



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM CONSTRUÇÕES METÁLICAS



ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE PLACAS DE BASE DE COLUNAS METÁLICAS TUBULARES

GISELE DA SILVA NOVO POSSATO

ORIENTADORA: Prof^ª. Dr^ª. Arlene Maria Sarmanho Freitas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Estrutura Metálica.

Ouro Preto, Maio de 2004.

AGRADECIMENTOS

- Aos meus pais, Carlos e Marilei, pelo incentivo e amor.
- Ao meu irmão, Wellington, que nunca esquecerei.
- Ao Giovanni pelo apoio, carinho e compreensão nos momentos difíceis.
- A minha filha, Luana, pelo amor.
- Ao Afonso e Luiz Gonzaga pelo apoio e amizade.
- A professora Arlene pela orientação e motivação ao longo deste trabalho.
- Aos colegas e amigos de mestrado, em especial a Fabiana, pelas horas de estudos.
- Aos funcionários do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da UFOP, em especial João, Dequinha e Geraldo, pela disposição nos ensaios experimentais.
- A CAPES pela bolsa de mestrado.
- A empresa Vallourec & Mannesmann do Brasil, pelo apoio e financiamento desse trabalho.

RESUMO

Neste trabalho, é apresentado um estudo experimental para analisar a resistência de placas de base de colunas formadas por tubos metálicos circulares. O programa experimental envolve ensaios em colunas curtas com placas de base conectadas através de chumbadores a uma base de concreto com resistência controlada. A excentricidade de carregamento é um parâmetro crítico para a análise sendo observados nos ensaios os modos de colapso obtidos.

Foram ensaiados quatro protótipos em laboratório, e o estudo experimental foi desenvolvido de forma a analisar a distribuição de tensões nas placas de base à medida que a coluna recebe carga excêntrica. Foram posicionados extensômetros em toda a placa de base para leitura das deformações, e com os valores das deformações foram obtidas as tensões nas placas.

É apresentada uma abordagem teórica de cálculo de placa de base de colunas tubulares, através das expressões analíticas encontradas em normas de cálculo, destacando EUROCODE3 (1992), AISC (1997) e NBR8800 (1986). Foram realizadas análises teóricas nos protótipos ensaiados de forma a comparar os valores encontrados nos ensaios realizados e as expressões analíticas das normas de cálculo de placas de base. A partir dessas comparações concluiu-se que as formulações propostas pela maioria dos autores são muito conservadoras. Dessa forma propõe-se uma alternativa de cálculo onde foram obtidos resultados compatíveis com os resultados experimentais.

ABSTRACT

In this work, an experimental study is presented to analyze the resistance of plates of base of columns formed by hollow steel tubes. The experimental program involves rehearsals in stub columns with base plates connected by ancorbolts in concrete foundation with controlled resistance. The eccentricity load is a critical parameter for the analysis being observed in the rehearsals the collapse manners obtained.

Four prototypes were rehearsed at laboratory, and the experimental study was developed from way to analyze the distribution of tensions in the base plates as the column receives eccentric load. Straingages were positioned in the whole base plate for reading of the deformations, and with the values of the deformations they were obtained the tensions in the plates.

A theoretical approach of calculation of plate of base of tubular columns is presented, through the analytical expressions found in calculation norms, detaching EUROCODE3 (1992), AISC (1997) and NBR8800 (1986). Theoretical analyses were accomplished in the rehearsed prototypes in way to compare the values found in the accomplished rehearsals and the analytical expressions of the norms of calculation of base plates. In short, the formulations proposed by most of the authors are conservative. In that way calculation alternatives are proposed being obtained compatible results with the experimental results..

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.	IX
LISTA DE TABELAS.	XV
LISTA DE SÍMBOLOS.	XVI
1. INTRODUÇÃO.	01
2. DIMENSIONAMENTO DE PLACAS DE BASE DE COLUNAS TUBULARES.	08
2.1. INTRODUÇÃO.	08
2.2. PRESSÃO DE CONTATO.	13
2.3. DIMENSIONAMENTO DE BASES FLEXÍVEIS.	15
2.4. DIMENSIONAMENTO DE BASES RÍGIDAS.	19
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.	29
3.1. INTRODUÇÃO.	29
3.2. PROJETO DA PLACA DE BASE.	29
3.3. CONFECÇÃO DO BLOCO DE CONCRETO.	38
3.4. CHUMBADORES.	39
3.5. MONTAGEM DOS ENSAIOS.	39
3.6. INSTRUMENTAÇÃO.	43
3.7. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	50
3.7.1. Deslocamentos e Carregamento.	51
3.7.2. Deformações.	52
3.8. METODOLOGIA DO ENSAIO.	52

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.	53
4.1. INTRODUÇÃO.	53
4.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DAS PLACAS DE BASE.	53
4.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS.	55
4.3.1. Ensaio 1.	56
4.3.2. Ensaio 2.	60
4.3.3. Ensaio 3.	64
4.3.4. Ensaio 4.	70
4.3.5. Ensaio 5.	74
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.	81
5.1. INTRODUÇÃO.	81
5.2. ANÁLISE TEÓRICA DAS DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS.	81
5.2.1. Critérios de Ruptura em Estado Plano de Tensões.	81
5.2.2. Estado Plano de Deformações Específicas.	83
5.2.3. Medida das Deformações Específicas em Laboratório.	84
5.3. CÁLCULO DAS TENSÕES PRINCIPAIS NOS ENSAIOS.	87
5.3.1. Ensaio 1.	87
5.3.2. Ensaio 2.	89
5.3.3. Ensaio 3.	91
5.3.4. Ensaio 4.	94
5.3.5. Ensaio 5.	96
6. AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.	100
6.1. INTRODUÇÃO.	100
6.2. AVALIAÇÃO SEGUNDO PRESCRIÇÕES EXISTENTES.	100
6.3. AVALIAÇÕES PROPOSTAS.	108
6.3.1. Primeira Proposição de Cálculo.	110
6.3.2. Segunda Proposição de Cálculo.	113
6.4. COMPARAÇÕES ENTRE AS FORMULAÇÕES.	115

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123
ANEXOS.	127
ANEXO I. Tabelas com os valores lidos pelos extensômetros, defletômetros e LVDT's nos Ensaios 1 a 5.....	128
ANEXO II. Tabelas com os valores das tensões provenientes das deformações medidas nos Ensaios 1 a 5.....	161
ANEXO III. Distribuição de tensões no Ensaio 5.....	203
ANEXO IV. Tabelas de comparação entre os resultados das análises teóricas, experimentais e as formulações propostas.....	206

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 – Tipos de seções tubulares.....	01
Figura 1.2 – Ligações parafusadas de base (Meyer, K. F. (2002)).....	03

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Tipos de placas de base. (a) Base Flexível; (b) Base Rígida; (c) Base Rígida.....	08
Figura 2.2 – Detalhe típico de bases flexíveis e bases rígidas para colunas tubulares.	09
Figura 2.3 – Detalhes típicos de bases rígidas para colunas tubulares com nervuras.	10
Figura 2.4 – Detalhe típico de base semi-rígida para colunas tubulares com barra de cisalhamento.	10
Figura 2.5 – Condições de vinculação das bases dos pilares (McGuire, W. (1968)).	11
Figura 2.6 – Efeito da variação do momento na base da coluna. Estágio 1; Estágio 2; Estágio 3; Estágio 4; Estágio 5 (McGuire, W. (1968)).....	12
Figura 2.7 – Detalhe típico de base flexível.	15
Figura 2.8 – Detalhe seção crítica da viga em balanço e sua projeção de acordo com RAUTARUUKKI.	16
Figura 2.9 – Detalhe seção crítica da viga em balanço e sua projeção de acordo com DEWOLF & RICKER.	17
Figura 2.10 – Detalhe típico de base rígida.	19
Figura 2.11 – Classificação das placas de base de acordo com a excentricidade da força axial de compressão. (a) Pequena excentricidade; (b) Excentricidade moderada e (c) Grande excentricidade.....	21
Figura 2.12 – Detalhe típico de base com “ e ” $>$ $L/6$ onde os chumbadores são tracionados.	22

Figura 2.13 – Representação do comportamento elástico da base do pilar.	23
Figura 2.14 – Posições de p_1 , p_2 e a_1 na placa de base com carga excêntrica, de acordo com RAUTARUUKKI.	26
Figura 2.15 – Posições de p_1 , p_2 e a_1 na placa de base com carga excêntrica, de acordo com DEWOLF & RICKER.	26
Figura 2.16 – Projeção da placa de base.	27

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Projeto dos Protótipos 1 e 2 (Ensaios 1, 2 e 3).	30
Figura 3.2 – Projeto do Protótipo 3 (Ensaio 4).	31
Figura 3.3 – Projeto do Protótipo 4 (Ensaio 5).	32
Figura 3.4 – Foto das imperfeições nos Protótipos 1 e 2.	33
Figura 3.5 – Foto das imperfeições nos Protótipos 3. (a) Face 3-4 da placa de base; (b) Face 1-2 da placa de base.	34
Figura 3.6 – Foto das imperfeições no Protótipo 4. (a) Face 1-2 da placa de base; (b) Face 3-4 da placa de base.	35
Figura 3.7 – Detalhe das deformações iniciais do Protótipo 3.	36
Figura 3.8 – Detalhe das deformações iniciais do Protótipo 4.	37
Figura 3.9 – Detalhes do bloco de apoio projetado para os ensaios dos Protótipos 1, 2, 3 e 4.	39
Figura 3.10 – Esquema geral de montagem dos Ensaios 1, 2 e 3.	41
Figura 3.11 – Esquema geral de montagem do Ensaio 4.	42
Figura 3.12 – Esquema geral de montagem do Ensaio 5.	43
Figura 3.13 – Detalhe do esquema de instrumentação com extensometria utilizado nos Ensaios 1 e 2.	44
Figura 3.14 – Detalhe do esquema de instrumentação com extensometria utilizado no Ensaio 3.	45
Figura 3.15 – Detalhe do esquema de instrumentação com extensometria utilizado no Ensaio 4.	46
Figura 3.16 – Detalhe do esquema de instrumentação com extensometria utilizado no Ensaio 5.	47

Figura 3.17 – Detalhe do posicionamento dos defletômetros e LVDT's utilizados nos Ensaios 1, 2 e 3.	48
Figura 3.18 – Detalhe do posicionamento dos LVDT's utilizados no Ensaio 4. ...	49
Figura 3.19 – Detalhe do posicionamento dos LVDT's utilizados no Ensaio 5. ...	49
Figura 3.20 – Detalhe da montagem do sistema de aplicação de carga e fixação do bloco de apoio utilizado nos Ensaios 1 a 5.	50
Figura 3.21 – Detalhe dos equipamentos para aquisição de dados.	51

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 – Corpos de prova utilizados para caracterização do material das placas de base.	54
Figura 4.2 – Relação carga x deformação dos extensômetros E1 e E2 do Ensaio 1.	57
Figura 4.3 – Relação carga x deformação dos extensômetros E3, E4 e E9 do Ensaio 1.	58
Figura 4.4 – Relação carga x deformação dos extensômetros E5 a E8 do Ensaio 1.	58
Figura 4.5 – Relação carga x deslocamento dos defetômetros e LVDT do Ensaio 1.	59
Figura 4.6 – Relação carga x deformação dos extensômetros E1 e E2 do Ensaio 2.	61
Figura 4.7 – Relação carga x deformação dos extensômetros E3, E4 e E9 do Ensaio 2.	61
Figura 4.8 – Relação carga x deformação dos extensômetros E5 a E8 do Ensaio 2.	62
Figura 4.9 – Relação carga x deslocamento dos defetômetros e LVDT do Ensaio 2.	63
Figura 4.10 – Foto da região da placa de base onde houve deformação aparente no Ensaio 2.	63
Figura 4.11 – Instrumentação dos Ensaios 1, 2 e 3.	65
Figura 4.12 – Relação carga x deformação de E1, E2, E7 a E9 do Ensaio 3.	67
Figura 4.13 – Relação carga x deformação de E3, E5, E11 e E13 do Ensaio 3. ...	67

Figura 4.14 – Relação carga x deformação de E4, E6, E10 e E12 do Ensaio 3. --	68
Figura 4.15 – Relação carga x deslocamento dos defetômetros e LVDT do Ensaio 3.....	69
Figura 4.16 – Foto da região da placa de base onde houve deformação aparente no Ensaio 3.....	69
Figura 4.17 – Relação carga x deformação dos extensômetros E1, E2, E9 e E10 do Ensaio 4.....	71
Figura 4.18 – Relação carga x deformação dos extensômetros E4, E6 e E8 do Ensaio 4.....	72
Figura 4.19 – Relação carga x deformação dos extensômetros E3, E5 e E7 do Ensaio 4.....	72
Figura 4.20 – Relação carga x deslocamento dos LVDT1 ao LVDT3 do Ensaio 4.....	73
Figura 4.21 – Foto da região da placa de base onde houve deformação aparente no Ensaio 4.....	74
Figura 4.22 – Relação carga x deformação de E16 e E17 do Ensaio 5.	77
Figura 4.23 – Relação carga x deformação de E3, E6, E9, E12 e E15 do Ensaio 5.....	77
Figura 4.24 – Relação carga x deformação de E2, E5, E8, E11 e E14 do Ensaio 5.....	78
Figura 4.25 – Relação carga x deformação de E1, E4, E7, E10 e E13 do Ensaio 5.....	78
Figura 4.26 – Relação carga x deslocamento dos LVDT1 ao LVDT3 do Ensaio 5.....	79
Figura 4.27 – Foto da região da placa de base onde houve deformação aparente no Ensaio 5.....	80

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – Plano xy das deformações específicas.....	84
Figura 5.2 – Detalhe do posicionamento dos extensômetros no plano xy.....	85

Figura 5.3 – Detalhe do posicionamento dos extensômetros em um plano qualquer.	86
Figura 5.4 – Relação carga x tensão dos extensômetros E3 e E4 do Ensaio 1. ...	88
Figura 5.5 – Relação carga x tensão dos extensômetros E5 e E6 do Ensaio 1. ...	88
Figura 5.6 – Relação carga x tensão dos extensômetros E7 e E8 do Ensaio 1. ...	89
Figura 5.7 – Relação carga x tensão dos extensômetros E3 e E4 do Ensaio 2. ...	90
Figura 5.8 – Relação carga x tensão dos extensômetros E5 e E6 do Ensaio 2. ...	90
Figura 5.9 – Relação carga x tensão dos extensômetros E7 e E8 do Ensaio 2. ...	91
Figura 5.10 – Relação carga x tensão dos extensômetros E3 e E4 do Ensaio 3. ...	92
Figura 5.11 – Relação carga x tensão dos extensômetros E5 e E6 do Ensaio 3. ...	92
Figura 5.12 – Relação carga x tensão dos extensômetros E10 e E11 do Ensaio 3. ...	93
Figura 5.13 – Relação carga x tensão dos extensômetros E12 e E13 do Ensaio 3. ...	93
Figura 5.14 – Relação carga x tensão dos extensômetros E3 e E4 do Ensaio 4. ...	95
Figura 5.15 – Relação carga x tensão dos extensômetros E5 e E6 do Ensaio 4. ...	95
Figura 5.16 – Relação carga x tensão dos extensômetros E7 e E8 do Ensaio 4. ...	96
Figura 5.17 – Relação carga x tensão dos extensômetros E1, E2 e E3 do Ensaio 5.	97
Figura 5.18 – Relação carga x tensão dos extensômetros E4, E5 e E6 do Ensaio 5.	98
Figura 5.19 – Relação carga x tensão dos extensômetros E7, E8 e E9 do Ensaio 5.	98
Figura 5.20 – Relação carga x tensão dos extensômetros E10, E11 e E12 do Ensaio 5.	99
Figura 5.21 – Relação carga x tensão dos extensômetros E13, E14 e E15 do Ensaio 5.	99

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 – Posições de p_1 , p_2 e a_1 na placa de base com carga excêntrica, de acordo com RAUTARUUKKI.	101
Figura 6.2 – Posições de p_1 , p_2 e a_1 na placa de base com carga excêntrica, de acordo com DEWOLF & RICKER.	102
Figura 6.3 – Desenho da chapa de base dos Protótipos 1 a 4.	103

Figura 6.4 – Situações de carregamento dos Ensaios 1 a 5.	104
Figura 6.5 – Comprimento da viga em balanço utilizada na “analogia de viga em balanço”.	105
Figura 6.6 – Distribuição de tensões para a carga de 310,5 kN no Ensaio 5 ao longo do comprimento da placa.	108
Figura 6.7 – Comprimento da viga engastada e apoiada.	111
Figura 6.8 – Comprimento da viga engastada e apoiada em apoio elástico.	113
Figura 6.9 – Comparações entre as formulações com espessura da placa de base de 12,5 mm, f_y de 308 MPa e excentricidade de carga de 168,3 mm.	116
Figura 6.10 – Comparações entre as formulações com espessura da placa de base de 16,0 mm, f_y de 435 MPa e excentricidade de carga de 168,3 mm.	117

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 - Resistência do concreto medido através de ensaios em corpos de prova moldados no dia da concretagem do bloco de apoio.....	38
---	----

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 – Resultados obtidos do ensaio de tração.	54
Tabela 4.2 – Resultados obtidos do ensaio de dureza.	55
Tabela 4.3 – Resultados obtidos da análise química.	55
Tabela 4.4 – Extensômetros dos Ensaios 1, 2 e 3.	64

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 – Pressão de contato nas placas de base para os casos de carregamento.....	106
Tabela 6.2 – Espessuras das placas de base.....	107
Tabela 6.3 – Cargas máximas nominais no regime elástico.....	107
Tabela 6.4 – Valores da linha neutra $y_{teórico}$ no regime elástico.....	110
Tabela 6.5 – Cargas máximas nominais considerando o vão da viga = X (regime elástico).....	111
Tabela 6.6 – Resumo dos resultados da análise experimental, da análise teórica com a analogia de viga em balanço e da primeira proposição de cálculo.....	112
Tabela 6.7 – Comprimento X da viga a partir da análise teórica de viga engastada e apoiada e da análise experimental.	113
Tabela 6.8 – Valores de k obtidos a partir da análise teórica de viga engastada e apoiada em apoio elástico e da análise experimental.	115
Tabela 6.9 – Cargas máximas nominais considerando o vão da viga = a_1 para viga engastada e apoiada em apoio elástico com $k = 550$	115

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas

- A_b - área da superfície da placa de base
- A_c - área da superfície do bloco de concreto homotética em relação à A_b
- A_s - área de aço total dos chumbadores tracionados
- B - largura da placa de base retangular
- D - diâmetro externo da coluna tubular circular
- E_c - módulo de elasticidade longitudinal do concreto
- E_s - módulo de elasticidade longitudinal do aço
- F_1 - reação no engaste da viga devido a pressão de contato (p_1-p_2)
- F_2 - reação no engaste da viga devido a pressão de contato p_2
- G - módulo de elasticidade transversal do aço
- H - esforço cortante
- I_b - momento de inércia da superfície da placa de base
- I_v - momento de inércia da seção transversal da viga
- L - comprimento da placa de base retangular
- M - momento fletor
- $M_{el, Rd}$ - momento fletor resistente de cálculo no regime elástico
- $M_{engaste}$ - momento fletor solicitante de cálculo no engaste da projeção da placa de base
- $M_{(p_1-p_2)}$ - momento fletor no engaste da viga devido a pressão de contato (p_1-p_2)
- M_{p_2} - momento fletor no engaste da viga devido a pressão de contato p_2
- M_{Sd} - momento fletor solicitante de cálculo
- M_{Sn} - momento fletor solicitante nominal
- N - força axial
- N_c - resultante da pressão de contato atuante na placa de base
- N_s - força atuante nos chumbadores localizados na zona tracionada da placa de base
- N_{Sd} - força axial solicitante de cálculo
- N_{Sn} - força axial solicitante nominal
- X - comprimento da viga engastada e apoiada

W - módulo resistente elástico da superfície da placa de base

Letras romanas minúsculas

- a - deslocamento da placa de base em relação ao eixo horizontal
- a_1 - projeção da placa de base utilizada na analogia de viga em balanço
- b - deslocamento da placa de base em relação ao eixo horizontal
- e - excentricidade do carregamento
- f - distância entre os chumbadores tracionados e o centro da placa de base
- f_{cd} - resistência de cálculo do concreto à compressão
- f_{ck} - resistência característica do concreto à compressão
- f_u - tensão limite de resistência à tração do aço
- f_y - tensão limite de escoamento do aço
- m - projeção da placa de base utilizada na analogia de viga em balanço
- n_e - relação entre os módulos de elasticidade longitudinais do aço e do concreto
- p - pressão de contato admissível de cálculo
- p_c - pressão de contato admissível de cálculo
- p_1 - pressão de contato máxima na borda da placa de base
- p_2 - pressão de contato na posição de ligação entre o pilar e a placa
- $p_{máx}$ - pressão de contato máxima na borda da placa de base
- k - constante de rigidez do apoio elástico
- t_p - espessura da placa de base
- y - posição da linha neutra
- y_{CG} - distância entre a posição do centro de gravidade da placa de base e a borda analisada
- $y_{experimental}$ - posição da linha neutra experimental
- $y_{teórico}$ - posição da linha neutra teórica

Letras gregas

- σ - tensão resultante dos esforços solicitantes
- σ_a, σ_b - tensões nas direções principais
- σ_c - tensão resistente do concreto

- σ_s - tensão resultante nos chumbadores tracionados
- σ_x, σ_y - tensões normais nas direções dos eixos x e y
- σ_1, σ_2 - tensões normais nas direções principais
- $\tau_{máx}$ - tensão de cisalhamento máximo
- τ_{xy} - tensão de cisalhamento na direção da bissetriz do ângulo formado pelos eixos x e y
- γ_c - coeficiente de ponderação do concreto
- γ_{MO} - coeficiente de ponderação
- γ_{xy} - deformação de cisalhamento na direção da bissetriz do ângulo formado pelos eixos x e y
- ϕ - coeficiente de resistência
- ϕ_b - coeficiente de resistência
- ϵ - alongamento residual do aço após sua ruptura
- ϵ_s - deformação do chumbador
- ϵ_c - deformação do bloco de concreto
- ϵ_x, ϵ_y - componentes de deformação no plano xy
- $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ - componentes de deformações específicas medidas em laboratório em um plano qualquer
- ν - coeficiente de Poisson

1. INTRODUÇÃO

O uso de estruturas metálicas na construção civil tem crescido significativamente nos últimos anos, onde estruturas metálicas de seções tubulares tornaram-se uma opção moderna, abrangendo um grande mercado.

As seções tubulares possuem uma forma simples e suas propriedades geométricas tornam possível a elaboração das mais variadas obras com soluções leves e econômicas, devido ao baixo peso próprio, e possuem também grande resistência à torção e resistência equilibrada à flexão, devido a geometria. Os tubos redondos apresentam a mesma capacidade resistente à flambagem em todas as direções e nos retangulares a variação é pequena, assim como existe a possibilidade de enchimento com o concreto, aumentando a resistência mecânica e ao fogo.

As barras tubulares possuem, na maioria das vezes, seções circulares, quadradas e retangulares, como pode ser visto na figura 1.1. As seções redondas são conhecidas desde o século dezenove e as retangulares só começaram a ser fabricados em 1959.

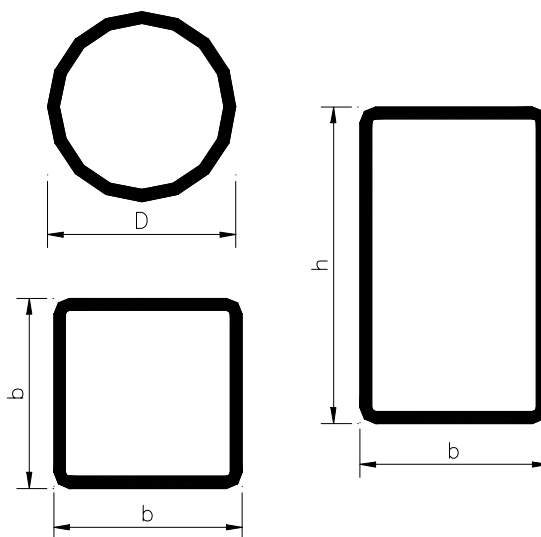


Figura 1.1 – Tipos de seções tubulares.

O aumento do uso de seções tubulares em estruturas metálicas, tem destacado a necessidade de métodos de cálculo que racionalizem as ligações parafusadas de barras

tubulares. No estudo das ligações é necessário uma profunda avaliação comportamental das mesmas, uma vez que estas provocam tensões no tubo que devem ser conhecidas para que seja possível a elaboração de projetos otimizados.

A ligação da extremidade inferior da coluna, ou seja a base da coluna, com o bloco de fundação de concreto é feita através das chapas de base, que têm por finalidade transmitir adequadamente as solicitações atuantes nas colunas para o bloco de fundação, sem exceder a resistência do concreto e garantir a fixação da extremidade da coluna. A fixação da chapa de base com o bloco é feita por chumbadores, que são usados também para posicionar a coluna no bloco. Os chumbadores podem estar trabalhando ou não dependendo do tipo de solicitação. Esse tipo de ligação de base feita através de chapa de base é o mais usual e seu desempenho é muito significativo no comportamento global da estrutura, como distribuição de esforços, deslocamentos e estabilidade da estrutura. Nas figuras 1.2(a) e 1.2(b) estão mostrados alguns tipos de ligações de base.



(a)



(b)

Figura 1.2 – Ligações parafusadas de base (Meyer, K. F.(2002)).

Nos últimos anos vários estudos têm sido desenvolvidos nesse campo de pesquisa tanto de caráter experimental quanto analítico/numérico, a fim de se determinar o comportamento real e a interação entre o carregamento axial e o momento fletor nas ligações.

Entre as investigações destacam-se os trabalhos de Hawkins que em 1967 e em 1968 conduziu testes nos quais a carga era aplicada somente na região central da placa de base. Para as placas mais finas, conseqüentemente mais flexíveis, o autor notou que a capacidade de suporte aumenta proporcionalmente com a tensão de escoamento da placa. O acréscimo da espessura da placa faz com que, a partir de um determinado valor, ela passe a se comportar como se estivesse totalmente carregada. Ele desenvolveu métodos analíticos para determinação da resistência de suporte, mas estes métodos foram pouco utilizados devido a complexidade de suas rotinas de cálculo (DEWOLF & RICKER (1990)).

FLING (1970) propôs a utilização da teoria da linha de escoamento para as colunas levemente carregadas. Ele assumiu que a flexão da placa de base se mantém no regime elástico e o deslocamento entre a placa e o bloco de concreto deveriam se manter a um valor fixo. GOGATE (1970) ressaltou que FLING negligenciou a influência favorável que os chumbadores exercem nestas ligações. FLING em resposta declarou que seria difícil levar em consideração essa influência, pelas grandes variações no projeto dos chumbadores.

STOCKWELL (1975) propôs que somente a área da placa diretamente sob a coluna, deveria ser considerada como área efetiva no dimensionamento da placa de base, porque percebeu que a flexibilidade das placas e a distribuição da pressão de contato não eram consistentes com a solução analítica, que considera a pressão de contato uniformemente distribuída na placa.

DEWOLF (1978) avaliou experimentalmente ligações de placas de base submetidas a carregamento axial e mostrou que a proposta da literatura era conservadora. Propôs, então, uma abordagem empírica simples, válida para diversas espessuras de placas. A formulação leva em consideração as resistências do concreto e da placa e a relação entre a excentricidade da aplicação da carga axial e a espessura da placa.

DEWOLF & SARISLEY (1980) realizaram ensaios em placas de base sob a ação combinada de carga axial e momento fletor e comparou seus resultados aos fornecidos pelas normas de projeto. Dentre as variáveis dos ensaios estavam a espessura da placa, as dimensões dos chumbadores e a excentricidade da carga axial equivalente. A partir dos resultados concluíram que o comportamento de colapso nem sempre era consistente com as hipóteses adotadas pelas normas.

MURRAY (1983) realizou estudos teóricos e experimentais com a placa de base modelada pelo método dos elementos finitos no regime elástico. A placa foi conectada à fundação rígida por meio de molas, que se desconectavam quando tracionadas. Baseado nos resultados teóricos dos seus ensaios, MURRAY concluiu que as afirmações de STOCKWELL (1975) estavam concisas, definindo desta forma, a área efetiva da placa que deveria ser utilizada.

THAMBIRATNAM & PARAMASIVAM (1986) realizaram testes para avaliar a excentricidade do carregamento e a espessura das placas de base. Utilizaram extensômetros em vários pontos da base para medir a tensão nas diferentes etapas de carregamento, e conseqüente determinação do carregamento de ruptura. Foram observados três modos de ruptura: esmagamento do concreto, escoamento da placa de base e colapso do parafuso de ancoragem. Pela teoria, a tensão na placa depende da resistência à compressão do concreto, mas os testes mostraram que não, a menos que a ruptura seja no esmagamento do concreto (caso em que se tem placa espessa e pequena excentricidade). Já as bases flexíveis, carregadas com pequena excentricidade rompem

por escoamento e seu comportamento independe da resistência do concreto. Apresentaram curvas iterativas indicando que em ligações de bases com placas espessas, o sistema não tem a maior capacidade de carga, pois a placa rígida, provoca o colapso prematuro do concreto. Pela distribuição de tensões e pelo carregamento, é evidente que para um carregamento constante a tensão na placa aumenta com o aumento da excentricidade, e a tensão na placa reduz com o aumento da espessura da placa.

PENSERINI & COLSON (1989) analisaram a resistência última das ligações de placa de base, considerando vários modos de ruptura para o bloco de concreto, os chumbadores, a placa e até mesmo para o pilar. Os autores utilizaram o método dos estados limites para o cálculo da resistência última, e fizeram comparações com resultados experimentais para ligações de placas de base rígidas e flexíveis.

ERMOPOULOS & STAMATOPOULOS (1996) desenvolveram, baseado na teoria clássica, um procedimento de cálculo para a derivação das curvas $M-\phi$ da ligação de placa de base, propondo uma nova formulação capaz de descrever com boa precisão a não-linearidade da relação Momento-Rotação. Foram fornecidos todos os coeficientes utilizados na formulação para cada caso particular de placa de base. Em 1997 estudaram o estado limite último das ligações de placas de base, e obtiveram curvas de interação $M-\phi$, levando-se em consideração os principais parâmetros do problema. O método proposto é baseado na consideração dos três modos de ruptura, os mesmos já observados por THAMBIRATNAM & PARAMASIVAM (1986), de acordo com a pressão de contato na placa de base. Os parâmetros avaliados foram as dimensões e a espessura da placa, o diâmetro, o comprimento e a localização dos chumbadores, e o carregamento axial.

ERMOPOULOS & MICHALTSOS (1998) propuseram uma nova metodologia capaz de conduzir a um modelo analítico que descrevesse a distribuição não-linear de tensão na placa de base e simular o comportamento elástico e elasto-plástico da ligação. Para cada tipo particular de placa (rígida, semi-rígida e flexível), os parâmetros correspondentes necessários foram calculados e introduzidos nas expressões analíticas propostas. Utilizando as equações de equilíbrio para o modelo considerado foram obtidas a tensão de compressão máxima, a largura da área de compressão e a força de tração dos chumbadores. Também foi avaliado o comportamento plástico da ligação.

Fazendo um estudo de forma comparativa entre os resultados da análise teórica e os obtidos pela análise numérica, MINCHILLO (2003) analisou placas de base solicitadas por força normal e momento fletor através do método dos elementos finitos e utilizando o software ANSYS para análise de placa de base. Nesta análise pode observar que a distribuição de tensões no carregamento axial mostra que a aproximação da teoria de uma viga em balanço, com carregamento uniformemente distribuído, é conservadora e fornece placas espessas e para grandes excentricidades a análise numérica e a análise teórica apresentaram algumas discrepâncias não mais a favor da segurança.

No mesmo ano, SANTOS (2003) realizou um estudo comparativo utilizando duas abordagens teóricas para placa de base, uma em que considera a placa trabalhando no regime elástico e a outra que considera a placa trabalhando no regime plástico. O que se notou foi que as bases dimensionadas no regime elástico fornecem uma espessura maior da placa e as bases dimensionadas no regime plástico fornecem uma espessura menor da placa. Isto se dá pelo fato de que as bases que trabalham no regime plástico aproveitam melhor a sua capacidade de resistência. SANTOS desenvolveu um programa computacional para automatizar o cálculo das placas de base, sendo as espessuras das mesmas fornecidas segundo a abordagem elástica e plástica.

FREITAS (2002) realizou ensaios em placas de base variando a excentricidade de carga para uma mesma espessura de placa de base. Observou-se que para excentricidades elevadas, o colapso se deve ao escoamento da placa de base, e para excentricidades mais próximas do núcleo (parte interna do tubo), o mesmo não ocorre, sendo que o bloco exerce forte contribuição na resistência do conjunto. Com relação às avaliações teóricas, a teoria de uma viga em balanço com carregamento uniformemente distribuído utilizada para avaliar a resistência da placa de base, conduz a resultados conservadores apesar da simplicidade de sua utilização. Os ensaios e os resultados dos mesmos serão apresentados e analisados no decorrer deste trabalho.

Foram realizadas muitas pesquisas experimentais e teóricas sobre o assunto, mas mesmo assim, a maioria das normas atuais, entre elas a NBR8800 (1986), traz poucas informações sobre o comportamento real dessas. É importante observar também que todas as pesquisas experimentais e teóricas não foram realizadas em placas de base de colunas tubulares.

Portanto, nesse trabalho, foram desenvolvidos estudos teóricos-experimentais do comportamento das ligações de placas de base de colunas em perfil tubular circular solicitados à força axial e momento fletor, de modo a avaliar e comparar os resultados experimentais com as avaliações teóricas apresentadas nas normas e literaturas sobre o assunto.

De acordo com o descrito no parágrafo anterior, foi montada uma estrutura para o presente trabalho que será apresentado a seguir, através de uma descrição sucinta do conteúdo dos capítulos.

No capítulo 2 é apresentada uma descrição dos tipos de ligações de base de colunas tubulares e como deve ser o procedimento de cálculo recomendado pela maioria dos autores, levando-se em consideração o tipo de carregamento e a excentricidade da aplicação desse carregamento na coluna.

No capítulo 3 é apresentado o programa experimental que contém o projeto das placas de base, o esquema de montagem dos ensaios, a instrumentação e a metodologia de ensaio.

No capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais dos ensaios e também o resultado da caracterização do material das placas de base dos protótipos.

No capítulo 5 é realizado um estudo sobre as deformações específicas e uma análise dos resultados dos ensaios realizados, onde a partir das deformações obtidas no laboratório, foram calculadas as tensões principais que produziram as deformações nas placas de base ensaiadas.

No capítulo 6 é realizada a avaliação e a comparação dos resultados experimentais com o dimensionamento de placas de base de colunas tubulares de acordo com a literatura sobre o assunto.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e as considerações finais do trabalho desenvolvido.

Em relação aos anexos, no anexo I são apresentadas as planilhas das deformações e deslocamentos dos ensaios dos protótipos. No anexo II são apresentadas as planilhas de obtenção das tensões principais nas placas de base dos ensaios. No anexo III são apresentados os gráficos das curvas de tensão do Ensaio 5 e no anexo IV as planilhas de onde foram obtidos os dados apresentados nos gráficos de comparação dos resultados deste trabalho.

2. DIMENSIONAMENTO DE PLACAS DE BASE DE COLUNAS TUBULARES

2.1. INTRODUÇÃO

As placas de base são usadas para fazer a ligação da extremidade inferior da coluna, ou seja, a base da coluna, com o elemento de apoio, geralmente um bloco de concreto, e tem por finalidade distribuir adequadamente a pressão da coluna sobre uma determinada área de fundação sem exceder a resistência do concreto e garantir a fixação da extremidade da coluna. A fixação da placa de base no bloco é feita por chumbadores, que também são usados para posicionar a coluna no bloco durante a montagem. Esse tipo de ligação de base feita através de placa de base é o mais usual, e seu desempenho é muito significativo no comportamento global da estrutura, como distribuição de esforços, deslocamentos e estabilidade da estrutura.

As placas de base de colunas podem estar submetidas a tipos de carregamento que dependem da excentricidade da aplicação da carga. A conexão entre a coluna e a chapa de base depende da combinação desses carregamentos atuantes, podendo assim ser classificada de acordo com a restrição ao giro em bases flexíveis ou rígidas, como está mostrado na figura 2.1.

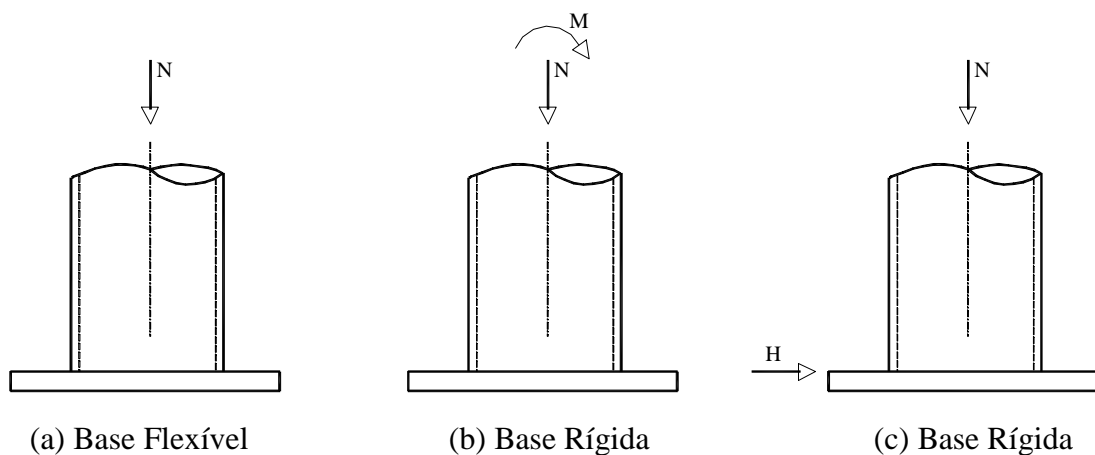


Figura 2.1 – Tipos de placas de base.

As bases flexíveis, que também são chamadas de rotuladas, figura 2.1(a), não oferecem restrição ao giro e são utilizadas para colunas com carregamento centrado, onde praticamente toda a placa de base está submetida à compressão. Neste caso a ancoragem através dos chumbadores não é essencial para o equilíbrio do sistema, sendo solicitados apenas durante a montagem. A base rotulada ideal é aquela que se assemelha à rótula perfeita, mas é de pouco uso e pode ser de difícil fabricação. A base rotulada mais simples e mais usada para colunas tubulares é aquela formada por uma placa soldada no pé da coluna e pela colocação de quatro chumbadores (figura 2.2). As bases rotuladas são mais econômicas para as fundações e podem ser usadas em qualquer tipo de terreno, em especial em locais de solo com baixa resistência.

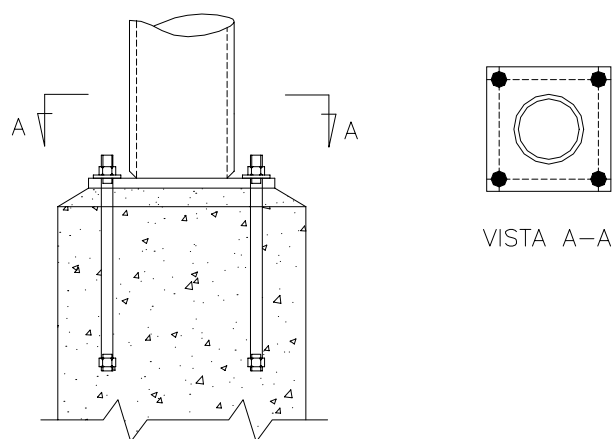


Figura 2.2 – Detalhe típico de bases flexíveis e bases rígidas para colunas tubulares.

As bases rígidas, que também são chamadas de engastadas, figura 2.1b, possuem restrição ao giro e transmitem cargas axiais e momentos fletores para a fundação, nesse caso a ancoragem realizada pelos chumbadores passa a ser importante e responsável pelo equilíbrio. As bases engastadas são as que propiciam estruturas mais econômicas, porém com fundações mais caras que as rotuladas, tendo por finalidade engastar os pilares às fundações através de uma série de artifícios, tornando-as o mais real possível com relação ao esquema estrutural adotado. São dimensionadas para resistir às cargas verticais, horizontais e aos momentos de engastamento.

A base engastada mais simples e mais usada para colunas tubulares também é aquela em que se solda a coluna, colocando-se quatro chumbadores, assim como as

bases flexíveis (figura 2.2). Quando as cargas são elevadas e o cálculo indica chapas com grandes espessuras, usa-se o artifício de enrijecê-las com pequenas nervuras, reduzindo-se assim a espessura das mesmas como mostra a figura 2.3.

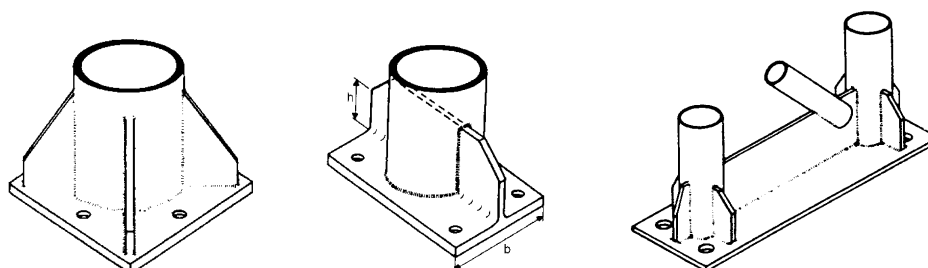


Figura 2.3 – Detalhes típicos de bases rígidas para colunas tubulares com nervuras.

