamento geométrico será desprezado o peso próprio da sapata. Além disso, considera-se carregamento centrado e que os lados da mesma possuem balanços de tamanhos iguais.

Área da sapata:

$$S = \frac{N_k}{\sigma_{adm}} = 3.69 \text{ m}^2$$

Dimensões da sapata:

$$B = \frac{(b - a)}{2} + \sqrt{S + 0.25 (b - a)^2} = 1.85 \text{ m}$$

$$A = \frac{S}{B} = 2 \text{ m}$$

## 1.3) Análise do Recalque Imediato da Sapata:

### 1.3.1) Método da Barata (1984, 1986):

Dados iniciais:

$\nu$ : coeficiente de Poisson;

$E_s$ : módulo de deformabilidade do solo;

$c_d$ : coeficiente dependente da forma e rigidez da sapata;

$\lambda$ : coeficiente de profundidade.

Os valores de  $\nu$  e de  $E_s$  podem ser obtidos através de ensaios de laboratório ou, conhecendo-se o tipo de solo em que a fundação será aplicada, podemos utilizar as tabelas presentes nas Figuras 2 e 3 respectivamente.

Tipo de Solo		Coeficiente de Poisson
ARGILA	Saturada	0,4 a 0,5
	Não saturada	0,1 a 0,3
	Arenosa	0,2 a 0,3
SILTE		0,3 a 0,35
AREIA	Compacta	0,2 a 0,4
	Grossa ( $e = 0,4$ a $0,7$ )	0,15
	Fina ( $e = 0,4$ a $0,7$ )	0,25
ROCHA	Depende do tipo	0,1 a 0,4

$\nu = 0.3$

Figura 2 - Estimativa do coeficiente de Poisson.

Tipo de Solo		$E_s$ (kPa)
ARGILA	Muito mole	300 a 3000
	Mole	2000 a 4000
	Média	4000 a 9000
	Dura	7000 a 18000
	Arenosa	30000 a 42000
AREIA	Siltosa	7000 a 20000
	Fofa	10000 a 25000
	Compacta	50000 a 85000
	( pedregulho + areia )	98000 a 200000
	compacta	

$$E_s = 20000 \text{ kPa}$$

Figura 3 - Estimativa do módulo de elasticidade.

O valor de  $c_\Delta$  pode ser obtido da tabela da Figura 4 de acordo com o tipo de sapata utilizada.

Características da placa carregada			Valor teórico de $c_\Delta$	Valor médio de $c_\Delta$
Forma	Tipo de carga	Localização do recalque		
Circular	carga uniforme	centro	1	0,85
	carga uniforme	periferia	0,636	
	placa rígida	área inteira	0,785	
Quadrada	carga uniforme	centro	1,12	0,95
	carga uniforme	meio do lado	0,78	
	carga uniforme	vértice	0,56	
	placa rígida	área inteira	0,85	

$$c_\Delta = 0.95$$

Figura 4 - Coeficiente dependente da rigidez e da forma da placa - Caquot-Kerisel (Barata, 1984).

Para a obtenção do valor de  $\lambda$  utilizaremos o ábaco presente na Figura 5. Este ábaco foi construído para análises de placas circulares, neste caso, faremos uma equivalência entre a área da fundação e a área de uma placa circular equivalente a fim de encontrarmos um raio equivalente ( $R$ ) para a sapata.

