



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PROJETO DE GRADUAÇÃO

KAMILA MARTINELLI ALVES

MAICON SILVA LUXINGER

DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES DE BASES DE PILARES DE AÇO

VITÓRIA

2021

KAMILA MARTINELLI ALVES

MAICON SILVA LUXINGER

DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES DE BASES DE PILARES DE AÇO

Projeto de Graduação dos alunos Kamila Martinelli Alves e Maicon Silva Luxinger, apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Macksuel Soares de Azevedo.

VITÓRIA

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES DE BASES DE PILARES DE AÇO

Kamila Martinelli Alves

Maicon Silva Luxinger

Projeto de Graduação dos alunos Kamila Martinelli Alves e Maicon Silva Luxinger, apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Aprovado em: 18/05/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Macksuel Soares de Azevedo (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Prof. Dr. Juliana da Cruz Vianna Pires
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Prof. Dr. Marcos Antônio Campos Rodrigues
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Marinete e Martins, por estarem sempre presentes e por fornecerem uma âncora de suporte essencial durante minha trajetória até aqui. Agradeço a eles e a todos os meus familiares que me fizeram ser a pessoa que sou hoje.

Aos meus amigos de graduação, agradeço a companhia e apoio fornecidos durante os anos que passamos juntos. Aos meus amigos de longa data, em especial Natália, Gabriela, Maria Letícia e Marcelo, por estarem há tanto tempo ao meu lado me oferecendo suporte em todas as etapas de minha vida, e pelo apoio que sempre tive.

Ao Maicon, pela parceria no desenvolvimento deste trabalho e ao professor Macksuel por nos apresentar a essa área e pela orientação durante todo esse processo.

Agradeço, por fim, à Universidade Federal do Espírito Santo, pelas oportunidades geradas e os conhecimentos fornecidos e a todos que conheci durante a graduação, que vieram a contribuir para minha formação acadêmica e profissional.

Kamila Martinelli Alves

Agradeço imensamente à Deus e aos meus pais, Rosilene e Hermes, que com suas fontes inesgotáveis de amor se fizeram presente nessa minha jornada e nunca mediram esforços para que eu chegasse até aqui. Aos meus irmãos e demais familiares que sempre me apoiaram. A eles, minha eterna gratidão.

À Kamila pelo companheirismo em todo esse processo e ao professor Macksuel pela orientação e por todo ensinamento passado ao longo desses anos na UFES.

Aos meus amigos de graduação e trabalho, em especial à Vanessa que desde o início de nossa jornada no IFES foi fonte de inspiração. À CT Junior e todo o movimento empresa júnior, que me ensinaram a cada dia a ser uma pessoa e profissional melhor, ético e comprometido com a verdade.

Por fim, agradeço à UFES e todos que nela se fizeram presente nessa etapa de minha vida e de alguma forma contribuíram, direta ou indiretamente, para minha formação.

Maicon Silva Luxinger

RESUMO

O correto dimensionamento das ligações de bases de pilares de aço em blocos de concreto é essencial para uma estrutura segura e estável, sendo o comportamento estrutural desse conjunto relacionado ao tipo de base utilizado. Este trabalho aborda o dimensionamento de bases de pilares de perfis I, H, tubulares retangulares e tubulares circulares, de acordo com os esforços solicitantes de compressão, tração, momento fletor e cisalhamento. Os elementos da ligação dimensionados são as placas de base, os chumbadores, o bloco de concreto e barra de cisalhamento. Adicionalmente, quando as solicitações são elevadas e resultam em chapas muito espessas, foram dimensionados enrijecedores fixados aos pilares I e H. O programa desenvolvido foi implementado pelo *Visual Basic for Applications (VBA)*, no *Microsoft Office Excel*, e apresenta como resultado a verificação de ligações de bases de pilares, com base nos cálculos demonstrados em fluxogramas de dimensionamento. Como validação, foram verificados exemplos de ligações de placas de base encontrados em literatura técnica, inserindo os dados no programa. Os resultados apresentados foram comparados com a literatura e analisados quanto ao desvio percentual encontrado entre os dois valores, e foram observadas divergências em escala pequena entre os resultados, validando assim a funcionalidade do programa.

Palavras-chave: Estruturas de aço. Bases de pilares de aço. Interface Aço-Concreto. Ligações em estruturas de aço. Dimensionamento.

ABSTRACT

The correct design of links between steel columns and concrete foundations is essential for a safe and stable structure, and the structural behavior of those elements relates to the type of base being designed. This study consists on the sizing of base plates linked with columns of sections I, H, rectangular tubular, and circular tubular subjected to compression, traction, bending moment, and shear loads. The elements of the link analyzed were the base plates, anchor rods, concrete bases and shear lugs. Additionally, when the loads are excessive and result in plates of great thickness, reinforcement plates attached to the columns of I and H sections were designed. The computer program developed through this research was implemented using *Visual Basic for Applications (VBA)*, of *Microsoft Office Excel*, and exhibits as results the structural verification of base plate links, based on the proceedings presented in sizing method flowcharts. As validation, examples of base plate links from technical literature were verified, with its data inserted into the program. The results shown were then compared with the literature and analyzed given the percentage deviation found between the two values, being observed divergencies in small scale between the results, which validates the functionality of the program.

Keywords: Steel Structures. Steel Base Plates. Steel-Concrete Interface. Steel Structure Links. Design method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes de uma ligação de base de pilar	16
Figura 2 – Placas de base simples (a) e com enrijecedores (b).....	16
Figura 3 - Base de pilar solicitada por esforço de compressão	21
Figura 4 - Seções críticas para os diferentes tipos de base	22
Figura 5 - Base de pilar solicitada por esforço de tração	24
Figura 6 - Bases de pilar com pequena excentricidade solicitadas por esforços axiais e momento fletor	25
Figura 7 – Bases de pilar com grande excentricidade solicitadas por esforços axiais e momento fletor	26
Figura 8 - Formas para transferência de cisalhamento	27
Figura 9 - Tipos de chumbadores.....	28
Figura 10 - Tela inicial do programa LIGMETAL	36
Figura 11 - Tela de dados do projeto e escolha do tipo de base.....	37
Figura 12 - Tela de escolha do perfil de pilar	38
Figura 13 - Tela de dados de entrada das solicitações	39
Figura 14 - Tela de dados de entrada dos chumbadores.....	40
Figura 15 - Tela de dados de entrada das dimensões dos chumbadores.....	41
Figura 16 - Tela de dados de entrada das disposições construtivas.....	42
Figura 17 - Tela de dados de entrada da placa de base	43
Figura 18 - Tela de dados de entrada da base de concreto	44
Figura 19 - Tela de dados de entrada da barra de cisalhamento	45
Figura 20 - Tela de dados de entrada do enrijecedor.....	46
Figura 21 - Tela de verificação da placa de base.....	47
Figura 22 - Tela de verificação do bloco de concreto.....	48

Figura 23 - Tela de verificação dos chumbadores.....	49
Figura 24 - Tela de verificação da barra de cisalhamento.....	50
Figura 25 - Tela de verificação do enrijecedor	51
Figura 26 – Corte longitudinal e seção transversal do perfil I e placa de base rotulada	52
Figura 27 - Corte longitudinal e seção transversal do perfil I e placa de base engastada	60
Figura 28 - Corte longitudinal e seção transversal do perfil tubular circular e placa de base circular engastada	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Disposições construtivas.....	29
Tabela 2 - Dados de entrada de perfil I com base rotulada sujeita a esforço axial de tração e cisalhamento	53
Tabela 3 - Comparação dos resultados do programa com os resultados calculados para a combinação 1 do exemplo de base rotulada.....	57
Tabela 4 - Comparação dos resultados do programa com os resultados calculados para a combinação 2 do exemplo de base rotulada.....	58
Tabela 5 - Comparação dos resultados do programa com os resultados calculados para a combinação 3 do exemplo de base rotulada.....	58
Tabela 6 - Dados de entrada de perfil I com base engastada sujeita a esforço axial de tração, esforço cortante e momento fletor	60
Tabela 7 - Comparação dos resultados do programa com os resultados calculados para a combinação 1 do exemplo de base engastada	61
Tabela 8 - Comparação dos resultados do programa com os resultados calculados para a combinação 2 do exemplo de base engastada	62
Tabela 9 - Comparação dos resultados do programa com os resultados calculados para a combinação 3 do exemplo de base engastada	62
Tabela 10 - Dados de entrada de perfil tubular circular e placa de base circular engastada.....	64
Tabela 11 - Comparação dos resultados do programa com os resultados calculados para a combinação 1 do exemplo de base rotulada.....	70

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MINUSCULAS:

a – distância da linha de chumbadores, ou do círculo formado pelos chumbadores no caso de placa circular, à linha de centro da placa

a_1 – distância do centro do chumbador à borda da placa de base

a_2 – distância entre os chumbadores

a_3 – distância do chumbador à borda do bloco de concreto

a_4 – distância entre os centros dos furos e a face da alma do pilar

b – largura do perfil tubular retangular

b_{bc} – comprimento da barra de cisalhamento

b_f – largura da mesa do perfil I ou H

c – distância

c_{bc} – distância da face inferior da placa de base até o centro de atuação das tensões de compressão no bloco de concreto

d – altura do perfil I ou H

d_{ca} – diâmetro do chumbador

d_f – diâmetro do furo

d_t – diâmetro externo do perfil tubular circular

e – excentricidade equivalente

e_{crit} – excentricidade crítica

f_{ck} – resistência característica do concreto à compressão

$f_{ck,bl}$ – resistência característica do concreto à compressão do bloco de concreto

$f_{ck,ar}$ – resistência característica do concreto à compressão da argamassa expansiva

$f_{u,ca}$ – resistência à ruptura do aço do chumbador

f_y – resistência ao escoamento do aço

$f_{y,ca}$ – resistência ao escoamento do aço dos chumbadores

$f_{y,bc}$ – resistência ao escoamento do aço da barra de cisalhamento

h – altura dos perfis I, H e tubular retangular

h_{an} – comprimento de ancoragem do chumbador

h_{ar} – espessura da camada de argamassa de assentamento/grout

h_{bc} – altura da barra de cisalhamento

h_{bl} – altura do bloco de concreto

h_t – distância do centro da placa à linha dos chumbadores

l_c – comprimento de contato

l_d – diâmetro da placa de base circular

$l_{m\acute{a}x}$ – comprimento máximo entre m , n e $\lambda n'$

m – comprimento de balanço

m_{eq} – comprimento de balanço equivalente

n – comprimento de balanço

n_t – número total de chumbadores da placa

$n_{t,eq}$ – número de chumbadores equivalente da placa

p – largura do chumbador tracionado

t_{ae} – espessura da arruela especial

t_{bc} – espessura da barra de cisalhamento

t_f – espessura da mesa do perfil I ou H

t_{pb} – espessura da placa

t_q – espessura da alma do perfil I ou H

LETRAS ROMANAS MAIUSCULAS:

A_1 – área da placa de base

A_2 – área da superfície de concreto

A_{cp} – área de contato entre a face superior da porca embutida e o concreto

$A_{e,ca}$ – área efetiva da seção transversal do chumbador

$A_{g,ca}$ – área bruta da seção transversal do chumbador

A_{rc} – área de ruptura do concreto

B_{bl} – largura do bloco de concreto

B_{pb} – largura da placa de base

$B_{pb,eq}$ – largura da placa de base equivalente

H_{bl} – comprimento do bloco de concreto

H_{pb} - comprimento da placa de base

$F_{t,Rd}$ – força de tração resistente de cálculo do chumbador

$F_{t,Rd,y}$ – força de tração resistente de escoamento da seção bruta do chumbador

$F_{t,Rd,u}$ – força de tração resistente de escoamento da parte rosqueada do chumbador

$F_{t,Rd,ac}$ – força de tração resistente de arrancamento do chumbador

$F_{t,sd}$ – força de tração solicitante de cálculo do chumbador

$F_{v,Rd}$ – força de cisalhamento resistente no fuste dos chumbadores

L_h – comprimento da dobra a 90° do chumbador

$M_{pb,Rd}$ – momento resistente de cálculo da placa

M_{sd} – momento solicitante de cálculo

$M_{pb,sd}$ – momento solicitante de cálculo da placa

$M_{bc,sd}$ – momento solicitante de cálculo da barra de cisalhamento

$M_{bc,Rd}$ – momento resistente de cálculo da barra de cisalhamento

M_{en} – momento solicitante de cálculo no enrijecedor

N_{sd} – força axial solicitante de cálculo

$N_{c,sd}$ – força axial de compressão solicitante de cálculo

$N_{t,sd}$ – força axial de tração solicitante de cálculo

$V_{at,Rd}$ – força de atrito resistente de cálculo

$V_{ca,sd}$ – força de cisalhamento solicitante de cálculo dos chumbadores

$V_{ca,Rd}$ – força de cisalhamento resistente de cálculo dos chumbadores

$V_{bc,sd}$ – força de cisalhamento solicitante de cálculo da barra de cisalhamento

$V_{bc,Rd}$ – força de cisalhamento resistente de cálculo da barra de cisalhamento

V_{sd} – força de cisalhamento solicitante de cálculo

V_{Rd} – força de cisalhamento resistente de cálculo

W_{en} – módulo resistente elástico

Y – seção comprimida do bloco de concreto

LETRAS GREGAS MINUSCULAS:

α – parâmetro

μ – coeficiente de atrito

σ – tensão normal

γ_{a1} – coeficiente de ponderação relativo ao estado limite último de escoamento do aço

γ_{a2} – coeficiente de ponderação relativo ao estado limite último de ruptura do aço

γ_c – coeficiente de ponderação da resistência do concreto

$\sigma_{c,Rd}$ – tensão resistente de cálculo do concreto à pressão de contato

$\sigma_{c,sd}$ – tensão solicitante de cálculo do concreto à pressão de contato

$\sigma_{bc,Rd}$ – tensão resistente de cálculo do concreto junto à barra de cisalhamento

$\sigma_{bc,sd}$ – tensão solicitante de cálculo do concreto junto à barra de cisalhamento

$\sigma_{en,Rd}$ – tensão resistente de cálculo dos enrijecedores

$\sigma_{en,sd}$ – tensão solicitante de cálculo dos enrijecedores

$\sigma_{v,en,Rd}$ – tensão cortante resistente de cálculo dos enrijecedores

$\sigma_{v,en,sd}$ – tensão cortante solicitante de cálculo dos enrijecedores

$\tau_{c,Rd}$ – tensão de cisalhamento resistente de cálculo

LETRAS GREGAS MAIUSCULAS:

Δ – comprimento a ser acrescentado no cálculo de H_{pb}

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. JUSTIFICATIVA	17
1.2. OBJETIVOS	17
1.2.1. Objetivos Gerais	17
1.2.2. Objetivos Específicos	17
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS DE UMA PLACA DE BASE	19
2.1.1. Tensão Resistente do Concreto	19
2.2. DIMENSIONAMENTO DE PLACA DE BASE	20
2.2.1. Esforços Axiais de Compressão	20
2.2.2. Esforços Axiais de Tração	22
2.2.3. Esforço Axial e Momento Fletor	24
2.2.3.1. <i>Dimensionamento de placa de base com pequena excentricidade</i>	24
2.2.3.2. <i>Dimensionamento de placa de base com grande excentricidade</i>	25
2.2.4. Esforço Cisalhante	26
2.2.4.1. <i>Atrito</i>	26
2.2.4.2. <i>Barra de Cisalhamento</i>	27
2.2.4.3. <i>Chumbadores</i>	28
2.3. DIMENSIONAMENTO DE BARRAS DE CISALHAMENTO	30
2.4. DIMENSIONAMENTO DE ENRIJECEDORES	30
2.4.1. Recomendações	31
2.4.1.1. <i>Usinagem</i>	31

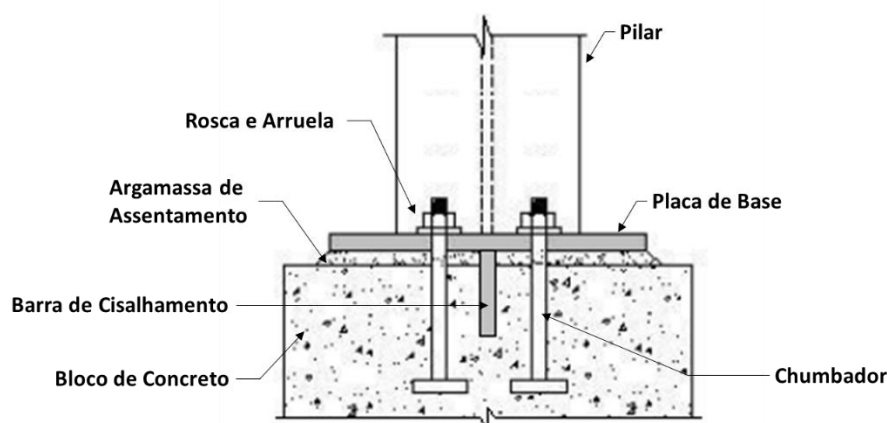
2.4.1.2. Nivelamento	31
2.4.1.3. Interligação entre Placa e Chumbadores	31
3. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	32
3.1. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROGRAMA.....	32
3.2. O PROGRAMA LIGMETAL	32
3.3. LIMITAÇÕES E ABRANGÊNCIAS DO PROGRAMA.....	34
3.4. INTERFACE DO PROGRAMA.....	35
4. VALIDAÇÃO DO PROGRAMA E RESULTADOS	52
4.1. PILAR DE SEÇÃO I EM BASE ROTULADA SUJEITA A ESFORÇO AXIAL E CORTANTE	52
4.2. PILAR DE SEÇÃO I EM BASE ENGASTADA SUJEITA A ESFORÇO AXIAL, CISALHAMENTO E MOMENTO FLETOR.....	59
4.3. PILAR DE SEÇÃO TUBULAR CIRCULAR COM PLACA DE BASE CIRCULAR SUJEITA A ESFORÇO AXIAL, CISALHAMENTO E MOMENTO FLETOR.....	63
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
5.1. CONCLUSÕES	71
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS.....	73
APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DE VERIFICAÇÃO DE BASES COM PERFIL I OU H SUJEITAS À COMPRESSÃO	74
APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DE VERIFICAÇÃO DE BASES COM PERFIL I OU H SUJEITAS À TRAÇÃO	77
APÊNDICE C – FLUXOGRAMA DE VERIFICAÇÃO DE BASES COM PERFIL I OU H SUJEITAS AO CISALHAMENTO	80

APÊNDICE D – FLUXOGRAMA DE VERIFICAÇÃO DE ENRIJECEDORES.....	83
APÊNDICE E – FLUXOGRAMA DE VERIFICAÇÃO DE BASES DE PERFIL TUBULAR COMPRIMIDAS	84
APÊNDICE F – FLUXOGRAMA DE VERIFICAÇÃO DE BASES DE PERFIL TUBULAR TRACIONADAS.....	87
APÊNDICE G – FLUXOGRAMA DE VERIFICAÇÃO DE BASES DE PERFIL TUBULAR SOLICITADAS AO CISALHAMENTO.....	90

1. INTRODUÇÃO

As ligações de bases são utilizadas na junção do aço com o concreto, tendo como principal função transmitir os esforços solicitantes dos pilares para a fundação. De modo geral, essa ligação é constituída pela placa de base, ligada a fundação por meio da argamassa de assentamento e dos chumbadores, podendo ser instalada barra de cisalhamento, como mostrado na Figura 1.

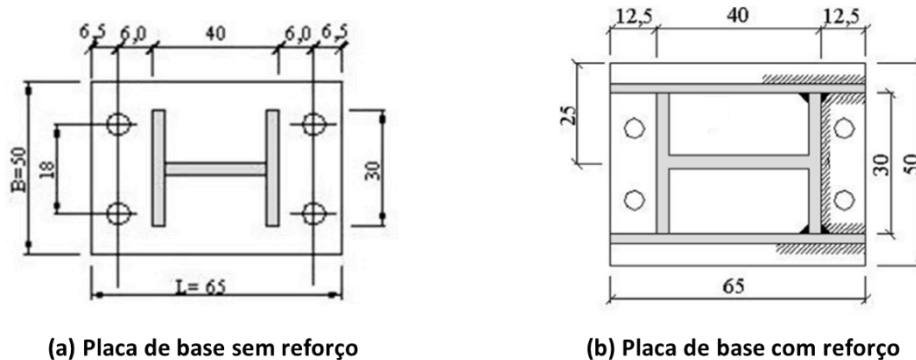
Figura 1 - Componentes de uma ligação de base de pilar



Fonte: Autores

Onde há cargas de grande magnitude atuando na ligação, o dimensionamento pode resultar em espessuras excessivas para a placa de base. Uma solução possível para essa situação é a especificação de reforços na placa de base por meio de enrijecedores, como indicado na Figura 2.

Figura 2 – Placas de base simples (a) e com enrijecedores (b)



Fonte: Bellei (2006)

Geralmente, as ligações de base de pilares podem estar sujeitas a esforços de compressão, tração, momentos fletores e cortantes, o que pode levar a estrutura ao seu estado limite último, incluindo a ruptura ou escoamento do metal na base de ligação.

Os detalhes da ligação entre os elementos devem ser organizados de forma a impedir manifestações patológicas, como rachaduras devido a fluência do concreto, encolhimento e movimento devido a temperatura, entre outros, além de resistir as solicitações e acomodar as deformações devido aos efeitos das cargas. A seleção do material e os detalhes do projeto das placas de base podem afetar significativamente o custo de fabricação e montagem das estruturas.

1.1. JUSTIFICATIVA

Com o avanço da tecnologia tornou-se viável a implementação de programas computacionais, a fim de facilitar o desenvolvimento de cálculos e modelos matemáticos. Para o âmbito acadêmico, é de extrema importância o desenvolvimento de tais ferramentas, de forma a simplificar e facilitar o entendimento sobre o assunto, tornando o aprendizado do estudante dinâmico.

Para as empresas de engenharia, principalmente as empresas de projetos estruturais, o uso de ferramentas computacionais que realizam e verificam os cálculos de seus projetos são de importância ímpar, uma vez que poupam tempo e custos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver um programa computacional para dimensionamento de ligações de placas de base de pilar de aço em apoios de concreto.

1.2.2. Objetivos Específicos

Apresentam-se como objetivos específicos:

- Estudar os critérios de dimensionamento de ligações de placa de bases de pilares de aço de acordo com Fisher e Kloiber (2006), a norma americana ACI 318:2014, a ABNT NBR 8800:2008 e a ABNT NBR 16239:2013;
- Implementar um programa computacional, utilizando a linguagem de programação *Visual Basic for Applications (VBA)* do *Microsoft Excel*, para o dimensionamento de ligações de interface aço-concreto;
- Validar o programa desenvolvido por meio de exemplos da literatura técnica de dimensionamento de ligações de placas de bases de pilares de aço.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Inicialmente, no capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica, utilizando as literaturas de maior relevância relacionadas ao dimensionamento de bases de pilares de aço e seus elementos constituintes. Em seguida, no capítulo 3, é abordada a implementação computacional realizada, suas limitações e abrangências e também é apresentada a interface do programa. No capítulo 4 é realizada a validação do programa e a análise dos resultados, onde é feito um comparativo entre o dimensionamento apresentado nos exemplos dados pela literatura estudada e os resultados entregues pelo programa para o mesmo exemplo. Em seguida, no capítulo 5 é feita uma conclusão diante dos resultados obtidos. Por último, são apresentados nos apêndices os fluxogramas de cálculo utilizados para a implementação computacional.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS DE UMA PLACA DE BASE

Sendo as ligações da placa de base de pilar a interface crítica entre estrutura de aço e a fundação, as mesmas costumam ser os últimos itens a serem dimensionados, porém são os primeiros itens necessários na execução da obra.

Esses tipos de ligações são utilizados para suportar as cargas de gravidade e funcionam como parte dos sistemas de resistência de carga lateral, sendo necessário uma demanda não apenas estrutural, mas também construtiva. (FISHER e KLOIBER, 2006).