O tipo de base mostrado na figura 2.1c trata-se de placa de base com uma carga horizontal ou cisalhante, além da carga axial, e são chamadas também de bases rígidas. Geralmente a componente de cisalhamento é menor em relação ao atrito desenvolvido e o esforço cisalhante deve ser considerado quando o contraventamento é conectado à base do pilar, sendo resistido pela resistência dos chumbadores ao cisalhamento. O cisalhamento pode ser resistido através do atrito ou do aparecimento de reações na direção horizontal. Quando o cisalhamento exceder a resistência ao atrito e a resistência dos chumbadores, este deve ser transferido para a fundação de uma outra maneira. Uma alternativa é a colocação de uma placa de cisalhamento como mostrado na figura 2.4.

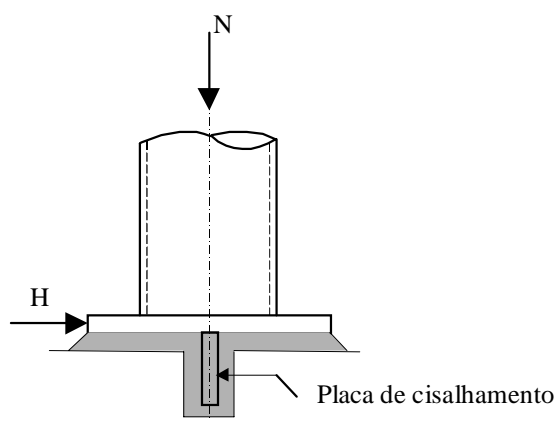


Figura 2.4 – Detalhe típico de base semi-rígida para colunas tubulares com barra de cisalhamento.

De acordo com MCGUIRE (1968) é fundamental o conhecimento do comportamento momento-giro da fundação do pilar para o entendimento da resposta dos pilares de base plana às cargas e às deformações da estrutura.

Considerando o pórtico da figura 2.5, assume-se que as bases dos pilares estão rigidamente fixadas, assumindo-se que, inicialmente, os pilares serão carregados axialmente como mostra a figura 2.5(a). Se o solo for uniforme, a distribuição de tensões ao final de cada bloco será simétrica e não haverá momento fletor na base do pilar. Se uma carga horizontal for aplicada, o pilar deformará conforme figura 2.5(b). A fundação deve ser solo firme ou rocha, e o bloco de concreto deve ser ajustado para que não deforme a fundação significativamente, onde cada base de pilar será efetivamente engastada.

Se por outro lado, o solo for compressível ou o tamanho do bloco de concreto for inadequado, o pilar poderá deformar-se como mostra a figura 2.5(c). Uma pequena resistência ao giro pode ser admitida e, independentemente da rigidez da conexão da base, cada pilar poderá comportar-se como se estivesse articulado a esta base. A situação é análoga àquela de uma viga de grande porte conectada rigidamente a um pilar muito flexível, apesar da ligação rígida, o momento na extremidade da viga é insignificante, desta forma, a ligação torna-se irrelevante. O projetista de fundação é que deve determinar se o solo é capaz de oferecer resistência ao giro e, se for, garantir que o bloco de concreto e a placa de base sejam capazes de transmitir o momento solicitado. Dessa forma é assumido que a fundação tenha capacidade de resistir a qualquer momento transmitido a ela sem deformar-se significativamente.

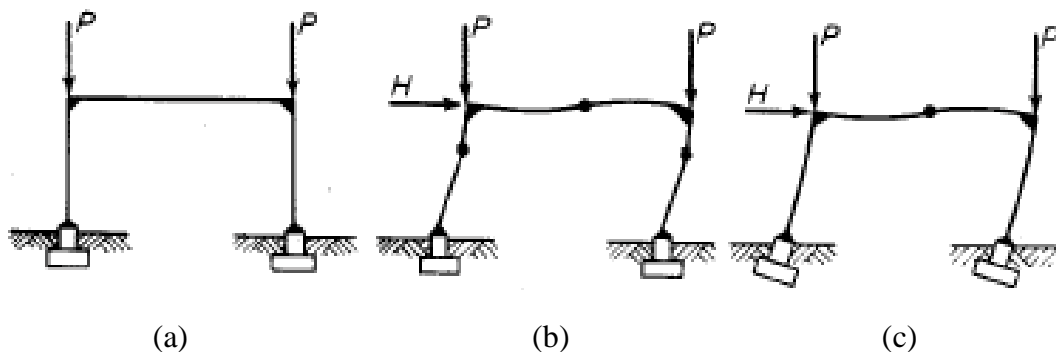


Figura 2.5 – Condições de vinculação das bases dos pilares (McGuire, W.(1968)).

Não se levando em consideração as características do solo, as variáveis mais importantes que fazem parte da relação momento-giro da ancoragem das bases dos pilares são: as dimensões das placas de base; a localização, dimensões e características da relação tensão-deformação dos chumbadores; as dimensões e relação tensão-deformação característica do bloco de concreto e o carregamento vertical aplicado no pilar.

Para o dimensionamento das chapas de base, os esforços de compressão e momento transmitidos à barra fornecem a espessura da chapa de base e os esforços de tração, momento e cortante serão utilizados no dimensionamento dos chumbadores.

MCGUIRE define em cinco estágios a resposta da base à carga vertical e aos momentos crescentes aplicados na base da coluna, de acordo com a figura 2.6. O cisalhamento horizontal aplicado na base da coluna não influencia no comportamento da mesma, exceto se o momento e a carga vertical são relativamente pequenos, visto que o cisalhamento só é considerado no dimensionamento do chumbador.

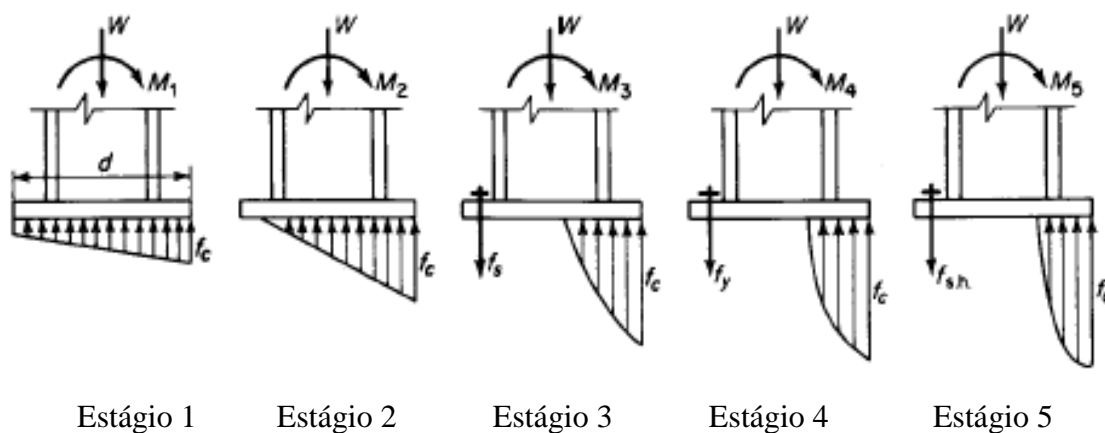


Figura 2.6 – Efeito da variação do momento na base da coluna (McGuire, W. (1968)).

No estágio 1 mostrado na figura 2.6, o pilar está submetido a baixos valores de momento. A distribuição de tensões sob a placa pode não ser linear, mas é considerado linear para análise. O estágio 2 abrange o trecho em que o momento varia do ponto que causa tensão nula na borda da placa de base ao ponto em que a tensão nula atinge o primeiro chumbador. Os chumbadores não são solicitados durante os estágios 1 e 2 ,

pois são indiferentes do ponto de vista estrutural, visto que ainda não estão solicitados. No estágio 3 o chumbador tracionado começa a escoar, e a partir deste estágio, a tensão de compressão no concreto terá atingido uma magnitude tal, que a distribuição de tensões será claramente não linear. O estágio 4 abrange a faixa de escoamento dos chumbadores mais solicitados e termina quando eles começam a se deformar. Por fim, o estágio 5 abrange condições sobre as quais os chumbadores mais solicitados se deformam até atingirem o colapso. A resistência pode ser determinada em qualquer estágio pelo esmagamento do concreto ou arrancamento dos chumbadores tracionados. Assumindo que tais rupturas possam ser desprezadas, a evolução do carregamento aplicado fornece um bom quadro qualitativo do comportamento do momento resistente da placa, considerando que apenas o bloco de concreto e os chumbadores tracionados estão sendo analisados.

Neste trabalho, a análise das placas de base contempla apenas bases com comportamento uniforme e sem a utilização de enrijecedores na coluna.

O método de cálculo para bases de colunas, recomendado pela maioria dos autores segue uma concepção básica que será descrita a seguir e será apresentado o dimensionamento das placas de base utilizando o desenvolvimento de cálculo de RAUTARUUKKI (1998), que é baseado na European Committee for Standardisation EUROCODE3 (1992), e de DEWOLF & RICKER (1990), que é baseado na American Institute of Steel Construction AISC (1989).

A área necessária da placa é determinada primeiramente em função da pressão de contato do elemento de fundação, obtida em função da reação à solicitação vinda do pilar.

2.2. PRESSÃO DE CONTATO

Como foi dito no item anterior, primeiro é necessário determinar a resistência do concreto à pressão de contato da coluna com o bloco de concreto da fundação antes de calcular a placa de base propriamente dita. A área da placa de base é obtida segundo a pressão de contato com a superfície de concreto, portanto a tensão resultante dos esforços solicitantes transmitidos pela base não deverá superar a resistência do concreto, uma vez que o esmagamento do concreto também constitui um estado limite último.

$$\sigma \leq \sigma_c = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = f_{cd} \quad (2.1)$$

Para base submetida à compressão axial simples:

$$\sigma = \frac{N_{Sd}}{A_b} \Rightarrow A_b = \frac{N_{Sd}}{f_{cd}} \quad (2.2)$$

Para base submetida à compressão axial e momento fletor:

$$\sigma = \frac{N_{Sd}}{A_b} + \frac{M_{Sd} \cdot y_{CG}}{I_b} \Rightarrow f_{cd} \cdot B \cdot L^2 - N_{Sd} \cdot L - 6 \cdot M_{Sd} = 0 \quad (2.3)$$

Onde,

σ = tensão resultante dos esforços solicitantes;

σ_c = tensão resistente do concreto;

f_{ck} = resistência característica do concreto à compressão;

γ_c = coeficiente de ponderação do concreto, sendo $\gamma_c = 1,4$;

f_{cd} = resistência de cálculo do concreto à compressão;

N_{Sd} = força axial solicitante de cálculo;

A_b = área da superfície da placa de base;

M_{Sd} = momento fletor solicitante de cálculo;

I_b = momento de inércia da superfície da placa de base;

y_{CG} = distância entre posição do centro de gravidade da placa de base e a borda analisada;

B = largura da placa de base;

L = comprimento da placa de base.

A pressão de contato admissível de cálculo, p , é função da resistência do concreto e da relação entre as áreas do concreto e da placa, como mostrado a seguir:

$$p = \phi \cdot 0,7 \cdot f_{ck} \cdot \sqrt{\frac{A_c}{A_b}} \leq \phi \cdot 1,4 \cdot f_{ck} \quad (2.4)$$

Onde,

A_c = área da superfície do bloco de concreto homotética em relação à A_b ;

ϕ = coeficiente de resistência.

Quando as dimensões do bloco de concreto são conhecidas, pode se adotar o maior dos dois valores dados pelas equações 2.5 e 2.6 a seguir para área da placa de base:

$$A_b = \frac{N_{sd}}{\phi \cdot 1,4 \cdot f_{ck}} \quad (2.5)$$

$$A_b = \frac{1}{A_c} \cdot \sqrt{\frac{N_{sd}}{\phi \cdot 1,4 \cdot f_{ck}}} \quad (2.6)$$

2.3. DIMENSIONAMENTO DE BASES FLEXÍVEIS

As bases flexíveis, como mostrado na figura 2.7, são aquelas solicitadas apenas aos esforços normais de compressão aplicados axialmente na coluna e deve ser dimensionada de tal forma que a restrição ao giro seja o menor possível.

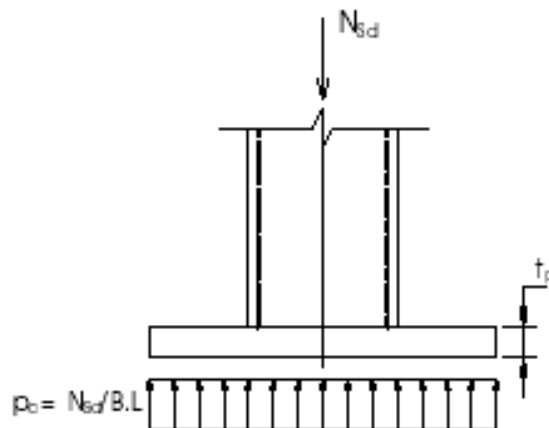


Figura 2.7 – Detalhe típico de base flexível.

A placa de base deve ser dimensionada para comportar-se como uma placa rígida, podendo-se admitir que a pressão de contato seja uniformemente distribuída ao longo da placa. O comportamento dessa placa rígida é considerado pela maioria dos autores semelhante à de uma viga em balanço com carregamento distribuído devendo ser calculado o momento fletor em torno de uma seção crítica. Segundo RAUTARUUKKI (1998) a seção crítica é localizada na face externa da coluna e o balanço da viga utilizado no cálculo é conforme mostrado na figura 2.8. A norma brasileira NBR8800 (1986) também considera a seção crítica como sendo na face externa da coluna. Já para DEWOLF & RICKER (1990) a seção crítica é maior e interna a coluna e o balanço da viga utilizado no cálculo é conforme mostrado na figura 2.9.

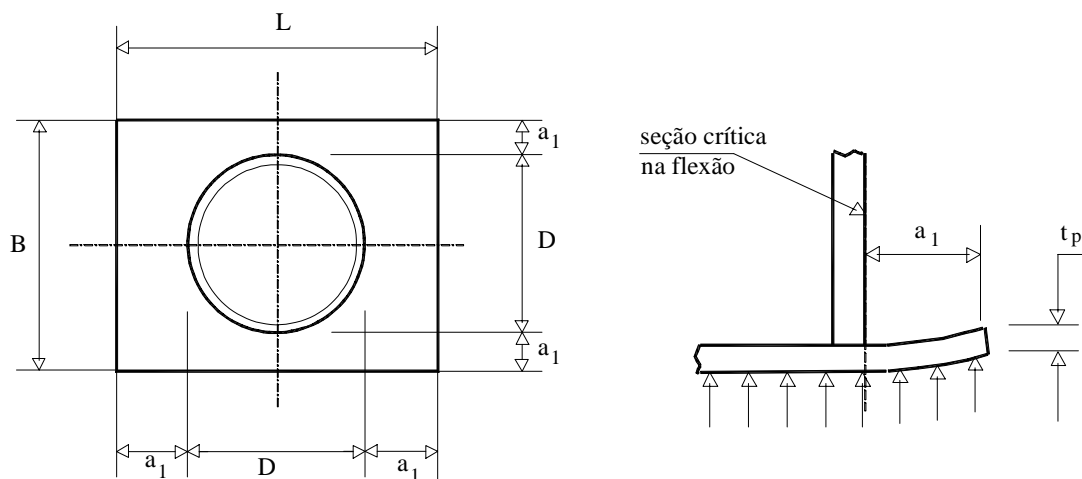


Figura 2.8 – Detalhe seção crítica da viga em balanço e sua projeção de acordo com RAUTARUUKKI.

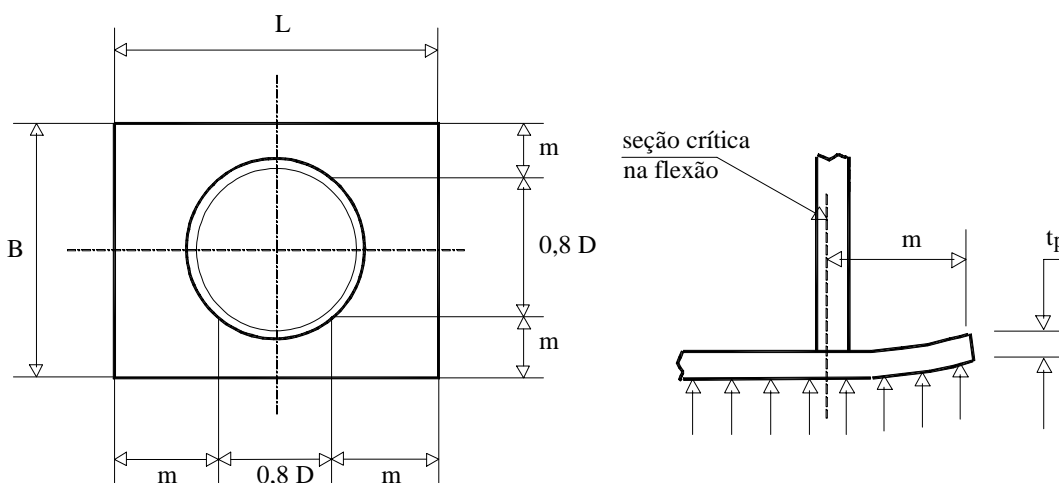


Figura 2.9 – Detalhe seção crítica da viga em balanço e sua projeção de acordo com DEWOLF & RICKER.

Onde,

D = diâmetro externo da coluna tubular circular;

t_p = espessura da placa de base;

m = projeção da placa de base utilizada na analogia de viga em balanço segundo DEWOLF & RICKER;

a_1 = projeção da placa de base utilizada na analogia de viga em balanço segundo RAUTARUUKKI.

O tratamento de cálculo para o dimensionamento das espessuras das placas divide-se em duas abordagens, uma que assume a hipótese da placa trabalhando no regime elástico, adotado por RAUTARUUKKI e DEWOLF & RICKER; e outra que assume a hipótese da placa trabalhando no regime plástico, adotado pelo manual do AISC-LRFD (1996) e PACKER (1997). O dimensionamento baseado no regime plástico sempre resulta em placas mais finas por possibilitar um aproveitamento maior da capacidade resistente da placa. Nesse trabalho será adotada apenas a hipótese da placa trabalhando no regime elástico.

A maior projeção entre o tubo e a borda da placa será tratada como uma viga em balanço, com momento máximo no engaste. Para RAUTARUUKKI, essa projeção é considerado o valor de “a₁” e para DEWOLF é “m”, como mostram as figuras 2.8 e 2.9.

A tensão na placa devido à pressão de contato é:

$$p_c = \frac{N_{Sd}}{A_b} \quad (2.7)$$

Assumindo uma faixa, por unidade de largura, da placa em balanço, obtém-se o momento fletor no engaste da projeção da placa de base:

$$M_{engaste} = \frac{p_c \cdot a_1^2 \cdot B}{2} \quad \text{para RAUTARUUKKI} \quad (2.8)$$

$$M_{engaste} = \frac{p_c \cdot m^2 \cdot B}{2} \quad \text{para DEWOLF \& RICKER} \quad (2.9)$$

$$\text{Maior entre: } a_1 = \frac{L-D}{2} \quad \text{ou} \quad a_1 = \frac{B-D}{2} \quad (2.10)$$

$$\text{Maior entre: } m = \frac{L-0,8 \cdot D}{2} \quad \text{ou} \quad m = \frac{B-0,8 \cdot D}{2} \quad (2.11)$$

A resistência de cálculo desta seção transversal da placa, por unidade de largura, segundo regime elástico, torna-se:

$$M_{el,Rd} = \phi_b \cdot W \cdot f_y \quad (2.12)$$

Respeitando a relação $M_{Rd} \geq M_{Sd}$, obtém-se a espessura da placa, igualando o máximo momento de cálculo, à resistência de cálculo ao momento fletor:

$$t_p = \sqrt{\frac{M_{\text{borda}} \cdot 6}{\phi_b \cdot B \cdot f_y}} \quad (2.13)$$

Sendo,

W = módulo resistente elástico da superfície da placa de base;

f_y = tensão de escoamento do aço da placa de base;

ϕ_b = coeficiente de resistência;

γ_{MO} = coeficiente de ponderação utilizado pelo EUROCODE3;

p_c = pressão de contato admissível de cálculo;

M_{engaste} = momento fletor solicitante de cálculo no engaste da projeção da placa de base;

$M_{\text{el, Rd}}$ = momento fletor resistente de cálculo no regime elástico.

2.4. DIMENSIONAMENTO DE BASES RÍGIDAS

As bases rígidas, como mostrado na figura 2.10, são aquelas solicitadas a esforço normal de compressão e momento fletor, aplicados na coluna e deve ser dimensionada de tal forma que a restrição à rotação seja a maior possível, aproximando-se da hipótese assumida no cálculo da estrutura, ou seja, engastamento.

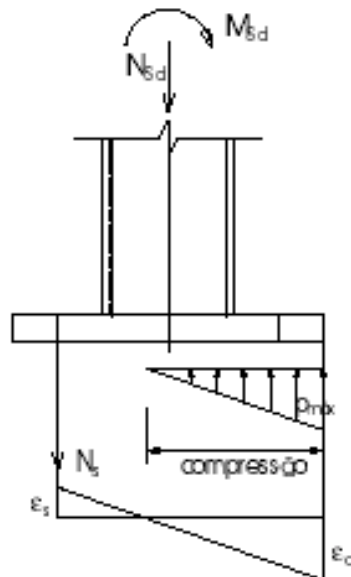


Figura 2.10 – Detalhe típico de base rígida.

Conforme mostrado anteriormente, existem duas abordagens para o dimensionamento de bases submetidas à carga axial e momento fletor. A primeira baseada no comportamento elástico e a segunda baseada no comportamento plástico. Neste trabalho será abordada a placa de base trabalhando no regime elástico.

O dimensionamento da placa de base depende da excentricidade da carga axial a coluna e incidente na placa de base, ou seja, da grandeza do momento fletor aplicado na placa e pode ser classificada em:

- Pequena excentricidade, figura 2.11(a):

$$e \leq \frac{L}{6}$$

- Excentricidade moderada, figura 2.11(b):

$$\frac{L}{6} < e \leq \frac{L}{3}$$

- Grande excentricidade, figura 2.11(c):

$$e > \frac{L}{3}$$

Para excentricidades pequenas e moderadas de acordo com as figuras 2.11(a) e 2.11(b), a força axial é resistida somente pelo contato entre a placa de base e o bloco de concreto. Para grandes excentricidades como na figura 2.11(c), é necessário o uso de chumbadores. Nesse caso, assume-se que o valor máximo da tensão de contato, seja igual a resistência de cálculo à compressão do concreto, f_{cd} .

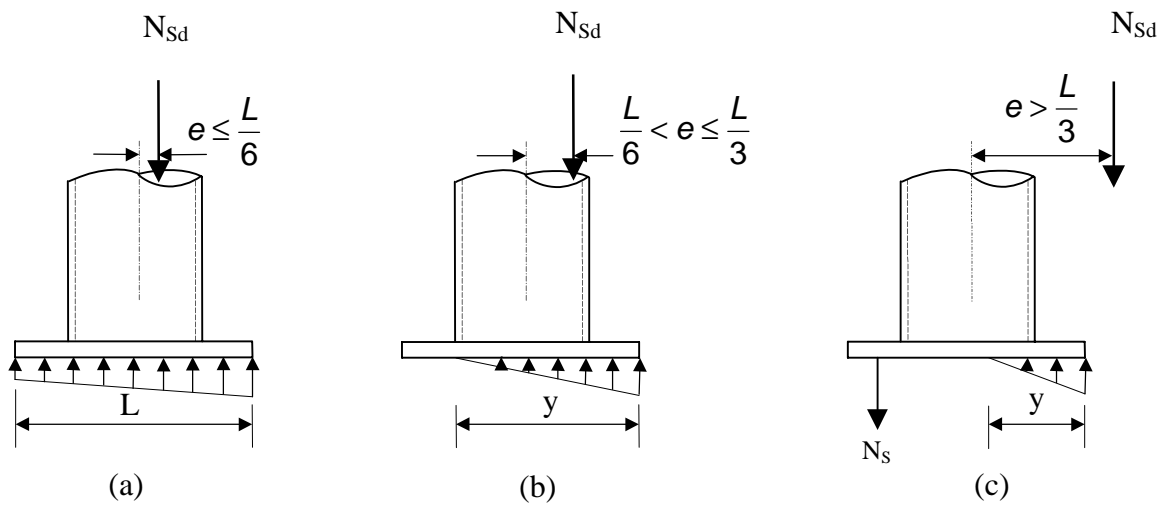


Figura 2.11 – Classificação das placas de base de acordo com a excentricidade da força axial de compressão (a) pequena excentricidade; (b) excentricidade moderada; (c) grande excentricidade.

Onde,

N_{Sd} = força axial de cálculo atuando na barra;

N_S = força atuante nos chumbadores localizados na zona tracionada da placa de base;

L = comprimento da placa de base;

e = excentricidade do carregamento;

y = posição da linha neutra.

De acordo com a figura 2.12, quando a excentricidade “ e ” $> L/6$, assume-se que a tensão de contato seja máxima na extremidade da placa onde ocorre o contato, e que decresça linearmente até uma distância y . Para a situação em que “ e ” $\leq L/6$, o contato ocorre em toda a extensão da placa de base, não havendo, portanto tração nos chumbadores.

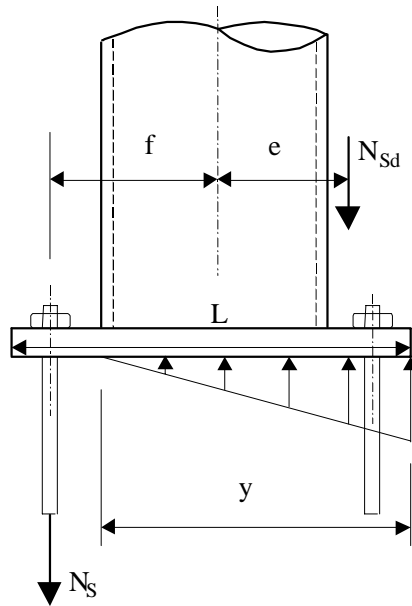


Figura 2.12 – Detalhe típico de placa de base com “e” > L/6 onde os chumbadores são tracionados.

Onde, f = distância entre os chumbadores tracionados e o centro da placa de base.

Através das equações de equilíbrio de forças e momentos (equações 2.14 e 2.15), juntamente com a representação do comportamento elástico do concreto do bloco e os chumbadores de aço conforme a equação de compatibilidade de deformação (equação 2.16), obtendo uma relação entre deslocamentos e deformações (figura 2.13), tem-se um polinômio de 3º grau, cuja incógnita é a posição da linha neutra y.

Equações de equilíbrio:

$$\Sigma F_v = 0 \Rightarrow N_{sd} + N_s = N_c = \frac{P_{\max} \cdot y \cdot L}{2} \quad (2.14)$$

$$\Sigma M = 0 \Rightarrow N_s \cdot f + (N_{sd} + N_s) \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{y}{3}\right) - N_{sd} \cdot e = 0 \quad (2.15)$$

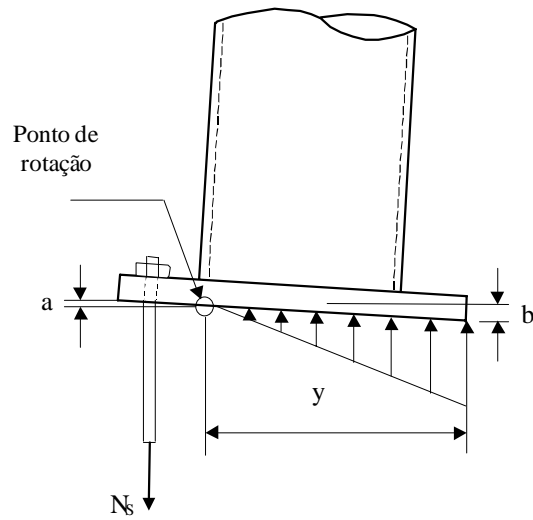


Figura 2.13 – Representação do comportamento elástico da base do pilar.

Equações de compatibilidade de deformação:

$$\frac{a}{b} = \frac{\frac{L}{2} + f - y}{y} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_c} = \frac{\frac{\sigma_s}{E_s}}{\frac{p_{\text{máx}}}{E_c}} = \frac{N_s}{A_s \cdot p_{\text{máx}}} \cdot \frac{E_c}{E_s} \quad (2.16)$$

Fazendo:

$$n_e = \frac{E_s}{E_c} \quad (2.17)$$

Substituindo a equação 2.17 em 2.16, vem:

$$\frac{\epsilon_s}{\epsilon_c} = \frac{N_s}{A_s \cdot p_{\text{máx}}} \cdot \frac{1}{n_e} \quad (2.18)$$

Onde:

N_c = resultante da pressão de contato atuante na placa de base;

$p_{\text{máx}}$ = pressão de contato máxima;

B = largura da placa de base;

a e b = deslocamentos indicados na figura 2.13;

ϵ_s = deformação do chumbador;

ϵ_c = deformação do bloco de concreto;

σ_s = tensão resultante nos chumbadores tracionados;

E_s = módulo de elasticidade longitudinal do aço;

E_c = módulo de elasticidade longitudinal do concreto;

A_s = área de aço total dos chumbadores tracionados;

n_e = relação entre os módulos de elasticidade longitudinal do aço e do concreto.

Adotando um valor para A_s e eliminando-se as incógnitas no sistema formado pelas equações 2.14, 2.15 e 2.18, o problema está resolvido, resultando em uma equação do 3º grau na variável y :

$$y^3 + k_1 y^2 + k_2 y + k_3 = 0 \quad (2.19)$$

Os coeficientes k_1 , k_2 e k_3 são função da geometria da ligação, da área de aço dos chumbadores, A_s , e da excentricidade do carregamento, e são calculados pelas expressões:

$$k_1 = 3 \left(e - \frac{L}{2} \right) \quad (2.20)$$

$$k_2 = \frac{6n_e \cdot A_s}{L} (f + e) \quad (2.21)$$

$$k_3 = -k_2 \left(\frac{L}{2} + f \right) \quad (2.22)$$

Obtida a posição da linha neutra “y”, é possível calcular a força atuante nos chumbadores “N_s” e a pressão de contato máxima “p_{máx}”, conforme as equações 2.23 e 2.24.

$$N_s = \frac{N_{sd} \cdot \left(\frac{y}{3} + e - \frac{L}{2}\right)}{\frac{L}{2} - \frac{y}{3} + G} \quad (2.23)$$

$$P_{máx} = \frac{2 \cdot (N_s + N_{sd})}{y \cdot B} \quad (2.24)$$

Onde, G = módulo de elasticidade transversal do aço.

Será adotado o processo de cálculo de RAUTARUUKKI e de DEWOLF & RICKER, para o cálculo da espessura das placas de bases rígidas, da mesma forma que foi calculada a espessura da placa de base flexível.

Para qualquer caso de excentricidade o procedimento para calcular a espessura da placa de base é o mesmo, onde tanto para RAUTARUUKKI quanto para DEWOLF & RICKER, é necessário primeiramente calcular as pressões de contato da placa com o bloco de concreto. Com as pressões de contato encontradas é possível calcular o momento no engaste da projeção da placa de base, que é o maior momento que ocorre na placa, utilizando a analogia de viga em balanço. Para o cálculo do momento na engaste é admitido que a placa de base passa a ser uma placa de largura a₁ ou m e comprimento a₁ ou m, engastada em uma borda e livre na outra. Dessa forma, os autores trabalham com a hipótese de que existe uma contribuição do tubo da coluna na deformação da placa de base. Com o valor do momento no engaste, é realizada a relação de que o momento de solicitação deve ser menor ou igual ao momento resistente, e assim calcular a espessura da placa de base.

Para RAUTARUUKKI o comprimento da viga em balanço é representado por a₁ e para DEWOLF & RICKER o comprimento é representado por m, como mostram as figuras 2.14 e 2.15.

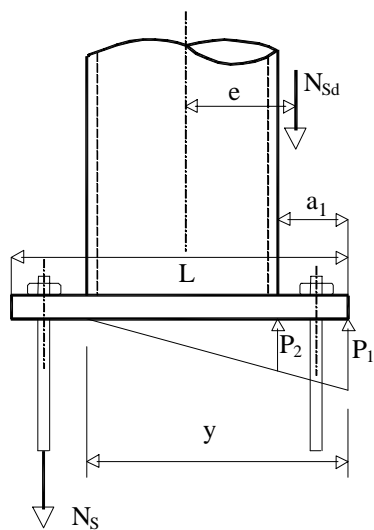


Figura 2.14 – Posições de p_1 , p_2 e a_1 na placa de base com carga excêntrica, de acordo com RAUTARUUKKI.

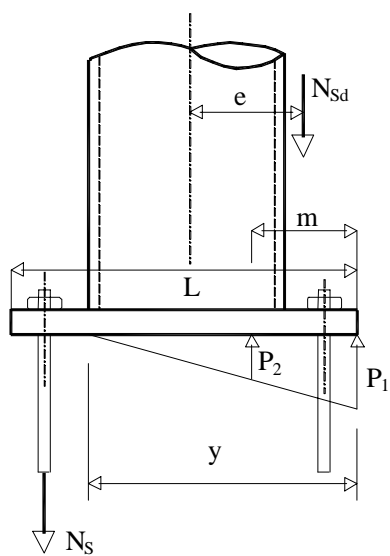


Figura 2.15 – Posições de p_1 , p_2 e m na placa de base com carga excêntrica, de acordo com DEWOLF & RICKER.

Como citado anteriormente, é necessário calcular inicialmente as pressões de contato, p_1 e p_2 (equações 2.25, 2.26 e 2.27), representado na figura 2.16, onde observa-se a projeção da placa, ou seja, o valor do comprimento da viga em balanço.

$$p_1 = \frac{N_{Sd}}{A_b} + \frac{M_{Sd}}{I_b} y_{CG} = \frac{N_{Sd}}{A_b} + \frac{M_{Sd}}{W} = \frac{N_{Sd}}{B \cdot L} + \frac{6 \cdot M_{Sd}}{B \cdot L^2} \quad (2.25)$$

$$p_2 = p_1 - \frac{12 \cdot M_{Sd}}{B \cdot L^3} a_1 \quad \text{para RAUTARUUKKI} \quad (2.26)$$

$$p_2 = p_1 - \frac{12 \cdot M_{Sd}}{B \cdot L^3} m \quad \text{para DEWOLF \& RICKER} \quad (2.27)$$

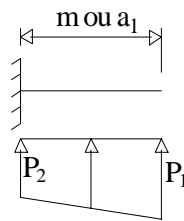


Figura 2.16 – Projeção da placa de base.

$$\text{Maior entre: } m = \frac{L - 0,8 \cdot D}{2} \quad \text{ou} \quad m = \frac{B - 0,8 \cdot D}{2} \quad (2.28)$$

$$\text{Maior entre: } a_1 = \frac{L - D}{2} \quad \text{ou} \quad a_1 = \frac{B - D}{2} \quad (2.29)$$

Onde,

$p_1 = p_{\text{máx}}$ = pressão de contato máxima na borda da placa de base;

p_2 = pressão de contato na posição de ligação entre o pilar e a placa;

N_{Sd} = força axial solicitante de cálculo;

M_{Sd} = momento fletor solicitante de cálculo;

A_b = área da superfície da placa de base;

I_b = momento de inércia da superfície da placa de base;

m = projeção da placa de base = comprimento da viga em balanço;

a_1 = projeção da placa de base = comprimento da viga em balanço;

D = diâmetro externo da coluna tubular circular.

Na abordagem elástica, tem-se nas equações 2.30 e 2.31 o cálculo do momento no engaste da viga em balanço e a equação 2.32 a espessura t_p requerida para a placa de base:

$$M_{\text{engaste}} = \left(\frac{p_2 \cdot a_1^2}{2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot a_1^2}{3} \right) \cdot B \quad \text{para RAUTARUUKKI} \quad (2.30)$$

$$M_{\text{engaste}} = \left(\frac{p_2 \cdot m^2}{2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot m^2}{3} \right) \cdot B \quad \text{para DEWOLF \& RICKER} \quad (2.31)$$

$$t_p = \sqrt{\frac{6 \cdot M_{\text{engaste}}}{\phi_b \cdot B \cdot f_y}} \quad (2.32)$$

Onde,

t_p = espessura da placa de base;

f_y = tensão de escoamento do aço da placa de base.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

O programa experimental consistiu em ensaios realizados em colunas curtas com placas de base conectadas através de chumbadores a uma base de concreto com resistência controlada. Os estudos experimentais foram realizados para avaliar a resistência de placas de base de colunas formadas por tubos metálicos circulares. A excentricidade de carregamento foi um parâmetro de análise e foram observados em cada ensaio o modo de colapso obtido e as conformidades deste com as avaliações teóricas.

Os estudos envolveram 5 ensaios onde a posição do carregamento e a espessura da placa de base foram variadas considerando-se as mesmas dimensões da mesma e da coluna. No primeiro ensaio, Ensaio 1, a excentricidade do carregamento foi igual a uma vez o raio externo do tubo da coluna, 84,15 mm, ou seja, próximo do núcleo central (área interna do tubo). No Ensaio 2, a excentricidade foi igual a duas vezes o raio externo do tubo da coluna, 168,3 mm, e o protótipo (Protótipo 1) foi o mesmo utilizado no Ensaio 1. Para o Ensaio 3 foi confeccionado um novo protótipo (Protótipo 2) semelhante ao Protótipo 1 e a excentricidade do carregamento foi a mesma do Ensaio 2, 168,3 mm. Nos Ensaios 4 e 5 foram construídos mais dois protótipos (Protótipo 3 e Protótipo 4) com as mesmas dimensões da placa de base dos Protótipos 1 e 2, mas com espessura da placa diferente e a mesma excentricidade de carregamento dos Ensaios 2 e 3.

Foi avaliada ainda a distribuição de deformações medidas através de extensômetros elétricos de resistência a cada etapa de carregamento, bem como a sua comparação com as diferentes excentricidades.

3.2. PROJETO DA PLACA DE BASE

Para avaliação da placa de base foram projetados protótipos com coluna curta tubular de seção transversal circular de comprimento definido para que não ocorressem

fenômenos como de flambagem da mesma. Para a aplicação de carga foi projetado um consolo na extremidade livre da coluna de forma a absorver os níveis de carga previstos. A placa de base foi dimensionada para níveis de cargas tais que o colapso ocorresse na placa de base que é o objeto da pesquisa em desenvolvimento. Nas figuras 3.1 a 3.3 têm-se as dimensões de projeto dos protótipos ensaiados.

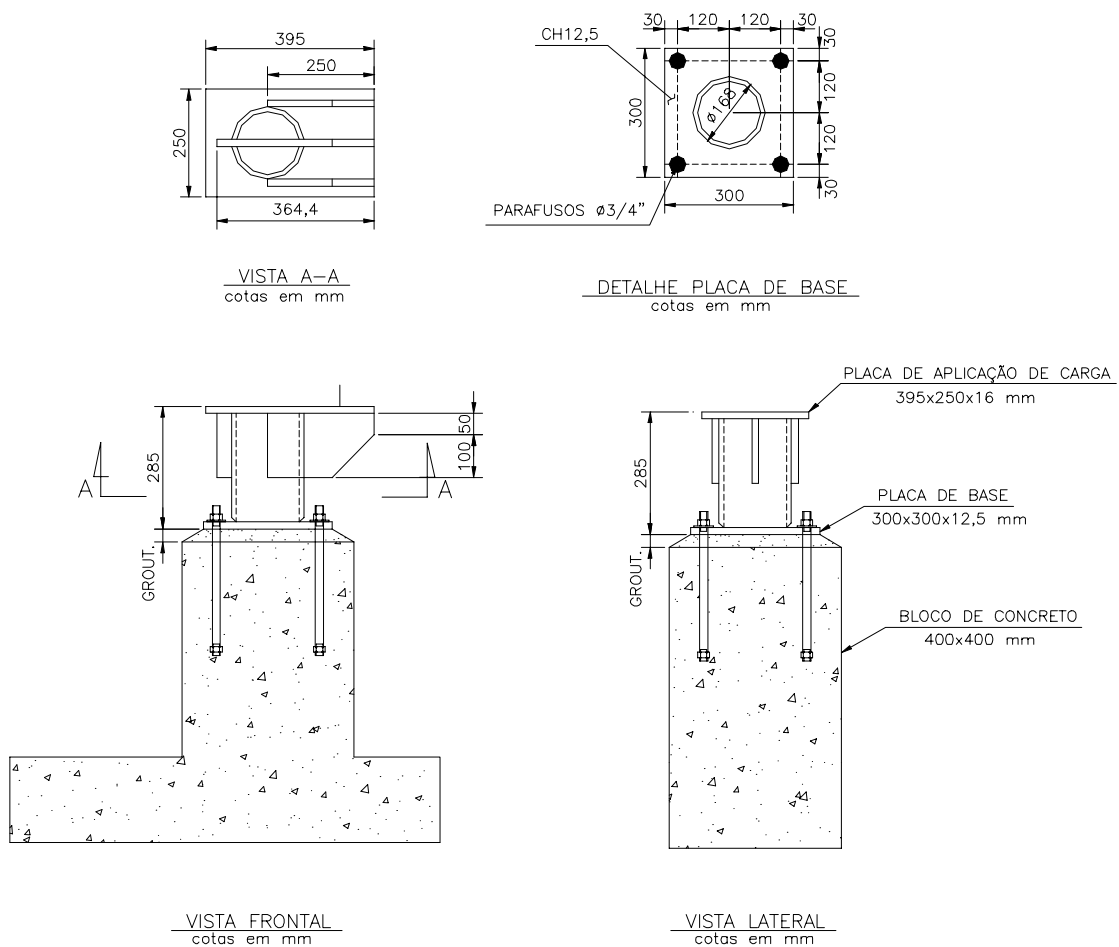
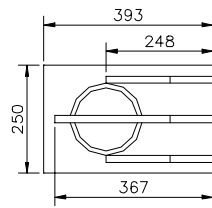
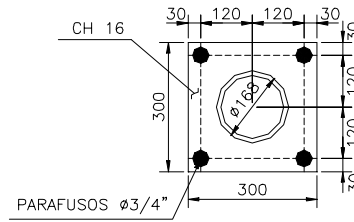


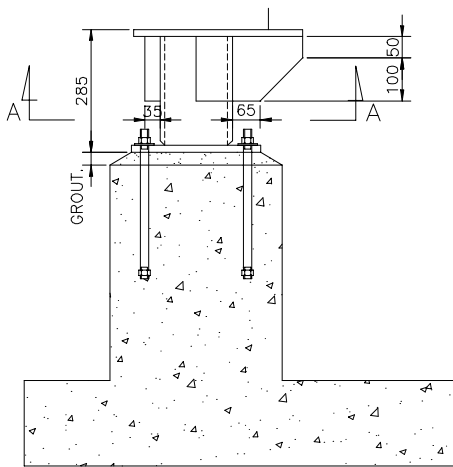
Figura 3.1 – Projeto dos Protótipos 1 e 2 (Ensaio 1, 2 e 3).



