

Escola de Engenharia  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte, agosto de 2002

**ESTUDO DE BASES DE PILARES METÁLICOS PELO MÉTODO  
DOS ELEMENTOS FINITOS**

MARCELO MELO MARTINS  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

***“ESTUDO DE BASES DE PILARES METÁLICOS PELO MÉTODO DOS  
ELEMENTOS FINITOS”***

Marcelo Melo Martins

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Dr. Ricardo Hallal Fakury  
DEES – UFMG – (Orientador)

---

Prof. Dr. Fernando Amorim de Paula  
DEES – UFMG – (Co-orientador)

---

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues  
DEES – UFMG

---

Prof. Dr. Luiz Fernando Loureiro Ribeiro  
UFOP

Belo Horizonte, 27 de setembro de 2002

## **AGRADECIMENTOS**

A todos que, das mais variadas formas e nas mais diversas ocasiões e situações, em maior ou menor grau, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, minha irmã e minha companheira, pelo apoio e incentivo que me foi dado.

Ao professor Gustavo de Souza Veríssimo, pelo incentivo a me ingressar neste curso.

Aos professores Ricardo Hallal Fakury e Fernando Amorim de Paula, pela paciência e atitude sempre prestativa.

Aos professores, alunos e funcionários, especialmente as meninas da secretaria e o Eliezer, do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, pelas contribuições do cotidiano e pela agradável convivência.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1.	Considerações Gerais .....	1
1.2.	Tipos das Bases de Pilares .....	1
1.3.	Carregamentos mais Comuns em Projeto .....	2
1.4.	Bases Carregadas Axialmente .....	3
1.5.	Bases Sujeitas à Compressão Axial com Momento Fletor .....	4
1.6.	Objetivo e metodologia .....	5
2	PROCEDIMENTOS TRADICIONAIS EM PROJETO .....	6
2.1.	Introdução.....	6
2.2.	Força Axial de Compressão .....	6
2.2.1.	Procedimento de Blodgett (1966).....	7
2.2.2.	Procedimento de DeWolf & Richer (1990).....	9
2.2.2.1.	Cálculo para placas mais leves.....	10
2.2.2.2.	Procedimento geral de cálculo.....	11
2.2.2.3.	Cálculo de placas de base carregadas levemente.....	12
2.3.	Força Axial de Compressão com Momento Fletor.....	15
2.3.1.	Procedimento de Blodgett (1966).....	15
2.3.2.	Procedimento de DeWolf & Richer (1990).....	20
2.3.2.1.	Cálculo para excentricidades pequenas e moderadas .....	21
2.3.2.2.	Cálculo para grandes excentricidades .....	24
2.4.	Força Axial de Tração.....	26
2.4.1.	Procedimento de DeWolf & Richer (1990).....	26
2.5.	Força Cortante.....	28
2.5.1.	Procedimento de DeWolf & Richer (1990).....	28
2.6.	Chumbadores .....	31
2.6.1.	Resistência de Cálculo do Chumbador à Tração .....	32
2.6.1.1.	DeWolf & Richer (1990) .....	32
2.6.2.	Resistência de Cálculo ao Arrancamento – Chumbadores de Gancho	

2.6.2.1. DeWolf & Richer (1990) .....	33
2.6.3. Resistência de Cálculo ao Arrancamento – Chumbadores tipo Parafuso Invertido ou Barra Redonda com Porca .....	34
2.7. Programa de Dimensionamento .....	36
2.7.1. Tela Principal.....	36
2.7.2. Janela Propriedades.....	37
2.7.3. Janela Carregamento .....	38
2.7.4. Janelas de Dimensionamento .....	39
2.7.4.1. Compressão axial .....	39
2.7.4.2. Compressão axial com momento fletor.....	41
2.7.4.3. Tração axial .....	42
2.7.4.4. Chumbadores .....	43
2.7.4.5. Barra de Cisalhamento .....	44
3 ANÁLISE NUMÉRICA VIA MEF .....	46
3.1. Considerações Gerais .....	46
3.2. Modelo 01 .....	48
3.2.1. Propriedades Geométricas .....	48
3.2.2. Situações de Carregamento .....	49
3.2.3. Modelagem via Programa Ansys.....	49
3.2.4. Condições de Contorno .....	55
3.3. Modelo 02.....	56
3.4. Modelo 03.....	58
3.4.1. Propriedades geométricas e carregamento.....	58
3.4.2. Modelagem e condições de contorno.....	59
3.5. Modelo 04.....	61
4 RESULTADOS.....	62
4.1. Considerações Gerais .....	62
4.2. Resultados Numéricos e Analíticos .....	63
4.2.1. Modelo 01 – Compressão axial com momento fletor (chumbador tipo Gancho).....	63
4.2.2. Modelo 02 – Compressão axial com momento fletor (chumbador tipo Barra Reta com Porca Embutida).....	78
4.2.3. Modelo 03 – Compressão Axial.....	81

4.2.4. Modelo 04 – Placa Levemente Carregada .....	87
5 CONCLUSÕES.....	88
6 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....	92
REFERÊNCIAS.....	93
APÊNDICE .....	95

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Bases de Pilar.....	2
FIGURA 1.2 – Situações de carregamento comuns no projeto da base de um pilar de aço.....	3
FIGURA 2.1 – Carga axial de compressão. ....	7
FIGURA 2.2 – Seção crítica. ....	7
FIGURA 2.3 – Balanço para determinação do momento fletor na placa.....	10
FIGURA 2.4 - Área de contato para placas de base levemente carregadas. ....	13
FIGURA 2.5 – Placa submetida a força axial com momento fletor.....	15
FIGURA 2.6 – Comportamento elástico do bloco de concreto e chumbadores. ...	18
FIGURA 2.7 – Situação geral. ....	21
FIGURA 2.8 – Pequena excentricidade – contato em toda placa. ....	22
FIGURA 2.9 – Excentricidade moderada – contato em parte da placa. ....	23
FIGURA 2.10 – Grande excentricidade.....	24
FIGURA 2.11 – Placa de base submetida à tração.....	26
FIGURA 2.12 – Linhas de escoamento ou charneiras plásticas. ....	27
FIGURA 2.13 – Esquema da barra de cisalhamento. ....	30
FIGURA 2.14 – Tipos de chumbador. ....	31
FIGURA 2.15 – Área projetada. ....	35
FIGURA 2.16 – Tela principal do programa .....	36
FIGURA 2.17 – Janela propriedades. ....	38
FIGURA 2.18 – Janela carregamento. ....	38
FIGURA 2.19 – Janela procedimento de cálculo.....	39
FIGURA 2.20 – Janela compressão axial / procedimento AISC (DeWolf & Richer 1990). ....	40
FIGURA 2.21 – Botões para ativar as janelas para o dimensionamento dos chumbadores e da barras de cisalhamento.....	40
FIGURA 2.22 – Janela compressão + momento / procedimento Blodgett (1966).41	
FIGURA 2.23 – Janela tração axial / AISC.....	42
FIGURA 2.24 – Janela cálculo dos chumbadores.....	43
FIGURA 2.25 – Janela barra de cisalhamento.....	44

FIGURA 2.26 – Janela ajuda.....	45
FIGURA 3.1 – Geometria do modelo 01. ....	48
FIGURA 3.2 – Elemento SOLID45.....	50
FIGURA 3.3 – Elemento SHELL63. ....	51
FIGURA 3.4 – Elemento BEAM4.....	52
FIGURA 3.5 – Par de elementos de contato. ....	53
FIGURA 3.6 - Curva do comportamento não-linear do elemento de mola. ....	54
FIGURA 3.7 - Malha gerada para o modelo 01 e seus respectivos contornos.....	54
FIGURA 3.8 - Geometria do modelo 02. ....	56
FIGURA 3.9 - Malha gerada para o modelo 02 e seus respectivos contornos.....	57
FIGURA 3.10 – Detalhe do chumbador com porca embutida. ....	57
FIGURA 3.11 – Geometria padrão para o modelo 03. ....	58
FIGURA 3.12 – Malha gerada para o modelo 03 com o carregamento aplicado. ....	60
FIGURA 3.13 – Malha gerada para o modelo 04. ....	61
FIGURA 4.1 – Condição deformada do modelo 01.....	63
FIGURA 4.2 – Tensões normais à superfície do bloco de concreto.....	64
FIGURA 4.3 – Sistema de coordenadas do modelo.....	64
FIGURA 4.4 – Distribuição da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para as quatro situações de carregamento na análise numérica. ....	65
FIGURA 4.5 – Comparativo entre a distribuição da análise numérica e teórica da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para a situação 01 de carregamento. ....	65
FIGURA 4.6 – Comparativo entre a distribuição da análise numérica e teórica da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para a situação 02 de carregamento. ....	66
FIGURA 4.7 – Comparativo entre a distribuição da análise numérica e teórica da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para a situação 03 de carregamento. ....	67
FIGURA 4.8 – Comparativo entre a distribuição da análise numérica e teórica da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para a situação 04 de carregamento. ....	67
FIGURA 4.9 – Distribuição da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para as seis situações de carregamento conforme Blodgett (1966)..	68

FIGURA 4.10 – Distribuição da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para as seis situações de carregamento conforme AISC (DeWolf & Richer (1990)).	69
FIGURA 4.11 – Comparativo entre a distribuição da tensão de contato nas situações 4,5 e 6 para ambos os procedimentos.	69
FIGURA 4.12 – Tensões SX nas fibras superiores da placa de base com espessura de 63mm.	70
FIGURA 4.13 – Tensões SZ nas fibras superiores da placa de base de espessura de 63mm.	71
FIGURA 4.14 – Pontos da placa de base onde foram obtidas as tensões SX e SZ.	72
FIGURA 4.15 – Resultante de tensão de contato para obtenção do momento fletor no ponto A.	73
FIGURA 4.16 – Gradiente de tensão axial nos chumbadores.	74
FIGURA 4.17 – Comparativo entre a distribuição da análise numérica e teórica da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para a situação 04 de carregamento.	75
FIGURA 4.18 – Distribuição da tensão de contato (placa/bloco) para a situação 04 de carregamento para espessuras da placa tendendo à infinito para o modelo 01.	76
FIGURA 4.19 – Condição deformada para a situação 4.	78
FIGURA 4.20 – Tensões SY no bloco de concreto.	79
FIGURA 4.21 – Tensões na placa de base.	79
FIGURA 4.22 – Placa de base do modelo HPL300.	81
FIGURA 4.23 – Distribuição da tensão normal à superfície do bloco (SY).	82
FIGURA 4.24 – Distribuição da tensão SX na placa de base.	83
FIGURA 4.25 – Distribuição da tensão SZ na placa de base do modelo HPM 300.	83
FIGURA 4.26 – Pontos da placa de base onde foram obtidas as tensões SX e SZ.	84
FIGURA 4.27 – Seção crítica.	85
FIGURA 4.28 – Status do contato entre a placa de base e o bloco de concreto.	87
FIGURA 4.29 – Área de contato obtida pelo método de DeWolf & Richer (1990).	87
FIGURA 5.1 – Representação da distribuição da tensão de contato.	89

FIGURA 5.2 – Seção crítica..... 91

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Tensões de contato admissíveis para o bloco de concreto. ....	8
TABELA 2.2 –Valores para o coeficiente de atrito. ....	28
TABELA 2.3 – Parâmetros Mínimos para instalação dos chumbadores. ....	31
TABELA 3.1 – Espessura da placa de base obtida através do procedimentos Blodgett (1966) e DeWolf & Richer (1990). ....	49
TABELA 3.2 – Situações de carregamento. ....	49
TABELA 3.3 – Dimensões dos perfilados utilizados no modelo 03. ....	58
TABELA 3.4 – Resistência de Cálculo à Compressão Axial. ....	59
TABELA 3.5 – Dimensões da placa de base para o modelo 03 em milímetros. ...	59
TABELA 4.1 – Situações de carregamento para comparativo entre procedimentos teóricos. ....	68
TABELA 4.2 – Tensões SX e SZ na placa de base com espessura de 63 mm. ...	72
TABELA 4.3 – Tensões SX e SZ na placa de base com espessura de 50 mm. ...	72
TABELA 4.4 – Momento fletor na placa de base em uma faixa unitária para o procedimento de DeWolf & Richer (1990). ....	73
TABELA 4.5 – Momento fletor na placa de base em uma faixa unitária para o procedimento de Blodgett (1966). ....	73
TABELA 4.6 – Força de tração no chumbador e sua respectiva resistência de cálculo. ....	75
TABELA 4.7 – Força de tração no chumbador e sua respectiva resistência de cálculo para 7 espessuras da placa de base. ....	77
TABELA 4.8 – Tensões SX e SZ na placa de base com espessura de 63 mm. ...	79
TABELA 4.9 – Momento fletor na placa de base em uma faixa unitária na seção crítica. ....	80
TABELA 4.10 – Valor da máxima tensão normal à superfície do bloco (SY). ....	82
TABELA 4.11 – Tensões SX e SZ da placa de base. ....	84
TABELA 4.12 – Momento fletor em uma faixa unitária da placa de base. ....	85

## RESUMO

Os procedimentos de projeto mais usuais para bases de pilares metálicos apresentam diferentes hipóteses para a distribuição dos esforços nos componentes das mesmas. Este trabalho teve como objetivo analisar bases de pilares metálicos, através de um programa computacional com elementos finitos, para obter com maior precisão o comportamento de seus componentes e, por meio dos resultados desta análise, avaliar os procedimentos usuais de projeto. São tratados pilares com seção “H” e placas de base sem nervuras. Na análise numérica foram abordadas as bases carregadas axialmente por uma força de compressão, atuando ou não um momento fletor. Para as situações em que atua um momento fletor, criaram-se modelos abordando tanto chumbadores tipo gancho quanto do tipo barra reta com porca embutida no concreto.

Observou-se neste trabalho a influência da espessura da placa de base no comportamento do conjunto da base de um pilar metálico (pilar, placa de base, chumbadores e bloco de concreto) e na distribuição dos esforços nestes componentes. Verificou-se ainda que os resultados teóricos, encontrados através dos procedimentos de projeto usuais, se aproximam dos resultados da análise numérica para valores específicos da espessura da placa de base.

## **ABSTRACT**

The most used design methods for steel column bases present hypotheses to the stress distribution on their connection components. The goal of this work was to analyze steel column bases through a finite element computational program in order to obtain more accurately the behavior of their components and through the results of this analysis to assess the design usual methods. The study include H profile columns with base plates without shear legs. In the numerical analysis were discussed the bases axially loaded by a compression load with or without a bending moment. To the situation that act a bending moment it has been created models using either hooked anchor bolts and thread rods with an end welded nut embedded in the concrete.

It was observed in this work the influence of the thickness of a base plate in the behavior of the components of a steel column base (column, base plate, anchor bolts and concrete block) and in the stress distribution of these components. It was still verified that the theoretical results which were found through the usual design methods approximate from the numerical analysis results to specific values of the thickness of the base plate.

# 1

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Nas estruturas metálicas, as bases de pilares têm sido muito pouco estudadas. Os elementos que compõem a base, placa de base e chumbadores, têm como objetivo conduzir os esforços solicitantes do pilar ao bloco de concreto e garantir a fixação da extremidade inferior do pilar na fundação, de acordo com o esquema estrutural adotado.

### **1.2. TIPOS DAS BASES DE PILARES**

Na classificação tradicional, as bases de pilares podem ser rotuladas ou engastadas.

A base rotulada ideal assemelha-se a uma rótula perfeita (FIG. 1.1a). Esse tipo de base é pouco utilizado devido às dificuldades de fabricação. A base rotulada mais simples e mais utilizada é formada por uma placa soldada à extremidade inferior do pilar e pela colocação de chumbadores posicionados o mais próximo possível

de seu eixo de interesse (FIG. 1.1b). Esse tipo de base torna menor o custo da fundação.

Geralmente, as bases engastadas propiciam estruturas mais econômicas e fundações mais onerosas que as rotuladas. Esse tipo de base tem a capacidade de resistir, além das forças verticais, aos momentos fletores devidos ao esquema estrutural adotado. A base engastada mais simples e mais utilizada consiste em uma placa soldada à extremidade inferior do pilar, com chumbadores afastados da linha de centro, com objetivo de se formar um braço de alavanca (FIG. 1.1c).

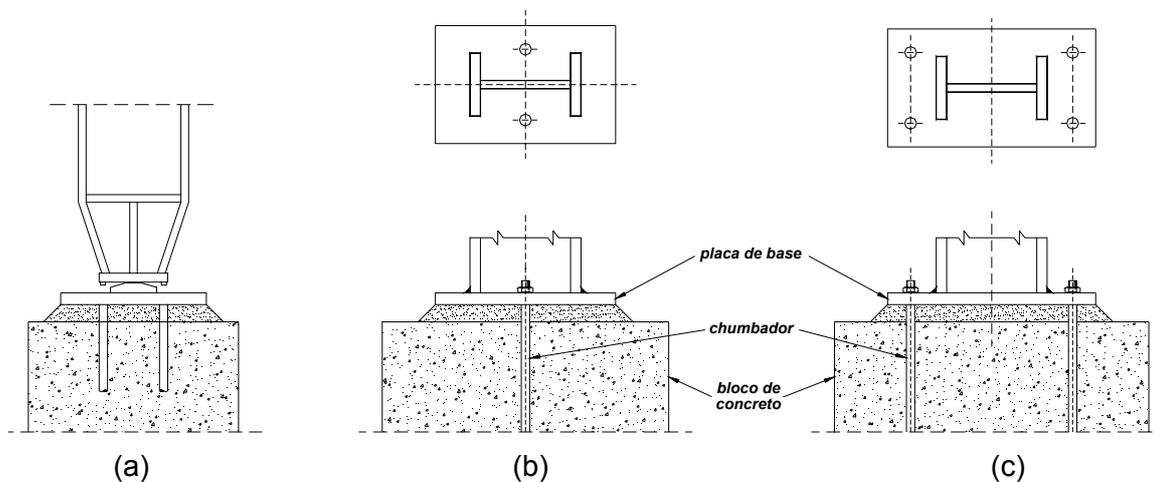
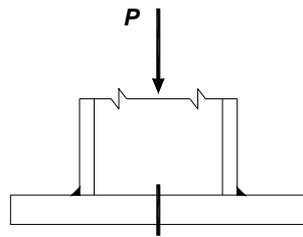


FIGURA 1.1 – Bases de Pilar.

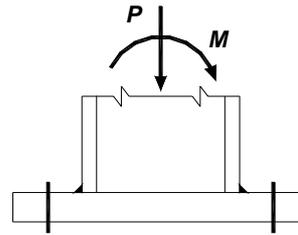
### 1.3. CARREGAMENTOS MAIS COMUNS EM PROJETO

Na base de um pilar, duas situações de carregamento são mais comuns em projeto: força axial e força axial com momento fletor, podendo atuar, nos dois casos, também uma força cortante.

O caso em que o pilar é carregado axialmente é mostrado na FIG. 1.2a. A força é perpendicular à placa de base e passa pelo centro de gravidade da seção transversal do pilar. As bases rotuladas são empregadas neste caso. Os chumbadores são usados apenas para estabilizar o pilar na fase de montagem, tendo sua resistência desprezada.



(a) força axial



(b) força axial e momento fletor

FIGURA 1.2 – Situações de carregamento comuns no projeto da base de um pilar de aço.

O segundo caso, mostrado na FIG. 1.2b, inclui tanto uma força axial, quanto um momento fletor. Este tipo de ligação (engastada) deve ser empregada nas bases de pórticos onde a capacidade de resistir a um momento fletor é necessária. Esse tipo de combinação de esforços surge também quando uma força é aplicada excêntrica ao eixo do pilar, que pode ser substituída por esta força aplicada axialmente e um momento fletor resultante. Se o momento fletor é relativamente pequeno, a ligação da base do pilar pode ser calculada desconsiderando-se a presença dos chumbadores; embora, estes sejam necessários na fase de montagem.

A força cortante pode atuar em ambos os casos anteriores, podendo ser resistida através do atrito entre a placa de base e bloco de concreto ou pelo uso de barras de cisalhamento, fixadas na parte inferior da placa de base, ou pelos próprios chumbadores.

Este trabalho é direcionado principalmente ao estudo das bases carregadas axialmente, atuando simultaneamente ou não um momento fletor. Desta forma, no que diz respeito à resistência da base de um pilar à força cortante, será apenas apresentado o procedimento para a obtenção da mesma no segundo capítulo, não sendo este item incluído nos capítulos referentes à análise numérica, resultados e conclusão.

#### **1.4. BASES CARREGADAS AXIALMENTE**

Placas de base carregadas axialmente são aquelas em que a força é perpendicular à sua superfície, passando pelo centro de gravidade do pilar.

DeWolf & Richer (1990) e Blodgett (1966) apresentam métodos semelhantes para o dimensionamento dessas placas. Ambos os estudos assumem que a placa de base flete em torno de uma seção crítica como uma viga em balanço, carregada com uma tensão de contato uniformemente distribuída sob esta placa.

Bases levemente carregadas com as dimensões da placa de base aproximadamente iguais às dimensões do pilar foram inicialmente tratadas por Fling (1970), utilizando como aproximação uma flexão elástica da placa e a hipótese de que toda a área da placa esteja em contato com o concreto. Esta aproximação tem sido utilizada no AISC/ASD (1989). Esta aproximação mostrou-se conservadora. Stockwell (1975), com modificações de Murray (1983), desenvolveu um método com base na hipótese de que o contato ocorre somente sob a região das mesas e da alma do pilar metálico.

### **1.5. BASES SUJEITAS À COMPRESSÃO AXIAL COM MOMENTO FLETOR**

As bases de pilares podem estar sujeitas a uma força axial de compressão juntamente com momento fletor ou a cargas de compressão excêntricas. Blodgett (1966) e DeWolf & Richer (1990) tratam deste assunto de formas diferentes. Em ambos os procedimentos, hipóteses são feitas sobre a magnitude e distribuição da tensão de contato entre o bloco de concreto e a placa de base e a tensão ou força nos chumbadores. A diferença entre os procedimentos é devida à formulação dessas hipóteses.

Segundo Blodgett (1966), as seções planas do contato entre a placa de base e o bloco de concreto *permanecem planas*, supondo portanto, que a placa de base seja perfeitamente rígida. Ao contrário do que admite Blodgett (1966), DeWolf & Richer (1990) consideram que as seções *não permanecem planas*. Desta forma não uma relação de proporcionalidade entre a deformação dos chumbadores e a do concreto sob à extremidade da placa de base.

## **1.6. OBJETIVO E METODOLOGIA**

Geralmente, a placa de base é maior que as dimensões externas do pilar, assim a flexão da mesma ocorre resultando uma tensão de contato no concreto de magnitude pequena ou inexistente nas extremidades da placa e maiores sob o pilar (alma e mesas). Esta distribuição não-linear de tensões é função do comportamento flexível da placa, do comportamento não-linear do concreto e da relação entre a área de contato entre o concreto e a placa de base, que cria o efeito de confinamento e, conseqüentemente, um estado de tensão triaxial no concreto. Apresentar aproximações para o problema resulta na formulação de hipóteses para a distribuição dos esforços nos componentes da ligação para se estabelecer as variáveis.

Portanto, este trabalho tem como objetivo apresentar e discutir, de uma forma crítica, as hipóteses dos procedimentos de projeto mais usuais para bases de pilares metálicos, fazendo uma análise comparativa entre os mesmos. Para melhorar a eficiência dessa análise, criou-se um programa em linguagem Delphi, contendo os procedimentos de projeto estudados.

Numa fase posterior, foi feita a análise numérica de quatro modelos via Método dos Elementos Finitos. Para tanto, foi empregado o programa ANSYS versão 5.7, disponível no Laboratório de Mecânica Computacional (LAMEC) do Departamento de Engenharia de Estruturas (DEES). Dois desses modelos simularam o comportamento de bases de pilares sujeitas à uma força axial de compressão e a um momento fletor, ambos contendo os componentes da base de um pilar metálico (pilar, placa de base, chumbadores e bloco de concreto), um com chumbadores tipo gancho e outro com chumbadores tipo barra reta com porca soldada. Os outros dois modelos simularam bases sujeitas somente à força axial de compressão.

Os resultados da análise numérica foram comparados com os valores obtidos através dos procedimentos de cálculo estudados, com objetivo de avaliar a precisão destes últimos.

# 2

## ***PROCEDIMENTOS TRADICIONAIS EM PROJETO***

### ***2.1. INTRODUÇÃO***

Para dimensionar a base de um pilar metálico, submetida aos carregamentos descritos no capítulo anterior, tradicionalmente utiliza-se para o dimensionamento dos seus componentes, dois procedimentos de projeto: Blodgett (1966) e DeWolf & Richer (1990).

O aspecto mais importante na discussão desses procedimentos é a forma ou o conjunto de hipóteses com as quais estes chegam aos valores dos esforços nos componentes da base.

### ***2.2. FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO***

Entre os casos de carregamento mais freqüentes encontra-se o de pilares carregados axialmente (FIG. 2.1). Considera-se, nesse caso, que o carregamento é perpendicular à placa e aplicado sobre eixo do pilar. Esta condição de

carregamento é utilizada em pórticos para os quais as bases dos pilares são consideradas como rótulas.

Os chumbadores não são submetidos a qualquer solicitação, têm apenas a função construtiva de estabilizar o pilar durante a montagem da estrutura.

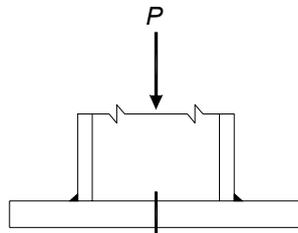


FIGURA 2.1 – Carga axial de compressão.

### 2.2.1. Procedimento de Blodgett (1966)

A placa de base é dimensionada assumindo-se que a mesma flete em torno de uma seção crítica (extremidade a área hachurada da FIG. 2.2) como uma viga em balanço. A carga decorrente da flexão neste balanço é considerada uniformemente distribuída e igual à tensão de contato que atua no bloco de concreto. Blodgett (1966) utiliza o método das tensões admissíveis (ASD).

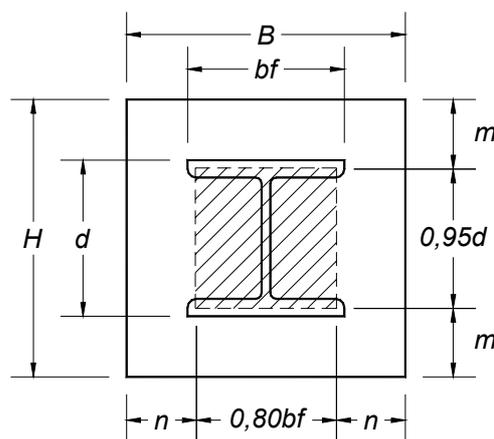


FIGURA 2.2 – Seção crítica.

Primeiramente, as dimensões da placa de base são determinadas dividindo-se a carga axial que atua no pilar pela resistência à compressão do bloco de concreto. A TAB. 2.1 fornece as tensões de contato admissíveis no bloco de concreto conforme Blodgett (1966).

TABELA 2.1 – Tensões de contato admissíveis para o bloco de concreto.

Toda área do bloco ocupada pela placa de base	0,250 $f_{ck}$
1/3 da área do bloco ocupada pela placa de base	0,375 $f_{ck}$

Determina-se então, as dimensões do balanço  $m$  e  $n$  conforme as equações 2.1 e 2.2 (ver FIG. 2.2).

$$m = \frac{1}{2} (H - 0,95d) \quad (2.1)$$

$$n = \frac{1}{2} (B - 0,80b_f) \quad (2.2)$$

A primeira função da espessura da placa de base é fornecer resistência suficiente para suportar o momento fletor ( $M_{placa}$ ) gerado pelo balanço da placa de base ( $m$  ou  $n$ ). O momento  $M_{placa}$ , para uma faixa de largura unitária, é dado pelo maior valor entre:

$$\frac{f_{cd} m^2}{2} \quad \text{e} \quad \frac{f_{cd} n^2}{2}$$

A tensão na placa de base por unidade de comprimento devido ao momento é dada por:

$$\sigma = \frac{M_{placa}}{W}$$

sendo

$$W = \frac{t^2}{6}$$

Então:

$$t^2 = 6 \frac{M_{placa}}{\sigma}$$

$$t^2 = \begin{cases} \frac{6pm^2}{2\sigma} = \frac{3pm^2}{\sigma} \\ \frac{6pn^2}{2\sigma} = \frac{3pn^2}{\sigma} \end{cases}$$

Portanto, a espessura da placa de base necessária é obtida conforme a equação 2.3, utilizando-se o maior valor entre:

$$m \sqrt{\frac{3\sigma_c}{0,75f_y}} \quad \text{e} \quad n \sqrt{\frac{3\sigma_c}{0,75f_y}} \quad (2.3)$$

onde  $\sigma_c$  é o valor da tensão de contato.

### 2.2.2. Procedimento de DeWolf & Richer (1990)

Neste procedimento, assume-se que o pilar está centrado na placa, a qual, por sua vez está centrada na fundação de concreto. O procedimento de DeWolf & Richer (1990) possui dois passos. A área necessária da placa de base é primeiro determinada, a partir da resistência de cálculo do concreto à compressão. No *Método dos Estados Limites*, o valor da carga de cálculo que atua no pilar ( $P_d$ ) é limitado pela seguinte equação:

$$P_d = \varphi_c R_n = 0,85\varphi_c f_{ck} A_1 \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq \varphi_c 1,7 f_{ck} A_1 \quad (2.4)$$

onde:

- $f_{ck}$  = resistência nominal do concreto a compressão;
- $A_1$  = área da placa de base;
- $A_2$  = área do bloco de concreto;
- $\varphi_c$  = fator de resistência para o contato no concreto igual a 0,60;
- $R_n$  = resistência nominal do concreto no contato.

Há um aumento da resistência do concreto no contato, quando a área do bloco é maior que a área da placa, devido ao efeito benéfico de confinamento. Este acréscimo de resistência é máximo quando a relação é igual ou maior que 4, e isto resulta em dimensões menores para a placa de base.

O segundo passo, então, é determinar a espessura da placa de base. De maneira similar ao procedimento de Blodgett (1966), assume-se que a placa flete em torno de uma seção crítica como uma viga em balanço, carregada com uma tensão de

contato uniformemente distribuída. As seções críticas estão próximas das extremidades do pilar conforme mostrado na FIG. 2.2 e o balanço utilizado no cálculo é mostrado na FIG. 2.3.

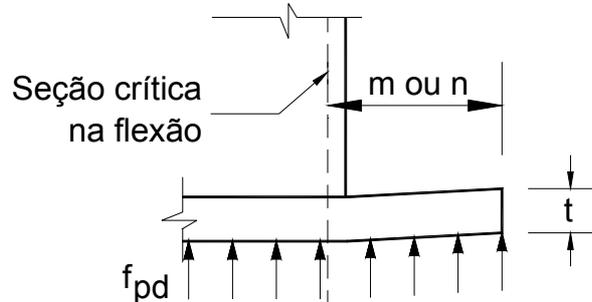


FIGURA 2.3 – Balanço para determinação do momento fletor na placa.

O momento plástico é empregado para se determinar a capacidade da placa. É igual  $Zf_y$ , onde  $Z$  é o módulo plástico da seção, igual a  $t^2/4$ , para uma faixa de largura unitária. O coeficiente de resistência para o momento  $\phi_b$  é 0,90.

#### 2.2.2.1. Cálculo para placas mais leves

As placas de base mais econômicas ocorrem quando  $m$  e  $n$ , mostrados na FIG. 2.2, são iguais e a relação entre a área do bloco de concreto e da placa é maior ou igual a 4. O primeiro caso ocorre quando a diferença entre  $B$  e  $H$ , mostrados na FIG. 2.2, é igual à diferença entre  $0,95d$  e  $0,80b_f$ . O procedimento seguinte fornece os passos necessários para a obtenção da placa mais leve:

*Procedimento de cálculo pelo LRFD:*

→ Determinar a carga de cálculo de compressão que atua no pilar ( $P_d$ );

→ A área da placa de base necessária ( $A_1$ ) é:

$$A_1 = \frac{P_d}{1,7\phi_c f_{ck}}, \text{ onde } \phi_c = 0,60;$$

→ As dimensões,  $B$  e  $H$ , são calculadas para que  $m$  e  $n$  tenham valores próximos;

$$H = \sqrt{A_1} + \Delta$$

onde  $\Delta = 0,5(0,95d - 0,80bf)$

Então:

$$B = \frac{A_1}{H}$$

Estes valores deverão ser arredondados para cima até a metade ou o inteiro mais próximo.

→ Determinar  $m$  e  $n$  conforme equação 2.1 e 2.2;

→ Determinar a espessura da placa necessária ( $t$ ) utilizando o maior valor entre;

$$m \sqrt{\frac{2P_d}{0,9f_yBH}} \quad \text{e} \quad n \sqrt{\frac{2P_d}{0,9f_yBH}} \quad (2.5)$$

→ As dimensões do bloco são então determinadas. Como o procedimento foi baseado na maior tensão de contato admissível, a área de concreto mínima deverá ser:

$$A_2 = 4HB$$

#### 2.2.2.2. Procedimento geral de cálculo

Nem sempre é possível se ter a relação entre a área do bloco de concreto e da placa de base e igual a 4. Se esta relação é determinada antes do cálculo da placa, o cálculo seguirá o exemplo anterior, com a mudança da resistência de cálculo do concreto no contato (Eq. 2.4).

Quando as dimensões do bloco são conhecidas o seguinte procedimento deverá ser empregado:

*Procedimento de cálculo pelo LRFD:*

→ Determinar a carga de cálculo de compressão que atua no pilar ( $P_d$ );

→ A área da placa será igual ao maior valor de:

$$A_1 = \frac{1}{A_2} \left[ \frac{P_d}{(0,60 \times 0,85 f_{ck})} \right]^2$$

$$A_1 = \frac{P_d}{1,7 \times 0,6 f_{ck}}$$

Obs.: Se a segunda equação prevalecer, a área de concreto  $A_2$  é igual ou maior que 4 vezes a área da placa.

→ As dimensões,  $B$  e  $H$ , são calculadas para que  $m$  e  $n$  tenham valores próximos;

$$H = \sqrt{A_1} + \Delta$$

onde  $\Delta = 0,5(0,95d - 0,80bf)$ .

Então:

$$B = \frac{A_1}{H}$$

Estes valores deverão ser arredondados para cima até a metade ou o inteiro mais próximo.

→ Determinar  $m$  e  $n$  conforme equação 2.1 e 2.2;

→ Determinar a espessura da placa necessária ( $t$ ) utilizando o maior valor entre  $m$  e  $n$  conforme equação 2.5.

### **2.2.2.3. Cálculo de placas de base carregadas levemente**

Placas de base levemente carregadas são aquelas em que o tamanho da placa é igual ou ligeiramente maior que as dimensões do pilar. Com isso  $m$  e  $n$  são aproximadamente zero, e a região crítica devido à flexão da placa é a área entre as mesas do pilar.

Este procedimento inclui tanto a verificação da área entre as mesas do pilar quanto o procedimento geral de cálculo visto anteriormente. Todas as placas podem ser totalmente calculadas por este procedimento. Se  $m$  ou  $n$  são maiores que  $b_f/2$  ou  $d/2$ , o procedimento para a área entre as mesas é desnecessário.

**Procedimento de cálculo pelo LRFD:**

→ A área da placa de base  $A_1$ , deverá ser igual ao maior valor entre:

$$A_1 = \frac{1}{A_2} \left[ \frac{P_d}{(0,60 \times 0,85 f_{ck})} \right]^2$$

$$A_1 = \frac{P_d}{1,7 \times 0,6 f_{ck}}$$

$$A_1 = b_f d$$

→ A área de contato baseia-se na hipótese desta possuir forma de “H” e está localizada logo abaixo dos elementos do pilar, conforme ilustra a FIG. 2.4. O valor desta área será o maior entre:

$$A_H = \frac{P_d}{\left( 0,60 \times 0,85 f_{ck} \sqrt{\frac{A_2}{b_f d}} \right)}$$

$$A_H = \frac{P_d}{0,6 \times 1,7 f_{ck}}$$

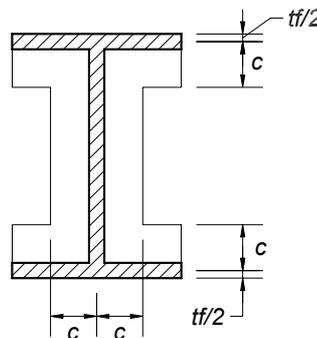


FIGURA 2.4 - Área de contato para placas de base levemente carregadas.

→ A distância para a seção em balanço utilizada no cálculo da tensão de flexão é determinada como segue:

$$c = 0,25 \left[ d + b_f - \sqrt{(d + b_f)^2 - 4A_H} \right] \quad (2.6)$$

→ A espessura é então determinada, como anteriormente, assumindo um comportamento elástico:

$$t = c \sqrt{\frac{2P_d}{0,9f_y A_H}} \quad (2.7)$$

## 2.3. FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO COM MOMENTO FLETOR

### 2.3.1. Procedimento de Blodgett (1966)

Quando um momento  $M$  é aplicado a um pilar já submetido a uma força axial de compressão  $P_c$ , é conveniente substituir para efeito de cálculo este carregamento combinado pela força  $P_c$ , aplicada com uma excentricidade “ $e$ ” do eixo do pilar. Blodgett (1966) admite que as seções planas da junção entre a placa de base e o bloco de concreto *permanecem planas*, supondo portanto, que a placa de base seja perfeitamente rígida. A distribuição de tensão é linear. Desta forma, a tensão nos chumbadores depende da distribuição de tensão na área do contato.