É importante, primeiramente, verificar o estado limite último de esmagamento do concreto na região de contato, de modo a obter as dimensões horizontais da placa de base, atendendo os requisitos de capacidade portante do bloco de concreto aos esforços de compressão. Também é necessário a verificação dos elementos de uma base, como a placa, os chumbadores e a barra de cisalhamento.

2.1.1. Tensão Resistente do Concreto

A ABNT NBR 8800:2008, define a tensão resistente de cálculo do concreto à tensão que a placa de base faz na superfície do elemento de fundação de concreto, conforme a Equação 1.

$$\sigma_{c,Rd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c \gamma_n} \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq f_{ck} \quad (1)$$

Onde:

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão;

γ_c é o coeficiente de ponderação do concreto;

γ_n é o coeficiente de comportamento, com valor de 1,40;

A_1 é a área da placa de base;

A_2 é a área da superfície de concreto homotética a A_1 .

Em caso de superfícies não homotéticas em relação à área comprimida da placa de base, A_2 deve ser calculado por meio do espraimento da área A_1 . Entretanto, ressalta-se que esse acréscimo chega ao limite máximo quando $A_2 = 4A_1$. Desse modo, a razão entre $\sqrt{A_2/A_1}$ deve ser menor ou igual a 2.

2.2. DIMENSIONAMENTO DE PLACA DE BASE

Nas ligações entre placas de base e a fundação podem ser utilizados os furos tipo padrão, porém, como se trata de uma ligação de materiais diferentes e com precisões construtivas diferentes, é comum utilizar furos alargados para facilitar a montagem.

A *AISC Design Guide*, de Fisher e Kloiber (2006), define cinco casos de cargas de dimensionamento diferentes em ligações de placa base e pilar:

- Esforços Axiais de compressão;
- Esforços Axiais de tração;
- Placas de base submetidas a pequenos momentos;
- Placas de base submetidas a grandes momentos;
- Dimensionamento para esforços de cisalhamento.

De modo geral, o dimensionamento para cargas de cisalhamento e cargas de momento são frequentemente executados de forma independente, pressupondo-se que não haja interação significativa entre eles.

2.2.1. Esforços Axiais de Compressão

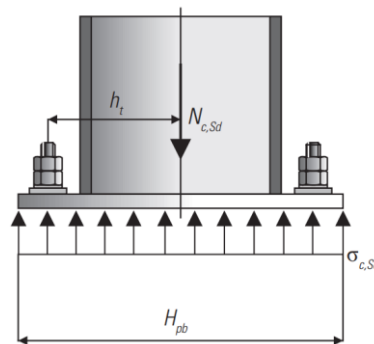
A placa de base deve ter capacidade resistente suficiente para receber as cargas axiais de compressão ou de tração do pilar. As dimensões horizontais são definidas pelo estado limite último de esmagamento do concreto e sua espessura deve ser suficiente para atender o limite de escoamento da placa de base causado pela flexão da chapa. Neste trabalho foi considerado que o pilar se encontra centralizado na placa de base.

Para os casos de dimensionamento de esforços axiais, as tensões entre a placa e o apoio de concreto são consideradas uniformemente distribuídas, conforme Equação 2.

$$\sigma_{c,Sd} = \frac{N_{Sd}}{A_1} \quad (2)$$

Onde N_{Sd} é a força à compressão solicitante de cálculo e A_1 a área comprimida da placa de base. A Figura 3 exemplifica uma base de pilar com esforço axial de compressão atuante.

Figura 3 - Base de pilar solicitada por esforço de compressão



Fonte: Notas de aula

Ao igualarmos as equações (1) e (2), pode-se determinar a área mínima de uma placa de base, como mostra a Equação 3.

$$A_{1,min} = \frac{N_{Sd}\gamma_c\gamma_n}{f_{ck}} \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \leq \frac{N_{Sd}\gamma_c\gamma_n}{2f_{ck}} \quad (3)$$

Segundo Fisher e Kloiber (2006), pode-se separar o dimensionamento das placas de base sujeitas a esforços de compressão em duas situações:

- Caso 1: $A_2 = A_1$
- Caso 2: $A_1 < A_2 \leq 4A_1$

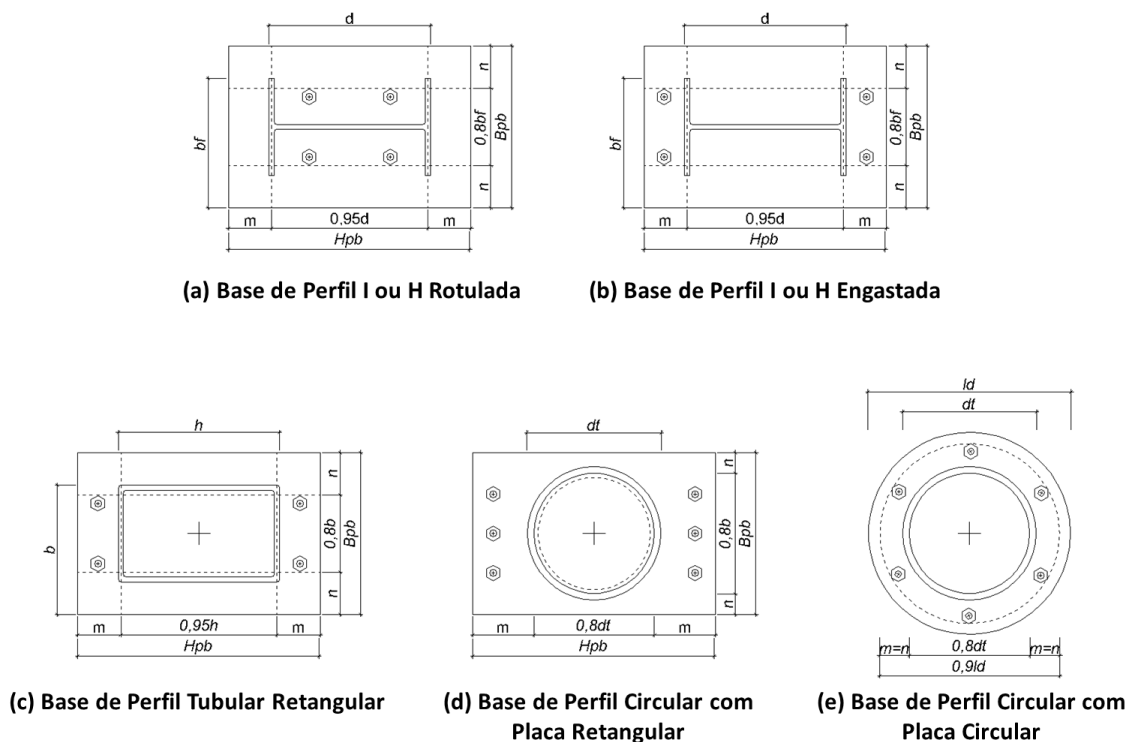
Onde A_2 é a área da superfície de concreto homotética a A_1 .

Em abordagens convencionais, define-se $A_2 = A_1$ (Caso 1), no entanto esse tipo de abordagem resulta em dimensões horizontais maiores da placa base. No Caso onde $A_2 \geq A_1$ obtém-se menores dimensões de placas de base, sendo mais econômico. Não é permitido que A_2 seja maior que $4A_1$.

É comum em projetos ter-se a área de concreto já definida, sendo necessário determinar as dimensões da placa de base a partir da área calculada. Por sua vez A_2 é calculado por meio da área da homotética a A_1 e verifica-se $\sigma_{c,Sd} \leq \sigma_{c,Rd}$. Ao selecionar as dimensões da placa base, deve-se localizar os chumbadores e utilizar as disposições construtivas conforme especificações de Fakury *et al* (2016).

Para o dimensionamento da espessura da placa de base, considera-se que ela está engastada em uma região central, definida na Figura 4, e possui as bordas livres. A reação da tensão entre a placa de base e o bloco de concreto será considerada como tensão solicitante de cálculo e sua espessura deve ser suficiente para resistir à flexão nas seções críticas.

Figura 4 - Seções críticas para os diferentes tipos de base



Fonte: Autores

2.2.2. Esforços Axiais de Tração

Fisher e Kloiber (2006) definem quatro etapas para o dimensionamento de chumbadores solicitados por esforços de tração:

- Determinação do posicionamento do pilar;

- b. Seleção do material, do número e do tamanho dos chumbadores para resistir aos esforços de cisalhamento e/ou tração;
- c. Determinação das dimensões apropriadas da placa de base para transferir os esforços solicitantes;
- d. Determinação do método para definir a resistência da barra de ancoragem dos chumbadores no bloco de concreto.

A resistência à tração de um chumbador é igual a resistência da ancoragem de concreto do grupo de chumbadores, ou de parte dos chumbadores submetidos à tração, em caso de bases com grande excentricidade devido ao momento, e a soma da resistência à tração do aço dos chumbadores contribuintes (FISHER e KLOIBER, 2006).

Para as ligações de chumbadores submetidos a tração, a capacidade resistente é considerada a menor das somas das resistências à tração do aço, dos chumbadores individuais contribuintes ou a resistência a tração do concreto do grupo de chumbadores.

Para solicitação ocasionada por esforços de tração em placas de base de pilar deve-se ter atenção ao dimensionamento dos chumbadores, pois estados limites últimos como ruptura e arrancamento dos chumbadores podem levar a placa de base ao colapso. A força de tração atuante nos chumbadores pode ser calculada por meio da Equação 4.

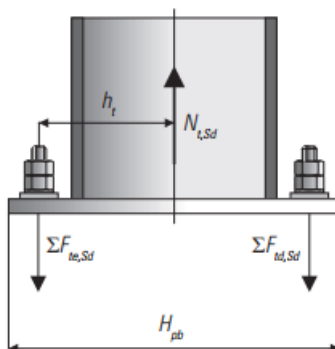
$$F_{t,Sd} = \frac{N_{Sd}}{n_t} \quad (4)$$

Após calculada a força de tração solicitante de cálculo nos chumbadores deve ser verificado se esta é menor que a força de tração resistente de cálculo, comparando as forças conforme mostrado na Equação 5.

$$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd} \quad (5)$$

A Figura 5 exemplifica uma base de pilar com esforço axial de tração atuante.

Figura 5 - Base de pilar solicitada por esforço de tração



Fonte: Notas de aula

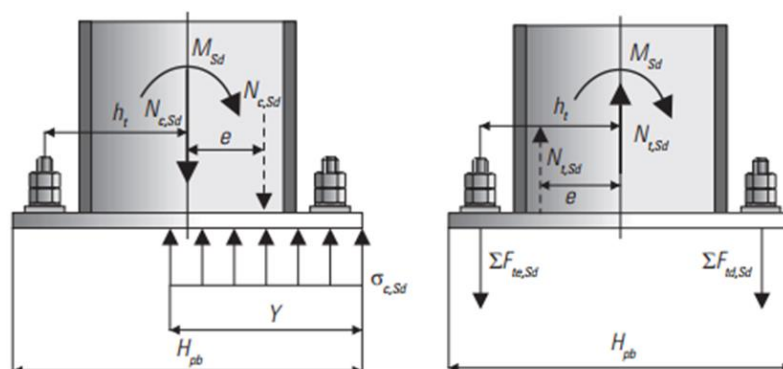
2.2.3. Esforço Axial e Momento Fletor

Para este tipo de carregamento em especial, Fisher e Kloiber (2006), estabelece que deve ser analisado duas situações distintas: placas de base solicitadas por pequenos momentos fletores (pequena excentricidade) e placas de base solicitadas por grandes momentos fletores (grande excentricidade).

2.2.3.1. Dimensionamento de placa de base com pequena excentricidade

Segundo Drake e Elkin (1999) apud Fisher e Kloiber (2006), a metodologia utilizada para o dimensionamento considera distribuição uniforme das tensões na placa de base. Em casos de pequenas excentricidades (Figura 6), a força axial é resistida apenas pelo contato entre a placa de base e o apoio de concreto. Já no caso de grandes excentricidades é necessário o uso de chumbadores tracionados para equilibrar os esforços na ligação.

Figura 6 - Bases de pilar com pequena excentricidade solicitadas por esforços axiais e momento fletor



Fonte: Notas de aula

De modo geral, o procedimento de cálculo para o dimensionamento segue as seguintes etapas:

1. Determinação da força axial e do momento fletor solicitante de cálculo;
2. Escolha das dimensões da placa de base;
3. Determinação da excentricidade (e), dada pela Equação 6, e a excentricidade crítica ($e_{crít}$).

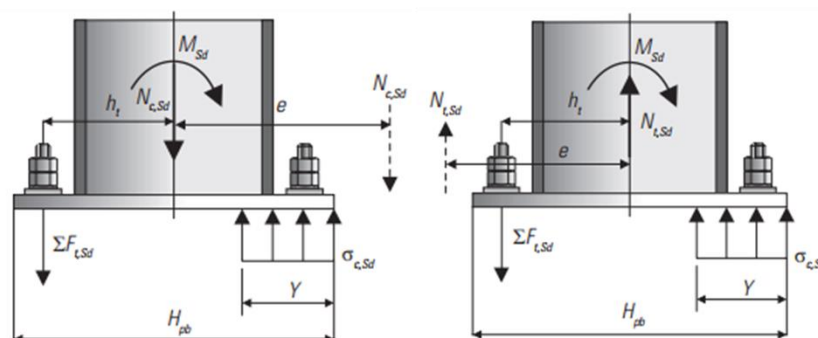
$$e = \frac{M_{Sd}}{N_{Sd}} \quad (6)$$

4. Quando $e \leq e_{crít}$ considera-se base de pequena excentricidade e segue-se para a próxima etapa, caso contrário, segue-se para a determinação de bases submetidas a grandes excentricidades.
5. Determinação da distância comprimida do concreto (Y);
6. Determinação da espessura da placa de base (t_{pb});
7. Determinação do comprimento da ancoragem do chumbador (h_{an}).

2.2.3.2. Dimensionamento de placa de base com grande excentricidade

Nos casos em que a magnitude do momento fletor é grande em relação à carga axial do pilar (Figura 7), utiliza-se os chumbadores para conectar a placa de base às fundações de concreto, impedindo que a base se incline apoiado na borda comprimida do bloco de concreto.

Figura 7 – Bases de pilar com grande excentricidade solicitadas por esforços axiais e momento fletor



Fonte: Notas de aula

Os procedimentos utilizados para o dimensionamento seguem o proposto por Fisher e Kloiber (2006):

1. Determinação da força axial e do momento fletor solicitante de cálculo;
2. Escolha das dimensões da placa de base;
3. Determinação da excentricidade (e) e a excentricidade crítica (e_{crit});
4. No caso de $e > e_{crit}$ segue-se para a próxima etapa. Em caso contrário, utiliza-se os procedimentos para bases de pequena excentricidade.
5. Determinação da distância comprimida do concreto (Y) e a tração aplicada no grupo de chumbadores ($\Sigma F_{t,sd}$);
6. Determinação da espessura da placa de base (t_{pb});
7. Determinação do comprimento da ancoragem do chumbador (h_{an}).

2.2.4. Esforço Cisalhante

De acordo com Fisher e Kloiber (2006), no dimensionamento, existem três formas para transferir o cisalhamento das placas de base de pilares de aço para o concreto:

2.2.4.1. Atrito

Aplicada nas situações em que a placa de base e o concreto estão submetidos às solicitações de compressão, onde a argamassa de preenchimento possui aderência e desenvolve capacidade de absorver os esforços de cisalhamento e resistir as forças laterais. De acordo com a ACI 318:2014, esta resistência proveniente do atrito pode ser calculada de acordo com a Equação 7.

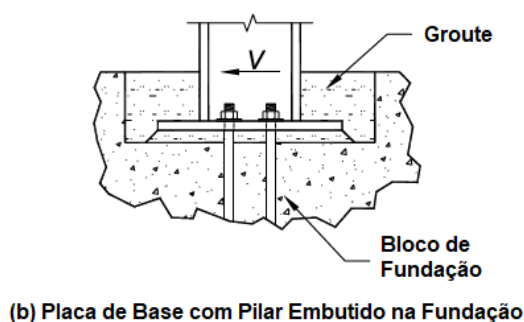
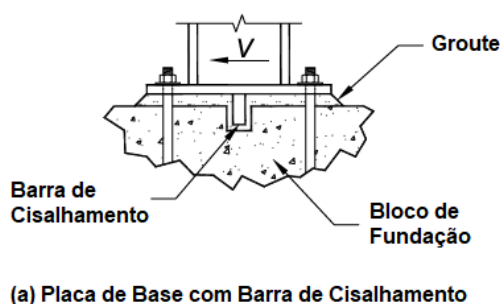
$$V_{at,Rd} \leq \begin{cases} 0,7\mu N_{c,Sd} \\ 0,2f_{ck,bl}YB_{pb} \end{cases} \quad (7)$$

Onde μ é dado por 0,55 para o contato entre o aço e a argamassa de assentamento e 0,7 para o aço no concreto.

2.2.4.2. Barra de Cisalhamento

As forças de cisalhamento podem ser transferidas pelo uso de barras de cisalhamento ou ainda pelo embutimento do pilar na fundação, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 - Formas para transferência de cisalhamento



Fonte: Fisher e Kloiber (2006)

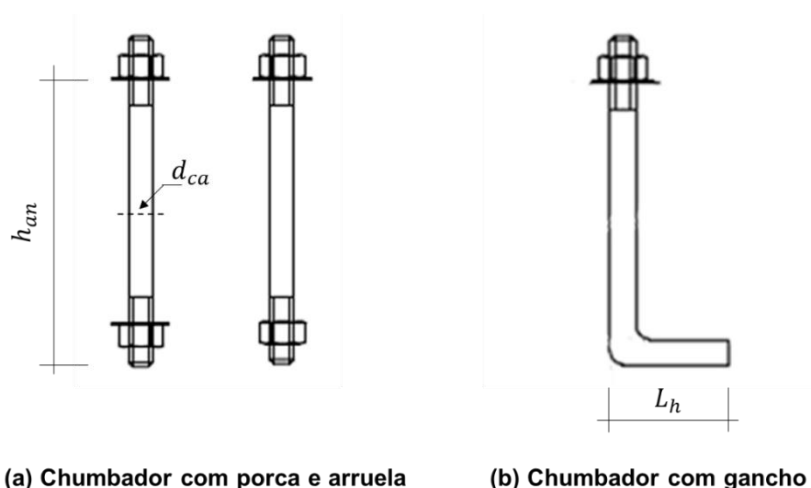
Segundo Fisher e Kloiber (2006), deve-se ter atenção à flexão gerada na placa de base resultante das forças na barra de cisalhamento, visto que pode apresentar problemas quando o cisalhamento da placa de base é grande e a força de flexão da barra de cisalhamento é em torno do eixo desfavorável do pilar. Via de regra a placa de base deve apresentar espessura igual ou maior que a da barra de cisalhamento.

Pode se utilizar mais de uma barra de cisalhamento para resistir a grandes forças de cisalhamento. Para casos em que toda a força cisalhante seja resistida pelo atrito entre a placa de base e o apoio de concreto a barra de cisalhamento pode ser dispensada.

2.2.4.3. Chumbadores

Os chumbadores estão presentes em todas as ligações de placas de base de pilares e tem a finalidade de garantir a fixação da placa de base à fundação de concreto. Esses atuam também conferindo estabilidade ao pilar na etapa de montagem da estrutura. O presente trabalho aborda dois tipos de chumbadores, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Tipos de chumbadores



Fonte: Autores

Segundo Bellei (2009), o comprimento (h_{an}) do chumbador deve ser no mínimo $12d_{ca}$ para chumbadores com aço SAE 1020 e ASTM A36. Recomenda-se o uso de pelo menos quatro chumbadores simetricamente dispostos sobre a placa de base com diâmetro mínimo de $19,05\text{ mm}$ para as bases de perfis I ou H. Para o caso de bases rotuladas é frequente o uso de 2 chumbadores sobre a base do pilar, porém sua utilização pode causar problemas de estabilidade na montagem da estrutura.

A ABNT NBR 16239:2013 sugere dimensões para as disposições construtivas de acordo com os diâmetros usuais dos chumbadores utilizados conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Disposições construtivas

Chumbador		Furo	Arruela Especial t_{ae} (mm)	Argamassa h_{ar} (mm)
Diâmetro d_{ca}		Diâmetro d_h (mm)		
(pol)	(mm)			
3/4	19,05	33	9,5	40
7/8	22,23	40	9,5	50
1	25,40	45	12,5	60
1 1/4	31,75	50	12,5	60
1 1/2	38,10	60	12,5	70
1 3/4	44,45	70	19,0	80
2	50,80	80	22,0	90

Para o caso de esforços axiais de tração atuantes na placa de base é função do chumbador resistir a essas solicitações, podendo ainda resistir aos esforços combinados de cisalhamento e tração. Segundo a ABNT NBR 8800:2008, a força de tração resistente de cálculo ($F_{t,Rd}$) de um chumbador é dada pela Equação 8.

$$F_{t,Rd} = 0,75 \frac{f_{ub} A_b}{\gamma_{a2}} \quad (8)$$

Onde:

f_{ub} é a resistência a ruptura do material do chumbador;

A_b é a área bruta do chumbador;

γ_{a2} é o coeficiente de ponderação relativo ao estado limite último de ruptura do aço.

O uso de chumbadores para transferência de forças de cisalhamento deve ser examinado cuidadosamente, em especial pela maneira como a força é transferida da placa de base para os chumbadores.

A força de cisalhamento resistente de cálculo ($F_{v,Rd}$) é apresentada pela ABNT NBR 8800:2008 conforme a Equação 9.

$$F_{v,Rd} = 0,40 \frac{f_{ub} A_b}{\gamma_{a2}} \quad (9)$$

Para os chumbadores a força de cisalhamento resistente de cálculo deve ser calculada de forma individual, pois pode haver variações entre os chumbadores devido a possibilidade de estarem sujeitos a diferentes forças de tração solicitantes de cálculo.

O arrancamento do chumbador do bloco de concreto é um modo de falha em potencial, com isso a resistência ao cisalhamento do aço deve ser consistente com a superfície de arrancamento.

2.3. DIMENSIONAMENTO DE BARRAS DE CISALHAMENTO

As barras de cisalhamento são chapas soldadas perpendicular à face inferior da placa de base, embutidas no bloco de concreto da fundação e são comumente utilizadas nas ligações de placas bases de pilares em que se tem esforços de cisalhamento de grandes magnitudes.

A barra de cisalhamento trabalha pressionando o concreto do bloco de fundação e por essa razão recomenda-se que sua altura (h_{bc}) seja pelo menos duas vezes a altura da argamassa de assentamento. É recomendado, que a espessura da placa de base tenha pelo menos a mesma espessura da barra de cisalhamento ($t_{bc} \leq t_{pb}$) a fim de prevenir a flexão na placa de base.

2.4. DIMENSIONAMENTO DE ENRIJECEDORES

Devido a carregamentos de grande intensidade incidente sobre os pilares, as placas de base a serem utilizadas podem ter espessuras excessivas, fazendo-se necessário reduzir tais dimensões (BELLEI, 2009). Desse modo surge o uso dos enrijecedores, que tem a função de auxiliar a distribuição do carregamento atuante e resistir juntamente aos esforços de flexão. Há diversas utilizações de enrijecedores, variando de acordo com o tipo de pilar, esforços e solicitações (MINCHILLO, 2004).

Ressalta-se que a solução mais fácil e simples para a fabricação de placas de base é a utilização da mesma sem reforços. Porém, é de comum acordo que a dificuldade de aquisição de certas espessuras, execução da instalação ou ainda problemas econômicos podem fazer necessário o uso de chapas de reforço.

O cálculo da capacidade resistente dos enrijecedores é feito de maneira simples, por meio da parcela da tensão que o enrijecedor está sujeito. Segundo Bellei (2009),

recomenda-se que a altura da chapa deve ser aproximadamente o dobro da sua largura.