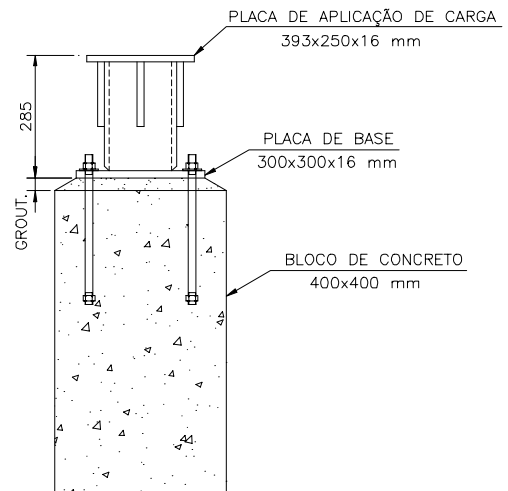
VISTA A-A
cotas em mm



DETALHE PLACA DE BASE
cotas em mm



VISTA FRONTAL
cotas em mm



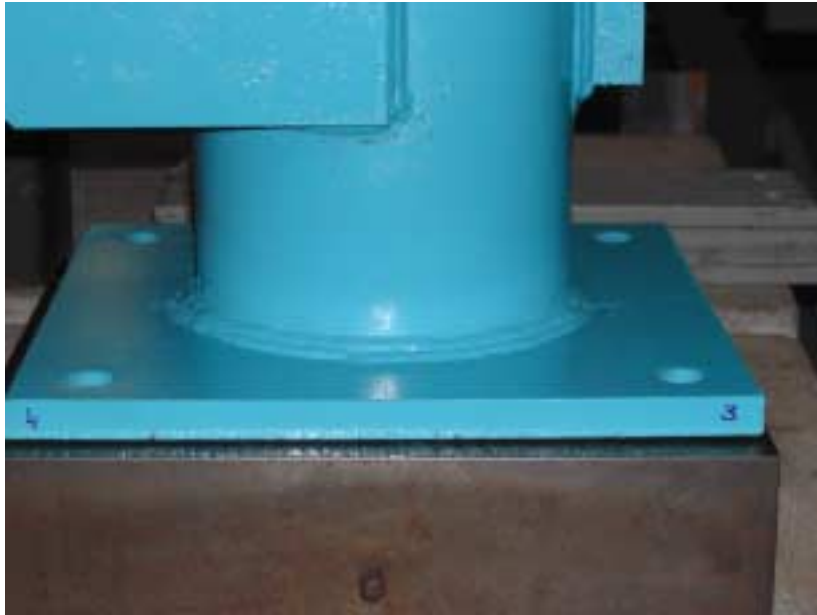
VISTA LATERAL
cotas em mm

Figura 3.3 – Projeto do Protótipo 4 (Ensaio 5).

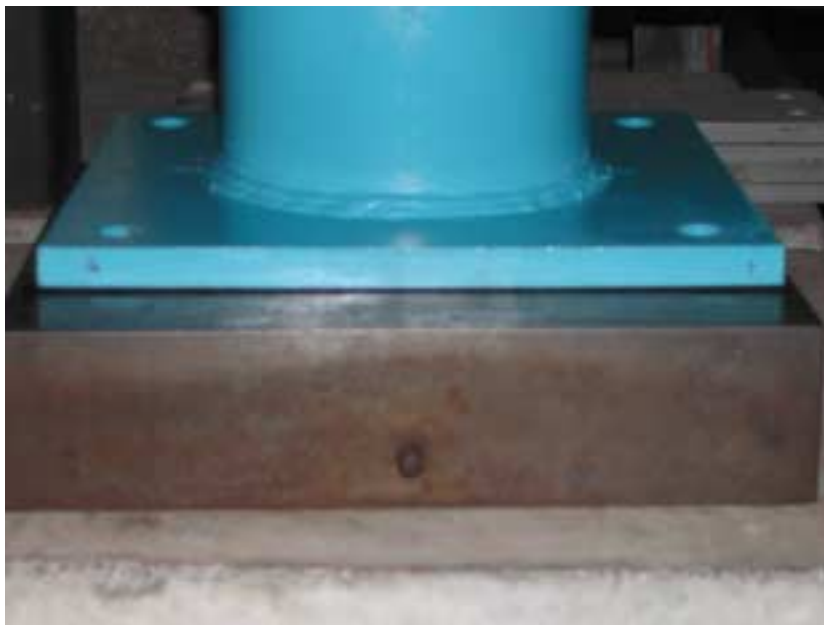
Observou-se a ocorrência de imperfeições de fabricação na placa de base em função de tensões residuais oriundas do aquecimento durante a execução das soldas de ligação (Figuras 3.4 a 3.6). As extremidades da placa de base foram deslocadas nas extremidades com uma curvatura em relação a vertical. Nas figuras 3.7 e 3.8 estão mostrados os valores dessas imperfeições para os Protótipos 3 e 4. Para os Protótipos 1 e 2 não foram medidas essas imperfeições.



Figura 3.4 – Foto das imperfeições nos Protótipos 1 e 2.

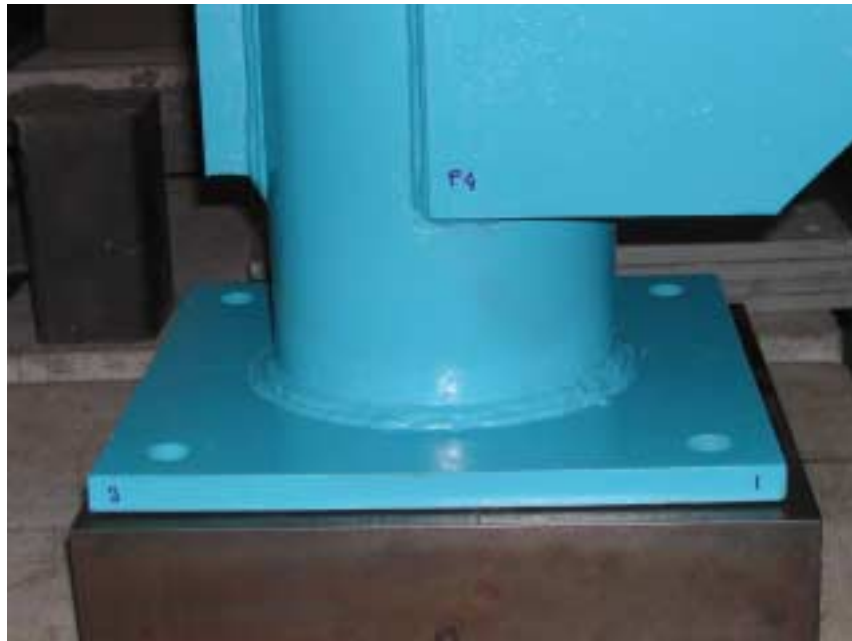


(a) Face 3-4 da placa de base.



(b) Face 1-2 da placa de base.

Figura 3.5 – Foto das imperfeições no Protótipo 3.



(a) Face 1-2 da placa de base



(b) Face 3-4 da placa de base

Figura 3.6 – Foto das imperfeições no Protótipo 4.

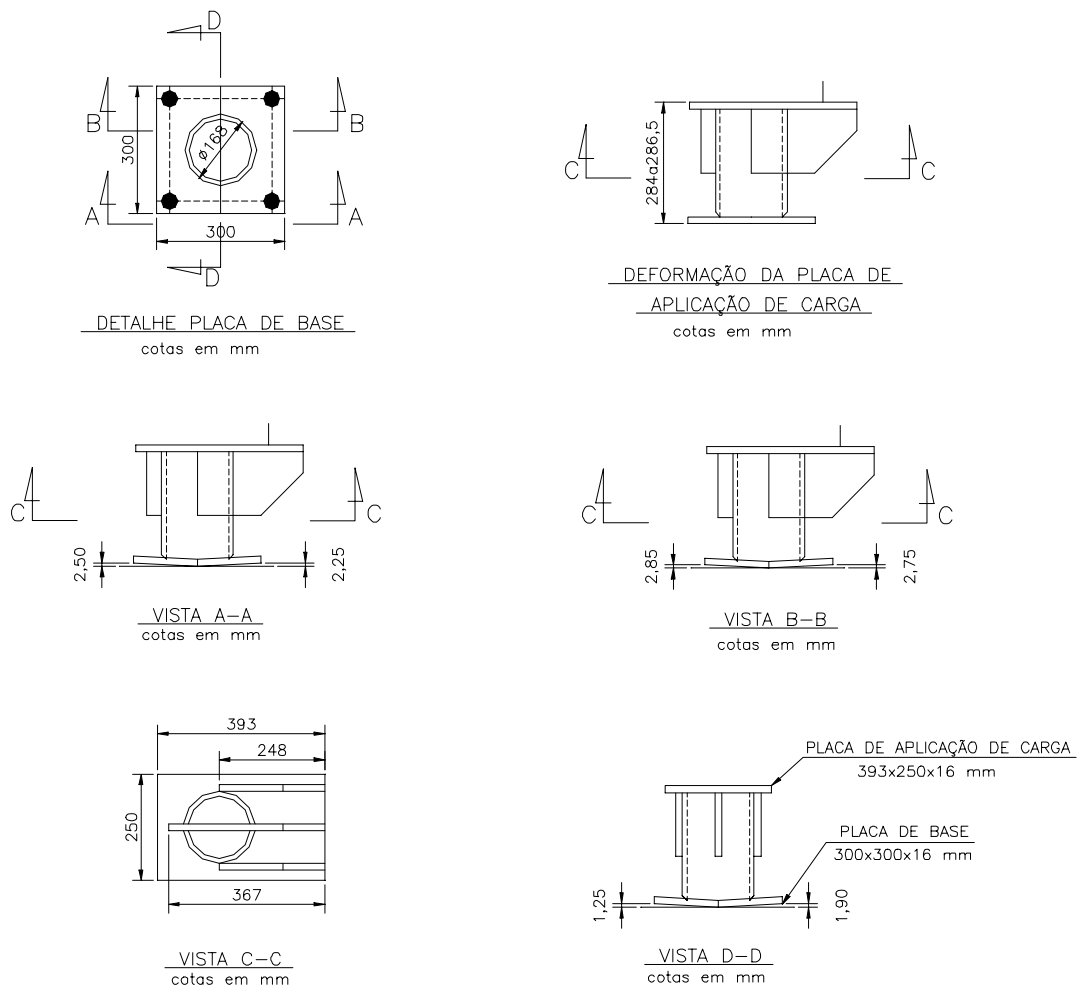


Figura 3.8 – Detalhe das deformações iniciais do Protótipo 4.

3.3. CONFECÇÃO DO BLOCO DE CONCRETO

Para a confecção do bloco de concreto foi utilizado cimento tipo ARI e com resistência a compressão (fck), igual a 20 MPa. Os ensaios de resistência do concreto a sete dias e nos dias dos Ensaio 1 e 2 estão apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Resistência do concreto medido através de ensaios em corpos de prova moldados no dia da concretagem do bloco de apoio.

Idade do concreto	fck do concreto (MPa)
7 dias	33,85
22 dias (Ensaio 1)	34,3
35 dias (Ensaio 2)	37,2

O bloco de concreto foi armado nas três direções utilizando barras de aço de diâmetro de 8,0 mm, de modo a evitar ruptura e danos no mesmo e ainda possibilitar sua fixação na laje de reação. A figura 3.9 ilustra o esquema de projeto do bloco. Observa-se que o furo previsto na base do bloco de apoio possibilita diversas posições do mesmo e conseqüentemente excentricidades variadas no protótipo utilizando-se para este fim um único bloco de concreto.

Após a retirada da forma do bloco foi executado o grout de aproximadamente 3 cm para nivelamento da superfície do mesmo e ajuste deste com o protótipo.

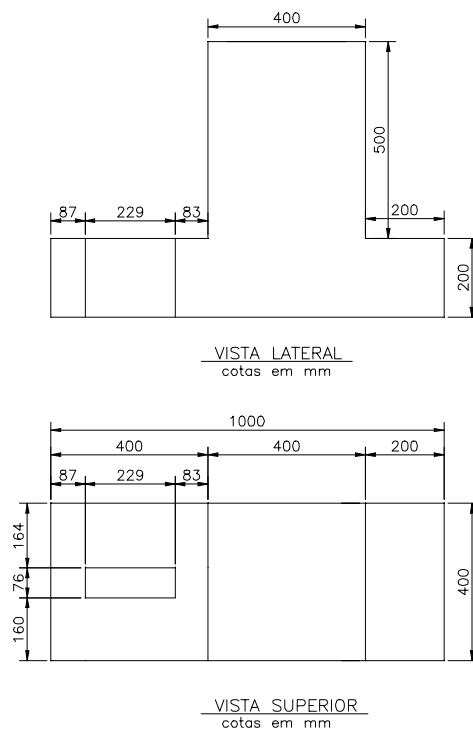


Figura 3.9 - Detalhes do bloco de apoio projetado para os ensaios dos Protótipos 1 a 4.

3.4. CHUMBADORES

Para a ancoragem da placa de base foram utilizadas 4 (quatro) barras de aço rosqueadas de diâmetro de $\frac{3}{4}$ " (19 mm) como chumbadores, com limite de escoamento (f_y) de aproximadamente 180 MPa.

Na extremidade inferior das barras foram utilizadas porcas de modo a possibilitar maior ancoragem da mesma.

A resistência dos chumbadores foi projetada de modo a induzir inicialmente o colapso da placa de base para posterior colapso das barras de aço (AISC (1998)).

3.5. MONTAGEM DOS ENSAIOS

Foram realizados 5 ensaios com duas excentricidades de carregamento. Os ensaios têm a nomenclatura de Ensaio 1, Ensaio 2, Ensaio 3, Ensaio 4 e Ensaio 5 e

possuem o mesmo esquema de montagem. As fotos das figuras 3.10, 3.11 e 3.12 ilustram o esquema geral de montagem dos ensaios realizados. A excentricidade do carregamento aplicado no protótipo foi igual ao raio externo do tubo para o Ensaio1 ($e_1 = 84,2 \text{ mm}$) e de duas vezes o raio externo para os Ensaios 2, 3, 4 e 5 ($e_2 = e_3 = e_4 = e_5 = 168,3 \text{ mm}$).

Inicialmente o bloco foi posicionado de modo a ter-se a excentricidade de carga de cada ensaio realizado. Após o posicionamento, o topo do bloco de apoio foi nivelado com gesso para eliminar os desníveis oriundos da concretagem. Na posição ajustada para a excentricidade da carga o bloco foi preso a laje de reação através de parafusos na região submetida à tração.

Em seguida a placa de base foi parafusada no bloco de apoio com o grout ainda trabalhável de modo a ajustar as imperfeições da placa de base. Para aperto das porcas utilizou-se torquímetro de modo a ter a mesma carga nas quatro barras de ancoragem do projeto.



Figura 3.10 – Esquema geral de montagem dos Ensaios 1, 2, e 3.



Figura 3.11 – Esquema geral de montagem do Ensaio 4.



Figura 3.12 – Esquema geral de montagem do Ensaio 5.

3.6. INSTRUMENTAÇÃO

Para a instrumentação dos corpos de prova foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER), transdutores de deslocamento, LVDT, defletômetros mecânicos, célula de carga, indicador de deformação e sistema automático de aquisição de dados.

Os extensômetros são do tipo linear, roseta a 45° e 90° e fabricados pela KYOWA e de modelos KFC-2-D16-11 (rosetas) e KFC-5-120-C1-11 (linear). Os extensômetros colocados na placa de base e nos chumbadores. Os extensômetros E1 e E2 estão localizados nos chumbadores tracionados de modo a monitorar as deformações

nos mesmos. As figuras 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16 mostram o posicionamento dos extensômetros na face superior e inferior da placa de base, e são identificados como:

- Ensaio 1 e 2 – E3 a E8 são do tipo roseta a 90° e o E9 linear.

Os extensômetros E3 e E4 foram posicionados no centro da placa e na sua face inferior. Estes extensômetros foram colados de modo a possibilitar a medida das deformações na região de menores deformações.

Os extensômetros E5 a E9 foram posicionados a 30 mm da face externa para coluna na face superior da placa para verificar as deformações nessas regiões.

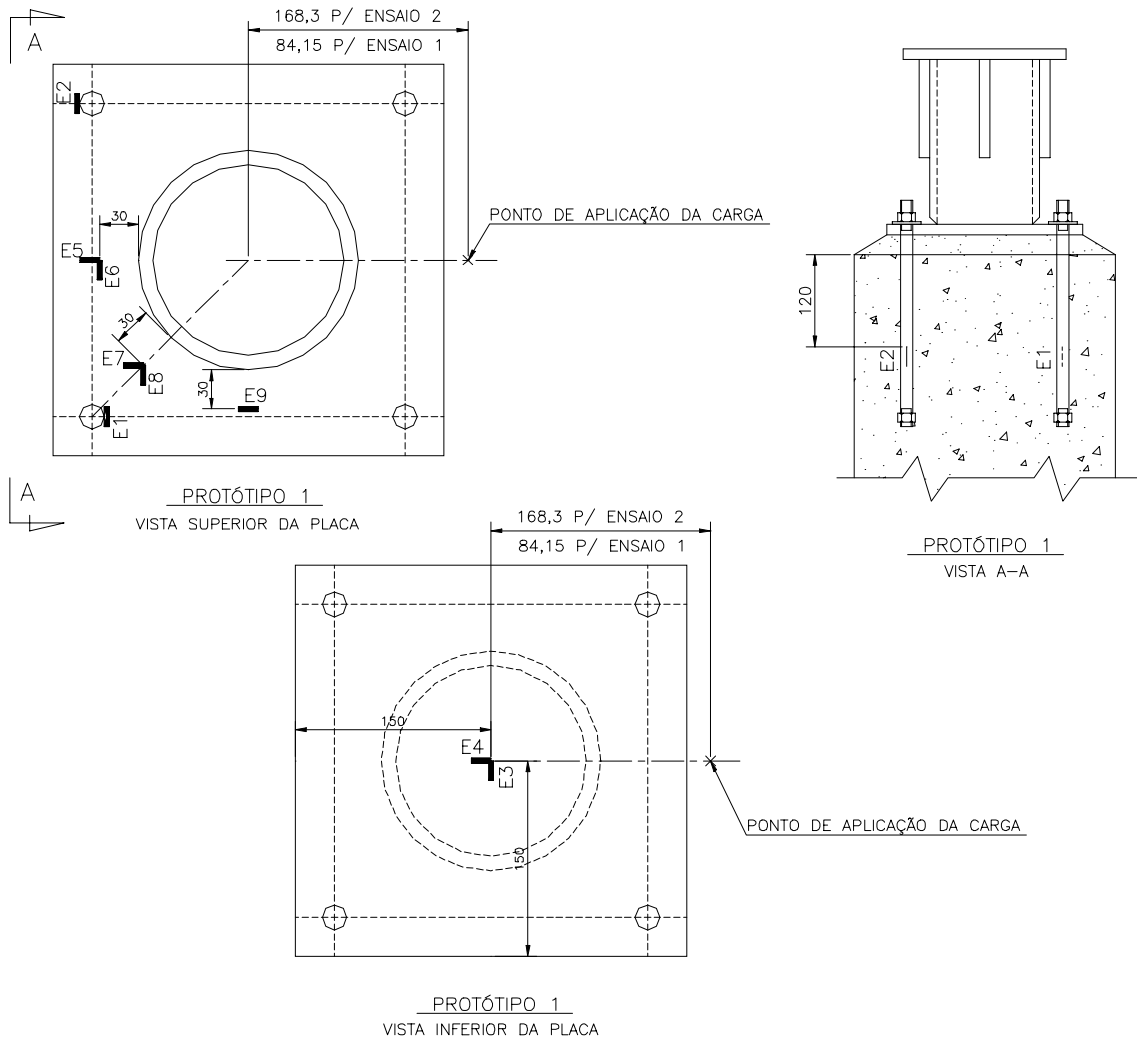


Figura 3.13 – Detalhe do esquema de instrumentação com extensometria utilizado nos Ensaio 1 e 2.

- Ensaio 3 – E3 a E6 e E10 a E13 são do tipo roseta a 90° e os E7 a E9 lineares.

Os extensômetros E3 a E13 foram posicionados a 30 mm da face externa da coluna na face superior da placa para verificar as deformações nessas regiões, e compararmos com os resultados do Ensaio 2, onde os extensômetros E5 a E9 do Ensaio 2 estão nas mesmas posições dos extensômetros E3 a E6 e E8 do ensaio 3, respectivamente.

Os extensômetros E7 e E9 a E13 foram posicionados de modo a verificar compatibilidade com os extensômetros E3 a E8.

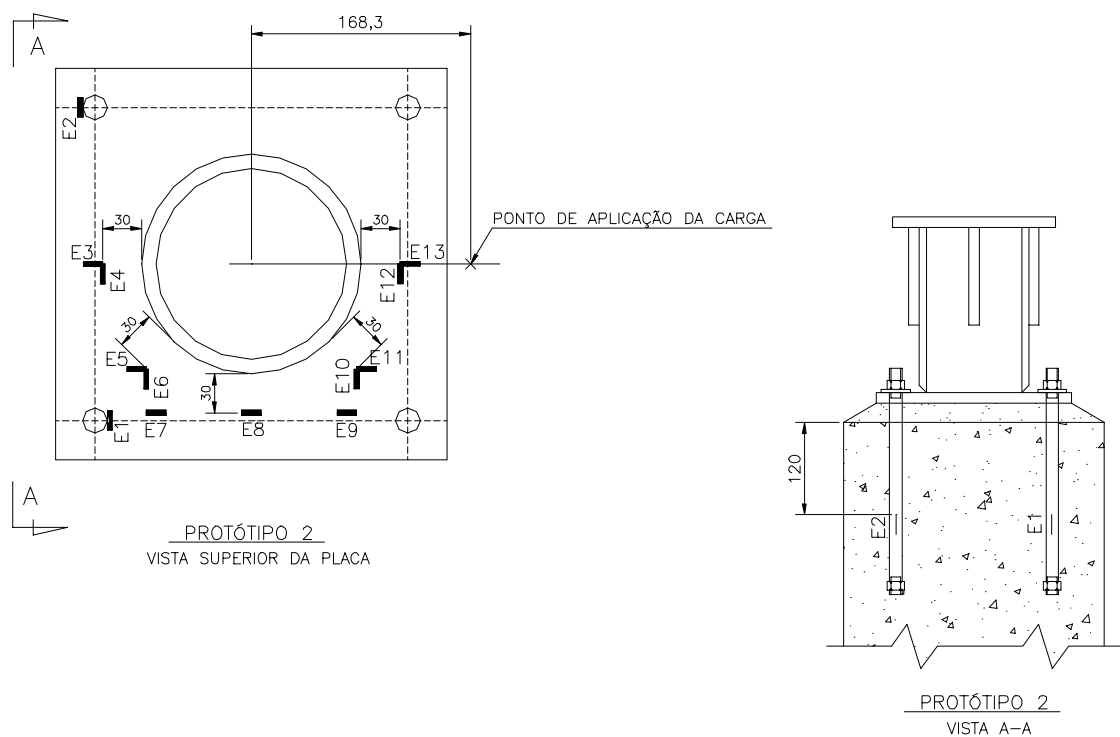


Figura 3.14 – Detalhe do esquema de instrumentação com extensometria utilizado no Ensaio 3.

- Ensaio 4 – E3 a E8 são do tipo roseta a 90° a os E9 e E10 lineares.

Os extensômetros E3 a E8 foram colados na face inferior da placa e posicionados de modo a verificar as deformações nessas regiões, e com as tensões calculadas a partir das deformações encontradas, poder comparar com a análise teórica de viga em balanço utilizada no dimensionamento de placas de base.

Os extensômetros E9 e E10 foram posicionados apenas para verificar a simetria das deformações.

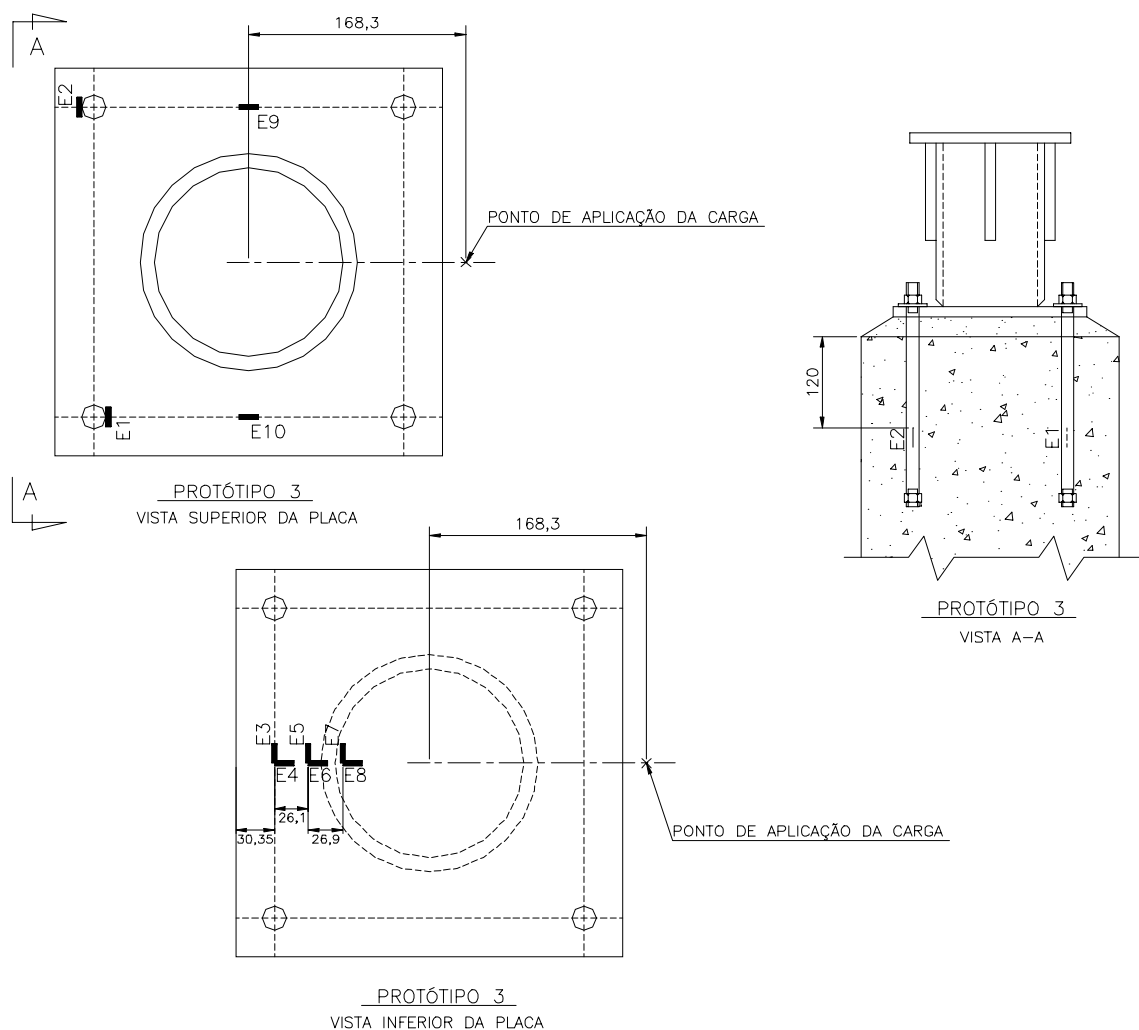


Figura 3.15 – Detalhe do esquema de instrumentação com extensometria utilizado no Ensaio 4.

- Ensaio 5 – E1 a E15 são do tipo roseta a 45° e os E16 e E17 lineares.

Nesse ensaio, o bloco de concreto foi rotacionado 180° para que os chumbadores que antes eram comprimidos sejam tracionados nesse ensaio, devido ao escoamento dos chumbadores tracionados no ensaio 4.

Os extensômetros E1 a E12 foram colados na face inferior da placa e posicionados de modo a verificar as deformações nessas regiões. A partir das tensões calculadas através das deformações encontradas pode-se comparar os resultados com a análise teórica de viga em balanço utilizada no dimensionamento de placas de base.

Os extensômetros E13 a E15 foram posicionados na face superior da placa e na mesma posição dos extensômetros E10 a E12 para compararmos os deformações na face inferior e superior da placa.

Os extensômetros E9 e E10 foram posicionados apenas para verificar a simetria das deformações nas extremidades da placa.

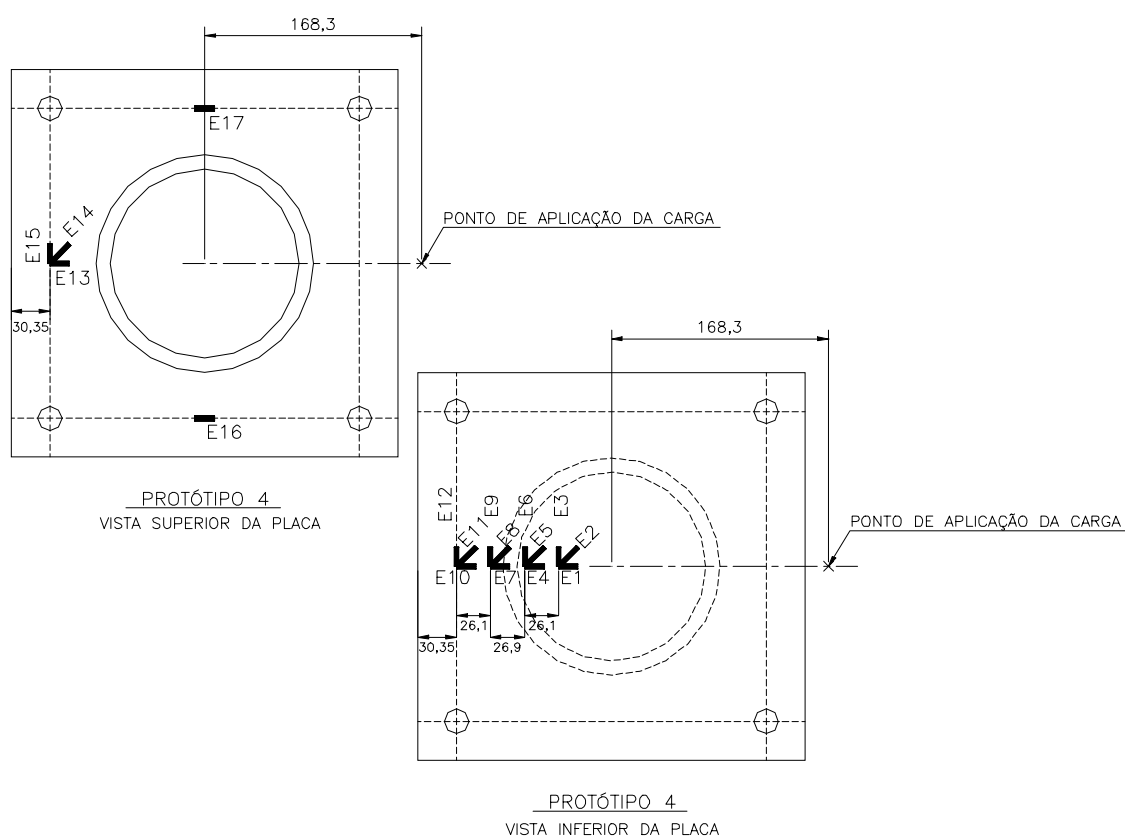


Figura 3.16 – Detalhe do esquema de instrumentação com extensometria utilizado no Ensaio 5.

As regiões de instrumentação para os Ensaios 1 a 3 foram selecionadas a partir de avaliação numérica do ensaio utilizando software comercial (MINCHILLO (2002)). Para os Ensaios 4 e 5 foi admitido a analogia de viga em balanço, para selecionar as regiões de instrumentação.

Para medição dos deslocamentos na extremidade livre dos Protótipos 1 e 2 foi posicionado um LVDT modelo MVL7-2000 da SENSOTEC, com região linear nominal igual a 2” (5,08mm). Três defletômetros mecânicos, fabricante MITUTOYO, foram utilizados de modo a avaliar recalques do bloco e sua influência nos resultados de ensaio. A figura 3.17 ilustra o posicionamento dos defletômetros e LVDT.

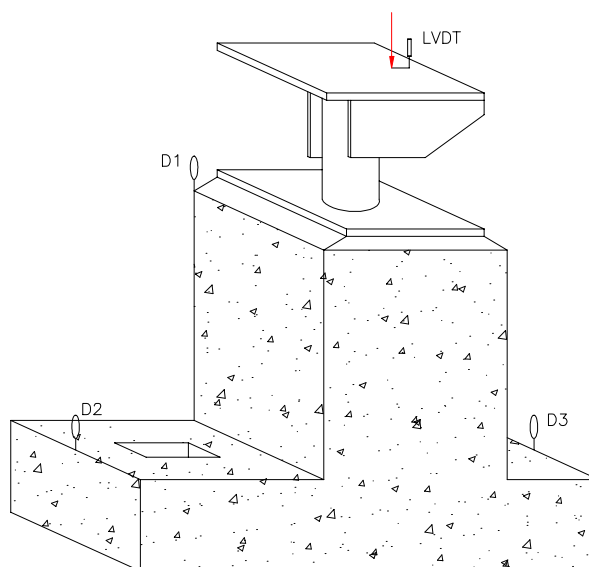


Figura 3.17 – Detalhe do posicionamento dos defletômetros e LVDT’s utilizados nos Ensaios 1, 2 e 3.

Nos Protótipos 3 e 4 foram posicionados 4 (quatro) LVDT modelo MVL7-2000 da SENSOTEC, com região linear nominal igual a 2” (5,08mm), para medição dos deslocamentos na extremidade livre do protótipo e avaliar recalques do bloco e sua influência nos resultados de ensaio. As figuras 3.18 e 3.19 ilustram o posicionamento dos LVDT nos Protótipos 3 e 4.

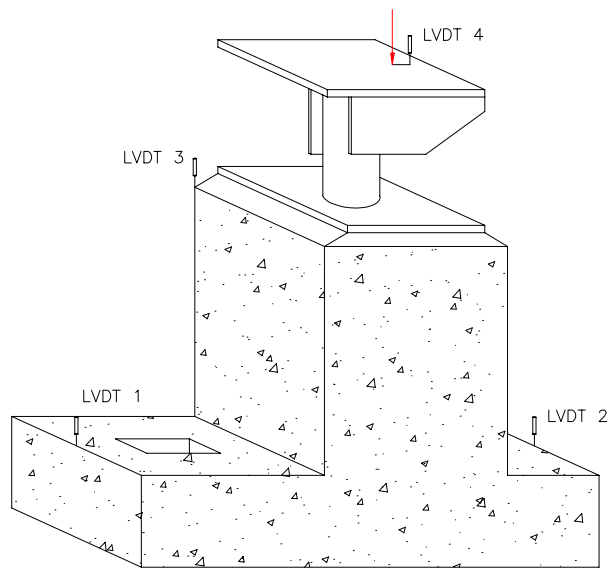


Figura 3.18 – Detalhe do posicionamento dos LVDT’s utilizados no Ensaio 4.

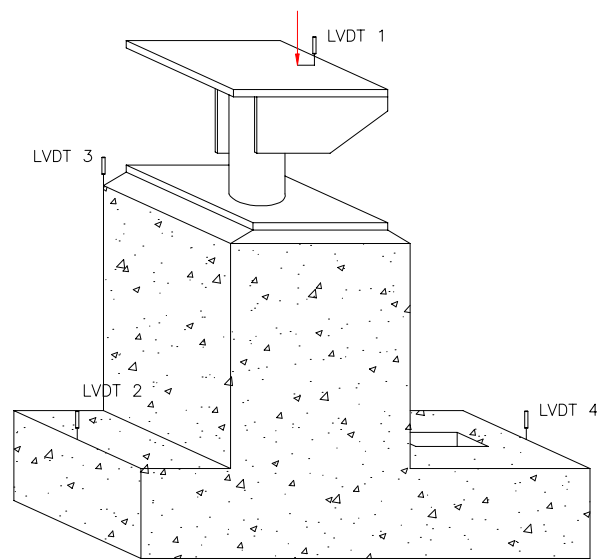


Figura 3.19 – Detalhe do posicionamento dos LVDT’s utilizados no Ensaio 5.

Para a aplicação da carga utilizou-se atuador hidráulico ENERPAC-RC 1008, com capacidade máxima de 1.000 kN, fixado à mesa inferior da viga do pórtico de reação. Logo abaixo deste, foi posicionada, para medição do carregamento, uma célula

de carga BERG CELL com capacidade de 2.000 kN. O esquema geral do sistema de aplicação de carga e do posicionamento em relação a laje de reação estão ilustrados na figura 3.20.

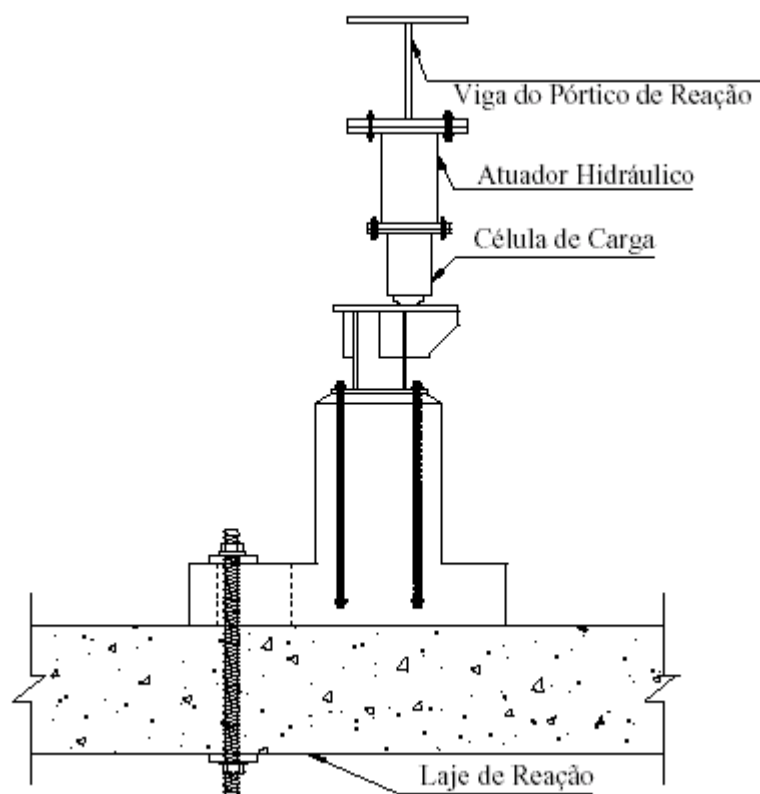


Figura 3.20 – Detalhe da montagem do sistema de aplicação de carga e fixação do bloco de apoio utilizado nos Ensaios 1 a 5.

3.7. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Nos ensaios realizados foram utilizados dois processos de obtenção de resultados: o primeiro deles para a medição dos deslocamentos na extremidade livre do protótipo e para acompanhamento e controle do carregamento aplicado e o segundo para a medição dos valores de deformação fornecida pelos extensômetros lineares e rosetas. Os defletômetros mecânicos foram lidos e seus valores anotados normalmente a cada etapa de carga.

3.7.1. Deslocamentos e carregamento

Utilizou-se um sistema de aquisição automático de dados controlado por computador para a obtenção dos resultados fornecidos pela célula de carga e pelo LVDT. Para isto foram necessários um computador 486 DX4 com placa de aquisição de dados conversora A/D e um amplificador de sinais para o LVDT e para a célula de carga. Um software específico (AQDADOS) foi utilizado para permitir o monitoramento e acompanhamento dos dados durante os ensaios através de gráficos, sendo os resultados armazenados em um arquivo ao final de cada experimento.

O sistema de aquisição de dados (foto 3.21) foi responsável pela aquisição e registro dos passos de carga e dos deslocamentos nas duas extremidades.



Figura 3.21 – Detalhe dos equipamentos para aquisição de dados.

3.7.2. Deformações

Os resultados fornecidos pelos extensômetros lineares e rosetas foram obtidos através de indicador de deformação e as medições foram realizadas a cada passo de carga enquanto o carregamento era mantido constante para que isto fosse possível.