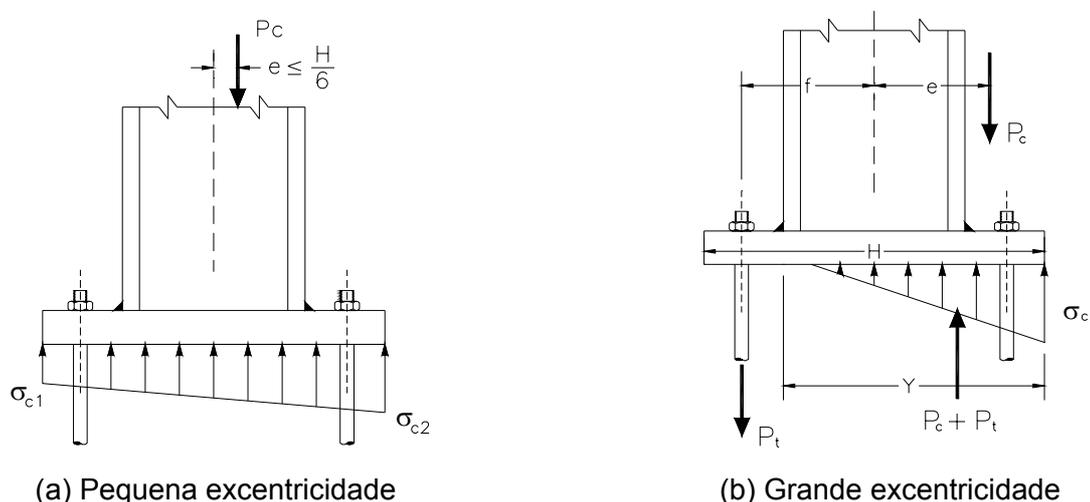


FIGURA 2.5 – Placa submetida a força axial com momento fletor.

Se a excentricidade “ $e$ ” é menor que  $H/6$  (pequena excentricidade), não há arrancamento da placa de base da superfície do bloco de concreto (FIG. 2.6a). O módulo resistente da seção da placa de base é dado por:

$$W = \frac{BH^2}{6} \quad (2.15)$$

Desta forma, as tensões de contato nas extremidades opostas da placa,  $\sigma_{c1}$  e  $\sigma_{c2}$  são determinadas através de:

$$\sigma_{c(1,2)} = \frac{P_c}{A_p} \pm \frac{P_c e}{S} \quad (2.16)$$

onde:  $P_c$  = carga nominal de compressão que atua no pilar;  
 $e$  = excentricidade equivalente;  
 $A_p$  = área da placa de base.

Quando a excentricidade “e” excede  $H/6$  (grande excentricidade), ocorre o arrancamento de parte da placa de base que é resistido pelos chumbadores. A tensão de contato no concreto é máxima na extremidade da placa que permanece em contato com o bloco. Assume-se que esta tensão decresce linearmente na direção da extremidade oposta da placa até igualar-se a zero a uma distância  $Y$ . Entretanto, inicialmente o valor do comprimento do contato ( $Y$ ) não é conhecido.

Existem três equações e três incógnitas;  $P_t$ ,  $Y$  e  $\sigma_c$ , onde  $P_t$  é o somatório da força de tração nos chumbadores:

1ª Equação: somatório das forças verticais iguais a zero:  $\Sigma V = 0$ :

$$\frac{1}{2} Y \sigma_c B - P_t - P_c = 0$$

ou

$$P_c + P_t = \frac{\sigma_c Y B}{2}$$

Então: (2.17)

$$\sigma_c = \frac{2(P_c + P_t)}{YB} \quad (2.18)$$

2ª Equação: somatório de momentos em relação ao eixo do pilar:  $\Sigma M = 0$ :

$$P_t f + (P_c + P_t) \left( \frac{H}{2} - \frac{Y}{3} \right) - P_c e = 0$$

ou

$$P_c = -P_t \left[ \frac{\frac{H}{2} - \frac{Y}{3} + f}{\frac{H}{2} - \frac{Y}{3} - e} \right] \quad (2.19)$$

e então,

$$P_t = -P_c \left[ \frac{\frac{H}{2} - \frac{Y}{3} - e}{\frac{H}{2} - \frac{Y}{3} + f} \right] \quad (2.20)$$

onde  $f$  é a distância entre o eixo do pilar e a linha de chumbadores, como mostrado na FIG. 2.6b.

3ª Equação: representando o comportamento elástico do bloco de concreto e da placa de base (FIG. 2.7):

$$\frac{a}{b} = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_c} = \frac{\frac{\sigma_s}{E_s}}{\frac{\sigma_c}{E_c}}$$

Então,

$$\frac{a}{b} = \frac{\sigma_s E_c}{\sigma_c E_s}$$

$\sigma_c$  pode também ser escrito na forma:

$$\sigma_s = \frac{P_t}{A_s}$$

e sendo

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

Então,

$$\frac{a}{b} = \frac{\frac{P_t}{A_s}}{\sigma_c n} = \frac{P_t}{A_s \sigma_c n},$$

onde:  $A_s$  = área total da placa de base em contato com o concreto;

$\sigma_s$  = tensão de tração nos chumbadores;

$\varepsilon_s$  = deformação no chumbador tracionado;

$E_s$  = módulo de elasticidade do aço da placa de base;

$\sigma_c$  = tensão de compressão no concreto;

$\varepsilon_c$  = deformação da fundação de concreto;

$E_c$  = módulo de elasticidade do concreto da fundação;

$n$  = relação entre os módulos elásticos do aço e do concreto.

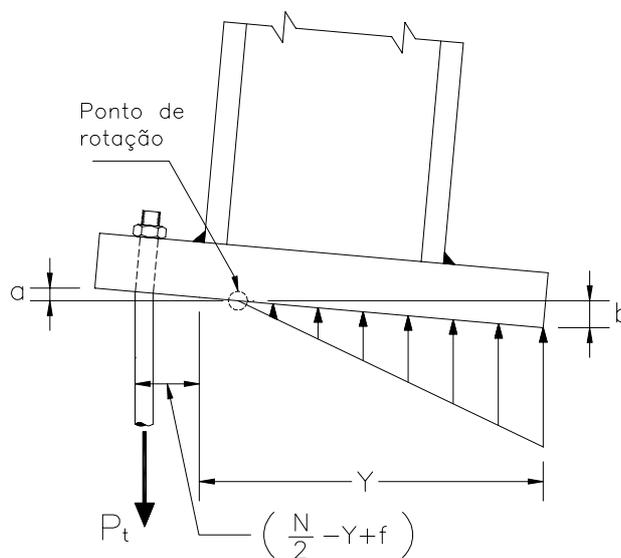


FIGURA 2.6 – Comportamento elástico do bloco de concreto e chumbadores.

Por semelhança de triângulos:

$$\frac{a}{b} = \frac{\frac{H}{2} - Y + f}{Y}$$

Então,

$$\frac{P_t}{A_s \sigma_c n} = \frac{\frac{H}{2} - Y + f}{Y}$$

ou

$$\sigma_c = \frac{P_t Y}{A_s n \left( \frac{H}{2} - Y + f \right)} \quad (2.21)$$

Substituindo-se a equação 2.21 na equação 2.17:

$$P_c + P_t = \frac{P_t Y^2 B}{2 A_s n \left( \frac{H}{2} - Y + f \right)} \quad (2.22)$$

Substituindo-se a equação 2.19 na equação 2.22:

$$-P_t \left[ \frac{\frac{H}{2} - \frac{Y}{3} + f}{\frac{H}{2} - \frac{Y}{3} - e} \right] + P_t = \frac{P_t Y^2 B}{2 A_s n \left( \frac{H}{2} - Y + f \right)} \quad (2.23)$$

Resolvendo a equação 2.23 para a variável Y, obtém-se:

$$\begin{aligned} -2nA_s \left( \frac{H}{2} - Y + f \right) \left( \frac{H}{2} - \frac{Y}{3} + f \right) + \left( \frac{H}{2} - \frac{Y}{3} - e \right) (2nA_s) \left( \frac{H}{2} - Y + f \right) = \\ = Y^2 B \left( \frac{H}{2} - \frac{Y}{3} - e \right) \end{aligned}$$

que se reduz a:

$$Y^3 + 3 \left( e - \frac{H}{2} \right) Y^2 + \frac{6nA_s}{B} (f + e) Y - \frac{6nA_s}{B} \left( \frac{H}{2} + f \right) (f + e) = 0 \quad (2.24)$$

Para expressar a equação 2.24 de uma maneira a facilitar o seu uso, obtém-se:

$$K_1 = 3\left(e - \frac{H}{2}\right); \quad K_2 = \frac{6nA_s}{B}(f + e); \quad K_3 = -K_2\left(\frac{H}{2} + f\right)$$

Então:

$$Y^3 + K_1Y^2 + K_2Y + K_3 = 0 \quad (2.25)$$

Tendo encontrado o comprimento efetivo do contato  $Y$ , a equação 2.20 pode ser usada para calcular a força de tração  $P_t$  nos chumbadores. A equação 2.21 fornece então, o valor da tensão de contato máxima  $\sigma_c$  no bloco de concreto.

Estabelecida a distribuição da tensão de contato, a espessura da placa de base é obtida de acordo com equação 2.3 do item 2.2.1.

### **2.3.2. Procedimento de DeWolf & Richer (1990)**

DeWolf & Richer (1990) utilizam para o cálculo de placas de base sujeitas a uma carga axial mais um momento fletor, uma aproximação baseada no comportamento elástico. Ao contrário do que admite Blodgett (1966), este método considera que as seções planas da junção entre a placa de base e o bloco de concreto *não permanecem planas*. Desta forma não uma relação de proporcionalidade entre a deformação dos chumbadores e a do concreto sob à extremidade da placa de base. É assumida uma distribuição de tensão elástica linear como mostrada na FIG. 2.8. Esta aproximação é adotada porque é mais consistente com o comportamento real.

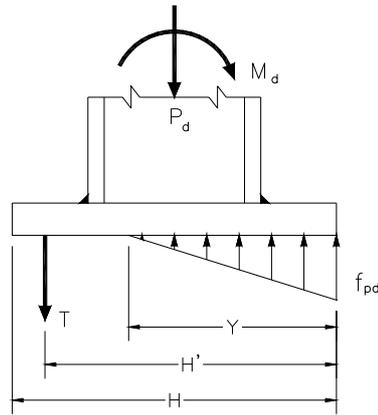


FIGURA 2.7 – Situação geral.

O cálculo é realizado para uma excentricidade “e” equivalente, igual ao momento fletor  $M_d$  dividido pela força axial  $P_d$ . O momento e a força axial são substituídos por uma força axial equivalente a uma distância e do eixo do pilar. Para pequenas excentricidades, a força axial equivalente é resistida somente pelo contato entre a placa de base e o bloco de concreto. Para grandes excentricidades, é necessário o uso de chumbadores. É preciso atribuir-se dimensões à placa de base para determinar se chumbadores são exigidos.

### 2.3.2.1. Cálculo para excentricidades pequenas e moderadas

Se a excentricidade “e” é igual ou menor que  $H/6$ , a tensão de contato de compressão atua em toda placa (FIG. 2.9). Para as extremidades da placa esta tensão é obtida da seguinte forma:

$$f_{pd(1,2)} = \frac{P_d}{BH} \pm \frac{M_d c}{I} \quad (2.26)$$

onde:  $B$  e  $H$  = largura e comprimento da placa de base, respectivamente;

$c$  =  $H/2$ ;

$I$  = momento de inércia,  $BH^3/12$ .

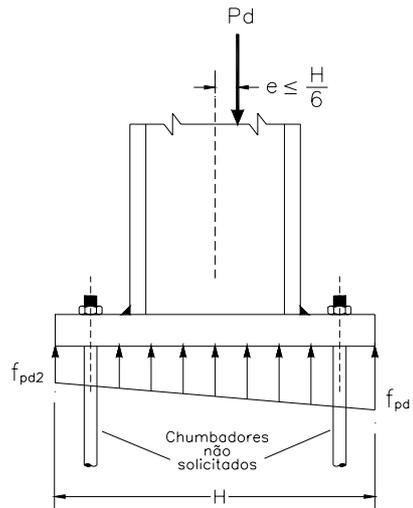


FIGURA 2.8 – Pequena excentricidade – contato em toda placa.

O cálculo é realizado pelo método *LRFD*. Assim a carga  $P$  e o momento  $M$  devem ter valores de cálculo e a máxima tensão  $f_{pd1}$  não deve exceder:

$$0,85\varphi_c f_{ck} \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 1,7\varphi_c f_{ck} \quad (2.27)$$

onde  $\varphi_c = 0,60$ .

Se a excentricidade equivalente “e” está entre  $H/6$  e  $H/2$  (moderada), o contato ocorre somente sob uma parcela da placa (FIG. 2.10). Para o equilíbrio, a resultante da distribuição triangular da tensão de contato deve ser igual à carga axial que atua no pilar localizada a uma distância “e” do centro da placa. Assim a máxima tensão  $f_{pd}$  é então:

$$f_{pd} = \frac{2P_d}{YB} \quad (2.28)$$

onde  $Y$  é a distância que o contato ocorre, igual a  $Y = 3(H/2 - e)$ .

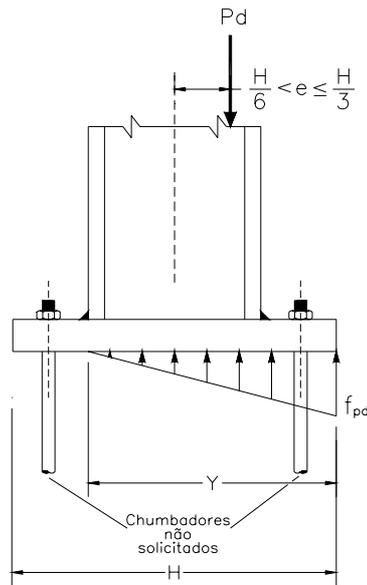


FIGURA 2.9 – Excentricidade moderada – contato em parte da placa.

O procedimento de cálculo pelo LRFD é descrito a seguir:

- Determinar os valores de cálculo da carga axial e do momento ( $P_d$  e  $M_d$ );
- Determinar a tensão de contato máxima de cálculo  $F_p$  de acordo com a equação 2.27:
- Atribuir valores para as dimensões da placa,  $H$  e  $B$ ;
- Determinar a excentricidade equivalente ( $e = M_d/P_d$ ), e a máxima tensão de contato ( $f_{pd}$ ) devido ao carregamento, conforme pequena excentricidade ou moderada (equações 2.26 e 2.28 respectivamente). Se esta tensão é menor que  $F_p$ , passar para o próximo passo, caso contrário alterar as dimensões da placa;
- Determinar a espessura da placa, com base na distribuição de tensão de contato elástica, usando a seção crítica como determinada para placas carregadas axialmente:

$$t = \sqrt{\frac{4M_{placa}}{0,90f_y}} \quad (2.29)$$

onde  $M_{placa}$  é o momento na seção crítica da placa, para uma faixa de largura unitária, devido a distribuição da tensão de contato.

### 2.3.2.2. Cálculo para grandes excentricidades

Quando a excentricidade efetiva é grande, o uso de um ou mais chumbadores é necessário para resistir à componente de tração resultante do momento  $M_d$  (FIG. 2.11).

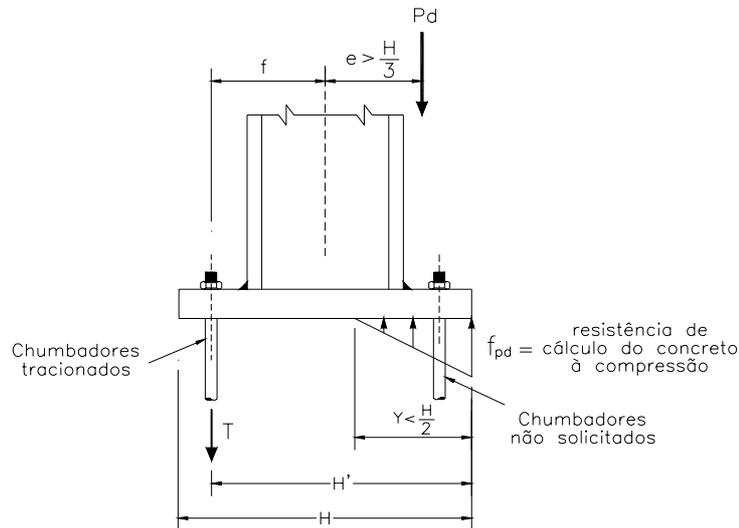


FIGURA 2.10 – Grande excentricidade.

Com as dimensões das placas atribuídas, de forma que a tensão de contato resultante não exceda o valor máximo  $F_p$ , as incógnitas são a magnitude da força  $T$  nos chumbadores e o comprimento do contato  $Y$ .

Duas equações de equilíbrio são então empregadas para que se determine as incógnitas. A soma das forças verticais, fornece:

$$T + P_d = \frac{f_{pd} Y B}{2} \quad (2.30)$$

A soma dos momentos em relação ao eixo da força de tração nos chumbadores, fornece:

$$P_d f + M_d = \frac{f_{pd} Y B}{2} \left( H' - \frac{Y}{3} \right) \quad (2.31)$$

onde:  $f$  = distância entre a linha de chumbadores e o eixo do pilar;  
 $H'$  = distância entre a borda da placa onde a tensão de contato é máxima e a linha de chumbadores tracionados (FIG. 2.8).

A equação 2.32 fornece o comprimento do contato  $Y$ :

$$Y = \frac{f' \pm \sqrt{\left[ f'^2 - 4 \left( \frac{f_{pd} \cdot B}{6} \right) \cdot (P_d \cdot f + M_d) \right]}}{\frac{f_{pd} \cdot B}{3}} \quad (2.32)$$

onde  $f' = f_{pd}BH'/2$ . A equação 2.33 então fornece a força resultante  $T$  nos chumbadores:

$$T = \frac{f_{pd}YB}{2} - P_d \quad (2.33)$$

*Procedimento de cálculo pelo LRFD:*

- Determinar os valores de cálculo da força axial e do momento ( $P_d$  e  $M_d$ );
- Determinar a tensão de contato máxima de cálculo  $F_p$  de acordo com a equação 2.27;
- Atribuir valores para as dimensões da placa,  $H$  e  $B$ ;
- Utilizar o carregamento de cálculo para determinar o comprimento de contato  $Y$ , igual ao menor valor positivo da equação 2.32. Se este valor for razoável, passe para o próximo passo. Se for próximo do valor de  $H'$ , a solução não é prática, já que isso implica que o contato se estende até as proximidades dos chumbadores, fazendo com que estes não desenvolvam toda sua resistência à tração. É então necessário retornar ao passo anterior e atribuir novos valores para  $H$  e  $B$ ;
- Determinar a resultante de tração  $T$  nos chumbadores, de acordo com a equação 2.33;
- Determinar a espessura da placa conforme a equação 2.29.

## 2.4. FORÇA AXIAL DE TRAÇÃO

Blodgett (1966) não apresenta um procedimento de cálculo para placas de base submetidas à força axial de tração.

### 2.4.1. Procedimento de DeWolf & Richer (1990)

Sob certas condições, placas de bases estão sujeitas a uma tração axial ou arrancamento. Estas placas devem ser verificadas à flexão quando o cálculo resulta em uma placa relativamente flexível, aproximadamente com as mesmas dimensões externas do pilar, isto é, placas levemente carregadas. Uma situação típica é mostrada na FIG. 2.13. Os chumbadores são posicionados na área entre as mesas, adjacentes à alma do pilar.

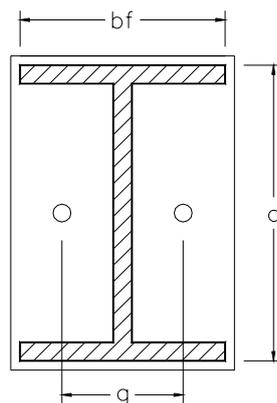


FIGURA 2.11 – Placa de base submetida à tração.

Murray (1983) fornece equações para a determinação da espessura da placa de base em que os chumbadores encontram-se entre as mesas do pilar próximos à alma, usando o *método da linha de escoamento* (FIG. 2.14). DeWolf & Richer (1990) adaptam estas equações com a adição do fator de resistência à flexão utilizado pelo LRFD.

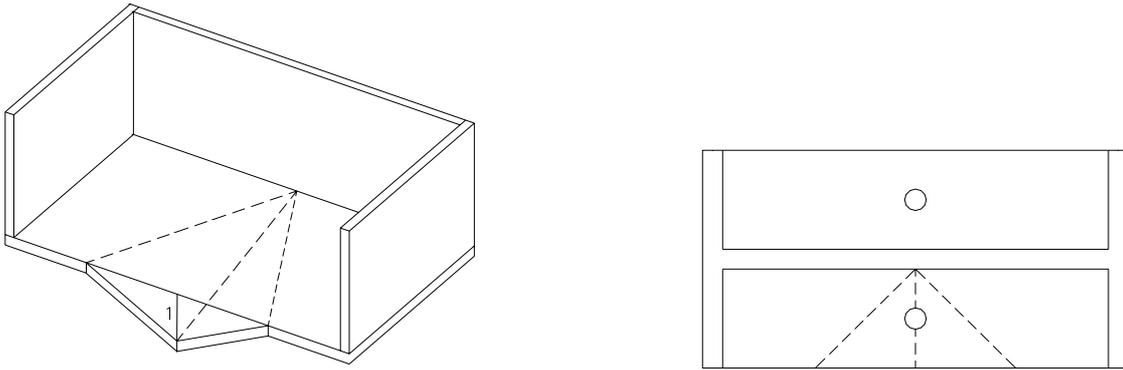


FIGURA 2.12 – Linhas de escoamento ou charneiras plásticas.

Quando  $\sqrt{2}b_f \leq d$ , a espessura da placa necessária é:

$$t = \sqrt{\frac{\sqrt{2}P_d g}{4\varphi_b b_f f_y}} \quad (2.39)$$

Quando  $\sqrt{2}b_f > d$ , a espessura da placa necessária é:

$$t = \sqrt{\frac{P_d g d}{\varphi_b f_y (d^2 + 2b_f^2)}} \quad (2.40)$$

onde:  $g$  = espaçamento entre os chumbadores, conforme FIG. 2.13;  
 $\varphi_b$  = fator de resistência à flexão igual a 0,90;  
 $P_d$  = força axial de cálculo de tração.

## 2.5. FORÇA CORTANTE

### 2.5.1. Procedimento de DeWolf & Richer (1990)

DeWolf & Richer (1990), no cálculo da placas sujeitas a uma força cortante, levam em consideração a resistência devido ao atrito entre a placa de base e o bloco de concreto e o uso de barras de cisalhamento quando necessário. A parcela de resistência ao cisalhamento desenvolvida pelo atrito é calculada com o coeficiente de atrito do LRFD de acordo com a TAB. 2.4.

TABELA 2.2 –Valores para o coeficiente de atrito.

Disposição Construtiva	Coeficiente de Atrito ( $\mu$ )
O plano de contato se encontra abaixo da superfície do bloco de concreto	0,90
O plano de contato coincide com superfície do bloco de concreto	0,70
O plano de contato se encontra acima da superfície do bloco de concreto ( <i>grout</i> )	0,55

O carregamento utilizado deverá ser a ação permanente, para o cálculo da força de atrito, e ação acidental que gera força cortante, como por exemplo, ação do vento, ambas de cálculo.

O cálculo da barra de cisalhamento baseia-se na resistência a compressão do concreto de contato, desprezando-se os efeitos de confinamento, que é igual a  $0,85\varphi_c f_{ck}$ , com  $\varphi_c = 0,60$ . A espessura da barra de cisalhamento não deve ser maior que a espessura da placa de base.

#### *Procedimento de cálculo pelo LRFD:*

→ Determinar a parcela da força cortante que pode ser resistida pela força de atrito, igual a  $\mu$  multiplicado pela carga permanente de cálculo mais a carga acidental que gera força de atrito. A parcela que será resistida pela barra de

cisalhamento ( $V_{sld}$ ), será então, a diferença entre a carga cisalhante de cálculo e esta força.

→ A área de contato para a(s) barra(s) de cisalhamento é:

$$A_{sl} = \frac{V_{sld}}{0,85\varphi_c f_{ck}} \quad (2.44)$$

→ Determinar as dimensões da barra de cisalhamento (FIG. 2.17) assumindo que o contato ocorre na região da barra logo abaixo da superfície do bloco de concreto, isto é, a resistência do *grout* é desprezada, caso ele exista.

→ O momento de cálculo na extremidade do balanço  $M_{sld}$  atuando em uma faixa de largura unitária da barra de cisalhamento é igual a:

$$M_{sld} = \left( \frac{V_{sld}}{B_{sl}} \right) \left( \frac{h + e_g}{2} \right) \quad (2.45)$$

onde:  $B_{sl}$  = largura total da(s) barra(s) de cisalhamento;

$h$  = altura vertical da barra;

$e_g$  = espessura do *grout*.

→ A espessura da barra de cisalhamento é então determinada. É obtida através da expressão empregada para placas sujeitas a momento:

$$t_{sl} = \sqrt{\frac{4M_{sld}}{0,90f_y}} \quad (2.46)$$

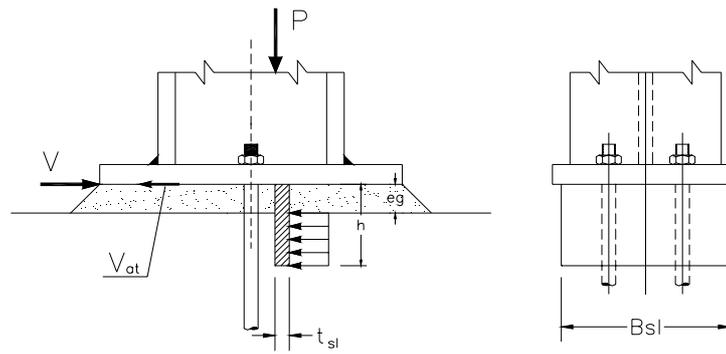


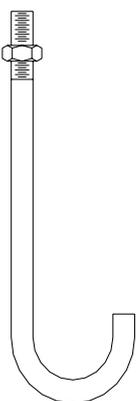
FIGURA 2.13 – Esquema da barra de cisalhamento.

Com relação aos chumbadores, a tensão que atua na área bruta dos mesmos, não deve ultrapassar a tensão admissível do material.

## 2.6. CHUMBADORES

Chumbadores são necessários em todas as placas de base. Primeiramente eles são usados para prevenir o tombamento dos pilares na fase de montagem. São também necessários quando a placa de base está sujeita a grandes momentos de cálculo ou arrancamento. Os tipos de chumbadores mais utilizados são:

- barras redondas rosqueadas com ancoragem no concreto proporcionada por gancho semi-circular feito a quente (FIG. 2.18a);
- parafusos com cabeça embutida no concreto para ancoragem (FIG. 2.18b);
- barras redondas rosqueadas com porca embutida no concreto para ancoragem (FIG. 2.18c).



(a)



(b)



(c)

FIGURA 2.14 – Tipos de chumbador.

Estes chumbadores, ao serem instalados, devem possuir uma distância mínima de cobertura lateral e um comprimento mínimo embutido no bloco de concreto de acordo com a TAB. 2.3 (DeWolf & Richer, 1990).

TABELA 2.3 – Parâmetros Mínimos para instalação dos chumbadores.

Tipo de Aço	Comprimento mínimo embutido	Distância mínima de cobertura lateral
A307, A36	$12d$	$5d > 100\text{mm}$
A325, A449	$17d$	$7d > 100\text{mm}$

\*  $d$  = diâmetro nominal do chumbador.

## **2.6.1. Resistência de Cálculo do Chumbador à Tração**

### **2.6.1.1. DeWolf & Richer (1990)**

DeWolf & Richer (1990) apresentam somente um estado limite último (ruptura da seção rosqueada) dado por:

$$T_u = 0,75\varphi_t f_u A_g \quad (2.47)$$

onde:

- $\varphi_t$  = coeficiente de resistência à tração, igual a 0,75;
- $f_u$  = limite de escoamento do aço;
- $A_g$  = área do fuste do chumbador.

## 2.6.2. Resistência de Cálculo ao Arrancamento – Chumbadores de Gancho

### 2.6.2.1. DeWolf & Richer (1990)

O cálculo dos chumbadores de gancho deverá ser fundamentado somente na ancoragem fornecida pelos respectivos ganchos. A resistência do gancho deve-se ao atrito com o concreto. Sua capacidade à tração,  $T_h$ , é:

$$T_h = 0,7f_{ck}dL_h \quad (2.50)$$

onde  $d$  é o diâmetro do chumbador e  $L_h$  o comprimento do gancho.

Como a ruptura pode ocorrer pelo desdobramento do gancho e conseqüente arrancamento do chumbador, é recomendado que o gancho seja calculado para desenvolver uma resistência mínima igual a metade da resistência à tração do chumbador,  $T_u$  (equação 2.47). Desta forma, o comprimento necessário do gancho é:

$$L_h = \frac{\left(\frac{T_u}{2}\right)}{0,7f_{ck}d} \quad (2.51)$$

O comprimento total do chumbador será no mínimo igual ao comprimento do gancho mais o da parte reta tomado da TAB. 2.5.

### 2.6.3. Resistência de Cálculo ao Arrancamento – Chumbadores tipo Parafuso Invertido ou Barra Redonda com Porca

No caso dos chumbadores constituídos por parafusos com cabeça embutida ou por barras redondas com porca para ancoragem, o colapso por arrancamento se dá quando o cone que envolve o chumbador se separa da fundação (FIG. 2.20a). O cone é suposto com um ângulo de radiação de 45° estabelecido da extremidade da cabeça do parafuso ou da porca. O colapso ocorre a uma tensão média (em MPa) de  $4\sqrt{0,007f_{ck}}$ , com  $f_{ck}$  em MPa, aplicada à área do círculo projetada pelo cone na superfície do bloco de concreto,  $A_{psf}$ . Assim, a resistência de cálculo ao arrancamento pode ser expressa por  $\varphi_a R_{na}$ , onde  $\varphi_a$  é o coeficiente de resistência, igual a 0,75 e  $R_{na}$  a resistência nominal ao arrancamento (em N), dada por ( $A_{psf}$  em mm<sup>2</sup> e  $f_{ck}$  em MPa):

$$R_{na} = 4A_{psf}\sqrt{0,007f_{ck}} \quad (2.52)$$

Pode ocorrer que dois chumbadores tracionados estejam situados muito próximos entre si, de modo que parte de suas áreas projetadas se sobreponham. Neste caso, a parte sobreposta deve ser dividida igualmente entre ambos. A FIG. 2.20b mostra a área projetada, considerando a influência, para chumbadores distanciados de  $S$ . O valor da área projetada, considerando tal influência, é:

$$A_{psf} = \pi l_a^2 - \frac{2 \arccos\left(\frac{S}{2l_a}\right) \pi l_a^2}{360} + \frac{S}{2} \sqrt{l_a^2 - \frac{S^2}{4}} \quad (2.53)$$

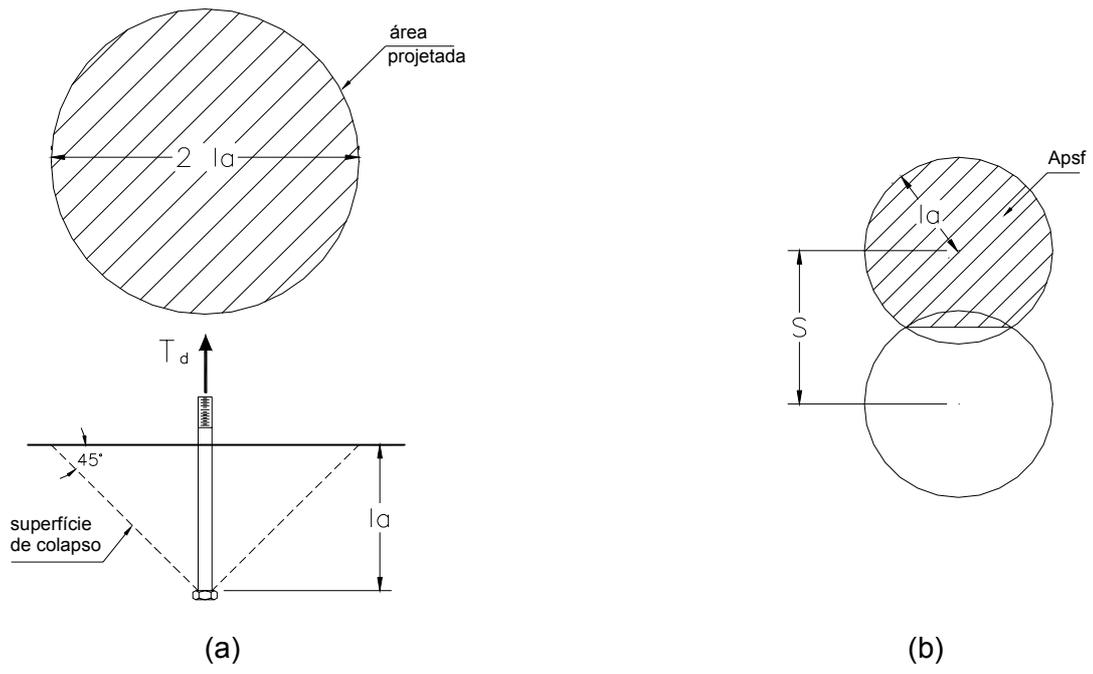


FIGURA 2.15 – Área proyectada.

## 2.7. PROGRAMA DE DIMENSIONAMENTO

Na análise comparativa entre os procedimentos estudados e na determinação dos modelos da análise numérica, ambos discutidos nos capítulos seguintes, o dimensionamento dos componentes da base (placa de base, chumbadores e bloco de concreto) foi realizado inúmeras vezes.

Com o objetivo de agilizar este processo repetitivo, desenvolveu-se um programa compilado em linguagem Delphi, versão 4.0, contendo as situações de carregamentos mais comuns para todos os procedimentos descritos neste capítulo. A seguir é apresentada a interface do programa.

### 2.7.1. Tela Principal

A FIG. 2.21 mostra a tela principal do programa onde se apresenta o *menu* e a barra de ferramentas. Na barra de ferramentas encontram-se as seguintes opções:

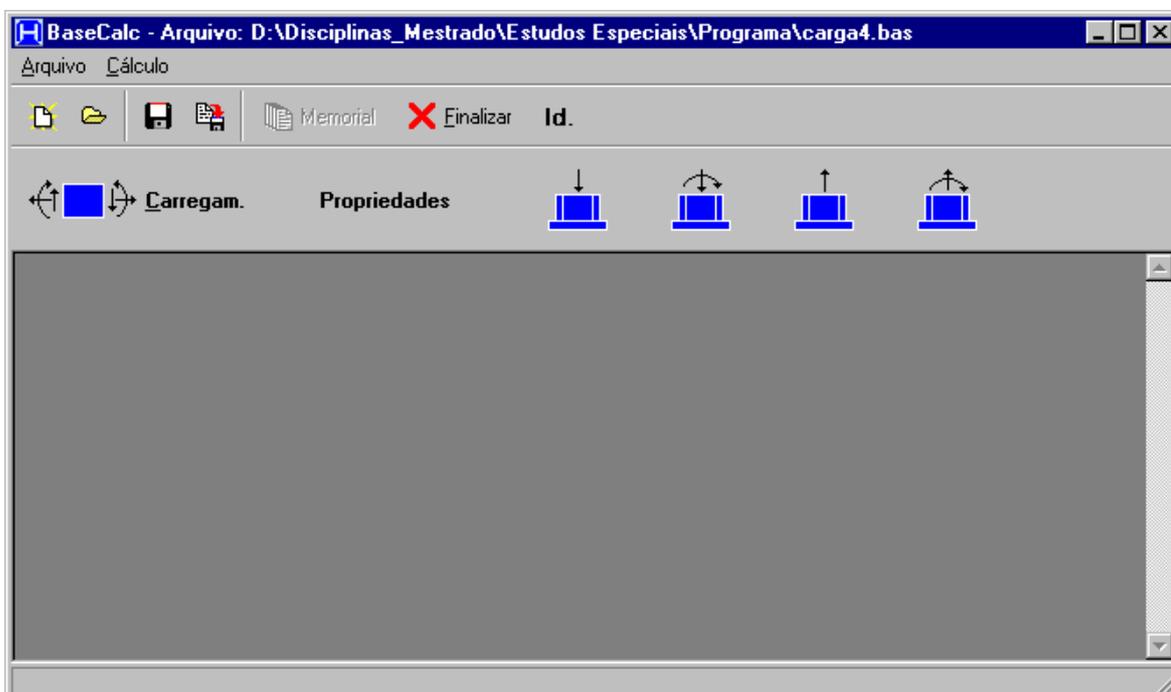


FIGURA 2.16 – Tela principal do programa

- *Novo Dimensionamento*: o programa inicia a entrada de dados com os campos limpos;
- *Abrir Dimensionamento*: o programa abre um arquivo de entrada de dados em formato de documento texto, já existente;
- *Salvar*: se o arquivo ainda não foi salvo, esta opção abre a caixa de diálogo Salvar Como padrão de Windows, caso contrário, esta opção atualiza o arquivo.
- *Salvar Como*: esta opção chama uma caixa de diálogo “Salvar Como”, padrão do Windows;
- *Memorial*: caso algum dimensionamento tenha sido efetuado pelo programa, esta opção retorna o resultado deste dimensionamento na tela principal.
- *Finalizar*: finaliza o programa;
- *Id.*: mostra a janela da identificação da estrutura (nome, data e nome do arquivo de saída);
- *Carregamento*: mostra a janela para entrada do carregamento;
- *Propriedades*: mostra a janela para entrada das propriedades geométricas do perfil do pilar e mecânicas dos materiais;
- Os quatro últimos botões mostram as janelas para o dimensionamento de bases submetidas a compressão axial, compressão axial com momento fletor, tração axial e tração axial com momento fletor, respectivamente.