2.4.1. Recomendações

Bellei (2009) faz algumas recomendações sobre o uso dos enrijecedores, visando uma melhor funcionalidade para o mesmo:

2.4.1.1. Usinagem

Placas de base com espessuras entre 50 a 100 mm devem ser usinadas do lado de contato com o pilar, sendo necessário um acréscimo de 5 mm na espessura. Já para placas de espessuras superiores a 100 mm, deve-se efetuar a usinagem de ambos os lados, considerando assim um acréscimo de 10 mm na espessura.

2.4.1.2. Nivelamento

Antes de se aplicar a argamassa de preenchimento é necessário realizar o nivelamento da placa com calços, parafusos calantes ou porcas. Desse modo, evita-se uma concentração muito grande de cargas em certos pontos do bloco de fundações.

2.4.1.3. Interligação entre Placa e Chumbadores

Pode-se realizar esse tipo de ligação de duas formas para o caso de placas soltas: com chumbadores ou com porcas e arruelas. Já para o caso de placas soldadas ao pilar durante a fabricação, recomenda-se apenas o uso de chumbadores.

3. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Foi implementado um programa computacional, o *LIGMETAL*, para verificação do dimensionamento de bases de pilares de aço de acordo com as normas brasileiras e americanas vigentes, com a finalidade de automatizar o dimensionamento dos elementos constituintes dessa ligação.

Com o intuito de divulgar o *LIGMETAL*, são abordados o correto funcionamento da ferramenta computacional, a linguagem de programação utilizada para a implementação do programa, a função do programa, os elementos da base de pilar que podem ser dimensionados com esta ferramenta e os dados retornados por ela. Também são apresentadas as suas limitações e abrangências, bem como a sua interface computacional.

3.1. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROGRAMA

Para a implementação do programa foi escolhido a linguagem de programação *Visual Basic*, no ambiente *Visual Basic for Applications* (2016) do *Microsoft Excel*. A escolha da ferramenta de programação se deu pela sua facilidade na utilização e implementação do código computacional. Ademais, objetivou-se entregar uma ferramenta de fácil acesso e entendimento para os usuários.

3.2. O PROGRAMA *LIGMETAL*

O programa *LIGMETAL* tem como finalidade o cálculo e a verificação do dimensionamento de ligações de placas de base de pilares aço e os blocos de concreto, bem como os elementos constituintes dessa ligação. Em situações onde o dimensionamento não é atendido pelos requisitos das normas vigentes, fornece sugestões de dimensões que atendam a esses requisitos.

Objetiva-se com o programa entregar à comunidade uma ferramenta de fácil acesso e utilização, que seja ágil no cálculo das verificações de placas de base de pilares de aço e seus elementos. Podendo ser utilizado por profissionais para desenvolvimento e verificação de projetos dessas estruturas e também pela comunidade acadêmica para uso em pesquisas e desenvolvimento de trabalhos acadêmicos na área.

O programa calcula e verifica as dimensões das placas de base de pilares, chumbadores e suas disposições na estrutura, barra de cisalhamento e enrijecedores e suas dimensões, bem como o elemento de concreto da fundação que receberá o pilar de aço.

O *LIGMETAL* possibilita o cálculo e dimensionamento da base de pilar para diversos casos de solicitações como esforços de tração e compressão pura, esforços de cisalhamento e tração e compressão com momento fletor.

Para a utilização do programa é necessário a inserção de dados de entrada, são eles:

- Dados do projeto: nome do projeto, nome do projetista e a data de elaboração (dados de preenchimento opcional);
- Tipo de base: a geometria do perfil do pilar e da placa de base (base retangular com perfil I ou H rotulada, base retangular com perfil I ou H engastada, base retangular com perfil tubular retangular e circular e base circular com perfil tubular circular);
- Dados do perfil: as dimensões do perfil do pilar de aço (podendo ser escolhido entre os perfis do banco de dados cadastrado no programa ou dados manuais preenchidos pelo usuário);
- Solicitações da placa de base: os esforços solicitantes de tração ou compressão, cisalhamento e momento fletor atuantes na placa de base;
- Chumbadores: tipo de chumbador (com gancho ou com porca e arruela), quantidade e dimensão dos chumbadores e a resistência ao escoamento e resistência a ruptura do aço (pode-se escolher dentre os materiais cadastrados ou inserção manual pelo usuário);
- Disposições construtivas: as distâncias de locação dos chumbadores na placa de base;
- Placa de base: dimensões da placa de base e resistência ao escoamento do material (para o caso da resistência ao escoamento pode-se escolher entre os materiais cadastrados e inserção manual);
- Base de concreto: dimensões do apoio de concreto da fundação e a resistência característica do concreto e da argamassa de assentamento

(para o caso da resistência do concreto essa opção pode ser escolhida dentre as já fornecida pelo programa ou inserção manual pelo usuário);

- Barra de cisalhamento: dimensões da barra de cisalhamento e resistência ao escoamento do material (pode-se escolher entre os materiais cadastrados ou inserção manual pelo usuário);
- Enrijecedores: dimensões das chapas de enrijecedores, quantidade de chapas e resistência ao escoamento do material (pode-se escolher entre os materiais cadastrados ou inserção manual pelo usuário).

Após a inserção dos dados de entrada e solicitada a verificação da placa de base de pilar, o programa retorna com as verificações dos elementos da ligação, tais como:

- Verificações da placa de base: excentricidade, excentricidade crítica, momento resistente e solicitante de cálculo;
- Verificações do bloco de concreto: tensão de compressão resistente e solicitante do concreto, ruptura do concreto, tensão resistente e solicitante junto à barra de cisalhamento;
- Verificação dos chumbadores: escoamento da seção bruta por tração, ruptura da seção rosqueada por tração, arrancamento do chumbador e cisalhamento no chumbador;
- Verificação da barra de cisalhamento: cisalhamento atuante na barra e momento resistente e solicitante de cálculo;
- Verificação do enrijecedor: tensão no enrijecedor paralela à placa de base e tensão de cisalhamento atuante enrijecedor.

É importante salientar que todas as verificações são realizadas com as tensões resistentes e solicitantes de cálculo e, além disso, as verificações levam em consideração os valores mínimos aceitáveis para o dimensionamento.

Além de todos os dados de saída apresentados acima, o programa retorna também com a validação da verificação realizada e em caso de não aprovação apresenta sugestões para alterações do dimensionamento.

3.3. LIMITAÇÕES E ABRANGÊNCIAS DO PROGRAMA

Para a implementação do programa computacional foram consideradas a ABNT NBR 8800:2008 para os perfis I ou H, ABNT NBR 16239:2013 para os perfis tubulares

retangulares e circulares. Complementar as normas citadas também foi utilizada a ACI 318:2014. Para os casos não previstos nessas normas o programa *LIGMETAL* pode não atender aos dimensionamentos exigidos.

O programa abrange o dimensionamento de placas de base de pilares de perfis I ou H, bases retangulares de perfis tubulares retangulares e circulares e bases circulares de perfis circulares. Podendo para esses elementos ser verificado os esforços axiais de tração e compressão, momentos fletores combinados aos esforços axiais e esforços de cisalhamentos atuantes na placa de base.

É possível, no programa *LIGMETAL*, a verificação do dimensionamento da ligação dos elementos da estrutura como a placa de base de pilar, o apoio de concreto da fundação, os chumbadores, barras de cisalhamento e enrijecedores.

Todas as verificações realizadas no programa consideram o pilar centralizado à placa de base, bem como a placa de base centralizada ao apoio de concreto da fundação. Uma limitação do programa é a não verificação da segurança estrutural em bases de pilares com momento fletor na direção do eixo de menor inércia do perfil do pilar.

Outras limitações apresentadas pelo programa são:

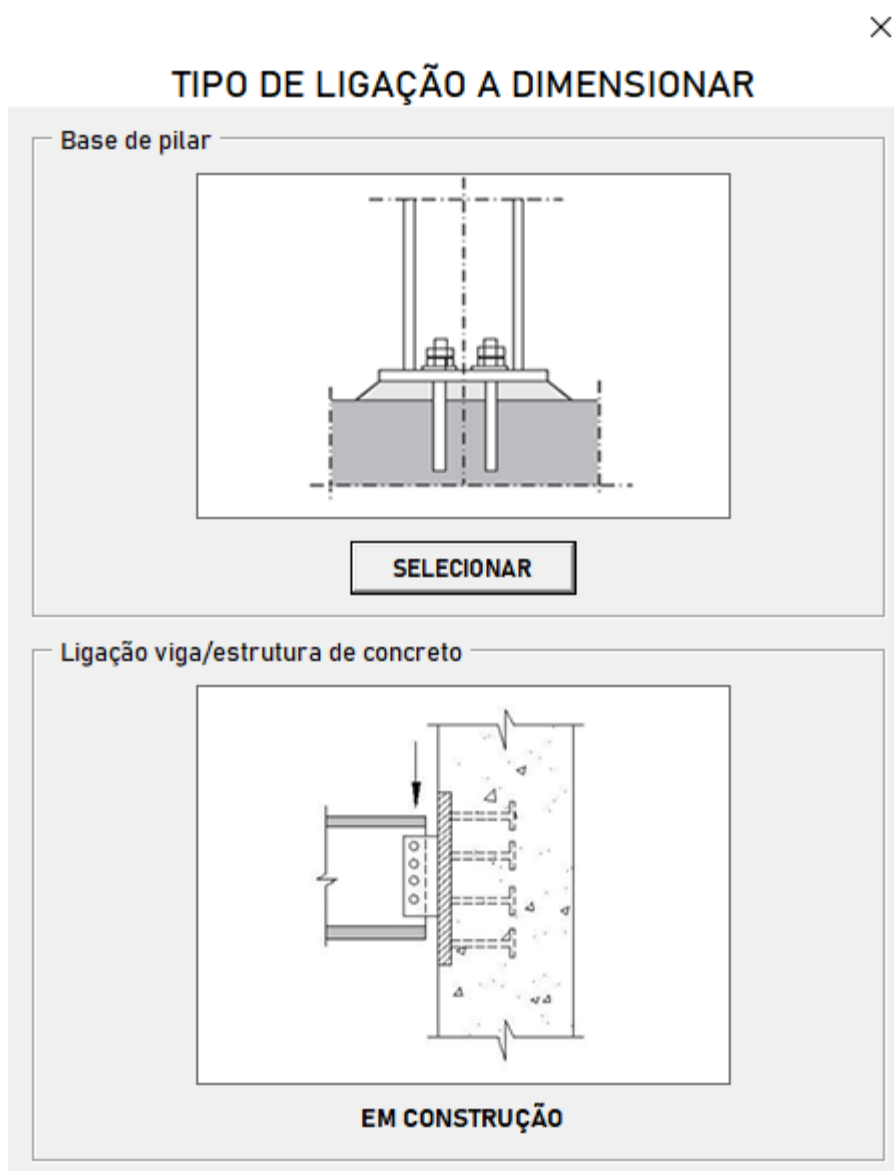
- Não considera o efeito do confinamento do concreto nas verificações da placa de base;
- Não considera a flexão nos chumbadores quando existem arruelas soldadas à placa de base;
- Não realiza a verificação de arrancamento do concreto ocasionado pela barra de cisalhamento;
- Não realiza a verificação de enrijecedores para as placas de base de perfis tubulares.

3.4. INTERFACE DO PROGRAMA

Ao acessar o *LIGMETAL*, o usuário é direcionado para a interface inicial do programa (Figura 10), onde é realizada a escolha do tipo de ligação a ser verificada. O presente trabalho foi elaborado somente para as ligações de placas de bases de pilares de aço em apoio de concreto, para os casos de ligações de vigas metálicas em apoios de concreto este módulo do programa se apresenta em construção pois o

programa elaborado é fonte de linha de pesquisa do professor orientador e será continuado sua implementação em pesquisas futuras.

Figura 10 - Tela inicial do programa *LIGMETAL*



Fonte: Autores

Ao selecionar a opção “*Base de pilar*” o usuário é levado para a tela de descrição do projeto, onde é possível inserir os dados sobre o nome do projeto e do projetista. Ainda nessa tela, deve-se escolher o tipo de base a ser verificada. Ao clicar no tipo de base desejada é mostrada a imagem da placa de base escolhida, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 - Tela de dados do projeto e escolha do tipo de base

×

DADOS INICIAIS

Dados do projeto (preenchimento opcional)

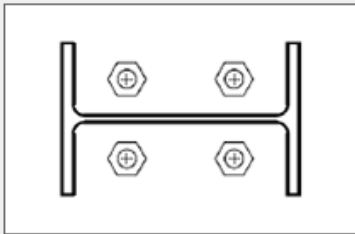
Projeto

Projetista Data

Tipo de base

- ☒ Base de perfil I ou H rotulada
- ☐ Base de perfil I ou H engastada
- ☐ Base de perfil tubular retangular
- ☐ Base de perfil tubular circular com placa retangular
- ☐ Base de perfil tubular circular com placa circular

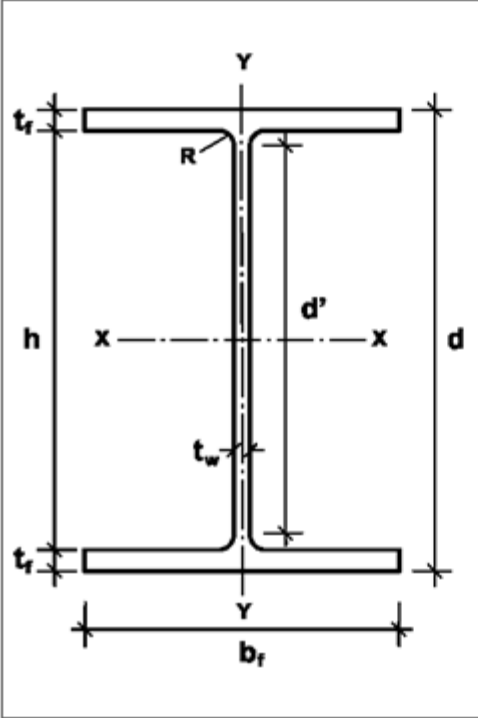
Base escolhida



Fonte: Autores

Após feita a escolha do tipo de placa de base, o usuário é direcionado para a tela de escolha do perfil do pilar. Nessa tela, tem-se a opção de inserir os dados do perfil de forma manual ou escolher dentre as opções do banco de dados do programa. Nesse banco de dados há informações acerca dos perfis I e H laminados produzidos pela Gerdau Aço Minas e perfis tubulares produzidos pela V&M do Brasil. Esta tela é adaptável de acordo com o tipo de base escolhida (Figura 12).

Figura 12 - Tela de escolha do perfil de pilar



ESCOLHA

☐ Manual

☐ Banco de dados

PERFIL:

d = mm

t_f = mm

t_w = mm

b_f = mm

h = mm

OK

Fonte: Autores

Feita a escolha do perfil, o programa direciona para a tela de “*Dados de Entrada*”, nessa tela o usuário deverá declarar todas as variáveis para que seja feita a verificação da segurança estrutural da ligação. A qualquer momento que o usuário desejar, ele pode voltar a tela inicial para alterar os dados do perfil do pilar e o tipo de placa de base.

Na primeira aba (Figura 13), “*Solicitações*”, o usuário declara as variáveis do esforço axial solicitante de cálculo (N_{sd}), esforço cisalhante solicitante de cálculo (V_{sd}) e o momento fletor solicitante de cálculo (M_{sd}). Para os esforços axiais solicitantes, o usuário deve informar a natureza, se tração ou compressão. Ainda na aba de solicitações, se a ligação da placa de base for solicitada por esforço de cisalhamento, o usuário deve indicar qual elemento da ligação deverá resistir ao esforço cisalhante,

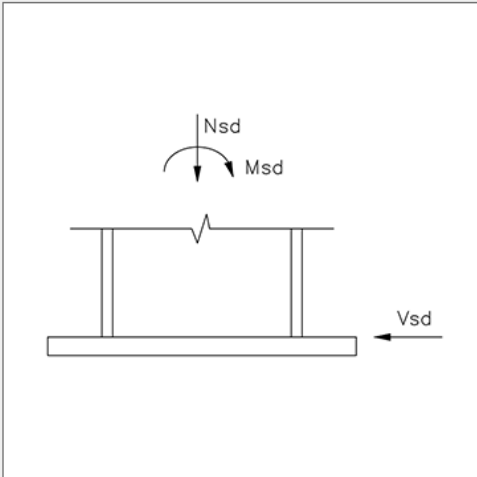
habilitando no programa a aba para dimensionamento da barra de cisalhamento, caso escolha essa opção.

Figura 13 - Tela de dados de entrada das solicitações

×

DADOS DE ENTRADA

Solicitações | Chumbadores | Disposições construtivas | Placa de base | Base de concreto | Barra de cisalhamento | Enrijecedores



Nsd = kN

☐ Tração ☐ Compressão

Vsd = kN

Msd = kN.m

Elemento que deverá resistir à força de cisalhamento:

☐ Barra de cisalhamento ☐ Chumbador

?: condições mínimas e/ou máximas para as dimensões.
 * Dimensões devem ser preenchidas em mm.

DADOS INICIAIS VERIFICAÇÃO

Fonte: Autores

Na aba “Chumbadores” da tela de dados de entrada (Figura 14), o usuário seleciona o tipo de chumbador da ligação, podendo escolher entre o chumbador com gancho ou chumbador com porca e arruela. Feita essa seleção, o usuário indica o material utilizado para a fabricação do chumbador, podendo escolher entre as opções fornecidas pelo programa, ou inserir os dados referente ao material utilizado de forma manual. É nessa aba que é informada a quantidade de chumbadores a serem utilizados, e dependendo da quantidade de chumbadores e do tipo de placa de base escolhida é habilitado a aba de dimensionamento de enrijecedores, visto que para o dimensionamento desse elemento há limitações construtivas devido as disposições construtivas da placa de base.

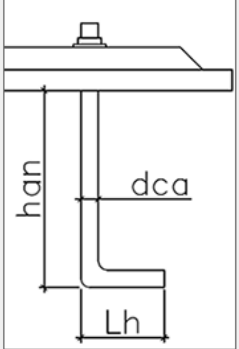
Figura 14 - Tela de dados de entrada dos chumbadores

×

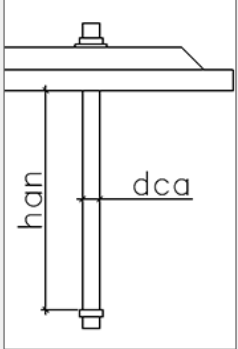
DADOS DE ENTRADA

Solicitações | Chumbadores | Disposições construtivas | Placa de base | Base de concreto | Barra de cisalhamento | Enrijecedores

Selecione o tipo de chumbador:



Chumbador com gancho



Chumbador com porca e arruela

Material

☐

☐ Outro: $f_y =$ kN/cm²

$f_u =$ kN/cm²

Dimensões

Número de chumbadores:

Dimensões dos chumbadores:

DEFINIR

Enrijecedores

☐ Utilizar enrijecedores na ligação da placa de base

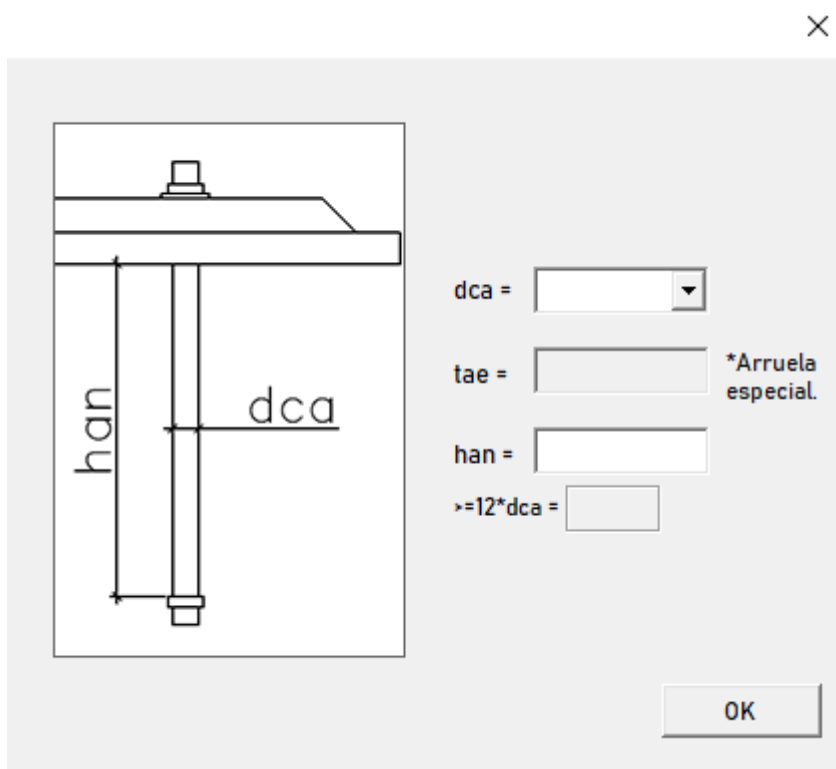
?: condições mínimas e/ou máximas para as dimensões.
* Dimensões devem ser preenchidas em mm.

DADOS INICIAIS
VERIFICAÇÃO

Fonte: Autores

As dimensões dos chumbadores são inseridas pelo usuário ao pressionar o botão *definir* presente na aba “Chumbadores”. Ao inserir o diâmetro do chumbador, o programa preenche automaticamente a espessura da arruela especial e o comprimento mínimo da ancoragem, podendo o usuário adotar um comprimento maior do que o sugerido (Figura 15).

Figura 15 - Tela de dados de entrada das dimensões dos chumbadores



Technical drawing of a bolt with dimensions han and dca .

Input fields:

- $dca =$
- $tae =$ *Arruela especial.
- $han =$
- $\geq 12 \cdot dca =$

OK

Fonte: Autores

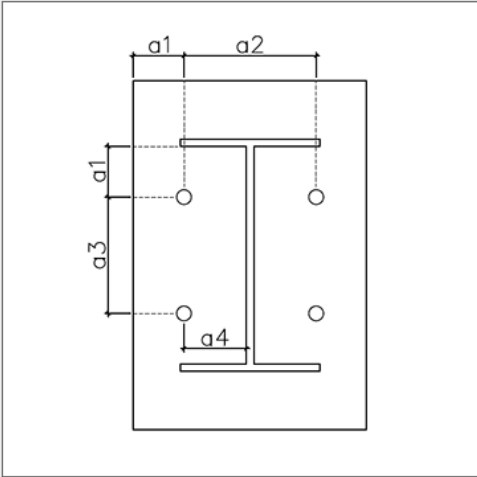
Seguindo a sequência de inserção de dados de entrada no programa, o usuário é levado a aba “*Disposições construtivas*”, conforme mostra a Figura 16. Nesta aba, o programa calcula previamente as distâncias mínimas referente a posição dos chumbadores na placa de base, considerando os critérios apresentados nas normas vigentes, podendo o usuário seguir com as dimensões sugeridas pelo programa ou inserir as dimensões desejadas.

Figura 16 - Tela de dados de entrada das disposições construtivas

×

DADOS DE ENTRADA

Solicitações
Chumbadores
Disposições construtivas
Placa de base
Base de concreto
Barra de cisalhamento
Enrijecedores



Posição dos chumbadores

*Defina o diâmetro do chumbador na aba "Chumbadores" para exibição de valores mínimos

a1 =		IV	38,1	mm	?
a2 =		IV	76,2	mm	?
a3 =		IV	76,2	mm	?
a4 =		IV	38,1	mm	?

? : condições mínimas e/ou máximas para as dimensões.
 * Dimensões devem ser preenchidas em mm.

DADOS INICIAIS

VERIFICAÇÃO

Fonte: Autores

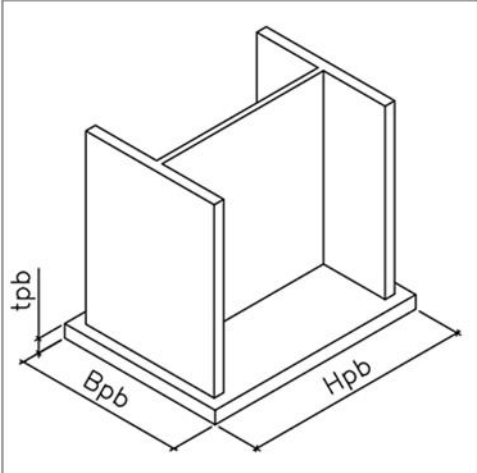
Na aba “*Placa de base*” (Figura 17) deve-se informar o material utilizado para a placa de base, podendo ser escolhido dentre as opções já existentes no programa ou a inserção de dados de forma manual, nessa segunda opção o usuário deve informar somente as características que influenciam no cálculo da placa. Além disso, o usuário deverá declarar também as variáveis referentes as dimensões da placa de base a ser verificada, onde ao lado são mostradas as dimensões mínimas exigidas por norma.