3.8. METODOLOGIA DE ENSAIO

Inicialmente realizou-se um pré-ensaio na fase elástica do material para verificação do sistema de aquisição de dados, da instrumentação e dos equipamentos utilizados, e também para acomodação do conjunto bloco de concreto e protótipo. Em seguida iniciou-se o ensaio e fez-se a aplicação de carregamentos crescentes. A cada etapa de carga foi realizada a aquisição de deformações e deslocamentos. Também foi observado aparecimento de trincas no grout as quais foram marcadas para acompanhamento da evolução das mesmas com o carregamento. Os protótipos foram levados ao colapso quando ocorreu escoamento da placa de base.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados da caracterização do material das placas de base dos Protótipos 1 a 4, para identificar o aço utilizado para a confecção das mesmas, o limite de escoamento e o limite de ruptura. Também serão apresentados os resultados dos Ensaios 1 a 5 realizados nos protótipos citados anteriormente.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DAS PLACAS DE BASE

Para a caracterização do material das placas de base foram realizados ensaios de tração, dureza e análise química nas chapas. Os ensaios foram realizados em duas amostras:

- Amostra 1 - chapa de 12,5 mm de espessura;
- Amostra 2 - chapa de 16 mm de espessura.

Para cada amostra foram realizados 3 ensaios de acordo com a norma American Society for Testing and Materials ASTM (1995), para determinar as dimensões e a metodologia de ensaio. O limite de escoamento foi calculado com 0,2% de deformação, usual para chapas de uso estrutural. As propriedades obtidas foram diferentes para as duas amostras, então foi necessário realizar ensaio de dureza e análise química, o que confirmou que as duas amostras possuem diferentes composições químicas e durezas.

A figura 4.1 mostra as dimensões dos corpos de prova e as tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, os resultados dos ensaios de tração, dureza e análise química dos materiais. Os resultados utilizados são às médias entre os valores obtidos para cada corpo de prova para a tensão limite de escoamento (f_y), a tensão limite de resistência à tração (f_u) e o alongamento residual após sua ruptura (ϵ). Esses valores serão admitidos para avaliação de todos os ensaios de placas de base dos protótipos 1, 2, 3 e 4.

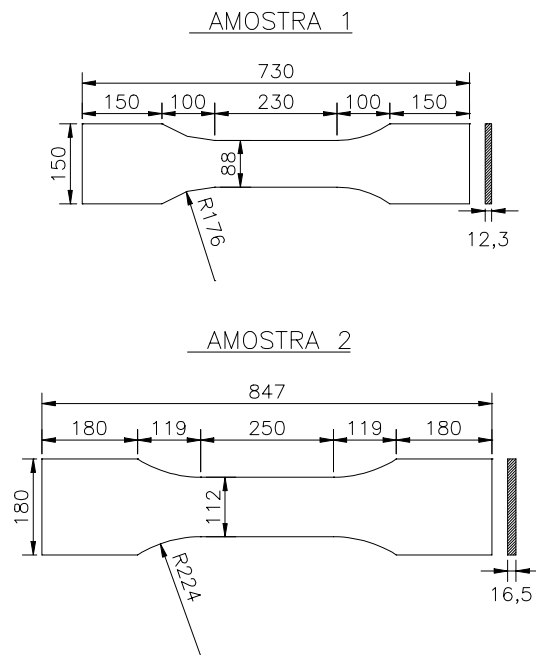


Figura 4.1 - Corpos de prova utilizados para caracterização do material das placas de base.

Tabela 4.1 – Resultados obtidos do ensaio de tração.

Amostra	Corpo de Prova	Área (mm ²)	f _y (MPa)	f _u (MPa)	ε (%)
01	A	312,4	307	466	43
	B	311,2	299	464	44
	C	309,9	319	463	44
	Média	311,2	308,3	464,3	43,6
02	A	413,2	428	632	31
	B	414,0	464	633	30
	C	415,7	415	633	30
	Média	414,3	435,6	632,6	30,3

Tabela 4.2 – Resultados obtidos do ensaio de dureza.

Amostra	Medida	HV	Média
01	1	203	207
	2	206	
	3	213	
02	1	254	249
	2	249	
	3	245	

Tabela 4.3 – Resultados obtidos da análise química.

Amostra	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr
01	0,091	0,976	0,0214	0,0089	0,188	0,270	0,530
02	0,103	1,130	0,0188	0,0108	0,366	0,179	0,531

Amostra	Mo	Al	Cu	Sn	V	Nb	B	Ti
01	0,001	0,0220	0,318	0,002	-	-	-	0,0097
02	0,001	0,0218	0,297	0,001	-	0,0276	-	0,0121

De acordo com os ensaios de tração, de dureza e a análise química das amostras 01 e 02, foi possível concluir que foram utilizados o aço ASTM A36 e o aço ASTM A588-B, respectivamente, como material para confecção das chapas de base de onde foram retiradas as amostras.

4.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

Os resultados dos Ensaios 1 a 5 serão apresentados nesse item e estão apresentados em forma de gráficos para melhor visualização. As tabelas contendo os valores lidos dos extensômetros estão no anexo I.

É importante lembrar que os Ensaios 1 e 2 foram realizados no Protótipo 1, que possui chapa de base de 12,5 mm de espessura, o Ensaio 3 foi realizado no Protótipo 2,

que também possui chapa de base de 12,5 mm, o Ensaio 4 foi realizado no Protótipo 3, que possui chapa de base de 16 mm e o Ensaio 5 foi realizado no Protótipo 4, que possui chapa de base de 16 mm de espessura.

4.3.1 Ensaio 1

O Ensaio 1 foi realizado utilizando-se o Protótipo 1, com uma excentricidade de carga igual a uma vez o raio externo do tubo circular da coluna, ou seja, 84,15 mm, e a carga máxima obtida nesse ensaio foi de 600,3 kN. Este valor não levou a placa de base ao escoamento e o ensaio foi paralisado por problemas no sistema de aplicação de carga. Após o descarregamento do protótipo as deformações obtidas anteriormente voltaram ao original, ou seja, não houve deformação residual nos pontos instrumentados do protótipo. Assim, foi avaliado que o colapso se daria para níveis de carga maiores devido principalmente ao nível de excentricidade da carga, ou seja, próximo ao núcleo do tubo. Observaram-se ainda trincas no grout oriundas de teste realizado anteriormente aos ensaios com a finalidade de definir o material a ser utilizado no nivelamento do bloco de concreto. Estas trincas não aumentaram após o Ensaio 1 não caracterizando influência no mesmo.

Nas figuras 4.2 a 4.4 tem-se os gráficos de carga x deformação dos extensômetros colados no Protótipo 1 (Ensaio 1).

Na figura 4.2 tem-se os extensômetros E1 e E2 colados nos chumbadores. Observa-se que o nível de deformações é pequeno sendo o máximo de 202μ , o que caracteriza que a sollicitação concentra-se na placa de base como projetado.

Na figura 4.3 tem-se a deformação lida nos extensômetros E3, E4 e E9. Observa-se que aqueles colados no núcleo central do tubo sofreram variações nas deformações o que caracteriza região limite entre a região tracionada e a comprimida da placa de base. Observa-se ainda que esta variação apresenta resultados ora de tração, ora de compressão. No entanto observa-se que no extensômetro E9 que está fora do núcleo central mas alinhado com o extensômetro E4, que as deformações são compressão apenas até o nível de cargas de 100 kN. Assim, no interior de núcleo tem-se uma configuração como uma placa circular toda engastada caracterizando uma distribuição

de tensões fortemente influenciada pela transmissão de carga pelo tubo associada a excentricidade.

Na figura 4.4 tem-se a deformação lida nos extensômetros E5 a E8. Observou-se que a deformação máxima obtida no ensaio foi de 687 microstrain no extensômetro E6. Observou-se também que as maiores deformações ocorreram nos extensômetros E5 e E6 que estão na região mais tracionada da placa de base.

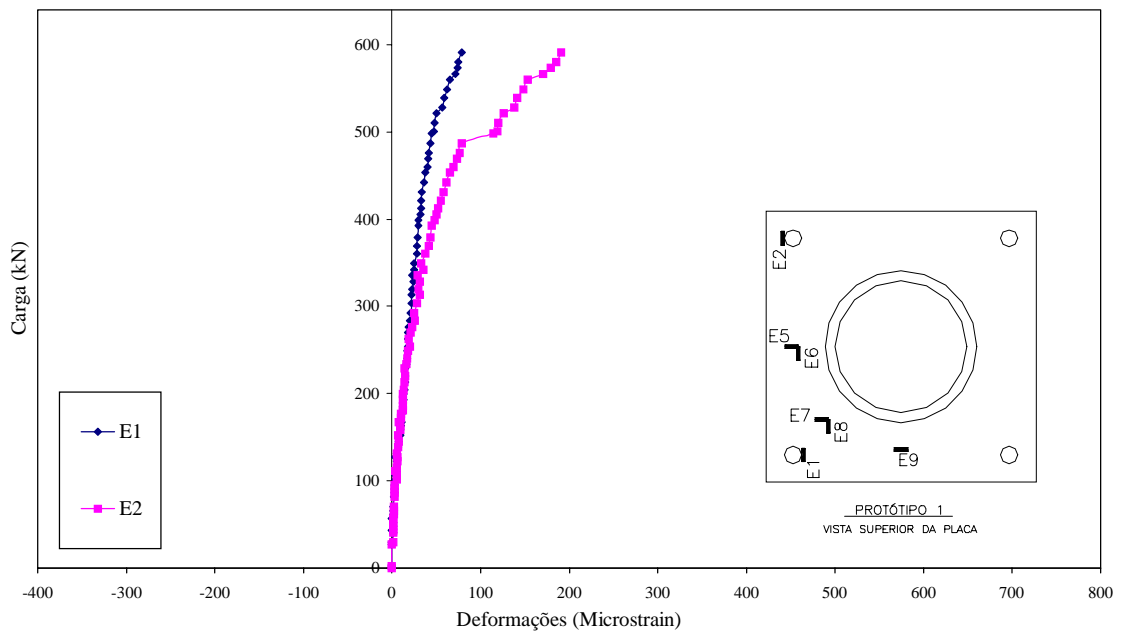


Figura 4.2 – Relação carga x deformação dos extensômetros E1 e E2 do Ensaio 1.

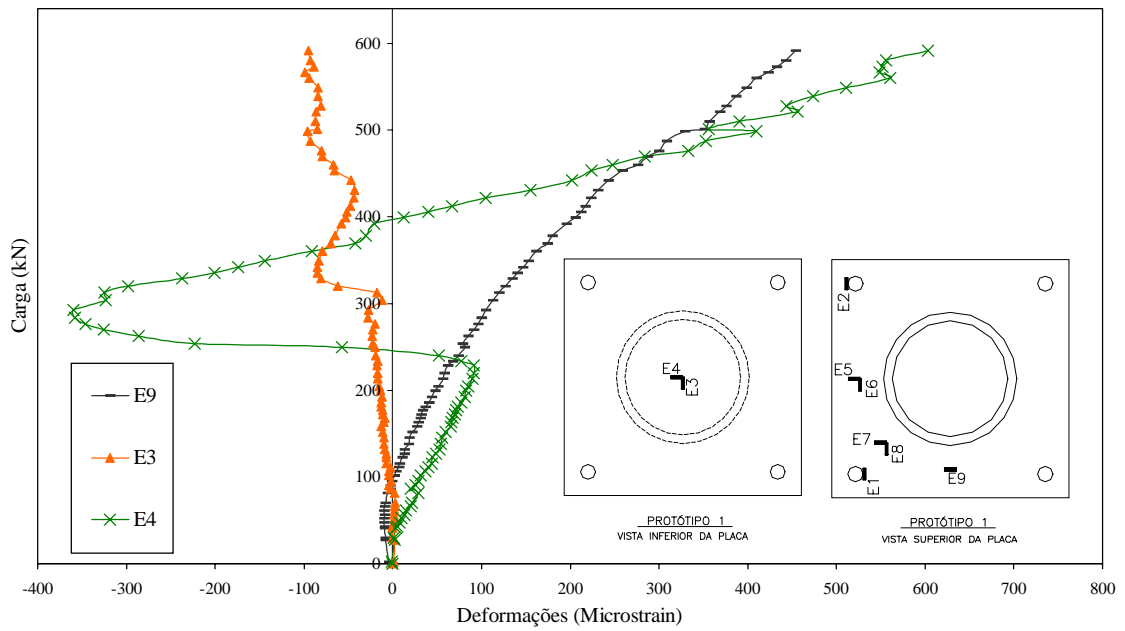


Figura 4.3 – Relação carga x deformação dos extensômetros E3, E4 e E9 do Ensaio 1.

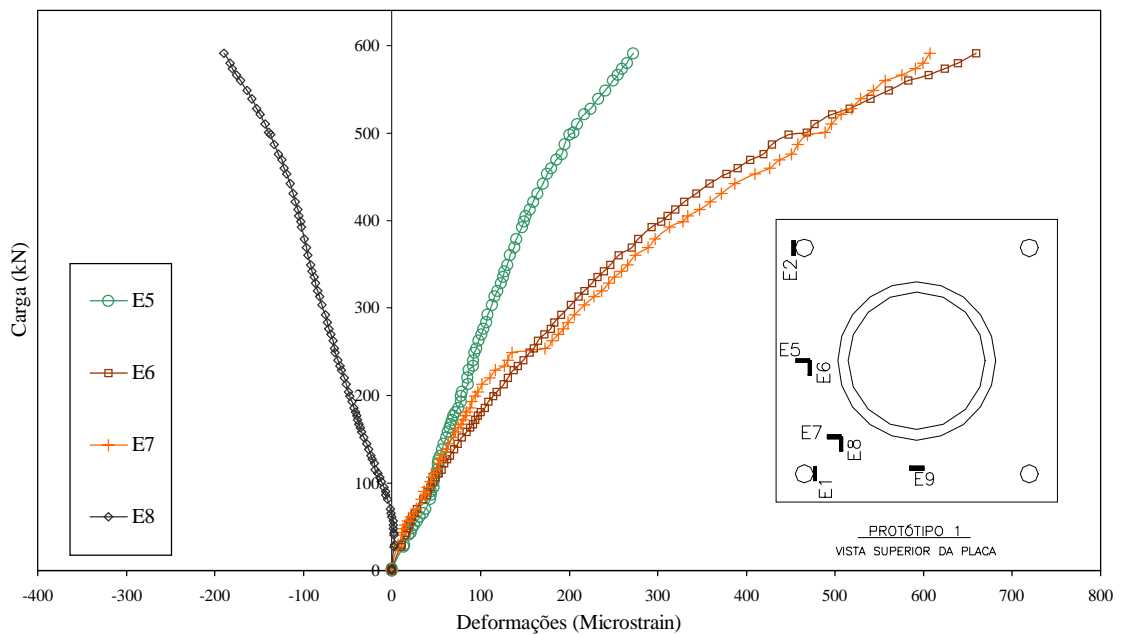


Figura 4.4 – Relação carga x deformação dos extensômetros E5 a E8 do Ensaio 1.

Na figura 4.5 tem-se o deslocamento medido através dos defletômetros e LVDT, onde foram observados valores pequenos caracterizando que os deslocamentos do bloco podem ser desprezados.

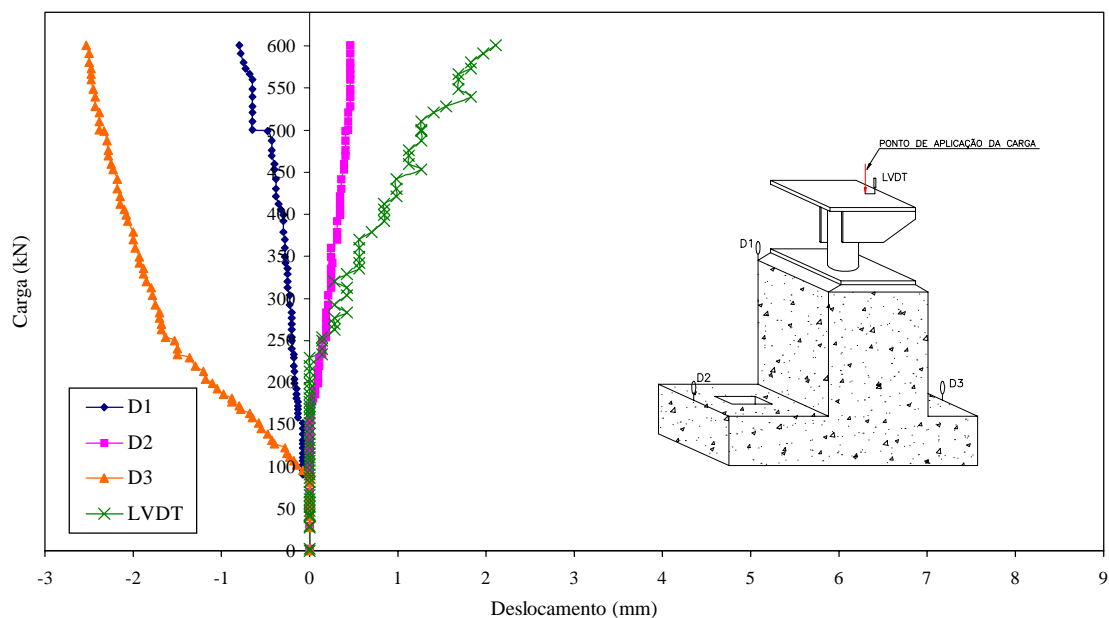


Figura 4.5 – Relação carga x deslocamento dos defletômetros e LVDT do Ensaio 1.

Após atingir a carga máxima citada, o protótipo foi descarregado e observou-se que o material da placa de base não sofreu escoamento com as deformações retornando a valores próximos a zero, portanto dentro da fase elástica do material (ver tabela do anexo I). Assim, o mesmo protótipo (Protótipo 1) foi carregado a uma excentricidade igual a duas vezes o raio, sendo este o Ensaio 2.

4.3.2. Ensaio 2

O Ensaio 2 foi realizado utilizando-se o Protótipo 1 com uma excentricidade igual a duas vezes o raio externo do tubo da coluna, ou seja, 168,3 mm, e ocorreu escoamento da placa de base nesse ensaio.

Nas figuras 4.6 a 4.8 têm-se os gráficos de carga x deformação dos extensômetros colados no Protótipo 1 (Ensaio 2).

Na figura 4.6 tem-se os extensômetros E1 e E2 colados nos chumbadores. Observa-se que ambos são tracionados tendo valores diferentes entre si em função da posição dos mesmos em relação ao diâmetro do chumbador. Ressalta-se que o nível máximo das deformações foram maiores que o *Ensaio 1*, mas dentro da fase elástica do material, ou seja, após o descarregamento as deformações voltaram a valores desprezíveis (ver tabela do anexo I).

Na figura 4.7 tem-se a deformação lida nos extensômetros E3, E4 e E9. Observou-se que os extensômetros E3 e E4 praticamente não apresentam deformação já que para o nível de excentricidade deste ensaio a placa de base passa a ser determinante na eficiência do conjunto placa-bloco. Já no *Ensaio 1*, os valores das deformações nos extensômetros E3 e E4 são bem maiores que as apresentadas nesse Ensaio 2, pois estão localizados no centro do tubo, ou seja, na região do núcleo de carga para o *Ensaio 1*, caracterizando assim a alta concentração das tensões através de transmissão de cargas pelo tubo para a placa de base.

Na figura 4.8 tem-se a deformação lida nos extensômetros E5 a E8. Observou-se que a deformação máxima obtida no ensaio foi de 3364 microstrain no extensômetro E6, correspondendo a carga máxima de 301,30 kN. Observa-se que os extensômetros E5 e E6, que estão na região mais tracionada e deformada da placa de base, possuem os maiores valores de deformação. Os extensômetros E7 e E8 possuem menores deformações que E5 e E6 em função da proximidade com os chumbadores, sendo que E8 tende a diminuir seu valor em função da deformação da placa de base ao final do ensaio.

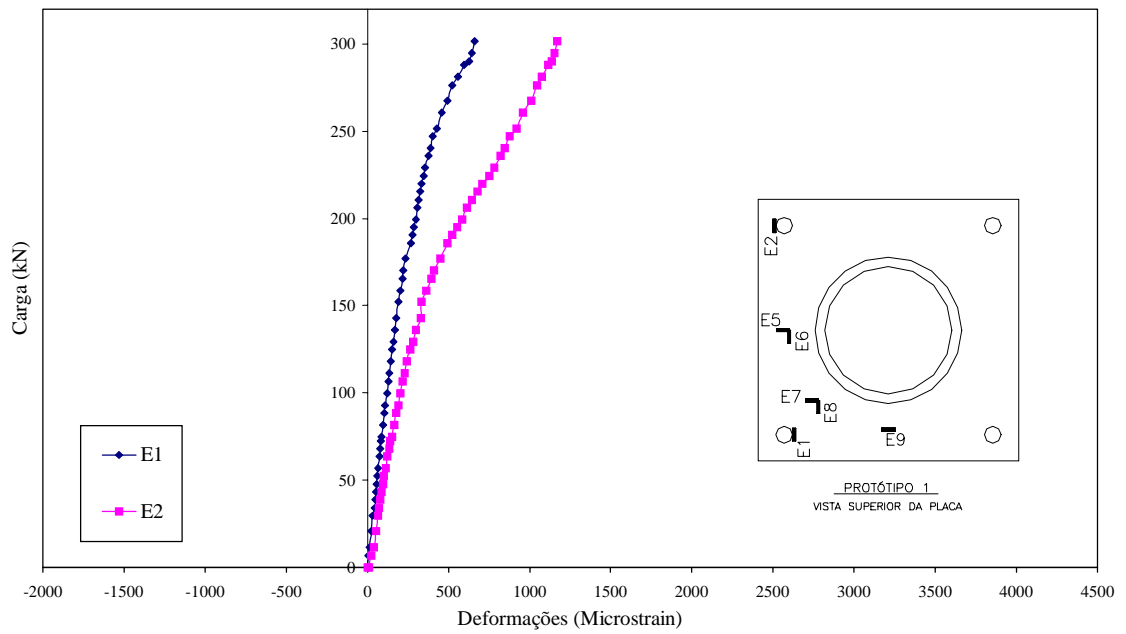


Figura 4.6 – Relação carga x deformação dos extensômetros E1 e E2 do Ensaio 2.

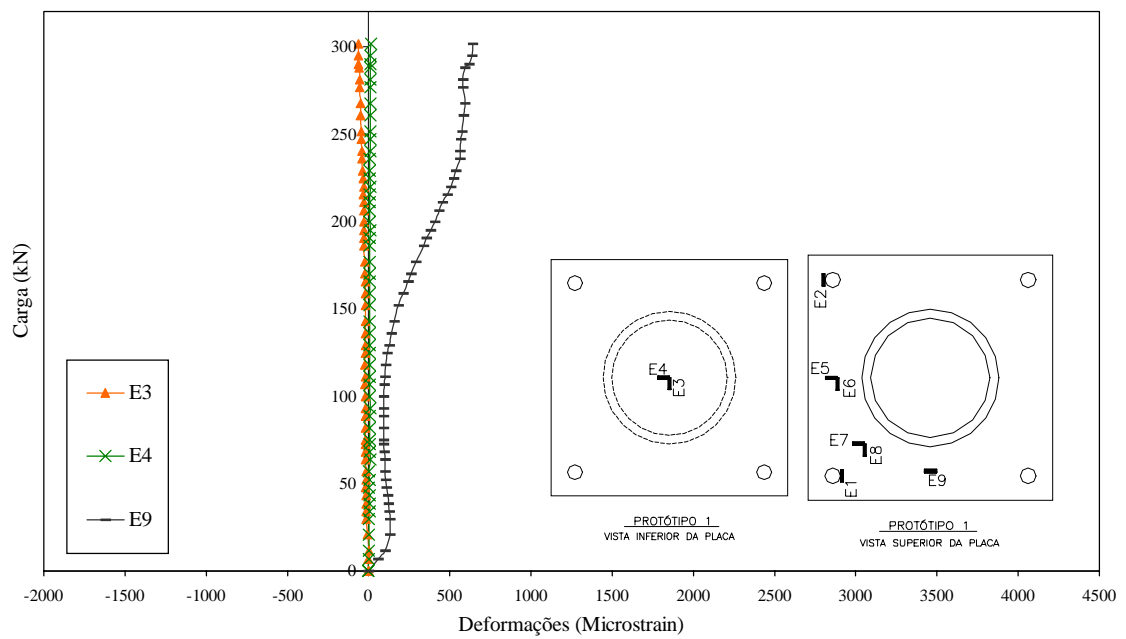


Figura 4.7 – Relação carga x deformação dos extensômetros E3, E4 e E9 do Ensaio 2.

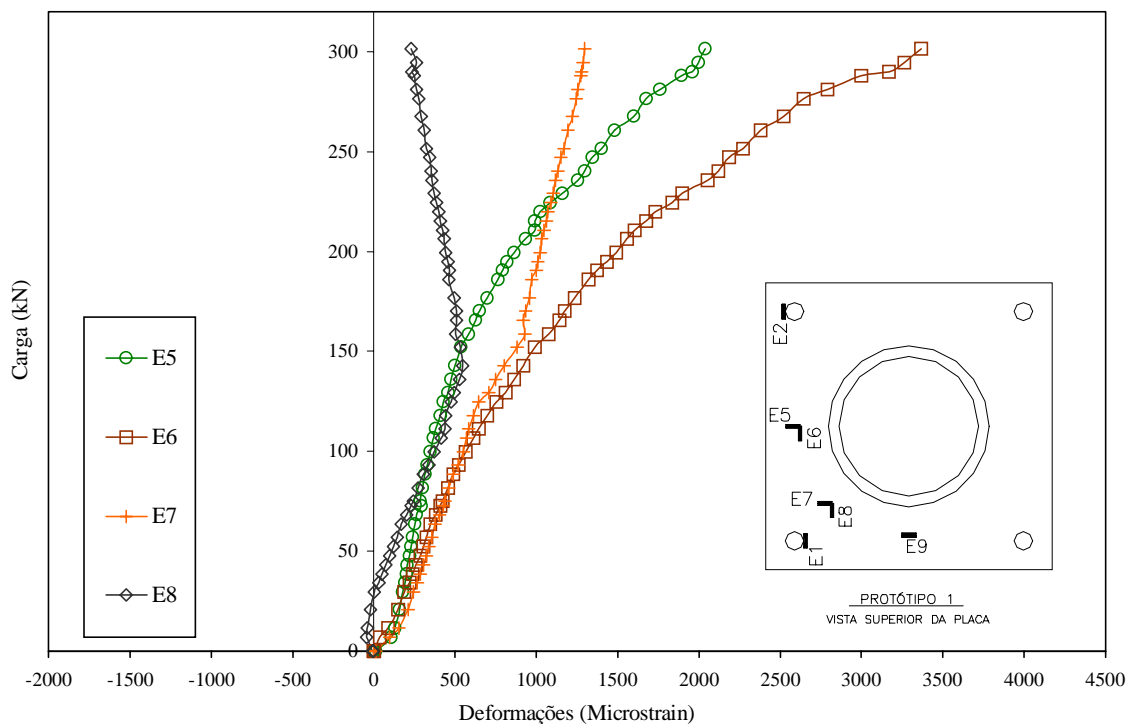


Figura 4.8 – Relação carga x deformação dos extensômetros E5 a E8 do Ensaio 2.

Na figura 4.9 tem-se o deslocamento medido através dos defletômetros e LVDT.

Observa-se que as medidas do defletômetro D3 sofreram uma mudança brusca no valor medido caracterizando uma folga que se reduz para níveis de carga superior a 10 kN. No entanto este valor ainda é pequeno sendo o máximo medido de 3 mm, o que pode ser desprezado concluindo-se que não houve movimentação no bloco. As leituras do LVDT são maiores que as leituras dos defletômetros em função dos deslocamentos oriundos da deformação inicial da placa de base, mas mesmo assim desprezíveis, onde ressalta-se que não houve deslocamentos na extremidade do protótipo onde se posicionava o LVDT..

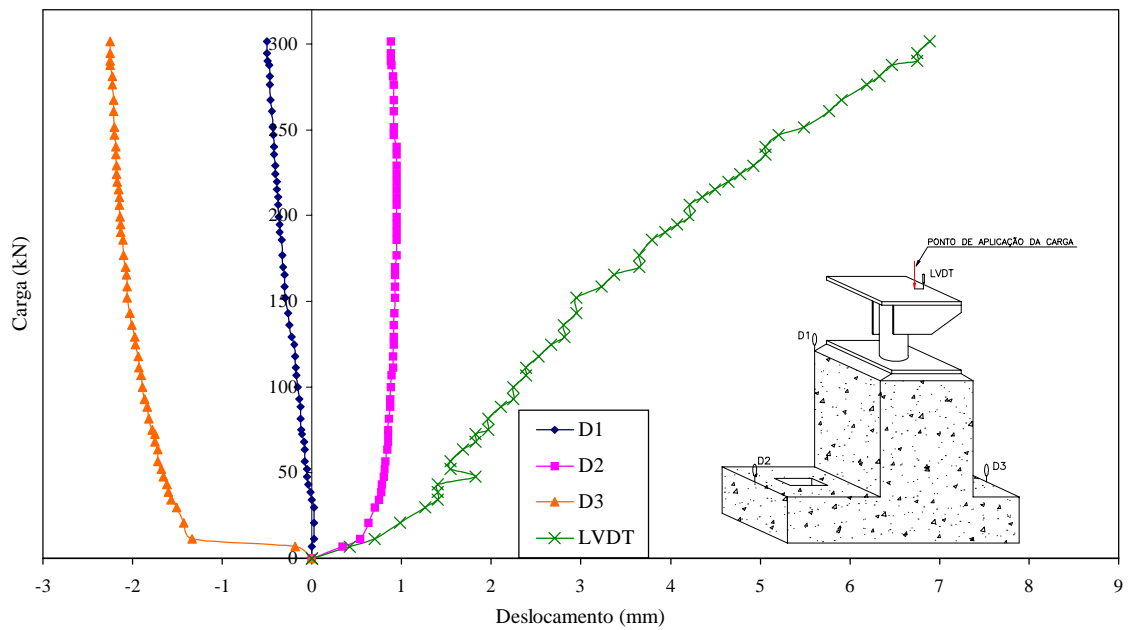


Figura 4.9 – Relação carga x deslocamento dos defletômetros e LVDT do Ensaio 2.

Na figura 4.10, mostra uma foto da placa de base deformada ao final do Ensaio 2.



Figura 4.10 – Foto da região da placa de base onde houve deformação aparente no Ensaio 2.

Os resultados da caracterização indicaram um material com tensão de escoamento médio igual a 308,3 MPa , o que equivale no ensaio a carga de 158,70 kN e uma deformação de 584 μ no extensômetro E5 e 1073 μ no E6.

4.3.3. Ensaio 3

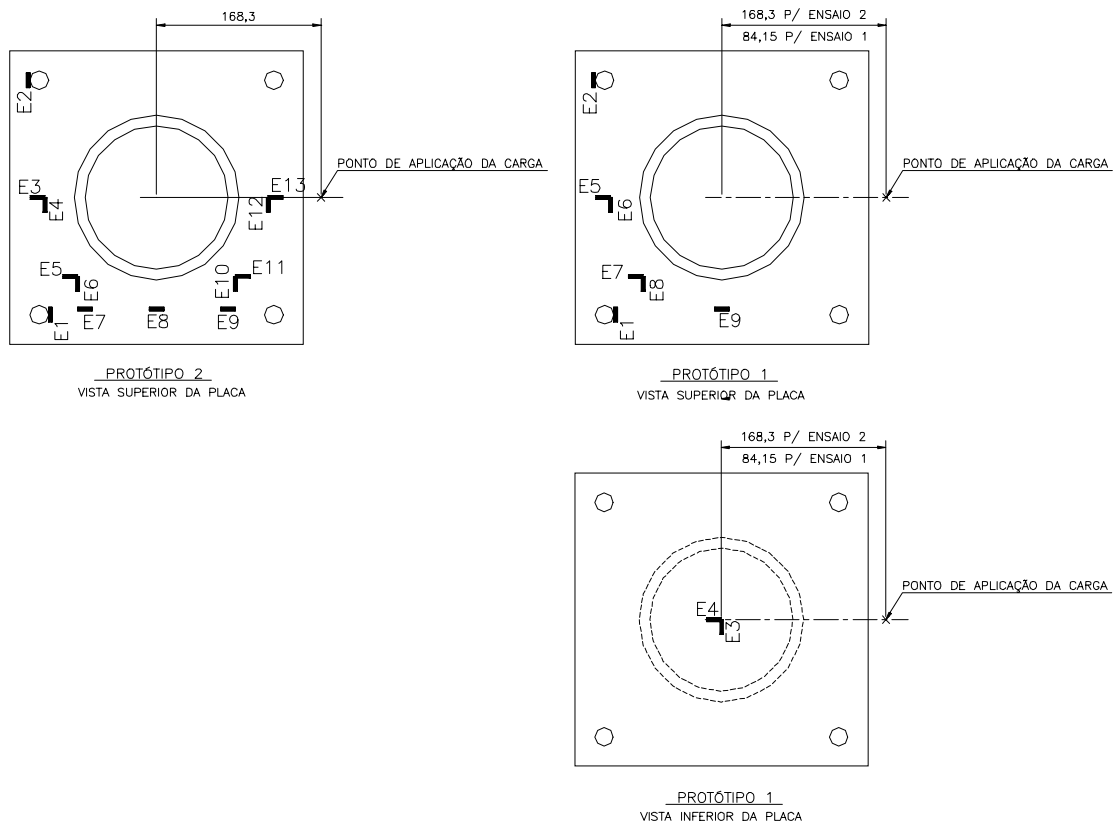
O Ensaio 3 foi realizado com o Protótipo 2, que possui as mesmas dimensões do Protótipo 1, e com uma excentricidade de aplicação da carga duas vezes o raio externo do tubo, ou seja, 168,3 mm, obtendo o escoamento da placa de base.

Neste ensaio a instrumentação foi modificada de modo a tentar avaliar a distribuição de tensões na região comprimida da placa através dos extensômetros E9 a E13, e a simetria das deformações através dos extensômetros E7 e E9. Os extensômetros posicionados no núcleo central não foram necessários neste Ensaio 3, em função que os resultados do *Ensaio 2* indicaram níveis muito baixos de deformação. A figura 4.11 mostra a instrumentação nos Ensaio 1, 2 e 3, respectivamente.

Para facilitar as comparações, a tabela 4.4 a seguir identifica o extensômetro dos Ensaio 1 e 2 que equivale, ou seja, possui a mesma posição no Ensaio 3.

Tabela 4.4 – Extensômetros dos Ensaio 1, 2 e 3.

Ensaio 1 e 2	Ensaio 3
E1	E1
E2	E2
E3	-
E4	-
E5	E3
E6	E4
E7	E5
E8	E6
E9	E8



(a) Ensaio 3

(b) Ensaio 1 e 2

Figura 4.11 – Instrumentação dos Ensaio 1, 2 e 3.

Nas figuras 4.12 a 4.14 têm-se os gráficos de carga x deformação dos extensômetros colados no Protótipo 2 (Ensaio 3).

Na figura 4.12 tem-se a deformação lida nos extensômetros E1, E2, E7, E8 e E9. O comportamento dos extensômetros E1 e E2 são equivalentes ao *Ensaio 2*. Os extensômetros E7, E8 e E9 estão alinhados na placa e seus valores indicam que desde a fase inicial a mesma se comporta com simetria, região tracionada (E7) e comprimida (E9), sendo esta última com maiores valores de deformação. Destaca-se que E8 que se localiza na linha de simetria da placa possui valores muito menores que E7 e E9, o que caracteriza a proximidade da zona de mudança de solicitação de tracionada para comprimida.

Na figura 4.13 tem-se a deformação lida nos extensômetros E3, E5, E11 e E13, colados na mesma direção e distantes 30 mm da face externa da coluna. Observa-se que o E13 sofre forte influência do contato da placa com o bloco (este extensômetro encontra-se na linha de aplicação da carga), caracterizando uma reação localizada ao carregamento. No entanto o E5 apresenta valores de deformação equivalentes ao E11 sendo o primeiro de tração e o segundo de compressão. Para a carga de escoamento $E5 = 911 \mu$ e $E11 = -709 \mu$. Assim, a influência do bloco restringe-se a uma reação localizada da carga.

A figura 4.14 apresenta as deformações lidas nos extensômetros E4, E6, E10 e E12, colados na mesma direção e distantes 30 mm da face externa da coluna e perpendiculares aos extensômetros da figura 4.13. Observa-se que E10 e E12 não registraram deformações consideráveis na fase elástica o que se justifica pela influência da linha de carga e da influência do chumbador. Os extensômetros E4 e E6 possuem deformações compatíveis com o efeito de tração na região da placa onde estão posicionados.

Observa-se que os extensômetros E3 e E4, que estão na região mais tracionada e deformada da placa de base possuem os maiores valores de deformação, assim como *E5 e E6 do ensaio 2*. Os extensômetros E5 e E6 possuem menores deformações que os extensômetros E3 e E4, em função da proximidade com os chumbadores. A carga máxima no ensaio foi de 306 kN e a deformação máxima foi de 3360 microstrain no extensômetro E4 que é compatível com o *E6 do Ensaio 2*.

Foram observadas diferenças nas deformações lidas pelos extensômetros E3 e E6, quando comparados os valores com *E5 e E8 do Ensaio 2*. Estes valores são justificados pela imperfeição da placa o que gerou uma distribuição não simétrica em relação a posição dos extensômetros. Observa-se que para o nível da carga de escoamento ($P_y = 163,30$ kN), os valores são $E3 = 509 \mu$, *E5 do Ensaio 2 = 584 μ* , $E6 = 695 \mu$, *E8 do Ensaio 2 = 503 μ* compatíveis. Na fase plástica observa-se que E3 possui valores muito diferentes de *E5 do Ensaio 2*, o que é justificado pelas imperfeições que naquele ensaio levaram a deformações máximas fora da posição de E5. Observa-se também que após a carga de escoamento P_y , E10, E12 e E13 apresentam medições de tração o que caracteriza uma complexa distribuição de tensões nesta fase.

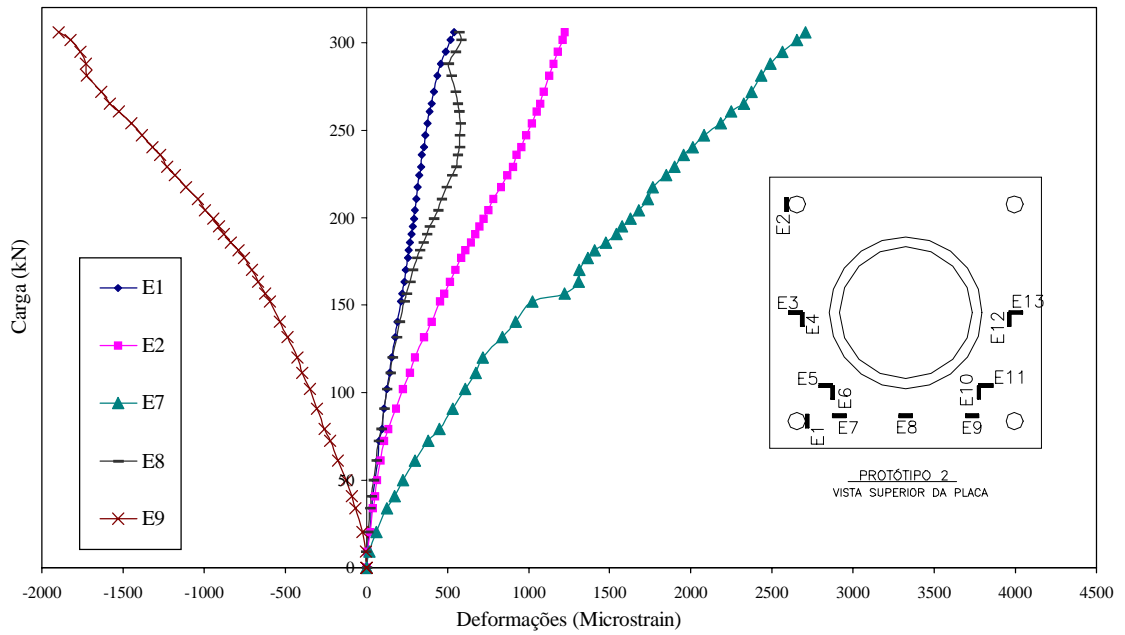


Figura 4.12 – Relação carga x deformação de E1, E2, E7 a E9 do Ensaio 3.