$$R = \sqrt{\frac{A \cdot B}{\pi}} = 1.08 \text{ m}$$

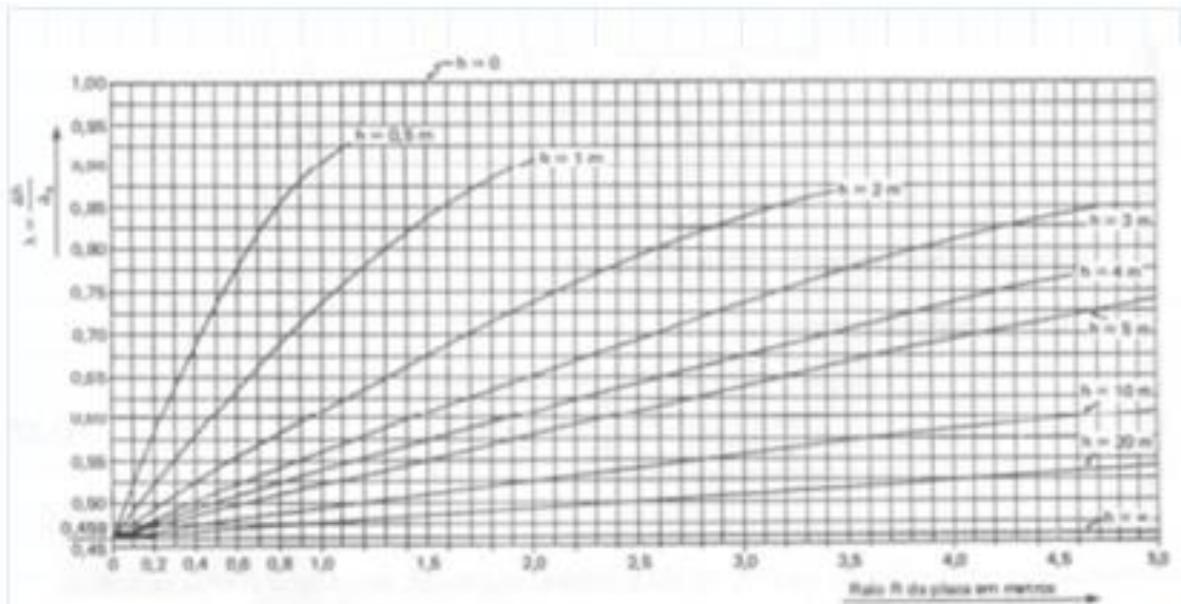


Figura 5 - Integração das expressões de Mindlin para a obtenção do coeficiente de profundidade - Caquot-Kerisel (Barata, 1984).

$$\lambda = 0.55$$

$$\rho_{iB} = \sigma_{adm} B \frac{1 - \nu^2}{E_s} c_{\Delta} \lambda = 11.9 \text{ mm}$$

### 1.3.2) Método de Décourt (1992):

$$\rho_{iD} = 27 \frac{cm}{MPa \cdot m^{0.7}} \frac{\sigma_{adm} B^{0.7}}{N_{spt}} = 8.7 \text{ mm}$$

### 1.3.3) Análise dos Recalques Calculados:

Segundo recomendações de Skempton-MacDonald, temos os seguintes valores de recalques totais limite para sapatas isoladas:

$$\begin{aligned} \rho_{max} &= 40 \text{ mm para arcias;} \\ \rho_{max} &= 65 \text{ mm para argilas.} \end{aligned}$$

Caso o recalque nas fundações ultrapasse esses valores limites, recomenda-se que se façam estudos mais aprofundados sobre o solo em questão ou que se modifique a geometria da fundação adotada.

## 2) DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

### 2.1) Convenções:

$h$ : altura da sapata;  
 $h_0$ : altura da base da sapata;  
 $T_A$ : tração nas armaduras longitudinais paralelas ao maior lado da sapata;  
 $T_B$ : tração nas armaduras longitudinais paralelas ao menor lado da sapata;  
 $A_{SA}$ : área de armadura longitudinal paralela ao maior lado da sapata;  
 $A_{SB}$ : área de armadura longitudinal paralela ao menor lado da sapata;  
 $l$ : camada de lastro abaixo das fundações;  
 $d$ : distância entre a cota do ponto mais alto da sapata e a do centro das armaduras;  
 $C_{nom}$ : cobrimento nominal de acordo com a tabela 7.2 da NBR 6118/2014 para classe de agressividade II;  
 $\phi_{pilar}$ : diâmetro das armaduras do pilar;  
 $\phi_1$ : diâmetro das armaduras longitudinais da sapata;  
 $d_{m\acute{a}x}$ : dimensão máxima característica do agregado graúdo a ser utilizado no concreto;  
 $l_b$ : comprimento de ancoragem básico;  
 $\alpha$ : coeficiente para cálculo de comprimento de ancoragem;  
 $l_{b,m\acute{i}n}$ : comprimento de ancoragem mínimo;  
 $l_{b,nec}$ : comprimento de ancoragem necessário;  
 $A_{sp,calc}$ : área de armadura calculada para o pilar;  
 $A_{sp,f}$ : área de armadura efetiva do pilar;  
 $f_{yd}$ : resistência de cálculo do aço;  
 $f_{bd}$ : resistência da aderência de cálculo da armadura;  
 $f_{ctd}$ : resistência à tração de cálculo do concreto;  
 $f_{ctd,inf}$ : resistência à tração de cálculo do concreto para as fibras inferiores;  
 $f_{ct,m}$ : resistência média à tração do concreto;  
 $f_{ck}$ : resistência característica do concreto;  
 $n_1, n_2, n_3$ : coeficientes para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva;  
 $\gamma_s$ : coeficiente de ponderação da resistência do aço no ELU;  
 $\gamma_c$ : coeficiente de ponderação da resistência do concreto no ELU;  
 $\gamma_f$ : coeficiente de majoração das ações.