Figura 17 - Tela de dados de entrada da placa de base

✕

DADOS DE ENTRADA

Solicitações
Chumbadores
Disposições construtivas
Placa de base
Base de concreto
Barra de cisalhamento
Enrijecedores



Material

Outro: $f_y =$ kN/cm²

Dimensões

*Defina o valor de a1 na aba "Disposições Construtivas" para exibição de valores mínimos.

Hpb = > 160 mm ?

Bpb = ≥ 102 , ≤ 182 mm ?

tpb = ≥ 19 mm ?

? : condições mínimas e/ou máximas para as dimensões.
* Dimensões devem ser preenchidas em mm.

DADOS INICIAIS

VERIFICAÇÃO

Fonte: Autores

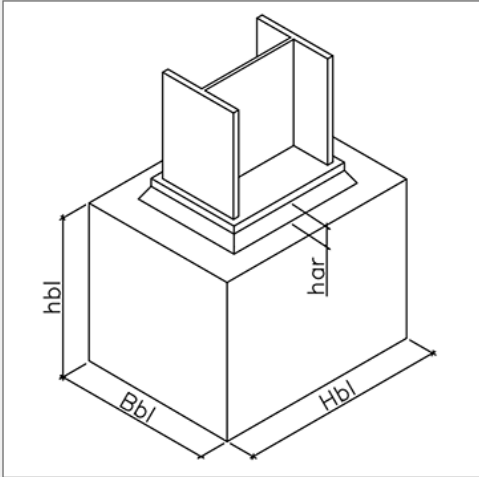
Os dados de entrada referente ao apoio de concreto devem ser declarados na aba “*Base de concreto*” conforme mostra a Figura 18. O usuário deve informar a resistência característica do material a ser utilizado na base de concreto, podendo escolher entre as opções do banco de dados do programa e inserção manual da resistência, e a resistência característica da argamassa de assentamento. Ainda nessa aba o usuário informa as variáveis referentes a dimensão do apoio de concreto, onde ao lado são apresentadas as dimensões mínimas exigidas para atendimento das normas.

Figura 18 - Tela de dados de entrada da base de concreto

×

DADOS DE ENTRADA

Solicitações
Chumbadores
Disposições construtivas
Placa de base
Base de concreto
Barra de cisalhamento
Enrijecedores



Material

☐

☐ Outro: $f_{ck,bl} =$ kN/cm^2

$f_{ck,ar} =$ kN/cm^2

*da argamassa expansiva. $\geq 1,5 \cdot f_{ck} =$ kN/cm^2

Dimensões

*Defina as dimensões da placa de base e o diâmetro dos chumbadores para exibição de valores mínimos

Hbl = $\geq$ 529,55 mm ?

Bbl = $\geq$ 389,55 mm ?

hbl = $\geq$ 600 mm ?

har = 40 mm ?

? : condições mínimas e/ou máximas para as dimensões.

* Dimensões devem ser preenchidas em mm.

DADOS INICIAIS

VERIFICAÇÃO

Fonte: Autores

A espessura da argamassa de assentamento é calculada de forma automática pelo programa de acordo com a formulação apresentada pela ABNT NBR 8800:2008, levando em consideração o diâmetro do chumbador.

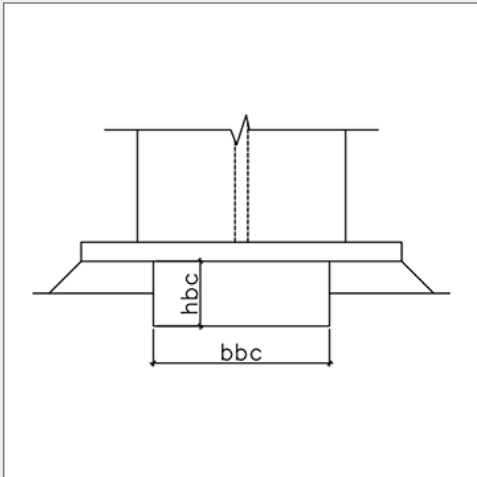
Na aba “*Barra de Cisalhamento*”, conforme Figura 19, são inseridos os dados referentes as dimensões e ao material da barra de cisalhamento, podendo ser escolhido entre os materiais fornecidos pelo programa ou inserção manual da resistência ao escoamento do aço. Para a espessura da barra é apresentada a dimensão mínima a ser atendida ao lado do campo de entrada dos dados.

Figura 19 - Tela de dados de entrada da barra de cisalhamento

×

DADOS DE ENTRADA

Solicitações | Chumbadores | Disposições construtivas | Placa de base | Base de concreto | Barra de cisalhamento | Enrijecedores



Material

☐

☐ Outro: $f_y =$ kN/cm²

Dimensões

*Defina a espessura da placa de base para exibição de valor mínimo de tbc

hbc = mm

bbc = mm

tbc = mm $\geq$ 19 mm ?

? : condições mínimas e/ou máximas para as dimensões.
* Dimensões devem ser preenchidas em mm.

DADOS INICIAIS
VERIFICAÇÃO

Fonte: Autores

O último passo a ser realizado na tela de “*Dados de Entrada*” é na aba “*Enrijecedores*” (Figura 20), onde o usuário declara as variáveis da chapa de reforço.

A seleção do material do enrijecedor pode ser feita por meio das opções fornecidas pelo programa ou de forma manual, inserindo o valor da resistência ao escoamento do aço da chapa. Além da escolha do material, o usuário insere as dimensões do enrijecedor, onde ao lado do campo para inserção há a informação com a dimensão máxima aceitável para dimensionamento da ligação.

A verificação para dimensionamento de enrijecedores está habilitada somente para os perfis I e H de bases rotuladas e bases engastadas com quatro chumbadores, para os demais casos não é possível realizar a verificação do enrijecedor devido as disposições construtivas da placa de base.

Figura 20 - Tela de dados de entrada do enrijecedor

×

DADOS DE ENTRADA

Solicitações | Chumbadores | Disposições construtivas | Placa de base | Base de concreto | Barra de cisalhamento | Enrijecedores

Material

☐

☐ Outro: $f_y =$ kN/cm²

Dimensões

Número de enrijecedores:

hen = mm

ben = mm ≤ 150 mm ?

ten = mm

? : condições mínimas e/ou máximas para as dimensões.
 * Dimensões devem ser preenchidas em mm.

DADOS INICIAIS
VERIFICAÇÃO

Fonte: Autores

Para todos os casos de dados de entrada inseridos pelo usuário o programa exibe as condições mínimas ou máximas a serem atendidas para o dimensionamento da placa de base do pilar e os demais elementos atuantes na ligação, de acordo com o exigido pelas normas.

Por fim, ao clicar no botão “*verificação*”, no canto inferior direito da tela, o usuário é encaminhado para a tela “*Verificação*” (Figura 21) onde são apresentadas todas as verificações para os elementos dimensionados separados pelas abas, de acordo com o elemento verificado.

Na primeira aba são apresentados os resultados dos cálculos realizados pelo programa, para as verificações da placa de base, como a excentricidade, excentricidade crítica e o momento fletor solicitante e resistente da placa de base.

Figura 21 - Tela de verificação da placa de base

×

VERIFICAÇÃO

Placa de base | Bloco de concreto | Chumbadores | Barra de cisalhamento | Enrijecedores

Excentricidade crítica

e,crít = ≥ 0

OBS:

Excentricidade

e = = 0

Momento fletor

Mpb,sd = ≤ Mpb,Rd =

OBS:

Fonte: Autores

Na aba de verificações do bloco de concreto (Figura 22) são apresentadas as verificações da tensão de compressão abaixo da placa de base e tensão de compressão junto à barra de cisalhamento. Além dessas verificações é apresentado também a verificação de ruptura do concreto do bloco de fundação. As verificações são realizadas mostrando as tensões resistentes e solicitantes de cálculo e comparando seus valores junto com o retorno de “ok” e “não ok” e, para os casos onde o dimensionamento não atende, o programa sugere alterações das dimensões.

Figura 22 - Tela de verificação do bloco de concreto

×

VERIFICAÇÃO

Placa de base | **Bloco de concreto** | Chumbadores | Barra de cisalhamento | Enrijecedores

Tensão de compressão abaixo da placa de base

$\sigma_{c,sd} =$ $\leq \sigma_{c,Rd} =$

OBS:

Tensão de compressão junto à barra de cisalhamento

$\sigma_{c,sd,bc} =$ $\leq \sigma_{c,Rd} =$

OBS:

Ruptura do concreto

$F_{t,sd} =$ $\leq F_{t,Rd,rc} =$

OBS:

Fonte: Autores

Seguindo para próxima aba, é mostrado as verificações para os chumbadores atuantes na ligação (Figura 23). São apresentadas as verificações do escoamento da seção bruta e rosqueada, arrancamento dos chumbadores e força de cisalhamento atuante no elemento da ligação.

Figura 23 - Tela de verificação dos chumbadores

×

VERIFICAÇÃO

Placa de base | Bloco de concreto | **Chumbadores** | Barra de cisalhamento | Enrijecedores

Escoamento da seção bruta

$F_{t,sd} =$ $\leq F_{t,Rd,y} =$

OBS:

Escoamento da seção rosqueada

$F_{t,sd} =$ $\leq F_{t,Rd,u} =$

OBS:

Arrancamento

$F_{t,sd} =$ $\leq F_{t,Rd,ac} =$

OBS:

Cisalhamento

$V_{ca,sd} =$ $\leq V_{ca,Rd,i} =$

OBS:

Fonte: Autores

Na aba de verificações da barra de cisalhamento (Figura 24), são apresentadas as verificações da força de cisalhamento e o momento fletor atuante. Assim como em todas as verificações realizadas pelo programa, aqui são comparados os resultados dos esforços solicitantes e resistentes de cálculo.

Figura 24 - Tela de verificação da barra de cisalhamento

×

VERIFICAÇÃO

Placa de base | Bloco de concreto | Chumbadores | Barra de cisalhamento | Enrijecedores

Cisalhamento

Vbc,sd = ≤ Vbc,Rd=

OBS:

Momento

Mbc,sd = ≤ Mbc,Rd=

OBS:

DADOS INICIAIS ALTERAR DADOS GERAR RELATÓRIO

Fonte: Autores

Por fim, na aba de verificação dos enrijecedores (Figura 25) são apresentadas as verificações dos enrijecedores dimensionados para a placa de base. A verificação deste elemento é feita por meio da tensão atuante no enrijecedor paralela à placa de base e a tensão cisalhante atuante no elemento da ligação, comparando os esforços solicitantes com os esforços resistentes.

Figura 25 - Tela de verificação do enrijecedor

×

VERIFICAÇÃO

Placa de base | Bloco de concreto | Chumbadores | Barra de cisalhamento | **Enrijecedores**

Tensão normal no enrijecedor

$\sigma_{en,sd} =$ $\leq$ $\sigma_{en,Rd} =$

OBS:

Tensão de cisalhamento no enrijecedor

$\sigma_{v,en,sd} =$ $\leq$ $\sigma_{v,en,Rd} =$

OBS:

Fonte: Autores

Em todas as abas de verificações é apresentado ao lado do resultado o status, sendo exibida uma mensagem de “ok” para os casos em que os elementos da ligação atendem as necessidades exigidas pela norma e “não ok” acompanhado de sugestão de modificação para os casos que a ligação não atende ao exigido.

É possível também, ao final das verificações, gerar um relatório com os dados de entrada do programa, os cálculos e as verificações realizadas, além das mensagens de retorno para os casos onde é necessário alterar alguma disposição ou material dos elementos participantes da ligação. O relatório é apresentado em arquivo pdf.

Além da opção de gerar o relatório da placa de base verificada, o usuário pode escolher alterar os dados de entrada inseridos no programa, ou até mesmo o tipo de base e perfil escolhido para a ligação.

4. VALIDAÇÃO DO PROGRAMA E RESULTADOS

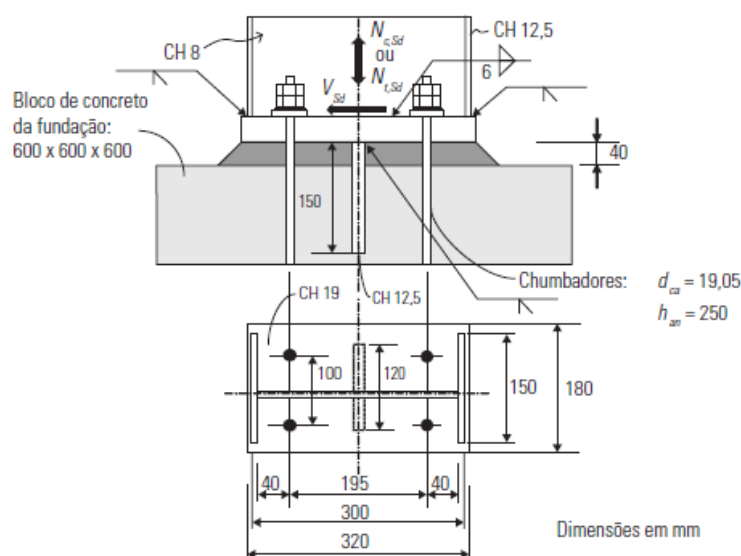
Para a validação do programa desenvolvido, buscou-se na literatura disponível, exemplos de dimensionamento de placas de base, porém foi constatado a carência de exemplos para todos os casos dimensionados pelo programa *LIGMETAL*, principalmente quando as placas de base possuem enrijecedores.

Para os casos omissos na literatura, optou-se resolver exemplos de forma manual, com o auxílio de uma calculadora, garantindo assim que o programa seja validado com pelo menos um exemplo para cada tipo de base de pilar.

4.1. PILAR DE SEÇÃO I EM BASE ROTULADA SUJEITA A ESFORÇO AXIAL E CORTANTE

O exemplo utilizado para validação consiste em um pilar de seção I em uma base rotulada sujeita a esforço axial e cortante, mostrado na Figura 26. Para o esforço axial, considerou-se duas situações, tração e compressão, de acordo com a combinação de esforços atuantes na ligação. As propriedades geométricas do perfil, disposições construtivas da placa de base e demais elementos da ligação, propriedades dos materiais e esforços solicitantes de cálculo encontram-se na Tabela 2.

Figura 26 – Corte longitudinal e seção transversal do perfil I e placa de base rotulada



Fonte: Fakury *et al* (2016)

Tabela 2 - Dados de entrada de perfil I com base rotulada sujeita a esforço axial de tração e cisalhamento

Perfil do pilar							
d		t _f		t _w		b _f	
300 mm		12,5 mm		8 mm		150 mm	
Solicitações							
Combinação 1		Combinação 2		Combinação 3			
N _{t,Sd}	96 kN	N _{c,Sd}	282 kN	N _{c,Sd}	8,8 kN		
V _{Sd}	10,8 kN	V _{Sd}	86 kN	V _{Sd}	19 kN		
Chumbador							
Tipo	com porca e arruela		Material		ASTM A36		
d _{ca}	19,05 mm	n _t	4	h _{an}	250 mm		
Disposições Construtivas							
a ₁	40 mm	a ₂	100 mm	a ₃	195 mm	a ₄	46 mm
Placa de base							
Material			USI CIVIL 350				
H _{pb}	320 mm	B _{pb}	180 mm	t _{pb}	19 mm		
Base de concreto							
Resistência		C20	f _{ck,ar}		3 KN/cm²		
H _{bl}	600 mm	B _{bl}	600 mm	h _{bl}	600 mm		
Barra de cisalhamento							
Material:			USI CIVIL 350				
h _{bc}	150 mm	b _{bc}	120 mm	t _{pb}	12,5 mm		

Fonte: Autores

As verificações da segurança estrutural foram realizadas comparando os resultados dos cálculos apresentados por Fakury *et al* (2016) com os resultados obtidos pelo programa. A fim de exemplificar os cálculos realizados pela literatura, foi resolvido o exemplo para a combinação 1 de esforços conforme as Equações 10 a 44.

a) Combinação 1

a.1) Excentricidade e excentricidade crítica

$$e = \left| \frac{M_{Sd}}{N_{t,Sd}} \right| = \left| \frac{0}{96} \right| = 0 \quad (10)$$

$$e_{crit} = h_t = \frac{19,5}{2} = 9,75 \text{ cm} \quad (11)$$

$$e < e_{crit} \quad (12)$$

$$Y = 0 \quad (13)$$

$$\sigma_{c, Sd} = 0 \quad (14)$$

$$\sum F_{t, Sd} = \frac{N_{t, Sd}}{2} \left(1 + \frac{e}{h_t} \right) = \frac{96}{2} \left(1 + \frac{0}{9,75} \right) = 48 \text{ kN} \quad (15)$$

a.2) Verificação dos chumbadores

a.2.1) Escoamento da seção bruta

$$\sum F_{t, Rd, y} = \frac{n_t A_{g, ca} f_{y, ca}}{\gamma_{a1}} = \frac{2 * 2,85 * 25}{1,10} = 129,54 \text{ kN} \quad (16)$$

$$\sum F_{t, Sd} = 48 \text{ kN} < \sum F_{t, Rd, y} = 129,54 \text{ kN} \text{ (Atende!)} \quad (17)$$

a.2.2) Escoamento da parte rosqueada

$$\sum F_{t, Rd, u} = \frac{n_t A_{e, ca} f_{u, ca}}{\gamma_{a2}} = \frac{2 * 2,14 * 40}{1,35} = 126,81 \text{ kN} \quad (18)$$

$$\sum F_{t, Sd} = 48 \text{ kN} < \sum F_{t, Rd, u} = 126,81 \text{ kN} \text{ (Atende!)} \quad (19)$$

a.2.3) Arrancamento dos chumbadores

$$\sum F_{t, Rd, ac} = \frac{8 n_t A_{cp} f_{ck, bl}}{\gamma_c} = \frac{8 * 2 * 4,85 * 2}{1,4} = 110,86 \text{ kN} \quad (20)$$

$$\sum F_{t, Sd} = 48 \text{ kN} < \sum F_{t, Rd, ac} = 110,86 \text{ kN} \text{ (Atende!)} \quad (21)$$

a.3) Verificação da placa de base

a.3.1) Momento fletor resistente de cálculo

$$M_{pb,Rd} = \frac{t_{pb}^2 f_{y,pb}}{4\gamma_{a1}} = \frac{1,9^2 * 35}{4 * 1,10} = 28,72 \text{ kN.cm/cm} \quad (22)$$

a.3.2) Momento fletor solicitante provocado pela tração nos chumbadores

$$\sum p_i \leq \left\{ \begin{matrix} n_t(2a_1 + d_{ca}) \\ B_{pb} \end{matrix} \right\} \leq \left\{ \begin{matrix} 2(2 * 4 + 1,9) = 19,8 \text{ cm} \\ 18 \text{ cm} \end{matrix} \right\} \rightarrow \sum p_i = 18 \text{ cm} \quad (23)$$

$$M_{pb,t,sd} = \frac{48 * 4}{18} = 10,67 \text{ kN.cm/cm} \quad (24)$$

$$M_{pb,t,sd} = 10,67 \text{ kN.cm/cm} < M_{pb,Rd} = 28,72 \text{ kN.cm/cm} \text{ (Atende!)} \quad (25)$$

a.4) Verificação do bloco de concreto

a.4.1) Tensão de compressão do concreto abaixo da placa de base

$$\sigma_{c,Rd} = \frac{f_{ck,bl}}{\gamma_c \gamma_n} = \frac{2}{1,4 * 1,4} = 1,02 \text{ kN/cm}^2 \quad (26)$$

$$\sigma_{c,sd} = 0 < \sigma_{c,Rd} = 1,02 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Atende!)} \quad (27)$$

a.4.2) Ruptura do concreto

$$c_1 \leq \left\{ \begin{matrix} \frac{H_{bl}}{2} - h_t \\ 1,5h_{an} \end{matrix} \right\} \leq \left\{ \begin{matrix} \frac{60}{2} - 9,75 = 20,25 \text{ cm} \\ 1,5 * 25 = 37,5 \text{ cm} \end{matrix} \right\} \rightarrow c_1 = 20,25 \text{ cm} \quad (28)$$

$$c_2 \leq \left\{ \begin{matrix} \frac{B_{bl} - B_{pb} + 2a_1}{2} \\ 1,5h_{an} \end{matrix} \right\} \leq \left\{ \begin{matrix} \frac{60 - 18 + 2 * 4}{2} = 25 \text{ cm} \\ 1,5 * 25 = 37,5 \text{ cm} \end{matrix} \right\} \rightarrow c_2 = 25 \text{ cm} \quad (29)$$

$$c_3 \leq \left\{ \begin{matrix} h_t \\ 1,5h_{an} \end{matrix} \right\} \leq \left\{ \begin{matrix} 9,75 \text{ cm} \\ 1,5 * 25 = 37,5 \text{ cm} \end{matrix} \right\} \rightarrow c_3 = 9,75 \text{ cm} \quad (30)$$

$$c_4 \leq \left\{ \begin{matrix} a_2 \\ 3,0h_{an} \end{matrix} \right\} \leq \left\{ \begin{matrix} 10 \text{ cm} \\ 3 * 25 = 75 \text{ cm} \end{matrix} \right\} \rightarrow c_4 = 10 \text{ cm} \quad (31)$$

$$\begin{aligned}
 A_{rc} &= 2 \left(c_2 + \frac{c_4}{2} \right) (c_1 + c_3) + (n_t - 2) c_4 (c_1 + c_3) \\
 &= 2 * \left(25 + \frac{10}{2} \right) * (20,25 + 9,75) + (2 - 2) * 10 * (20,25 + 9,75) \\
 &= 1.800 \text{ cm}^2
 \end{aligned} \tag{32}$$

$$\sum F_{t,Rd,rc} = \frac{0,08 A_{rc} \sqrt{f_{cl,bl}}}{\gamma_c h_{an}^{1/3}} = \frac{0,08 * 1.800 * \sqrt{2}}{1,4 * 25^{1/3}} = 49,75 \text{ kN} \tag{33}$$

$$\sum F_{t,Sd} = 48 \text{ kN} \leq \sum F_{t,Rd,rc} = 49,75 \text{ kN (Atende!)} \tag{34}$$

a.4.3) Tensão de compressão do concreto junto à barra de cisalhamento

$$\sigma_{bc,Sd} = \frac{V_{bc,Sd}}{b_{bc}(h_{bc} - h_{ar})} = \frac{10,8}{12 * (15 - 4)} = 0,08 \text{ kN/cm}^2 \tag{35}$$

$$\sigma_{c,bc,Sd} = 0,08 < \sigma_{c,Rd} = 1,02 \text{ kN/cm}^2 \text{ (Atende!)} \tag{36}$$

a.5) Verificação da barra de cisalhamento

a.5.1) À força cortante

$$V_{at,Rd} \leq \begin{cases} 0,7 \mu N_{c,Sd} \\ 0,2 f_{ck,bl} Y B_{pb} \end{cases} \leq \begin{cases} 0,7 * 0,55 * 0 = 0 \text{ kN} \\ 0,2 * 2 * 32 * 18 = 230,4 \text{ kN} \end{cases} = 0 \text{ kN} \tag{37}$$

$$V_{bc,Sd} = V_{Sd} - V_{at,Rd} = 10,8 - 0 = 10,8 \text{ kN} \tag{38}$$

$$V_{bc,Rd} = \frac{0,6 * 12 * 1,25 * 35}{1,10} = 286,36 \text{ kN} \tag{39}$$

$$V_{bc,Sd} = 10,8 \text{ kN} \leq V_{bc,Rd} = 286,36 \text{ kN (Atende!)} \tag{40}$$

a.5.2) Ao momento fletor

$$c_{bc} = h_{ar} + \frac{(h_{bc} - h_{ar})}{2} = 4 + \frac{(15 - 4)}{2} = 9,5 \text{ cm} \tag{41}$$

$$M_{bc,Sd} = V_{bc,Sd} c_{bc} = 10,8 * 9,5 = 102,6 \text{ kN.cm} \tag{42}$$

$$M_{bc,Rd} = \frac{b_{bc} t_{bc}^2 f_{y,bc}}{4 \gamma_{a1}} = \frac{12 * 1,25^2 * 35}{4 * 1,10} = 149,15 \text{ kN.cm} \quad (43)$$

$$M_{bc,Sd} = 102,6 \text{ kN.cm} \leq M_{bc,Rd} = 149,15 \text{ kN.cm} \quad (44)$$

Nos exemplos disponíveis da literatura, assim como nos casos em que foram realizados cálculos de forma manual, foram considerados arredondamentos de duas casas decimais, o que em comparação com o programa desenvolvido pode gerar pequenos desvios percentuais visto que esse possui precisão de cálculo maior. A Tabela 3 mostra as principais verificações realizadas para a combinação 1 de esforços, comparando os desvios entre os valores retornados pelo programa e os valores do exemplo da literatura.