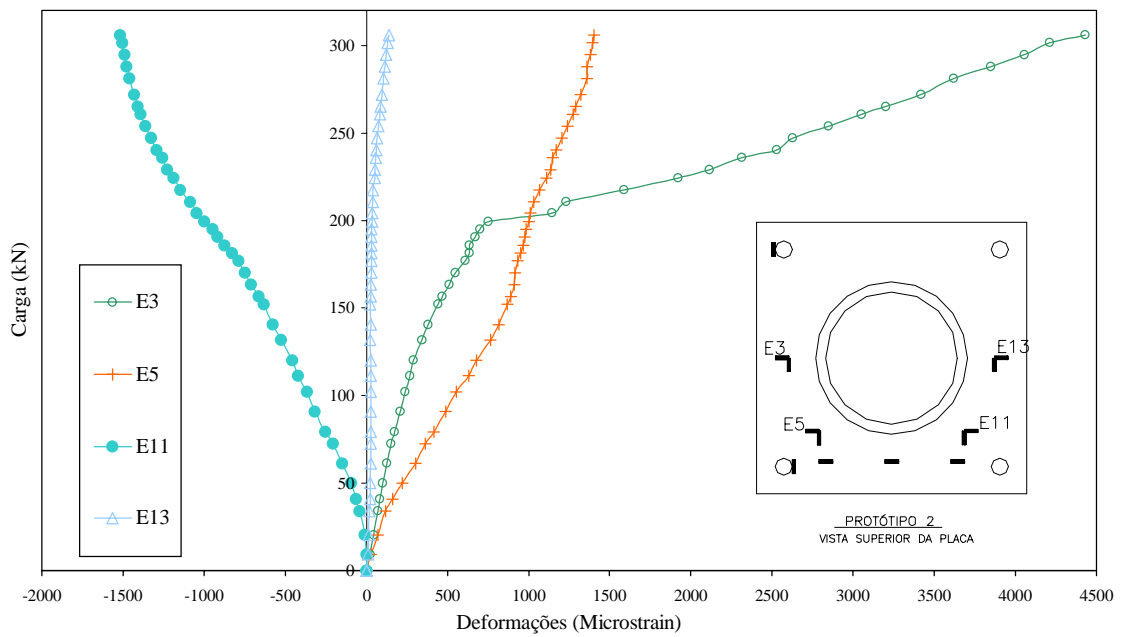


Figura 4.13 – Relação carga x deformação de E3, E5, E11 e E13 do Ensaio 3.

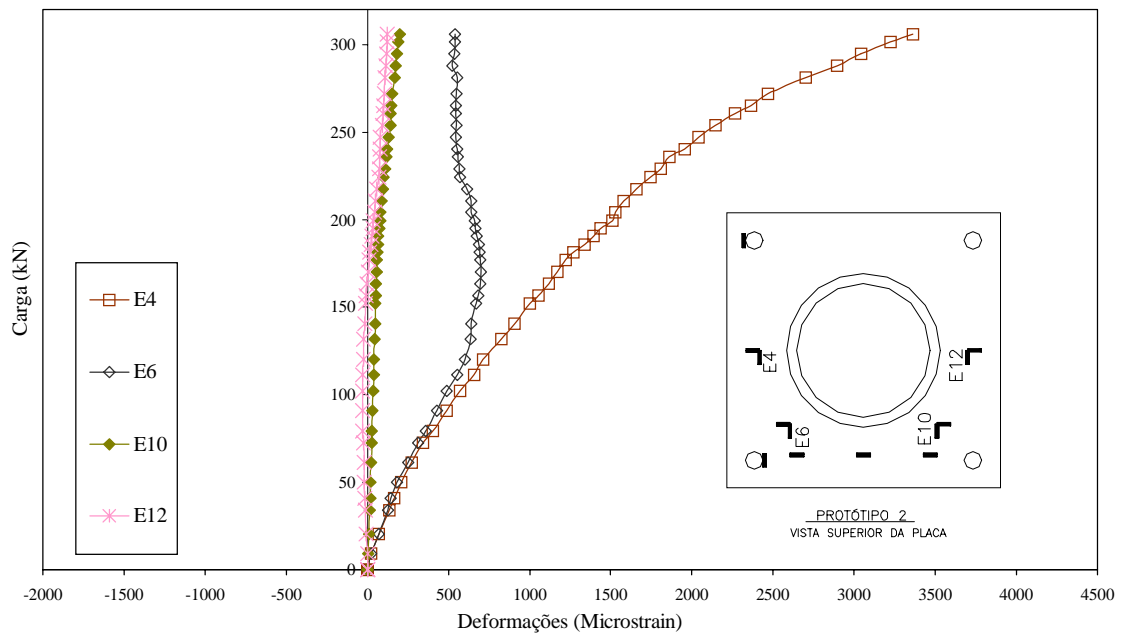


Figura 4.14 – Relação carga x deformação de E4, E6, E10 e E12 do Ensaio 3.

Na figura 4.15 tem-se o deslocamento medido através dos defletômetros e LVDT. Observa-se que nesse Ensaio 3 também não houve deslocamentos na extremidade do protótipo onde se posicionava o LVDT.

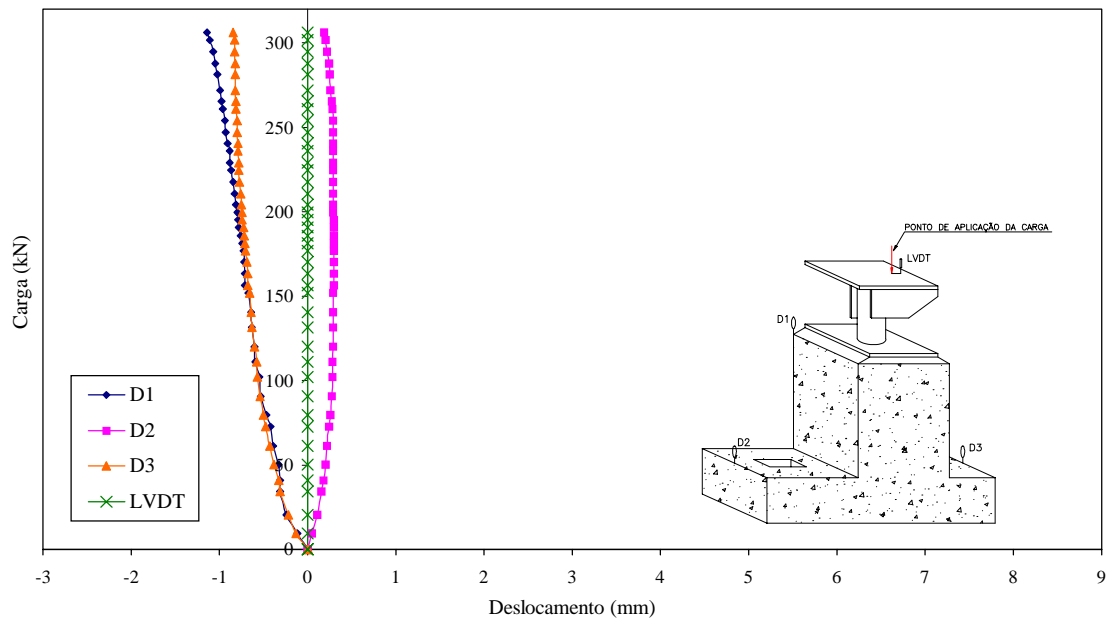


Figura 4.15 – Relação carga x deslocamento dos defletômetros e LVDT do Ensaio 3.

Na figura 4.16, tem-se uma foto da placa de base deformada ao final do Ensaio 3.



Figura 4.16 – Foto da região da placa de base onde houve deformação aparente no Ensaio 3.

Os resultados da caracterização indicaram um material com tensão de escoamento médio igual a 308,3 MPa , o que equivale no ensaio a carga de 163,30 kN e uma deformação de 509 μ no extensômetro E3 e 1117 μ no E4 .

4.3.4. Ensaio 4

Para o Ensaio 4 foi projetado um novo protótipo (Protótipo 3) semelhante aos Protótipos 1 e 2, mas com espessura de 16 mm. Esse Ensaio 4 foi realizado para uma excentricidade duas vezes o raio externo do tubo, ou seja, 168,3 mm, se obtendo o escoamento da placa de base.

A partir das observações dos ensaios anteriores algumas avaliações foram necessárias nos ensaios seguintes. A instrumentação contempla a possibilidade de determinar esta posição e ainda foram colados extensômetros na face inferior para avaliar a influência do contato com o concreto o que se verificou não ser significativo. Foram colados ainda dois extensômetros E9 e E10 para verificar a simetria na aplicação da carga.

Nas figuras 4.17 a 4.19 tem-se os gráficos de carga x deformação dos extensômetros colados no Protótipo 3 (Ensaio 4).

Na figura 4.17 tem-se a deformação lida nos extensômetros E1, E2, E9 e E10. Com relação E1 e E2 tem-se ambos tracionados sendo o mais distante da carga, E2, com maiores valores. Após o descarregamento da carga podemos observar que os chumbadores escoaram devido às deformações residuais que apareceram nos extensômetros E1 e E2 (ver anexo I). Isso ocorreu devido aos maiores níveis de carga obtidos. Com relação aos extensômetros E9 e E10 colocados para verificar a simetria da placa de base com aplicação de carga, obtiveram valores diferentes um do outro após a aplicação da carga de 95,32 kN, devido a deformações iniciais da placa na fabricação da mesma e deformações ocorridas no decorrer ensaio.

Nas figuras 4.18 e 4.19 tem-se a deformação lida nos extensômetros E3 a E8. Observa-se que os extensômetros E3 e E4, assim como nos *Ensaio 1, 2 e 3*, que estão na região mais tracionada e deformada da placa de base e possuem os maiores valores de deformação. Os extensômetros E5 e E6 possuem menores deformações que os extensômetros E3 e E4, e os extensômetros E7 e E8, menores deformações que E3 e E4,

em função da proximidade com o tubo da coluna, como esperado antes do ensaio. A carga máxima no ensaio foi de 378,5 kN e a deformação máxima foi de 2889 microstrain no extensômetro E3. Com relação aos extensômetros E4, E6 e E8, colados no sentido da aplicação de carga, onde $E6 > E8 > E4$, observou-se que as deformações são contrárias as deformações lidas em E3, E5 e E7, onde $E3 > E5 > E7$. Isso ocorreu devido a leitura dos extensômetros estarem no mesmo sentido de aplicação da carga. As leituras do extensômetro E6 são maiores que as leituras do E8 devido E6 estar mais próximo da face externa da coluna, que possui alta concentração de tensão, pois a carga aplicada na coluna desce para a placa de base através das paredes da coluna.

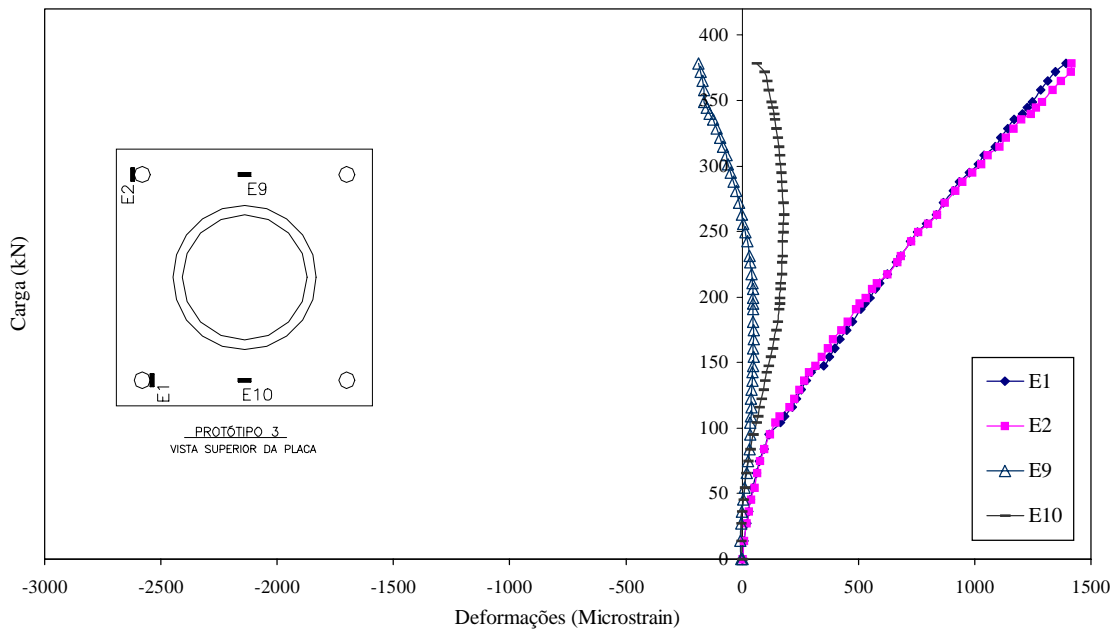


Figura 4.17 – Relação carga x deformação dos extensômetros E1, E2, E9 e E10 do Ensaio 4.

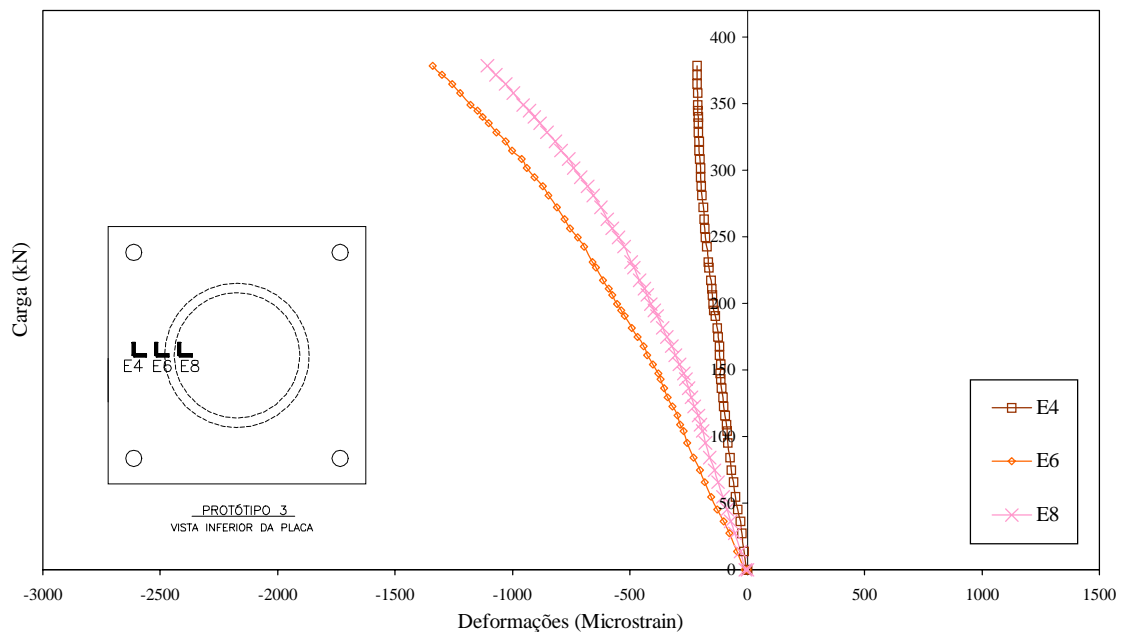


Figura 4.18 – Relação carga x deformação dos extensômetros E4, E6 e E8 do Ensaio 4.

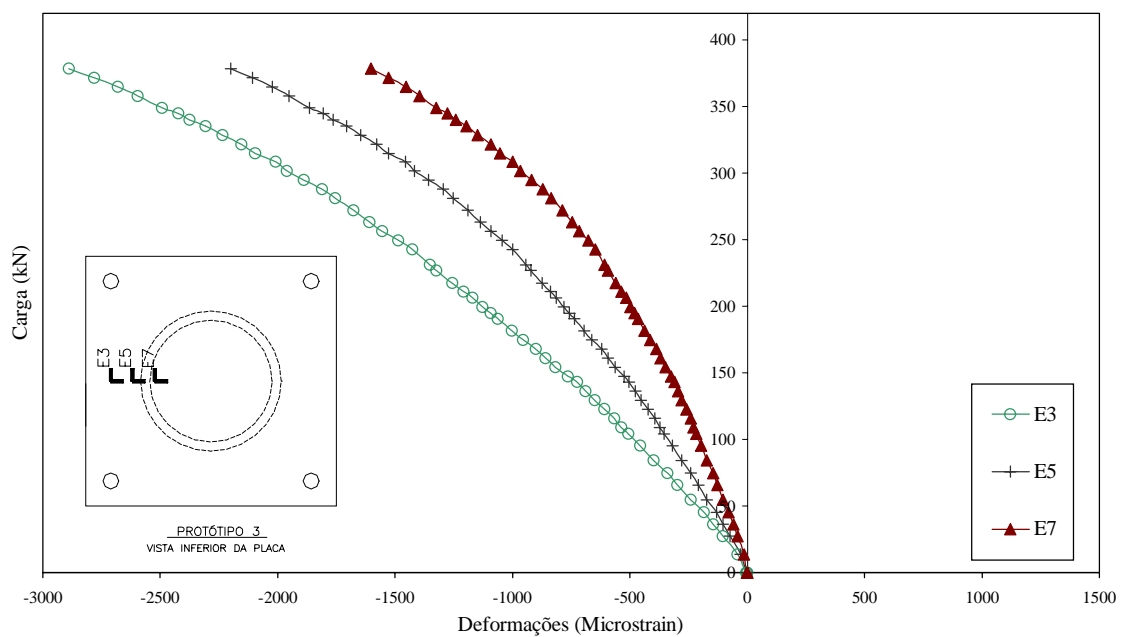


Figura 4.19 – Relação carga x deformação dos extensômetros E3, E5 e E7 do Ensaio 4.

Na figura 4.20 tem-se o deslocamento medido através dos LVDT1 ao LVDT3. Observou-se que não ocorreu deslocamento do bloco de concreto, da placa de base e nem da placa de aplicação da carga, locais onde os LVDT estavam posicionados. As leituras no LVDT 4 foram perdidas devido a problemas na aquisição de dados.

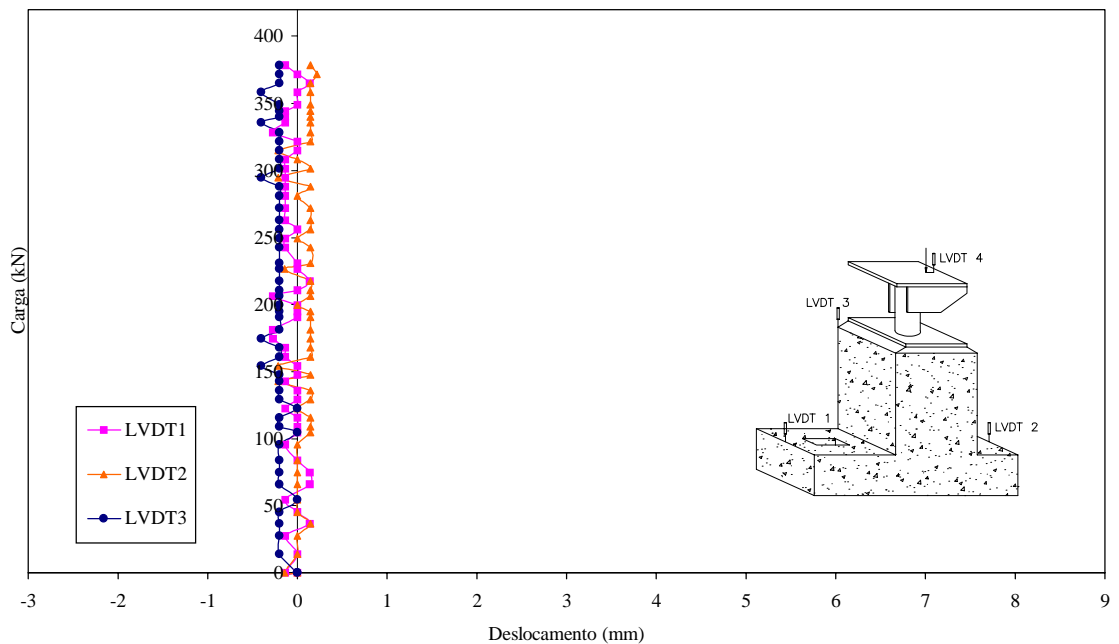


Figura 4.20 – Relação carga x deslocamento dos LVDT1 ao LVDT3 do Ensaio 4.

Foi observado aparecimento de trincas no decorrer da aplicação da carga, chegando a deformar a placa na região tracionada, conforme a figura 4.21 (foto da placa deformada).

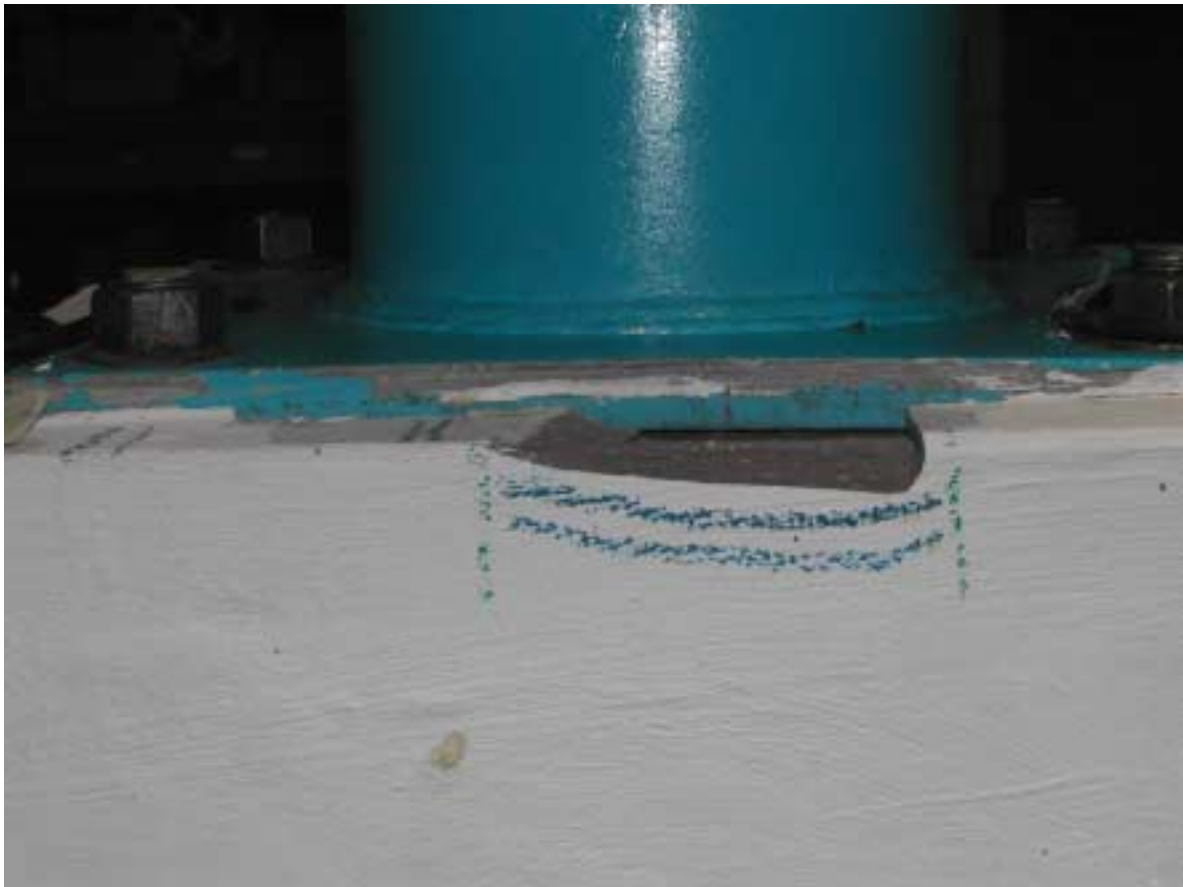


Figura 4.21 – Foto da região da placa de base onde houve deformação aparente no Ensaio 4.

Os resultados da caracterização indicaram um material com tensão de escoamento médio igual a 435,6 MPa , o que equivale no ensaio a carga de 287,9 kN e uma deformação de 195 μ no extensômetro E4 e 1812 μ no E3.

4.3.5. Ensaio 5

Para o Ensaio 5 foi projetado um outro protótipo (Protótipo 4) semelhante ao Protótipo 3, para validar os resultados encontrados no Ensaio 4. Esse Ensaio 5 também foi realizado para uma excentricidade duas vezes o raio externo do tubo, ou seja, 168,3 mm, se obtendo o escoamento da placa de base.

Neste ensaio a instrumentação foi modificada com relação ao ensaio 4, devido a inclusão de extensômetros, de modo a tentar avaliar a distribuição de tensões na região comprimida da placa, assim como no *Ensaio 4*, através dos extensômetros tipo roseta a 45° E1 a E15, onde E1 a E12 na face inferior da placa de base e E13 a E15 na face superior. Nesse ensaio foram colados extensômetros na face superior da placa devido a necessidade de avaliar se há diferenças entre a face inferior e superior da placa. Os extensômetros E16 e E17 foram posicionados de modo a verificar a simetria das deformações com a aplicação de carga.

Nesse ensaio foi necessário rodar o bloco de concreto 180° porque no *Ensaio 4* os chumbadores tracionados escoaram. Os chumbadores que antes estavam comprimidos no *Ensaio 4*, trabalharam tracionados nesse Ensaio 5. Esses chumbadores não foram instrumentados pois na concretagem do bloco foram colocados extensômetros apenas nos chumbadores que antes estavam trabalhando tracionados nos Ensaios 1, 2, 3 e 4. Para controle de deslocamento do bloco de concreto na região que sofre tração foi colocado LVDT, o que podemos observar que não houve deslocamento, conforme figura 4.26.

Nas figuras 4.22 a 4.25 tem-se os gráficos de carga x deformação dos extensômetros colados no protótipo 4 (Ensaio 5).

Na figura 4.22 tem-se a deformação lida nos extensômetros E16 e E17. Os extensômetros E16 e E17 obtiveram valores diferentes um do outro após a aplicação da carga de 97,59 kN, assim como os *extensômetros E9 e E10 do ensaio 4*, devido a deformações iniciais da placa na fabricação da mesma e deformações ocorridas no decorrer ensaio.

Nas figuras 4.23 a 4.25 têm-se as deformações lidas nos extensômetros E1 a E15. Observa-se que os extensômetros E10 e E12, que estão na região mais tracionada e deformada da placa de base possuem os maiores valores de deformação, assim como *E3 e E4 do Ensaio 4*. Os extensômetros E7 e E9 possuem menores deformações que os extensômetros E10 e E12, e os extensômetros E4 e E6, menores deformações que E7 e E9, em função da proximidade com o tubo da coluna, assim como *E7 e E8 menores que E5 e E6 e menores que E3 e E4 do Ensaio 4*. Nesse ensaio foram colocados também os extensômetros E1 e E3 que estão mais próximos do centro da coluna, e ocorreram deformações menores que os E4 e E6, como previsto. Também foram colocados os

extensômetros E13 e E15 na face superior da placa de base, compatíveis com os E10 e E12 da face inferior, e os valores de deformação foram parecidos.

Nesse ensaio foram colocados extensômetros tipo roseta a 45° para calcular as tensões de cisalhamento que ocorrem na placa de base. Dessa forma foram colocados os extensômetros E11, E8, E5, e E2, posicionados a 45° de E10, E7, E4 e E1, respectivamente. Com valores das deformações lidas nos extensômetros foi observado que as deformações do extensômetro E10, foram maiores que o E8, conseqüentemente E8 maiores que o E5 e E5 maiores que o E2, como esperado.

Nesse ensaio 5 foi observado que todos os extensômetros que possuem a mesma posição dos *extensômetros do Ensaio 4* tiveram valores lidos de deformação compatíveis, assim como os valores das deformações lidas nos extensômetros E7>E4>E1>E10 que possuem a mesma ordem de valores dos *extensômetros E4, E6 e E8 do Ensaio 4*. Isso ocorreu devido a leitura dos extensômetros estarem no mesmo sentido de aplicação da carga assim como no *Ensaio 4*, e as leituras dos extensômetros E4 e E7 são maiores que as leituras do E10 devido E4 e E7 estarem mais próximos da face externa da coluna que possui alta concentração de tensão, pois a carga aplicada na coluna desce para a placa de base através das paredes da coluna.

A carga máxima no ensaio foi de 414,70 kN e a deformação máxima foi de 2896 microstrain no extensômetro E12, que é compatível com o *E3 do Ensaio 4*.

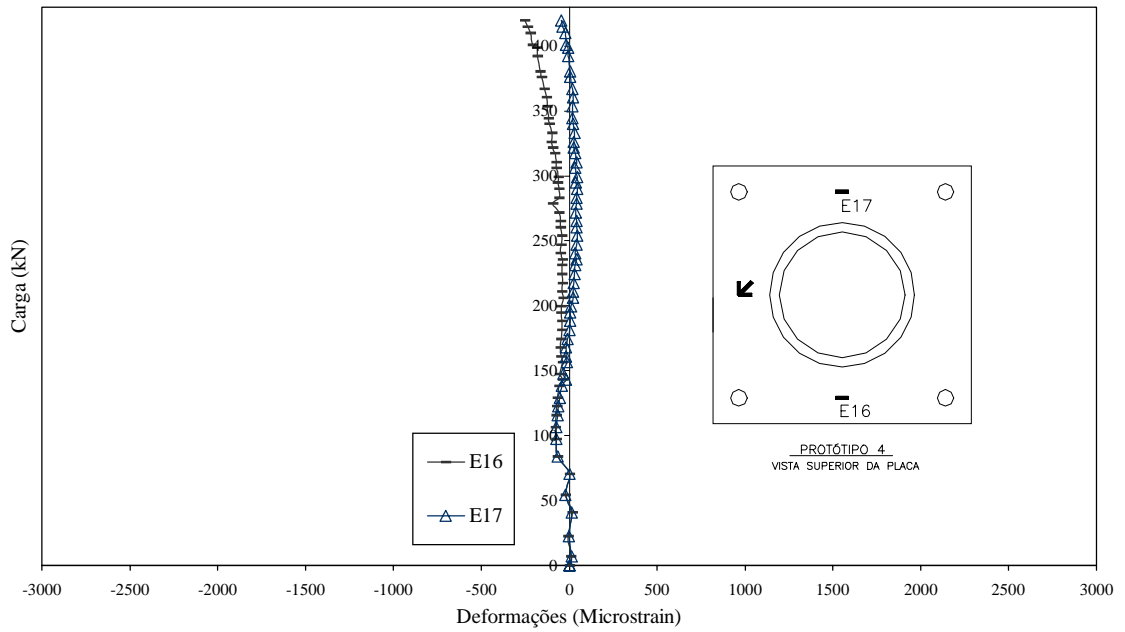


Figura 4.22 – Relação carga x deformação de E16 e E17 do Ensaio5.

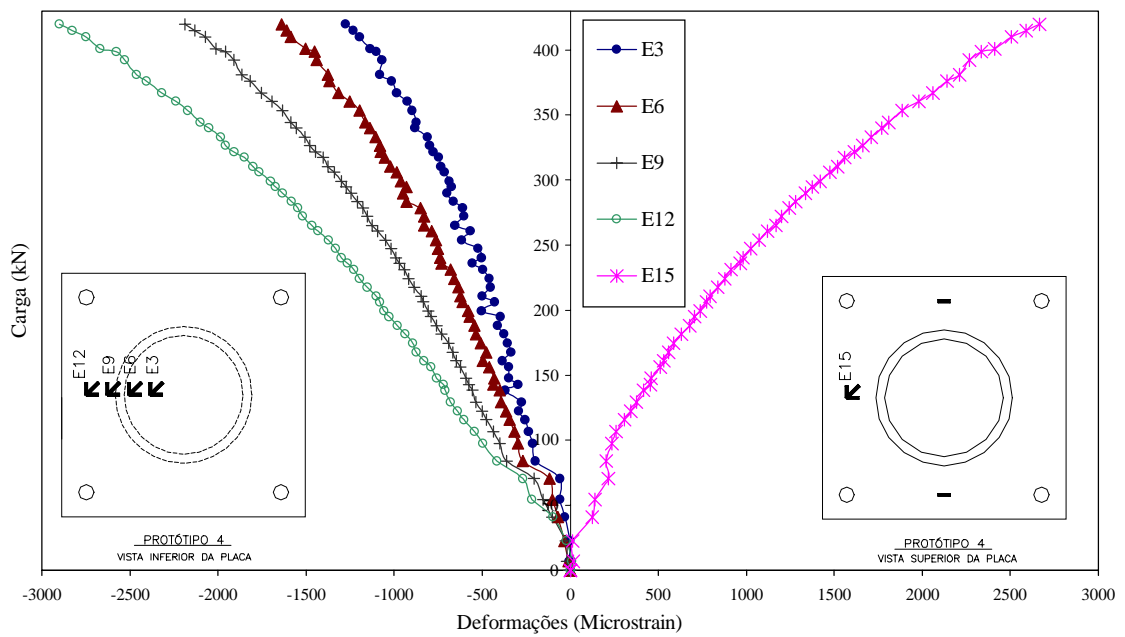


Figura 4.23 – Relação carga x deformação de E3, E6, E9, E12 e E15 do Ensaio 5.

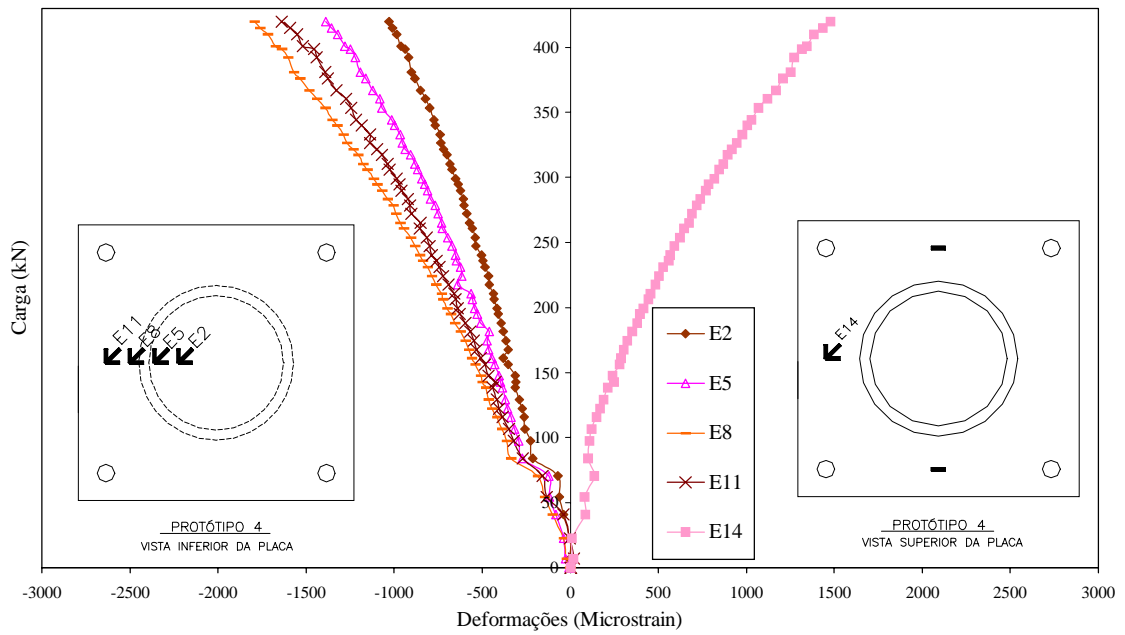


Figura 4.24 – Relação carga x deformação de E2, E5, E8, E11 e E14 do Ensaio 5.

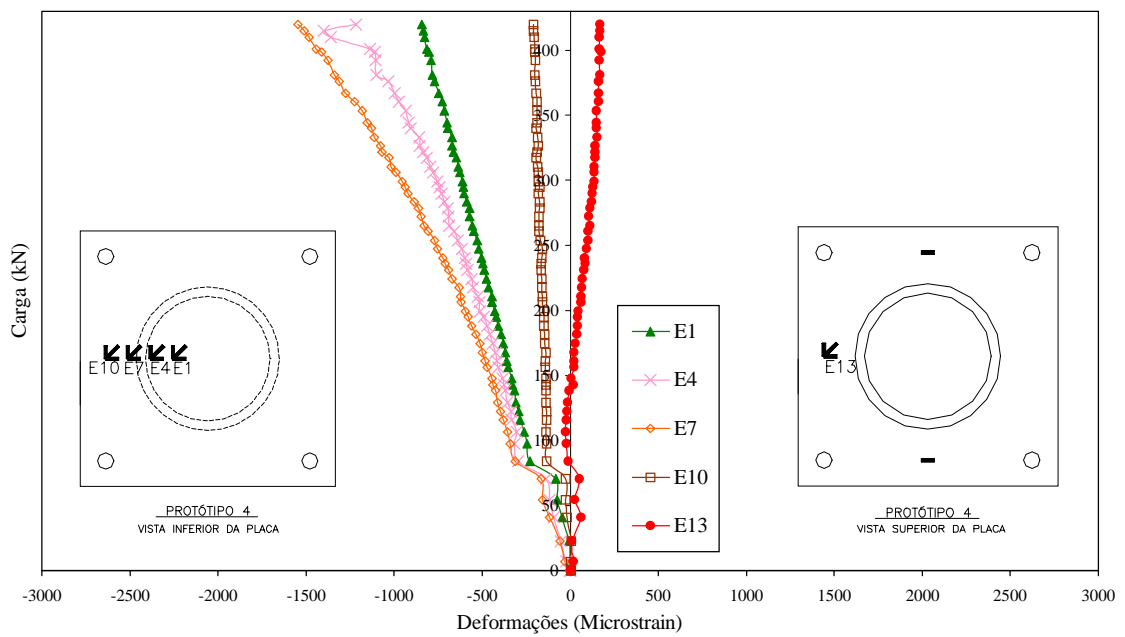


Figura 4.25 – Relação carga x deformação de E1, E4, E7, E10 e E13 do Ensaio 5.

Na figura 4.26 tem-se o deslocamento medido através dos LVDT1 ao LVDT3. Observou-se que não ocorreu deslocamento do bloco de concreto próximo ao ponto de aplicação da carga onde o LVDT4 foi posicionado. Também observou-se deslocamentos que indicam a movimentação ocasionada pela deformação da placa de base. As leituras no LVDT4 foram perdidas devido a problemas na aquisição de dados.

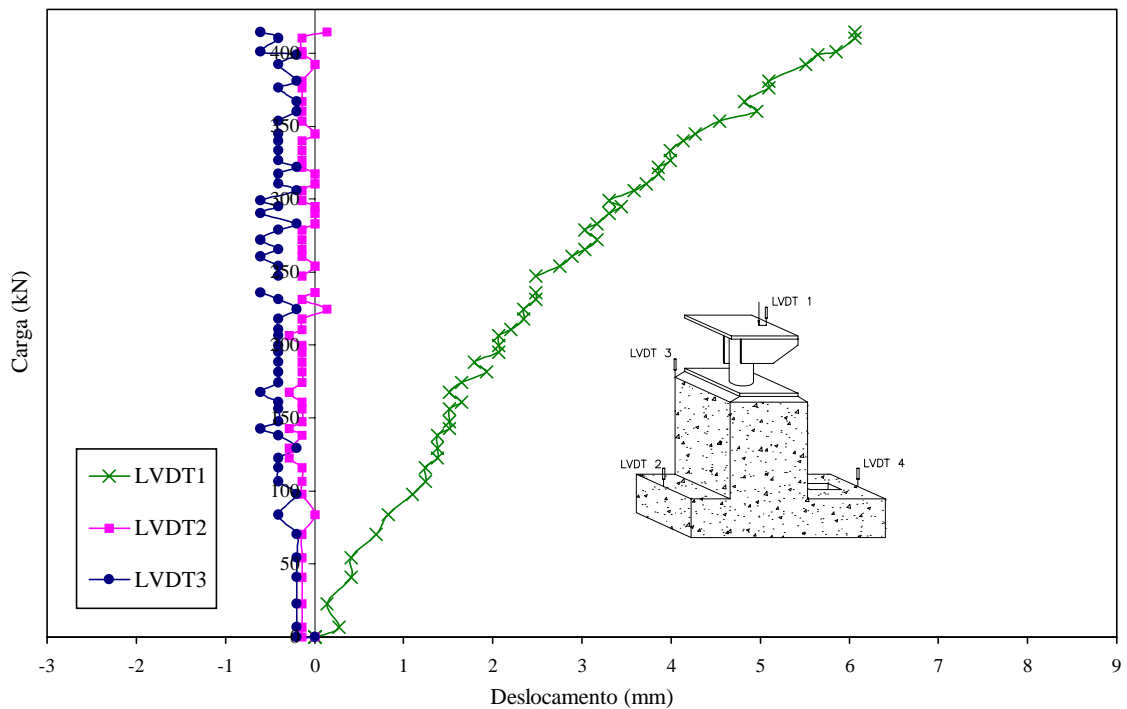


Figura 4.26 – Relação carga x deslocamento dos LVDT 1 a LVDT 3 do Ensaio 5.

Assim como no ensaio 4, foi observado aparecimento de trincas no decorrer da aplicação da carga, chegando a deformar totalmente a placa na região de maiores tensões, conforme a figura 4.27 (foto da placa deformada).



Figura 4.27 – Foto da região da placa de base onde houve deformação aparente no Ensaio5.

Os resultados da caracterização indicaram um material com tensão de escoamento médio igual a 435,6 MPa , o que equivale no ensaio a carga de 310,5 kN e uma deformação de 185 μ no extensômetro E10 e 1802 μ no E12 .

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a análise dos resultados dos ensaios realizados. Obteve-se, a partir das deformações medidas no laboratório, as tensões principais que produziram as deformações nas placas de base dos ensaios. Em seguida realizaram-se as comparações previstas. As análises realizadas foram no limite elástico do material.

5.2. ANÁLISE TEÓRICA DAS DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS

Nesse item de análise teórica das deformações específicas, serão estudados os critérios de ruptura em estado plano de tensões, o estado plano de deformações específicas e a medida das deformações específicas em laboratório. Esse estudo que será apresentado foi retirado do livro de resistência dos materiais de BEER & JOHNSTON.

5.2.1. Critérios de Ruptura em Estado Plano de Tensões

Os elementos estruturais são projetados de modo que o material que os compõem, sendo material dúctil, não venha a escoar pela ação dos carregamentos esperados. Quando o elemento está sob ação de estado uniaxial de tensão, o valor da tensão normal, σ_x , que vai provocar escoamento do material pode ser obtido através de ensaio de tração em corpo de prova do mesmo material, uma vez que o elemento e o corpo de prova estão sob o mesmo tipo de sollicitação e sob o mesmo estado de tensões. Assim, mesmo não levando em consideração os mecanismos reais que levam o material ao escoamento, podemos estabelecer que a peça estrutural está segura enquanto $\sigma_x < \sigma_y$, onde σ_y é a tensão de escoamento do material no teste de tração.