### **2.7.2. Janela Propriedades**

Na janela Propriedades (FIG. 2.22) são fornecidos ao programa as propriedades geométricas do perfil do pilar (altura  $d$ , largura e espessura das mesas,  $b_f$  e  $t_f$  e a espessura da alma,  $t_w$ ), assim como o tipo de aço da placa de base com seu respectivo módulo elástico. Os limites de escoamento ( $f_y$ ) e resistência ( $f_u$ ) o programa fornece automaticamente. Também são fornecidos ao programa, a resistência do concreto a compressão ( $f_{ck}$ ) e seu módulo elástico ( $E_c$ ).



FIGURA 2.17 – Janela propriedades.

### 2.7.3. Janela Carregamento

A entrada de dados do carregamento é feita na janela Carregamento (FIG. 2.23), que possui a opção de se inserir as cargas nominais ou de cálculo. Caso a opção das cargas nominais seja utilizada, o programa realiza as combinações possíveis para os tipos de carregamentos disponíveis (carga permanente, sobrecarga, vento e equipamento) e retorna aquela mais desfavorável para a força axial, momento fletor e força cortante. A identificação da base do pilar também é feita nesta janela.

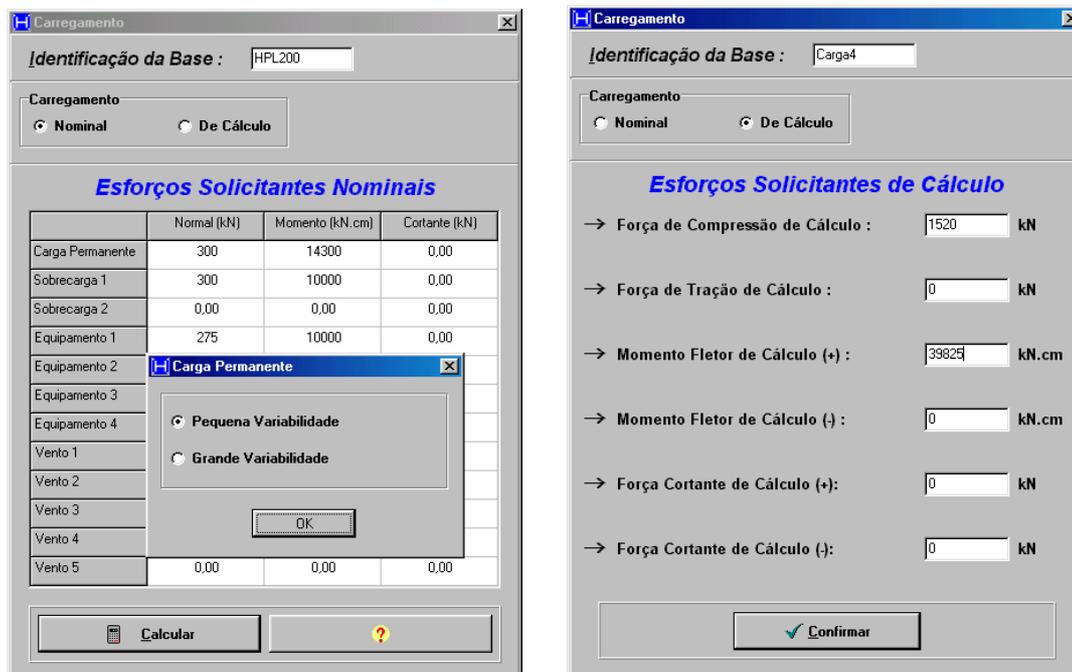


FIGURA 2.18 – Janela carregamento.

#### 2.7.4. Janelas de Dimensionamento

Na janela principal, quando se aciona qualquer um dos quatro botões de dimensionamento, a janela Procedimento de Cálculo (FIG. 2.24) é aberta, para que a escolha do procedimento de cálculo seja feita. Ao clicar no botão OK, após a seleção do procedimento, a janela de dimensionamento correspondente à opção de carregamento pré-determinada se ativará.

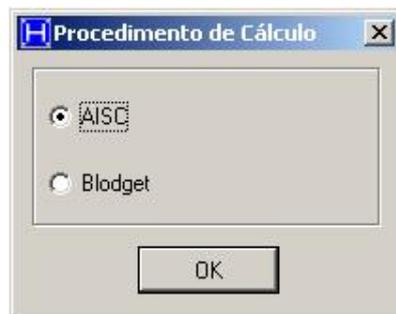


FIGURA 2.19 – Janela procedimento de cálculo.

##### 2.7.4.1. Compressão axial

A FIG. 2.25 mostra a Janela Compressão Axial para o procedimento sugerido por DeWolf & Richer (1990) (AISC), que possui como entrada de dados somente a relação entre a área da placa de base e do bloco de concreto quando a segunda não é conhecida ou o seu valor quando é previamente determinado. Esta janela também é utilizada para Blodgett (1966), já que estes dois procedimentos são semelhantes. O programa retorna, para os dois procedimentos, o valor da tensão de compressão no concreto, a espessura de cálculo da placa de base e a espessura comercial adotada.



FIGURA 2.20 – Janela compressão axial / procedimento AISC (DeWolf & Richer 1990).

Nesta, como em todas as janelas de dimensionamento, é possível chamar as janelas para o dimensionamento dos chumbadores e da barra de cisalhamento, que serão descritas nos itens seguintes, através dos botões da FIG. 2.26, assim como a Janela Carregamento (FIG. 2.22).



FIGURA 2.21 – Botões para ativar as janelas para o dimensionamento dos chumbadores e da barras de cisalhamento.

## 2.7.4.2. Compressão axial com momento fletor

**Identificação da Base :** modelo4 Edit27 Edit30 Edit28

**Dimensões do Perfil**

Altura (d) :	450	mm
Largura (bf) :	450	mm
Esp. Mesa (tf) :	22,4	mm
Esp. Alma (tw) :	12,5	mm

**Dimensões da Base**

Altura (H) :	790	mm
Largura (B) :	490	mm
f :	310	mm

**Chumbadores Tracionados**

Diâmetro :	1	pol.
Área :	5,07	cm <sup>2</sup>
Nº de Chumb. :	3	

**Força Normal de Cálculo (Nd) :** 1252,5 kN

**Momento Fletor de Cálculo (Md) :** 48590,0 kN.cm

**Módulo Elástico do Aço (Es) :** 20500 kN/cm<sup>2</sup>

**Limite de Escoamento do Aço (fy) :** 30 kN/cm<sup>2</sup>

**Módulo Elástico do Concreto (Ec) :** 2880 kN/cm<sup>2</sup>

**Resistência à Compressão do Concreto (fck) :** 2 kN/cm<sup>2</sup>

**e = 41,86 cm -- Grande Excentricidade**

<b>F<sub>pd</sub> = 1,81 kN/cm<sup>2</sup></b>	<b>F<sub>cd</sub> = 1,96 kN/cm<sup>2</sup></b>
<b>P<sub>t</sub> = 218,86 kN</b>	<b>Y = 33,26 cm</b>
<b>t = 62,01 mm</b>	<b>t = 63,08 mm</b>

**Cálculo dos Chumbadores**      **Barra de Cisalhamento**

Calcular    Anotar    Esforços    Fechar

Combinação p/ Tração = 1,3°CP + 1,5°SC1 + 1,5°EQ1

Combinação p/ Espess = 1,3°CP + 1,5°SC1 + 1,5°EQ1

FIGURA 2.22 – Janela compressão + momento / procedimento Blodgett (1966).

A FIG. 2.27 mostra a Janela Compressão + Momento para o procedimento sugerido por Blodgett (1966), que possui como entrada de dados as dimensões da placa de base, a distância entre o eixo do pilar e a linha de chumbadores e informações sobre os chumbadores, tais como sua quantidade e diâmetro. O programa possui um banco de dados com valores de diâmetros comerciais para os chumbadores e suas respectivas áreas da seção transversal. Para DeWolf & Richer (1990) não é necessário fornecer informações sobre os chumbadores. O programa retorna, para os dois procedimentos, o valor da excentricidade equivalente com sua classificação, a tensão de contato que atua no concreto e a sua respectiva resistência, o valor de força de tração nos chumbadores, o comprimento do contato e as espessuras de cálculo e comercial adotada para a placa de base. Caso o usuário forneça as cargas nominais o programa apresenta a combinação mais desfavorável para cálculo da espessura da placa e da tração nos chumbadores.

### 2.7.4.3. Tração axial

A FIG. 2.28 apresenta a Janela Tração para o dimensionamento conforme DeWolf & Richer (1990). Deve-se fornecer ao programa, as dimensões da placa de base, o número de chumbadores e as propriedades geométricas indicadas. O número de chumbadores é fixado em dois e o programa fornece apenas opção de chumbadores posicionados entre as mesas do pilar. O programa retorna, para os dois procedimentos, o valor da espessura de cálculo e comercial adotada.

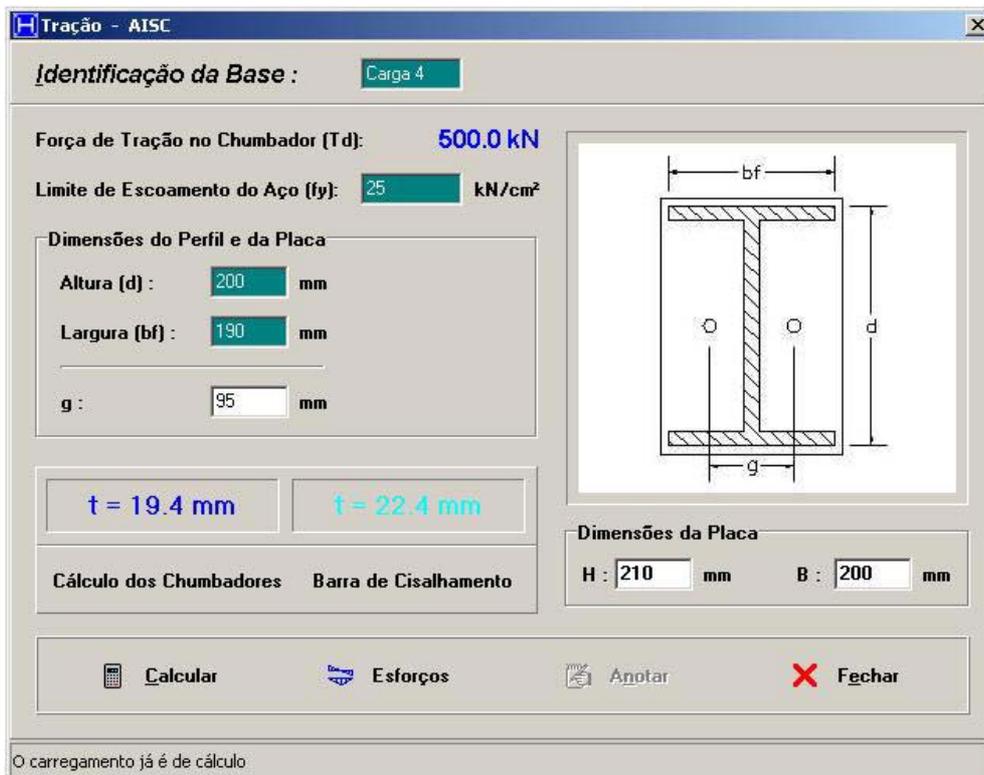


FIGURA 2.23 – Janela tração axial / AISC.

#### 2.7.4.4. Chumbadores

A FIG. 2.30 mostra a janela para a verificação dos chumbadores. O usuário deve informar o número de chumbadores tracionados, bem como o tipo de aço que os compõe. O programa fornece três opções para o tipo de chumbador: barra redonda com gancho semi-circular, parafuso com a cabeça embutida no concreto e barra redonda com porca soldada embutida no concreto. A verificação para as duas últimas opções é a mesma.

O programa utiliza a força de tração nos chumbadores, na verificação dos mesmos, encontrada na janela de dimensionamento de onde se ativou a presente janela. Como saída de dados tem-se a força de tração de cálculo em cada chumbador com sua respectiva resistência, a verificação se o chumbador atende ou não e o valor  $d1$  para que não haja arrancamento no caso de chumbadores tipo barra reta ou o comprimento mínimo de ancoragem ( $l_a$ ) no caso de chumbadores de gancho.

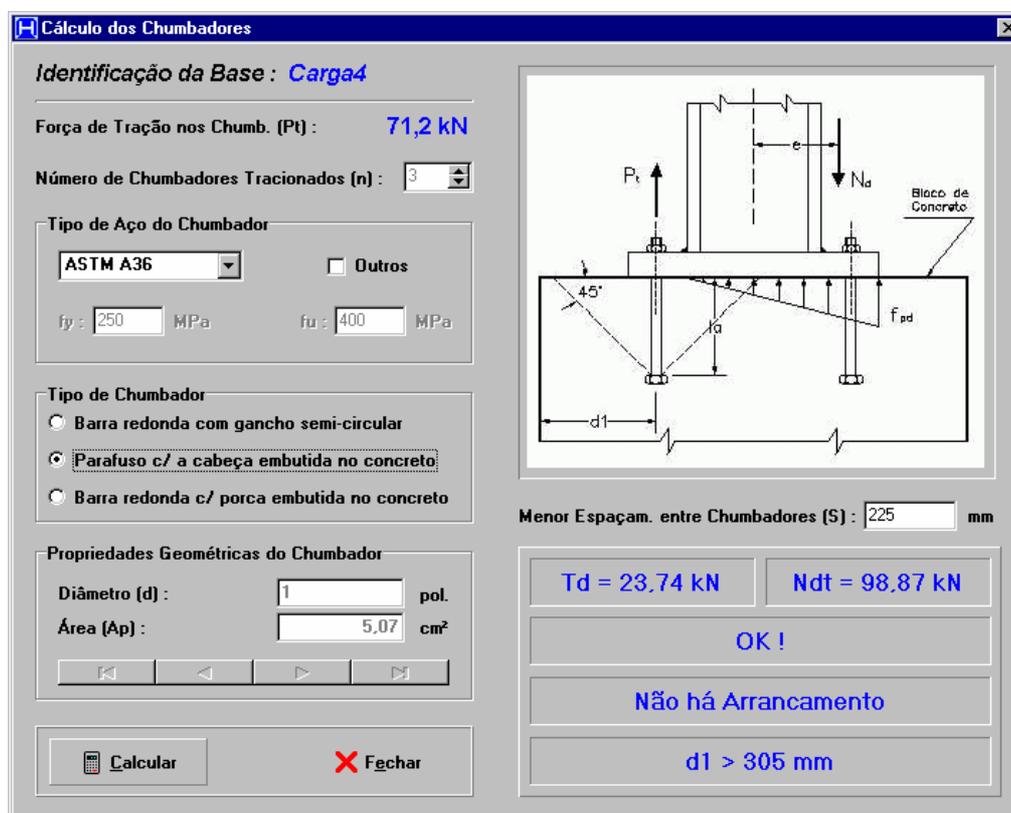


FIGURA 2.24 – Janela cálculo dos chumbadores.

### 2.7.4.5. Barra de Cisalhamento

Para a verificação da barra de cisalhamento (FIG. 2.31), quando esta é necessária, o usuário deve fornecer o valor da altura do enchimento (c), a altura do contato entre a barra de cisalhamento e o bloco de concreto e a largura da barra. O valor do coeficiente de atrito depende do procedimento escolhido.

O programa informa o valor da força de atrito ( $V_{at}$ ), da resultante da tensão de contato ( $V_{ds}$ ), da resistência do concreto à compressão e as espessuras de cálculo e comercial adotada para a barra de cisalhamento.

Nesta, como também em algumas janelas do programa, o botão  se encontra próximo de algumas variáveis. Ao se clicar neste botão, o programa chama a janela da FIG. 2.32 contendo a desenho que identifica a variável em questão.



Barra de Cisalhamento - AISC

Identificação da Base : Carga 4

Força cortante de cálculo (Vd): 1150.0 kN

Enchimento (c):  20 mm

Altura do contato (hs):  30 mm

Largura da barra (bs):  190 mm

Coeficiente de atrito: 0.90

Coeficiente de atrito

Placa embutida no bloco

Placa apoiada na superfície do bloco

Placa apoiada no enchimento (grout)

Vat = 1080 kN

Vds = 70 kN

fcd = 1.02 kN/cm<sup>2</sup>

ts = 15.9 mm

ts = 15.9 mm

Calcular Fechar

FIGURA 2.25 – Janela barra de cisalhamento.

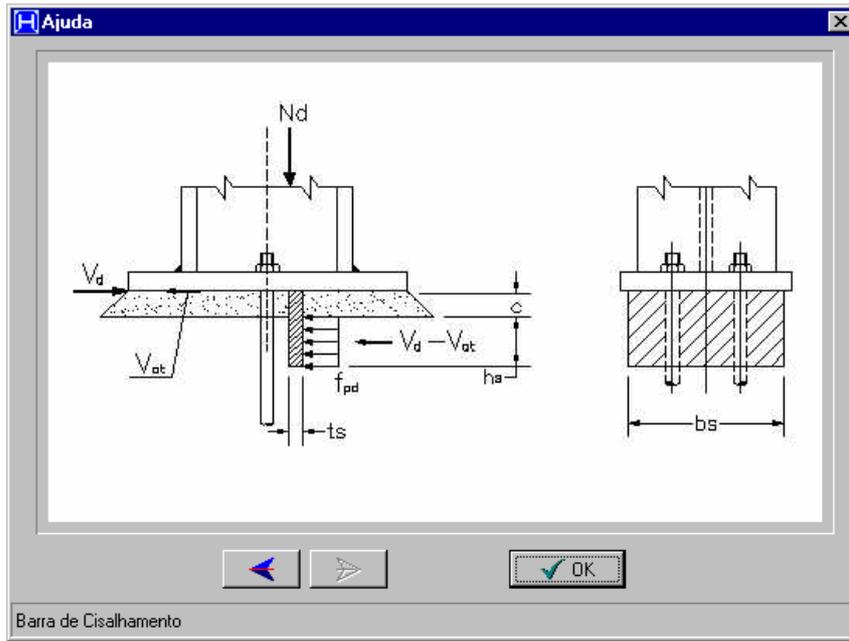


FIGURA 2.26 – Janela ajuda.

# 3

## ***ANÁLISE NUMÉRICA VIA MEF***

### **3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Devido às incertezas envolvidas nas hipóteses de projeto anteriormente abordadas, sobre a distribuição da tensão de contato entre a placa de base e o concreto e sobre a flexibilidade desta placa, realizou-se a análise numérica de quatro modelos de base de pilar, via *Método dos Elementos Finitos*, para verificar o seu comportamento global e de suas partes integrantes. As análises foram realizadas neste trabalho utilizando-se o programa ANSYS, versão 5.7.

Trata-se de um programa bastante rico quanto à biblioteca de elementos, tipos de análises possíveis, recursos numéricos disponíveis, pré e pós-processadores. Permite a análise de problemas de estruturas (objeto deste trabalho), fenômenos eletromagnéticos, transferência de calor, escoamento de fluídos e acústica.

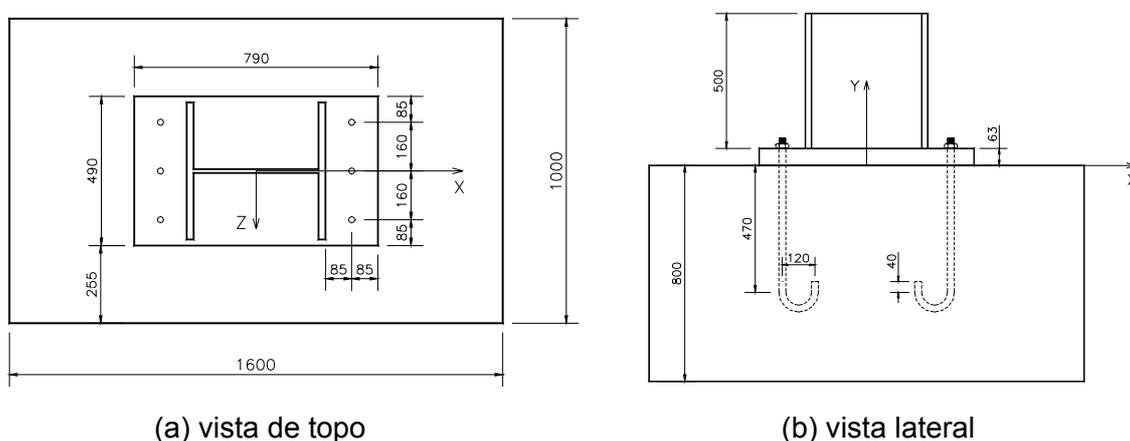
Realizou-se a entrada de dados dos quatro modelos através de arquivos de texto contendo a *linguagem de projeto paramétrica do Ansys* (APDL), permitindo a construção dos modelos de forma paramétrica através de variáveis. A utilização deste recurso torna possíveis alterações no modelo de forma rápida, permitindo também o uso de operações matemáticas, rotinas de repetição (*loops*), comandos para tomada de decisão (*if-then-else*), etc. Todos os comandos, pertinentes ao programa, necessários a construção de um modelo, são fornecidos através deste arquivo de texto, sem a utilização da *Interface Gráfica do Usuário* (GUI).

### 3.2. MODELO 01

Criou-se este modelo com o objetivo de simular bases submetidas à força axial de compressão juntamente com um momento fletor.

#### 3.2.1. Propriedades Geométricas

O modelo tem como componentes o pilar, a placa de base, os chumbadores e o bloco de concreto. O esquema da FIG. 3.1 ilustra, com detalhes, sua geometria com suas respectivas dimensões em milímetros.



Adotou-se o perfil CS 450×198 (450×450×22,4×12,5) para o pilar metálico. Os chumbadores empregados, quando necessários, são do tipo *gancho* com diâmetro de 12,7mm (1/2"). As dimensões da placa de base foram obtidas utilizando-se os procedimentos de cálculo abordados. A TAB. 3.1 apresenta a espessura da placa de base para as quatro situações de carregamento descritas no próximo sub-item. As demais propriedades geométricas não variam para todas as situações e são mostradas na FIG. 3.1.

TABELA 3.1 – Espessura da placa de base obtida através do procedimentos Blodgett (1966) e DeWolf & Richer (1990).

Situações de Carregamento	espessura da placa de base (mm)	
	DeWolf	Blodgett
1	50	63
2	50	63
3	50	63
4	63	63

### 3.2.2. Situações de Carregamento

As situações de carregamento envolvendo uma combinação de força normal e momento fletor, foram determinadas tendo em vista uma tensão máxima no pilar, devido a estes dois esforços, igual a 15 kN/cm<sup>2</sup>. Tais situações são apresentadas na TAB. 3.2.

TABELA 3.2 – Situações de carregamento.

Situação	Força Normal (kN)	Momento Fletor (kN.cm)
1	3800	0
2	3040	13275
3	2280	26550
4	1520	39825

### 3.2.3. Modelagem via Programa Ansys

O modelo é composto pelo pilar metálico, placa de base, chumbadores e pelo bloco de concreto. O conteúdo do arquivo de entrada de dados para o programa Ansys deste modelo, assim com para os demais, está contido no Anexo I.

Como o bloco de concreto é uma estrutura tridimensional, utilizou-se o elemento SOLID45, que é usado para modelagem tridimensional de estruturas sólidas. Ele é definido por oito nós, tendo três graus de liberdade em cada um: translações nas direções X, Y e Z. A geometria, a posição dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento são mostrados na FIG. 3.2.

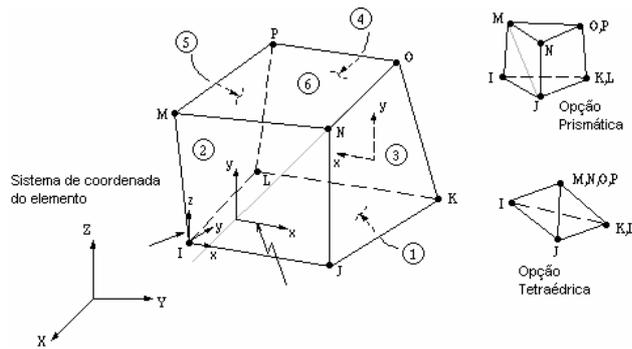


FIGURA 3.2 – Elemento SOLID45.

Inicialmente, atribuiu-se um comportamento elástico a este elemento. Após a verificação dos resultados da respectiva análise, observou-se que as tensões nos elementos em questão, ultrapassaram o limite de resistência à compressão do concreto adotado de  $f_{ck}=2,0 \text{ kN/cm}^2$ . Desta forma, o elemento SOLID45 foi mantido, e o comportamento não-linear do concreto foi considerado utilizando-se o critério de escoamento de Drucker-Prager, aplicável a materiais granulares, tais como solo, rochas e o próprio concreto. Este critério de escoamento é adequado para o concreto por permitir que sejam consideradas diferentes resistências a tração e compressão. O critério de Drucker-Prager é definido pelos parâmetros do material  $\alpha$  e  $k$  fornecidos por Barbosa (1997) através das equações.

$$\alpha = \frac{f_{ck} - f_{tk}}{\sqrt{3}(f_{ck} + 2f_{tk})} \quad (3.1)$$

$$k = \frac{\sqrt{3}f_{ck}f_{tk}}{f_{ck} + 2f_{tk}} \quad (3.2)$$

onde  $f_{ck}$  e  $f_{tk}$  são, respectivamente, as resistências do concreto à compressão e tração.

Segundo Barbosa (1997), a grande limitação do uso deste critério, para estruturas de concreto, consiste no fato de não haver mudanças na superfície de escoamento, resultando em um modelo necessariamente elastoplástico perfeito, sem encruamento ou amolecimento. A implicação disso na análise de estruturas de concreto é a incapacidade de representar adequadamente o processo de ruptura do material, especialmente na tração onde, uma vez atingida a tensão máxima, o material entra em escoamento. Não há como se caracterizar a ruptura do concreto devida à fissuração. Nem mesmo o procedimento, usual em

dimensionamento, de desprezar-se a resistência à tração do concreto é possível, em virtude de dificuldades numéricas quando se adotam valores muito baixos para a resistência a tração. Dessa forma, nos modelos que empregam esse critério, a fissuração é substituída por um processo de escoamento, que, embora limite o crescimento das tensões de tração, torna o modelo mais rígido que a estrutura real, ao não permitir também seu decaimento.

Os valores do módulo elástico, do coeficiente de *Poison* e da resistência à compressão do concreto foram de 2880 kN/cm<sup>2</sup>, 0,19 e 2 kN/cm<sup>2</sup> respectivamente.

Com relação ao pilar metálico e a placa de base, utilizou-se elementos de casca (SHELL63) para representá-los. O elemento SHELL63 possui tanto comportamento de membrana quanto de placa, ou seja, forças normais e perpendiculares ao plano do elemento são permitidas. O elemento é definido por quatro nós, tendo seis graus de liberdade em cada um: translações nas direções X, Y e Z, e rotações em torno dos eixos X, Y e Z. A geometria, a posição dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento são mostrados na FIG. 3.3.

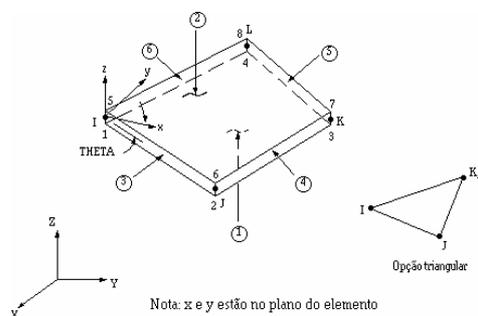


FIGURA 3.3 – Elemento SHELL63.

A constante real, que para o elemento SHELL63 se refere à espessura do mesmo, diferencia a placa de base dos elementos do pilar (mesas e alma).

Como a resistência à flexão dos chumbadores é uma grandeza considerada importante, empregou-se o elemento de viga BEAM4 para representá-los. Este elemento é definido por dois ou três nós, área da seção transversal, por dois momentos de inércia (IZZ e IYY), duas espessuras (TKY e TKZ), por um momento

de inércia à torção e pelas propriedades do material. Possui seis graus de liberdade em cada nó: translações nas direções X, Y e Z, e rotações em torno dos eixos X, Y e Z. A geometria, a posição dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento são mostrados na FIG. 3.4.

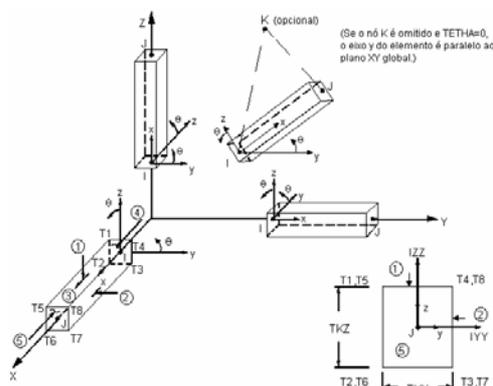


FIGURA 3.4 – Elemento BEAM4.

Os elementos dos chumbadores foram gerados de forma que a posição de seus nós coincidisse com a posição dos nós dos elementos sólidos. Isto foi feito para facilitar a ligação dos chumbadores ao concreto através dos elementos de mola, que serão descritos nos parágrafos seguintes.

O aço utilizado nos chumbadores, na placa de base e no pilar possui valores para o módulo elástico e coeficiente de *Poisson* de 20500 kN/cm<sup>2</sup> e 0,3 respectivamente. Optou-se por considerar um comportamento elástico dos elementos destes três componentes do modelo, já que as tensões obtidas nos mesmos não atingiram o limite de escoamento do aço adotado.

Além dos elementos utilizados para representar as partes físicas do modelo (pilar, placa de base, chumbadores e bloco de concreto), outros foram empregados para simular tanto o contato entre a placa de base e o bloco de concreto quanto o atrito entre os chumbadores e o concreto.

Devido às restrições impostas pela malha do bloco de concreto, causadas pelo formato de gancho dos chumbadores, a projeção dos nós da placa sobre o bloco de concreto não coincidia com os nós dos elementos sólidos. Então, o uso dos

elementos de contato superfície-superfície foi a melhor opção encontrada para representar o contato placa de base/bloco de concreto, uma vez que estes elementos não exigem tal situação. Para o par de elemento deste contato, utilizou-se o elemento TARGE170 (bloco) juntamente com o CONTA173 (placa). O par é definido pelo uso de um mesmo número para as respectivas constantes reais. O elemento CONTA173 é usado para representar o contato 3-D entre uma superfície “alvo” (TARGE170) e uma superfície deformável, definida por este elemento. Este elemento é disposto nas superfícies de elementos 3-D sólidos ou de cascas, tendo as mesmas características da face de um elemento sólido ou de casca com a qual está conectado. A geometria e localização dos nós, de ambos os elementos de contato, são mostradas na FIG. 3.5.

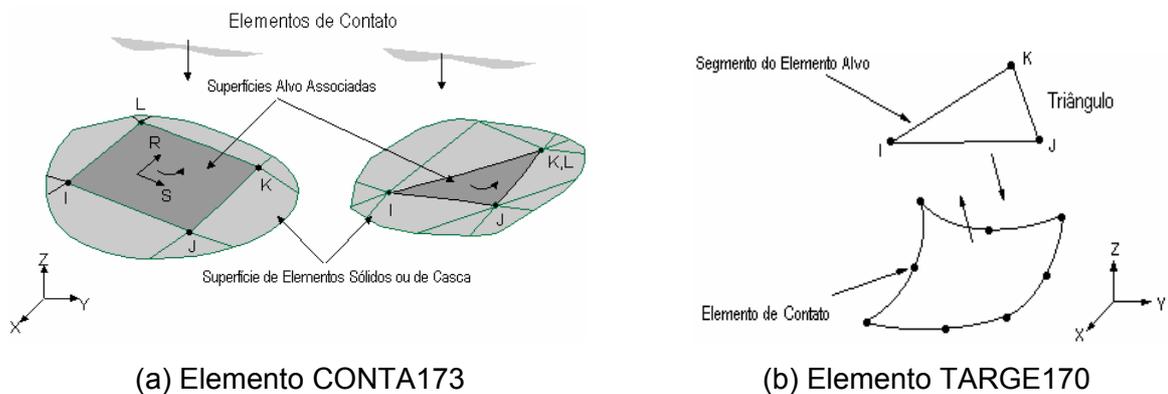


FIGURA 3.5 – Par de elementos de contato.

O atrito entre os chumbadores e o concreto foi simulado com auxílio do elemento de mola COMBIN39, que possui característica unidirecional com comportamento não-linear, determinado através de uma curva genérica da força em função do deslocamento. A curva força-deslocamento utilizada para simular o atrito entre chumbadores e o concreto foi definida por cinco pontos, e é mostrada na FIG. 3.6. Os valores que definem os pontos 2 e 4,  $D_{lim}$  e  $F_{bu\_sm}$ , são respectivamente, o deslocamento limite de 0,1mm que define o ponto até o qual há variação da força de atrito e a força de atrito máxima para um segmento do chumbador, definida pela tensão de aderência entre aço e concreto  $\tau_{bu}$ , obtida pela equação 3.1, conforme NBR 6118 (1980):

$$\tau_{bu} = 0,9\sqrt{f_{cd}} \quad (3.1)$$

onde  $f_{cd}$  é a resistência de cálculo do concreto à compressão.

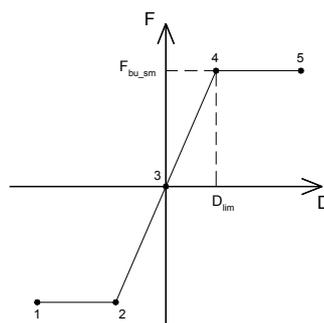


FIGURA 3.6 - Curva do comportamento não-linear do elemento de mola.

Inseriram-se os elementos de mola somente na parte reta dos chumbadores, isto devido à dificuldade de se determinar um sistema de coordenadas para cada nó do gancho, em que a direção do deslocamento relativo entre os nós da mola fosse tangente ao gancho. Tal fato não compromete o comportamento geral do modelo, já que a força de tração obtida no início do gancho é pequena, pois as molas, que acima dele se encontram, absorvem grande parte desta força.

Toda a malha do modelo, ou seja, a malha do pilar, da placa de base, do bloco de concreto e dos chumbadores, foi gerada utilizando-se o mapeamento, que consiste em um controle na geração da malha. Utilizou-se este processo com o objetivo de diminuir o número de elementos, e conseqüentemente o número de nós, e de se ter uma malha bem definida. A malha gerada para o bloco de concreto, placa de base e pilar metálico é mostrada na FIG. 3.7.

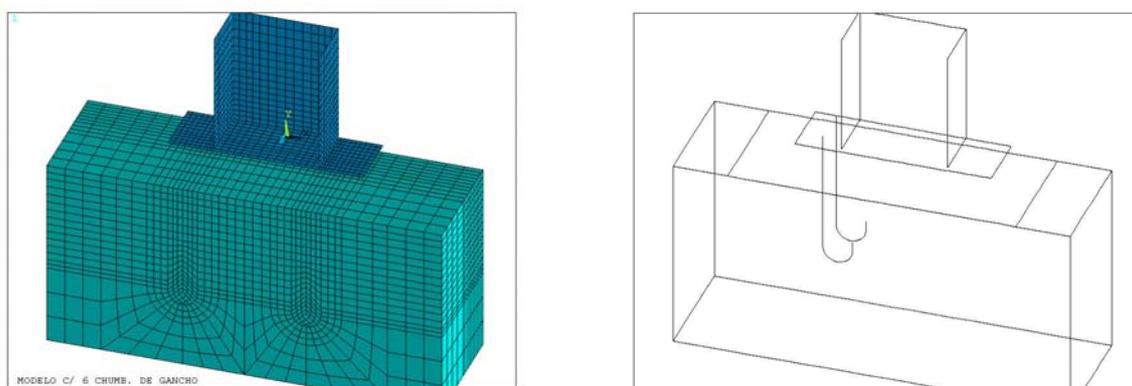


FIGURA 3.7 - Malha gerada para o modelo 01 e seus respectivos contornos.

#### **3.2.4. Condições de Contorno**

Por se tratar de um modelo tridimensional que envolve elementos sólidos, o número de nós gerados é muito grande, o que aumenta o tempo e esforço computacional necessários para o processamento. O uso da simetria do modelo, em relação ao plano X-Y (FIG. 3.1), foi indispensável para contornar esse problema. Para garantir tal simetria, restringiu-se a translação na direção do eixo Z e as rotações em torno dos eixos X e Y, dos nós contidos no plano de simetria.

Apoiou-se a face inferior do bloco, restringindo-se a translação na direção do eixo Y de todos os nós dessa região. Para impedir o deslocamento do bloco na direção do eixo Z, restringiu-se a translação, nesta direção, dos nós contidos na linha que divide ao meio a face inferior do bloco, paralela ao eixo Z.

O nó localizado no centro da placa de base possui o deslocamento UX nulo, impedindo assim, que a mesma se desloque nesta direção.

### 3.3. MODELO 02

Este modelo é uma variação do *Modelo 01*. Também tem o objetivo de simular bases submetidas à força axial de compressão juntamente com um momento fletor. A diferença está no tipo de chumbador empregado que, neste caso, é do tipo barra reta com porca soldada na extremidade embutida no concreto. A consequência desta mudança é a alteração da malha do bloco de concreto, que está vinculada ao formato do chumbador. Desta forma, a ancoragem não é proporcionada mais pelo atrito entre o chumbador e o concreto, e sim pelo contato entre a porca embutida e o concreto, ocasionando a formação do cone de arrancamento.

A FIG. 3.8 ilustra, a geometria do modelo com suas respectivas dimensões em milímetros.