Tabela 3 - Comparação dos resultados do programa com os resultados calculados para a combinação 1 do exemplo de base rotulada

		Programa computacional		Exemplo resolvido		Desvio percentual
	e	0	cm	0	cm	0,000%
Placa de base	e _{crít}	9,75	cm	9,75	cm	0,000%
	M _{pb,Sd}	10,67	kN.cm/cm	10,67	kN.cm/cm	0,000%
	M _{pb,Rd}	28,72	kN.cm/cm	28,72	kN.cm/cm	0,000%
Bloco de concreto	σ _{c,Sd}	0	kN/cm ²	0	kN/cm ²	0,000%
	σ _{c,Rd}	1,02	kN/cm ²	1,02	kN/cm ²	0,000%
	σ _{c,Sd,bc}	0,08	kN/cm ²	0,08	kN/cm ²	0,000%
	F _{t,Sd}	48	kN	48	kN	0,000%
	F _{t,Rd,rc}	49,75	kN	49,75	kN	0,000%
Chumbador	F _{t,Rd,y}	129,56	kN	129,55	kN	-0,008%
	F _{t,Rd,u}	126,68	kN	126,68	kN	0,000%
	F _{t,Rd,ac}	110,75	kN	110,75	kN	0,000%
	V _{bc,Sd}	10,8	kN	10,8	kN	0,000%
Barra de cisalhamento	V _{bc,Rd}	286,36	kN	286,36	kN	0,000%
	M _{bc,Sd}	102,6	kN.cm	102,6	kN.cm	0,000%
	M _{bc,Rd}	149,15	kN.cm	149,15	kN.cm	0,000%

Fonte: Autores

As Tabelas 4 e 5 relacionam as principais verificações realizadas para as combinações 2 e 3 de esforços, respectivamente, comparando os desvios entre os valores retornados pelo programa e os valores do exemplo da literatura.

Tabela 4 - Comparação dos resultados do programa com os resultados calculados para a combinação 2 do exemplo de base rotulada

		Programa computacional		Exemplo resolvido		Desvio percentual
	e	0	cm	0	cm	0,000%
Placa de base	e_{crit}	8,32	cm	8,32	cm	0,000%
	$M_{pb,Sd}$	6,88	kN.cm/cm	6,88	kN.cm/cm	0,000%
	$M_{pb,Rd}$	28,72	kN.cm/cm	28,72	kN.cm/cm	0,000%
Bloco de concreto	$\sigma_{c,Sd}$	0,49	kN/cm ²	0,49	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{c,Rd}$	1,02	kN/cm ²	1,02	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{c,Sd,bc}$	0	kN/cm ²	0	kN/cm ²	0,000%
Barra de cisalhamento	$V_{bc,Sd}$	0	kN	0	kN	0,000%
	$V_{bc,Rd}$	286,36	kN	286,36	kN	0,000%
	$M_{bc,Sd}$	0	kN.cm	0	kN.cm	0,000%
	$M_{bc,Rd}$	149,15	kN.cm	149,15	kN.cm	0,000%

Fonte: Autores

Tabela 5 - Comparação dos resultados do programa com os resultados calculados para a combinação 3 do exemplo de base rotulada

		Programa computacional		Exemplo resolvido		Desvio percentual
	e	0	cm	0	cm	0,000%
Placa de base	e_{crit}	15,77	cm	15,76	cm	-0,063%
	$M_{pb,Sd}$	0,21	kN.cm/cm	0,21	kN.cm/cm	0,000%
	$M_{pb,Rd}$	28,72	kN.cm/cm	28,72	kN.cm/cm	0,000%
Bloco de concreto	$\sigma_{c,Sd}$	0,01	kN/cm ²	0,01	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{c,Rd}$	1,02	kN/cm ²	1,02	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{c,Sd,bc}$	0,12	kN/cm ²	0,12	kN/cm ²	0,000%
Barra de cisalhamento	$V_{bc,Sd}$	15,73	kN	15,61	kN	-0,769%
	$V_{bc,Rd}$	286,36	kN	286,36	kN	0,000%
	$M_{bc,Sd}$	149,41	kN.cm	148,3	kN.cm	-0,748%
	$M_{bc,Rd}$	149,15	kN.cm	149,15	kN.cm	0,000%

Fonte: Autores

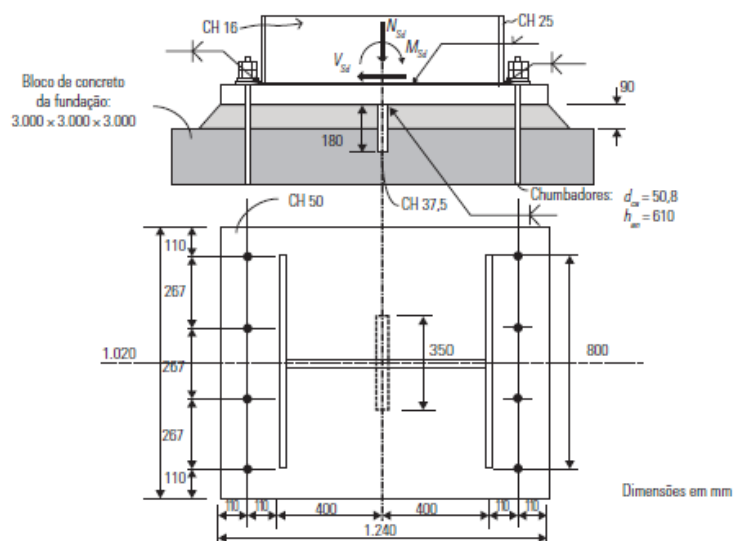
Ao se analisar os resultados obtidos pelo software desenvolvido frente aos cálculos manuais para uma placa base rotulada, solicitada por esforços axiais e cisalhamento conclui-se que estes são satisfatórios com pequenos desvios apresentados para algumas verificações. Esses desvios ocorrem devido aos arredondamentos anteriormente mencionados, onde em placas de base com pequenos esforços solicitantes, fazem com que a diferença para os cálculos retornados pelo programa seja notada. Sendo assim, programa se apresenta como uma ferramenta adequada para a verificação do dimensionamento desse tipo de placa de base.

4.2. PILAR DE SEÇÃO I EM BASE ENGASTADA SUJEITA A ESFORÇO AXIAL, CISALHAMENTO E MOMENTO FLETOR

O exemplo utilizado para validação consiste em um pilar de seção I em uma base engastada sujeita a esforço axial, esforço cortante e momento fletor, mostrado na Figura 27. Para o esforço axial, utilizou-se tração e compressão, de acordo com a combinação de esforços atuantes na ligação. As propriedades geométricas do perfil, disposições construtivas da placa de base e demais elementos da ligação, propriedades dos materiais e esforços solicitantes de cálculo estão dispostos na Tabela 6.

Como a literatura estudada carece de informações e exemplos acerca do uso de enrijecedores nas placas de bases de pilares de aço, utilizou-se do exemplo de Fakury *et al.* (2016) acrescido com as dimensões dos enrijecedores, sendo os resultados do programa comparados com os cálculos manuais realizados.

Figura 27 - Corte longitudinal e seção transversal do perfil I e placa de base engastada



Fonte: Fakury et al (2006)

Tabela 6 - Dados de entrada de perfil I com base engastada sujeita a esforço axial de tração, esforço cortante e momento fletor

Perfil do pilar					
d		t _f		t _w	
800 mm		25 mm		16 mm	
				b _f	
				800 mm	
Solicitações					
Combinação 1		Combinação 2		Combinação 3	
N _{t,Sd}	120 kN	N _{c,Sd}	4.850 kN	N _{c,Sd}	250 kN
V _{Sd}	250 kN	V _{Sd}	110 kN	V _{Sd}	340 kN
M _{Sd}	650 kN.m	M _{Sd}	200 kN.m	M _{Sd}	850 kN.m
Chumbador					
Tipo	com porca e arruela		Material		ASTM A36
d _{ca}	50,8 mm	n _t	4	h _{an}	610 mm
Disposições Construtivas					
a ₁	110 mm	a ₂	800 mm	a ₃	1020 mm
				a ₄	392 mm
Placa de base					
Material			USI CIVIL 350		
H _{pb}	1240 mm	B _{pb}	1020 mm	t _{pb}	50,8 mm
Base de concreto					
Resistência		C20	f _{ck,ar}		3 KN/cm²
H _{bl}	3000 mm	B _{bl}	3000 mm	h _{bl}	3000 mm
Barra de cisalhamento					

Material:		USI CIVIL 350			
h_{bc}	180 mm	b_{bc}	350 mm	t_{pb}	37,5 mm
Enrijecedor					
Material:		USI CIVIL 350		n_e	2
h_{en}	400 mm	b_{en}	220 mm	t_{en}	37,5 mm

Fonte: Autores

As Tabelas 7, 8 e 9 relacionam as principais verificações realizadas para as três combinações de esforços, respectivamente, comparando os desvios entre os valores retornados pelo programa e os valores do exemplo da literatura.

Tabela 7 - Comparação dos resultados do programa com os resultados calculados para a combinação 1 do exemplo de base engastada

		Programa computacional		Exemplo resolvido		Desvio percentual
Placa de base	e	541,67	cm	541,7	cm	0,006%
	e_{crit}	51	cm	51	cm	0,000%
	$M_{pb,Sd}$	132,66	kN.cm/cm	132,77	kN.cm/cm	0,083%
	$M_{pb,Rd}$	205,28	kN.cm/cm	205,28	kN.cm/cm	0,000%
Bloco de concreto	$\sigma_{c,Sd}$	1,02	kN/cm ²	1,02	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{c,Rd}$	1,02	kN/cm ²	1,02	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{c,Sd,bc}$	0,79	kN/cm ²	0,79	kN/cm ²	0,000%
	$F_{t,Sd}$	653,15	kN	653,7	kN	0,084%
	$F_{t,Rd,rc}$	769,37	kN	769,7	kN	0,043%
Chumbador	$F_{t,Rd,y}$	921,29	kN	921,36	kN	0,008%
	$F_{t,Rd,u}$	900,81	kN	900,74	kN	-0,008%
	$F_{t,Rd,ac}$	787,57	kN	787,66	kN	0,011%
Barra de cisalhamento	$V_{bc,Sd}$	250	kN	250	kN	0,000%
	$V_{bc,Rd}$	2505,68	kN	2505,68	kN	0,000%
	$M_{bc,Sd}$	3375	kN.cm	3375	kN.cm	0,000%
	$M_{bc,Rd}$	3915,13	kN.cm	3915,13	kN.cm	0,000%
Enrijecedor	$\sigma_{en,Sd}$	12,59	kN/cm ²	12,59	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{en,Rd}$	31,82	kN/cm ²	31,82	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{v,en,Sd}$	7,63	kN/cm ²	7,63	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{v,en,Rd}$	19,09	kN/cm ²	19,09	kN/cm ²	0,000%

Fonte: Autores

Tabela 8 - Comparação dos resultados do programa com os resultados calculados para a combinação 2 do exemplo de base engastada

		Programa computacional		Exemplo resolvido		Desvio percentual
Placa de base	e	4,12	cm	4,12	cm	0,000%
	e _{crít}	38,7	cm	38,69	cm	-0,026%
	M _{pb,Sd}	118,31	kN.cm/cm	118,1	kN.cm/cm	-0,178%
	M _{pb,Rd}	205,28	kN.cm/cm	205,28	kN.cm/cm	0,000%
Bloco de concreto	$\sigma_{c,Sd}$	0,41	kN/cm ²	0,41	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{c,Rd}$	1,02	kN/cm ²	1,02	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{c,Sd,bc}$	0	kN/cm ²	0	kN/cm ²	0,000%
	V _{bc,Sd}	0	kN	0	kN	0,000%
Barra de cisalhamento	V _{bc,Rd}	2505,68	kN	2505,68	kN	0,000%
	M _{bc,Sd}	0	kN.cm	0	kN.cm	0,000%
	M _{bc,Rd}	3915,13	kN.cm	3915,13	kN.cm	0,000%
Enrijecedor	$\sigma_{en,Sd}$	5,07	kN/cm ²	5,06	kN/cm ²	-0,198%
	$\sigma_{en,Rd}$	31,82	kN/cm ²	31,82	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{v,en,Sd}$	3,07	kN/cm ²	3,07	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{v,en,Rd}$	19,09	kN/cm ²	19,09	kN/cm ²	0,000%

Fonte: Autores

Tabela 9 - Comparação dos resultados do programa com os resultados calculados para a combinação 3 do exemplo de base engastada

		Programa computacional		Exemplo resolvido		Desvio percentual
Placa de base	e	340	cm	340	cm	0,000%
	e _{crít}	60,8	cm	60,8	cm	0,000%
	M _{pb,Sd}	173,53	kN.cm/cm	173,42	kN.cm/cm	-0,063%
	M _{pb,Rd}	205,28	kN.cm/cm	205,28	kN.cm/cm	0,000%
Bloco de concreto	$\sigma_{c,Sd}$	0,77	kN/cm ²	0,77	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{c,Rd}$	1,02	kN/cm ²	1,02	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{c,Sd,bc}$	0,77	kN/cm ²	0,77	kN/cm ²	0,000%
	F _{t,Sd}	649,44	kN	648,9	kN	-0,083%
	F _{t,Rd,rc}	769,37	kN	769,7	kN	0,043%
Chumbador	F _{t,Rd,y}	921,29	kN	921,36	kN	0,008%

Barra de cisalhamento	$F_{t,Rd,u}$	900,81	kN	900,74	kN	-0,008%
	$F_{t,Rd,ac}$	787,57	kN	787,66	kN	0,011%
	$V_{bc,Sd}$	243,75	kN	243,75	kN	0,000%
	$V_{bc,Rd}$	2505,68	kN	2505,68	kN	0,000%
	$M_{bc,Sd}$	3290,62	kN.cm	3290,63	kN.cm	0,000%
	$M_{bc,Rd}$	3915,13	kN.cm	3915,13	kN.cm	0,000%
Enrijecedor	$\sigma_{en,Sd}$	12,59	kN/cm ²	12,59	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{en,Rd}$	31,82	kN/cm ²	31,82	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{v,en,Sd}$	7,63	kN/cm ²	7,63	kN/cm ²	0,000%
	$\sigma_{v,en,Rd}$	19,09	kN/cm ²	19,09	kN/cm ²	0,000%

Fonte: Autores

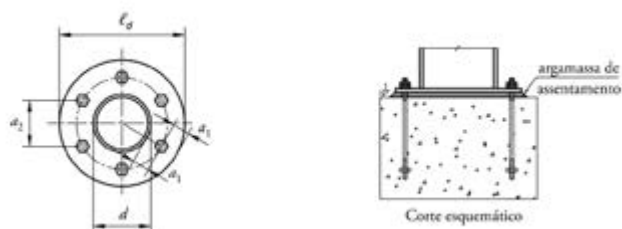
Ao se analisar os resultados obtidos pelo software desenvolvido frente aos cálculos manuais, conclui-se que estes são satisfatórios, pois apresentam pequenos desvios para algumas verificações, que se justificam devido aos arredondamentos anteriormente mencionados. Sendo assim, o programa se apresenta como uma ferramenta adequada para a verificação do dimensionamento desse tipo de placa de base.

4.3. PILAR DE SEÇÃO TUBULAR CIRCULAR COM PLACA DE BASE CIRCULAR SUJEITA A ESFORÇO AXIAL, CISALHAMENTO E MOMENTO FLETOR

O exemplo utilizado para validação consiste em um pilar de seção tubular circular com placa de base circular sujeita a esforço axial de compressão, esforço cortante e momento fletor, como mostra a Figura 28. As propriedades geométricas do perfil, disposições construtivas da placa de base e demais elementos da ligação, propriedades dos materiais e esforços solicitantes de cálculo estão dispostos na Tabela 10.

Como a literatura estudada carece de exemplos acerca do uso de chumbadores com arruelas especiais como dispositivo para resistir às forças de cisalhamento, os valores dessa etapa foram comparados com cálculos manuais realizados.

Figura 28 - Corte longitudinal e seção transversal do perfil tubular circular e placa de base circular engastada



Fonte: Araújo et al (2016)

Tabela 10 - Dados de entrada de perfil tubular circular e placa de base circular engastada

Perfil do pilar					
d		t			
355,6 mm		12,5 mm			
Solicitações					
NcSd	200 kN	VsD	300 kN	MSd	160 kNm
Chumbador					
Tipo	com porca e arruela		Material	ASTM A36	
dca	25,4 mm	nt	8	han	250 mm
Disposições Construtivas					
a1	50 mm	a2	100 mm	a3	160 mm
Placa de base					
Material		fyb	250 Mpa	fub	400 Mpa
ld	555,6 mm	tpb	31,5 mm		
Base de concreto					
Resistência		C20	fck,bl	2 KN/cm²	
har	60 mm		fck,ar	3 KN/cm²	
Hbl	900 mm	Bbl	780 mm	hbl	900 mm
Barra de cisalhamento					
Material:			USI CIVIL 350		
hbc	150 mm	bbc	300 mm	tpb	31,5 mm

Fonte: Autores

As verificações foram realizadas comparando os resultados dos cálculos apresentados por Araújo *et al.* (2016) com os resultados obtidos pelo programa. A fim

de exemplificar os cálculos realizados pela literatura, foi resolvido conforme as Equações 45 a 84.

a) Determinação dos parâmetros necessários

$$H_{pb} = B_{pb} = 0,9l_d = 0,9 * 355,6 = 500 \text{ mm} \quad (45)$$

$$m = n = \frac{0,9l_d - 0,8d}{2} = \frac{0,9 * 355,6 - 0,8 * 355,6}{2} = 107,8 \text{ mm} \quad (46)$$

$$B_{pb,eq} = n_t(d_{ca} + m_{eq} - a_1) \leq 0,90,9l_d \quad (47)$$

$$B_{pb,eq} = 8 * (25 + 135,56 - 50) = 884,48 \text{ mm} > 0,9 * 555,6 = 500 \text{ mm}$$

$$\text{Portanto, } B_{pb,eq} = 500 \text{ mm}$$

$$m_{eq} = \frac{l_d - 0,8d}{2} = \frac{555,6 - 0,8 * 355,6}{2} = 135,56 \text{ mm} \quad (48)$$

$$n_{eq} = \frac{2}{3}n_t \leq 8 = \frac{2}{3} * 8 = 5,33 \quad (49)$$

b) Verificação do modo de falha por formação de charneira plástica na placa de base

b.1) Excentricidade e excentricidade crítica

$$e = \left| \frac{M_{Sd}}{N_{t,Sd}} \right| = \left| \frac{160000}{200} \right| = 800 \text{ mm} \quad (50)$$

$$\sigma_{c,Rd} = \frac{f_{ck,bl} \sqrt{A_2/A_1}}{\gamma_c \gamma_n} \leq f_{ck,bl} = \frac{20\sqrt{1}}{1,4 * 1,4} = 10,2 \leq 20 \text{ MPa} \quad (51)$$

$$e_{crit} = \frac{1}{2} \left(H_{pb} - \frac{N_{sd}}{\sigma_{c,Rd} B_{pb}} \right) = \frac{1}{2} * \left(500 - \frac{200000}{10,2 * 500} \right) = 230,4 \text{ mm} \quad (52)$$

$$e = 800 \text{ mm} > e_{crit} = 230,4 \text{ mm} \rightarrow \text{Caso C3.} \quad (53)$$

b.2) Parâmetros geométricos do aparelho de apoio

$$l_c = \left(\frac{H_{pb}}{2} + a\right) - \sqrt{\left(\frac{H_{pb}}{2} + a\right)^2 - \frac{2N_{sd}(e+a)}{\sigma_{c,Rd}B_{pb}}}, \text{ se:} \quad (54)$$

$$\left(\frac{H_{pb}}{2} + a\right)^2 \geq \frac{3,125N_{sd}(e+a)}{\sigma_{c,Rd}B_{pb}} \quad (55)$$

$$a = d/2 + a_1 = 355,6/2 + 50 = 227,8 \text{ mm} \quad (56)$$

$$\left(\frac{H_{pb}}{2} + a\right)^2 \geq \frac{3,125N_{sd}(e+a)}{\sigma_{c,Rd}B_{pb}} \quad (57)$$

$$\left(\frac{500}{2} - 227,8\right)^2 = 228,3 \geq \frac{3,125 * 200000 * (800 + 227,8)}{10,8 * 500} = 125,96$$

$$l_c = \left(\frac{500}{2} + 227,8\right) - \sqrt{\left(\frac{500}{2} - 227,8\right)^2 - \frac{2 * 200000 * (800 + 227,8)}{10,2 * 500}} = 93,50$$

$$e_{crit} = \frac{1}{2} \left(H_{pb} - \frac{N_{sd}}{\sigma_{c,Rd} B_{pb}} \right) = \frac{1}{2} \left(500 - \frac{200000}{10,2 * 500} \right) = 230,4 \text{ mm} \quad (58)$$

$$e = 800 \text{ mm} > e_{crit} = 230,4 \text{ mm} \rightarrow \text{Caso C3.} \quad (59)$$

b.3) Determinação da espessura mínima da placa de base

$$t_{pb,mín} \geq \begin{cases} t_{pb,mín1} \\ t_{pb,mín2} \end{cases} \quad (60)$$

$$t_{pb,mín} = l_{máx} \sqrt{\frac{2\sigma_{c,Rd}}{(f_y/\gamma_{a1})}} = 107,8 * \sqrt{\frac{2 * 10,2}{(350/1,1)}} = 27,30 \text{ mm} \quad (61)$$

$$\text{Se } l_c \geq m \rightarrow l_{máx} \geq \begin{cases} m \\ n \end{cases} \quad (62)$$

$$\text{Se } l_c < m \rightarrow l_{máx} \geq \begin{cases} p \\ n \end{cases}$$

Como $l_c = 93,5 \text{ mm} < m = 107,8 \text{ mm} \rightarrow l_{m\acute{a}x} \geq n$ e p
 $n = 107,8 \text{ mm}$

$$p = \sqrt{l_c(2m - l_c)} = \sqrt{93,5 * (2 * 107,8 - 93,5)} = 106,5 \text{ mm} \quad (63)$$

Portanto, $l_{m\acute{a}x} = 107,8 \text{ mm}$

$$F_{t,sd} = \frac{2(\sigma_{c,Rd} l_c B_{pb} - N_{sd})}{n_{t,eq}} = \frac{2 * (10,2 * 93,5 * 500 - 200000)}{5,33} = 103,88 \text{ kN} \quad (64)$$

$$t_{pb,m\acute{i}n2} = \sqrt{\frac{2n_{t,eq} F_{t,sd} (m_{eq} - a_1)}{B_{pb,eq} (f_y / \gamma_{a1})}} = \sqrt{\frac{2 * 5,33 * 103883 * (135,56 - 50)}{500(350/1,1)}} \quad (65)$$

$$t_{pb,m\acute{i}n2} = 24,4 \text{ mm}$$

Finalmente, $t_{pb,m\acute{i}n} = 27,30 \text{ mm}$

c) Verificar o modo de falha por ruptura por tração do chumbador

$$d_{ca,m\acute{i}n} = \sqrt{\frac{4F_{t,sd}}{0,75\pi(f_{ub}/\gamma_{a2})}} = \sqrt{\frac{4 * 103883}{0,75 * \pi * (400/1,35)}} = 24,49 \text{ mm} \quad (66)$$