Por outro lado, quando o elemento estrutural está submetido a estado plano de tensões, é conveniente determinar as tensões principais, σ_a e σ_b , em um certo ponto. Podemos considerar o material como estando sujeito a um estado biaxial de tensões naquele ponto. Desse modo, não é possível prever diretamente no ensaio de tração

citado anteriormente, se o material que compõe o elemento estrutural em estudo vai atingir a ruptura ou não. É necessário, antes disso, estabelecer algum critério que leve em consideração o real mecanismo de ruptura do material, que permita comparar os efeitos dos dois estados de tensões a que está submetido o material. Existem dois critérios de ruptura mais frequentemente usados: o *critério da máxima tensão de cisalhamento* e o *critério da máxima energia de distorção*. Neste trabalho iremos apresentar apenas o *critério da máxima tensão de cisalhamento* que foi utilizado nas análises.

O *critério da máxima tensão de cisalhamento* se baseia no fato de que o escoamento dos materiais dúcteis é causado por deslizamento do material ao longo de superfícies oblíquas, deslizamento devido principalmente a tensões cisalhantes. Por este critério, um elemento estrutural é considerado seguro enquanto a tensão máxima de cisalhamento, $\tau_{\text{máx}}$, no elemento não excede a tensão de cisalhamento correspondente a um corpo de prova do mesmo material, que escoou no ensaio de tração.

Lembramos que a tensão de cisalhamento máxima no caso de carga axial centrada é igual à metade do valor da tensão normal correspondente. Concluímos então que a tensão de cisalhamento máxima em um corpo de prova em ensaio de tração é $\frac{1}{2} \sigma_x$ no instante em que o material inicia o escoamento. Lembramos também que, para o estado plano de tensões, o valor máximo da tensão de cisalhamento, $\tau_{\text{máx}}$, é igual a $\frac{1}{2} \sigma_{\text{máx}}$ se as tensões principais são ambas positivas ou negativas, e igual a $\frac{1}{2} |\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}|$ se a tensão máxima é positiva e a tensão mínima é negativa. Desse modo, se as tensões principais σ_a e σ_b têm o mesmo sinal, o critério da máxima tensão de cisalhamento nos leva a:

$$|\sigma_a| < \sigma_y \quad \text{e} \quad |\sigma_b| < \sigma_y \quad (5.1)$$

Se as tensões principais σ_a e σ_b têm sinais contrários, o critério da máxima tensão de cisalhamento leva a:

$$|\sigma_a - \sigma_b| < \sigma_y \quad (5.2)$$

5.2.2. Estado Plano de Deformações Específicas

O estudo a seguir será limitado a estados planos de deformações, isto é, àquelas situações em que as deformações do material ocorrem em planos paralelos e são iguais em cada um desses planos. Se escolhermos o eixo z como sendo perpendicular aos planos em que ocorrem as deformações, temos $\varepsilon_z = \gamma_{zx} = \gamma_{zy} = 0$, e as únicas deformações que aparecem são as componentes ε_x , ε_y e γ_{xy} .

Analisando as variações das deformações específicas para uma rotação dos eixos coordenados, observamos que as equações de $\varepsilon_{x'}$, $\varepsilon_{y'}$ e $\gamma_{x'y'}$ (equações 5.3, 5.4 e 5.5) têm uma semelhança formal com as equações para a transformação de tensões planas $\sigma_{x'}$, $\sigma_{y'}$ e $\tau_{x'y'}$ (equações 5.6, 5.7 e 5.8). As primeiras podem ser obtidas das segundas, por substituição das tensões normais pelas correspondentes deformações específicas normais, e pela substituição das tensões de cisalhamento τ_{xy} e $\tau_{x'y'}$, por metade das deformações de cisalhamento correspondentes, quer dizer, por $\frac{1}{2} \gamma_{xy}$ e $\frac{1}{2} \gamma_{x'y'}$, respectivamente.

$$\varepsilon_{x'} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cdot \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \cdot \sen 2\theta \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_{y'} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cdot \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \cdot \sen 2\theta \quad (5.4)$$

$$\gamma_{x'y'} = -(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cdot \sen 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta \quad (5.5)$$

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \cos 2\theta + \tau_{xy} \cdot \sen 2\theta \quad (5.6)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \cos 2\theta - \tau_{xy} \cdot \sen 2\theta \quad (5.7)$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \sen 2\theta + \tau_{xy} \cdot \cos 2\theta \quad (5.8)$$

As equações 5.3, 5.4 e 5.5 vieram da equação 5.9 que nos permite determinar a deformação específica normal em qualquer direção OB, $\epsilon(\theta)$, em função das componentes de deformação ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy} e do ângulo θ que OB forma com o eixo x, como mostra a figura 5.1. Verificamos que, para $\theta = 0^\circ$, a equação 5.9 leva a $\epsilon(0^\circ) = \epsilon_x$ e que, para $\theta = 90^\circ$, leva a $\epsilon(90^\circ) = \epsilon_y$. Por outro lado, se fizermos $\theta = 45^\circ$ na equação 5.9, vamos obter a deformação específica normal na direção da bissetriz OB do ângulo formado por x e y, $\epsilon(45^\circ)$, na equação 5.10.

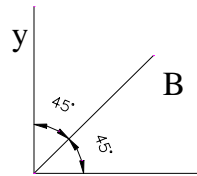


Figura 5.1 – Plano xy das deformações específicas.

$$\epsilon(\theta) = \epsilon_x \cos^2 \theta + \epsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (5.9)$$

$$\epsilon(45^\circ) = \frac{1}{2} \cdot (\epsilon_x + \epsilon_y + \gamma_{xy}) \quad (5.10)$$

5.2.3. Medida das Deformações Específicas em Laboratório

As deformações específicas podem ser determinadas em qualquer direção na superfície de um elemento estrutural a partir da medição utilizando extensômetros elétricos de resistência que utiliza como princípio a proporcionalidade entre as deformações específicas e a resistência elétrica.

As componentes de deformação ϵ_x e ϵ_y , mostradas na figura 5.2, podem ser determinadas em um ponto da superfície livre de um material pela simples medição das deformações normais específicas ao longo dos eixos x e y desenhadas nesse ponto utilizando extensômetros. Se usarmos um terceiro extensômetro para a direção da

bissetriz OB do ângulo formado pelos eixos x e y, a equação 5.11 permite determinar a deformação de cisalhamento γ_{xy} :

$$\gamma_{xy} = 2 \cdot \epsilon_{OB} - (\epsilon_x + \epsilon_y) \quad (5.11)$$

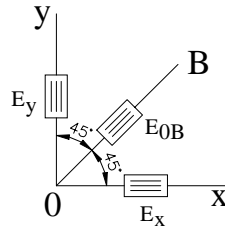


Figura 5.2 – Detalhe do posicionamento dos extensômetros no plano xy.

Devemos observar que as componentes de deformações ϵ_x , ϵ_y e γ_{xy} em um certo ponto podem ser obtidas com resultados de medições normais feitas ao longo de três linhas quaisquer desenhadas por esse ponto (figura 5.3). Chamando de θ_1 , θ_2 e θ_3 os ângulos que cada uma das linhas faz com o eixo x, e de ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 as medições correspondentes, substituímos na equação 5.9 esses valores, obtemos as três equações 5.12, 5.13 e 5.14 que podem ser resolvidas simultaneamente para ϵ_x , ϵ_y e γ_{xy} .

$$\epsilon_1 = \epsilon_x \cos^2 \theta_1 + \epsilon_y \sin^2 \theta_1 + \gamma_{xy} \sin \theta_1 \cos \theta_1 \quad (5.12)$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_x \cos^2 \theta_2 + \epsilon_y \sin^2 \theta_2 + \gamma_{xy} \sin \theta_2 \cos \theta_2 \quad (5.13)$$

$$\epsilon_3 = \epsilon_x \cos^2 \theta_3 + \epsilon_y \sin^2 \theta_3 + \gamma_{xy} \sin \theta_3 \cos \theta_3 \quad (5.14)$$

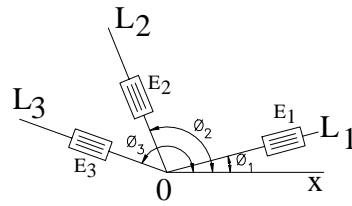


Figura 5.3 – Detalhe do posicionamento dos extensômetros em um plano qualquer.

Deve ser observado que a superfície livre, em que são medidas as deformações, está em estado plano de tensões, enquanto as equações 5.9 e 5.11 foram deduzidas para um estado plano de deformações. Como já foi visto, no entanto, a normal à superfície livre é um eixo principal de deformações.

O arranjo de extensômetros usados na medição de três deformações específicas em laboratório ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 é conhecido pelo nome de roseta de deformação. A roseta usada na medição de deformações normais ao longo dos eixos x e y e de sua bissetriz é chamada de roseta de 45° . Este arranjo de extensômetros só é possível em um estado plano de tensões uma vez que na face onde está a roseta não podem atuar tensões. Conhecidas as deformações em três direções e com as equações 5.12, 5.13 e 5.14, obtêm-se os valores de ϵ_x , ϵ_y e γ_{xy} . Usando-se as equações 5.15, 5.16 e 5.17 calculam-se as tensões σ_x , σ_y e τ_{xy} que produziram as deformações no elemento.

$$\sigma_x = \frac{(\epsilon_x + \nu\epsilon_y) \cdot E}{(1 - \nu^2)} \quad (5.15)$$

$$\sigma_y = \frac{(\epsilon_y + \nu\epsilon_x) \cdot E}{(1 - \nu^2)} \quad (5.16)$$

$$\tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy} \quad (5.17)$$

5.3. CÁLCULO DAS TENSÕES PRINCIPAIS NOS ENSAIOS

Neste item serão calculadas as tensões principais σ_1 e σ_2 a partir das deformações lidas pelos extensômetros nos ensaios para analisar o comportamento elástico da placa de base. As tensões principais normais e de cisalhamento que produziram as deformações medidas nos ensaios foram calculadas utilizando as equações 5.15, 5.16 e 5.17 e serão apresentadas em forma de gráfico para uma melhor visualização.

Nas figuras 5.4 a 5.21 estão apresentados os gráficos de carga x tensão principal de cada roseta de deformação, formada pelo par de extensômetros tipo roseta a 45° posicionados na face superior ou inferior da placa de base ou nos chumbadores tracionados. Não foram calculadas as tensões provenientes das deformações medidas por extensômetros colados em uma direção. As tabelas que geraram os gráficos apresentados neste capítulo estão no anexo II.

O valor da carga que levou a placa de base ao escoamento foi encontrado a partir da tensão de escoamento do aço da placa de base, proveniente do ensaio de caracterização do material da mesma.

5.3.1. Ensaio 1

Neste Ensaio 1 a maior tensão ocorreu no par de extensômetros E5 e E6, com o valor de 179,30 MPa. O maior valor de carga, 600,32 kN, não levou o escoamento da placa de base porque o ensaio foi paralisado por problemas na aplicação de carga (item 4.3.1).

Serão apresentados os gráficos das tensões principais, aqui chamados de Tensão 1 e Tensão 2, calculados a partir das 3 rosetas de deformações compostas pelos extensômetros E3/E4, E5/E6 e E7/E8. O caso de tensões obtidas a partir de deformações medidas por extensômetro colado em uma direção encontram-se nos anexos.

Observa-se nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentadas a seguir que as tensões máximas encontram-se abaixo da tensão de escoamento do aço da placa de base. Na figura 5.4 tem-se a distribuição de tensões no núcleo da coluna fortemente influenciada

pela baixa excentricidade de carga. Na figura 5.5, tem-se as tensões máximas que ocorreram na placa de base.

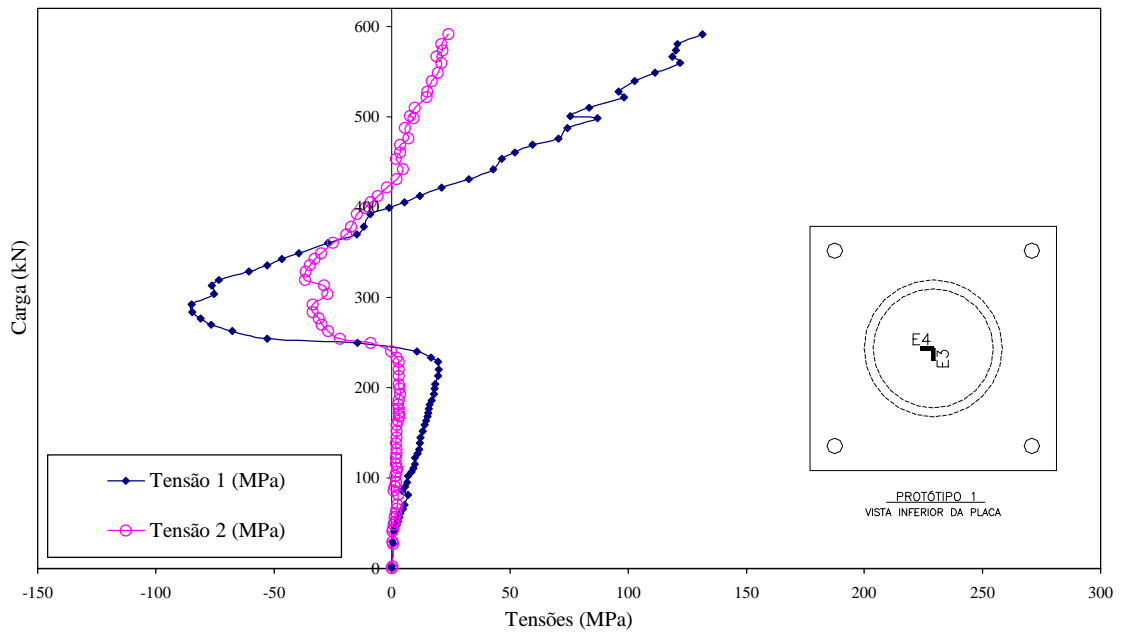


Figura 5.4 - Relação carga x tensão dos extensômetros E3 e E4 do Ensaio 1.

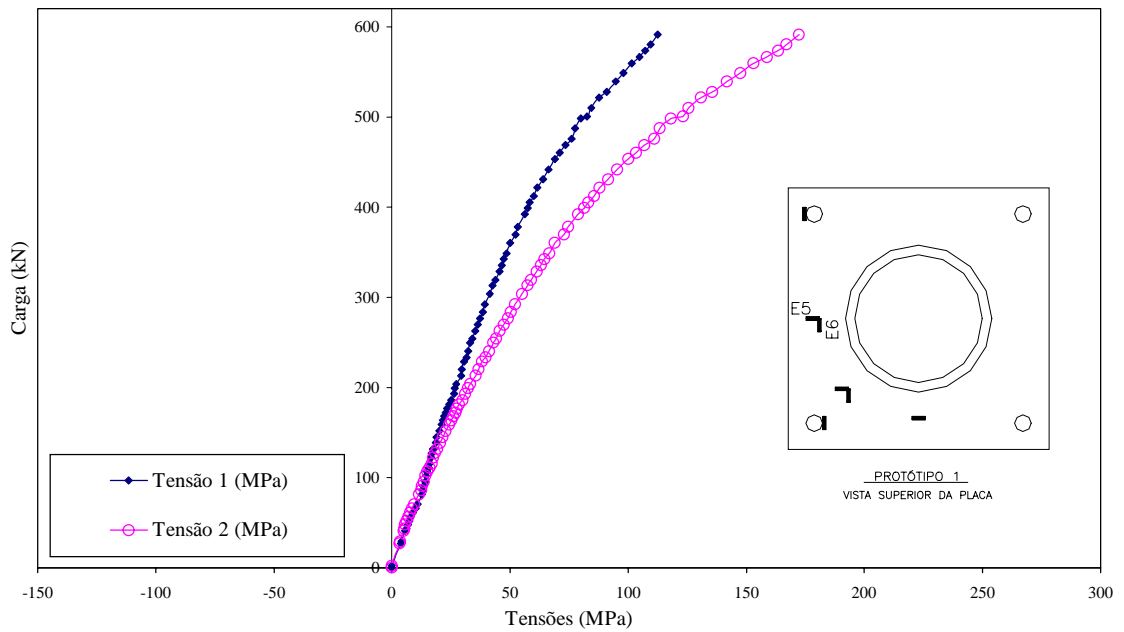


Figura 5.5 - Relação carga x tensão dos extensômetros E5 e E6 do Ensaio 1.

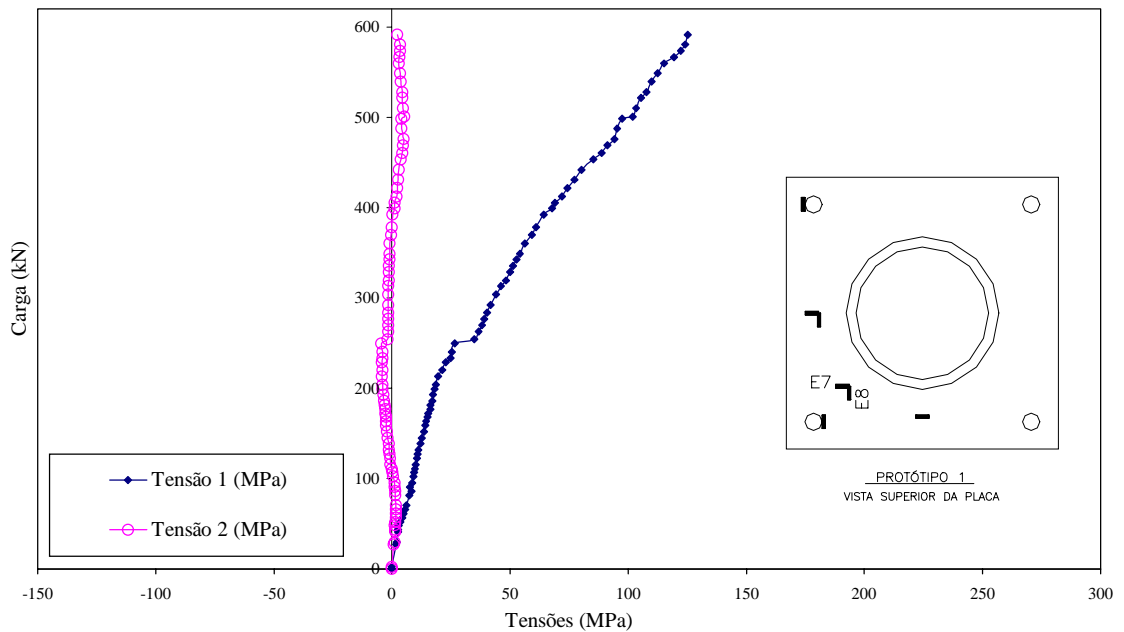


Figura 5.6 - Relação carga x tensão dos extensômetros E7 e E8 do Ensaio 1.

5.3.2. Ensaio 2

Neste Ensaio 2 a maior tensão, assim como no *Ensaio 1*, ocorreu no par de extensômetros E5 e E6, com o valor de 928,77 MPa. Ocorreu o escoamento da placa de base com o valor de carga de 158,70 kN e tensão de 291,18 MPa, que corresponde a deformação específica lida no par de extensômetros E5 e E6 de 584 μ e 1073 μ respectivamente.

Nos gráficos representados a seguir tem-se as tensões obtidas a partir das 3 rosetas formadas pelos extensômetros E3/E4, E5/E6 e E7/E8.

Na figura 5.7 observa-se que as tensões no núcleo central são nulas e novamente na figura 5.8, são mostradas as tensões máximas nos pontos dos extensômetros E5/E6.

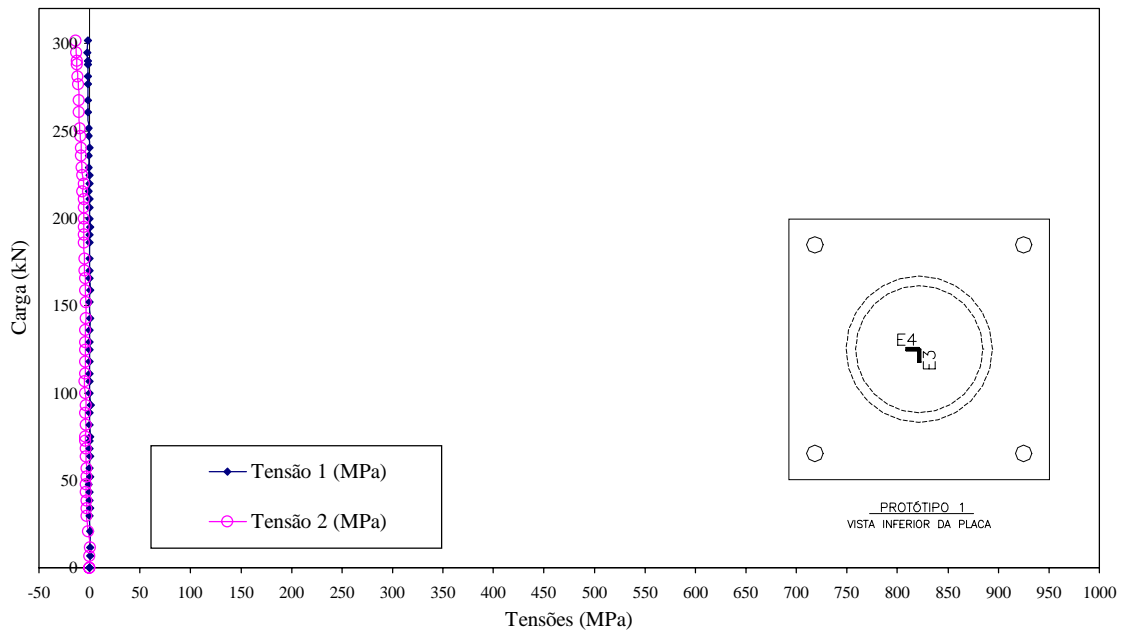


Figura 5.7 - Relação carga x tensão dos extensômetros E3 e E4 do Ensaio 2.

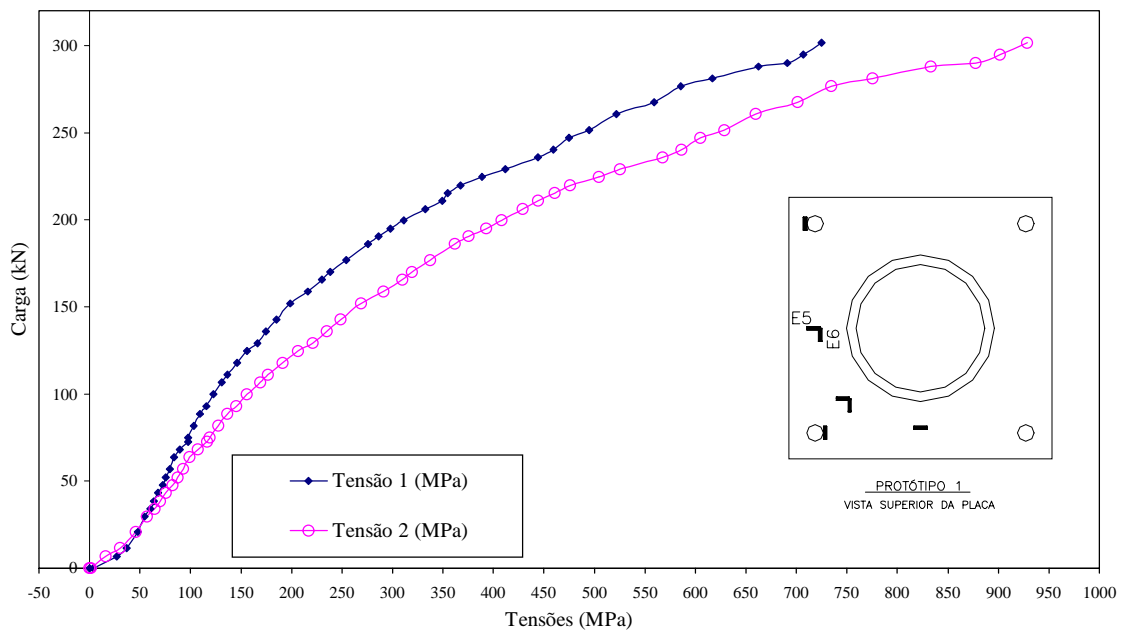


Figura 5.8 - Relação carga x tensão dos extensômetros E5 e E6 do Ensaio 2.

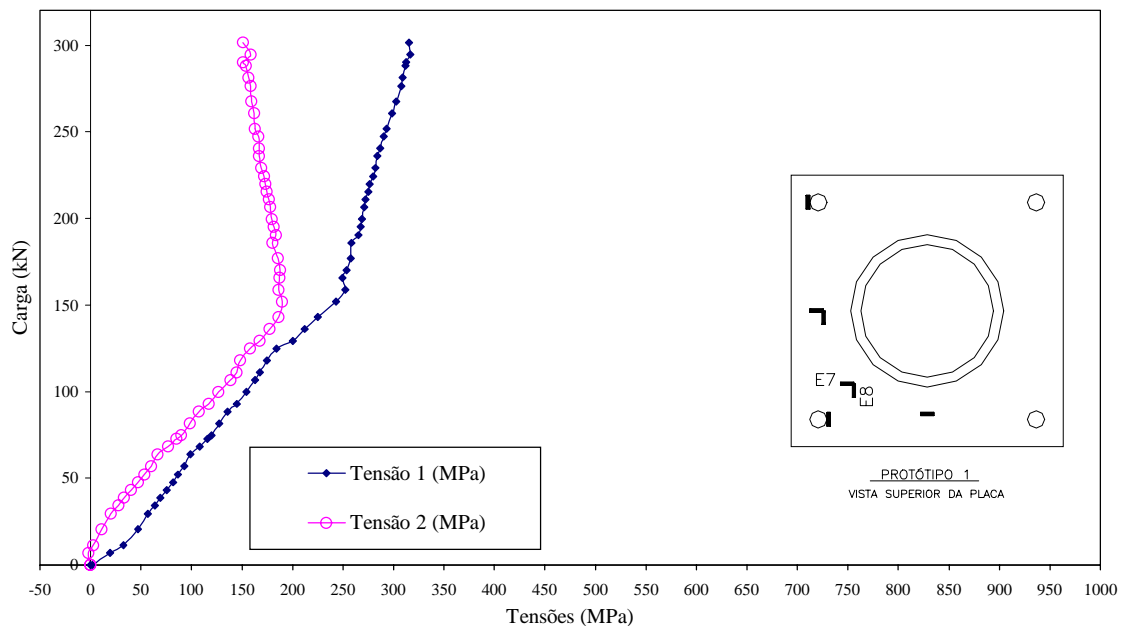


Figura 5.9 - Relação carga x tensão dos extensômetros E7 e E8 do Ensaio 2.

5.3.3. Ensaio 3

Este Ensaio 3 é semelhante ao *Ensaio 2*, o que é possível observar a partir dos gráficos das tensões ilustrados a seguir. A maior tensão, assim como no *Ensaio 2*, ocorreu no par de extensômetros E3 e E4, que corresponde a posição dos *extensômetros E5 e E6 do Ensaio 2*, com o valor de 1274 MPa. Ocorreu o escoamento da placa de base com o valor de carga de 163,30 kN e tensão de 295,61 MPa, que corresponde a deformação específica lida no par de extensômetros E3 e E4 de 509 μ e 1117 μ respectivamente.

Os gráficos a seguir ilustram as tensões medidas pelas 4 rosetas compostas pelos extensômetros E3/E4, E5/E6, E10/E11 e E12/E13. O caso de tensões obtidas a partir de deformações medidas por extensômetro colado em uma direção encontram-se nos anexos.

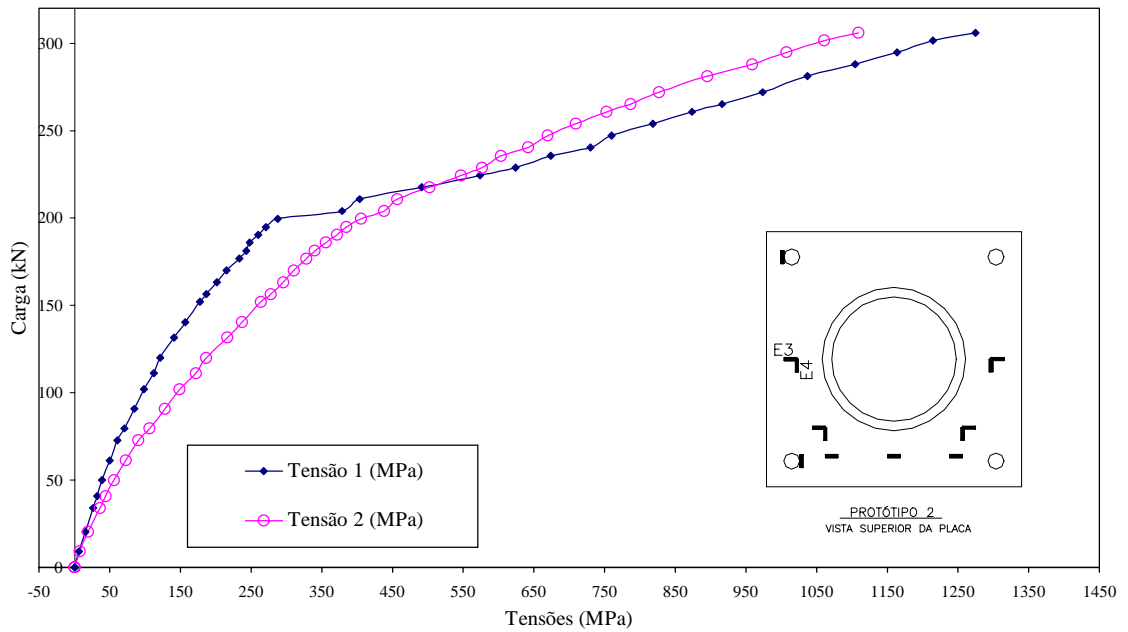


Figura 5.10 - Relação carga x tensão dos extensômetros E3 e E4 do Ensaio 3.

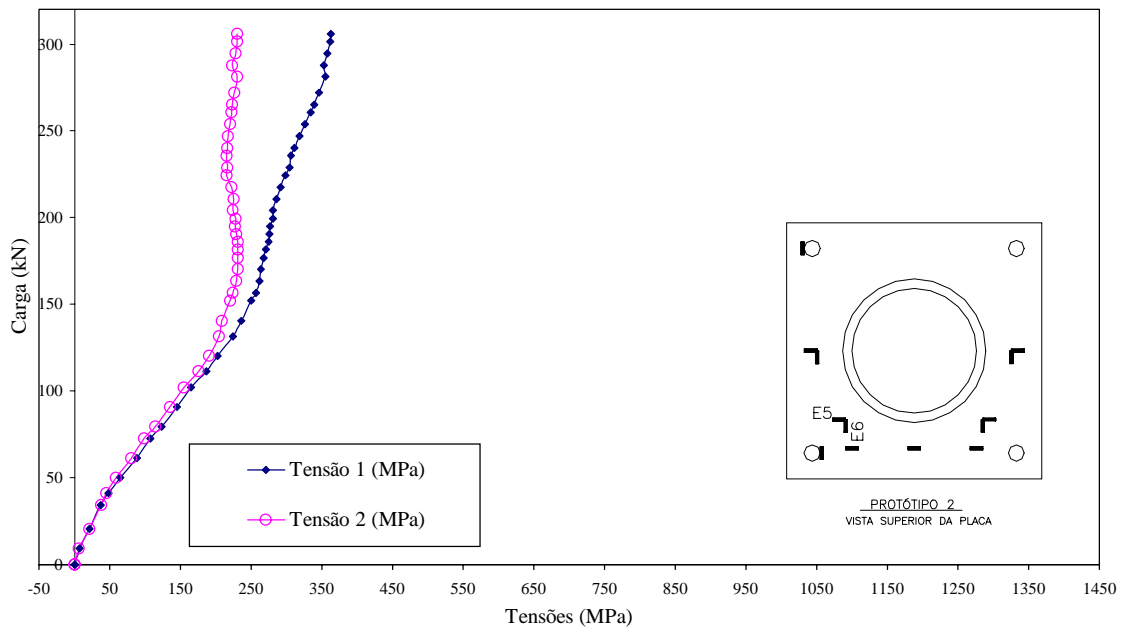


Figura 5.11 - Relação carga x tensão dos extensômetros E5 e E6 do Ensaio 3.

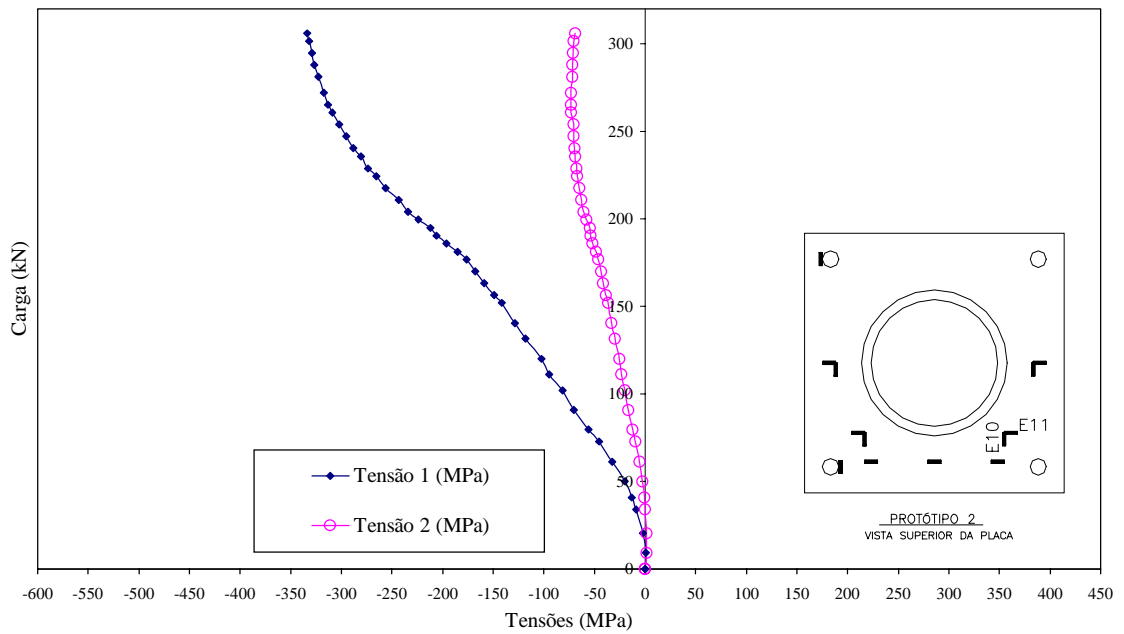


Figura 5.12 - Relação carga x tensão dos extensômetros E10 e E11 do Ensaio 3.

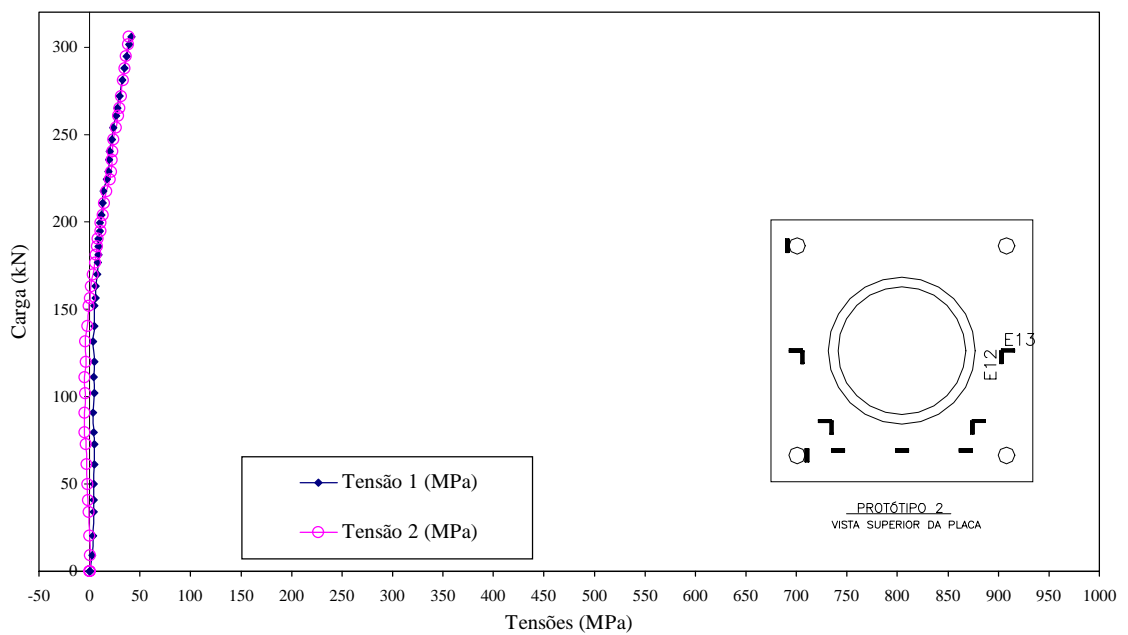


Figura 5.13 - Relação carga x tensão dos extensômetros E12 e E13 do Ensaio 3.

Observa-se nos gráficos das figuras 5.10 e 5.11 que o comportamento das tensões são análogos ao *Ensaio 2*. Os gráficos das figuras 5.12 e 5.13 correspondem a rosetas coladas na região comprimida da placa. O nível de tensões observado é inferior ao da região tracionada, caracterizando neste caso a influência do bloco de concreto como apoio da placa. Observam-se ainda, tensões neutras na linha de eixo da carga, onde estão colados os extensômetros E12/E13 (figura 5.13), o que pode ser associado a maior distância em relação ao eixo central que os outros pontos instrumentados e a posição da linha neutra. Observam-se também níveis de tensões de tração na fase plástica o que pode ser justificado pela redistribuição de tensões e ainda o chumbador. Na roseta dos extensômetros E10/E11 (figura 5.12) tem-se níveis maiores de compressão.

5.3.4. Ensaio 4

Neste Ensaio 4 a espessura da placa de base foi de 16 mm, mas a excentricidade de aplicação da carga manteve-se em 168,30 mm. A maior tensão ocorreu no par de extensômetros E3 e E4, com o valor de 681,10 MPa. Ocorreu o escoamento da placa de base com o valor de carga de 287,9 kN e tensão de 431,66 MPa, que corresponde a deformação específica lida no par de extensômetros E3 e E4 de 1812 μ e 195 μ respectivamente.

Os gráficos a seguir ilustram as tensões medidas pelas 3 rosetas compostas pelos extensômetros E3/E4, E5/E6 e E7/E8.

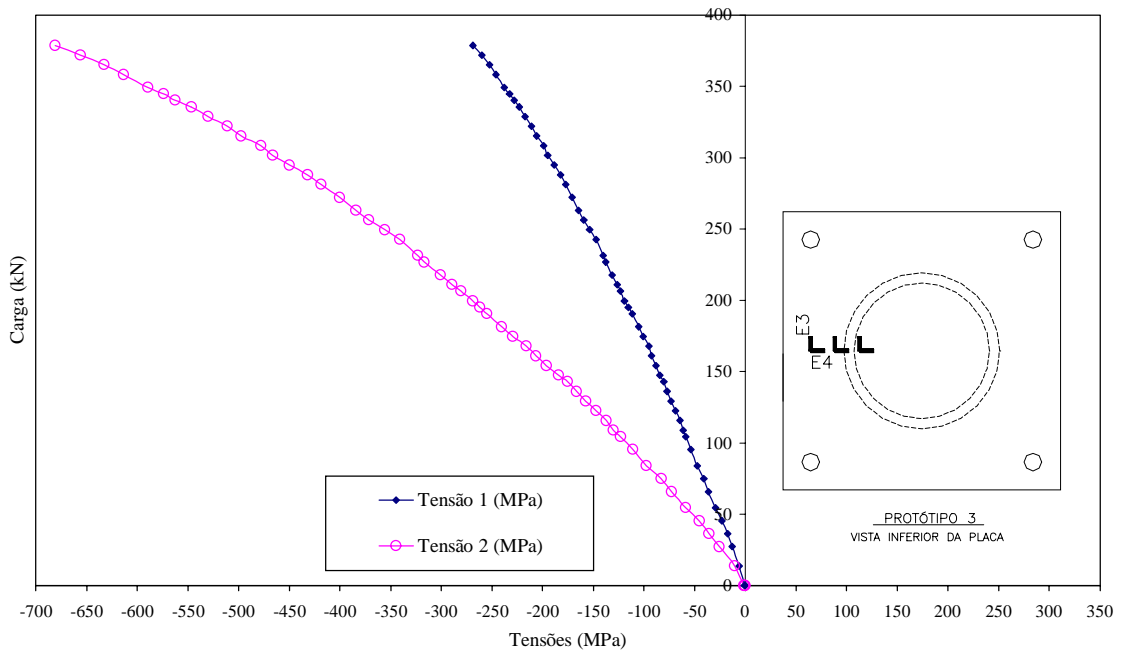


Figura 5.14 - Relação carga x tensão dos extensômetros E3 e E4 do Ensaio 4.