### 2.2) Análise da rigidez:

A expressão abaixo gera a altura necessária para que a sapata seja considerada rígida.

$$h_{m\acute{i}n} = \frac{(A \cdot a)}{3} = 0.53 \text{ m}$$

### 2.3) Cobrimento:

Toda fundação superficial deve ser executada em cima de uma camada de lastro de no mínimo 5 cm de espessura. Já o cobrimento nominal das armaduras deve ser verificado conforme item 7.4.7 da NBR 6118/2014, que apresenta:

- $C_{nom} = 30$  mm, para classe I e II de agressividade;
- $C_{nom} = 40$  mm, para classe III de agressividade;
- $C_{nom} = 50$  mm, para classe IV de agressividade.

$$l \geq 5 \text{ cm} \quad C_{nom} = 30 \text{ mm}$$

#### 2.4) Altura da sapata suficiente para permitir a ancoragem da armadura de arranque do pilar:

2.4.1) Dados de entrada ( $f_{ck}$  e  $f_{yk}$  em MPa):

$$\gamma_f = 1.4 \quad \gamma_s = 1.15 \quad \gamma_c = 1.4$$

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa} \quad f_{ck} = 20 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 14.29 \text{ MPa}$$

$$f_{sd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.78 \text{ MPa}$$

$$A_{s,calc} = 12.27 \text{ cm}^2 \quad A_{s,ef} = 12.27 \text{ cm}^2 \quad \phi_{pilar} = 12.5 \text{ mm}$$

2.4.2) Cálculo de  $f_{ct,m}$ :

$$f_{ct,m} = 0.3 \frac{f_{ck}^{\frac{2}{3}}}{\text{MPa}^{\frac{2}{3}}} \text{ MPa} = 2.21 \text{ MPa}$$

2.4.3) Cálculo de  $f_{ctk,inf}$ :

$$f_{ctk,inf} = 0.7 f_{ct,m} = 1.55 \text{ MPa}$$

2.4.4) Cálculo de  $f_{cd}$ :

$$f_{cd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} = 1.11 \text{ MPa}$$

#### 2.4.5) Cálculo de $f_{bd}$ :

A NBR 6118/2014 estabelece que:

- $n_1 = 1,0$  para barras lisas;
- $n_1 = 1,4$  para barras entalhadas;
- $n_1 = 2,25$  para barras nervuradas;
- $n_2 = 1,0$  para situações de boa aderência;
- $n_2 = 0,7$  para situações de má aderência;
- $n_3 = 1,0$  para  $\phi_{barra} < 32 \text{ mm}$ ;
- $n_3 = (132 - \phi_{barra})/100$ , para  $\phi_{barra} \geq 32 \text{ mm}$ .