Diâmetro do chumbador fornecido: 25,4 mm

Portanto,

$$d_{ca} = 25,4 \text{ mm} \geq d_{ca,m\acute{i}n} = 24,49 \text{ mm} \text{ (Atende!)} \quad (67)$$

d) Verificar o modo de falha por arrancamento do chumbador

Para evitar o arrancamento dos chumbadores, deve-se respeitar os valores mínimos de disposições descritas na tabela 23 da norma ABNT NBR 16239:2013.

e) Verificar o modo de falha por esmagamento do concreto ou da argamassa expansiva de assentamento da região de contato com a placa de base

$$\sigma_{c,Rd} = \frac{f_{ck,bl} \sqrt{A_2/A_1}}{\gamma_c \gamma_n} \leq f_{ck,bl} = \frac{20\sqrt{1}}{1,4 * 1,4} = 10,2 \leq 20 \text{ MPa} \quad (68)$$

f) Verificar o modo de falha por desligamento da ligação

$$V_{Rd} = \mu \sigma_{c,Rd} l_c B_{pb} \leq \tau_{c,Rd} H_{pb} B_{pb} \quad (69)$$

$$V_{Rd} = 0,45 * 10,2 * 93,5 * 500 = 214,85 \text{ kN} \leq \frac{0,2 * 20}{1,4} * 500 * 500 = 714,28 \text{ kN} \rightarrow \text{Atende!}$$

$$V_{Rd} = 214,58 \text{ kN} < V_{sd} = 300 \text{ kN} \rightarrow \text{Não atende!} \quad (70)$$

Nesse caso, deve-se adotar dispositivo para evitar deslizamento da ligação, sendo essas arruelas soldadas à placa de base ou uma barra de cisalhamento. O exemplo de dimensionamento encontrado na literatura

f.1) Utilização de barra de cisalhamento

Conforme a norma ABNT NBR 8800:2008, $\sigma_{c,Rd}$ deve ser obtido considerando a relação A_2/A_1 igual a 4.

$$\sigma_{c,Rd} = \frac{f_{ck,bl} \sqrt{A_1/A_2}}{\gamma_c \gamma_n} \leq f_{ck,bl} = \frac{20\sqrt{4}}{1,4 * 1,4} = 20,4 \leq 20 \text{ MPa} \quad (71)$$

Portanto, $\sigma_{c,Rd} = 20 \text{ Mpa}$

$$t_{bc,min} = \sqrt{\frac{2V_{sd}(h_{bc} + h_{ar})}{b_{bc}(f_y/\gamma_{a1})}} = \sqrt{\frac{2 * 300000 * (150 + 60)}{300 * (350/1,1)}} = 36,33 \text{ mm} \quad (72)$$

$$t_{bc,min} = 36,33 \text{ mm} < t_{bc} = 37,5 \text{ mm} (\text{Atende!}) \quad (73)$$

$$V_{bc,Rd} = \sigma_{c,Rd}(h_{bc} - h_{ar})b_{bc} = 20 * (150 - 60) * 300 = 540 \text{ kN} \quad (74)$$

$$V_{sd} = 300 \text{ kN} \leq V_{bc,Rd} = 540 \text{ kN} (\text{Atende!}) \quad (75)$$

f.2) Utilização de chumbadores com arruelas especiais

Como a base é comprimida de grande excentricidade, há chumbadores de um lado sendo comprimidos e do outro sendo tracionados. O dimensionamento a seguir foi desenvolvido por meio de cálculos manuais, visto que a literatura não apresenta um exemplo com o fluxo de cálculo.

$$F_{t,sd,d} = \frac{F_{t,sd}}{n_t} = \frac{103,88}{8} = 12,98 \text{ kN} \quad F_{t,sd,e} = 0 \text{ kN} \quad (76)$$

$$A_{g,ca} = \frac{\pi d_{ca}^2}{4} = \frac{\pi * 25,4^2}{4} = 506,71 \text{ mm}^2 \quad (77)$$

$$F_{v,Rd,i} = \frac{0,4 A_{g,ca} f_{u,ca}}{\gamma_{a2}} = \frac{0,4 * 506,71 * 400}{1,35} = 60,05 \text{ kN} \quad (78)$$

$$\alpha = 1,45 \frac{(t_{pb} + 0,5 t_{ae}) f_u \gamma_{a1}}{d_{ca} f_y \gamma_{a2}} = 1,45 * \frac{(31,50 + 0,5 * 8)}{25,4} * \frac{400}{250} * \frac{1,1}{1,35} = 2,64 \quad (79)$$

$$V_{ca,Rd,i} \leq \left\{ \frac{1}{1 + \alpha^2} \left[\sqrt{(1 + \alpha^2) F_{v,Rd,i}^2 - (0,533 F_{t,sd})^2} - \alpha (0,533 F_{t,sd,i}) \right] \right. \\ \left. n_t 5 d_{ca}^2 \sigma_{c,Rd} \right\} \quad (80)$$

$$V_{ca,Rd,d} \quad (81)$$

$$\leq \left\{ \frac{1}{1 + 2,64^2} \left[\sqrt{(1 + 2,64^2) * 60050^2 - (0,533 * 12980)^2} - \frac{2,64 * (0,533 * 12980)}{5 * 25,4^2 * 10,2} \right] \right\} = 18,96 \text{ kN}$$

$$V_{ca,Rd,d} = 18,96 \text{ kN}$$

$$V_{ca,Rd,e} \quad (82)$$

$$\leq \left\{ \frac{1}{1 + 2,64^2} \left[\sqrt{(1 + 2,64^2) * 60050^2 - (0,533 * 0)^2} - 2,64 * (0,533 * 0) \right] \right\}$$

$$\leq \left\{ \frac{1}{1 + 2,64^2} \left[\sqrt{(1 + 2,64^2) * 60050^2} \right] \right\} = 21,27 \text{ kN}$$

$$V_{ca,Rd,e} = 21,27 \text{ kN}$$

$$V_{ca,Rd} = (n_t/2) V_{Rd,d} + (n_t/2) V_{Rd,e} = \left(\frac{8}{2}\right) * 18,96 + \left(\frac{8}{2}\right) * 21,27 \quad (83)$$

$$V_{ca,Rd} = 160,92 \text{ kN}$$

$$V_{ca,Rd} = 160,92 \text{ kN} < V_{sd} = 300 \text{ kN} \text{ (Não atende!)} \quad (84)$$

Com os dados do exemplo em questão, os chumbadores não resistem à força de cisalhamento. Sendo assim, seria necessário especificar chumbadores de maior diâmetro ou, caso seja inviável, utilizar barra de cisalhamento.

Tabela 11 - Comparação dos resultados do programa com os resultados calculados para a combinação 1 do exemplo de base rotulada

		Programa computacional		Exemplo resolvido		Desvio percentual
Placa de base	e	800	mm	800	mm	0,000%
	e_{crit}	230,42	mm	230,42	mm	0,000%
	$t_{pb,min}$	27,30	kN.cm/cm	27,30	kN.cm/cm	0,000%
Bloco de concreto	$\sigma_{c,Rd}$	1,02	kN/cm ²	1,02	kN/cm ²	0,000%
Chumbador	$d_{ca,min}$	24,39	kN	24,49	kN	0,408%
	$V_{ca,Rd}$	160,78	kN	160,92	kN	0,087%
Barra de cisalhamento	$t_{bc,min}$	36,33	kN	36,33	kN	0,000%
	$V_{bc,Rd}$	551,02	kN	540,00	kN	-2,041%

Fonte: Autores

Os resultados obtidos pelo software se mostram satisfatórios quando comparados com as placas de base verificadas e seus cálculos obtidos pela literatura e pelos cálculos manuais. Apresentam pequenos desvios para algumas verificações, justificados pelos arredondamentos anteriormente mencionados. Sendo assim, o programa se apresenta como uma ferramenta adequada para a verificação do dimensionamento desse tipo de placa de base.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi implementado um programa computacional para a verificação do dimensionamento de bases de pilares de aço considerando a hipótese uniforme de distribuição de tensões. O programa foi devidamente validado para todos os tipos de bases de pilares disponíveis, tendo seus resultados comparado com ao menos um exemplo retirado da literatura estudada.

Ao analisarmos os desvios percentuais apresentados pelo programa quando comparado com os resultados dos exemplos resolvidos observa-se que estes apresentam valores menores que 0,8%, resultado bastante satisfatório. Os desvios se justificam pelos arredondamentos nos cálculos manuais realizados para a resolução dos exemplos da literatura e também o arredondamento gerado pelo programa para apresentação dos resultados finais das verificações.

Pode-se concluir que o programa *LIGMETAL* apresenta-se como uma excelente ferramenta para o dimensionamento de bases de pilares de aços, auxiliando tanto ao mercado profissional quanto a comunidade acadêmica para a resolução de trabalhos e pesquisas na área.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A ABNT NBR 8800:2008 ainda não aborda o tema de bases de pilares de aços diretamente em seu escopo, assim como as literaturas disponíveis carecem da mesma necessidade.

Ao longo do desenvolvimento desse trabalho percebeu-se oportunidades para pesquisas futuras dentro do tema e melhorias no programa desenvolvido, tornando-o um software mais completo e robusto para o dimensionamento de ligações em interface de aço e concreto de estruturas metálicas.

Para pesquisas futuras segue os temas sugeridos:

- Estudar e implementar ao programa o dimensionamento de enrijecedores para placas de bases de perfis tubulares;

- Estudar e implementar ao programa o procedimento de cálculo que considera a hipótese linear de distribuição de tensões;
- Estudar e implementar no programa desenvolvido o procedimento de cálculo para a consideração do efeito do confinamento do concreto;
- Estudar o dimensionamento de bases de pilares de aço sujeitas a solicitação de momento fletor no eixo de menor inércia do pilar e acrescentar ao programa;
- Estudar e incluir no programa o dimensionamento de outras interfaces de aço-concreto, como ligações de vigas de aço com elementos de concreto e pilares embutidos nas fundações.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: Building code requirements for structural concrete. Farmington Hill, 2014.

ARAÚJO, Afonso Henrique Mascarenhas de *et al.* **Projeto de Estruturas de Edificações com Perfis Tubulares de Aço**. Belo Horizonte: Ed. do Autor, 2016. 598 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16239**: Projeto de estruturas mistas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. Rio de Janeiro, 2013.

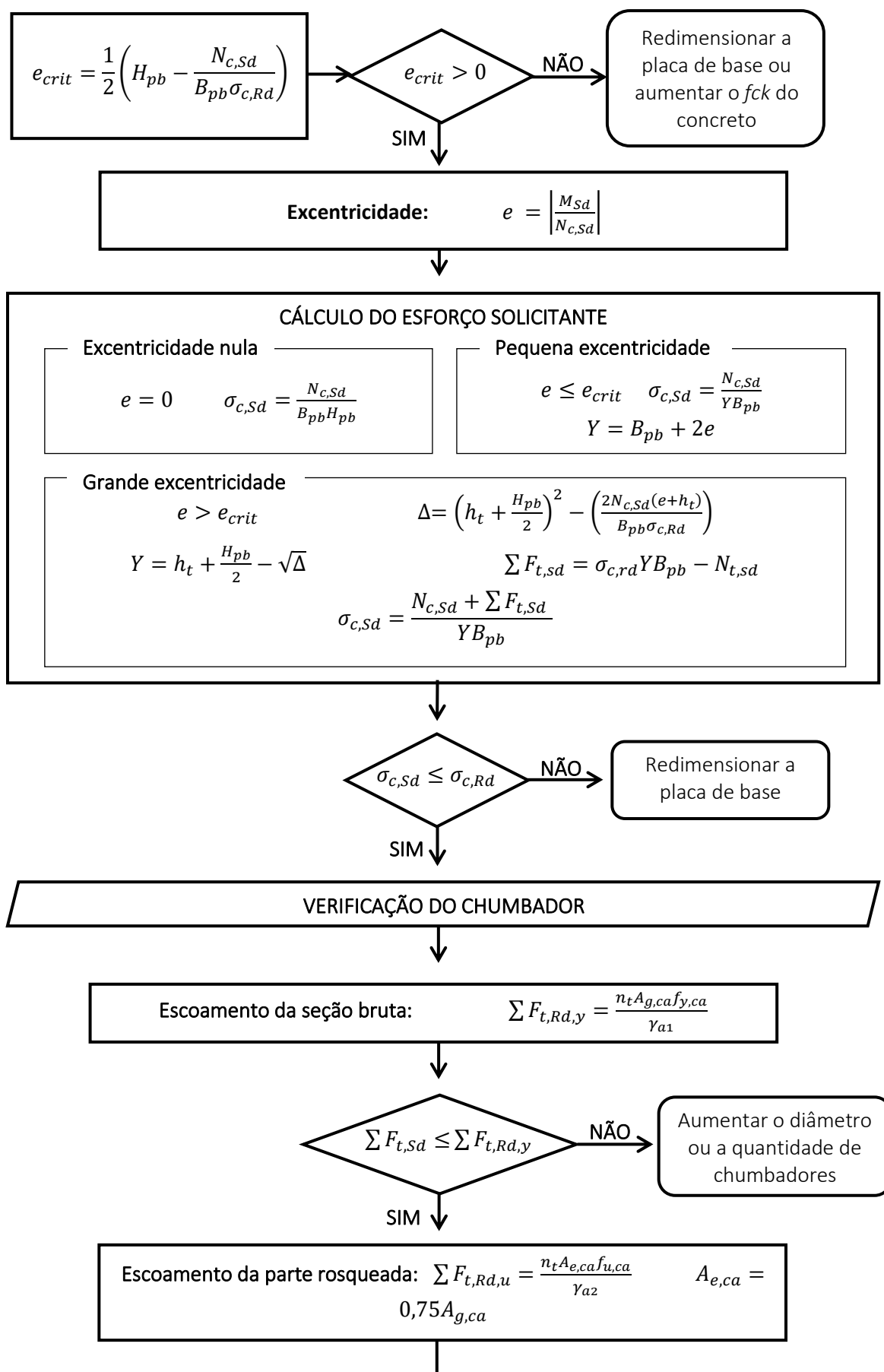
BELLEI, I. H. **Interfaces aço-concreto**. 2ªed. Instituto Aço Brasil, Centro Brasileiro da Construção em Aço, Rio de Janeiro, 2009.

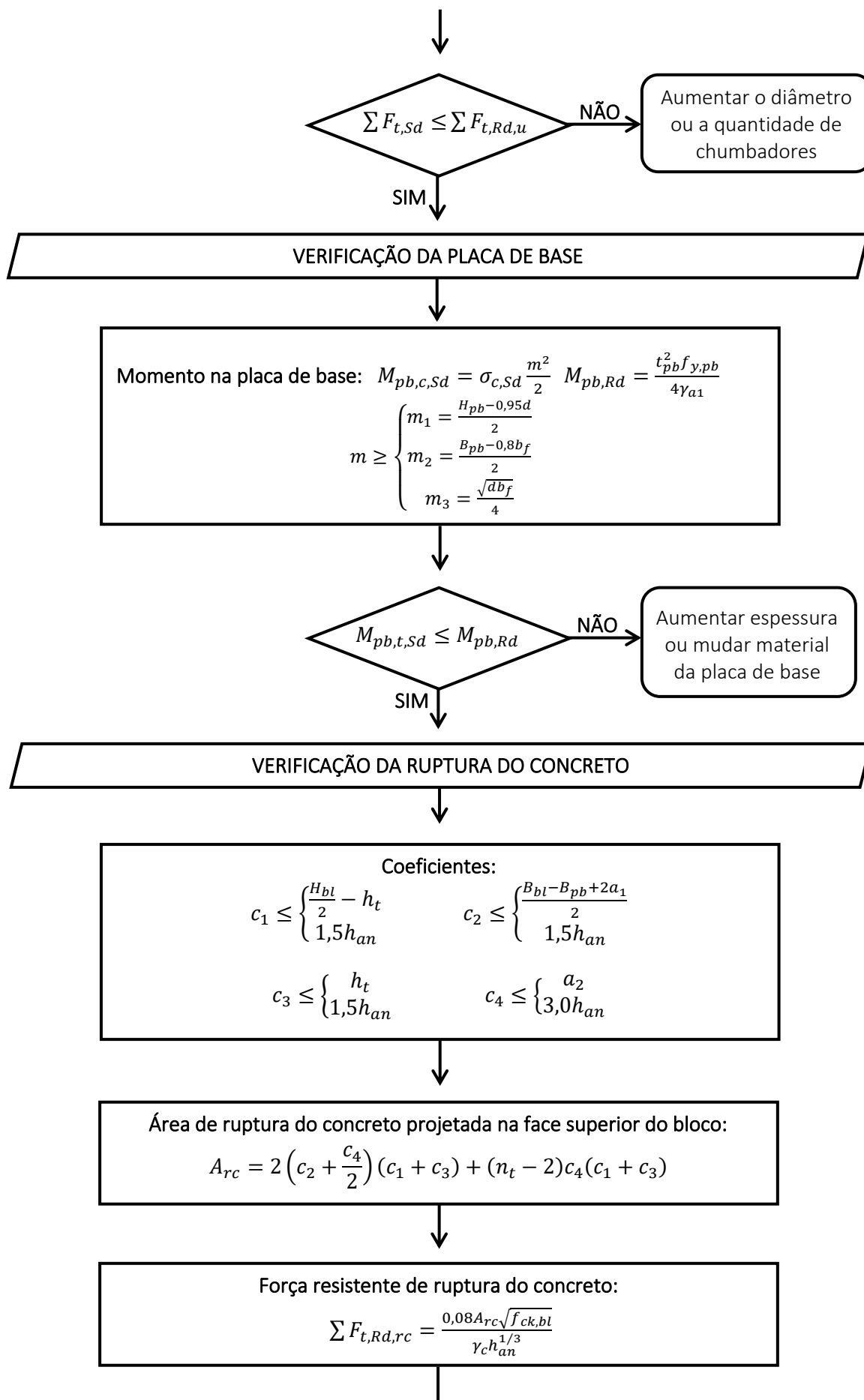
FAKURY, R. H.; SILVA, A. L. R. C.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

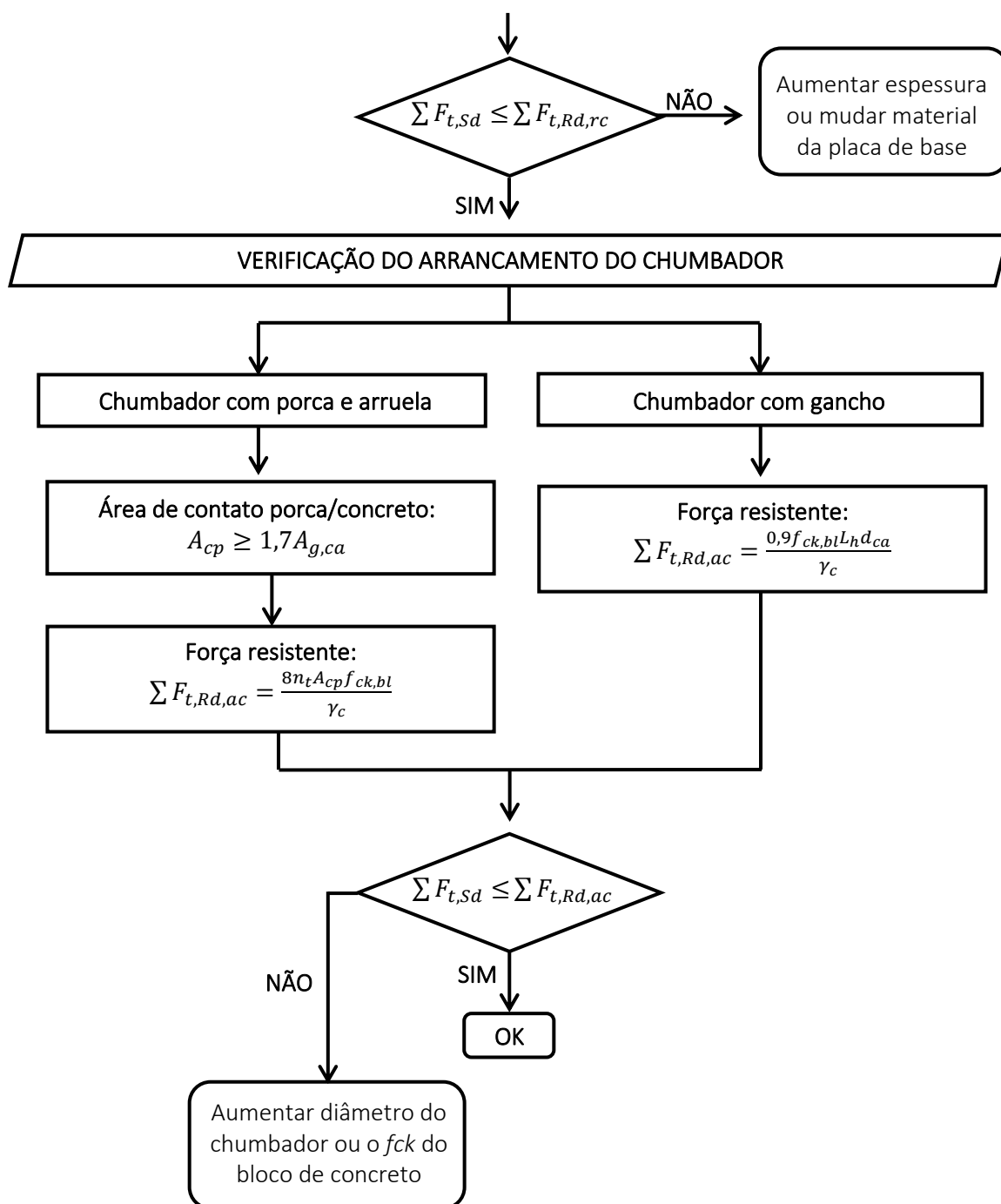
FISHER, J. M.; KLOIBER, L. A. **Base Plate and Anchor Rod Design**. Steel Design Guide American Institute of Steel Construction, 2006.

MINCHILLO, D. G. V.; REQUENA, J. A. V. **A influência dos enrijecedores nas tensões das placas de bases de pilares metálicos tubulares**. XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, Argentin, Mendonza, 2004.