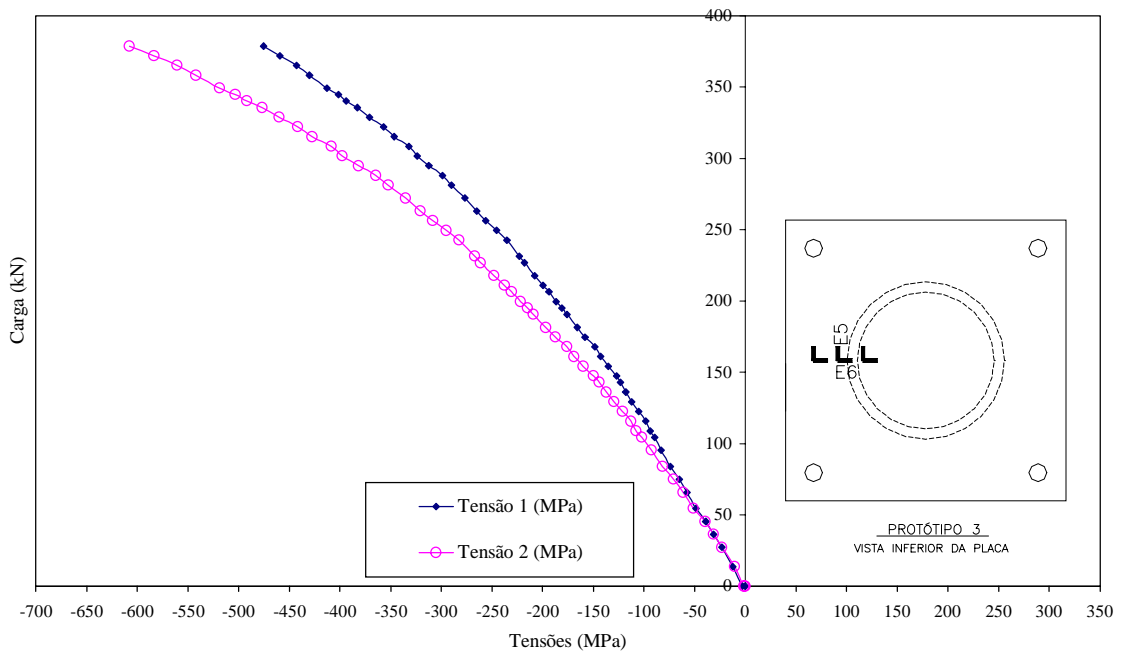


Figura 5.15 - Relação carga x tensão dos extensômetros E5 e E6 do Ensaio 4.

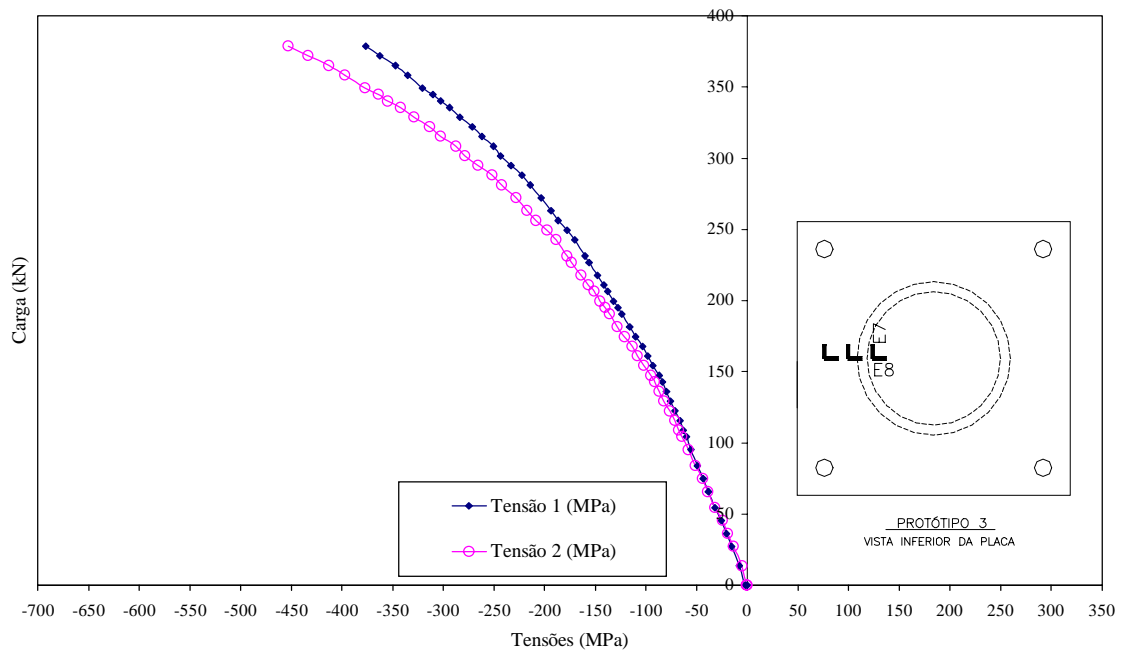


Figura 5.16 - Relação carga x tensão dos extensômetros E7 e E8 do Ensaio 4.

5.3.5. Ensaio 5

Este Ensaio 5 foi realizado nas mesmas condições do *Ensaio 4*, então é importante observar a semelhança entre os resultados dos dois ensaios, por exemplo através dos gráficos das tensões mostrados a seguir. Neste ensaio além dos extensômetros posicionados nos mesmos lugares do *Ensaio 4* foram posicionados mais 6 extensômetros dos quais 3 foram posicionados próximo do núcleo central da placa e os outros 3 na face superior da placa. Com os extensômetros próximos do núcleo central foi possível encontrar a posição da linha neutra. E com os extensômetros da face superior podemos verificar que os esforços são os mesmos tanto na face superior quanto na face inferior da placa de base. A maior tensão, assim como no *Ensaio 4*, ocorreu no par de extensômetros E10 e E12, que corresponde a posição dos *extensômetros E3 e E4 do Ensaio 4*, com o valor de 683,48 MPa. Ocorreu o escoamento da placa de base com o valor de carga de 310,50 kN e tensão de 428,60 MPa, que corresponde a deformação específica lida no par de extensômetros E10 e E12 de 185 μ e 1802 μ respectivamente.

Os gráficos a seguir ilustram as tensões medidas pelas 5 rosetas compostas pelos extensômetros E1/E2/E3, E4/E5/E6, E7/E8/E9, E10/E11/E12 e E13/E14/E15, cujas posições encontram-se na figura 3.16 apresentada no capítulo 3.

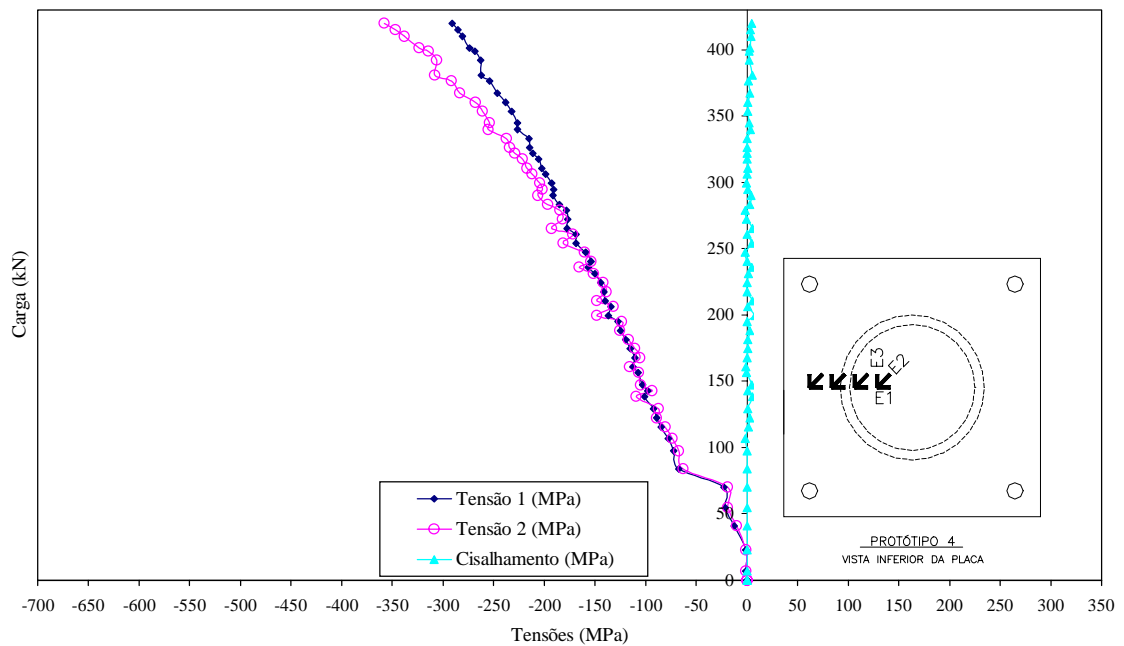


Figura 5.17 - Relação carga x tensão dos extensômetros E1, E2 e E3 do Ensaio 5.

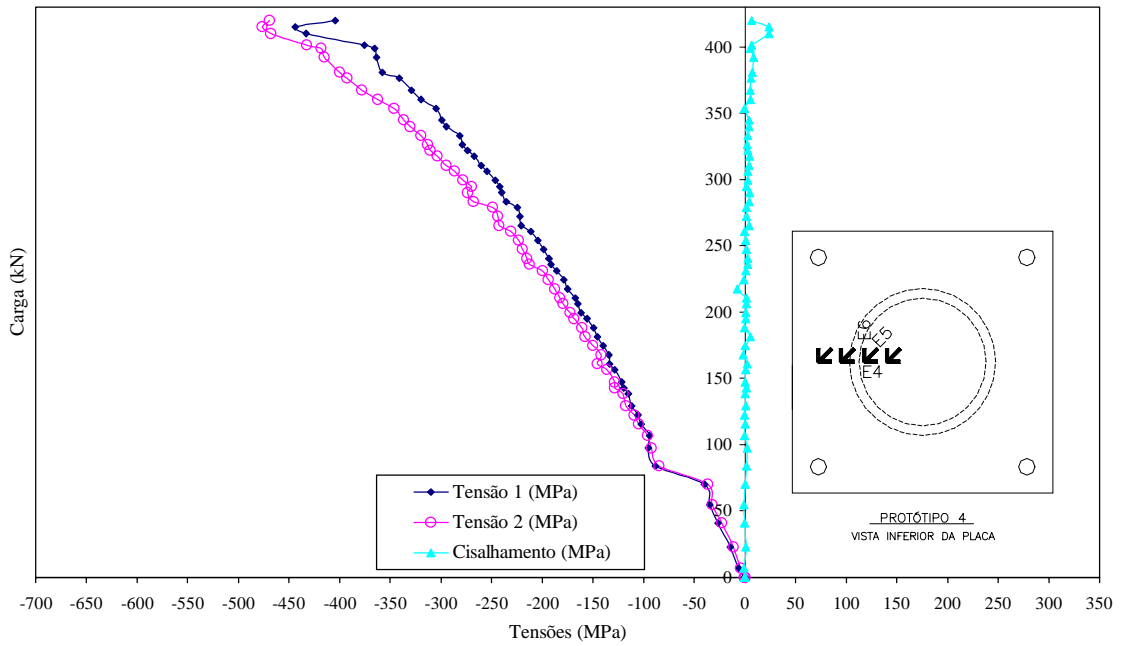


Figura 5.18 - Relação carga x tensão dos extensômetros E4, E5 e E6 do Ensaio 5.

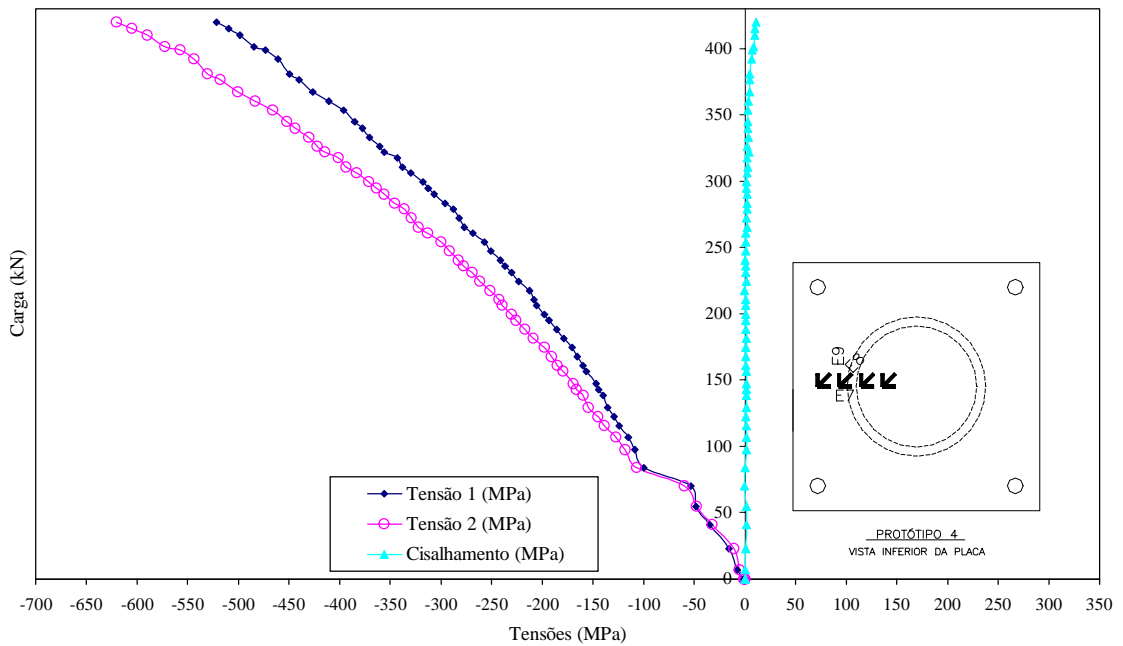


Figura 5.19 - Relação carga x tensão dos extensômetros E7, E8 e E9 do Ensaio 5.

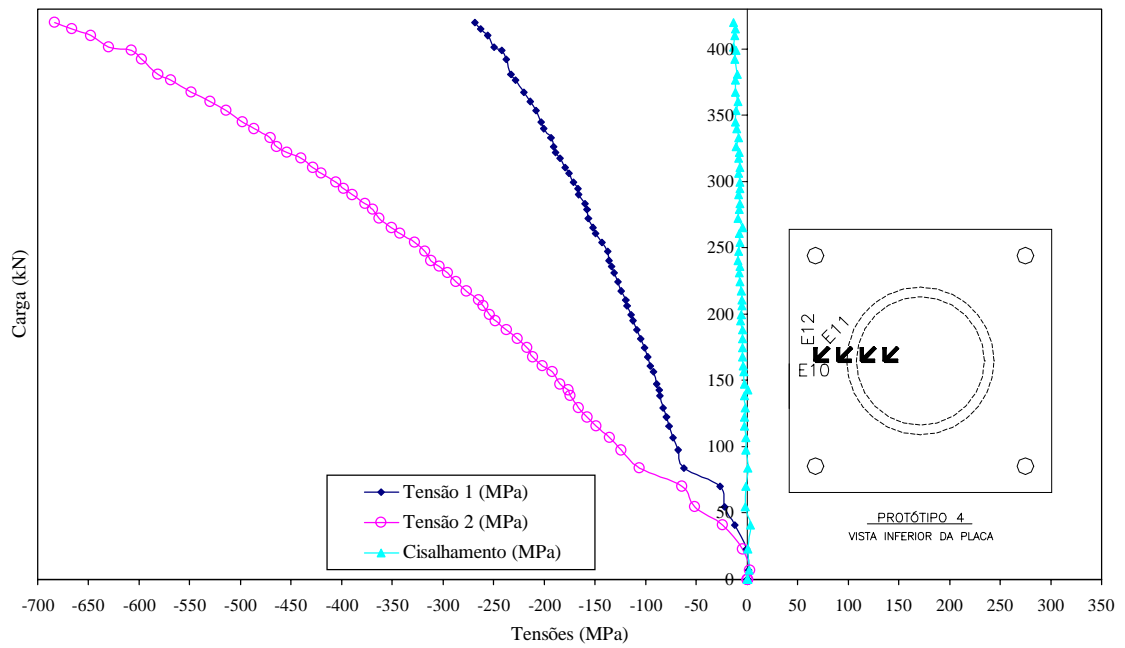


Figura 5.20 - Relação carga x tensão dos extensômetros E10, E11 e E12 do Ensaio 5.

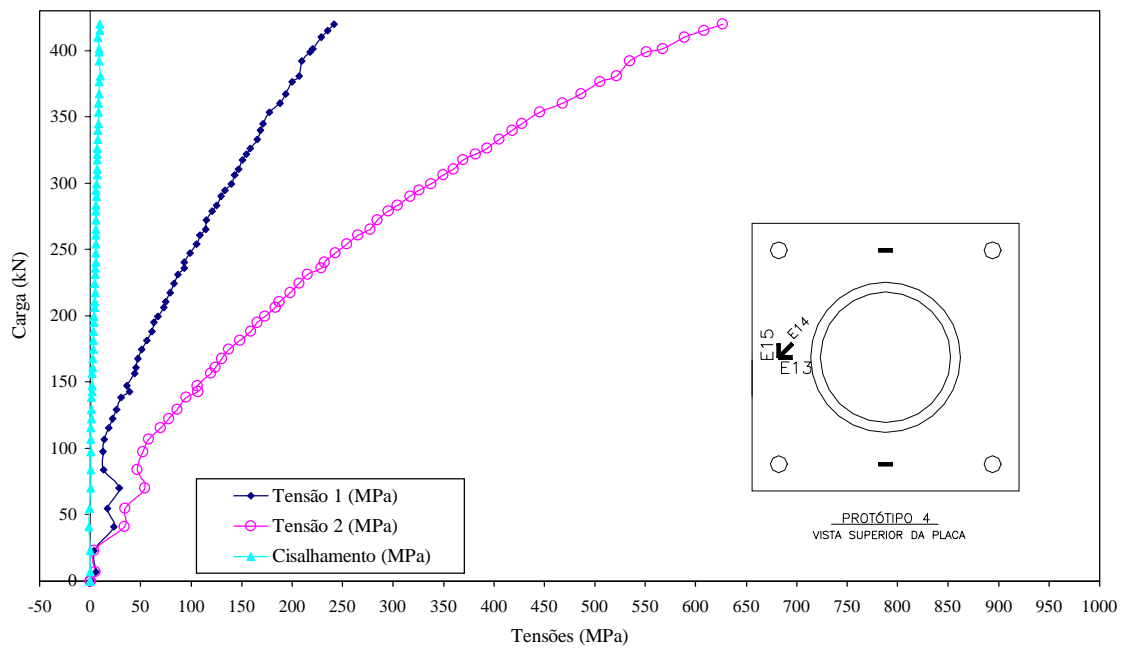


Figura 5.21 - Relação carga x tensão dos extensômetros E13, E14 e E15 do Ensaio 5.

6. AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o dimensionamento das placas de base ensaiadas utilizando o desenvolvimento de cálculo de RAUTARUUKKI (1998), que é baseado na EUROCODE3 (1992), e de DEWOLF & RICKER (1990), que é baseado na AISC (1989). A metodologia do dimensionamento foi apresentada no capítulo 2. Nos itens seguintes tem-se as avaliações para placas rígidas estudadas neste trabalho.

A avaliação teórica das placas de base utilizadas nos ensaios foi realizada a partir das características geométricas dos protótipos ensaiados e a partir deles foi encontrado a carga máxima nominal que as respectivas placas suportam na fase elástica. Para o cálculo da carga máxima nominal não foi utilizado nenhum coeficiente de majoração nas equações.

Em seguida são realizadas análises e apresentadas proposições para o dimensionamento das placas de base.

6.2. AVALIAÇÃO SEGUNDO PRESCRIÇÕES EXISTENTES

Segundo RAUTARUUKKI (1998), para calcular a espessura da chapa de base, é necessário primeiramente calcular as pressões de contato da placa com o bloco de concreto (figura 6.1). Com as pressões de contato encontradas é possível calcular o momento na borda da placa, que é o maior momento que ocorre na placa de base, utilizando a analogia de viga em balanço. Com o valor do momento na borda da placa, é imposta a condição de que o momento de solicitação deve ser menor ou igual ao momento resistente, e assim calcular a espessura da placa de base.

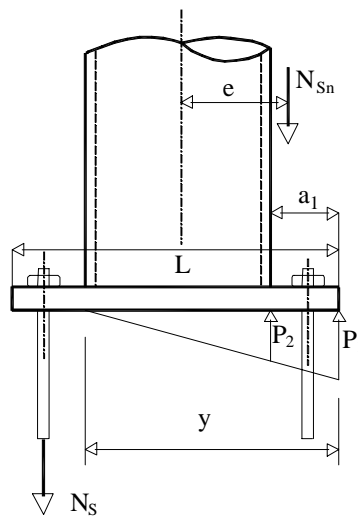


Figura 6.1 – Posições de p_1 , p_2 e a_1 na placa de base com carga excêntrica, de acordo com RAUTARUUKKI.

Para o cálculo da pressão de contato 1 (p_1), que é a pressão de contato máxima que ocorre na placa, o valor utilizado de y_{CG} da placa de base, deve ser igual a distância do centro de gravidade da placa à borda. Já para o cálculo da pressão de contato 2 (p_2), que é a pressão de contato na posição de engaste da viga em balanço considerada, deve ser utilizado o comprimento da própria viga em balanço. Para o cálculo do momento na borda da placa é admitido que a placa de base passa a ser uma placa de largura a_1 e comprimento a_1 , engastada em uma borda e livre na outra. Dessa forma, o autor trabalha com a hipótese de que existe uma contribuição do tubo da coluna na deformação da placa de base.

De acordo com o desenvolvimento de cálculo de DEWOLF & RICKER (1990), é apresentado o mesmo raciocínio para o cálculo da espessura da placa de base, mas consideram o comprimento da viga em balanço como sendo m (apresentado no capítulo 2), conforme mostrado na figura 6.2.

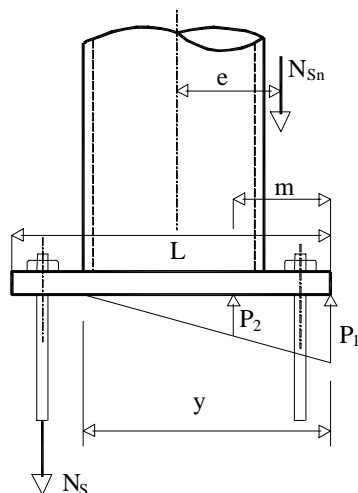


Figura 6.2 – Posições de p_1 , p_2 e a_1 na placa de base com carga excêntrica, de acordo com DEWOLF e RICKER.

Serão realizados dimensionamentos considerando duas hipóteses de cálculo, RAUTARUUKKI e DEWOLF & RICKER, para os protótipos ensaiados nesse trabalho. Será utilizada a nomenclatura a seguir para identificação das placas de base de acordo com os ensaios e considerando a variação de espessura e de excentricidade:

- PB1–Placa de base com espessura de 12,5 mm e excentricidade de carga de 84,15 mm
- PB2–Placa de base com espessura de 12,5 mm e excentricidade de carga de 168,30 mm
- PB3–Placa de base com espessura de 16,0 mm e excentricidade de carga de 168,30 mm.

Para o dimensionamento das placas de base utilizaram-se os seguintes dados, sendo utilizado a coluna circular fabricada pela Vallourec & Mannesman do Brasil (VMB):

- Coluna tubular circular VMB: Diâmetro de 168,30 mm
Espessura de 11, mm
- Resistência do bloco de concreto: $f_{ck}=34,20$ MPa
(essa resistência foi medida através de ensaios em corpos de prova moldados no dia da concretagem do bloco de apoio e rompidos no dia do primeiro ensaio – Ensaio 1)
- Módulo de elasticidade do aço: $E_{aço}=205$ GPa

- Módulo de elasticidade do bloco de concreto: $E_{\text{concreto}}=28,8 \text{ GPa}$
 - Relação entre módulos de elasticidade do aço e do concreto: $n_e = \frac{E_s}{E_c}$
 - Tensão do concreto: $\sigma_c= 34,20 \text{ MPa}$ (será utilizado o valor nominal do concreto que é igual ao f_{ck})
 - Placa de base de 12,5 mm: Limite de escoamento - $f_y=308 \text{ MPa}$
Limite de ruptura – $f_u=464 \text{ MPa}$
 - Placa de base de 16,0 mm: Limite de escoamento - $f_y=435 \text{ MPa}$
Limite de ruptura – $f_u=632 \text{ MPa}$
- (esses limites de escoamento e de ruptura das placas de base de 12,5 e 16,0 mm são os resultados da caracterização do material das placas de base dos Protótipos 1 a 4).

Na figura 6.3 está mostrado o desenho das placas de base dos Protótipos 1 a 4.

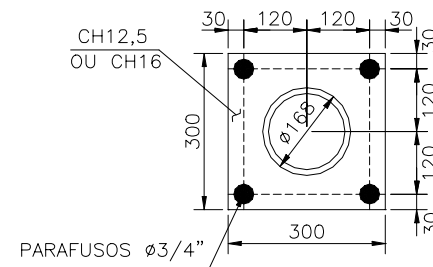


Figura 6.3 – Desenho da chapa de base dos Protótipos 1 a 4.

Para cada tipo de placa de base, será realizado o cálculo da carga máxima nominal que as respectivas placas suportam na fase elástica, pelo método de RAUTARUUKKI e pelo método de DEWOLF & RICKER. Para o cálculo da carga máxima nominal não será utilizado nenhum coeficiente de majoração nas equações.

Nas 3 placas de base dimensionadas PB1, PB2 e PB3 foram analisados dois diferentes casos de excentricidade: $e_1 = 84,15\text{mm}$ e $e_2 = 168,30\text{mm}$, conforme a figura 6.4.

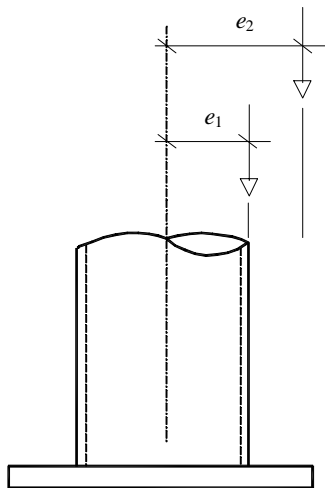


Figura 6.4 – Situações de carregamento dos Ensaios 1 a 5.

A excentricidade e_1 é aplicada no raio externo do pilar, e e_2 está fora do núcleo central. De acordo com a classificação de DEWOLF tem-se:

- $e_1 = 84,15$ = excentricidade moderada, pois:

$$\frac{L}{6} \leq e \leq \frac{L}{3} \rightarrow 100 \leq e \leq 50 \text{ mm} \quad (6.1)$$

- $e_2 = 168,30$ = grande excentricidade, pois:

$$e > \frac{L}{3} \rightarrow e > 100 \text{ mm} \quad (6.2)$$

Sendo L igual à largura da placa de base, ou seja, 300 mm.

Primeiro calcula-se as pressões de contato, p_1 e p_2 , que varia em função da dimensão da placa e da excentricidade do carregamento axial. Na figura 6.5 está mostrado o comprimento da viga em balanço utilizado na “analogia de viga em balanço” e a distribuição do carregamento segundo as pressões de contato. Em seguida, tem-se as equações para m e a_1 (projeções da placa de base) utilizadas no dimensionamento.

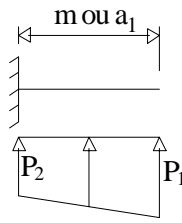


Figura 6.5 – Comprimento da viga em balanço utilizada na “analogia de viga em balanço”.

$$m = \frac{L - 0,8 \cdot D}{2} \quad (6.3)$$

$$a_1 = \frac{L - D}{2} \quad (6.4)$$

$$p_1 = \frac{N_{Sn}}{A_b} + \frac{M_{Sn}}{I_b} y_{CG} = \frac{N_{Sn}}{A} + \frac{M_{Sn}}{W} = \frac{N_{Sn}}{B \cdot L} + \frac{6 \cdot M_{Sn}}{B \cdot L^2} \quad (6.5)$$

$$p_2 = p_1 - \frac{12 \cdot M_{Sn}}{B \cdot L^3} a_1 \quad \text{para RAUTARUUKKI} \quad (6.6)$$

$$p_2 = p_1 - \frac{12 \cdot M_{Sn}}{B \cdot L^3} m \quad \text{para DEWOLF \& RICKER} \quad (6.7)$$

Onde,

p_1 = pressão de contato máxima na borda da placa;

p_2 = pressão de contato na posição de ligação entre o pilar e a placa;

N_{Sn} = força axial solicitante nominal;

M_{Sn} = momento fletor solicitante nominal;

A_b = área da superfície da placa de base;

I_b = momento de inércia da superfície da placa de base;

m = projeção da placa de base = comprimento da viga em balanço (figura 6.2);

a_1 = projeção da placa de base = comprimento da viga em balanço (figura 6.2);

B e L = largura e comprimento da placa de base retangular (figuras 2.8 e 2.9);
D = diâmetro externo do perfil tubular da coluna.

A tabela 6.1 traz o momento da borda e a pressão de contato uniformemente variável.

Tabela 6.1 – Pressão de contato nas placas de base para os casos de carregamento.

Identificação das Placas de Base	De acordo com RAUTARUUKKI $a_1 = 65,85 \text{ mm}$			De acordo com DEWOLF & RICKER - $m = 82,68 \text{ mm}$		
	M_{sn} (kN.mm)	p_1 (N/mm ²)	p_2 (N/mm ²)	M_{sn} (kN.mm)	p_1 (N/mm ²)	p_2 (N/mm ²)
PB1	11494,89	4,07	2,95	7489,35	2,65	1,74
PB2	14473,80	4,17	2,76	9492,12	2,74	1,57
PB3	33491,70	9,65	6,39	21946,32	6,33	3,64

Na abordagem elástica, variando em função da excentricidade do carregamento, tem-se na tabela 6.2 o momento no engaste da viga em balanço e as espessuras requeridas para as placas de bases:

$$M_{\text{engaste}} = \left(\frac{p_2 \cdot a_1^2}{2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot a_1^2}{3} \right) \cdot B \quad \text{para RAUTARUUKKI} \quad (6.9)$$

$$M_{\text{engaste}} = \left(\frac{p_2 \cdot m^2}{2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot m^2}{3} \right) \cdot B \quad \text{para DEWOLF \& RICKER} \quad (6.10)$$

$$t_p = \sqrt{\frac{6 \cdot M_{\text{engaste}}}{B \cdot f_y}} \quad (6.11)$$

Onde,

t_p = espessura da placa de base;

f_y = tensão de escoamento do aço.

Tabela 6.2 – Espessuras das placas de base.

	De acordo com RAUTARUUKKI $a_1 = 65,85 \text{ mm}$		De acordo com DEWOLF & RICKER – $m = 82,68 \text{ mm}$	
Identificação das Placas de Base	Momento no engaste – M_{engaste} (kN.mm)	Espessura t_p (mm)	Momento no engaste – M_{engaste} (kN.mm)	Espessura t_p (mm)
PB1	2405,56	12,50	2407,02	12,50
PB2	2407,44	12,50	2408,11	12,50
PB3	5570,71	16,00	5567,69	16,00

Na tabela 6.3 está mostrado qual a carga máxima que as placas de base resistem antes de escoar segundo RAUTARUUKKI e DEWOLF & RICKER. Podemos observar que DEWOLF & RICKER são mais conservadores que RAUTARUUKKI, pois os valores da carga máxima nominal são menores, consequentemente a placa escoar com menos carga.

Tabela 6.3 – Cargas máximas nominais no regime elástico.

			De acordo com RAUTARUUKKI	De acordo com DEWOLF & RICKER
Identificação das Placas de Base	Excentricidade Carregamento (mm)	Espessura t_p (mm)	Carga Máxima Nominal (kN)	Carga Máxima Nominal (kN)
PB1	84,15	12,50	136,6	89,0
PB2	168,30	12,50	86,0	56,4
PB3	168,30	16,00	199,0	130,4

6.3. AVALIAÇÕES PROPOSTAS

Com relação a analogia de viga em balanço, foi possível observar através dos ensaios que a placa de base se comporta como um viga em balanço, visto que nos Ensaios 4 e 5 as tensões aumentam a medida que se aproxima dos chumbadores tracionados e tendem a zero na região interna do tubo da coluna. Assim não houve deslocamento nesta região e pode-se dizer que o tubo proporciona um engaste na região da solda do mesmo com a placa de base. Dessa forma foi possível calcular a posição da linha neutra experimental no Ensaio 5. A figura 6.6 mostra o gráfico de tensão ao longo do comprimento da placa e na posição dos extensômetros para o Ensaio 5. A partir da curva gerada pelos pontos de tensão calculados através dos extensômetros foi possível encontrar uma reta e a partir desta foi possível obter a posição da linha neutra experimental para o Ensaio 5, que é de 109,91 mm para a carga de 310,50 kN (carga de escoamento). Apesar da distribuição não ser uma reta, observou-se que isto se justifica pela influência do tubo, o que pode ser observado na mesma figura 6.6. No anexo III tem-se a distribuição de tensões para outros níveis de carga e a mesma configuração da distribuição.

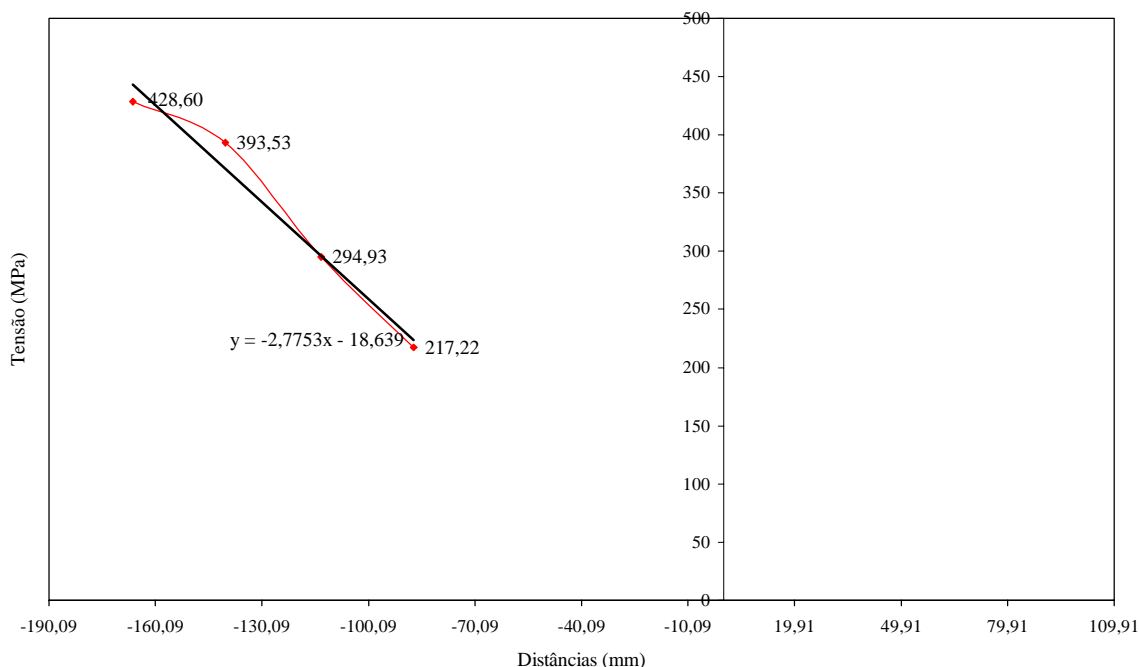


Figura 6.6 – Distribuição de tensões para a carga de 310,5 kN no Ensaio 5 ao longo do comprimento da placa.

Quando se tem o caso de excentricidade moderada e grande excentricidade, ou seja, $e > L/6$, assume-se que a pressão de contato seja máxima na extremidade da placa onde ocorre o contato da placa com o bloco de concreto, e decresça linearmente até a posição da linha neutra y , conforme mostrado nas figuras 6.1 e 6.2, havendo, portanto, tração nos chumbadores. Para o cálculo da posição da linha neutra $y_{\text{teórico}}$ foi utilizado o polinômio de 3º grau obtido da relação entre deslocamentos e deformações como visto no capítulo 2.

$$y_{\text{teórico}}^3 + k_1 \cdot y_{\text{teórico}}^2 + k_2 \cdot y_{\text{teórico}} + k_3 = 0 \quad (6.12)$$

Onde, os coeficientes k_1 , k_2 e k_3 são funções da geometria da ligação, da área de aço dos chumbadores e da excentricidade do carregamento, e são calculados pelas expressões, também já vistas no capítulo 2:

$$k_1 = 3 \left(e - \frac{L}{2} \right) \quad (6.13)$$

$$k_2 = \frac{6n_e \cdot A_s}{L} (f + e) \quad (6.14)$$

$$k_3 = -k_2 \left(\frac{L}{2} + f \right) \quad (6.15)$$

Onde,

$y_{\text{teórico}}$ = posição da linha neutra teórica;

e = excentricidade do carregamento;

L = comprimento da placa de base;

A_s = área de aço total dos chumbadores tracionados;

n_e = relação entre módulos de elasticidade do aço e do concreto;

f = distância entre os chumbadores tracionados e o centro da placa de base.

Assim, os valores de $y_{teórico}$ estão mostrados na tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Valores da linha neutra $y_{teórico}$ no regime elástico.

Identificação das Placas de Base	Posição da linha neutra $y_{teórico}$ (mm)
PB1	216,4587
PB2	131,6468
PB3	131,6468

Comparando a posição da linha neutra teórica com a experimental do Ensaio 5 a diferença foi de aproximadamente 16%, porque para o cálculo da LN teórica é admitido uma distribuição linear de deformações na seção da base, e observando o gráfico da figura 6.6 podemos perceber que a distribuição de deformações não é linear ao longo da placa. Uma outra justificativa é que experimentalmente é possível observar através do Ensaio 5 que o bloco de concreto exerce forte contribuição na resistência momento-giro da placa de base devido a excentricidade de carga.

Inicialmente e utilizando o princípio de que a “a viga em balanço” possui seu comprimento associado a linha neutra, pode-se pensar em utilizar este nas avaliações teóricas. No entanto, um maior comprimento da viga geraria uma resistência muito menor, além de ser incoerente com relação à influência do tubo no deslocamento da placa.

Como já foi dito anteriormente, experimentalmente é possível observar que o bloco de concreto exerce uma contribuição na resistência momento-giro da placa de base e dessa forma será utilizado a mesma para a proposição de duas alternativas de cálculo para placa de base que serão prescritas nos itens seguintes.

6.3.1. Primeira Proposição de Cálculo

A primeira alternativa é calculada a partir da projeção da placa de base considerando não mais a analogia de viga em balanço e sim uma viga engastada em

uma extremidade e apoiada no outra, como mostra a figura 6.7, com um comprimento X.

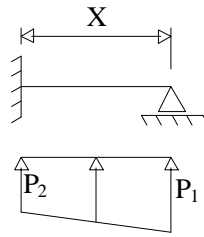


Figura 6.7 – Comprimento da viga engastada e apoiada.

O valor do comprimento da viga X foi considerado como sendo:

$$y_{\text{teórico}} = 131,6468 \text{ mm};$$

$$y_{\text{experimental}} = 109,91 \text{ mm}.$$

Então, temos:

$$M_{\text{engaste}} = \left(\frac{p_2 \cdot X^2}{8} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot X^2 \cdot 7}{120} \right) \cdot B \quad (6.16)$$

Dessa forma chega-se aos seguintes resultados apresentados na tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Cargas máximas nominais considerando o vão da viga = X

(regime elástico).

Identificação das Placas De Base	Comprimento X da viga (mm)	N _{sn} (kN)	M _{sn} (kN.mm)	p ₁ (N/mm ²)	p ₂ (N/mm ²)	M _{engaste} (kN.mm)
PB2	y _{teórico} = 131,6468	119,5	20111,90	5,80	1,87	2407,97
PB3	y _{teórico} = 131,6468	276,4	46518,10	13,41	4,34	5569,57
	y _{experimental} = 109,91 (apenas para o Ensaio 5)	362,5	61008,80	17,59	7,65	5566,16

Utilizando este princípio de viga engastada e apoiada pode-se pensar em considerar seu comprimento igual a “a₁” e a “m” nas avaliações teóricas. No entanto, um menor comprimento juntamente com essa hipótese de viga engastada e apoiada geraria uma resistência muito grande, ficando muito a favor da segurança, apesar de ser mais coerente com relação a influência do tubo no deslocamento da placa.

Na tabela 6.6 está apresentado um resumo dos resultados da análise experimental dos Ensaios 1 a 5, da análise teórica dos mesmos ensaios para a analogia de viga em balanço e para uma viga engastada em uma extremidade e apoiada na outra.

Tabela 6.6 – Resumo dos resultados da análise experimental, da análise teórica com a analogia de viga em balanço e da primeira proposição de cálculo.

Carga Máxima Nominal (kN)					
Ensaio	Análise Experimental	Análise Teórica Viga em Balanço		Análise Teórica Viga Engastada e Apoiada	
		RAUTARUUKKI	DEWOLF & RICKER	y _{teórico} = 131,6468 mm	y _{experimental} = 109,91 mm
1	-	136,6	89	-	-
2	158,70	86,0	56,4	119,5	-
3	163,30	86,0	56,4	119,5	-
4	287,90	199,0	130,4	276,4	-
5	310,50	199,0	130,4	276,4	362,5

A partir dos resultados da análise teórica de viga engastada e apoiada apresentada na tabela 6.6 e utilizando a carga máxima de escoamento dos ensaios, é possível encontrar o comprimento X da viga engastada e apoiada. Os resultados dessa análise estão apresentados na tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Comprimento X da viga a partir da análise teórica de viga engastada e apoiada e da análise experimental.