Coefficientes a serem utilizados:

$$n_1 \quad 2.25 \qquad n_2 \quad 1.0 \qquad n_3 \quad 1.0$$

$$f_{bd} = n_1 n_2 n_3 f_{ctd} = 2.49 \text{ MPa}$$

#### 2.4.6) Comprimento de ancoragem básico:

$$l_b = \frac{\phi_{pilar}}{4} \frac{f_{yd}}{f_{bd}} = 54.64 \text{ cm}$$

#### 2.4.7) Comprimento de ancoragem necessário:

A NBR 6118/2014 estabelece que:

- $\alpha$  é 1,0 para barras sem gancho;
- $\alpha$  é 0,7 para barras tracionadas com gancho, com cobrimento no plano normal ao do gancho maior ou igual a  $3 \phi_{barra}$ ;
- $\alpha$  é 0,7 quando houver barras transversais soldadas conforme 9.4.2.2 da NBR 6118/2014;
- $\alpha$  é 0,5 quando houver barras transversais soldadas conforme 9.4.2.2 da NBR 6118/2014 e gancho, com cobrimento no plano normal ao do gancho maior ou igual a  $3 \phi_{barra}$ ;

Para este caso:

$$\alpha \quad 0.7$$

$$l_{b, \text{nec}} = \alpha l_b \frac{A_{s, \text{calc}}}{A_{s, \text{ef}}} = 38.25 \text{ cm}$$

#### 2.4.8) Comprimento de ancoragem mínimo:

Segundo a NBR 6118/2014,  $l_{b,min}$  é dado pelo maior valor dentre os três a seguir:

$$l_{b,min1} = 0.3 l_b = 16.39 \text{ cm}$$

$$l_{b,min2} = 10 \phi_{\text{pilar}} = 12.5 \text{ cm}$$

$$l_{b,min3} = 100 \text{ mm} = 10 \text{ cm}$$

Logo:

$$l_{b,min} = \max l_{b,min1}, l_{b,min2}, l_{b,min3} = 16.39 \text{ cm}$$

2.4.9) Verificação do comprimento de ancoragem necessário:

$$\text{Verificação} \left\{ \begin{array}{l} \text{if } l_{b,nec} \geq l_{b,min} \\ \quad \parallel \text{ "Ok!"} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{ "Comprimento não atende!"} \end{array} \right\} = \text{"Ok!"}$$

2.5) Altura da sapata:

A altura da sapata deve ser tal que possibilite a ancoragem do pilar, além disso, será obtida de forma a garantir que a fundação seja considerada rígida. Logo:

$$h_{min} \left\{ \begin{array}{l} \text{if } h_{min} \geq l_{b,nec} \\ \quad \parallel h_{min} \leftarrow h_{min} \\ \text{else} \\ \quad \parallel h_{min} \leftarrow l_{b,nec} \end{array} \right\} = 53.23 \text{ cm}$$

Valor adotado para h:

**$h = 60 \text{ cm}$**

2.6) Altura da base da sapata:

O valor prático comumente adotado é o maior dentre  $h/3$  e 20 cm. Logo:

$$h_0 \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \frac{h}{3} > 20 \text{ cm} \\ \quad \parallel h_0 \leftarrow \frac{h}{3} \\ \text{else} \\ \quad \parallel h_0 \leftarrow 20 \text{ cm} \end{array} \right\} = 20 \text{ cm}$$

2.7) Tração nas armaduras:

2.7.1) Cálculo da altura útil (d):

$$d = h - C_{\text{nom}} = 0.57 \text{ m}$$

2.7.2) Tração nas armaduras paralelas ao lado A da sapata:

$$T_A = \frac{N_k (A - a)}{8 d} = 350.22 \text{ kN}$$

2.7.3) Tração nas armaduras paralelas ao lado B da sapata:

$$T_B = \frac{N_k (B - b)}{8 d} = 350.22 \text{ kN}$$

## 2.8) Área de armadura calculada:

2.8.1) Área necessária para as armaduras paralelas ao lado A da sapata:

$$A_{SA} = \frac{T_A \gamma_f}{f_{yd}} = 11.28 \text{ cm}^2$$

2.8.2) Área necessária para as armaduras paralelas ao lado B da sapata:

$$A_{SB} = \frac{T_B \gamma_f}{f_{yd}} = 11.28 \text{ cm}^2$$

## 2.9) Armaduras mínimas:

2.9.1) Critério adotado:

Apesar da norma fazer distinção entre armaduras positivas e negativas, e de lajes armadas em uma ou duas direções, pode-se admitir, para todos esses casos, uma taxa de armadura mínima igual a 0,15% (em relação a área bruta).