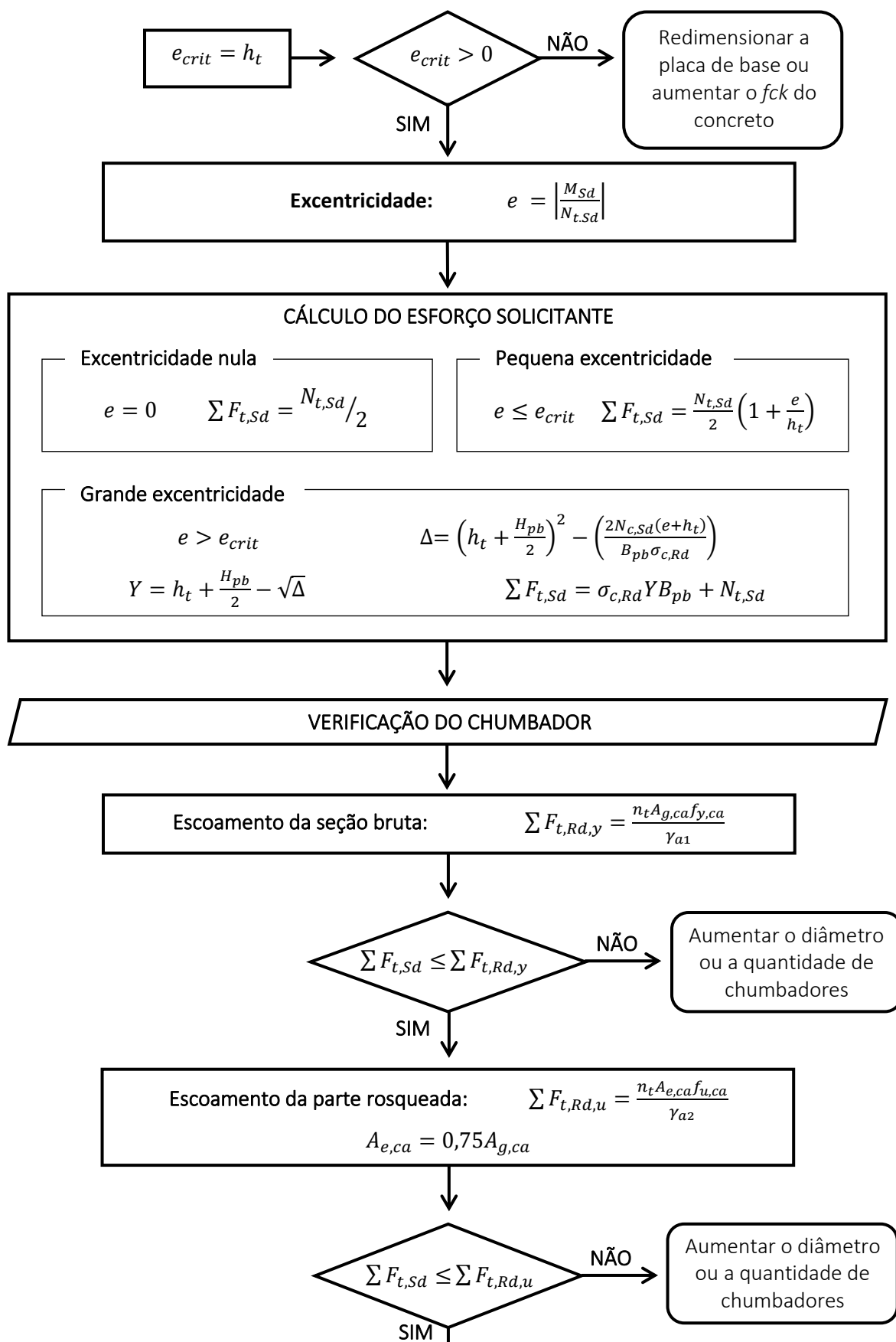
APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DE VERIFICAÇÃO DE BASES COM PERFIL I OU H SUJEITAS À COMPRESSÃO

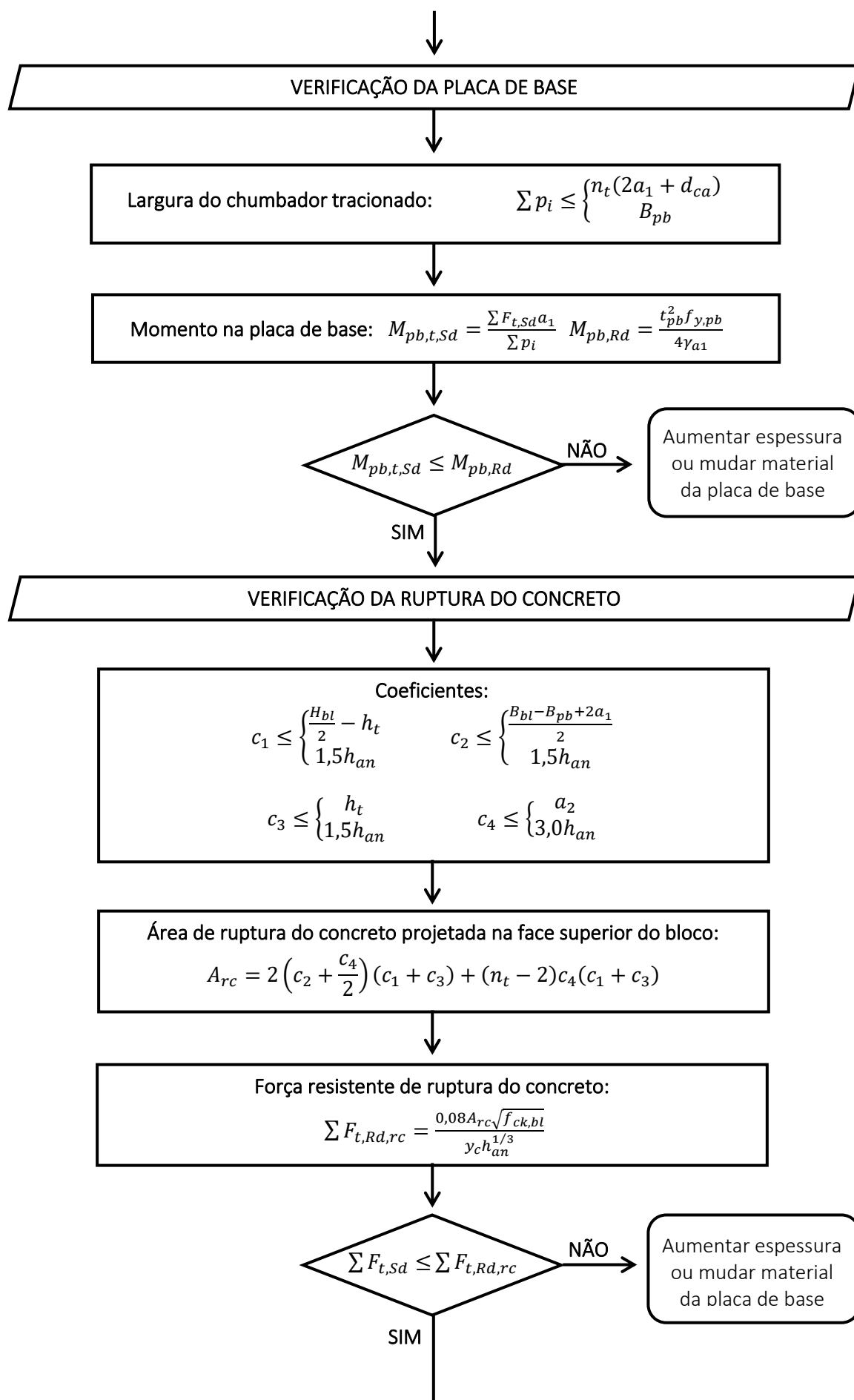


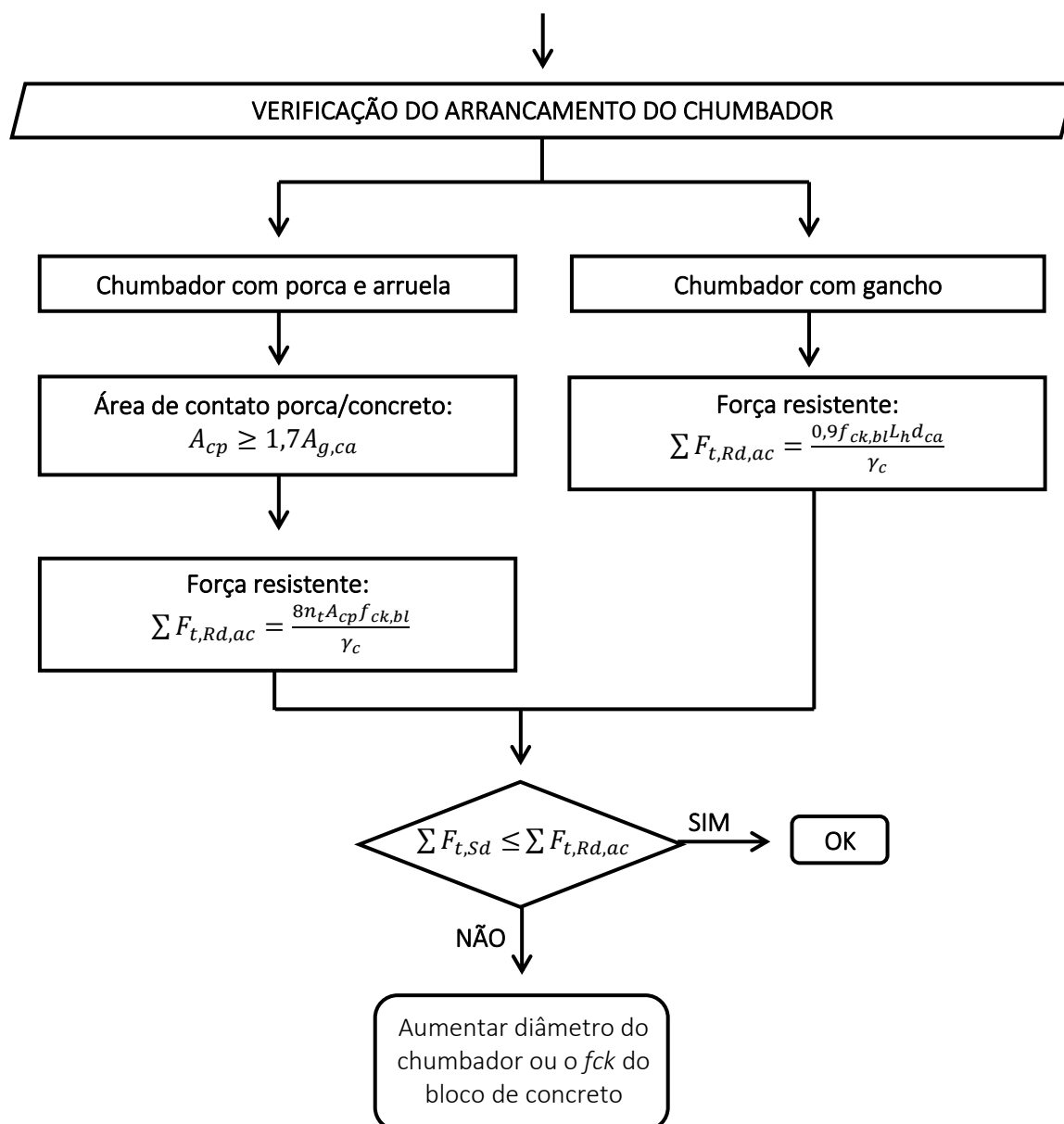




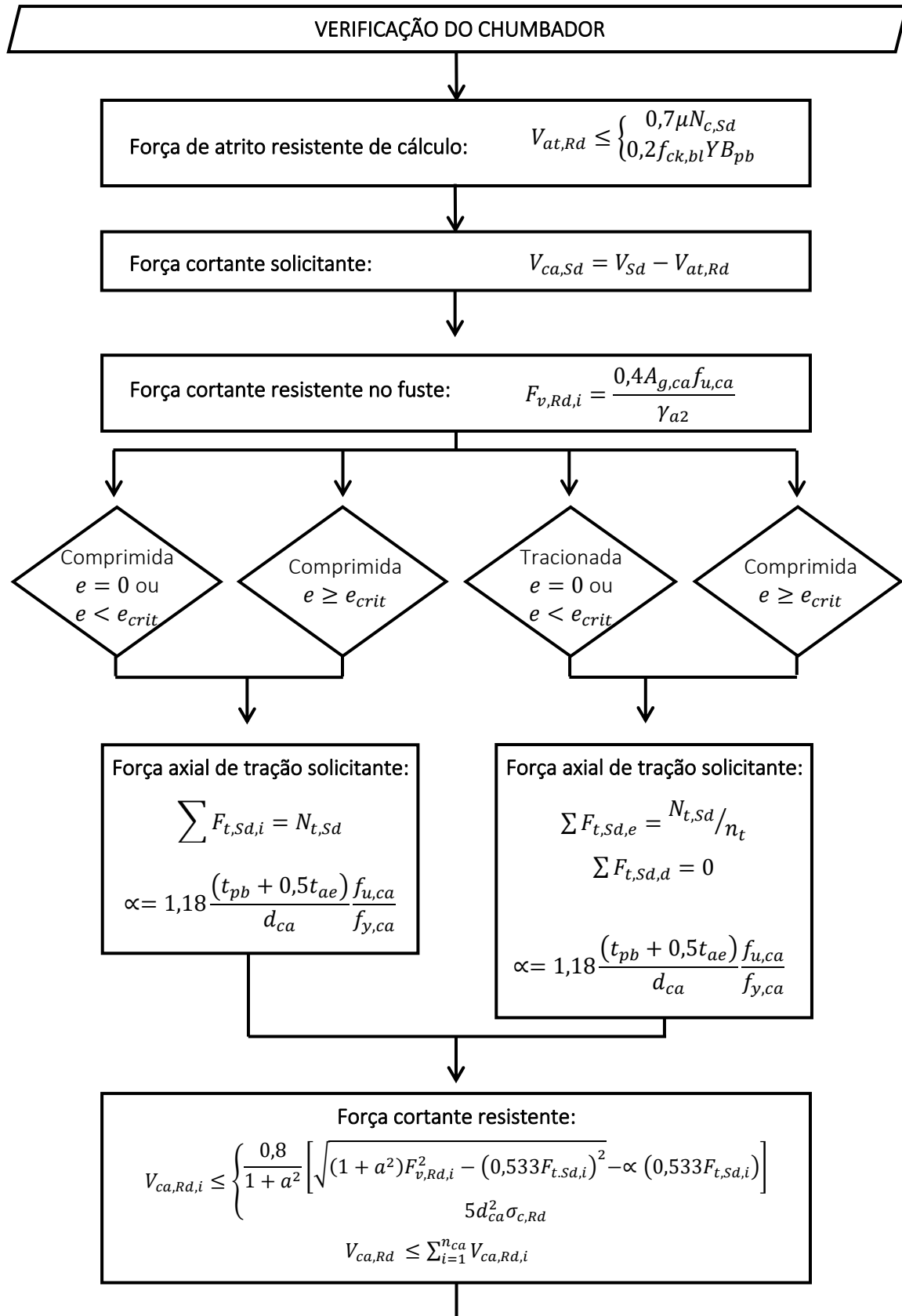
APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DE VERIFICAÇÃO DE BASES COM PERFIL I OU H SUJEITAS À TRAÇÃO

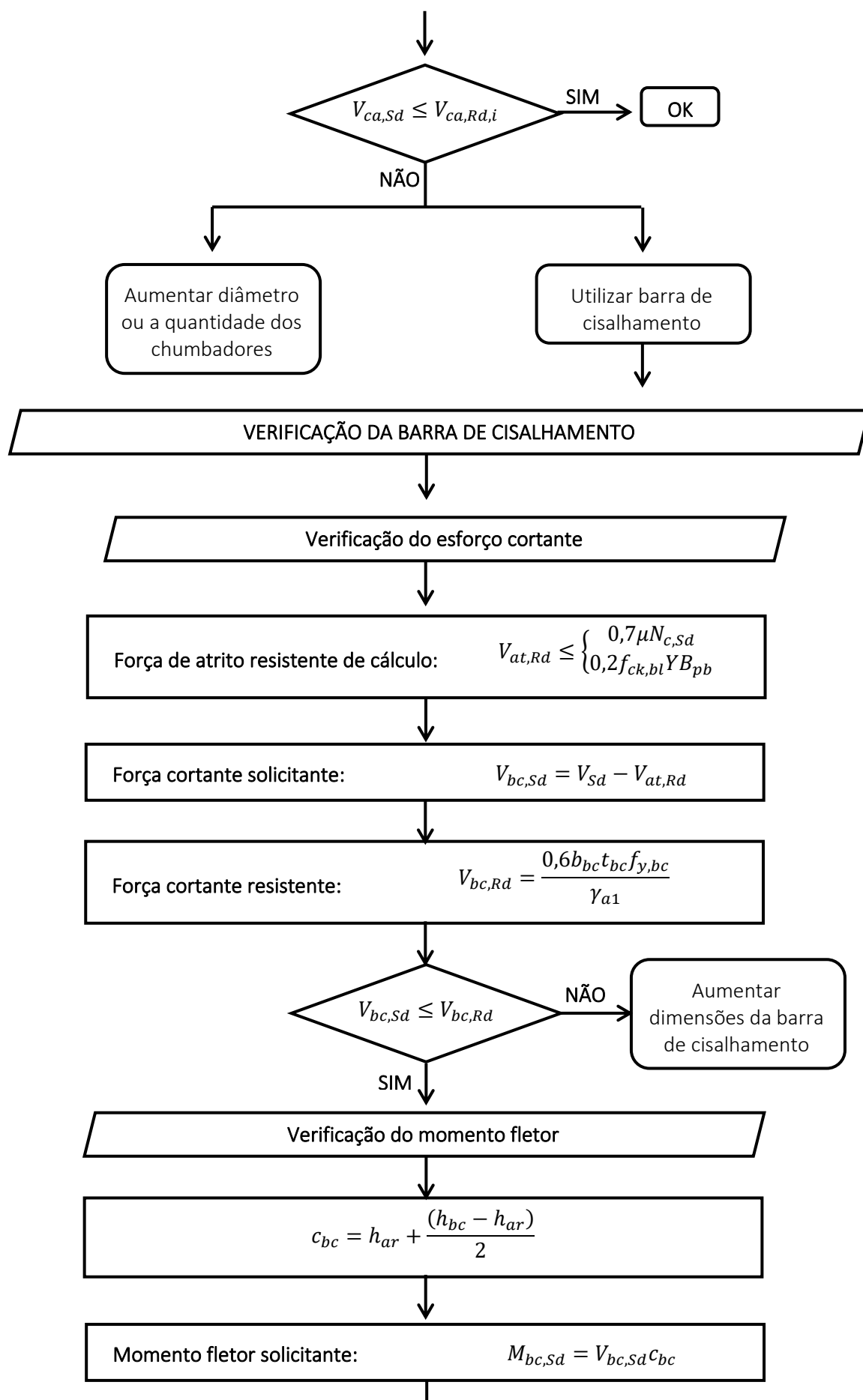


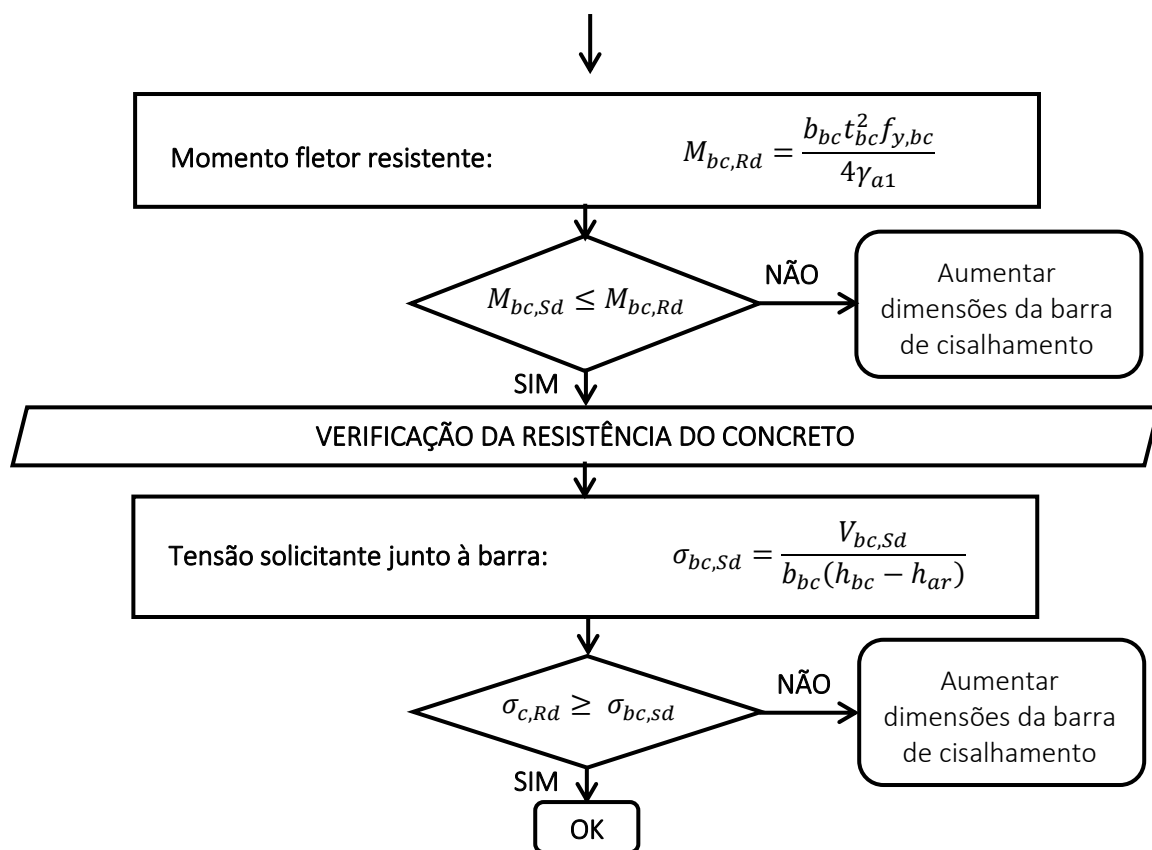




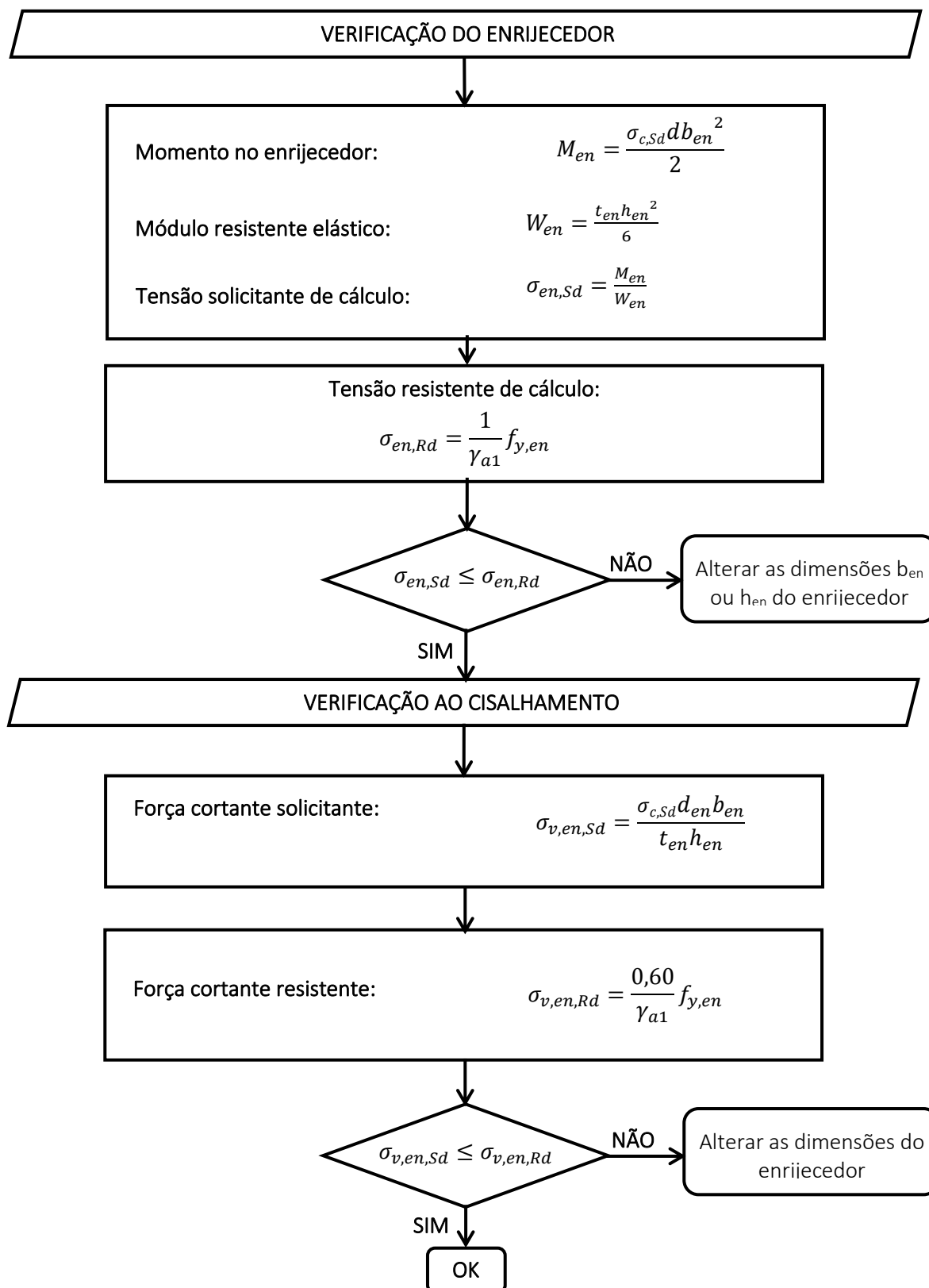
**APÊNDICE C – FLUXOGRAMA DE VERIFICAÇÃO DE BASES COM PERFIL I OU
H SUJEITAS AO CISALHAMENTO**