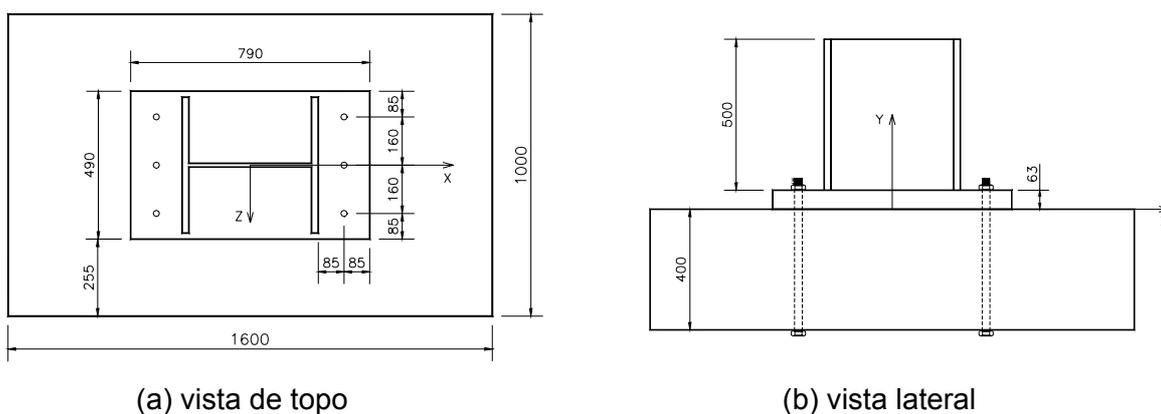


FIGURA 3.8 - Geometria do modelo 02.

As características geométricas do perfil metálico e da placa de base são as mesmas do Modelo 01. Os chumbadores, quando necessários, também possuem diâmetro de 12,7mm (1/2"). Apesar da geometria deste modelo ser basicamente a mesma do anterior, a malha do bloco de concreto é diferente, já que está vinculada ao formato dos chumbadores. A FIG. 3.9 mostra a malha do *Modelo 02* e seus respectivos contornos.

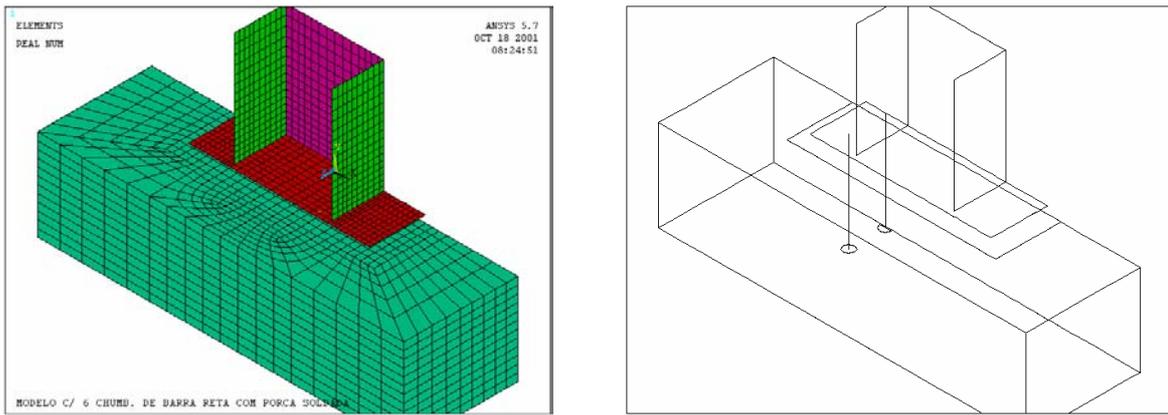


FIGURA 3.9 - Malha gerada para o modelo 02 e seus respectivos contornos.

Conforme descrito anteriormente, neste sistema a ancoragem é garantida pelo contato entre a porca embutida e o concreto. Por esta razão, fez-se necessário seccionar o bloco horizontalmente ao nível das porcas dos chumbadores (FIG. 3.8b), com o objetivo de se criar o contato entre estas e o concreto mais facilmente. Apoiou-se a face desta seção, restringindo-se a translação na direção do eixo Y de todos os nós dessa região, com exceção daqueles ao redor das porcas embutidas, permitindo a deformação do concreto devido à tensão de compressão e evitando uma possível concentração de tensões de tração nesta região. Com o mesmo objetivo de se evitar concentrações de tensão no contato, criaram-se as porcas com a forma de um octógono, evitando assim, arestas muito angulosas. A FIG. 3.10 mostra o detalhe da porca do chumbador. Da mesma forma que o Modelo 01, os deslocamentos no plano horizontal (plano X-Z) dos chumbadores e do bloco de concreto foram compatibilizados.

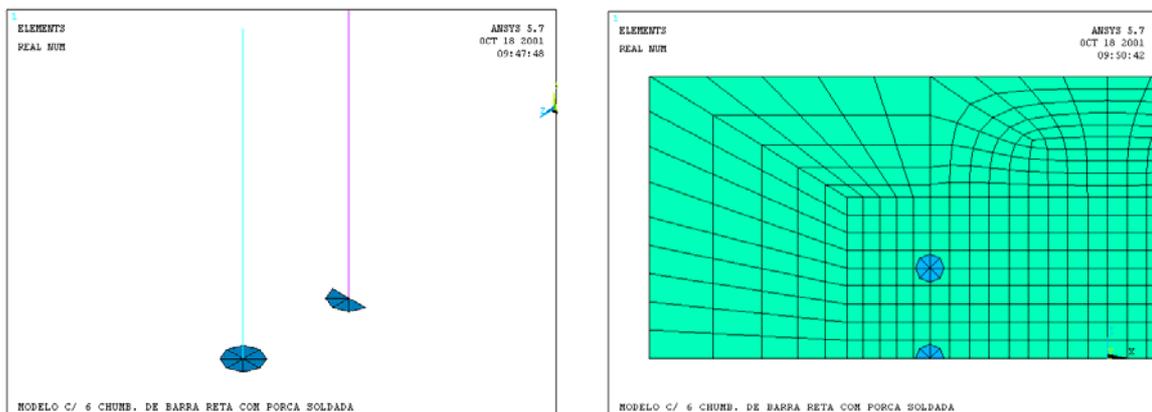


FIGURA 3.10 – Detalhe do chumbador com porca embutida.

### 3.4. MODELO 03

Bases submetidas apenas à força axial de compressão também foram simuladas através do modelo 03. Desta forma, a modelagem dos chumbadores foi dispensada.

#### 3.4.1. Propriedades geométricas e carregamento

A FIG. 3.11 mostra a geometria padrão do Modelo 03.

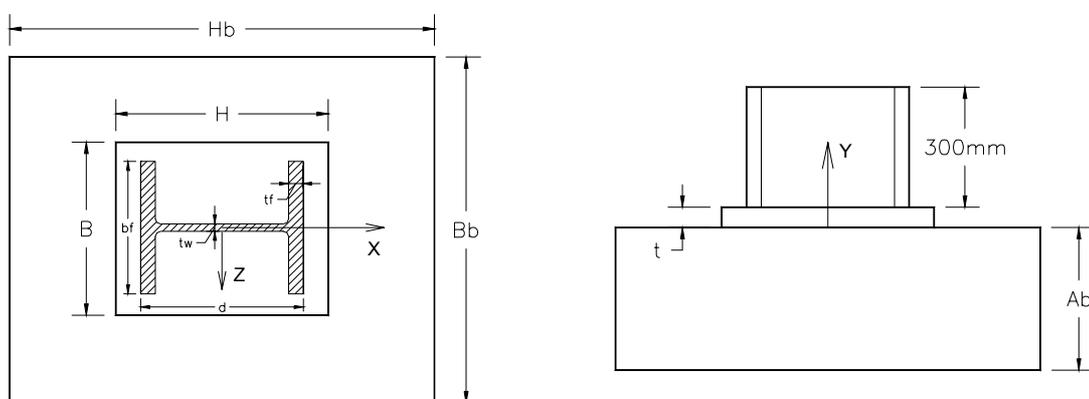


FIGURA 3.11 – Geometria padrão para o modelo 03.

O modelo foi analisado para nove pilares, cujas propriedades geométricas se encontram na TAB. 3.3. Tomou-se como valor da carga de compressão, noventa por cento da resistência de cálculo à compressão axial dos pilares (TAB. 3.4), com comprimento de flambagem de 3m, conforme NBR8800 (1986).

TABELA 3.3 – Dimensões dos perfilados utilizados no modelo 03.

Perfil	d (mm)	bf (mm)	tw (mm)	tf (mm)	A (cm <sup>2</sup> )
HPL 100	96	100	5,0	8	21,2
HPL 200	190	200	6,5	10	53,8
HPM 200	200	200	9,0	15	78,1
HPL 300	290	300	8,5	14	113,0
HPM 300	300	300	11,0	19	149,0
HPP 300	340	310	21,0	39	303,0
HPM 400	400	300	13,5	24	198,0
HPM 500	500	300	14,5	28	239,0
HPP 600	620	305	21,0	40	364,0

TABELA 3.4 – Resistência de Cálculo à Compressão Axial.

Perfil	$L_{bx}$ (cm)	$L_{by}$ (cm)	Rd (kN)	0,9.Rd (kN)
HPL 100	300	300	182,7	164,4
HPL 200	300	300	893,3	804,0
HPM 200	300	300	1307,4	1176,7
HPL 300	300	300	2219,6	1997,6
HPM 300	300	300	2943,5	2649,1
HPP 300	300	300	6026,7	5424,0
HPM 400	300	300	3889,2	3500,3
HPM 500	300	300	4662,3	4196,1
HPP 600	300	300	7100,7	6390,7

As dimensões da placa de base são apresentadas na TAB. 3.5.

TABELA 3.5 – Dimensões da placa de base para o modelo 03 em milímetros.

Perfil	Comprimento (H)	Largura (B)	Espessura (t)
HPL 100	100	105	16,0
HPL 200	200	210	31,5
HPM 200	250	250	37,5
HPL 300	315	325	50,0
HPM 300	370	370	63,0
HPP 300	550	505	63,0
HPM 400	490	370	63,0
HPM 500	600	360	75,0
HPP 600	815	405	75,0

### 3.4.2. Modelagem e condições de contorno

Apesar do modelo 03 tratar de bases axialmente comprimidas, os elementos utilizados para modelar o concreto, o pilar de aço e a placa de base foram os mesmos utilizados no modelo 01, ou seja, os elementos SOLID45 e SHELL63 respectivamente. Os materiais empregados são os mesmos utilizados no modelo 01. A FIG. 3.12 mostra a malha gerada e o carregamento aplicado.

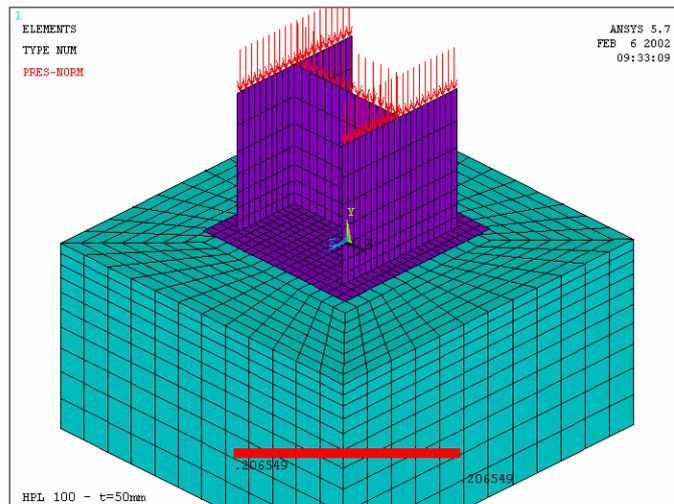


FIGURA 3.12 – Malha gerada para o modelo 03 com o carregamento aplicado.

Devido a menor complexidade deste modelo, gerando assim um menor número de elementos e nós, foi possível modelar sua geometria completa e não somente sua parte simétrica. Os deslocamentos na direção dos eixos X e Z bem como a rotação em torno do eixo Y do nó central da placa de base foi impedida. A base do bloco de concreto foi apoiada restringindo-se o deslocamento UY destes nós. Para que não houvesse a rotação do bloco, os deslocamentos UX e UZ de dois nós situados em faces opostas foram impedidos, lembrando-se que o sistema de coordenadas é o mesmo para todos os modelos e é mostrado na FIG. 3.11.

### 3.5. **MODELO 04**

DeWolf & Richer (1990), para placas levemente carregadas, supõem que o contato, entre a placa de base e o bloco de concreto, ocorra somente em uma faixa sob a alma e as mesas do pilar. Criou-se então este modelo para simular este tipo de situação e verificar o comportamento do contato entre a placa de base e o concreto.

Adotou-se o perfil CS 300x62 (300x300x9,5x8,0) para o pilar metálico. Não foram utilizados chumbadores, por se tratar de uma compressão axial. A placa de base possui área de 300x300mm e espessura de 27 mm, obtidas através do procedimento de DeWolf & Richer (1990) (placas levemente carregadas), para uma força normal no pilar de 1300kN. Toda a modelagem empregada neste modelo, desde os tipos de elementos até as condições de contorno, é a mesma utilizada no modelo 03. A FIG. 3.13 ilustra a malha gerada para este modelo.

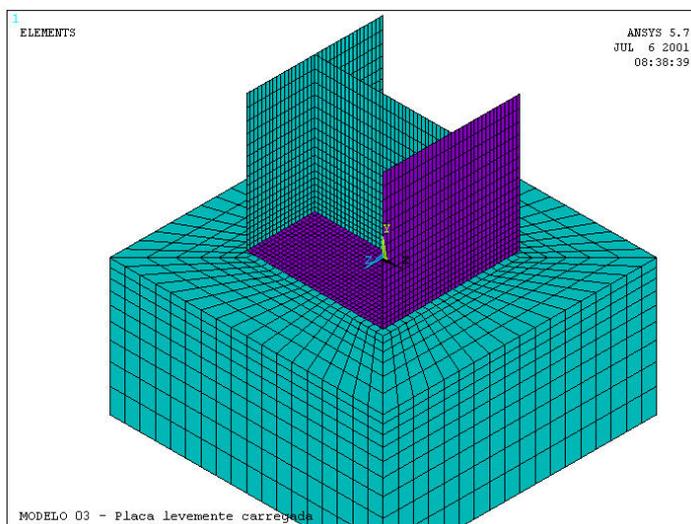


FIGURA 3.13 – Malha gerada para o modelo 04.

# 4

## **RESULTADOS**

### **4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Como resultados de maior interesse a este trabalho, são enfatizadas neste capítulo as tensões normais na placa de base devido à sua flexão, a distribuição e valores das tensões de contato entre a placa de base e o bloco de concreto e a força de tração que atua nos chumbadores para os modelos apresentados no capítulo anterior.

São mostrados também os valores obtidos, para os itens citados no parágrafo anterior, através dos procedimentos teóricos já discutidos, a fim de se ter um comparativo entre a análise teórica e numérica.

As unidades utilizadas no programa Ansys para força e deslocamento foram respectivamente quilonewton (kN) e milímetro (mm).

## 4.2. RESULTADOS NUMÉRICOS E ANALÍTICOS

### 4.2.1. Modelo 01 – Compressão axial com momento fletor (chumbador tipo Gancho)

A FIG. 4.1 apresenta como resultados iniciais, a condição deformada do modelo para as situações de carregamento 1 a 4. É válido lembrar que na primeira situação o pilar é carregado somente com uma força axial de compressão. Nas situações seguintes, a força normal é reduzida em vinte por cento (20%) em cada uma delas e o momento aumentado de forma que tensão de compressão no pilar permaneça em  $15 \text{ kN/cm}^2$  (ver TAB. 3.2).

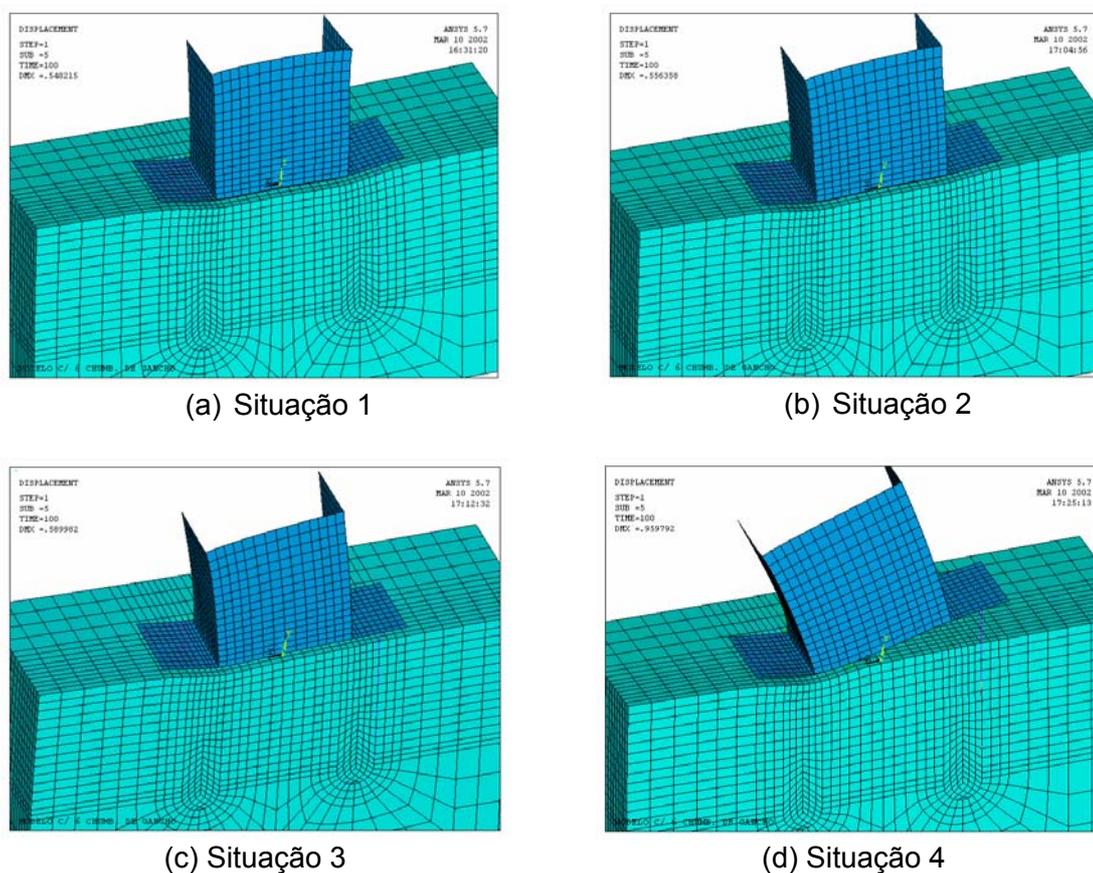


FIGURA 4.1 – Condição deformada do modelo 01

A seguir é mostrada na FIG. 4.2 a distribuição das tensões SY no bloco de concreto, perpendiculares à superfície superior do mesmo. O sistema de coordenadas é mostrado na FIG. 4.3 para auxiliar na visualização das direções das tensões. Na escala de cores da FIG. 4.2 o azul escuro representa os valores

máximos da tensão de compressão e o vermelho, por sua vez, os valores mínimos, podendo chegar a valores positivos (tração).

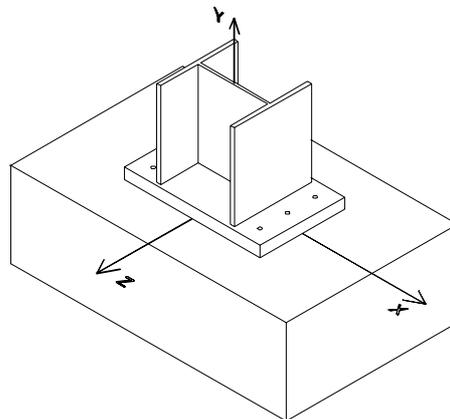
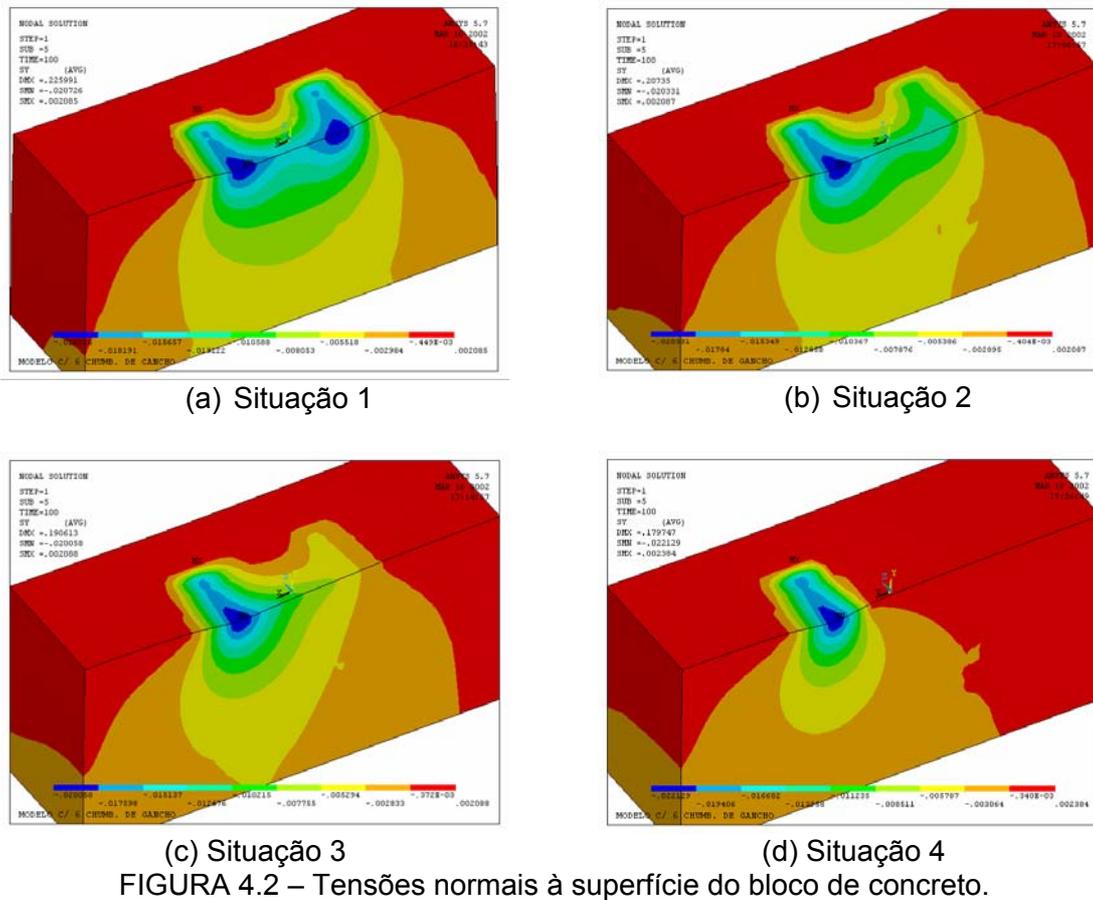


FIGURA 4.3 – Sistema de coordenadas do modelo.

A distribuição da tensão de contato, entre a placa de base e o bloco de concreto, no plano XY (plano médio da alma do pilar) obtida na análise numérica é a apresentada na FIG. 4.4 para os quatro carregamentos. Há uma simetria nesta distribuição para o carregamento 1, onde há apenas compressão axial e seu valor máximo ocorre sob as mesas do pilar. Nos carregamentos seguintes, há uma

concentração gradual da tensão de contato sob a mesa onde há maior compressão. Na situação 4 houve uma concentração da tensão de compressão apenas sob uma das mesas já que nesta condição de carregamento os chumbadores foram solicitados.

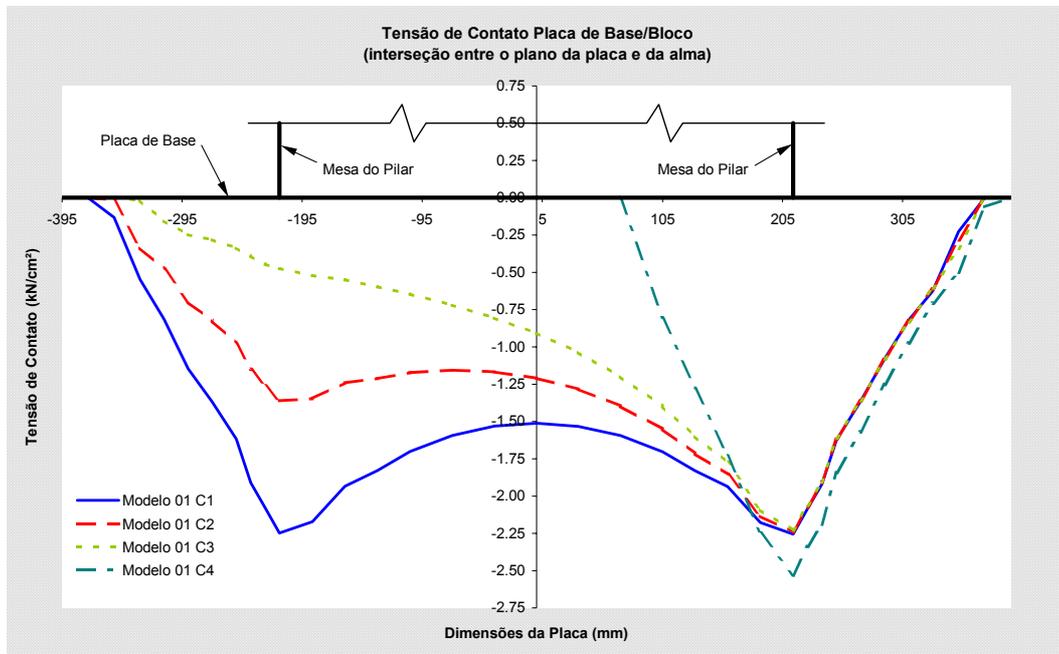


FIGURA 4.4 – Distribuição da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para as quatro situações de carregamento na análise numérica.

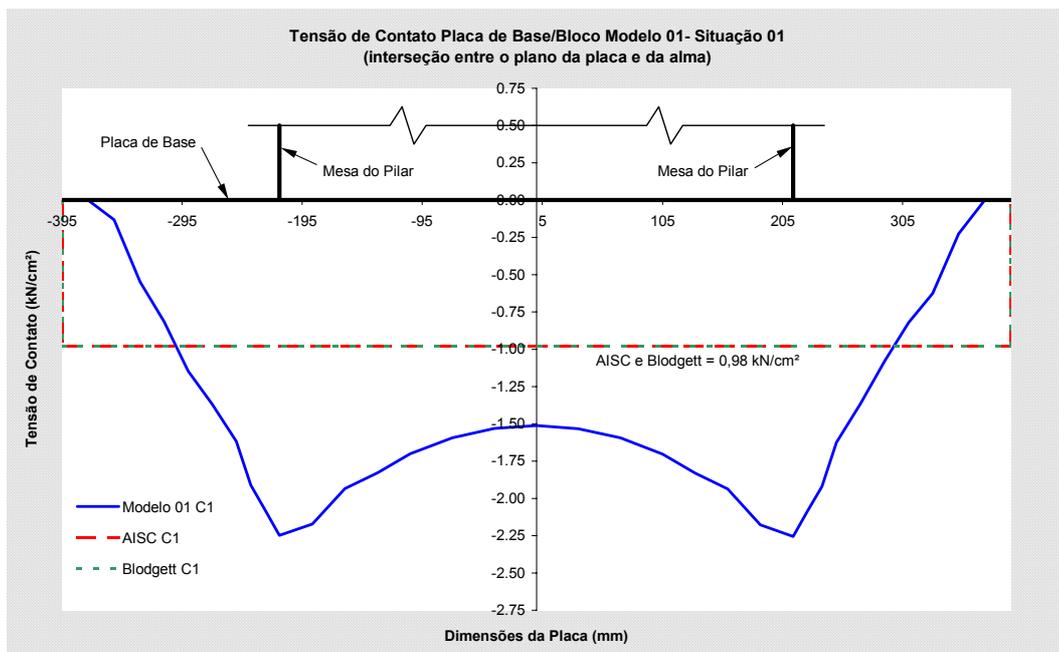


FIGURA 4.5 – Comparativo entre a distribuição da análise numérica e teórica da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para a situação 01 de carregamento.

Nas figuras 4.5 a 4.8 foram comparadas as distribuições da tensão de contato da análise numérica e aquelas obtidas nos procedimentos teóricos para as quatro situações de carregamento.

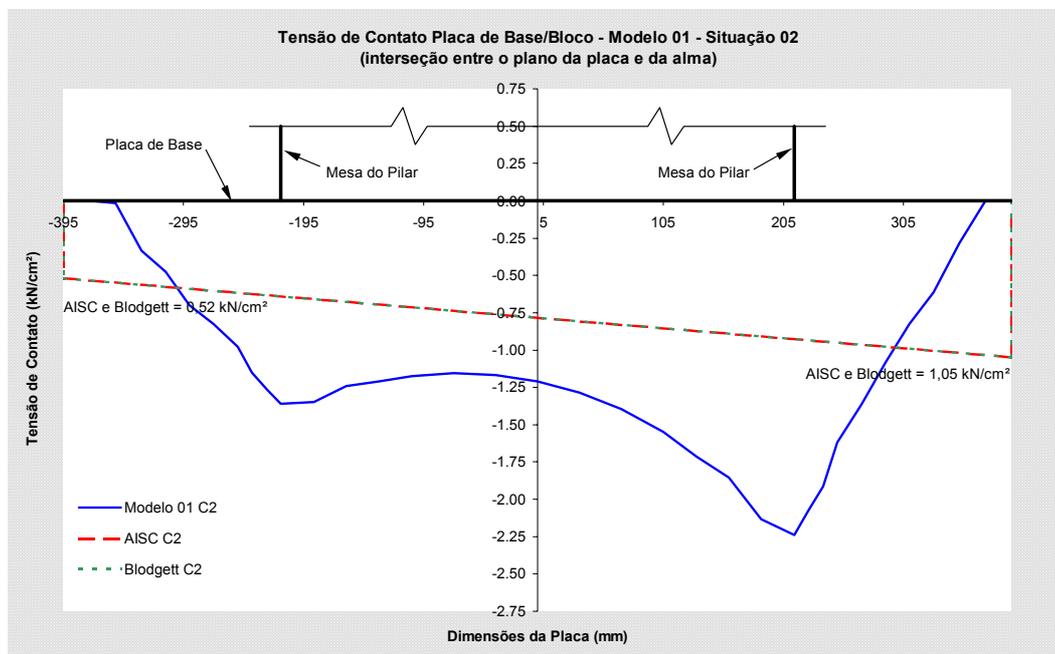


FIGURA 4.6 – Comparativo entre a distribuição da análise numérica e teórica da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para a situação 02 de carregamento.

Como foi apresentado no capítulo 2, tanto DeWolf & Richer (1990) como Blodgett (1966) admitem uma distribuição uniforme da tensão de contato ao longo da largura da placa e uma variação linear ao longo de seu comprimento, dependendo do valor do momento, até atingir seu valor máximo em sua extremidade. Nas quatro situações de carregamento, observa-se que esta variação linear não ocorre ao longo do comprimento da placa conforme análise numérica, já que a placa de base não é perfeitamente rígida. Nas regiões onde sua rigidez é maior (sob o pilar) a tensão de contato também é maior. É importante lembrar que a distribuição da tensão de contato da análise numérica apresentada nos gráficos das figuras 4.4 a 4.8 está no plano XY, ou seja, sob a alma do pilar. Desta forma, as distribuições obtidas em planos paralelos a este se concentram cada vez mais sob as mesas do pilar, à medida que se afastam do plano XY.

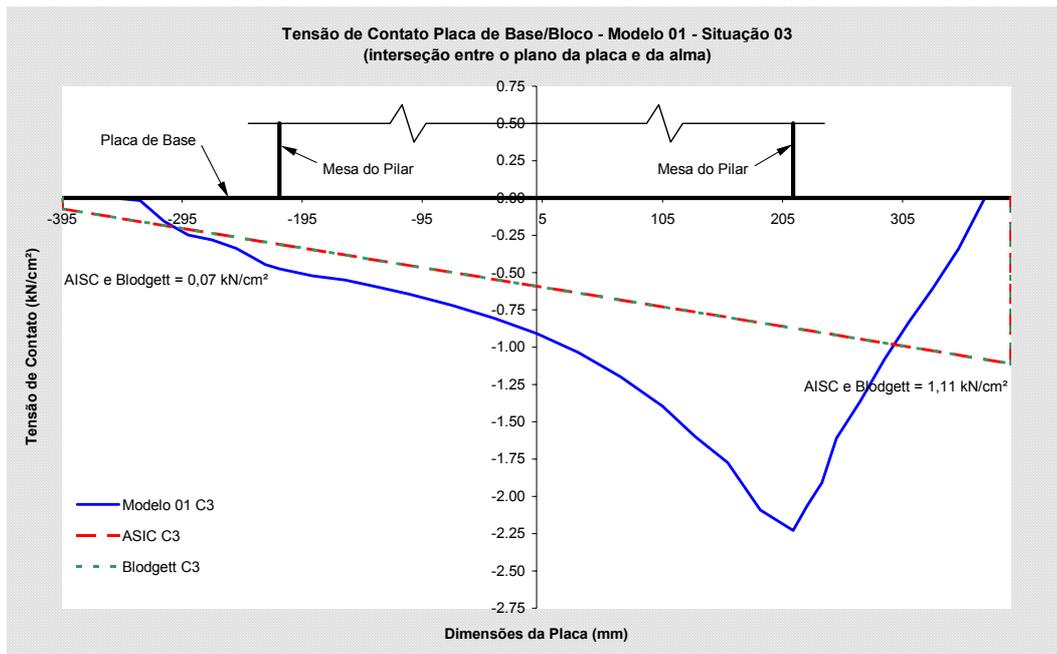


FIGURA 4.7 – Comparativo entre a distribuição da análise numérica e teórica da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para a situação 03 de carregamento.

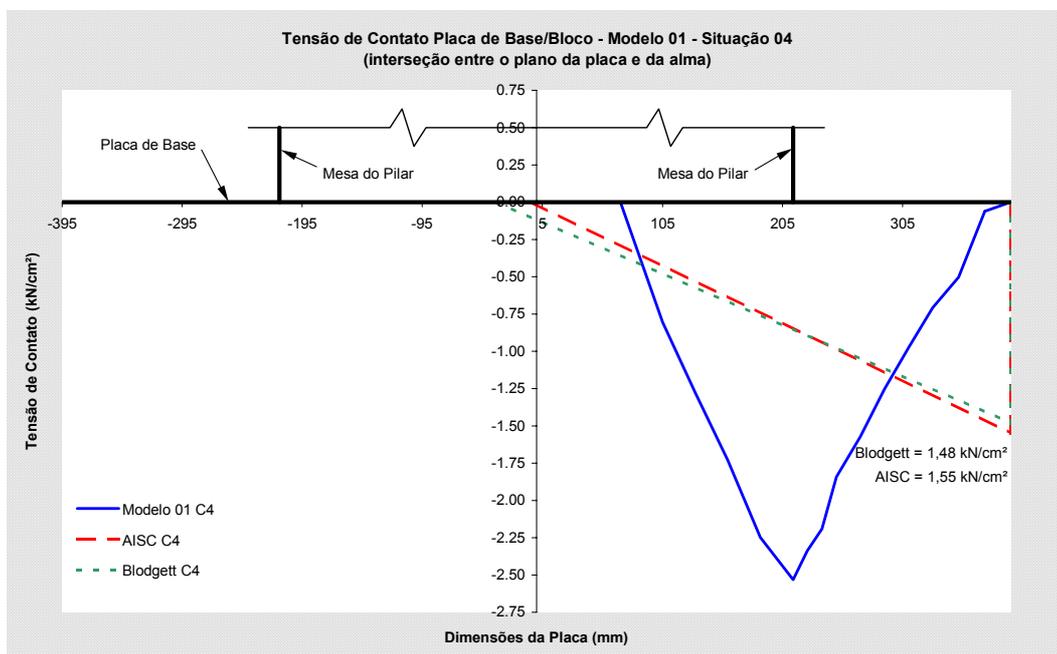


FIGURA 4.8 – Comparativo entre a distribuição da análise numérica e teórica da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para a situação 04 de carregamento.

Os dois procedimentos apresentam distribuições semelhantes quando a excentricidade equivalente ( $M_d/N_d$ ) é menor que  $H/6$ , onde  $H$  é o comprimento da placa de base. Como esta excentricidade nas três primeiras situações de carregamento se manteve nesta faixa, criaram-se mais duas situações somente com o objetivo de se comparar os procedimentos de DeWolf & Richer (1990) e Blodgett (1966) para bases carregadas axialmente com um momento fletor. Na obtenção destes dois novos carregamentos, seguiu-se a mesma idéia de se manter a tensão de compressão no pilar em 15 kN/cm<sup>2</sup> reduzindo-se a força normal gradualmente em 20%. A TAB. 4.1 apresenta as seis situações de carregamento.

TABELA 4.1 – Situações de carregamento para comparativo entre procedimentos teóricos.

Situação	Força Normal (kN)	Momento Fletor (kN.cm)
1	3800	0
2	3040	13275
3	2280	26550
4	1520	39825
5	760	53100
6	0	66375

As figuras 4.9 e 4.10 mostram a distribuição da tensão de contato para o procedimento de Blodgett (1966) e DeWolf & Richer (1990) respectivamente nas seis situações de carregamento.

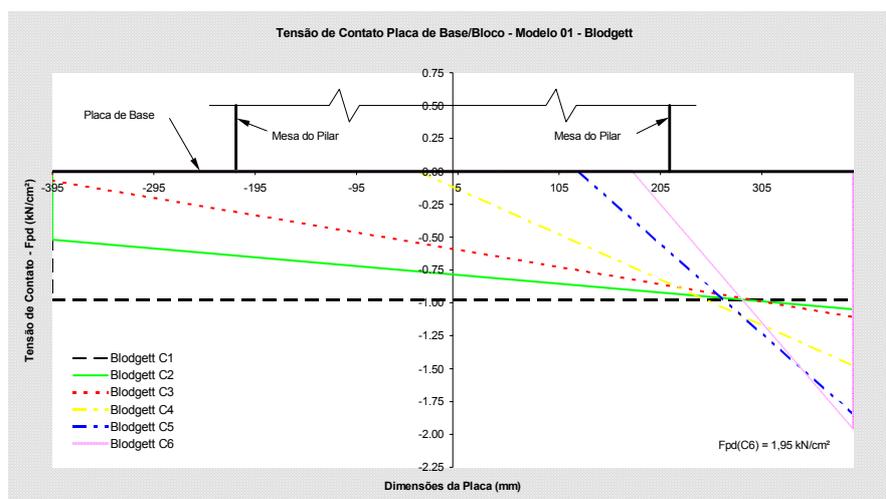


FIGURA 4.9 – Distribuição da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para as seis situações de carregamento conforme Blodgett (1966).