2.9.2) Área de armadura mínima paralela ao lado A da sapata:

$$A_{SA,\text{mín}} = 0.0015 B h = 16.62 \text{ cm}^2$$

2.9.3) Área de armadura mínima paralela ao lado B da sapata:

$$A_{SB,\text{mín}} = 0.0015 A h = 17.97 \text{ cm}^2$$

## 2.10) Armaduras máximas:

2.10.1) Critério adotado:

Item 17.3.5.3.2 da NBR 6118/2014.

2.10.2) Área de armadura máxima paralela ao lado A da sapata:

$$A_{SA,m\acute{a}x} = 0.08 B h = 886.56 \text{ cm}^2$$

2.10.3) Área de armadura máxima paralela ao lado B da sapata:

$$A_{SB,m\acute{a}x} = 0.08 A h = 958.56 \text{ cm}^2$$

## 2.11) Verificação da área de armadura:

2.11.1) Área de Armadura paralela ao lado A da sapata:

$$A_{SA} \left\{ \begin{array}{l} \text{if } A_{SA,m\acute{a}n} \leq A_{SA} \leq A_{SA,m\acute{a}x} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} A_{SA} \leftarrow A_{SA} \\ \text{else if } A_{SA} < A_{SA,m\acute{a}n} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} A_{SA} \leftarrow A_{SA,m\acute{a}n} \\ \text{else} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} A_{SA} \leftarrow A_{SA,m\acute{a}x} \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \right. = 16.62 \text{ cm}^2$$

2.11.2) Área de armadura paralela ao lado B da sapata:

$$A_{SB} \left\{ \begin{array}{l} \text{if } A_{SB,m\acute{a}n} \leq A_{SB} \leq A_{SB,m\acute{a}x} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} A_{SB} \leftarrow A_{SB} \\ \text{else if } A_{SB} < A_{SB,m\acute{a}n} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} A_{SB} \leftarrow A_{SB,m\acute{a}n} \\ \text{else} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} A_{SB} \leftarrow A_{SB,m\acute{a}x} \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \right. = 17.97 \text{ cm}^2$$

## 2.12) Detalhamento das armaduras:

2.12.1) Cálculo do número de barras a adotar:

Nesta etapa precisamos definir o diâmetro das barras a serem usadas para as armaduras longitudinais.

$$\phi_l = 12.5 \text{ mm}$$

$$N_A = 4 \frac{A_{SA}}{\pi \phi_l^2} = 13.55$$

$$N_B = 4 \frac{A_{SB}}{\pi \phi_l^2} = 14.65$$

### 2.12.2) Verificação da área efetiva de armadura:

Deve-se adotar um número inteiro de barras para as duas direções.

$$N_A = 14 \quad A_{SA,xf} = N_A \pi \frac{\phi_1^2}{4} = 17.18 \text{ cm}^2$$
$$\text{Verifica } A_{SA,xf} \left\{ \begin{array}{l} \text{if } A_{SA,\text{mín}} \leq A_{SA,xf} \leq A_{SA,\text{máx}} \\ \quad \parallel \text{ "NA OK!"} \\ \text{else if } A_{SA} < A_{SA,\text{mín}} \\ \quad \parallel \text{ "Aumentar NA!"} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{ "Diminuir NA!"} \end{array} \right. = \text{"NA OK!"}$$

$$N_B = 15 \quad A_{SB,xf} = N_B \pi \frac{\phi_1^2}{4} = 18.41 \text{ cm}^2$$
$$\text{Verifica } A_{SB,xf} \left\{ \begin{array}{l} \text{if } A_{SB,\text{mín}} \leq A_{SB,xf} \leq A_{SB,\text{máx}} \\ \quad \parallel \text{ "NB OK!"} \\ \text{else if } A_{SB} < A_{SB,\text{mín}} \\ \quad \parallel \text{ "Aumentar NB!"} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{ "Diminuir NB!"} \end{array} \right. = \text{"NB OK!"}$$

### 2.12.3) Verificação do cobrimento nominal:

O cobrimento das armaduras deve atender à especificações do item 7.4.7 na NBR 6118/2014.