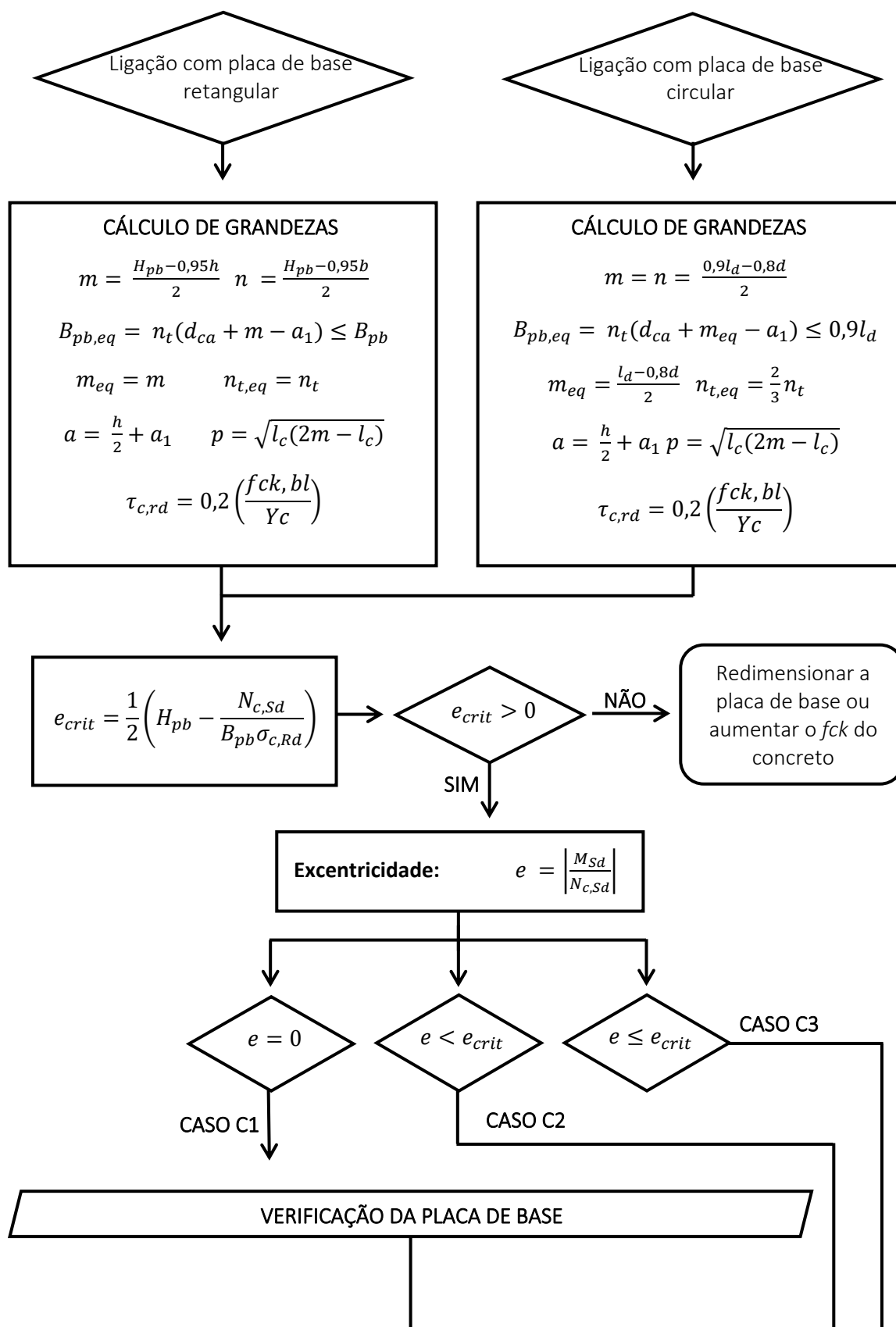


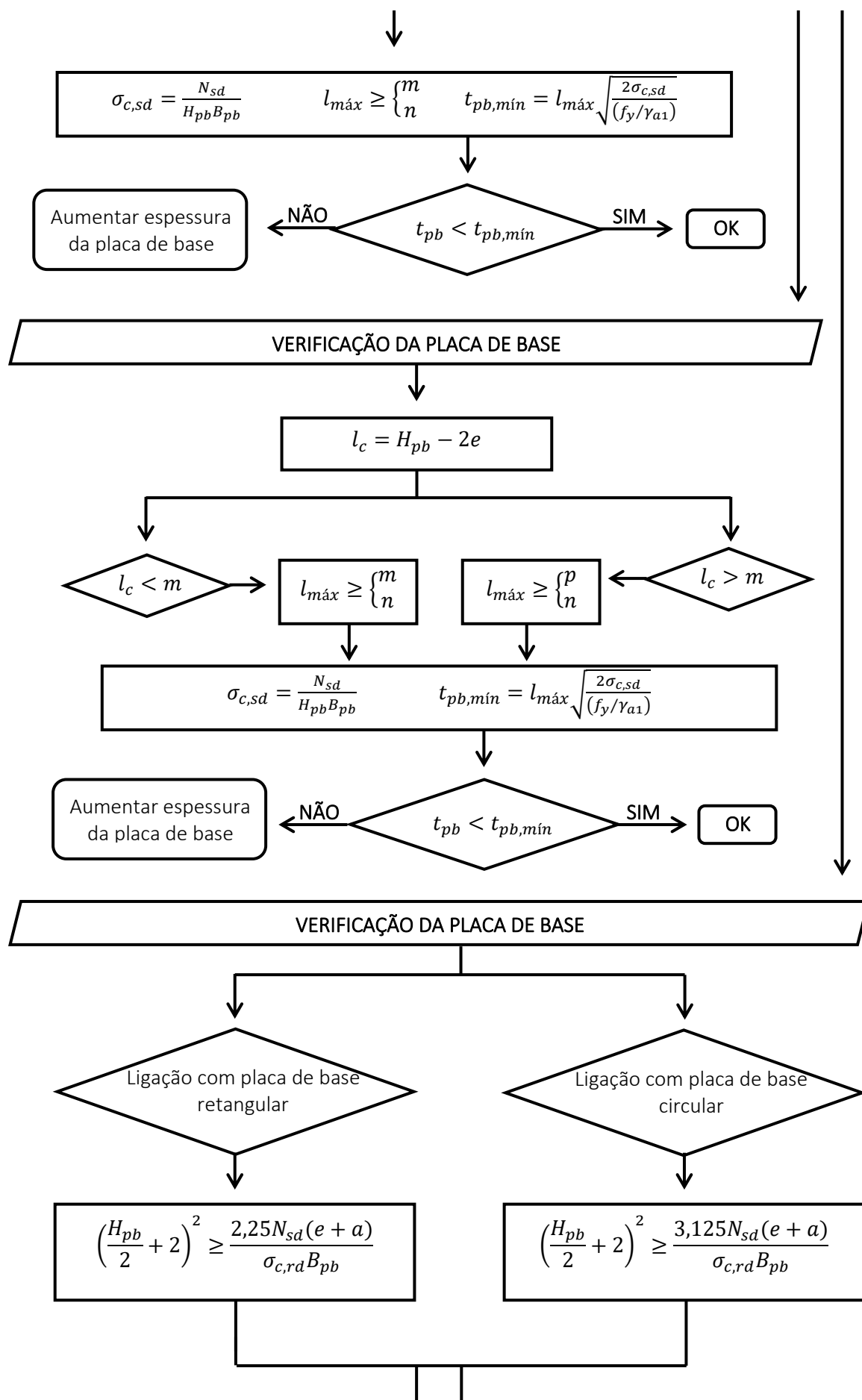


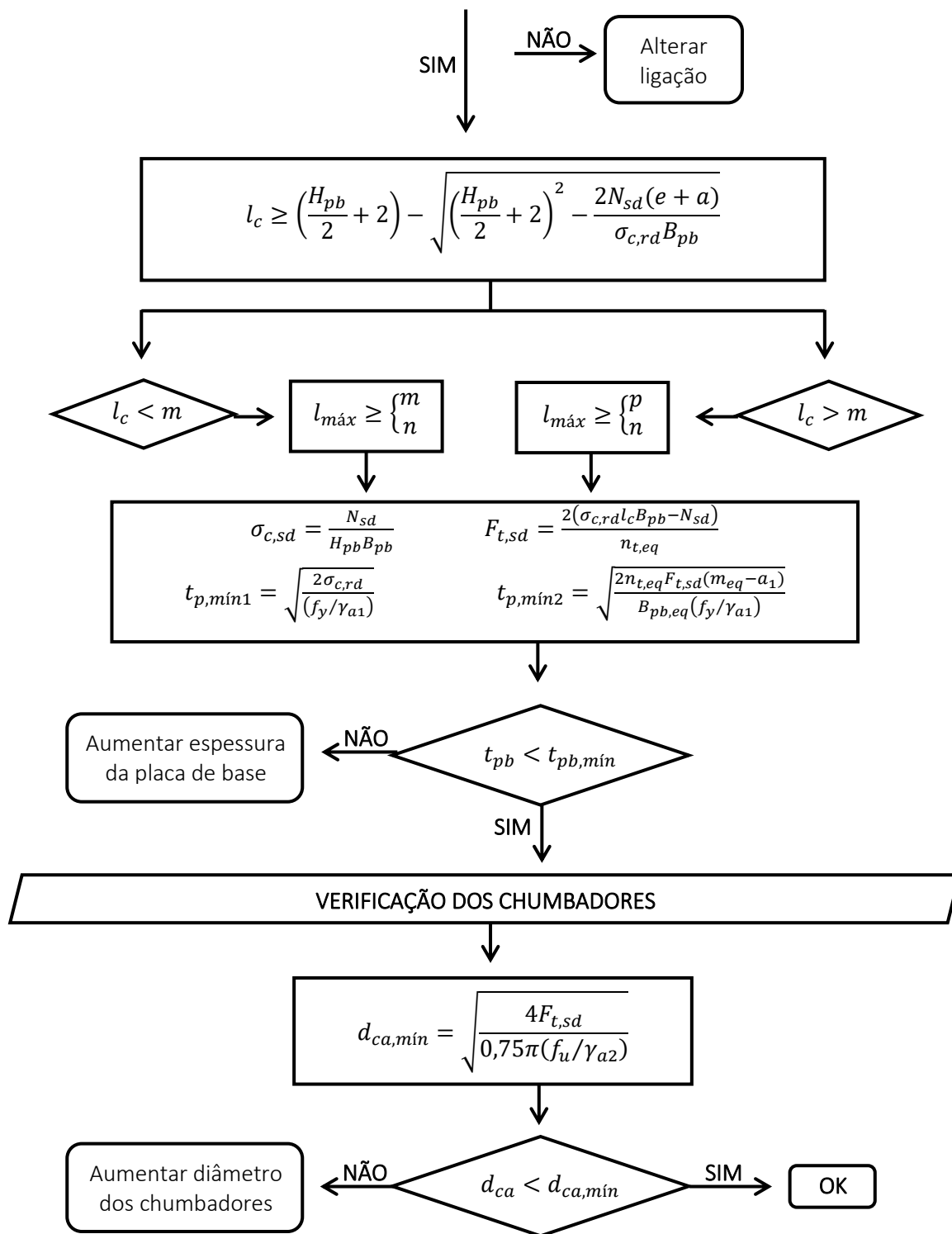
APÊNDICE D – FLUXOGRAMA DE VERIFICAÇÃO DE ENRIJECEDORES



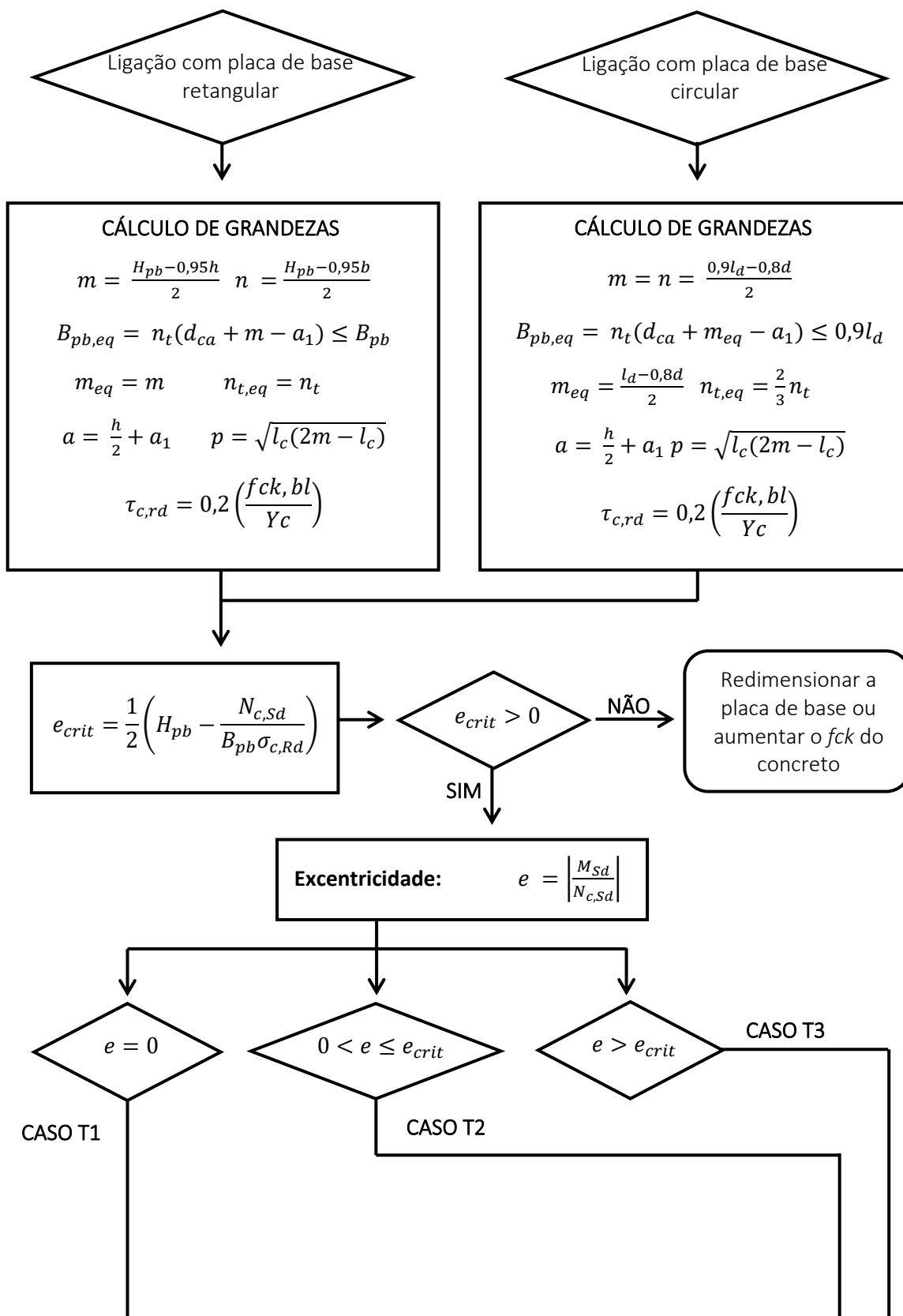
APÊNDICE E – FLUXOGRAMA DE VERIFICAÇÃO DE BASES DE PERFIL TUBULAR COMPRIMIDAS

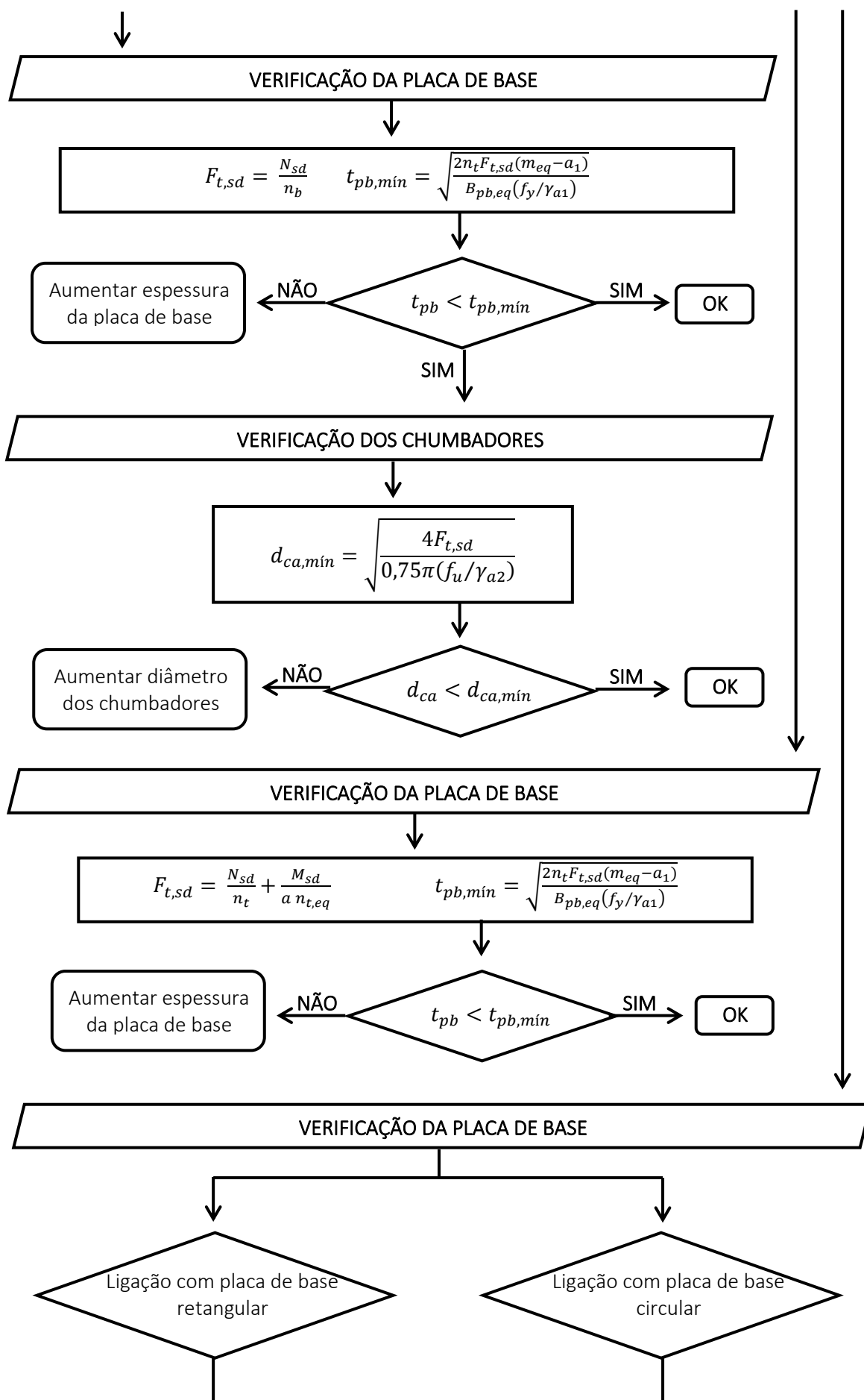


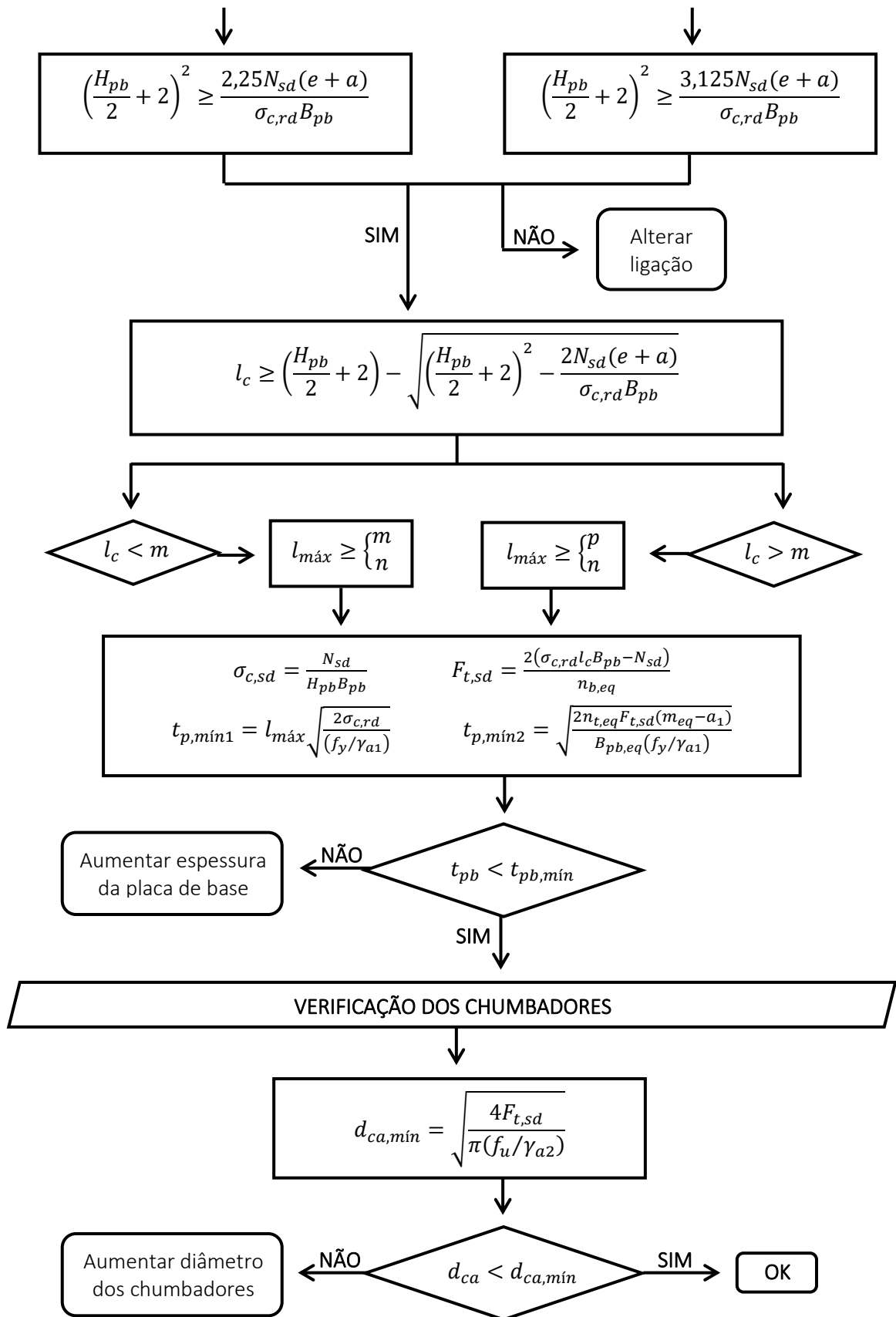




APÊNDICE F – FLUXOGRAMA DE VERIFICAÇÃO DE BASES DE PERFIL TUBULAR TRACIONADAS







APÊNDICE G – FLUXOGRAMA DE VERIFICAÇÃO DE BASES DE PERFIL TUBULAR SOLICITADAS AO CISALHAMENTO