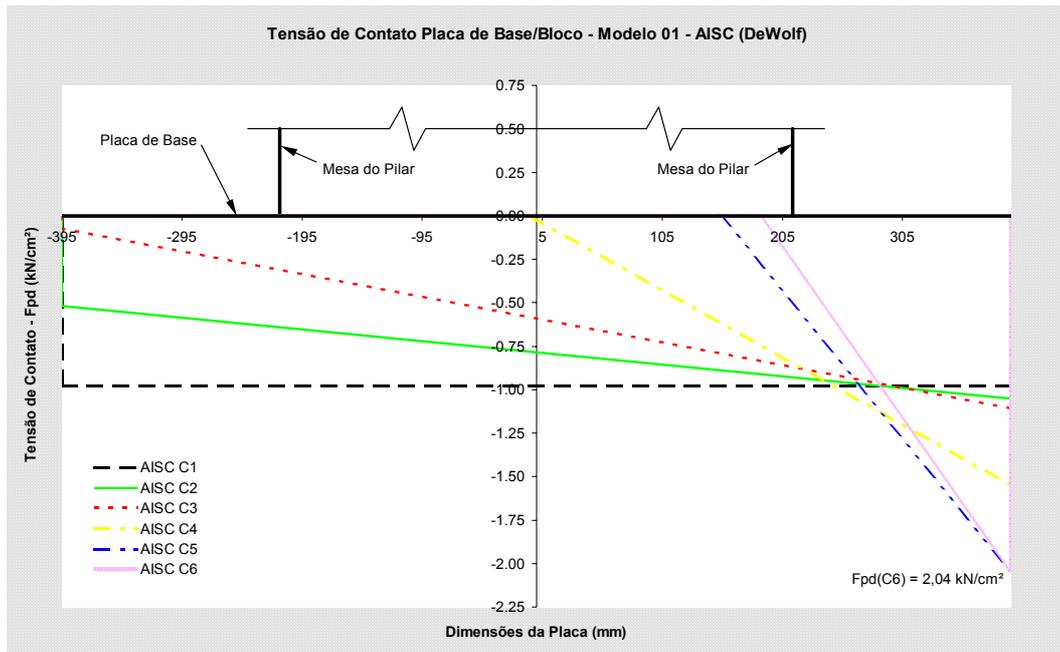


FIGURA 4.10 – Distribuição da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para as seis situações de carregamento conforme AISC (DeWolf & Richer (1990)).

Como os dois procedimentos não apresentaram diferenças na distribuição da tensão de contato para os carregamentos 1, 2 e 3, a FIG. 4.11 apresenta os resultados apenas para os carregamentos 4, 5 e 6.

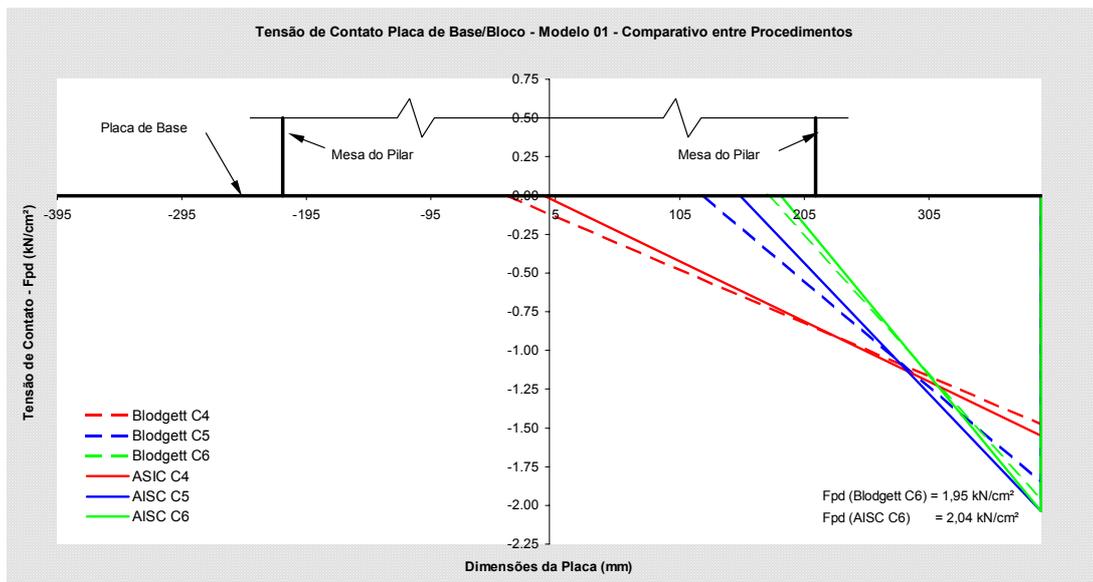


FIGURA 4.11 – Comparativo entre a distribuição da tensão de contato nas situações 4,5 e 6 para ambos os procedimentos.

Apesar dos dois procedimentos apresentarem teorias diferentes para a composição de esforços na placa de base a distribuição de tensão de contato em ambos diverge pouco, como ilustra a FIG. 4.11.

A FIG. 4.12 apresenta a distribuição das tensões SX nas fibras superiores das placas de base com espessura de 63 mm. As regiões em azul escuro representam as fibras mais comprimidas exatamente sob as mesas, também comprimidas, em torno das quais a placa sofre maior flexão. Os resultados para as fibras inferiores da placa de base são semelhantes aos das fibras superiores porém com sinais trocados, ou seja, em um nó quando a fibra superior está comprimida a inferior está tracionada. Na situação 4 surgem tensões de tração sob uma das mesas, já que apenas neste caso os chumbadores foram solicitados como será mostrado posteriormente.

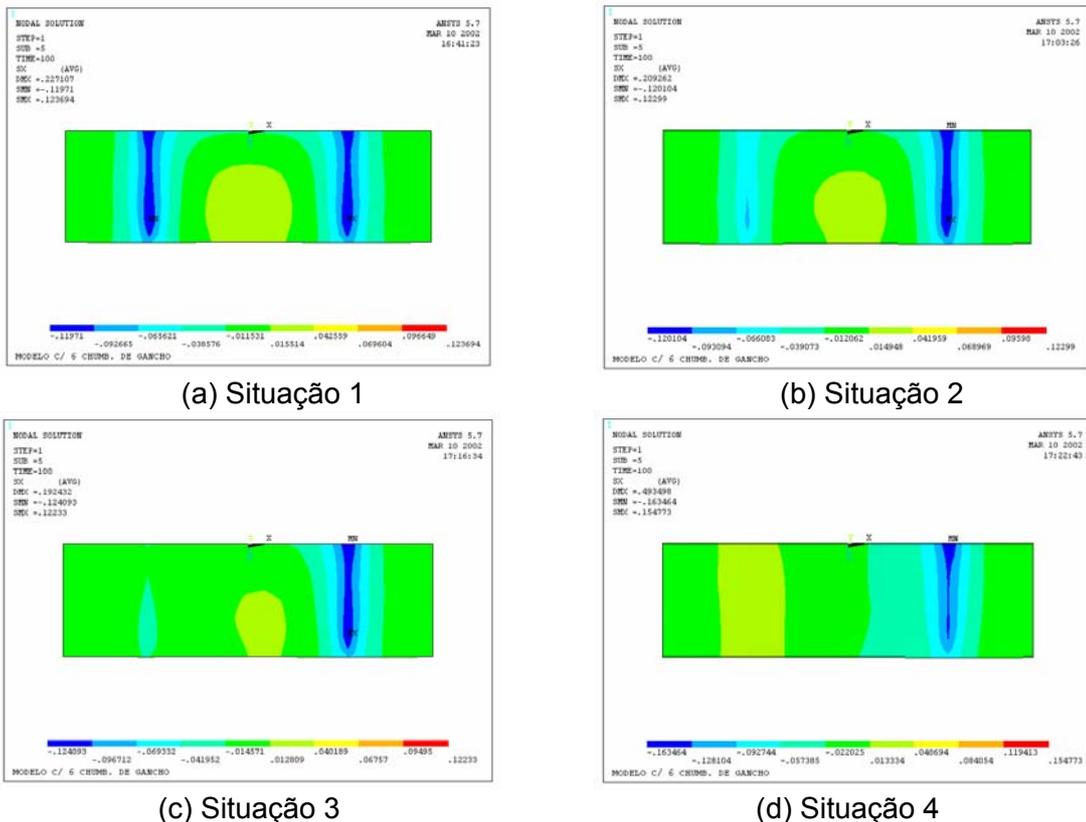
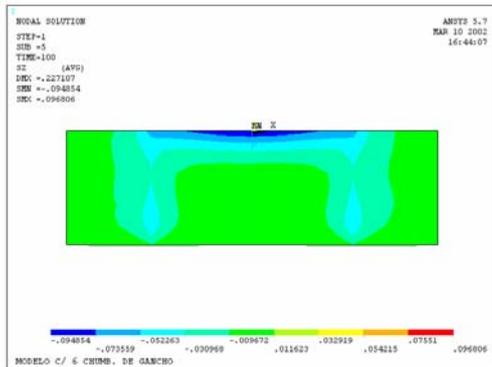


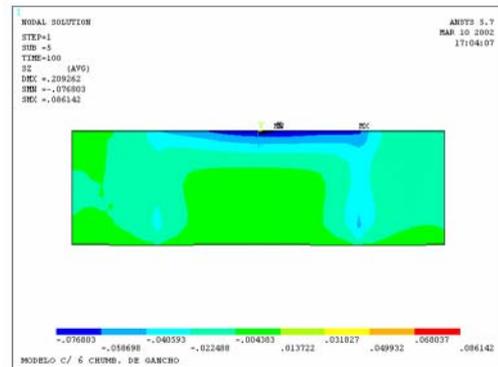
FIGURA 4.12 – Tensões SX nas fibras superiores da placa de base com espessura de 63mm.

A distribuição das tensões SX nas placas base com espessura de 50 mm é semelhante à mostrada na FIG. 4.4 para as placas com espessura de 63 mm.

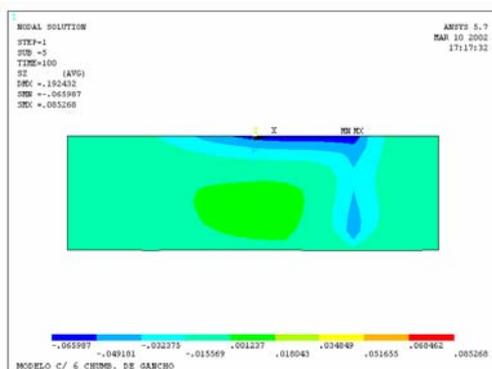
Agora são mostradas na FIG. 4.13 as tensões SZ novamente nas fibras superiores da placa de base. As máximas tensões de compressão surgem sob a alma do perfil por ser uma região onde há maior facilidade de flexão da placa em torno do eixo X.



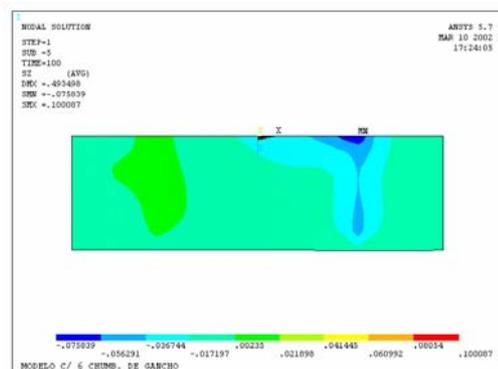
(a) Situação 1



(b) Situação 2



(c) Situação 3



(d) Situação 4

FIGURA 4.13 – Tensões SZ nas fibras superiores da placa de base de espessura de 63mm.

Como resultados numéricos, tomaram-se os valores das tensões SX nos pontos 4, 5, 6, 7 e 8 da FIG. 4.14 e são mostrados na TAB. 4.2. Utilizou-se os pontos 1, 2 e 3 para se obter os valores da tensão SZ. Os resultados da TAB. 4.2 são referentes às placas de espessura de 63 mm. Tais resultados para as placas de espessura de 50 mm estão na TAB. 4.3.

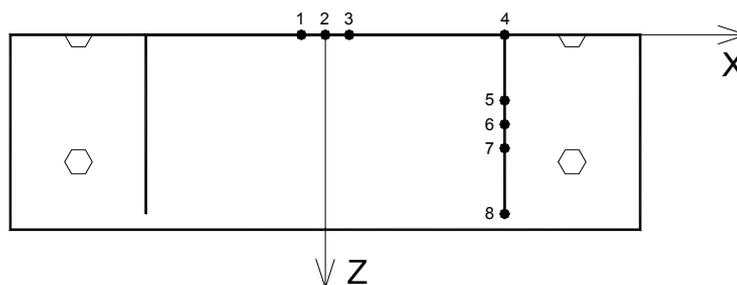


FIGURA 4.14 – Pontos da placa de base onde foram obtidas as tensões SX e SZ.

TABELA 4.2 – Tensões SX e SZ na placa de base com espessura de 63 mm.

Situação 1			Situação 2		
Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )	Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )
1	----	-9,34	1	----	-7,27
2	----	-9,49	2	----	-7,59
3	----	-9,34	3	----	-7,68
4	-11,61	----	4	-12,01	----
5	-10,40	----	5	-10,65	----
6	-10,75	----	6	-10,93	----
7	-11,14	----	7	-11,26	----
8	-10,17	----	8	-10,10	----

Situação 3			Situação 4		
Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )	Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )
1	----	-5,20	1	----	-1,80
2	----	-5,70	2	----	-2,19
3	----	-6,02	3	----	-2,63
4	-12,41	----	4	-16,35	----
5	-10,90	----	5	-13,14	----
6	-11,11	----	6	-13,13	----
7	-11,37	----	7	-13,18	----
8	-10,03	----	8	-11,17	----

TABELA 4.3 – Tensões SX e SZ na placa de base com espessura de 50 mm.

Situação 1			Situação 2			Situação 3		
Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )	Ponto s	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )	Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )
1	----	-12,22	1	----	-9,49	1	----	-6,75
2	----	-12,43	2	----	-9,95	2	----	-7,45
3	----	-12,21	3	----	-10,06	3	----	-7,90
4	-13,93	----	4	-14,41	----	4	-14,87	----
5	-12,92	----	5	-13,16	----	5	-13,38	----
6	-13,52	----	6	-13,67	----	6	-13,80	----
7	-14,15	----	7	-14,21	----	7	-14,26	----
8	-13,20	----	8	-13,06	----	8	-12,88	----

Comparou-se entre os procedimentos teóricos e a análise numérica o valor do momento fletor sob a parte externa da mesa mais comprimida do pilar. As tabelas 4.4 e 4.5 apresentam estes valores para uma faixa de largura unitária da placa de base. O momento fletor apresentado nas nestas tabelas, para os procedimentos teóricos, são oriundos da resultante ( $R$ ) da tensão de contato vezes o braço de alavanca  $L$  conforme mostrado da FIG. 4.15. No caso na análise numérica, transformou-se o valor da máxima tensão entre os pontos 4 e 8 em um momento fletor equivalente para um comportamento elástico da placa de base.

TABELA 4.4 – Momento fletor na placa de base em uma faixa unitária para o procedimento de DeWolf & Richer (1990).

Situação de carregamento	DeWolf (A) (kN.cm/cm)	Análise Numérica (B) (kN.cm/cm)	$\frac{B}{A} \times 100$
1	161,20	58,04	36,0
2	165,20	60,04	36,3
3	169,20	61,96	36,6
4	216,70	108,15	49,9

TABELA 4.5 – Momento fletor na placa de base em uma faixa unitária para o procedimento de Blodgett (1966).

Situação de carregamento	Blodgett (A) (kN.cm/cm)	Análise Numérica (B) (kN.cm/cm)	$\frac{B}{A} \times 100$
1	151,10	76,80	50,8
2	145,70	79,45	54,5
3	149,60	82,09	54,8
4	208,00	108,15	52,0

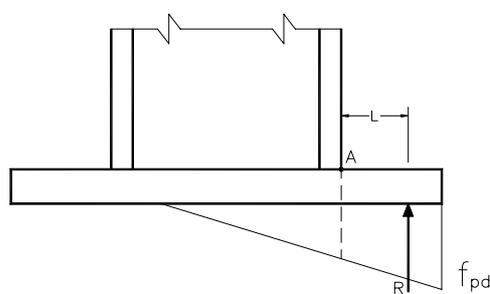


FIGURA 4.15 – Resultante de tensão de contato para obtenção do momento fletor no ponto A.

Pelo fato de, tanto DeWolf & Richer (1990) quanto Blodgett (1966), adotarem em suas hipóteses uma distribuição linear da tensão de contato, com seu valor máximo na extremidade da placa de base, a resultante desta distribuição provoca um momento fletor maior (de 2 a 2,7 vezes maior) que na análise numérica, já que nesta o valor máximo da tensão de contato de encontra sob a mesa mais comprimida e seu valor mínimo na extremidade da placa, conseqüentemente sua resultante se encontra mais próxima desta mesa, região de referência na determinação do momento fletor na placa.

Como já citado anteriormente, somente na situação 4 de carregamento os chumbadores foram solicitados. A FIG. 4.15 mostra o gradiente de tensões axiais nos chumbadores para tal situação. A tensão máxima (31,40 kN/cm<sup>2</sup>) ocorre no elemento de ligação entre o chumbador e a placa de base e decresce à medida que os elementos *mergulham* no concreto. Este efeito acontece devido ao uso das molas que conectam os chumbadores ao bloco de concreto com o intuito de simular a aderência entre os mesmos.

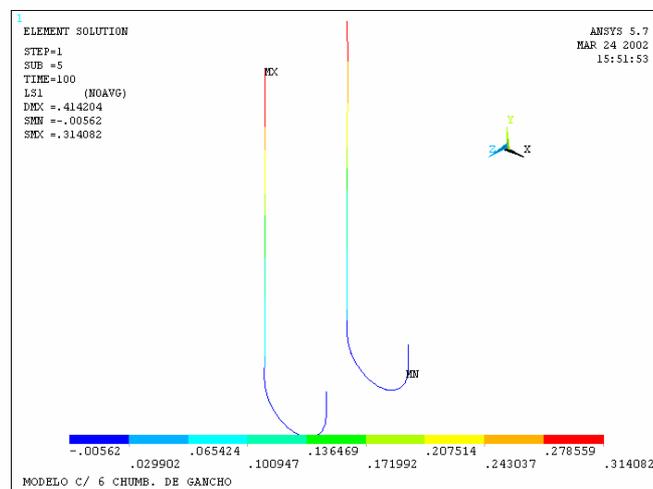


FIGURA 4.16 – Gradiente de tensão axial nos chumbadores.

A TAB. 4.6 apresenta os valores da força de tração em um chumbador, obtidos pelos procedimentos de DeWolf & Richer (1990) e Blodgett (1966) e através da análise numérica para a quarta situação de carregamento, assim como a resistência de cálculo do chumbador utilizado.

TABELA 4.6 – Força de tração no chumbador e sua respectiva resistência de cálculo.

Situação de carregamento	Procedimento teórico (kN)		Análise numérica (kN)	Resistência de cálculo à tração do chumbador de 12,7mm, aço ASTM A36 (kN)
	DeWolf	Blodgett		
4	0,00	8,64	39,96	24,77

A força de tração no chumbador encontrada na análise numérica foi muito superior à obtida conforme Blodgett (1966) e maior também que sua respectiva resistência de cálculo à tração. Pelo fato dos chumbadores serem solicitados nesta condição de carregamento, houve um maior descolamento entre a placa de base e o bloco de concreto. Desta forma, a tensão de contato se concentrou principalmente sob a mesa comprimida do pilar conforme ilustra a FIG. 4.17. Isto fez com que sua resultante de compressão se aproximasse dos chumbadores. Para que o equilíbrio desse sistema pudesse ocorrer, a resultante de tração nos chumbadores tem que ser maior. Esta nova distribuição de esforços pode explicar o valor elevado da força de tração encontrado no chumbador.

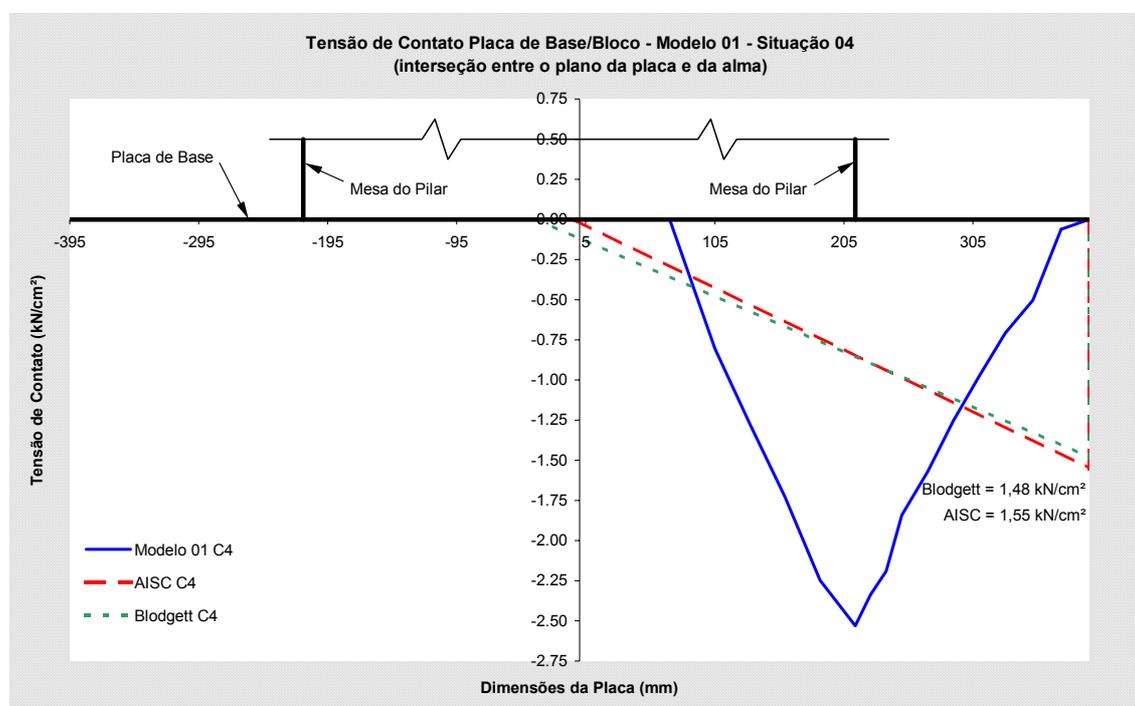


FIGURA 4.17 – Comparativo entre a distribuição da análise numérica e teórica da tensão de contato (placa/bloco) no plano da alma do pilar para a situação 04 de carregamento.

Analisou-se o modelo em questão, para a quarta situação de carregamento, variando-se a espessura da placa de base até que esta tivesse um comportamento de uma placa infinitamente rígida, com o objetivo de observar a distribuição da tensão de contato e a força de tração nos chumbadores. A FIG. 4.18 mostra o comportamento da tensão de contato encontrada, tendendo a uma distribuição linear, com seu valor máximo na extremidade da placa de base mais rígida ( $t = 800\text{mm}$ ). Devido ao efeito de borda do contato (isto foi observado quando a rigidez das placas é grande) sua variação linear foi interrompida na extremidade da placa.

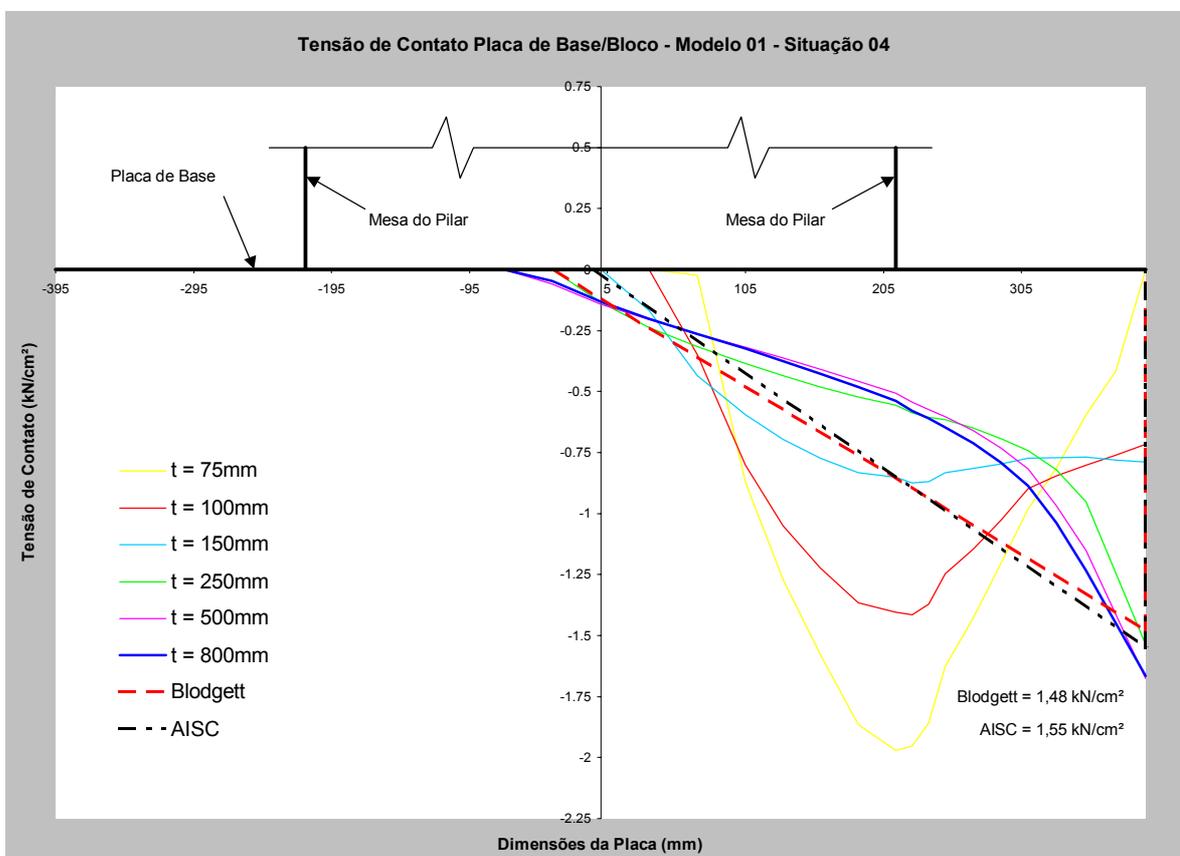


FIGURA 4.18 – Distribuição da tensão de contato (placa/bloco) para a situação 04 de carregamento para espessuras da placa tendendo à infinito para o modelo 01.

A TAB. 4.7 apresenta o valor da força de tração em cada chumbador obtido para o modelo. Simulou-se sete placas com espessuras de 75, 100, 150, 200, 250, 500 e 800mm. À medida que a rigidez da placa aumenta a força de tração nos chumbadores diminui, tendendo a um valor constante.

TABELA 4.7 – Força de tração no chumbador e sua respectiva resistência de cálculo para 7 espessuras da placa de base.

Espessura da placa (mm)	Situação de carregamento	Procedimento teórico (kN)		Análise numérica (kN)	Resistência de cálculo à tração do chumbador de 12,7mm, aço ASTM A36 (kN)
		DeWolf	Blodgett		
75				<b>36,38</b>	
100				<b>28,89</b>	
150				<b>15,82</b>	
200	4	<b>0,00</b>	<b>8,64</b>	<b>8,62</b>	<b>24,77</b>
250				<b>5,49</b>	
500				<b>2,55</b>	
800				<b>2,17</b>	

#### 4.2.2. **Modelo 02 – Compressão axial com momento fletor (chumbador tipo Barra Reta com Porca Embutida)**

A diferença entre este modelo e o primeiro é o tipo de chumbador empregado. Como observado no modelo 01, também no modelo 02, os chumbadores foram solicitados somente na situação 4 de carregamento. Apesar da malha do bloco de concreto ser diferente em ambos os modelos, os resultados discutidos para o modelo 01 foram os mesmos para as situações 1, 2 e 3 no modelo 02, onde os chumbadores não interferem nos resultados. Desta forma, são apresentados somente os resultados deste modelo para a situação 4 de carregamento.

A FIG. 4.19 mostra a condição deformada do modelo com um fator de multiplicação de 200, onde o deslocamento máximo da placa de base foi de 1,07mm.

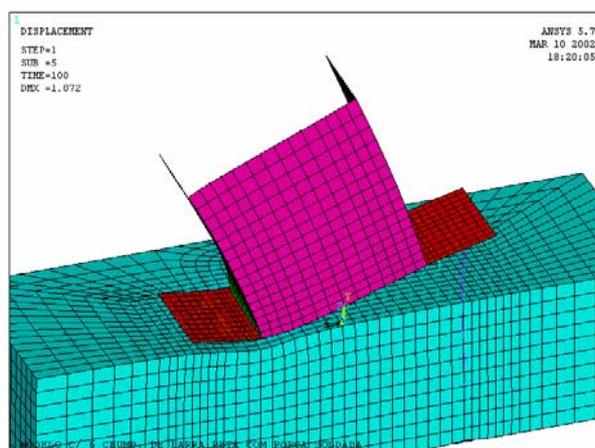
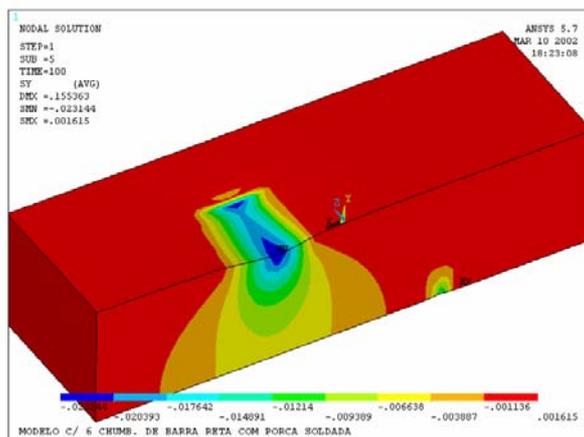
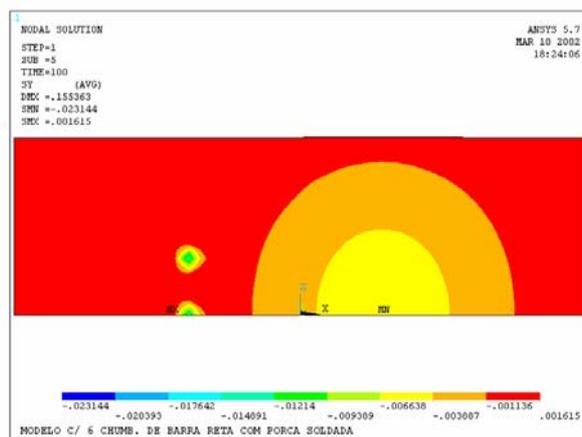


FIGURA 4.19 – Condição deformada para a situação 4.

A distribuição da tensão SY na superfície do bloco de concreto para este modelo é semelhante à do modelo 01 para a situação 4 de carregamento. A FIG. 4.20a mostra tal distribuição. Já a FIG. 4.20b apresenta a distribuição da tensão de mesma natureza na parte inferior do modelo, no plano horizontal que secciona as porcas embutidas, onde é notável a região do bloco comprimida pelas porcas embutidas no mesmo, lembrando que somente a parte simétrica do conjunto (bloco, placa, chumbadores e pilar) foi modelada e que o modelo possui três chumbadores tracionados. A tensão SY obtida no bloco foi de 2,31 kN/cm<sup>2</sup> na região sob a ligação entre a mesa comprimida e a alma do pilar (região mais rígida da placa de base).



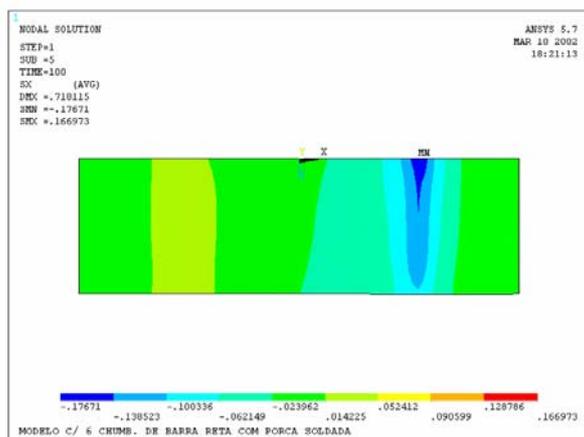
(a) Vista 3D do bloco



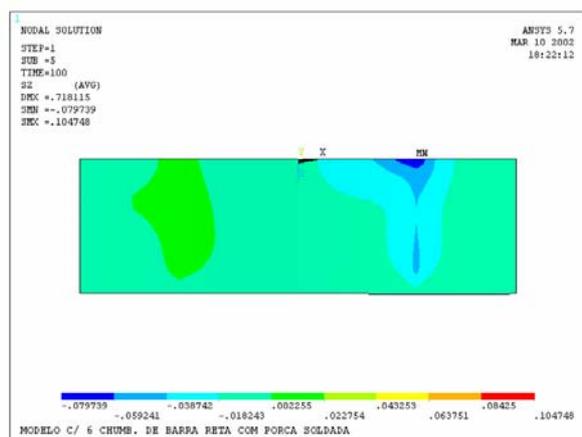
(b) Vista da base do bloco

FIGURA 4.20 – Tensões SY no bloco de concreto.

As figuras 4.21a e 4.21b mostram a distribuição da tensão SX e SZ, respectivamente, na placa de base. Ambas as distribuições são semelhantes àsquelas encontradas no modelo 01 para a situação 4 de carregamento. Os resultados nos pontos indicados na FIG. 4.14 são apresentados na TAB. 4.8.



(a) Tensão SX



(b) Tensão SZ

FIGURA 4.21 – Tensões na placa de base.

TABELA 4.8 – Tensões SX e SZ na placa de base com espessura de 63 mm.

Situação 4		
Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )
1	----	-1,08
2	----	-1,39
3	----	-1,82
4	-17,67	----
5	-13,93	----
6	-13,84	----
7	-13,82	----
8	-11,62	----

Apresentaram-se somente os resultados para a placa de base com espessura de 63mm pois não há variação desta dimensão na situação 4 de carregamento.

A TAB. 4.9 apresenta o comparativo entre os valores do momento fletor dos procedimentos teóricos e da análise numérica, sob a face externa da mesa mais comprimida do pilar.

TABELA 4.9 – Momento fletor na placa de base em uma faixa unitária na seção crítica.

Situação de carregamento	DeWolf (A) (kN.cm/cm)	Blodgett (kN.cm/cm)	Análise Numérica (B) (kN.cm/cm)	$\frac{B}{A} \times 100$
4	216,70	208,00	116,89	<b>54,0</b>

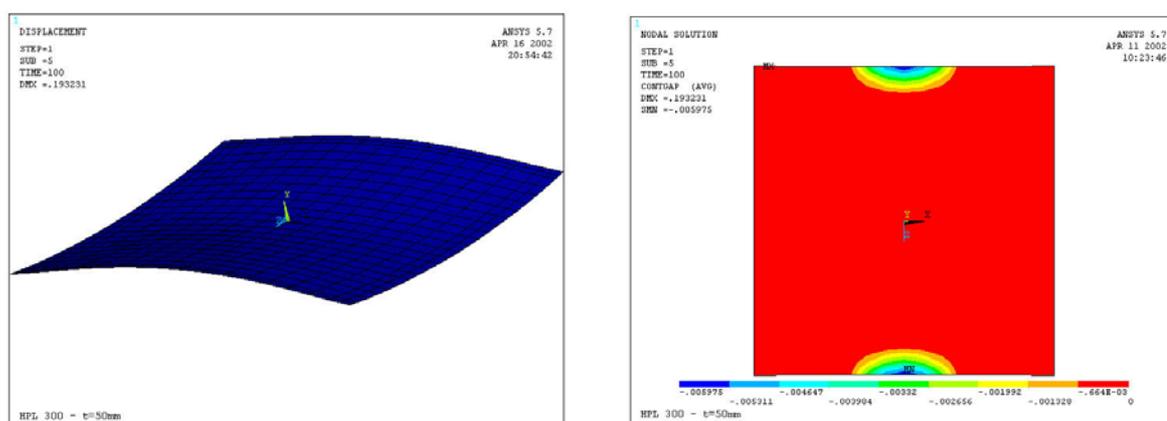
Com exceção dos chumbadores, por ter o mecanismo de ancoragem diferente, o comportamento deste modelo foi semelhante àquele com chumbador de gancho (modelo 01), desta forma, os comentários sobre a distribuição da tensão de contato, sobre a placa de base e sobre o força de tração nos chumbadores são também pertinentes neste modelo.

Como os chumbadores deste modelo são do tipo barra reta com porca embutida no concreto, a ancoragem é fornecida através destas porcas e não pelo atrito. Desta forma não há gradiente de tensão axial nos chumbadores, já que o uso das molas para simular a aderência entre aço e concreto não foi necessário. A tensão axial obtida nos chumbadores foi de 26,78 kN/cm<sup>2</sup> que fornece uma força de tração de 33,92 kN.

O deslocamento vertical máximo da placa de base foi de 1,07mm, um pouco maior que no modelo 01 (0,96mm). A deformação da região de contato entre as porcas imersas e o concreto e a ausência de molas ao longo do chumbador para simular a aderência aço-concreto pode justificar esta diferença.