$$d_{\text{máx}} = 19 \text{ mm}$$

$$\text{Verificação} \left\{ \begin{array}{l} \text{if } C_{\text{nom}} \geq \phi_1 \wedge d_{\text{máx}} \leq 1.2 C_{\text{nom}} \\ \quad \parallel \text{ "Cobrimento OK!"} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{ "Cobrimento Insuficiente!"} \end{array} \right. = \text{"Cobrimento OK!"}$$

### 2.12.4) Cálculo e verificação do espaçamento entre barras:

O espaçamento entre barras deve atender ao disposto no item 20.1 da norma citada acima.

$$S_{m\acute{a}x} = \min(2h, 20 \text{ cm}) = 0.2 \text{ m}$$

$$S_A = \frac{A - 2 C_{nom} \phi_l}{N_A - 1} = 14.8 \text{ cm}$$

$$\text{Verifica}_{S_A} \left\{ \begin{array}{l} \text{if } S_A \leq S_{m\acute{a}x} \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{"Espa\c{c}amento OK!"} \\ \text{else} \\ \text{"Diminuir Espa\c{c}amento"} \end{array} \right. \\ \end{array} \right. = \text{"Espa\c{c}amento OK!"}$$

$$S_B = \frac{B - 2 C_{nom} \phi_l}{N_B - 1} = 12.7 \text{ cm}$$

$$\text{Verifica}_{S_B} \left\{ \begin{array}{l} \text{if } S_B \leq S_{m\acute{a}x} \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{"Espa\c{c}amento OK!"} \\ \text{else} \\ \text{"Diminuir Espa\c{c}amento"} \end{array} \right. \\ \end{array} \right. = \text{"Espa\c{c}amento OK!"}$$

## 2.13) Dimensionamento ao cisalhamento:

### 2.13.1) Verifica\c{c}o da ruptura por compress\c{a}o diagonal:

Conven\c{c}oes:

$d_u$ : altura \c{u}til m\acute{e}dia da sapata ;

$d_x$  e  $d_y$ : s\c{a}o as alturas \c{u}teis nas duas dire\c{c}oes ortogonais;

$u_0$ : per\acute{ı}metro do contorno cr\acute{ı}tico C;

$F_{Sd}$ : for\c{c}a ou rea\c{c}o\c{a}o concentrada, de c\c{a}lculo.

$$F_{Sd} = N_{Sd} = 1.4 \cdot 10^3 \text{ kN} \quad d_x = d = 0.57 \text{ m} \quad d_y = d = 0.57 \text{ m}$$

$$d_u = \frac{d_x + d_y}{2} = 0.57 \text{ m} \quad u_0 = 2(a + b) = 1.3 \text{ m} \quad \tau_{Sd} = \frac{N_{Sd}}{u_0 d_u} = 1.89 \text{ MPa}$$

$$\alpha_v = 1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} = 0.92 \quad \tau_{Rd2} = 0.27 \alpha_v f_{cd} = 3.55 \text{ MPa}$$

$$\text{Verifica\c{c}o} \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \tau_{Rd2} \geq \tau_{Sd} \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{"OK!"} \\ \text{else} \\ \text{"N\c{a}o OK!"} \end{array} \right. \\ \end{array} \right. = \text{"OK!"}$$

### 2.13.2) Verificação da dispensa de armadura transversal:

É usual e desejável evitar a colocação de armadura transversal para força cortante em sapatas, dessa forma, caso seja verificada a adoção dessa armadura pelo programa, recomenda-se analisar primeiramente a possibilidade de se alterar a altura da sapata. Caso não seja possível essa modificação, dimensiona-se a armadura transversal.