### 4.2.3. Modelo 03 – Compressão axial

A configuração da condição deformada foi semelhante para as nove variações do modelo 03, havendo um pequeno descolamento da placa de base do bloco de concreto no centro das extremidades paralelas à alma do pilar. A FIG. 4.21a apresenta a condição deformada da placa de base para o modelo HPL 300 e seu descolamento é mostrado na FIG. 4.22b na qual a cor vermelha representa a região de contato entre a placa e o bloco e a cor azul escuro a região com maior descolamento.



(a) Condição deformada

(b) Descolamento - gap

FIGURA 4.22 – Placa de base do modelo HPL300.

A distribuição da tensão normal à superfície do bloco de concreto (SY) conseqüentemente, também foi semelhante nos nove modelos onde seu valor máximo está sempre na região do bloco sob o encontro das mesas a da alma do pilar metálico (representada pela cor azul escuro). A FIG. 4.23 apresenta tal distribuição e a TAB. 4.10 traz seus valores máximos.

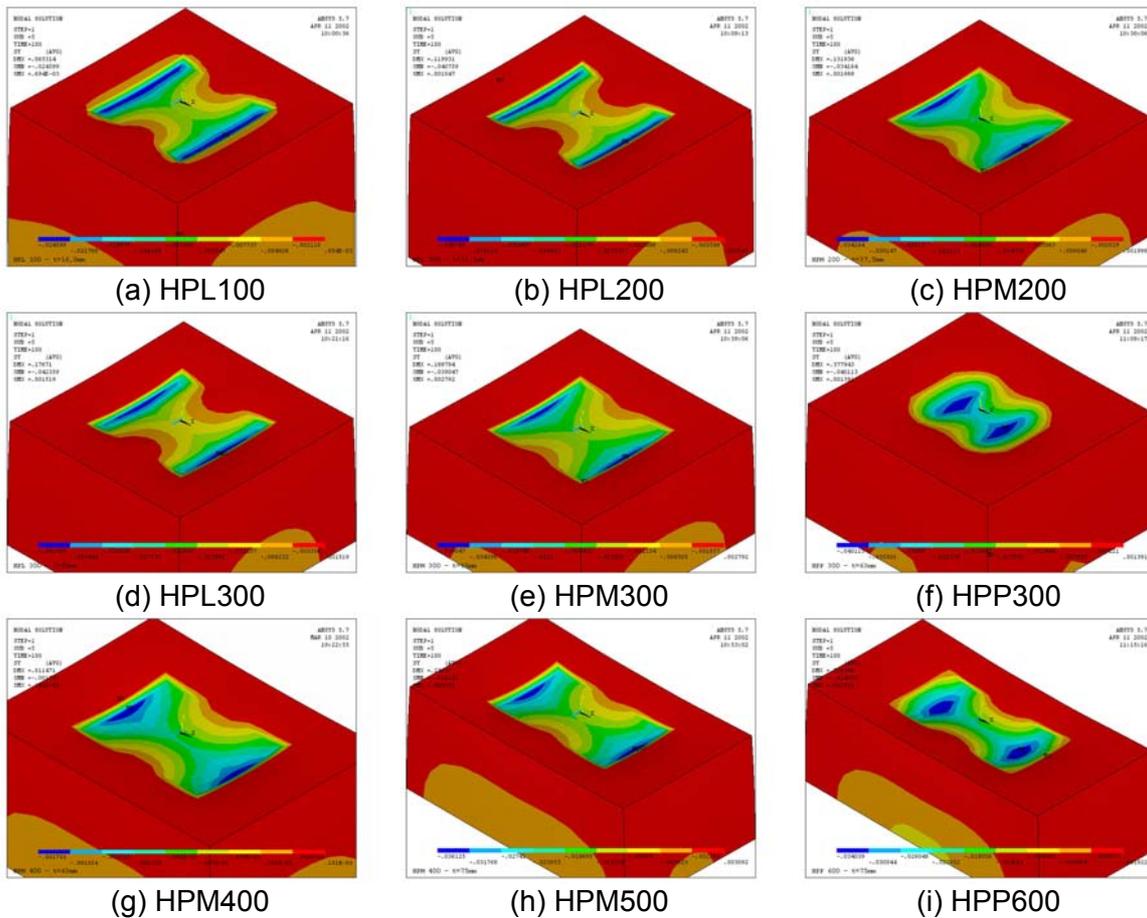


FIGURA 4.23 – Distribuição da tensão normal à superfície do bloco (SY).

TABELA 4.10 – Valor da máxima tensão normal à superfície do bloco (SY).

<b>Modelo</b>	<b>Tensão Máxima (kN/cm<sup>2</sup>)</b>
HPL100	2,46
HPL200	4,07
HPM200	3,41
HPL300	4,23
HPM300	3,90
HPP300	4,01
HPM400	3,54
HPM500	3,61
HPP600	3,40

Os valores da TAB. 4.10 estão acima da resistência à compressão do concreto adotada de 2 kN/cm<sup>2</sup>. Isso pode ser explicado pelo aumento da tensão de escoamento com o aumento da pressão de confinamento conforme o critério de Drucker-Prager adotado para o concreto.

A distribuição da tensão SX na placa de base é mostrada na FIG. 4.24. Seus valores máximos surgem sob as extremidades e centro das mesas do pilar. A distribuição da tensão SZ foi semelhante nos nove modelos, onde seu valor máximo está sempre na região central da mesa do pilar. Como exemplo tomou-se a placa de base do modelo HPM 300 (FIG. 4.25). Tomaram-se os valores das tensões SX nos pontos 4, 5, 6 e 7 da FIG. 4.26 e são mostrados na TAB. 4.11. Para os valores da tensão SZ tomaram-se os pontos 1, 2 e 3.

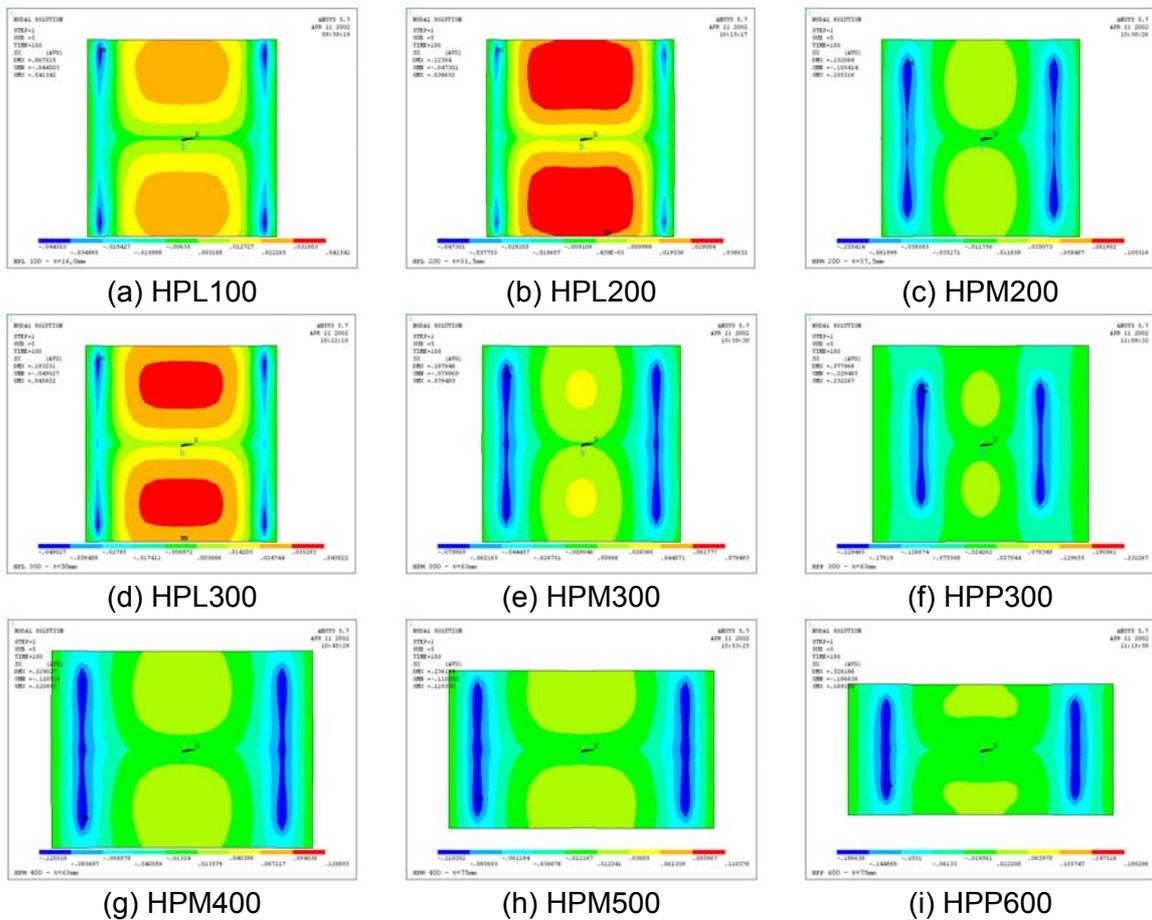


FIGURA 4.24 – Distribuição da tensão SX na placa de base.

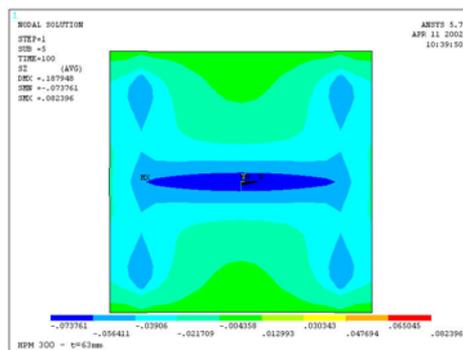


FIGURA 4.25 – Distribuição da tensão SZ na placa de base do modelo HPM 300.

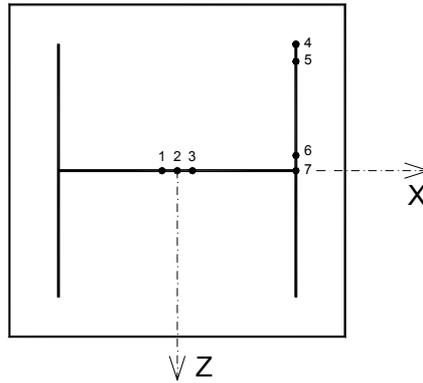


FIGURA 4.26 – Pontos da placa de base onde foram obtidas as tensões SX e SZ.

TABELA 4.11 – Tensões SX e SZ da placa de base.

<b>HPL 100</b>			<b>HPL 200</b>			<b>HPM 200</b>		
Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )	Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )	Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )
1	----	-6,35	1	----	-7,69	1	----	-8,70
2	----	-6,41	2	----	-7,90	2	----	-8,61
3	----	-6,35	3	----	-7,69	3	----	-8,70
4	-3,74	----	4	-3,31	----	4	-8,74	----
5	-4,45	----	5	-4,18	----	5	-10,54	----
6	-2,23	----	6	-2,27	----	6	-8,37	----
7	-2,40	----	7	-2,55	----	7	-8,85	----

<b>HPL 300</b>			<b>HPM 300</b>			<b>HPP 300</b>		
Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )	Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )	Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )
1	----	-7,70	1	----	-7,63	1	----	-13,92
2	----	-7,75	2	----	-7,64	2	----	-13,95
3	----	-7,70	3	----	-7,63	3	----	-13,95
4	-3,68	----	4	-6,44	----	4	-19,10	----
5	-4,84	----	5	-7,98	----	5	-23,21	----
6	-2,99	----	6	-6,91	----	6	-19,28	----
7	-3,22	----	7	-7,08	----	7	-19,59	----

<b>HPM 400</b>			<b>HPM 500</b>			<b>HPP 600</b>		
Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )	Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )	Pontos	SX (kN/cm <sup>2</sup> )	SZ (kN/cm <sup>2</sup> )
1	----	-9,59	1	----	-8,99	1	----	-13,10
2	----	-9,67	2	----	-9,02	2	----	-13,17
3	----	-9,59	3	----	-8,99	3	----	-13,10
4	-10,21	----	4	-9,55	----	4	-15,60	----
5	-12,08	----	5	-10,99	----	5	-18,62	----
6	-10,46	----	6	-10,07	----	6	-17,15	----
7	-10,80	----	7	-10,37	----	7	-17,53	----

Comparou-se entre os procedimentos teóricos e a análise numérica o valor do momento fletor máximo em uma faixa de largura unitária da placa de base. Este comparativo é apresentado na TAB. 4.12. Nos modelos HPL100 e HPL200 o momento máximo ocorreu no centro da alma do pilar, nos modelos restantes este valor foi detectado próximo às extremidades das mesas no ponto 5.

TABELA 4.12 – Momento fletor em uma faixa unitária da placa de base.

Modelo	DeWolf / Blodgett (A) (kN.cm/cm)	Análise Numérica (B) (kN.cm/cm)	$\frac{B}{A} \times 100$
HPL100	8.78	2.73	<b>25.9</b>
HPL200	6.38	13.06	<b>24.7</b>
HPM200	20.66	24.70	<b>40.1</b>
HPL300	18.42	32.29	<b>25.2</b>
HPM300	43.10	52.79	<b>36.7</b>
HPP300	168.42	153.53	<b>82.0</b>
HPM400	43.05	79.91	<b>39.8</b>
HPM500	39.84	103.03	<b>44.5</b>
HPP600	130.24	174.56	<b>55.8</b>

O valor do momento fletor apresentado na tabela acima, para os procedimentos teóricos, foi tomado na seção crítica conforme a FIG. 4.27, com exceção do modelo HPL100, onde se utilizou a teoria de Bases Levemente Carregadas de DeWolf & Richer (1990) que não se aplica aos modelos restantes devido a inconsistências matemáticas (raiz quadrada de número negativo) na determinação do valor da variável “c” (Eq. 2.6).

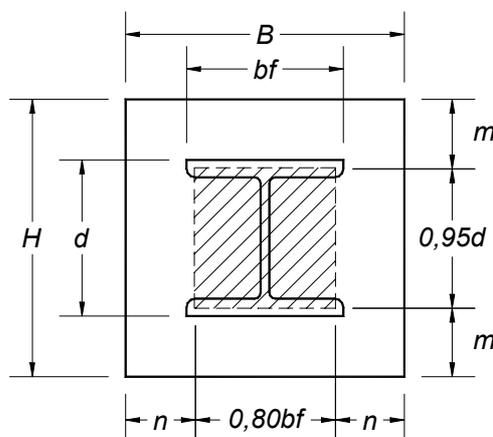


FIGURA 4.27 – Seção crítica.

De uma forma geral, os procedimentos de DeWolf & Richer (1990) e Blodgett (1966) apresentaram momentos abaixo dos encontrados na análise numérica, principalmente quando as dimensões da placa de base são mais próximas das dimensões externas do pilar. Quando isso acontece, o braço de alavanca que determina o momento fletor na placa de base é pequeno, tornando esses procedimentos poucos confiáveis uma vez que o momento fletor crítico se situa na região central da alma do pilar.

#### 4.2.4. Modelo 04 – Placa Levemente Carregada

Avaliou-se apenas, como resultado do modelo 04, o *status* do contato, se o mesmo se encontrava fechado ou aberto. A FIG. 4.28 apresenta estes resultados, onde o valor 2 (vermelho) da escala representa o contato fechado e o valor 1 (azul) o contato aberto.

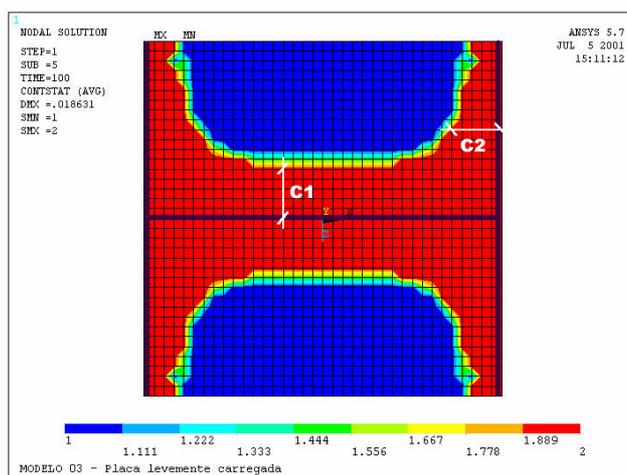


FIGURA 4.28 – Status do contato entre a placa de base e o bloco de concreto.

O valor obtido de “*c*” pelo procedimento de DeWolf & Richer (1990) foi de 69 mm para o perfil CS 300x62 (300x300x9,5x8,0) e uma carga de compressão de 1300 kN, enquanto na análise numérica obteve-se tanto para  $c_2$ , tomado a um quarto da largura da mesa, e como para  $c_1$  o valor de 42 mm. A hipótese de DeWolf & Richer (1990) de que a área de contato para esse tipo de base possui a forma de “*H*” foi confirmada pela análise numérica através da comparação da área de contato das figuras 4.28 (área vermelha) e 4.29 (área pontilhada).

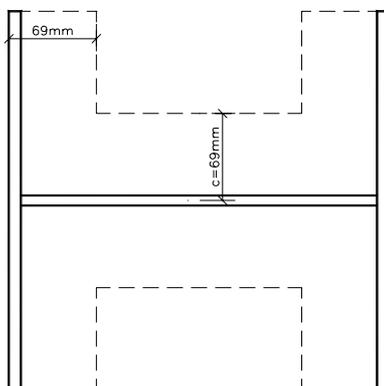


FIGURA 4.29 – Área de contato obtida pelo método de DeWolf & Richer (1990).

# 5

## **CONCLUSÕES**

A principal meta deste trabalho foi criar modelos, via método dos elementos finitos, que representassem o comportamento dos componentes da base de um pilar metálico: placa de base, chumbadores e bloco de concreto, e através dos resultados da análise numérica desses modelos, avaliar procedimentos de projeto normalmente usados na prática.

Inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica sobre os procedimentos de projetos mais utilizados para bases de pilares metálicos. Estes procedimentos foram apresentados no Capítulo 2. Criaram-se então modelos numéricos a partir dos resultados de simulações realizadas a partir destes procedimentos. Na análise numérica foram abordadas apenas as bases carregadas axialmente por uma força de compressão atuando ou não um momento fletor. Para a situação em que atua um momento fletor, criaram-se modelos abordando tanto chumbadores tipo gancho quanto do tipo barra reta com porca embutida do concreto.

Nos modelos 01 e 02, que tratam de bases carregadas por um força axial de compressão juntamente com um momento fletor, houve diferenças significativas entre seus resultados e dos procedimentos de DeWolf & Richer (1990) e Blodgett (1966), tanto para a placa de base quanto para os chumbadores. Uma possível

explicação para estas diferenças está na distribuição da tensão de contato entre a placa de base e o bloco de concreto. De acordo com procedimentos práticos, este contato ocorre uniformemente ao longo da largura da placa e varia linearmente, dependendo do valor do momento fletor, ao longo do comprimento tendo seu valor máximo na extremidade (FIG. 5.1). A análise numérica mostrou que a distribuição não possui esta configuração. As tensões máximas situam-se exatamente sob a(s) mesa(s) comprimida(s) do pilar com uma conformação aproximada em forma de parábola.

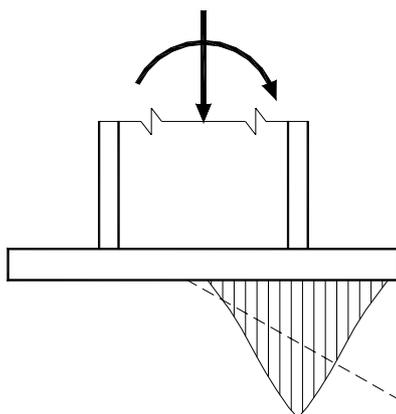


FIGURA 5.1 – Representação da distribuição da tensão de contato.

O momento fletor na placa de base em relação à face externa da mesa comprimida ficou cerca de 50 % menor na análise numérica em comparação com os procedimentos teóricos. A distribuição em forma de parábola reduz o momento fletor na placa já que sua resultante se encontra mais próxima da mesa.

A força de tração no chumbador, fornecida pela análise numérica, ficou acima de sua resistência de cálculo, enquanto de acordo com Blodgett (1966), o valor desta força foi 3 vezes menor que sua resistência de cálculo. Na situação de carregamento em que os chumbadores foram solicitados, houve uma concentração da tensão de contato, com valores máximos sob a mesa comprimida do pilar, fazendo com que a resultante desta tensão se aproximasse da linha dos chumbadores tracionados. Para que este sistema se equilibre, a resultante de tração nos chumbadores deve ser maior do que na distribuição adotada pelos procedimentos teóricos.

A força de tração nos chumbadores do tipo barra reta foi um pouco menor em relação ao outro modelo deste elemento (tipo gancho). A deformação da região de contato entre as porcas imersas e o concreto e a ausência de molas ao longo do chumbador para simular a aderência aço-concreto pode justificar esta diferença.

Desta forma, pode-se dizer com o que foi apresentado, que os procedimentos de DeWolf & Richer (1990) e Blodgett (1966) para bases carregadas axialmente com um momento fletor são conservadores com relação à placa de base e podem subdimensionar os chumbadores. Não houve diferenças significativas entre os procedimentos, apesar de apresentarem teorias diferentes a respeito das seções do contato entre a placa de base e o bloco de concreto.

Após a análise do modelo 01 para placas de base com grandes espessuras, ou seja, placas rígidas, observou-se que o valor da força de tração nos chumbadores diminui sensivelmente à medida que cresce a espessura da chapa, tendo sido observada uma tendência de estabilização (vide TAB. 4.7), salientando-se que o valor obtido com a aplicação do procedimento de Blodgett (1966) é da mesma ordem de grandeza obtido na análise numérica para a chapa com 200mm de espessura. A distribuição da tensão de contato, entre a placa de base e o bloco de concreto, também se aproximou da condição teórica. Isto mostra a influência da rigidez da placa de base na distribuição de esforços e que apesar das hipóteses dos procedimentos usuais sobre a distribuição da tensão de contato, considerando a placa rígida, não representarem a condição real deste elemento, seus resultados estão de acordo com suas hipóteses.

O procedimento para bases axialmente comprimidas de DeWolf & Richer (1990) e Blodgett (1966) apresentou valores para o momento fletor na placa de base menores quando comparados com os resultados numéricos, principalmente quando as dimensões da placa se aproximam das dimensões externas do pilar. Como o momento fletor é tomado na seção crítica (FIG. 5.2), o braço de alavanca para sua determinação torna-se muito reduzido, gerando valores muito elevados para o momento na placa não representativos de sua condição real. Desta forma,

estes procedimentos não são indicados nas situações em que as dimensões da placa de base são reduzidas.

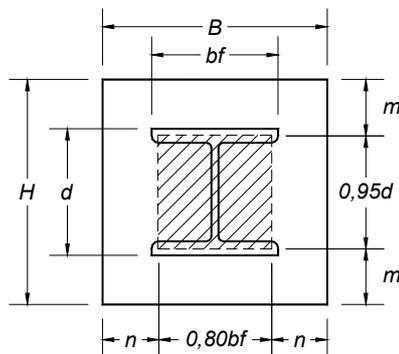


FIGURA 5.2 – Seção crítica.

A hipótese adotada por DeWolf & Richer (1990) de que o contato entre a placa de base e o bloco de concreto ocorra somente em uma faixa sob a alma e as mesas do pilar, para placas levemente carregadas (modelo 04), é válida mas conservadora, uma vez que o valor de “c” pelo procedimento teórico foi 64% maior do que o obtido na análise numérica. Este método é adequado somente a placas de base em que as dimensões estejam muito próximas das do pilar, caso contrário inconsistências matemáticas surgem na determinação do valor da variável “c”.

# 6

## ***SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS***

Inclusão da força horizontal para verificar a resistência dos chumbadores a este tipo de solicitação isolada e em conjunto com a tração;

Modelagem de bases com nervuras para verificar a sua influência no comportamento do conjunto da base de um pilar metálico;

Realização do mesmo estudo presente nesta dissertação utilizando-se outro tipo de seção para o pilar, como por exemplo perfis tubulares;

Utilização de outro tipo de elemento de contato para se saber sua influência no comportamento do modelo;

Estudo da influência dos chumbadores não solicitados na deformação do concreto na região comprimida do mesmo;

Elaboração de um novo procedimento de projeto para bases de pilares metálicos com base na curva momento rotação do conjunto pilar-placa de base, estabelecida através dos modelos numéricos.

## Referências

---

- AISC/ASD. *American Institute of Steel Construction*. Manual of Steel Construction, Allowable Stress Design, 8ª ed., 1989.
- AISC/LRFD. *American Institute of Steel Construction*. Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design, 2ª ed., 1994.
- BARBOSA, A. F. *Estudo de Modelos para Análise Não-Linear de Estruturas de Concreto pelo Método dos Elementos Finitos* (Tese de Mestrado). Escola de Engenharia de Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.
- BLODGETT, O. W. *Design of Welded Structures*. Cleveland, Ohio, 3.3:1-32, 1966.
- DEWOLF, J. T. *Axially Loaded Column Base Plates*. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 104, nº ST5, pp 781-794, 1978.
- DEWOLF, J. T. & SARISLEY, E. F. *Column Base Plates with Axial Loads and Moments*. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 106, nº ST11, pp 2167-2184, 1980.
- DEWOLF, J. T. & RICHER, D. T. *Column Base Plates, Steel Design Guides Series 1*, American Institute of Steel Construction, Chicago, 1990.
- FAKURY, R. H. *Notas de Aula do Curso de Mestrado*. Departamento de Estruturas, UFMG, 1995.
- FLING, R. S. *Design of Steel Bearing Plates*. Engineering Journal, AISC, Vol. 7, nº 2, 1970.
- MURRAY, T, M. *Design of Lightly Loaded Column Base Plates*. Engineering Journal, AISC, Vol. 20, nº 4 (Fourth Quarter), pp. 143-152, 1983.
- NBR 6118. *Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado*. ABNT, Rio de Janeiro, 1980.

NBR 8800. *Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios, Método dos Estados Limites*. ABNT, Rio de Janeiro, 1986.  
QUEIROZ, G. *Elementos das Estruturas de Aço*. 4ª edição, 1993.

SIDERBRÁS. *Galpões para Usos Gerais*. Publicações Técnica para o Desenvolvimento da Construção Metálica, Vol. 1, 1987

STOCKWELL, F, W. *Preliminary Base Plate Selection*. Engineering Journal, AISC, Vol. 12, nº 3 (Third Quarter), pp. 92-99, 1975.

Apresenta-se a seguir a entrada de dados para o programa Ansys 5.7 dos modelos gerados neste trabalho.

## **A.1 – Modelo 01 – Força normal de compressão com momento fletor – chumbador de gancho (situação 03).**

```
/COM, =====
/COM, ===== MODELO 01: 6 CHUMBADORES DE GANCHO =====
/COM, ===== COMPRESSÃO NORMAL + MOMENTO FLETOR =====
/COM,
/COM,
/COM, AUTOR:          Marcelo Melo Martins
/COM, ORIENTADOR:     Prof. Ricardo Hallal Fakury
/COM, CO-ORIENTADOR: Prof. Fernando Amorim de Paula
/COM,
/COM, OBSERVAÇÕES:   1 - Não utilizar o comando para comprimir a numeração de
/COM,                  qualquer entidade;
/COM,
/COM,                2 - Uso da simetria do modelo em relação ao plano XY;
/COM,
/COM,                3 - Unidade de comprimento = mm, unidade de força = kN.
/COM,
/COM,
/COM, ALTERACOES:   1 - Ec (2880 kN/cm²) e poisson (0.19) do concreto
/COM,
/COM,                2 - GAP igual à 25mm
/COM,
/COM,                3 - Elem. de viga entre placa e chumb. tracionado
/COM,
/COM,                4 - Ha apenas chumbadores tracionados
/COM,
/COM,                5 - Porcas na placa retiradas
/COM,
/COM,                6 - Molas na parte reta dos chumbadores
/COM,
/COM,                7 - Concreto c/ Drucker-Prager - Carregamento 3
/COM,
/COM, =====

/TITLE, MODELO C/ 6 CHUMB. DE GANCHO

/PLOPTS, LOGO, 0

KEYW, PR_STRUC, 1
/PMETH, OFF

/PREP7

/COM, TIPOS DE ELEMENTOS *****

ET, 1, SOLID45      ! BLOCO DE CONCRETO

ET, 2, BEAM4       ! CHUMBADORES (COMPRESSÃO e TRAÇÃO)

ET, 3, LINK10      ! LIGAÇÃO ENTRE PLACA E CHUMBADORES
```

```

ET,4,SHELL63      ! ELEMENTO CONVENCIONAL DA PLACA
                  ! ELEMENTO ENRIJECIDO DA PLACA (porcas)
                  ! PERFIL METÁLICO (alma)
                  ! PERFIL METÁLICO (mesas)

ET,5,CONTA173     ! ELEMENTOS DO CONTATO DA PLACA DE BASE

ET,6,TARGE170     ! ELEMENTOS DE CONTATO DO BLOCO DE CONCRETO

ET,7,COMBIN39     ! ELEMENTOS DE MOLA (CHUMBADORES E BLOCO)

/COM, DADOS GERAIS *****

! Carregamento
Nd      = -2280          !Força axial de compressão no pilar (kN)
Md      = 265500        !Momento fletor de cálculo no pilar (kN.mm)

! Constantes Geométricas
d       = 450           !Altura do perfil
tf      = 22.4          !Espessura das mesas do pilar
tw      = 12.5          !Espessura da alma do pilar
tp1     = 50            !Espessura da placa de base
tp2     = 500           !Espessura da placa na região das porcas
ap1     = 126.68        !Área do chumbador fora do plano de simetria
ap2     = ap1/2         !Área do chumbador no plano de simetria
Dch     = 12.7          !Diâmetro do chumbador (mm)
ex      = Md/Nd         !Excentricidade X da carga normal
Api     = 25230         !Área do perfil do pilar (mm²)
IZp     = 991670000     !Inércia em torno do eixo Z do modelo (mm4)
IXch    = (3.14159*Dch**4)/64 !Momento de inércia do chumbador

! Constantes Fisicas
Ea      = 205           !Módulo de elasticidade do aço (kN/mm²)
nua     = 0.3           !Coeficiente de Poisson do aço
Ec      = 28.8          !Módulo de elasticidade do concreto (kN/mm²)
nuc     = 0.19         !Coeficiente de Poisson do concreto

/COM, TIPOS DE MATERIAIS *****

UIMP,1,EX, , ,Ea,
UIMP,1,NUXY, , ,nua, ! Aço

UIMP,2,EX, , ,Ec,
UIMP,2,NUXY, , ,nuc, ! Concreto

UIMP,3,MU, , ,0,      ! Contato

TB,DP,2              ! Drucker-Prager
TBDATA,1,0.433012,0.0028867,0

/COM, CONSTANTES REAIS *****

R,1,ap1,IXch,IXch,Dch,Dch, ,          !Chumbadores internos
RMORE, ,IXch/100000, , , , ,

R,2,ap2,IXch/2,IXch/2,Dch/2,Dch/2, , !Chumbadores simetria
RMORE, ,IXch/200000, , , , ,

R,3,tp1, , , , , ,          !Placa convencional
RMORE, , , , ,

R,4,tp2, , , , , ,          !Placa - Porcas
RMORE, , , , ,

R,5,tw, , , , , ,          !Alma do pilar
RMORE, , , , ,

R,6,tf, , , , , ,          !Mesa do pilar
RMORE, , , , ,

```

```

R,7, , ,250,0.1,-25.001, , !Contato entre placa e bloco
RMORE, , , , , ,

R,8,ap1, !Contato placa-chumb interno

R,9,ap2, !Contato placa-chumb simetria

DEF = 0.1
FORCA = 2.833

R,10,-1,-0.75,-DEF,-FORCA/4,0,0 ! MOLA1 - PRIMEIRA (SIMETRIA)
RMORE,DEF,FORCA/4,1,0.75

R,11,-1,-1.5,-DEF,-FORCA/2,0,0 ! MOLA1 - OUTRAS (SIMETRIA)
RMORE,DEF,FORCA/2,1,1.5

R,12,-1,-1.5,-DEF,-FORCA/2,0,0 ! MOLA2 - PRIMEIRA (INTERNO)
RMORE,DEF,FORCA/2,1,1.5

R,13,-1,-3,-DEF,-FORCA,0,0 ! MOLA2 - OUTRAS (INTERNO)
RMORE,DEF,FORCA,1,3

/COM, KEYPOINTS DO PLANO PRINCIPAL*****

/AUTO,1
/REP

K,1,-800,0,0
K,2,-580,0,0
K,3,-395,0,0
K,4,-310,0,0
K,5,-250,0,0
K,6,-190,0,0
K,7,-105,0,0
K,8,0,0,0
K,9,-800,-60,0
K,10,-580,-60,0
K,11,-395,-60,0
K,12,-310,-60,0
K,13,-250,-60,0
K,14,-190,-60,0
K,15,-105,-60,0
K,16,0,-60,0
K,17,-800,-235,0
K,18,-580,-235,0
K,19,-395,-235,0
K,20,-310,-235,0
K,21,-250,-235,0
K,22,-190,-235,0
K,23,-105,-235,0
K,24,0,-235,0
K,25,-250,-370,0
K,26,-800,-430,0
K,27,-580,-430,0
K,28,-395,-430,0
K,29,-310,-430,0
K,30,-250,-410,0
K,31,-190,-430,0
K,32,-105,-430,0
K,33,0,-430,0
K,34,-800,-470,0
K,35,-580,-470,0
K,36,-395,-470,0
K,37,-310,-470,0
K,38,-250,-470,0
K,39,-190,-470,0
K,40,-105,-470,0
K,41,0,-470,0
K,42,-292.43,-512.43,0
K,43,-250,-530,0
K,44,-207.57,-512.43,0
K,45,-352.53,-572.53,0
K,46,-250,-615,0
K,47,-147.47,-572.53,0
K,48,-800,-800,0

```

K, 49, -580, -800, 0  
K, 50, -250, -800, 0  
K, 51, 0, -800, 0

KPLOT

/COM, LINHAS DO PLANO PRINCIPAL \*\*\*\*\*

LSTR, 1, 2  
LSTR, 2, 3  
LSTR, 3, 4  
LSTR, 4, 5  
LSTR, 5, 6  
LSTR, 6, 7  
LSTR, 7, 8  
LSTR, 9, 10  
LSTR, 10, 11  
LSTR, 11, 12 !\* LINHA 10  
LSTR, 12, 13  
LSTR, 13, 14  
LSTR, 14, 15  
LSTR, 15, 16  
LSTR, 17, 18  
LSTR, 18, 19  
LSTR, 19, 20  
LSTR, 20, 21  
LSTR, 21, 22  
LSTR, 22, 23 !\* LINHA 20  
LSTR, 23, 24  
LSTR, 26, 27  
LSTR, 27, 28  
LSTR, 28, 29  
LSTR, 29, 25  
LSTR, 25, 31  
LSTR, 31, 32  
LSTR, 32, 33  
LSTR, 34, 35  
LSTR, 35, 36 !\* LINHA 30  
LSTR, 36, 37  
LSTR, 37, 30  
LSTR, 30, 39  
LSTR, 39, 40  
LSTR, 40, 41  
LSTR, 48, 49  
LSTR, 49, 50  
LSTR, 50, 51  
LSTR, 1, 9  
LSTR, 9, 17 !\* LINHA 40  
LSTR, 17, 26  
LSTR, 26, 34  
LSTR, 34, 48  
LSTR, 2, 10  
LSTR, 10, 18  
LSTR, 18, 27  
LSTR, 27, 35  
LSTR, 35, 49  
LSTR, 3, 11  
LSTR, 11, 19 !\* LINHA 50  
LSTR, 19, 28  
LSTR, 28, 36  
LSTR, 4, 12  
LSTR, 12, 20  
LSTR, 20, 29  
LSTR, 29, 37  
LSTR, 5, 13  
LSTR, 13, 21  
LSTR, 21, 25  
LSTR, 25, 30 !\* LINHA 60  
LSTR, 30, 38  
LSTR, 43, 46  
LSTR, 46, 50  
LSTR, 6, 14  
LSTR, 14, 22  
LSTR, 22, 31  
LSTR, 31, 39  
LSTR, 7, 15

```

LSTR,15,23
LSTR,23,32   !* LINHA 70
LSTR,32,40
LSTR,8,16
LSTR,16,24
LSTR,24,33
LSTR,33,41
LSTR,41,51
LSTR,38,42
LSTR,42,45
LSTR,45,49
LSTR,38,44   !* LINHA 80
LSTR,44,47
LSTR,47,51
larc,37,42,38,60
larc,42,43,38,60
larc,43,44,38,60
larc,44,39,38,60
larc,36,45,38,145
larc,45,46,38,145
larc,46,47,38,145
larc,47,40,38,145   !* LINHA 90

```

```

/COM, ÁREAS DO PLANO PRINCIPAL *****

```

```

AL,1,39,8,44   !* ÁREA 1
AL,2,44,9,49
AL,3,49,10,53
AL,4,53,11,57
AL,5,57,12,64
AL,6,64,13,68
AL,7,68,14,72
AL,8,40,15,45
AL,9,45,16,50
AL,10,50,17,54 !* ÁREA 10
AL,11,54,18,58
AL,12,58,19,65
AL,13,65,20,69
AL,14,69,21,73
AL,15,41,22,46
AL,16,46,23,51
AL,17,51,24,55
AL,18,55,25,59
AL,19,59,26,66
AL,20,66,27,70 !* ÁREA 20
AL,21,70,28,74
AL,22,42,29,47
AL,23,47,30,52
AL,24,52,31,56
AL,25,56,32,60
AL,26,60,33,67
AL,27,67,34,71
AL,28,71,35,75
AL,29,43,36,48
AL,30,48,79,87 !* ÁREA 30
AL,31,87,78,83
AL,32,83,77,61
AL,33,61,80,86
AL,34,86,81,90
AL,35,90,82,76
AL,88,79,37,63
AL,84,78,88,62
AL,80,77,84,85
AL,85,62,89,81
AL,89,63,38,82 !* ÁREA 40