Dados de entrada:

$d$ : altura útil da sapata (junto à face do pilar);

$d_m$ : altura útil média da sapata na direção de "a";

$d_b$ : altura útil média da sapata na direção de "b".

$$\tau_{Rd} = 0.25 f_{ctd} = 0.28 \text{ MPa}$$

- Verificação em relação à maior dimensão da sapata (lado A):

$$L_m = \frac{(A - a)}{2} \quad \frac{d}{2} = 0.51 \text{ m} \quad V_{St,A} = \sigma_{adm} L_m B = 257.13 \text{ kN}$$

$$d_m = \frac{d}{2} + h_0 = 0.34 \text{ m}$$

$$k = \begin{cases} \text{if } \left| \frac{1.6 \text{ m}}{d_m} \right| \geq 1 \\ \left| \frac{1.6 \text{ m}}{d_m} \right| \\ \text{else} \\ 1 \end{cases} = 1.26$$

$$\rho_1 = \begin{cases} \text{if } \frac{A_{SA}}{B d_m} \leq 0.02 \\ \frac{A_{SA}}{B d_m} \\ \text{else} \\ 0.02 \end{cases} = 0.003$$

$$V_{Rd1,A} = \tau_{Rd} k (1.2 + 40 \rho_1) B d_m = 287 \text{ kN}$$

$$\text{Verifica\_armadura\_transversal} = \begin{cases} \text{if } V_{Rd1,A} \geq V_{St,A} \\ \text{"Desnecessária"} \\ \text{else} \\ \text{"Necessária"} \end{cases}$$

- Verificação em relação à menor dimensão da sapata (lado B):

$$L_m = \frac{(B - b)}{2} \quad \frac{d}{2} = 0.51 \text{ m} \quad V_{St,B} = \sigma_{adm} L_m A = 278.02 \text{ kN}$$

$$d_{sb} = \frac{d}{(B/b)} + h_0 = 0.34 \text{ m}$$

$$k = \begin{cases} \text{if } \left| \frac{1.6 \text{ m}}{d_{sb}} \right| \geq 1 \\ \left| \frac{1.6 \text{ m}}{d_{sb}} \right| \\ \text{else} \\ 1 \end{cases} = 1.26 \quad \rho_1 = \begin{cases} \text{if } \frac{A_{SB}}{B \cdot d_{sb}} \leq 0.02 \\ \frac{A_{SB}}{B \cdot d_{sb}} \\ \text{else} \\ 0.02 \end{cases} = 0.003$$

$$V_{Rd1,B} = \tau_{Rd} \cdot k \cdot (1.2 + 40 \cdot \rho_1) \cdot A \cdot d_{sb} = 312.34 \text{ kN}$$

$$\text{Verifica\_armadura\_transversal} = \begin{cases} \text{if } V_{Rd1,B} \geq V_{Sd,B} \\ \text{"Desnecessária"} \\ \text{else} \\ \text{"Necessária"} \end{cases} = \text{"Desnecessária"}$$

### 2.13.3) Verificação das tensões de aderência:

Um dos tipos de ruína nas sapatas é o deslizamento excessivo das armaduras longitudinais. Isso impede que as tensões de tração necessárias ao equilíbrio sejam mobilizadas integralmente.

Nas sapatas rígidas, pode-se obter a tensão de aderência solicitante com base no método das bielas, a partir das seguintes expressões, para as direções A e B da fundação, respectivamente:

$$\tau_{bd,A} = \frac{N_{Sd}}{2 \cdot d \cdot N_B \cdot \pi \cdot \phi_1} \cdot \frac{(A - a)}{A} = 1.67 \text{ MPa} \quad \tau_{bd,B} = \frac{N_{Sd}}{2 \cdot d \cdot N_A \cdot \pi \cdot \phi_1} \cdot \frac{(B - b)}{B} = 1.93 \text{ MPa}$$

$$f_{bd} = 2.49 \text{ MPa}$$

$$\text{Verifica\_f}_{bd} = \begin{cases} \text{if } \tau_{bd,A} \leq f_{bd} \wedge \tau_{bd,B} \leq f_{bd} \\ \text{"Não há problemas aderência!"} \\ \text{else if } \tau_{bd,A} \leq f_{bd} \wedge \tau_{bd,B} > f_{bd} \\ \text{"Problema na direção B!"} \\ \text{else if } \tau_{bd,A} > f_{bd} \wedge \tau_{bd,B} \leq f_{bd} \\ \text{"Problema na direção A!"} \\ \text{else} \\ \text{"Problema nas duas direções!"} \end{cases} = \text{"Não há problemas aderência!"}$$