```

```

/COM, DIVISÃO DAS LINHAS DO PLANO PRINCIPAL *****

```

```

LSEL,S,LINE,,1,38
LESIZE,ALL,,3,,
ALLSEL,ALL
LSEL,ALL

```

```

LESIZE,39,,2,,,,
LESIZE,44,,2,,,,
LESIZE,49,,2,,,,
LESIZE,53,,2,,,,
LESIZE,57,,2,,,,
LESIZE,64,,2,,,,
LESIZE,68,,2,,,,
LESIZE,72,,2,,,,
LESIZE,40,,5,,,,
LESIZE,45,,5,,,,
LESIZE,50,,5,,,,
LESIZE,54,,5,,,,
LESIZE,58,,5,,,,
LESIZE,65,,5,,,,
LESIZE,69,,5,,,,
LESIZE,73,,5,,,,
LESIZE,41,,6,,,,
LESIZE,46,,6,,,,
LESIZE,51,,6,,,,
LESIZE,55,,6,,,,
LESIZE,59,,6,,,,
LESIZE,66,,6,,,,
LESIZE,70,,6,,,,
LESIZE,74,,6,,,,
LESIZE,42,,2,,,,
LESIZE,47,,2,,,,
LESIZE,52,,2,,,,
LESIZE,56,,2,,,,
LESIZE,60,,2,,,,
LESIZE,67,,2,,,,
LESIZE,71,,2,,,,
LESIZE,75,,2,,,,
LESIZE,43,,3,,,,
LESIZE,48,,3,,,,
LESIZE,87,,3,,,,
LESIZE,83,,3,,,,
LESIZE,61,,3,,,,
LESIZE,86,,3,,,,
LESIZE,90,,3,,,,
LESIZE,76,,3,,,,
LESIZE,62,,3,,,,
LESIZE,63,,3,,,,
LESIZE,77,,3,,,,
LESIZE,78,,3,,,,
LESIZE,79,,3,,,,
LESIZE,80,,3,,,,
LESIZE,81,,3,,,,
LESIZE,82,,3,,,,
LESIZE,84,,3,,,,
LESIZE,85,,3,,,,
LESIZE,88,,3,,,,
LESIZE,89,,3,,,,

```

```

/COM, SÓLIDOS (EXTRUDE) *****

```

```

/VIEW,1,0.47,0.264,0.842
/ANG,1
/REP,FAST

VEXT,ALL,, , , ,160, , ,

ASEL,S,LOC,Z,160
VEXT,ALL,, , , ,85, , ,

ASEL,S,LOC,Z,245
VEXT,ALL,, , , ,255, , ,

ALLSEL,ALL
/REP,FAST

```

```

/COM, DIVISÃO DAS LINHAS CRIADAS PELO EXTRUDE *****

```

```

LSEL,S,LOC,Z,80
LPLOT
LESIZE,ALL,,7,,,,

LSEL,S,LOC,Z,202.5
LPLOT
LESIZE,ALL,,3,,,,

LSEL,S,LOC,Z,372.5
LPLOT
LESIZE,ALL,,4,,,,

ALLSEL,ALL
VPLOT

/COM, GERAÇÃO DA MALHA DA 1ª METADE DO BLOCO DE CONCRETO *****

TYPE,1,
MAT,2,

MSHKEY,1
VMESH,ALL

/COM, ESPELHO DA METADE DO BLOCO E "MERGE" *****

VSYMM,X,ALL,,0,0
VPLOT
NUMMRG,NODE,,
NUMMRG,KP,,

/COM, CHUMBADORES *****

KPLOT
ERASE
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP

! X(-) E Z = 0 *****

K,410,-310.0000,0.0000000,0.0000000
K,411,-310.0000,-60.00000,0.0000000
K,412,-310.0000,-235.0000,0.0000000
K,413,-310.0000,-430.0000,0.0000000
K,414,-310.0000,-470.0000,0.0000000
K,415,-292.4300,-512.4300,0.0000000
K,416,-250.0000,-530.0000,0.0000000
K,417,-207.5700,-512.4300,0.0000000
K,418,-190.0000,-470.0000,0.0000000
K,419,-190.0000,-430.0000,0.0000000

! X(-) E Z = 160 *****

K,420,-310.0000,0.0000000,160.0000
K,421,-310.0000,-60.00000,160.0000
K,422,-310.0000,-235.0000,160.0000
K,423,-310.0000,-430.0000,160.0000
K,424,-310.0000,-470.0000,160.0000
K,425,-292.4300,-512.4300,160.0000
K,426,-250.0000,-530.0000,160.0000
K,427,-207.5700,-512.4300,160.0000
K,428,-190.0000,-470.0000,160.0000
K,429,-190.0000,-430.0000,160.0000

! X(+) E Z = 0 *****

K,430,310.0000,0.0000000,0.0000000
K,431,310.0000,-60.00000,0.0000000

```

```

K,432,310.0000,-235.0000,0.0000000
K,433,310.0000,-430.0000,0.0000000
K,434,310.0000,-470.0000,0.0000000
K,435,292.4300,-512.4300,0.0000000
K,436,250.0000,-530.0000,0.0000000
K,437,207.5700,-512.4300,0.0000000
K,438,190.0000,-470.0000,0.0000000
K,439,190.0000,-430.0000,0.0000000

! X(+) E Z = 160 *****

K,440,310.0000,0.0000000,160.0000
K,441,310.0000,-60.00000,160.0000
K,442,310.0000,-235.0000,160.0000
K,443,310.0000,-430.0000,160.0000
K,444,310.0000,-470.0000,160.0000
K,445,292.4300,-512.4300,160.0000
K,446,250.0000,-530.0000,160.0000
K,447,207.5700,-512.4300,160.0000
K,448,190.0000,-470.0000,160.0000
K,449,190.0000,-430.0000,160.0000

! KEYPOINTS DA PLACA *****

K,450,-395,25,0
K,451,-330,25,0
K,452,-310,25,0 ! CHUMBADOR(X- e Z=0)
K,453,-290,25,0
K,454,-250,25,0
K,455,-213.8,25,0
K,456,-105,25,0
K,457,0,25,0
K,458,105,25,0
K,459,213.8,25,0
K,460,250,25,0
K,461,290,25,0
K,462,310,25,0 ! CHUMBADOR(X+ e Z=0)
K,463,330,25,0
K,464,395,25,0

KSEL,S,KP, ,450,464
KGEN,2,ALL, , , ,20,15,0,0
KSEL,S,KP, ,465,479
KGEN,2,ALL, , , ,120,15,0,0
KSEL,S,KP, ,480,494
KGEN,2,ALL, , , ,20,15,0,0
KSEL,S,KP, ,495,509
KGEN,2,ALL, , , ,20,15,0,0
KSEL,S,KP, ,510,524
KGEN,2,ALL, , , ,45,15,0,0
KSEL,S,KP, ,525,539
KGEN,2,ALL, , , ,20,15,0,0

KSEL,S,KP, ,410,554
KPLOT
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO, 1
/REP

! LINHAS*****

NUMSTR,LINE,1050,
! INICIA A NUMERAÇÃO DAS NOVAS LINHAS EM 1050

LSTR,410,411 ! LINHA 1050
LSTR,411,412
LSTR,412,413
LSTR,413,414
LARC,414,415,419,60
LARC,415,416,419,60
LARC,416,417,413,60
LARC,417,418,413,60
LSTR,418,419

LSTR,420,421 ! LINHA 1059

```

```

LSTR,421,422
LSTR,422,423
LSTR,423,424
LARC,424,425,429,60
LARC,425,426,429,60
LARC,426,427,423,60
LARC,427,428,423,60
LSTR,428,429

LSTR,430,431 ! LINHA 1068
LSTR,431,432
LSTR,432,433
LSTR,433,434
LARC,434,435,439,60
LARC,435,436,439,60
LARC,436,437,433,60
LARC,437,438,433,60
LSTR,438,439

LSTR,440,441 ! LINHA 1077
LSTR,441,442
LSTR,442,443
LSTR,443,444
LARC,444,445,449,60
LARC,445,446,449,60
LARC,446,447,443,60
LARC,447,448,443,60
LSTR,448,449

```

/COM, DIVISÃO DAS LINHAS DOS CHUMBADORES \*\*\*\*\*

```

LSEL,S,LINE,,1050,1085
LESIZE,ALL,,3,,

LESIZE,1050,,2,,
LESIZE,1059,,2,,
LESIZE,1068,,2,,
LESIZE,1077,,2,,
LESIZE,1051,,5,,
LESIZE,1060,,5,,
LESIZE,1069,,5,,
LESIZE,1078,,5,,
LESIZE,1052,,6,,
LESIZE,1061,,6,,
LESIZE,1070,,6,,
LESIZE,1079,,6,,
LESIZE,1053,,2,,
LESIZE,1058,,2,,
LESIZE,1062,,2,,
LESIZE,1067,,2,,
LESIZE,1071,,2,,
LESIZE,1076,,2,,
LESIZE,1080,,2,,
LESIZE,1085,,2,,

```

CM,LCHUMB,LINE ! CRIA UM BLOCO C/ AS LINHAS DOS CHUMBADORES

```

/AUTO, 1
/REP
LPLOT

```

/COM, GERAÇÃO DA MALHA DOS CHUMBADORES \*\*\*\*\*

```

TYPE,2,
MAT,1,
REAL,1,

LSEL,S,LINE,,1059,1067 ! Chumb. tracionados
MSHKEY,1
LMESH,ALL

TYPE,2, ! CHUMBADORES DO PLANO DE SIMETRIA
MAT,1,

```

```

REAL, 2,

LSEL,S,LINE, ,1050,1058          ! Chumb. tracionados
MSHKEY,1
LMESH,ALL

/COM, COMPONENTE DOS NÓS E ELEMENTOS DA PROJEÇÃO DA PLACA NO BLOCO *****

ESEL,S,TYPE,,1
NSLE,S
NPLOT
NSEL,R,LOC,Y,0
/REPLOT
NSEL,R,LOC,X,-460,460
/REPLOT
NSEL,R,LOC,Z,0,310
/REPLOT
CM,TARGET,NODE

ESLN,R
EPLOT
CM,E TARGET,ELEM
ALLSEL,ALL

/COM, LINHAS DA PLACA DE BASE *****

KSEL,S,KP, ,410,554
KPLOT
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO, 1
/REP

! LINHAS NA DIREÇÃO DE "X"
I = 450
*DO,K,1,7
  L,I,(I+1),3, , , , , ,
  I = I + 15
*ENDDO
I = 451
*DO,K,1,7
  L,I,(I+1),1, , , , , ,
  I = I + 15
*ENDDO
I = 452
*DO,K,1,7
  L,I,(I+1),1, , , , , ,
  I = I + 15
*ENDDO
I = 453
*DO,K,1,7
  L,I,(I+1),2, , , , , ,
  I = I + 15
*ENDDO
I = 454
*DO,K,1,7
  L,I,(I+1),3, , , , , ,
  I = I + 15
*ENDDO
I = 455
*DO,K,1,7
  L,I,(I+1),4, , , , , ,
  I = I + 15
*ENDDO
I = 456
*DO,K,1,7
  L,I,(I+1),3, , , , , ,
  I = I + 15
*ENDDO
I = 457
*DO,K,1,7
  L,I,(I+1),3, , , , , ,

```

```

I = I + 15
*ENDDO
I = 458
*DO,K,1,7
L,I,(I+1),4, , , , , ,
I = I + 15
*ENDDO
I = 459
*DO,K,1,7
L,I,(I+1),3, , , , , ,
I = I + 15
*ENDDO
I = 460
*DO,K,1,7
L,I,(I+1),2, , , , , ,
I = I + 15
*ENDDO
I = 461
*DO,K,1,7
L,I,(I+1),1, , , , , ,
I = I + 15
*ENDDO
I = 462
*DO,K,1,7
L,I,(I+1),1, , , , , ,
I = I + 15
*ENDDO
I = 463
*DO,K,1,7
L,I,(I+1),3, , , , , ,
I = I + 15
*ENDDO

```

```

! LINHAS NA DIREÇÃO DE "Z"
I = 450
*DO,K,1,15
L,I,(I+15),1, , , , , ,
I = I + 1
*ENDDO
I = 465
*DO,K,1,15
L,I,(I+15),5, , , , , ,
I = I + 1
*ENDDO
I = 480
*DO,K,1,15
L,I,(I+15),1, , , , , ,
I = I + 1
*ENDDO
I = 495
*DO,K,1,15
L,I,(I+15),1, , , , , ,
I = I + 1
*ENDDO
I = 510
*DO,K,1,15
L,I,(I+15),2, , , , , ,
I = I + 1
*ENDDO
I = 525
*DO,K,1,15
L,I,(I+15),1, , , , , ,
I = I + 1
*ENDDO

```

/COM, AREAS DA PLACA DE BASE \*\*\*\*\*

NUMSTR,AREA,870,

```

F = 99
H = 98
I = 1086
*DO,K,1,14
AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)

```

```
I = I + 7
F = F - 6
H = H - 6
*ENDDO
```

```
F = 113
H = 112
I = 1087
*DO,K,1,14
  AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)
  I = I + 7
  F = F - 6
  H = H - 6
*ENDDO
```

```
F = 127
H = 126
I = 1088
*DO,K,1,14
  AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)
  I = I + 7
  F = F - 6
  H = H - 6
*ENDDO
```

```
F = 141
H = 140
I = 1089
*DO,K,1,14
  AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)
  I = I + 7
  F = F - 6
  H = H - 6
*ENDDO
```

```
F = 155
H = 154
I = 1090
*DO,K,1,14
  AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)
  I = I + 7
  F = F - 6
  H = H - 6
*ENDDO
```

```
F = 169
H = 168
I = 1091
*DO,K,1,14
  AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)
  I = I + 7
  F = F - 6
  H = H - 6
*ENDDO
```

```
KSEL,S,KP, ,410,554
LSLK,S,1
LPLOT
```

```
/COM, GERAÇÃO DA MALHA DA PLACA DE BASE *****
```

```
ASEL,S,AREA, ,870,953
```

```
TYPE,4,
MAT,1,
REAL,3,
```

```
MSHKEY,1
AMESH,ALL
ASEL,S,AREA, ,870,953
```

```
/COM, COMPONENTE C/ O NÓS DA PLACA *****
```

```
ESEL,S,REAL,,3,4
NSLE,S
CM,CONTACT,NODE
```

```
/COM, TOPO DO PERFIL METÁLICO *****
```

```
K,555,-213.8,525,225
K,556,-213.8,525,180
K,557,-213.8,525,160
K,558,-213.8,525,140
K,559,-213.8,525,20
K,560,-213.8,525,0
K,561,-105,525,0
K,562,0,525,0
K,563,105,525,0
K,564,213.8,525,0
K,565,213.8,525,20
K,566,213.8,525,140
K,567,213.8,525,160
K,568,213.8,525,180
K,569,213.8,525,225
KPLOT
/AUTO, 1
/REP
```

```
I = 555
*DO,K,1,14
  LSTR,I,(I+1)
  I = I + 1
*ENDDO
```

```
LESIZE,1274,,2,,
LESIZE,1275,,1,,
LESIZE,1276,,1,,
LESIZE,1277,,5,,
LESIZE,1278,,1,,
LESIZE,1279,,4,,
LESIZE,1280,,3,,
LESIZE,1281,,3,,
LESIZE,1282,,4,,
LESIZE,1283,,1,,
LESIZE,1284,,5,,
LESIZE,1285,,1,,
LESIZE,1286,,1,,
LESIZE,1287,,2,,
```

```
L,530,555,16,2,,
L,515,556,16,2,,
L,500,557,16,2,,
L,485,558,16,2,,
L,470,559,16,2,,
L,455,560,16,2,,
L,456,561,16,2,,
L,457,562,16,2,,
L,458,563,16,2,,
L,459,564,16,2,,
L,474,565,16,2,,
L,489,566,16,2,,
L,504,567,16,2,,
L,519,568,16,2,,
L,534,569,16,2,,
```

```
AL,1274,1289,1249,1288
AL,1275,1290,1234,1289
AL,1276,1291,1219,1290
AL,1277,1292,1204,1291
AL,1278,1293,1189,1292
AL,1279,1294,1121,1293
AL,1280,1295,1128,1294
AL,1281,1296,1135,1295
AL,1282,1297,1142,1296
AL,1283,1298,1193,1297
AL,1284,1299,1208,1298
AL,1285,1300,1223,1299
AL,1286,1301,1238,1300
```

AL,1287,1302,1253,1301

! Malha de uma Mesa do pilar

TYPE,4,  
MAT,1,  
REAL,6,  
  
ASEL,S,LOC,Y,275  
ASEL,R,LOC,X,-213.8  
MSHKEY,1  
AMESH,ALL

! Malha da outra Mesa do pilar

TYPE,4,  
MAT,1,  
REAL,6,  
  
ASEL,S,LOC,Y,275  
ASEL,R,LOC,X,213.8  
MSHKEY,1  
AMESH,ALL

! Malha da Alma do pilar

TYPE,4,  
MAT,1,  
REAL,5,  
  
ASEL,S,LOC,Y,275  
ASEL,R,LOC,Z,0  
MSHKEY,1  
AMESH,ALL

ALLSEL,ALL  
EPLOT  
/NUMBER,1  
/PNUM,TYPE,1  
/REPLOT

/COM, ELEMENTOS DE LIGAÇÃO ENTRE A PLACA E OS CHUMBADORES \*\*\*\*\*

L,452,410,1, , , , , , ,  
L,497,420,1, , , , , , ,  
L,462,430,1, , , , , , ,  
L,507,440,1, , , , , , ,

LPLOT  
/AUTO,1  
/REP

! Chumbadores tracionados (elementos de viga)

MAT,1,  
TYPE,2,  
REAL,2,  
  
LSEL,S,LOC,Y,12.5  
LSEL,R,LOC,Z,0  
LSEL,R,LOC,X,-310  
MSHKEY,1  
LMESH,ALL

MAT,1,  
TYPE,2,  
REAL,1,

LSEL,S,LOC,Y,12.5  
LSEL,R,LOC,Z,160  
LSEL,R,LOC,X,-310  
MSHKEY,1  
LMESH,ALL

```

/COM, CONTATO PLACA DE BASE E BLOCO DE FUNDAÇÃO *****

MAT,3,
TYPE,6,          ! TARGE170 (TARGET)
REAL,7,

!GCGEN,CONTACT,TARGET,5, , ,

KSEL,ALL
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,X,-580,580
LSLK,S,1
ASLL,S,1
APLOT
AMESH,ALL

MAT,3,
TYPE,5,          ! CONTA173 (CONTACT)
REAL,7,

CMSEL,S,CONTACT
NPLOT
ESURF,,BOTTOM

ESEL,S,TYPE,,5,6
/REPLOT
ESURF,,REVE

/COM, MOLAS *****

KEYOPT,7,3,2          !(deslocamento das molas somente na direção Y global)

NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,0,-800
NSEL,R,LOC,X,-310
NSEL,R,LOC,Z,0
NSEL,R,LOC,Y,0,-400
NPLOT
CM,CHUMB1,NODE          !(SIMETRIA)

NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Y,0,-800
NSEL,R,LOC,X,-310
NSEL,R,LOC,Z,160
NSEL,R,LOC,Y,0,-400
NPLOT
CM,CHUMB2,NODE          !(INTERNO)

TYPE,7,          ! (PRIMEIRA MOLA, SIMETRIA)
REAL,10,

CMSEL,S,CHUMB1
NSEL,R,LOC,Y,0
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO

TYPE,7,          ! (DEMAIS MOLAS, SIMETRIA)
REAL,11,

CMSEL,S,CHUMB1
NSEL,R,LOC,Y,-30
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO

CMSEL,S,CHUMB1

```

```

NSEL,R,LOC,Y,-60
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO

CMSEL,S,CHUMB1
NSEL,R,LOC,Y,-95
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO

CMSEL,S,CHUMB1
NSEL,R,LOC,Y,-130
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO

CMSEL,S,CHUMB1
NSEL,R,LOC,Y,-165
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO

CMSEL,S,CHUMB1
NSEL,R,LOC,Y,-200
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO

CMSEL,S,CHUMB1
NSEL,R,LOC,Y,-235
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO

CMSEL,S,CHUMB1
NSEL,R,LOC,Y,-267.5
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO

CMSEL,S,CHUMB1
NSEL,R,LOC,Y,-300
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO

CMSEL,S,CHUMB1
NSEL,R,LOC,Y,-332.5
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO

CMSEL,S,CHUMB1
NSEL,R,LOC,Y,-365
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO

CMSEL,S,CHUMB1
NSEL,R,LOC,Y,-397.5
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO

```

```
TYPE,7,          ! (PRIMEIRA MOLA, INTERNO)
REAL,12,
```

```
CMSEL,S,CHUMB2
NSEL,R,LOC,Y,0
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO
```

```
TYPE,7,          ! (DEMAIS MOLAS, SIMETRIA)
REAL,13,
```

```
CMSEL,S,CHUMB2
NSEL,R,LOC,Y,-30
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO
```

```
CMSEL,S,CHUMB2
NSEL,R,LOC,Y,-60
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO
```

```
CMSEL,S,CHUMB2
NSEL,R,LOC,Y,-95
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO
```

```
CMSEL,S,CHUMB2
NSEL,R,LOC,Y,-130
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO
```

```
CMSEL,S,CHUMB2
NSEL,R,LOC,Y,-165
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO
```

```
CMSEL,S,CHUMB2
NSEL,R,LOC,Y,-200
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO
```

```
CMSEL,S,CHUMB2
NSEL,R,LOC,Y,-235
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO
```

```
CMSEL,S,CHUMB2
NSEL,R,LOC,Y,-267.5
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO
```

```
CMSEL,S,CHUMB2
NSEL,R,LOC,Y,-300
*GET,MAXIMO,NODE,0,NUM,MAX, ,
*GET,MINIMO,NODE,0,NUM,MIN, ,

E,MINIMO,MAXIMO
```



```

/COM, CARREGAMENTO *****

! 100 % do carregamento #####

Md_aux = 1.0*Md
Nd_aux = 1.0*Nd

y      = D - tf
Syf1   = (Nd_aux/Api+(Md_aux/IZp)*(y/2))*tf      !Tensão mesa esquerda
Syf2   = (Nd_aux/Api-(Md_aux/IZp)*(y/2))*tf      !Tensão mesa direita
Syf1   = -Syf1
Syf2   = -Syf2

Syw1   = (Nd_aux/Api+(Md_aux/IZp)*(y/2))*(tw/2)  !Tensão no lado esquerdo da alma
Syw2   = (Nd_aux/Api-(Md_aux/IZp)*(y/2))*(tw/2)  !Tensão no lado direito da alma
Syw1   = -Syw1
Syw2   = -Syw2

! Pressão nas mesas

LSEL,S,LOC,Y,525
LSEL,R,LOC,X,-213.8
SFL,ALL,PRES,Syf1, ,

LSEL,S,LOC,Y,525
LSEL,R,LOC,X,213.8
SFL,ALL,PRES,Syf2, ,

! Pressão na alma

LSEL,S,LOC,Y,525

Sy1    = Syw1
Sy2    = (108.8/y)*(Syw2-Syw1)+Syw1
SFL,1279,PRES,Sy1,Sy2,

Sy1    = Sy2
Sy2    = (213.8/y)*(Syw2-Syw1)+Syw1
SFL,1280,PRES,Sy1,Sy2,

Sy1    = Sy2
Sy2    = (318.8/y)*(Syw2 - Syw1)+Syw1
SFL,1281,PRES,Sy1,Sy2,

Sy1    = Sy2
Sy2    = Syw2
SFL,1282,PRES,Sy1,Sy2,

LSEL,S,LOC,Y,525

LPLOT

/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO, 1
/REP

/PST,PRES,NORM,1
/VSCALE,1,10,0
/REPLOT

SFTRAM      ! Transfere a tensão das linhas p/ os elementos

TIME,100          ! Valor para o time
NSUBST,5,10,5    ! Valor do delta time
CNVTOL,F, ,0.05,2, ,

ALLSEL,ALL

SOLVE
FINISH
/EXIT,SOLU

```

## A.2 – Modelo 02 – Força normal de compressão com momento fletor – chumbador tipo barra reta (situação 04).

```

/COM, =====
/COM, ===== MODELO 02: 6 CHUMBADORES DE BARRA C/ PORCA SOLDADA =====
/COM, ===== COMPRESSÃO NORMAL + MOMENTO FLETOR =====
/COM,
/COM,
/COM, AUTOR:          Marcelo Melo Martins
/COM, ORIENTADOR:     Prof. Ricardo Hallal Fakury
/COM, CO-ORIENTADOR:  Prof. Fernando Amorim de Paula
/COM,
/COM, OBSERVAÇÕES:   1 - Não utilizar o comando para comprimir a numeração de
/COM,                  qualquer entidade;
/COM,
/COM,                  2 - Uso da simetria do modelo em relação ao plano XY.
/COM,
/COM, ALTERAÇÕES:    1 - Existem apenas chumbadores tracionados
/COM,
/COM,                  2 - Gap = 31.5mm p/ a placa e de 5mm p/ as porcas
/COM,
/COM,                  3 - Superfície inferior do bloco na cota de Z = -400mm.
/COM,
/COM,                  4 - Contato entre porcas inferiores e bloco.
/COM,
/COM,                  5 - Não há porcas na placa de base.
/COM,
/COM,                  6 - Porca octaédrica
/COM,
/COM,                  7 - Malha do bloco refinada
/COM,
/COM,                  8 - Variação do Carregamento em 5 etapas 0,25,50,75,100
/COM,
/COM, =====

/TITLE, MODELO C/ 6 CHUMB. DE BARRA RETA COM PORCA SOLDADA

/PLOPTS, LOGO, 0

KEYW, PR_STRUC, 1
/PMETH, OFF

/PREP7

/COM, TIPOS DE ELEMENTOS *****

ET, 1, SOLID45      ! BLOCO DE CONCRETO

ET, 2, BEAM4        ! CHUMBADORES (COMPRESSÃO e TRAÇÃO)

ET, 3, LINK10       ! LIGAÇÃO ENTRE PLACA E CHUMBADORES

ET, 4, SHELL63      ! ELEMENTO CONVENCIONAL DA PLACA
                   ! PORCAS
                   ! PERFIL METÁLICO (alma)
                   ! PERFIL METÁLICO (mesas)

ET, 5, CONTA173     ! ELEMENTOS DO CONTATO DA PLACA DE BASE

ET, 6, TARGE170    ! ELEMENTOS DE CONTATO DO BLOCO DE CONCRETO

ET, 7, COMBIN39     ! ELEMENTOS DE MOLLA (CHUMBADORES E BLOCO)

/COM, DADOS GERAIS *****

! Carregamento
Nd      = -1520      !Força axial de compressão no pilar (kN)

```

```

Md      = 398250      !Momento fletor de cálculo no pilar (kN.mm)

! Constantes Geométricas
d       = 450         !Altura do perfil
tf      = 22.4        !Espessura das mesas do pilar
tw      = 12.5        !Espessura da alma do pilar
tp1     = 63          !Espessura da placa de base
tp2     = 500         !Espessura da placa na região das porcas
Dch     = 12.7        !Diâmetro do chumbador (mm)
ap1     = (3.1419*Dch**2)/4 !Área do chumbador fora do plano de simetria
ap2     = ap1/2       !Área do chumbador no plano de simetria
ex      = Md/Nd       !Excentricidade X da carga normal
Api     = 25230       !Área do perfil do pilar (mm²)
IZp     = 991670000   !Inércia em torno do eixo Z do modelo(mm4)
IXch    = (3.14159*Dch**4)/64 !Momento de inércia do chumbador

! Constantes Físicas
Ea      = 205         !Módulo de elasticidade do aço (kN/mm²)
nua     = 0.3         !Coeficiente de Poisson do aço
Ec      = 28.8        !Módulo de elasticidade do concreto (kN/mm²)
nuc     = 0.19        !Coeficiente de Poisson do concreto
KN      = 1000        !Parâmetro de rigidez normal entre a placa e o bloco (kN/mm)

```

```

/COM, TIPOS DE MATERIAIS *****

```

```

UIMP,1,EX, , ,Ea,
UIMP,1,NUXY, , ,nua, ! Aço

```

```

UIMP,2,EX, , ,Ec,
UIMP,2,NUXY, , ,nuc, ! Concreto

```

```

UIMP,3,MU, , ,0, ! Contato

```

```

TB,DP,2 ! Drucker-Prager
TBDATA,1,0.433012,0.0028867,0

```

```

/COM, CONSTANTES REAIS *****

```

```

R,1,ap1,IXch,IXch,Dch,Dch, , !Chumbadores internos
RMORE, ,IXch/100000, , , ,

```

```

R,2,ap2,IXch/2,IXch/2,Dch/2,Dch/2, , !Chumbadores simetria
RMORE, ,IXch/200000, , , ,

```

```

R,3,tp1, , , , , !Placa convencional
RMORE, , , ,

```

```

R,4,tp2, , , , , !Placa - Porcas
RMORE, , , ,

```

```

R,5,tw, , , , , !Alma do pilar
RMORE, , , ,

```

```

R,6,tf, , , , , !Mesa do pilar
RMORE, , , ,

```

```

R,7, , ,250,0.1,-31.5001, , !Contato entre placa e bloco
RMORE, , , , ,

```

```

R,8,ap1, !ligação placa-chumb interno

```

```

R,9,ap2, !ligação placa-chumb simetria

```

```

R,10, , ,250,0.1,-5.001, , !Contato entre porcas inferiores e bloco
RMORE, , , , ,

```

```

!R,11, , , , , ! Concreto
!RMORE, , , , ,

```

```

/COM, CRIAÇÃO DOS KEYPOINTS DO PLANO PRINCIPAL*****

```

```
/VIEW,1,,-1
/ANG,1
```

```
K,1,800,0,0
K,2,455,0,0
K,3,310,0,0      ! Chumbador X(+) Z=0
K,4,-310,0,0     ! Chumbador X(-) Z=0
K,5,-455,0,0
K,6,-800,0,0
K,7,800,0,250
K,8,455,0,160
K,9,310,0,160    ! Chumbador X(+) Z=160
K,10,-310,0,160 ! Chumbador X(-) Z=160
K,11,-455,0,160
K,12,-800,0,250
K,13,800,0,500
K,14,455,0,285
K,15,310,0,285
K,16,-310,0,285
K,17,-455,0,285
K,18,-800,0,500
K,19,310,0,500
K,20,-310,0,500
```

```
KPLOT
```

```
/COM, CRIAÇÃO DAS LINHAS C/ DIVISÕES DO PLANO PRINCIPAL *****
```

```
I = 1
*DO,K,1,6
  L,I,(I+6),7, , , , , ,
  I = I + 1
*ENDDO
I = 7
*DO,K,1,6
  L,I,(I+6),6, , , , , ,
  I = I + 1
*ENDDO
I = 1
*DO,K,1,5
  LSTR,I,(I+1)
  I = I + 1
*ENDDO
LESIZE,13, , ,7,0.33, , ,
LESIZE,14, , ,7, , , ,
LESIZE,15, , ,20, , , ,
LESIZE,16, , ,7, , , ,
LESIZE,17, , ,7,3, , ,
```

```
I = 7
*DO,K,1,5
  LSTR,I,(I+1)
  I = I + 1
*ENDDO
LESIZE,18, , ,7,0.33, , ,
LESIZE,19, , ,7, , , ,
LESIZE,20, , ,20, , , ,
LESIZE,21, , ,7, , , ,
LESIZE,22, , ,7,3, , ,
```

```
I = 13
*DO,K,1,5
  LSTR,I,(I+1)
  I = I + 1
*ENDDO
LESIZE,23, , ,7,0.33, , ,
LESIZE,24, , ,7, , , ,
LESIZE,25, , ,20, , , ,
LESIZE,26, , ,7, , , ,
LESIZE,27, , ,7,3, , ,
```

```
L,15,19,7,3, , , , ,
L,16,20,7,3, , , , ,
L,13,19,7, , , , ,
L,19,20,10, , , , ,
```

L,20,18,7, , , , , , ,

/COM, CRIAÇÃO DAS ÁREAS DO PLANO PRINCIPAL \*\*\*\*\*

I = 13  
\*DO,K,1,5  
AL,I,(I-11),(I+5),(I-12)  
I = I + 1  
\*ENDDO

I = 18  
\*DO,K,1,5  
AL,I,(I-10),(I+5),(I-11)  
I = I + 1  
\*ENDDO

AL,23,24,28,30  
AL,25,29,31,28  
AL,26,27,32,29

/COM, CRIAÇÃO DOS SÓLIDOS (EXTRUDE) \*\*\*\*\*

/VIEW,1,0.47,0.264,0.842  
/ANG,1  
/REP,FAST

VEXT,ALL, , , , -400, , , ,  
!ASEL,S,LOC,Y,-400  
!VEXT,ALL, , , , -400, , , ,  
ALLSEL,ALL  
/REP,FAST

/COM, DIVISÃO DAS LINHAS CRIADAS PELO EXTRUDE \*\*\*\*\*

LSEL,S,LOC,Y,-200  
LPLOT  
LESIZE,ALL, , , 10, , , ,  
!LSEL,S,LOC,Y,-600  
!LPLOT  
!LESIZE,ALL, , , 6,3.33, , , ,  
/VIEW,1,1,1,1  
/ANG,1  
/REP,FAST  
VPLOT

/COM, GERAÇÃO DA MALHA DO BLOCO DE CONCRETO \*\*\*\*\*

TYPE,1,  
MAT,2,  
!REAL,11,  
!VSEL,U, , , 25  
VSEL,U, , , 12  
MSHKEY,1  
VMESH,ALL  
VSEL,ALL  
VSEL,S, , , 12  
MSHKEY,1  
VMESH,ALL  
ALLSEL,ALL  
EPLOT

/COM, CRIAÇÃO DOS CHUMBADORES \*\*\*\*\*

ERASE  
KPLOT  
/AUTO, 1  
/REP

! X(-) E Z = 0 \*\*\*\*\*

K, 61, 310, 0, 0 ! Chumbador X(+) Z=0 (137)  
K, 62, -310, 0, 0 ! Chumbador X(-) Z=0 (138)  
K, 63, 310, 0, 160 ! Chumbador X(+) Z=160 (139)  
K, 64, -310, 0, 160 ! Chumbador X(-) Z=160 (140)  
K, 65, 310, -405, 0 ! Chumbador X(+) Z=0  
K, 66, -310, -405, 0 ! Chumbador X(-) Z=0  
K, 67, 310, -405, 160 ! Chumbador X(+) Z=160  
K, 68, -310, -405, 160 ! Chumbador X(-) Z=160

NUMSTR, LINE, 137,

I = 61  
\*DO, K, 1, 4  
L, I, (I+4), 12, , , , , ,  
I = I + 1  
\*ENDDO

! KEYPOINTS DA PLACA \*\*\*\*\*

K, 450, -395, 31.5, 0  
K, 451, -330, 31.5, 0  
K, 452, -310, 31.5, 0 ! CHUMBADOR(X- e Z=0)  
K, 453, -290, 31.5, 0  
K, 454, -250, 31.5, 0  
K, 455, -213.8, 31.5, 0  
K, 456, -105, 31.5, 0  
K, 457, 0, 31.5, 0  
K, 458, 105, 31.5, 0  
K, 459, 213.8, 31.5, 0  
K, 460, 250, 31.5, 0  
K, 461, 290, 31.5, 0  
K, 462, 310, 31.5, 0 ! CHUMBADOR(X+ e Z=0)  
K, 463, 330, 31.5, 0  
K, 464, 395, 31.5, 0

KSEL, S, KP, , 450, 464  
KGEN, 2, ALL, , , , 20, 15, 0, 0  
KSEL, S, KP, , 465, 479  
KGEN, 2, ALL, , , , 120, 15, 0, 0  
KSEL, S, KP, , 480, 494  
KGEN, 2, ALL, , , , 20, 15, 0, 0  
KSEL, S, KP, , 495, 509  
KGEN, 2, ALL, , , , 20, 15, 0, 0  
KSEL, S, KP, , 510, 524  
KGEN, 2, ALL, , , , 45, 15, 0, 0  
KSEL, S, KP, , 525, 539  
KGEN, 2, ALL, , , , 20, 15, 0, 0

KSEL, S, KP, , 410, 554  
KPLOT  
/VIEW, 1, 1, 1, 1  
/ANG, 1  
/REP, FAST  
/AUTO, 1  
/REP

! CRIAÇÃO DAS LINHAS\*\*\*\*\*

NUMSTR, LINE, 1090,  
! INICIA A NUMERAÇÃO DAS NOVAS LINHAS EM 1090

/COM, GERAÇÃO DA MALHA DOS CHUMBADORES \*\*\*\*\*

```

TYPE,2,
MAT,1,
REAL,2,          ! CHUMBADORES DO PLANO DE SIMETRIA

LSEL,S,LINE, ,138
MSHKEY,1
LMESH,ALL

TYPE,2,
MAT,1,
REAL,1,

LSEL,S,LINE, ,140
MSHKEY,1
LMESH,ALL

/COM, COMPONENTE DOS NÓS E ELEMENTOS DA PROJEÇÃO DA PLACA NO BLOCO *****

!ESEL,S,TYPE,,1
!NSLE,S
!NPLOT
!NSEL,R,LOC,Y,0
!/REPLOT
!NSEL,R,LOC,X,-460,460
!/REPLOT
!NSEL,R,LOC,Z,0,310
!/REPLOT
!CM,TARGET,NODE

!ESLN,R
!EPLOT
!CM,E_TARGET,ELEM
ALLSEL,ALL

/COM, CRIAÇÃO DAS LINHAS DA PLACA DE BASE *****

KSEL,S,KP, ,450,554
KPLOT
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO, 1
/REP

! LINHAS NA DIREÇÃO DE "X"
I = 450
*DO,K,1,7
  L,I,(I+1),3, , , , , ,
  I = I + 15
*ENDDO
I = 451
*DO,K,1,7
  L,I,(I+1),1, , , , , ,
  I = I + 15
*ENDDO
I = 452
*DO,K,1,7
  L,I,(I+1),1, , , , , ,
  I = I + 15
*ENDDO
I = 453
*DO,K,1,7
  L,I,(I+1),2, , , , , ,
  I = I + 15
*ENDDO
I = 454
*DO,K,1,7
  L,I,(I+1),3, , , , , ,
  I = I + 15
*ENDDO
I = 455
*DO,K,1,7
  L,I,(I+1),4, , , , , ,

```

```

I = I + 15
*ENDDO
I = 456
*DO,K,1,7
L,I,(I+1),3, , , , , ,
I = I + 15
*ENDDO
I = 457
*DO,K,1,7
L,I,(I+1),3, , , , , ,
I = I + 15
*ENDDO
I = 458
*DO,K,1,7
L,I,(I+1),4, , , , , ,
I = I + 15
*ENDDO
I = 459
*DO,K,1,7
L,I,(I+1),3, , , , , ,
I = I + 15
*ENDDO
I = 460
*DO,K,1,7
L,I,(I+1),2, , , , , ,
I = I + 15
*ENDDO
I = 461
*DO,K,1,7
L,I,(I+1),1, , , , , ,
I = I + 15
*ENDDO
I = 462
*DO,K,1,7
L,I,(I+1),1, , , , , ,
I = I + 15
*ENDDO
I = 463
*DO,K,1,7
L,I,(I+1),3, , , , , ,
I = I + 15
*ENDDO

```

```

! LINHAS NA DIREÇÃO DE "Z"
I = 450
*DO,K,1,15
L,I,(I+15),1, , , , , ,
I = I + 1
*ENDDO
I = 465
*DO,K,1,15
L,I,(I+15),5, , , , , ,
I = I + 1
*ENDDO
I = 480
*DO,K,1,15
L,I,(I+15),1, , , , , ,
I = I + 1
*ENDDO
I = 495
*DO,K,1,15
L,I,(I+15),1, , , , , ,
I = I + 1
*ENDDO
I = 510
*DO,K,1,15
L,I,(I+15),2, , , , , ,
I = I + 1
*ENDDO
I = 525
*DO,K,1,15
L,I,(I+15),1, , , , , ,
I = I + 1
*ENDDO

```

/COM, CRIAÇÃO DAS ÁREAS DA PLACA DE BASE \*\*\*\*\*

NUMSTR,AREA,870,

F = 99  
H = 98  
I = 1090  
\*DO,K,1,14  
AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)  
I = I + 7  
F = F - 6  
H = H - 6  
\*ENDDO

F = 113  
H = 112  
I = 1091  
\*DO,K,1,14  
AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)  
I = I + 7  
F = F - 6  
H = H - 6  
\*ENDDO

F = 127  
H = 126  
I = 1092  
\*DO,K,1,14  
AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)  
I = I + 7  
F = F - 6  
H = H - 6  
\*ENDDO

F = 141  
H = 140  
I = 1093  
\*DO,K,1,14  
AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)  
I = I + 7  
F = F - 6  
H = H - 6  
\*ENDDO

F = 155  
H = 154  
I = 1094  
\*DO,K,1,14  
AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)  
I = I + 7  
F = F - 6  
H = H - 6  
\*ENDDO

F = 169  
H = 168  
I = 1095  
\*DO,K,1,14  
AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)  
I = I + 7  
F = F - 6  
H = H - 6  
\*ENDDO

KSEL,S,KP, ,61,554  
LSLK,S,1  
LPLOT

/COM, GERAÇÃO DA MALHA DA PLACA DE BASE \*\*\*\*\*

ASEL,S,AREA, ,870,953  
!ASEL,U,AREA, ,913  
!ASEL,U,AREA, ,914  
!ASEL,U,AREA, ,899

```

!ASEL,U,AREA, ,900
!ASEL,U,AREA, ,871
!ASEL,U,AREA, ,872
!ASEL,U,AREA, ,923
!ASEL,U,AREA, ,924
!ASEL,U,AREA, ,909
!ASEL,U,AREA, ,910
!ASEL,U,AREA, ,881
!ASEL,U,AREA, ,882

TYPE,4,
MAT,1,
REAL,3,

MSHKEY,1
AMESH,ALL
ASEL,S,AREA, ,870,953

!TYPE,4,
!MAT,1,
!REAL,4,

!AMESH,913
!AMESH,914
!AMESH,899
!AMESH,900
!AMESH,871
!AMESH,872
!AMESH,923
!AMESH,924
!AMESH,909
!AMESH,910
!AMESH,881
!AMESH,882

/COM, CRIAÇÃO DO COMPONENTE C/ O NÓS DA PLACA *****

ESEL,S,REAL,,3,4
NSLE,S
CM,CONTACT,NODE

/COM, CRIAÇÃO DO TOPO DO PERFIL METÁLICO *****

K,555,-213.8,531.5,225
K,556,-213.8,531.5,180
K,557,-213.8,531.5,160
K,558,-213.8,531.5,140
K,559,-213.8,531.5,20
K,560,-213.8,531.5,0
K,561,-105,531.5,0
K,562,0,531.5,0
K,563,105,531.5,0
K,564,213.8,531.5,0
K,565,213.8,531.5,20
K,566,213.8,531.5,140
K,567,213.8,531.5,160
K,568,213.8,531.5,180
K,569,213.8,531.5,225

KPLOT
/AUTO, 1
/REP

I = 555
*DO,K,1,14
  LSTR,I,(I+1)
  I = I + 1
*ENDDO

LESIZE,1278, , ,2, , , ,
LESIZE,1279, , ,1, , , ,
LESIZE,1280, , ,1, , , ,
LESIZE,1281, , ,5, , , ,

```

```

LESIZE,1282, , ,1, , , ,
LESIZE,1283, , ,4, , , ,
LESIZE,1284, , ,3, , , ,
LESIZE,1285, , ,3, , , ,
LESIZE,1286, , ,4, , , ,
LESIZE,1287, , ,1, , , ,
LESIZE,1288, , ,5, , , ,
LESIZE,1289, , ,1, , , ,
LESIZE,1290, , ,1, , , ,
LESIZE,1291, , ,2, , , ,

```

```

L,530,555,16,2, , , , ,
L,515,556,16,2, , , , ,
L,500,557,16,2, , , , ,
L,485,558,16,2, , , , ,
L,470,559,16,2, , , , ,
L,455,560,16,2, , , , ,
L,456,561,16,2, , , , ,
L,457,562,16,2, , , , ,
L,458,563,16,2, , , , ,
L,459,564,16,2, , , , ,
L,474,565,16,2, , , , ,
L,489,566,16,2, , , , ,
L,504,567,16,2, , , , ,
L,519,568,16,2, , , , ,
L,534,569,16,2, , , , ,

```

```

AL,1278,1293,1253,1292
AL,1279,1294,1238,1293
AL,1280,1295,1223,1294
AL,1281,1296,1208,1295
AL,1282,1297,1193,1296
AL,1283,1298,1125,1297
AL,1284,1299,1132,1298
AL,1285,1300,1139,1299
AL,1286,1301,1146,1300
AL,1287,1302,1197,1301
AL,1288,1303,1212,1302
AL,1289,1304,1227,1303
AL,1290,1305,1242,1304
AL,1291,1306,1257,1305

```

! Malha de uma Mesa do pilar

```

TYPE,4,
MAT,1,
REAL,6,

ASEL,S,LOC,Y,281.5
ASEL,R,LOC,X,-213.8
MSHKEY,1
AMESH,ALL

```

! Malha da outra Mesa do pilar

```

TYPE,4,
MAT,1,
REAL,6,

ASEL,S,LOC,Y,281.5
ASEL,R,LOC,X,213.8
MSHKEY,1
AMESH,ALL

```

! Malha da Alma do pilar

```

TYPE,4,
MAT,1,
REAL,5,

ASEL,S,LOC,Y,281.5
ASEL,R,LOC,Z,0
MSHKEY,1
AMESH,ALL

```

```

ALLSEL,ALL
EPLOT

```

```
/NUMBER,1
/PNUM,REAL,1
/REPLOT
```

```
/COM, ELEMENTOS DE LIGAÇÃO ENTRE A PLACA E OS CHUMBADORES *****
```

```
L,462,61,1,, , , , , ,      ! Chumbador X(+) Z=0
L,507,63,1,, , , , , ,      ! Chumbador X(+) Z=160
L,452,62,1,, , , , , ,      ! Chumbador X(-) Z=0
L,497,64,1,, , , , , ,      ! Chumbador X(-) Z=160
```

```
LPLOT
/AUTO,1
/REP
```

```
MAT,1,                          ! Chumbador X(+) Z=0 (tracionado)
TYPE,2,
REAL,2,
```

```
LSEL,S,LOC,Y,15.75
LSEL,R,LOC,Z,0
LSEL,R,LOC,X,-310
MSHKEY,1
LMESH,ALL
```

```
MAT,1,                          ! Chumbador X(+) Z=160 (tracionado)
TYPE,2,
REAL,1,
```

```
LSEL,S,LOC,Y,15.75
LSEL,R,LOC,Z,160
LSEL,R,LOC,X,-310
MSHKEY,1
LMESH,ALL
```

```
/COM, CRIAÇÃO DO CONTATO PLACA DE BASE E BLOCO DE FUNDAÇÃO *****
```

```
TYPE,6,                          ! TARGE170 (TARGET)
REAL,7,
```

```
!GCGEN,CONTACT,TARGET,5, , ,
```

```
KSEL,ALL
KSEL,S,LOC,Y,0
KSEL,R,LOC,X,-455,455
KSEL,R,LOC,Z,0,285
LSLK,S,1
ASLL,S,1
APLOT
AMESH,ALL
```

```
TYPE,5,                          ! CONTA173 (CONTACT)
REAL,7,
```

```
CMSEL,S,CONTACT
NPLOT
ESURE, ,BOTTOM
```

```
ESEL,S,TYPE, ,5
/REPLOT
ESURE, ,REVE
```

```
/COM, PORCAS DOS CHUMBADORES IMERSAS NO CONCRETO *****
```

```
! Porcas p/ X(-)
```

```
K,700,(-310+25),-405,0
K,701,(-310+17.67),-405,17.67
K,702,-310,-405,25
K,703,(-310-17.67),-405,17.67
```

```

K,704,(-310-25),-405,0

K,705,(-310+25),-405,160
K,706,(-310+17.67),-405,(160+17.67)
K,707,-310,-405,(160+25)
K,708,(-310-17.67),-405,(160+17.67)
K,709,(-310-25),-405,160
K,710,(-310-17.67),-405,(160-17.67)
K,711,-310,-405,(160-25)
K,712,(-310+17.67),-405,(160-17.67)

KSEL,ALL

NUMSTR,LINE,1500,
  ! INICIA A NUMERAÇÃO DAS NOVAS LINHAS EM 1500

L,700,701,1, , , , , , , ,      ! Linha 1500
L,701,702,1, , , , , , , ,
L,702,703,1, , , , , , , ,
L,703,704,1, , , , , , , ,
L,700,66,1, , , , , , , ,
L,701,66,1, , , , , , , ,      ! Linha 1505
L,702,66,1, , , , , , , ,
L,703,66,1, , , , , , , ,
L,704,66,1, , , , , , , ,

L,705,706,1, , , , , , , ,      ! Linha 1510
L,706,707,1, , , , , , , ,
L,707,708,1, , , , , , , ,
L,708,709,1, , , , , , , ,
L,709,710,1, , , , , , , ,
L,710,711,1, , , , , , , ,
L,711,712,1, , , , , , , ,      ! Linha 1515
L,712,705,1, , , , , , , ,
L,705,68,1, , , , , , , ,
L,706,68,1, , , , , , , ,
L,707,68,1, , , , , , , ,
L,708,68,1, , , , , , , ,      ! Linha 1520
L,709,68,1, , , , , , , ,
L,710,68,1, , , , , , , ,
L,711,68,1, , , , , , , ,
L,712,68,1, , , , , , , ,

NUMSTR,AREA,1010

AL,1504,1500,1505      ! Área 1010
AL,1505,1501,1506
AL,1506,1502,1507
AL,1507,1503,1508

AL,1517,1509,1518
AL,1518,1510,1519
AL,1519,1511,1520
AL,1520,1512,1521
AL,1521,1513,1522
AL,1522,1514,1523
AL,1523,1515,1524
AL,1524,1516,1517

ASEL,S,LOC,Y,-405

TYPE,4,
MAT,1,
REAL,4,

MSHKEY,0

AMESH,ALL

ESEL,S,REAL, ,1,4
EPLOT
/ANG,1
/REP,FAST

/COM, CRIAÇÃO DO CONTATO ENTRE AS PORCAS IMERSAS E O BLOCO *****

```

```

TYPE,6,          ! TARGE170 (TARGET)
REAL,10,

!GCGEN,CONTACT,TARGET,5, , ,

!ASEL,S,LOC,Y,-400
!APLOT
!AMESH,ALL

ESEL,S,TYPE,,1
NSLE,S
NSEL,R,LOC,Y,-400
NPLOT
ESURF,,BOTTOM
ESURF,,REVE

TYPE,5,          ! CONTA173 (CONTACT)
REAL,10,

NSEL,S,LOC,Y,-100,-405
ESLN,S
ESEL,R,TYPE,,4
NSLE,R
/AUTO,1
/REP
NPLOT
ESURF,,BOTTOM

ESEL,S,REAL,,10          !Posiciona o sentido da normal do contato
ESURF,,REVE
!REPLOT

/COM, CERIG-PLANO RÍGIDO P/ APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO *****

!NSEL,S,LOC,Y,1031.5
!NPLOT
!/VIEW,1,1,1,1
!/ANG,1
!/REP,FAST
!/AUTO,1
!/REP
!NSEL,R,LOC,X,0
!*GET,NoMaster,NODE,0,NUM,MAX, ,

!NSEL,ALL
!NSEL,S,LOC,Y,1031.5
!CERIG,NoMaster,ALL,ALL, , , ,

/COM, COUPLE ENTRE OS NÓS DOS CHUMB. E DO CONCRETO

ESEL,S,TYPE,,1,2
NSLE,S
NSEL,R,LOC,Y,0,-330
NPLOT
CPINTF,UX,5.1
CPINTF,UZ,5.1

FINISH

! %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FIM DO PREPROCESSADOR %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
! %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% INÍCIO DA SOLUÇÃO %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

/SOLU

/COM, CONDIÇÕES DE CONTORNO *****

```



```

SFL,1284,PRES,Sy1,Sy2,

Sy1      = Sy2
Sy2      = (318.8/y)*(Syw2 - Syw1)+Syw1
SFL,1285,PRES,Sy1,Sy2,

Sy1      = Sy2
Sy2      = Syw2
SFL,1286,PRES,Sy1,Sy2,

LSEL,S,LOC,Y,531.5

LPLOT

/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO, 1
/REP

/PSF,PRES,NORM,1
/VSCALE,1,10,0
/REPLOT

SFTRAM      ! Transfere a tensão das linhas p/ os elementos

ANTYPE,0                ! Análise estática

TIME,100                ! Valor para o time
NSUBST,5,10,5          ! Valor do delta time
CNVTOL,F, ,0.05,2, ,

ALLSEL,ALL

SOLVE
FINISH
/EXIT,SOLU

```

### A.3 – Modelo 03 – Compressão axial (HPL300).

```
/COM, =====  
/COM, ===== HPL 300 =====  
/COM,  
/COM, ===== COMPRESSÃO AXIAL =====  
/COM,  
/COM,  
/COM, AUTOR:          Marcelo Melo Martins  
/COM, ORIENTADOR:     Prof. Ricardo Hallal Fakury  
/COM, CO-ORIENTADOR:  Prof. Fernando Amorim de Paula  
/COM,  
/COM,  
/COM, OBSERVAÇÕES:    1 - Não utilizar o comando para comprimir a numeração de  
/COM,                  qualquer entidade;  
/COM,  
/COM,                  2 - Unidade de comprimento = mm, unidade de força = kN.  
/COM,  
/COM,  
/COM, ALTERACOES:    1 - Ec (2880 kN/cm²) e poisson (0.19) do concreto  
/COM,  
/COM,                  2 - Elem. de viga entre placa e chumb. tracionado  
/COM,  
/COM,                  3 - Concreto c/ Drucker-Prager  
/COM,  
/COM, =====
```

```
/TITLE, HPL 300 - t=50mm
```

```
/PLOPTS, LOGO, 0
```

```
KEYW, PR_STRUC, 1
```

```
/PMETH, OFF
```

```
/PREP7
```

```
/COM, TIPOS DE ELEMENTOS *****
```

```
ET, 1, SOLID45      ! BLOCO DE CONCRETO
```

```
ET, 2, SHELL63      ! ELEMENTO CONVENCIONAL DA PLACA  
                    ! ELEMENTO ENRIJECIDO DA PLACA (porcas)  
                    ! PERFIL METÁLICO (alma)  
                    ! PERFIL METÁLICO (mesas)
```

```
ET, 3, CONTA173     ! ELEMENTOS DO CONTATO DA PLACA DE BASE
```

```
ET, 4, TARGE170     ! ELEMENTOS DE CONTATO DO BLOCO DE CONCRETO
```

```
/COM, DADOS GERAIS *****
```

```
! Constantes Geométricas
```

```
d      = 290          !Altura do perfil  
bf     = 300          !Largura do perfil  
tf     = 14           !Espessura das mesas do pilar  
tw     = 8.5         !Espessura da alma do pilar  
tp     = 50           !Espessura da placa de base  
Ap     = 11300        !Área do perfil do pilar (mm²)  
H      = 315          !Comprimento da placa de base  
B      = 325          !Largura da placa de base  
Apl    = H*B  
Hb     = (4*Apl*H/B)**0.5 !Comprimento do bloco de concreto  
Bb     = 4*Apl/Hb     !Largura do bloco de concreto  
Ab     = 400          !Altura do bloco  
gap    = tp/2        !Distancia entre a placa e o bloco
```

```
! Carregamento
```

```

Pd      = 1997.6                                !kN
Sd      = Pd/Ap                                  !Pressão na seção do pilar (kN/mm²)

! Constantes Físicas
Ea      = 205                                    !Módulo de elasticidade do aço (kN/mm²)
nua     = 0.3                                    !Coeficiente de Poisson do aço
Ec      = 28.8                                    !Módulo de elasticidade do concreto (kN/mm²)
nuc     = 0.19                                    !Coeficiente de Poisson do concreto

!Divisões
DIV1    = 10                                     !Placa (mesas)
DIV2    = 14                                     !Placa (alma)
DIV3    = 12                                     !Bloco (ortogonais)
DIV4    = 7                                      !Bloco (inclinadas)
DIV5    = 10                                     !Bloco (extrude)
DIV6    = 7                                      !Bloco (extrude)

/COM, TIPOS DE MATERIAIS *****
UIMP,1,EX, , ,Ea,
UIMP,1,NUXY, , ,nua, ! Aço

UIMP,2,EX, , ,Ec,
UIMP,2,NUXY, , ,nuc, ! Concreto

UIMP,3,MU, , ,0, ! Elementos de Contato

TB,DP,2 ! Drucker-Prager
TBDATA,1,0.433012,0.0028867,0

/COM, CONSTANTES REAIS *****

R,1,tp, , , , , !Placa convencional
RMORE, , , ,

R,2,tw, , , , , !Alma do pilar
RMORE, , , ,

R,3,tf, , , , , !Mesa do pilar
RMORE, , , ,

R,4, , ,80,0.1,-(gap+0.001), , !Contato entre placa e bloco
RMORE, , , , ,

/COM, KEYPOINTS DO PLANO PRINCIPAL*****

/AUTO,1
/REP

K,1,-H/2,gap,-B/2
K,2,-(d-tf)/2,gap,-B/2
K,3,(d-tf)/2,gap,-B/2
K,4,H/2,gap,-B/2
K,5,-H/2,gap,-bf/2
K,6,-(d-tf)/2,gap,-bf/2
K,7,(d-tf)/2,gap,-bf/2
K,8,H/2,gap,-bf/2
K,9,-H/2,gap,0
K,10,-(d-tf)/2,gap,0
K,11,(d-tf)/2,gap,0
K,12,H/2,gap,0
K,13,-H/2,gap,bf/2
K,14,-(d-tf)/2,gap,bf/2
K,15,(d-tf)/2,gap,bf/2
K,16,H/2,gap,bf/2
K,17,-H/2,gap,B/2
K,18,-(d-tf)/2,gap,B/2
K,19,(d-tf)/2,gap,B/2
K,20,H/2,gap,B/2

K,21,-H/2,0,-B/2

```

```

K,22,H/2,0,-B/2
K,23,-H/2,0,B/2
K,24,H/2,0,B/2
K,25,-Hb/2,0,-Bb/2
K,26,Hb/2,0,-Bb/2
K,27,-Hb/2,0,Bb/2
K,28,Hb/2,0,Bb/2

KPLOT

/VIEW,1,,1
/ANG, 1
/REP,FAST

/COM, LINHAS DA PLACA DE BASE *****

! Linhas verticais

I = 1
*DO,K,1,4
  L,I,(I+4),2,,,,,
  I = I + 1
*ENDDO

I = 5
*DO,K,1,4
  L,I,(I+4),DIV1,,,,,
  I = I + 1
*ENDDO

I = 9
*DO,K,1,4
  L,I,(I+4),DIV1,,,,,
  I = I + 1
*ENDDO

I = 13
*DO,K,1,4
  L,I,(I+4),2,,,,,
  I = I + 1
*ENDDO

! Linhas horizontais

I = 1
*DO,K,1,5
  L,I,(I+1),2,,,,,
  I = I + 4
*ENDDO

I = 2
*DO,K,1,5
  L,I,(I+1),DIV2,,,,,
  I = I + 4
*ENDDO

I = 3
*DO,K,1,5
  L,I,(I+1),2,,,,,
  I = I + 4
*ENDDO

/COM, LINHAS DO BLOCO *****

NUMSTR,LINE,51,

L,26,25,DIV3,,,,,
L,21,22,DIV3,,,,,
L,24,23,DIV3,,,,,
L,27,28,DIV3,,,,,
L,25,27,DIV3,,,,,
L,21,23,DIV3,,,,,
L,24,22,DIV3,,,,,
L,28,26,DIV3,,,,,

L,25,21,DIV4,,,,,

```

```
L,22,26, DIV4, , , , , , ,
L,24,28, DIV4, , , , , , ,
L,23,27, DIV4, , , , , , ,
```

```
/COM, ÁREAS DA PLACA DE BASE *****
```

```
F = 16
H = 17
I = 1
*DO,K,1,3
  AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)
  I = I + 1
  F = F + 4
  H = H + 4
*ENDDO
```

```
F = 13
H = 14
I = 5
*DO,K,1,3
  AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)
  I = I + 1
  F = F + 4
  H = H + 4
*ENDDO
```

```
F = 10
H = 11
I = 9
*DO,K,1,3
  AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)
  I = I + 1
  F = F + 4
  H = H + 4
*ENDDO
```

```
F = 7
H = 8
I = 13
*DO,K,1,3
  AL,I,(I+F),(I+1),(I+H)
  I = I + 1
  F = F + 4
  H = H + 4
*ENDDO
```

```
ASEL,S,LOC,Y,gap
```

```
TYPE,2,
MAT,1,
REAL,1
MSHKEY,1
AMESH,ALL
```

```
/COM, ÁREAS DO BLOCO *****
```

```
NUMSTR,AREA,1000,
```

```
AL,51,59,52,60
AL,60,57,61,58
AL,53,62,54,61
AL,59,55,62,56
AL,52,56,53,57
```

```
/COM, CRIAÇÃO DOS SÓLIDOS (EXTRUDE) *****
```

```
/VIEW,1,0.47,0.264,0.842
/ANG,1
/REP,FAST
```

```
VEXT,1000,1004,1,,-Ab, , , ,
```

```
ALLSEL,ALL
/REP,FAST
```

/COM, DIVISÃO DAS LINHAS CRIADAS PELO EXTRUDE \*\*\*\*\*

LSEL,S,LOC,Y,-Ab/2  
LPLOT  
LESIZE,ALL,, ,DIV5,3, , ,

ALLSEL,ALL  
VPLOT

/COM, MALHA DO BLOCO DE CONCRETO \*\*\*\*\*

TYPE,1,  
MAT,2,

MSHKEY,1  
VMESH,ALL

/COM, PERFIL METÁLICO \*\*\*\*\*

KSEL,S,KP,,6,7  
KSEL,A,KP,,10,11  
KSEL,A,KP,,14,15

KGEN,2,ALL,, ,0,300,0,100,0,0

KSEL,ALL

NUMSTR,LINE,200,

L,6,6+100,DIV6,3, , , , , ,  
L,7,7+100,DIV6,3, , , , , ,  
L,10,10+100,DIV6,3, , , , , ,  
L,11,11+100,DIV6,3, , , , , ,  
L,14,14+100,DIV6,3, , , , , ,  
L,15,15+100,DIV6,3, , , , , ,

NUMSTR,LINE,210,

L,106,110,DIV1, , , , , , ,  
L,110,114,DIV1, , , , , , ,  
L,110,111,DIV2, , , , , , ,  
L,107,111,DIV1, , , , , , ,  
L,111,115,DIV1, , , , , , ,

NUMSTR,AREA,1500,

AL,210,200,6,202  
AL,213,201,7,203  
AL,211,202,10,204  
AL,214,203,11,205  
AL,212,202,24,203

ASEL,S,AREA,,1500,1503

TYPE,2,  
MAT,1,  
REAL,3  
MSHKEY,1  
AMESH,ALL

ASEL,S,AREA,,1504

TYPE,2,  
MAT,1,  
REAL,2  
MSHKEY,1  
AMESH,ALL

/COM, CONTATO\*\*\*\*\*

```

MAT,3,
TYPE,4,      ! TARGE170 (TARGET)
REAL,4,

KSEL,ALL
KSEL,S,LOC,Y,0
LSLK,S,1
ASLL,S,1
APLOT
AMESH,ALL

ALLSEL,ALL

MAT,3,
TYPE,3,      ! CONTA173 (CONTACT)
REAL,4,

NSEL,S,LOC,Y,(gap)
NPLOT
ESURF,,BOTTOM

ESEL,S,TYPE,,4
/REPLOT
ESURF,,REVE

asel,s,area,,1000
asel,a,area,,1002
/REPLOT
ESLA,S
ESURF,,REVE
EPLOT

FINISH

/SOLU

/COM, CARREGAMENTO*****

LSEL,S,LOC,Y,300+(gap)

SFL,ALL,PRES,Sd, ,

/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO, 1
/REP

/PSF,PRES,NORM,2,0,1
/VSCALE,1,2,0
/REPLOT

ALLSEL,ALL

SFTRAM      ! Transfere a tensão das linhas p/ os elementos

/COM, RESTRIÇÕES *****

! Bloco de Concreto

NSEL,S,LOC,Y,-Ab
D,ALL,UY,0, , , , , ,      ! Impede o desloc. UY
NSEL,S,LOC,Y,-Ab
NSEL,R,LOC,Z,0
NSEL,R,LOC,X,0
D,ALL,UX,0, , , , , ,      ! Impede o desloc. UX
D,ALL,UZ,0, , , , , ,      ! Impede o desloc. UZ

NSEL,S,LOC,Y,-Ab
NSEL,R,LOC,Z,Bb/2
NSEL,R,LOC,X,Hb/2
D,ALL,UX,0, , , , , ,      ! Impede o desloc. UX
D,ALL,UZ,0, , , , , ,      ! Impede o desloc. UZ

```



### A.3 – Modelo 04 – Placas Levemente Carregadas

```
/COM, =====
/COM, ===== MODELO 04: PLACA LEVEMENTE CARREGADA =====
/COM, ===== COMPRESSÃO AXIAL =====
/COM,
/COM,
/COM, AUTOR:          Marcelo Melo Martins
/COM, ORIENTADOR:     Prof. Ricardo Hallal Fakury
/COM, CO-ORIENTADOR: Prof. Fernando Amorim de Paula
/COM,
/COM, OBSERVAÇÕES:   1 - Não utilizar o comando para comprimir a numeração de
/COM,                  qualquer entidade;
/COM,
/COM,                  2 - GAP = 13.5mm
/COM,
/COM, ALTERACOES:    1 - Ec (2880 kN/cm2) e poison (0.19) do concreto
/COM,
/COM,                  2 - Não há chumbadores
/COM,
/COM, =====

/TITLE, MODELO 03 - Placa levemente carregada

/PLOPTS, LOGO, 0

KEYW, PR_STRUC, 1
/PMETH, OFF

/PREP7

/COM, TIPOS DE ELEMENTOS *****

ET, 1, SOLID45      ! BLOCO DE CONCRETO

ET, 2, SHELL63      ! ELEMENTO CONVENCIONAL DA PLACA
                   ! PERFIL METÁLICO (alma)
                   ! PERFIL METÁLICO (mesas)

ET, 3, CONTA173     ! ELEMENTOS DO CONTATO DA PLACA DE BASE

ET, 4, TARGE170    ! ELEMENTOS DE CONTATO DO BLOCO DE CONCRETO

/COM, DADOS GERAIS *****

! Constantes Geométricas
d      = 300          !Altura do perfil
tf     = 9.5          !Espessura das mesas do pilar
tw     = 8            !Espessura da alma do pilar
tp1    = 27           !Espessura da placa de base
Ap     = 7950         !Área dp perfil (mm2)

! Carregamento
Nd     = 1300         !kN
Sd     = Nd/Ap        !Pressão na seção do pilar (kN/mm2)

! Constantes Físicas
Ea     = 205          !Módulo de elasticidade do aço (kN/mm2)
nua    = 0.3          !Coeficiente de Poisson do aço
Ec     = 28.8         !Módulo de elasticidade do concreto (kN/mm2)
nuc    = 0.19        !Coeficiente de Poisson do concreto

! NÚMERO BÁSICO DE DIVISÕES
DIV    = 18

/COM, TIPOS DE MATERIAIS *****
```

```

UIMP,1,EX, , ,Ea,
UIMP,1,NUXY, , ,nua, ! Aço

UIMP,2,EX, , ,Ec,
UIMP,2,NUXY, , ,nuc, ! Concreto

UIMP,3,MU, , ,0, ! Elementos de Contato

TB,DP,2 ! Drucker-Prager
TBDATA,1,0.433012,0.0028867,0

/COM, CONSTANTES REAIS *****

R,1,tw, , , , , !Alma do pilar
RMORE, , , ,

R,2,tf, , , , , !Mesa do pilar
RMORE, , , ,

R,3, , ,70,0.1,-13.5001, , !Contato entre placa e bloco
RMORE, , , , , ,

R,4,tp1, , , , , !Placa de Base
RMORE, , , ,

/COM, CRIAÇÃO DOS KEYPOINTS DO PLANO PRINCIPAL*****

/VIEW,1,,1
/ANG,1

K,1,-300,0,-300
K,2,300,0,-300
K,3,-150,0,-150
K,4,150,0,-150
K,5,-150,0,150
K,6,150,0,150
K,7,-300,0,300
K,8,300,0,300

KSEL,ALL

KPLOT

/COM, CRIAÇÃO DAS LINHAS DO PLANO PRINCIPAL *****

I = 1
*DO,K,1,4
LSTR,I,(I+1)
I = I + 2
*ENDDO

LSTR,1,7
LSTR,3,5
LSTR,4,6
LSTR,2,8
LSTR,1,3
LSTR,2,4
LSTR,8,6
LSTR,7,5

LSEL,ALL

LSEL,S,LINE,,1,4
LESIZE,ALL, , ,DIV

LSEL,S,LINE,,5,8
LESIZE,ALL, , ,DIV

LSEL,S,LINE,,9,12
LESIZE,ALL, , ,DIV/3,1/3

LPLOT

```

LSEL,ALL

/COM, CRIAÇÃO DAS ÁREAS DO PLANO PRINCIPAL \*\*\*\*\*

AL,1,10,2,9  
AL,8,11,7,10  
AL,3,11,4,12  
AL,6,12,5,9  
AL,2,7,3,6

/COM, CRIAÇÃO DOS SÓLIDOS (EXTRUDE) \*\*\*\*\*

/VIEW,1,0.47,0.264,0.842  
/ANG,1  
/REP,FAST

VEXT,ALL, , , , -300, , , ,

ALLSEL,ALL  
/REP,FAST

/COM, DIVISÃO DAS LINHAS CRIADAS PELO EXTRUDE \*\*\*\*\*

LSEL,S,LOC,Y,-150  
LPLOT  
LESIZE,ALL, , , DIV/2,3, , ,

ALLSEL,ALL  
VPLOT

/COM, GERAÇÃO DA MALHA DA 1ª METADE DO BLOCO DE CONCRETO \*\*\*\*\*

TYPE,1,  
MAT,2,

MSHKEY,1  
VMESH,ALL

/COM, PLACA DE BASE \*\*\*\*\*

K,50,-150,(tp1/2),-150  
K,51,150,(tp1/2),-150  
K,52,-150,(tp1/2),0  
K,53,150,(tp1/2),0  
K,54,-150,(tp1/2),150  
K,55,150,(tp1/2),150

NUMSTR,LINE,100,

L,50,51,2\*DIV, , , , , ,  
L,52,53,2\*DIV, , , , , ,  
L,54,55,2\*DIV, , , , , ,  
L,52,50, DIV, , , , , ,  
L,51,53, DIV, , , , , ,  
L,54,52, DIV, , , , , ,  
L,53,55, DIV, , , , , ,

AL,100,104,101,103  
AL,101,106,102,105

ASEL,S,LOC,Y,(tp1/2)

TYPE,2,  
MAT,1,  
REAL,4

MSHKEY,1  
AMESH,ALL

/COM, PERFIL METÁLICO \*\*\*\*\*

K,100,-150,300+(tp1/2),-150  
K,101,150,300+(tp1/2),-150  
K,102,-150,300+(tp1/2),0  
K,103,150,300+(tp1/2),0  
K,104,-150,300+(tp1/2),150  
K,105,150,300+(tp1/2),150

NUMSTR,LINE,200,

L,100,101,2\*DIV, , , , , ,  
L,102,103,2\*DIV, , , , , ,  
L,104,105,2\*DIV, , , , , ,  
L,102,100, DIV, , , , , ,  
L,101,103, DIV, , , , , ,  
L,104,102, DIV, , , , , ,  
L,103,105, DIV, , , , , ,

NUMSTR,LINE,300,

I = 50  
\*DO,K,1,6  
L,I,(I+50),DIV,3, , , , , ,  
I = I + 1  
\*ENDDO

AL,103,302,203,300  
AL,105,304,205,302  
AL,104,301,204,303  
AL,106,303,206,305  
AL,101,302,201,303

ASEL,S,LOC,Y,150+(tp1/2)  
ASEL,R,LOC,X,-150

TYPE,2,  
MAT,1,  
REAL,2  
MSHKEY,1  
AMESH,ALL

ASEL,S,LOC,Y,150+(tp1/2)  
ASEL,R,LOC,X,150

TYPE,2,  
MAT,1,  
REAL,2  
MSHKEY,1  
AMESH,ALL

ASEL,S,LOC,Y,150+(tp1/2)  
ASEL,R,LOC,X,0

TYPE,2,  
MAT,1,  
REAL,1  
MSHKEY,1  
AMESH,ALL

ASEL,ALL

/COM, CONTATO\*\*\*\*\*

MAT,3,  
TYPE,4, ! TARGE170 (TARGET)  
REAL,3,

KSEL,ALL  
KSEL,S,LOC,Y,0

```

LSLK,S,1
ASLL,S,1
APLOT
AMESH,ALL

ALLSEL,ALL

MAT,3,
TYPE,3,      ! CONTA173 (CONTACT)
REAL,3,

NSEL,S,LOC,Y,(tp1/2)
NPLOT
ESURF,,BOTTOM

ESEL,S,TYPE,,3,4
/REPLOT
ESURF,,REVE

FINISH

/SOLU

/COM, CARREGAMENTO*****

LSEL,S,LOC,Y,300+(tp1/2)
LSEL,U,LOC,Z,-150
LSEL,U,LOC,Z,150
SFL,ALL,PRES,Sd,

/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP

/PSF,PRES,NORM,1
/VSCALE,1,10,0
/REPLOT

ALLSEL,ALL

SFTRAM      ! Transfere a tensão das linhas p/ os elementos

/COM, RESTRIÇÕES *****

! Bloco de Concreto

NSEL,S,LOC,Y,-300
D,ALL,UY,0,, , , , , ,      ! Impede o desloc. UY
NSEL,S,LOC,Y,-300
NSEL,R,LOC,Z,0
NSEL,R,LOC,X,0
D,ALL,UX,0,, , , , , ,      ! Impede o desloc. UX
D,ALL,UZ,0,, , , , , ,      ! Impede o desloc. UZ

NSEL,S,LOC,Y,-300
NSEL,R,LOC,Z,300
NSEL,R,LOC,X,300
D,ALL,UX,0,, , , , , ,      ! Impede o desloc. UX
D,ALL,UZ,0,, , , , , ,      ! Impede o desloc. UZ

! Placa de Base

NSEL,S,LOC,Y,(tp1/2)
NSEL,R,LOC,Z,0
NSEL,R,LOC,X,0
D,ALL,UX,0,, , , , , ,      ! Impede o desloc. UX
D,ALL,UZ,0,, , , , , ,      ! Impede o desloc. UZ
D,ALL,ROTY,0,, , , , , ,      ! Impede a rotação ROT_Y da placa de base

ALLSEL,ALL

EPLOT

```

```
/VIEW,1,1,1,1  
/ANG,1  
/REP,FAST  
/AUTO,1  
/REP
```

```
TIME,100 ! Valor para o time  
NSUBST,5,10,5 ! Valor do delta time  
CNVTOL,F, ,0.05,2, ,
```

```
ALLSEL,ALL
```

```
SOLVE
```