Ensaio	Comprimento X da viga (mm)
2	109,00
3	107,10
4	128,00
5	121,60

Com os resultados mostrados na tabela 6.7 e em função da espessura t_p da placa de base e da maior dimensão L da placa é possível encontrar a seguinte equação:

$$4,80 \cdot t_p + 0,32 \cdot \frac{L}{2} = X \quad (6.17)$$

6.3.2. Segunda Proposição de Cálculo

Na segunda proposição de cálculo propõe-se consideração de uma viga engastada em uma extremidade (localizada na parede do tubo) e a outra apoiada em apoio elástico, como mostra a figura 6.9, com um comprimento a_1 .

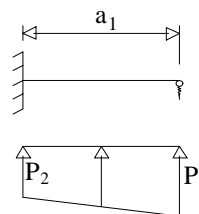


Figura 6.8 – Comprimento da viga engastada e apoiada em apoio elástico

O valor do comprimento a_1 foi considerado o mesmo da análise teórica segundo RAUTARUUKKI.

Então temos:

$$M_{p_2} = F_2 \cdot a_1 - \frac{p_2 \cdot a_1^2}{2} \quad (6.18)$$

$$F_2 = \frac{p_2 \cdot a_1^4}{8 \cdot E_S \cdot I_v \cdot \left(\frac{a_1^3}{3 \cdot E_S \cdot I_v} + \frac{1}{k} \right)} \quad (6.19)$$

$$M_{(p_1-p_2)} = F_1 \cdot a_1 - \frac{(p_1 - p_2) \cdot a_1^2}{3} \quad (6.20)$$

$$F_1 = F_{(p_1-p_2)} = \frac{11 \cdot (p_1 - p_2) \cdot a_1^4}{120 \cdot E_S \cdot I_v \cdot \left(\frac{a_1^3}{3 \cdot E_S \cdot I_v} + \frac{1}{k} \right)} \quad (6.21)$$

$$M_{\text{engaste}} = M_{p_2} + M_{(p_1-p_2)} \quad (6.22)$$

Onde,

M_{p_2} = Momento no engaste da viga devido a pressão de contato p_2 ,

F_2 = Reação no engaste da viga devido a pressão de contato p_2 ,

$M_{(p_1-p_2)}$ = Momento no engaste da vida devido a pressão de contato $(p_1 - p_2)$,

F_1 = Reação no engaste da viga devido à pressão de contato $(p_1 - p_2)$,

I_v = momento de inércia da seção transversal da viga,

k = rigidez do apoio elástico.

Nas análises realizadas a partir da comparação com os valores experimentais obteve-se o valor da constante k da rigidez do apoio elástico em cada ensaio. Na tabela 6.8 têm-se os valores de k obtidos.

Tabela 6.8 – Valores de k obtidos a partir da análise teórica de viga engastada e apoiada em apoio elástico e da análise experimental.

Ensaio	Comprim. da viga (mm)	N_{Sn} (kN)	M_{Sn} (kN.mm)	p₁ (N/mm²)	p₂ (N/mm²)	M_{engaste} (kN.mm)	Rigidez do apoio elástico k
2	65,85	158,7	26709,21	7,70	5,09	2408,08	516
3	65,85	163,3	27483,39	7,92	5,24	2404,71	563
4	65,85	287,9	48453,57	13,97	9,24	5571,29	493
5	65,85	310,5	52257,15	15,06	9,96	5567,96	645

O valor da rigidez do apoio elástico utilizado na comparação entre as formulações existentes e propostas, foi $k = 550$, considerado para os ensaios realizados neste trabalho. Com esse valor de k , obtêm-se na tabela 6.9 a máxima carga de escoamento para cada ensaio considerando a análise teórica de viga engastada e apoiada em apoio elástico.

Tabela 6.9 – Cargas máximas nominais considerando o vão da viga = a_1 para viga engastada e apoiada em apoio elástico com $k = 550$.

Identificação das Placas De Base	Comprimento a_1 da viga (mm)	N_{Sn} (kN)	M_{Sn} (kN.mm)	p₁ (N/mm²)	p₂ (N/mm²)	M_{engaste} (kN.mm)
PB2	65,85	162,0	27264,60	7,86	5,20	2404,88
PB3	65,85	296,5	49900,95	14,38	9,52	5568,25

6.4. COMPARAÇÕES ENTRE AS FORMULAÇÕES

Para comparar os resultados das análises teóricas segundo RAUTARUUKKI e DEWOLF com a análise experimental e as formulações propostas para a análise teórica foram feitos dois gráficos, figuras 6.9 e 6.10, um com a espessura da placa de base de 12,5 mm e tensão de escoamento do aço da placa de 308 MPa de acordo com os Ensaios

2 e 3 e o outro gráfico com a espessura da placa de 16 mm e tensão de escoamento do aço da placa de 435 MPa de acordo com os Ensaios 4 e 5. No eixo y está representado a carga máxima de ruptura e no eixo x está representado o comprimento da placa de base dividido pela espessura da mesma. O comprimento da placa de base variou de 300 mm até 400 mm. As tabelas com esses resultados estão no anexo IV. A excentricidade da aplicação da carga foi de 168,30 mm como ocorreu nos Ensaios 2 a 5.

Para o caso da viga engastada e apoiada com o comprimento sendo $y_{\text{experimental}}$, foi representado apenas com 1 ponto, porque essa análise foi realizada apenas para o Ensaio 5, onde o comprimento da placa da base é de 300 mm e a espessura é de 16 mm.

Para mostrar os resultados dos Ensaios 2, 3, 4 e 5 nas tabelas, também foi representado por um ponto cada ensaio, pois os ensaios foram realizados em placas com comprimento de 300 mm e espessura de placa de 12,5 mm para os Ensaios 2 e 3 e de 16 mm para os Ensaios 4 e 5.

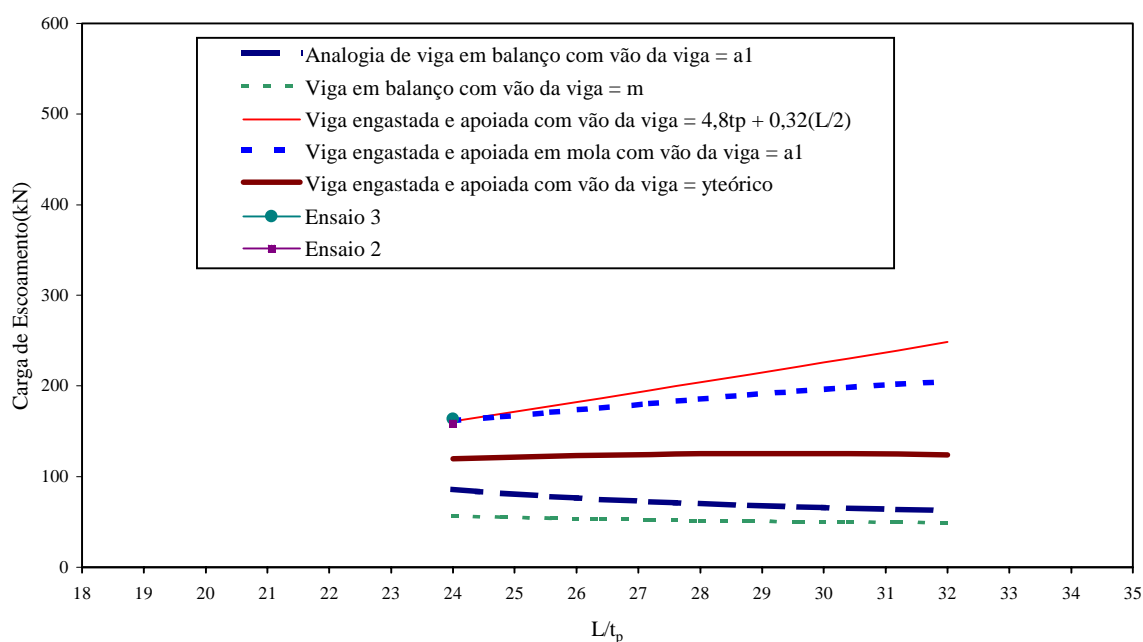


Figura 6.9 – Comparações entre as formulações com espessura da placa de base de 12,5 mm, f_y de 308 MPa e excentricidade de carga de 168,3 mm.

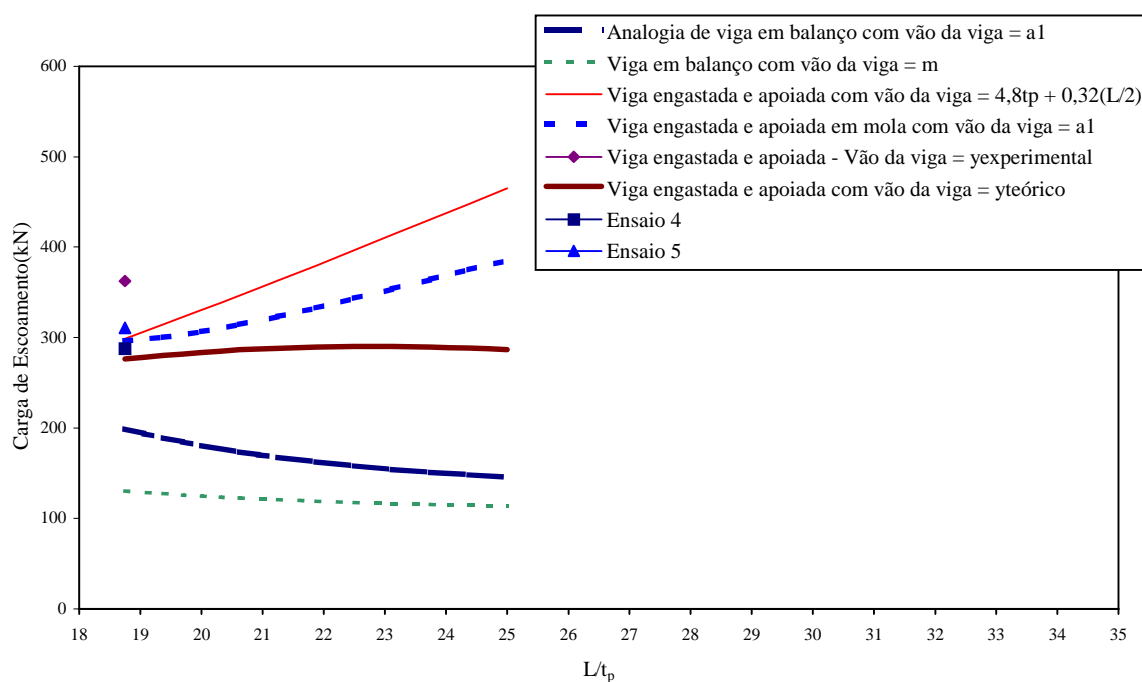


Figura 6.10 – Comparações entre as formulações com espessura da placa de base de 16,0 mm, f_y de 435 MPa e excentricidade de carga de 168,3 mm.

De acordo com os gráficos das figuras 6.9 e 6.10 é possível verificar que os melhores resultados quando comparados com os ensaios são da análise teórica de que a viga se comporta como engastada e apoiada em apoio elástico com comprimento da viga sendo a_1 . O efeito do apoio elástico pode ser resultado do comportamento bidimensional da placa, ou seja, na direção perpendicular ao momento fletor há uma resistência de viga entre os dois chumbadores; ou pode ser resultado da contribuição do bloco de concreto na resistência momento-giro da placa de base. Uma forma de avaliar esse comportamento do apoio elástico seria calcular a rigidez do bloco de concreto e comparar com a constante de rigidez calculada do apoio elástico.

Quanto a proposição de viga engastada e apoiada com o comprimento da viga igual a “ $y_{\text{experimental}}$ ” e “ $y_{\text{teórico}}$ ”, apesar de os resultados serem próximos dos resultados experimentais, essa hipótese não considera a influência da coluna na deformação da placa de base, mas seus resultados foram decisivos para encontrar uma equação para o comprimento da viga engastada e apoiada

A proposição de que a viga se comporta como engastada e apoiada com a equação proposta para o comprimento da viga obteve também resultados satisfatórios, mas na equação proposta o comprimento da viga está diretamente influenciado pela espessura da placa e as dimensões da placa de base, e analogamente ao caso anterior não levando em consideração a influência da coluna. Dessa forma quanto maior a placa de base maior a resistência da mesma, o que pode não ser o real, pois a coluna tem uma forte influência na deformação da placa. Uma forma de avaliar esse comportamento seria ensaiar placas de base com dimensões maiores e o mesmo diâmetro de tubo para a coluna.

A formulação proposta por DEWOLF & RICKER que é baseado na AISC, é mais conservador que a formulação proposta por RAUTARUUKKI que é baseado no EUROCODE, como pode ser visto através dos gráficos.

É possível perceber também nos gráficos a influência da espessura da placa de base e do limite de escoamento do aço da placa de base na resistência da mesma.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo desse trabalho foi avaliar o comportamento experimental das ligações de placas de base de colunas tubulares circulares solicitadas à força normal e momento fletor. Esse comportamento foi avaliado através de 5 ensaios realizados em placas de base, onde os parâmetros analisados foram a espessura da placa e a excentricidade de aplicação do carregamento axial à coluna, gerando assim um momento fletor na placa. O estudo se desenvolveu de forma comparativa entre os resultados da análise teórica e os obtidos pela análise experimental.

Através dos resultados obtidos pode-se observar de uma maneira geral que:

- 1) as tensões variam muito com o aumento da excentricidade para um dado carregamento axial, e uma mesma espessura de placa;
- 2) a distribuição de tensões no carregamento axial mostra que a aproximação da analogia de uma viga em balanço com carregamento distribuído, é conservadora e fornece placa de base espessas.

Nos Ensaios 2 a 5, que possuem excentricidade de carregamento de 168,30 mm, o escoamento ocorreu primeiro na posição dos extensômetros que se localizam na linha de eixo dos chumbadores tracionados, ou seja, nessa posição ocorreram as maiores tensões diminuindo a medida que os extensômetros se aproximam da coluna, chegando a ficarem nulos no centro da mesma. A carga máxima foi de 301,5 kN e 306 kN para os Ensaios 2 e 3 que possuem chapa de 12,5 mm e de 378,5 kN e 414,7 kN para os Ensaios 4 e 5 que possuem chapa de 16 mm. Nesses ensaios observou-se que as cargas experimentais médias que provocaram escoamento na placa de base são aproximadamente, 33% e 47% maiores que as cargas teóricas obtidas segundo RAUTARUUKKI e DEWOLF & RICKER, respectivamente. A análise teórica é mais conservadora quando comparada com a análise experimental, gerando assim placas mais espessas.

No Ensaio 1 que possui excentricidade de carga de 84,15 mm e espessura da placa de base de 12,5 mm, ocorreu um acúmulo de tensões no centro da coluna devido a proximidade da aplicação de carga. Com o Ensaio 1 também foi observado que para a carga mais próxima do centro da coluna, maior a resistência da placa de base, sendo que

o bloco exerce forte contribuição na resistência do conjunto. Nesse ensaio a carga maior foi de 600,3 kN, não ocorrendo escoamento da placa de base.

De acordo com as deformações medidas observou-se que para um mesmo nível de carregamento, têm-se valores de deformação compatíveis, ou seja, com os valores próximos entre si. Este resultado possibilita uma mesma análise para todos os ensaios realizados.

As maiorias dos autores, como RAUTARUUKKI e DEWOLF & RICKER, propõem que para o cálculo da espessura da placa de base deve ser considerada a projeção da placa como sendo uma viga em balanço, engastado na parede do tubo da coluna e livre na borda da placa de base, onde o carregamento dessa viga é a pressão de contato entre a placa de base e o bloco de concreto. Com relação essa hipótese, foi possível observar que a placa se comporta como uma viga em balanço visto que nos ensaios 4 e 5 as deformações aumentam a medida que se aproxima dos chumbadores tracionados e tendem a zero na região interna do tubo da coluna, caracterizando a hipótese de que existe um engaste na região da solda do tubo da coluna com a placa de base.

Foram sugeridas duas proposições de cálculo:

- 1) Na primeira proposição de cálculo, a viga utilizada para dimensionar a espessura da placa comporta-se como engastada em uma extremidade e apoiada na outra com comprimento sendo $y_{teórico}$ e $y_{experimental}$. O $y_{teórico}$ é encontrado através do equilíbrio de forças e momentos juntamente com a representação do comportamento elástico do material do bloco de concreto e dos chumbadores. O $y_{experimental}$ é encontrado a partir da posição da linha neutra obtido com resultados experimentais do ensaio 5. Com esses resultados foi encontrada uma equação proposta para calcular o comprimento da viga engastada e apoiada, diretamente influenciada pela espessura da placa de base e suas dimensões.
- 2) Na segunda proposição de cálculo a viga se comporta como engastada em uma extremidade e apoiada em apoio elástico na outra extremidade com o comprimento sendo a projeção a_1 , ou seja, a projeção entre a face da coluna e extremidade da placa.

Verificou-se que os melhores resultados quando comparados com os ensaios são da análise teórica de que a viga se comporta como engastada e apoiada em apoio

elástico com comprimento da viga sendo a_1 . O efeito do apoio elástico pode ser resultado do comportamento bidimensional da placa, ou seja, na direção perpendicular ao momento fletor há uma resistência de viga entre os dois chumbadores; ou pode ser resultado da contribuição do bloco de concreto na resistência momento-giro da placa de base. Uma forma de avaliar esse comportamento do apoio elástico seria calcular a rigidez do bloco de concreto e comparar com a constante de rigidez calculada do apoio elástico.

Quanto à proposição de viga engastada e apoiada com o comprimento da viga igual a “ $y_{\text{experimental}}$ ” e “ $y_{\text{teórico}}$ ”, apesar dos resultados serem próximos dos resultados experimentais, essa hipótese não considera a influência da coluna na deformação da placa de base, mas seus resultados foram decisivos para encontrar uma equação para o comprimento da viga engastada e apoiada.

A proposição de que a viga se comporta como engastada e apoiada com a equação proposta para o comprimento da viga obteve também resultados satisfatórios, mas na equação proposta o comprimento da viga está diretamente influenciado pela espessura da placa e as dimensões da placa de base, e analogamente ao caso anterior não levando em consideração a influência da coluna. Dessa forma quanto maior a placa de base maior a resistência da mesma, o que pode não ser o real, pois a coluna tem uma forte influência na deformação da placa. Uma forma de avaliar esse comportamento seria ensaiar placas de base com dimensões maiores e o mesmo diâmetro de tubo para a coluna.

No Ensaio 5 ficou comprovado que as tensões calculadas a partir das deformações lidas pelos extensômetros em todos os ensaios, são as tensões principais. Isso foi possível, pois, neste ensaio foram colados extensômetros a 45° , e dessa forma foi calculado as tensões de cisalhamento que são nulas.

É válido enfatizar que há necessidade de melhorar as formulações propostas nesse trabalho, para otimização do dimensionamento, principalmente com intuito de encontrar melhores resultados teóricos e mais compatíveis com os resultados experimentais.

Como sugestão para trabalhos futuros é importante realizar novos ensaios variando as dimensões da placa de base e a excentricidade de carga e também realizar análise numérica com os dados dos ensaios realizados. Pode-se ainda analisar o

comportamento $M \times \phi$ para que os projetos estruturais considerem a ligação semi-rígida, assim como utilizar o critério para dimensionamento de placas quanto ao giro para ligações semi-rígidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION –AISC, **Hollow Structural Sections** – Connections Manual, 1997.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION –AISC, **Manual of steel construction**, Load and Resistance Factor Design-LRFD, VOL.1&2, 2nd editon, Illinois, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS –ASTM, **E8M-95 A-Standard Test Methods for Tension Testing os Metallic Materials (Metric)**, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –ABNT, **Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios - NBR 8800**, Rio de Janeiro/RJ, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –ABNT, **Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado - NBR 6118**, Rio de Janeiro/RJ, 2000.

BEER, F. P.; JOHNSTON Jr., E. R., **Resistência dos Materiais**. McGraw Hill do Brasil, tradução Paulo Prestes Castilho, 1982.

BLODGETT, O. W. **Design of Welded Structure**, The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, Ohio, 1966.

DEWOLF, J.T. Axially Loaded Column Base Plates. **Journal of the Structural Division ASCE**, v.104, p. 781-794, 1978.

DEWOLF, J.T.& RICKER, D. T. Column Base Plates, AISC Design Guide Series I. **American Institute of Steel Construction**. Chicago, IL, 1990.

DEWOLF, J.T.& SANSLEY, E.F. Column Base Plates with Axial Loads and Moments. **Journal of the Structural Division ASCE**, v.106, p. 2167-84, 1980.

DUTTA, D.; KUROBANE, Y.; PACKER, J.A.; RONDAL, J.; WARDENIER, J.; WÜRKER, K.; YEOMANS, N.; **Construction with Hollow Steel Sections**, Paris,

ERMOPOULOS J. Ch.; MICHALTSOS G. T. Analytical modelling of stress distribution under column base plates. **J. Construct. Steel Res.**, v. 46, n.1-3, Paper N°. 136, 1998.

ERMOPOULOS, J. C. & STAMAPOULOS, G. N. Mathematical Modeling of Column Base-Plate Connections. **J. Construct. Steel Res.**, v. 36, n.2, p. 79-100, 1996

European Committee for Standardisation, EUROCODE 3: Design of steel structures: ENV 1993 – 1 - 1: General rules and rules for buildings, 1992.

FLING, R.S. Design of Steel Bearing Plates. **Engineering Journal, AISC**, v.7, n.2, p. 37-40, 1970.

FREITAS, A. M. S., REQUENA, J. A. V., FONSECA, W. D. A., MINCHILLO, D. G. V., Placa de Base para Colunas Metálicas tubulares: Abordagem Experimental. II Congresso Internacional da Construção Metálica – II CICOM. São Paulo, Novembro 2002.

GOGATE, A. B. discussion of “Design of Steel Bearing Plates” by R. S. Fling **Engineering Journal, AISC**, v.7, n. 4, p. 134, 1970.

MEYER, K. F. **Construções com Tubos**. Belo Horizonte, 2002.

McGUIRE, W. **Steel Structures**. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1968.

MINCHILLO, D. G. V., **Estudo do Comportamento de Ligações de Placas de Base para Estruturas Metálicas Tubulares**. Dissertação de Mestrado, FEC/UNICAMP. Campinas, 2003.

MURRAY, T. M. Design of Lightly Loaded Steel Column Base Plates. **Engineering Journal, AISC**, v.20, n. 4, p. 143-152, 1983.

OWENS, G.W. & KNOWLES, P. R., **Steel Designer's Manual**. SCI, 5 ed, London, 1992.

PACKER, J.A.; HENDERSON, J.E., **Hollow Structural Section: Connections and Trusses - a Design Guide**. Canadian Institute of Steel Construction, Universal Offset Limited, Toronto, Canada, 2.ed, 1997.

PENSERINI, P. & COLSON, A. Ultimate Limit Strength of Column Base Connections. **J. Construct. Steel Res.**, v. 14, p. 301-320, 1989.

QUEIROZ, G., **Elementos das Estruturas de Aço**. Belo Horizonte, 4. ed, 1993.

RAUTARUUKKI OYJ; HANNU VAINIO. Design Handbook for Rautaruukki **Structural Hollow Sections**. Hämeenlinna, Finlândia, 1998.

SALMON, C. G. & JOHNSON, J. E., **Steel Structures: Design and Behavior**. New York:Harper & Row. ed.2, 1007 p, 1980.

SANTOS, A. L. E. F., **Ligações de Barras Tubulares para Estruturas Metálicas Planas**. Dissertação de Mestrado, FEC/UNICAMP. Campinas, 2003.

STAMAPOULOS, G. N. & ERMOPOULOS, J. C. Interaction Curves for Column Base-Plate Connections. **J. Construct. Steel Res.**, v. 44,n.1-2, p. 69-89, 1997.

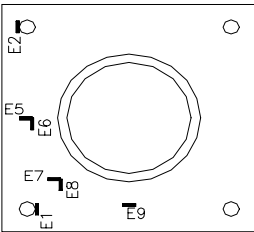
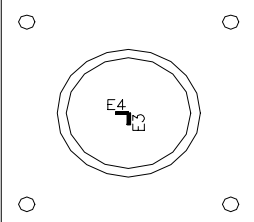
STOCKWELL, F. W. Preliminary Base Plate Selection. **Engineering Journal, AISC**, v.12, n. 3, p. 92-99, 1975.

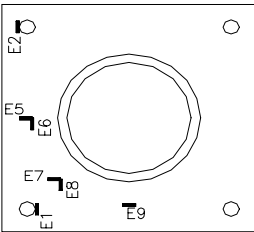
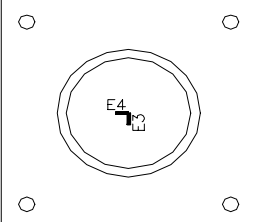
THAMBIRATNAM, D.P. & PARAMASIVAM, P. Base plates under axial loads and moments. **Journal of Structural Engineering**, v.112, n.5, p.1166-1181, 1986.

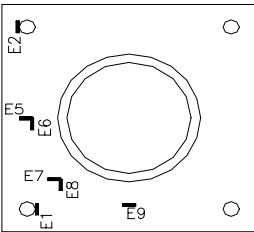
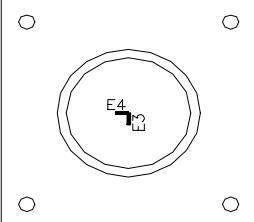
ANEXOS

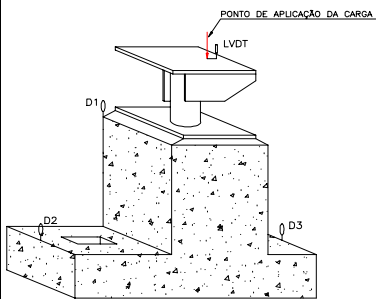
ANEXO I - Tabelas com os valores lidos pelos extensômetros, defletômetros e LVDT's nos Ensaios 1, 2, 3, 4 e 5.

ENSAIO 1

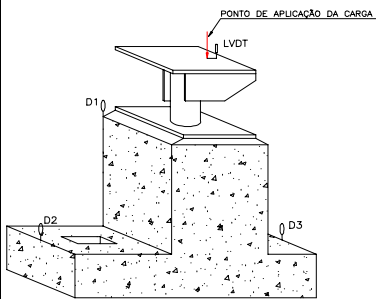
PLACA DE BASE DE COLUNA METÁLICA TUBULAR											
ENSAIO 1 - PROTÓTIPO 1		PLANILHA 1 - EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS									
Excentricidade: 84,15 mm		Data: 27/09/02			Folha: 1						
Detalhes	Carga (kN)	Leitura dos Extensômetros (Microstrain)									Obs.
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	
 <p>PROTÓTIPO 1 VISTA SUPERIOR DA PLACA</p>  <p>PROTÓTIPO 1 VISTA INFERIOR DA PLACA</p>	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sem encostar
	2,45	0	0	1	-1	0	0	-1	0	-4	Encostado
	27,37	0	0	2	2	13	10	6	2	-8	
	29,63	0	1	0	1	14	11	7	3	-8	
	40,96	1	1	0	4	19	15	11	2	-9	
	43,22	0	1	0	5	21	16	11	2	-9	
	47,75	1	1	1	8	23	17	12	1	-10	
	52,28	1	1	2	10	25	19	15	1	-10	
	56,81	0	1	1	13	28	21	18	1	-9	
	61,34	1	2	2	15	31	23	21	0	-10	
	65,87	1	2	2	20	35	26	24	-1	-9	
	70,40	1	2	3	22	38	28	27	-2	-8	
	81,73	2	3	2	29	43	35	33	-5	-6	
	86,26	3	3	-3	20	44	39	38	-7	-3	
	90,79	3	3	-4	26	44	40	36	-7	-3	
	95,32	3	3	-2	29	47	43	40	-9	-1	
	102,10	4	5	-4	31	47	46	43	-12	2	
	106,60	4	5	-4	37	48	49	45	-14	4	
	111,20	5	4	-3	40	50	53	47	-16	7	
	115,70	5	5	-7	44	51	56	50	-19	8	
122,50	5	6	-7	45	52	59	53	-20	11		
127,00	4	6	-7	49	53	62	54	-22	13		
131,60	5	5	-9	53	54	65	57	-24	13		
138,40	7	7	-10	54	57	70	61	-26	18		
145,20	8	8	-10	56	58	74	64	-29	19		
152,00	9	7	-11	60	61	79	69	-32	22		
158,70	9	9	-13	65	63	84	72	-34	27		
163,30	10	9	-10	66	65	88	75	-36	29		

PLACA DE BASE DE COLUNA METÁLICA TUBULAR											
ENSAIO 1 - PROTÓTIPO 1		PLANILHA 1 - EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS									
Excentricidade: 84,15 mm		Data: 27/09/02			Folha: 2						
Detalhes	Carga (kN)	Leitura dos Extensômetros (Microstrain)									Obs.
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	
 <p>PROTÓTIPO 1 VISTA SUPERIOR DA PLACA</p>	167,80	11	8	-9	68	66	91	78	-37	31	
	172,30	10	10	-11	70	68	94	80	-39	32	
	176,90	11	10	-11	72	69	97	83	-40	34	
	181,40	12	12	-13	73	72	100	84	-41	37	
	185,90	12	12	-13	77	75	105	88	-43	41	
	192,70	13	12	-12	81	78	109	90	-45	44	
	199,50	13	12	-14	83	78	114	94	-48	48	
	204,10	14	13	-15	85	79	118	97	-49	51	
	213,10	15	14	-17	90	86	126	102	-52	57	
	219,90	15	15	-17	91	85	131	110	-54	58	
 <p>PROTÓTIPO 1 VISTA INFERIOR DA PLACA</p>	229,00	15	14	-18	91	87	137	117	-57	62	
	233,50	16	16	-17	77	91	142	127	-59	68	
	240,30	17	17	-19	52	91	148	131	-61	74	
	249,40	17	18	-20	-57	93	155	136	-64	81	
	253,90	18	20	-22	-223	95	160	173	-65	79	
	262,90	18	19	-23	-286	98	165	181	-67	85	
	269,70	18	21	-22	-326	101	172	188	-69	91	
	276,50	19	23	-20	-346	103	179	193	-71	96	
	283,30	20	26	-28	-358	106	183	199	-73	100	
	292,40	21	25	-27	-360	108	191	206	-75	105	
303,70	22	28	-12	-323	113	202	217	-79	113		
312,80	22	31	-18	-325	116	211	228	-82	120		
319,60	23	30	-62	-298	119	217	237	-84	127		
328,60	24	31	-81	-237	123	226	245	-86	135		
335,40	23	29	-85	-201	125	232	251	-88	140		
342,20	25	35	-85	-174	127	239	259	-90	147		
349,00	25	33	-83	-144	130	246	266	-92	153		
360,40	28	38	-79	-91	133	256	275	-95	162		

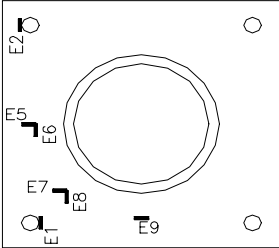
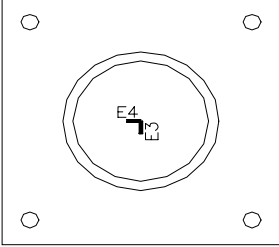
PLACA DE BASE DE COLUNA METÁLICA TUBULAR											
ENSAIO 1 - PROTÓTIPO 1		PLANILHA 1 - EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS									
Excentricidade: 84,15 mm		Data: 27/09/02			Folha: 3						
Detalhes	Carga (kN)	Leitura dos Extensômetros (Microstrain)									Obs.
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	
 <p>PROTÓTIPO 1 VISTA SUPERIOR DA PLACA</p>	369,40	28	42	-70	-42	138	271	289	-97	174	
	378,50	29	43	-65	-30	140	278	297	-99	180	
	392,10	30	45	-58	-21	147	293	313	-102	196	
	398,90	30	48	-53	12	149	304	328	-103	206	
	405,70	32	50	-52	40	151	311	334	-105	212	
	412,50	33	52	-48	67	155	320	347	-106	217	
	421,50	33	55	-44	105	159	330	359	-109	223	
	430,60	34	58	-43	155	164	343	372	-112	231	
	441,90	36	61	-47	202	170	358	387	-115	243	
	453,20	38	65	-66	224	175	377	410	-119	259	
	460,00	40	69	-67	248	180	390	426	-122	276	
	 <p>PROTÓTIPO 1 VISTA INFERIOR DA PLACA</p>	469,10	41	73	-79	284	185	404	437	-124	287
475,90		42	76	-80	333	192	419	451	-128	300	
487,20		43	79	-93	353	195	429	458	-133	309	
498,50		45	114	-96	410	200	448	469	-137	329	
500,80		47	119	-85	356	205	468	489	-139	351	
509,90		48	120	-87	391	209	477	496	-143	357	
521,20		50	126	-86	456	217	497	507	-149	369	
528,00		57	138	-81	444	224	516	519	-153	376	
539,30		59	141	-84	474	233	540	529	-158	387	
548,40		62	148	-84	511	241	561	543	-164	399	
559,70		65	153	-94	561	249	583	557	-171	410	
566,50		72	170	-99	549	255	606	576	-176	423	
573,30	74	179	-89	552	260	624	591	-180	433		
580,10	75	185	-93	556	265	639	599	-183	443		
591,40	79	191	-95	603	272	659	607	-190	454		
600,50	93	202	-93	617	280	687	615	-197	471		
0,00	19	56	96	-976	53	194	230	-11	93	Descarregado	

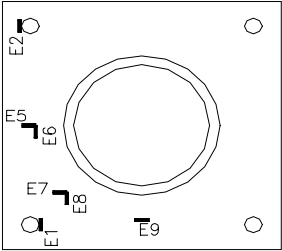
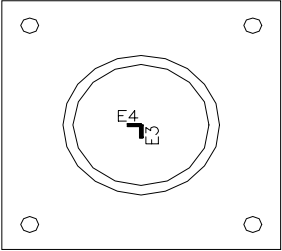
PLACA DE BASE DE COLUNA METÁLICA TUBULAR						
ENSAIO 1 - PROTÓTIPO 1		PLANILHA 2 - DEFLETÔMETRO E LVDT				
Excentricidade: 84,15 mm		Data:	27/09/02	Folha:	1	
Detalhes	Carga (kN)	Leitura (mm)				Obs.
		D ₁	D ₂	D ₂	LVDT	
	0,00	0	0	0	0	Sem encostar
	2,45	0	0	0	0	Encostado
	27,37	0	0	0	0	
	29,63	0	0	0	0	
	40,96	0	0	0	0	
	43,22	0	0	0	0	
	47,75	0	0	0	0	
	52,28	0	0	0	0	
	56,81	0	0	0	0	
	61,34	0	0	0	0	
	65,87	0	0	0	0	
	70,40	0	0	0	0	
	81,73	0	0	0	0	
	86,26	0	0	0	0	Introdução do D ₂
	90,79	-0,08	0	0	0	Introdução do D ₃
	95,32	-0,08	0	-0,08	0	
	102,10	-0,08	0	-0,15	0	
	106,60	-0,08	0	-0,18	0	
	111,20	-0,08	0	-0,23	0	
	115,70	-0,08	0	-0,26	0	
	122,50	-0,08	0	-0,28	0	
	127,00	-0,08	0	-0,4	0	
	131,60	-0,08	0	-0,43	0	
	138,40	-0,08	0	-0,48	0	
145,20	-0,08	0	-0,55	0		
152,00	-0,08	0	-0,58	0		
158,70	-0,13	0,01	-0,65	0		
163,30	-0,13	0,01	-0,68	0		

PLACA DE BASE DE COLUNA METÁLICA TUBULAR						
ENSAIO 1 - PROTÓTIPO 1		PLANILHA 2 - DEFLETÔMETRO E LVDT				
Excentricidade: 84,15 mm		Data:	27/09/02	Folha:	2	
Detalhes	Carga (kN)	Leitura (mm)				Obs.
		D ₁	D ₂	D ₂	LVDT	
	167,80	-0,13	0,01	-0,78	0	
	172,30	-0,13	0,01	-0,8	0	
	176,90	-0,13	0,03	-0,88	0	
	181,40	-0,15	0,04	-0,88	0	
	185,90	-0,15	0,06	-0,98	0	
	192,70	-0,15	0,06	-1,05	0	
	199,50	-0,17	0,09	-1,1	0	
	204,10	-0,17	0,09	-1,18	0	
	213,10	-0,17	0,09	-1,2	0	
	219,90	-0,18	0,11	-1,3	0	
	229,00	-0,18	0,11	-1,36	0	
	233,50	-0,18	0,14	-1,5	0,1401	
	240,30	-0,2	0,14	-1,5	0,1401	
	249,40	-0,2	0,14	-1,53	0,1401	
	253,90	-0,2	0,19	-1,63	0,1401	
	262,90	-0,2	0,19	-1,68	0,2807	
	269,70	-0,2	0,19	-1,68	0,2807	
	276,50	-0,2	0,19	-1,7	0,2807	
	283,30	-0,2	0,19	-1,7	0,4213	
	292,40	-0,23	0,21	-1,75	0,2807	
	303,70	-0,23	0,21	-1,78	0,4213	
	312,80	-0,25	0,24	-1,8	0,4213	
	319,60	-0,25	0,24	-1,85	0,2807	
	328,60	-0,25	0,24	-1,88	0,4213	
335,40	-0,25	0,24	-1,88	0,5619		
342,20	-0,27	0,26	-1,93	0,5619		
349,00	-0,28	0,24	-1,93	0,5619		
360,40	-0,28	0,24	-1,98	0,5619		

PLACA DE BASE DE COLUNA METÁLICA TUBULAR						
ENSAIO 1 - PROTÓTIPO 1		PLANILHA 2 - DEFLETÔMETRO E LVDT				
Excentricidade: 84,15 mm		Data:	27/09/02	Folha:	3	
Detalhes	Carga (kN)	Leitura (mm)				Obs.
		D ₁	D ₂	D ₂	LVDT	
	369,40	-0,28	0,31	-2	0,5619	
	378,50	-0,3	0,31	-2	0,7024	
	392,10	-0,3	0,31	-2,06	0,843	
	398,90	-0,3	0,34	-2,08	0,843	
	405,70	-0,33	0,34	-2,1	0,843	
	412,50	-0,35	0,34	-2,15	0,843	
	421,50	-0,38	0,34	-2,15	0,9836	
	430,60	-0,38	0,36	-2,18	0,9836	
	441,90	-0,38	0,36	-2,18	0,9836	A placa começa a deslocar da base.
	453,20	-0,4	0,39	-2,23	1,265	
	460,00	-0,4	0,39	-2,25	1,124	
	469,10	-0,43	0,41	-2,28	1,124	
	475,90	-0,43	0,41	-2,28	1,124	
	487,20	-0,43	0,41	-2,3	1,265	
	498,50	-0,48	0,41	-2,33	1,265	Retirou o manômetro
	500,80	-0,65	0,44	-2,38	1,265	
	509,90	-0,65	0,44	-2,38	1,265	
	521,20	-0,65	0,44	-2,38	1,405	
	528,00	-0,65	0,46	-2,43	1,546	
	539,30	-0,65	0,46	-2,43	1,827	
	548,40	-0,65	0,46	-2,45	1,687	
	559,70	-0,65	0,46	-2,48	1,687	
	566,50	-0,68	0,46	-2,48	1,687	
573,30	-0,73	0,46	-2,48	1,827		
580,10	-0,75	0,46	-2,5	1,827		
591,40	-0,78	0,46	-2,5	1,968		
600,50	-0,8	0,46	-2,53	2,108		
0,00	-0,66	-0,04	-1,46	-	Descarregado	

ENSAIO 2

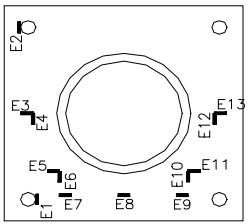
PLACA DE BASE DE COLUNA METÁLICA TUBULAR												
ENSAIO 2 - PROTÓTIPO 1		PLANILHA 1 - EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS										
Excentricidade: 168,3 mm		Data:	09/10/02			Folha:	1					
Detalhes	Carga (kN)	Leitura dos Extensômetros (Microstrain)									Obs.	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉		
 <p>PROTÓTIPO 1 VISTA SUPERIOR DA PLACA</p>	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sem Encostar	
	0,00	0	9	1	0	13	2	11	-5	4	Encostado	
	6,98	6	23	0	3	106	35	99	-43	59		
	11,51	14	41	1	3	131	89	154	-39	100		
	20,77	25	54	-7	4	158	147	210	-21	131		
	29,63	33	65	-13	4	177	188	245	5	134		
	34,16	45	72	-14	6	190	218	268	31	128		
	38,69	50	79	-15	5	199	238	285	51	123		
	43,22	55	87	-16	5	208	259	303	73	118		
	47,75	59	95	-18	4	222	284	322	99	111		
	52,28	63	102	-16	7	228	303	338	120	107		
	56,81	68	112	-15	4	239	325	357	144	103		
	 <p>PROTÓTIPO 1 VISTA INFERIOR DA PLACA</p>	63,68	73	122	-18	10	251	347	376	166	100	
		68,14	79	133	-18	6	264	380	403	200	96	
		72,63	85	140	-19	6	289	409	426	229	94	
		74,94	89	152	-20	8	285	425	439	246	92	
		81,73	96	164	-18	6	299	456	463	274	93	
		88,53	103	178	-20	7	314	488	490	305	92	
93,06		111	192	-18	11	330	524	518	338	92		
99,85		120	206	-20	5	347	564	549	371	95		
106,60		130	215	-22	6	368	612	571	413	98		
111,20		136	229	-21	5	382	643	585	437	101		
118,00	142	245	-22	7	407	696	613	441	108			
124,80	151	263	-20	7	430	754	646	473	115			
129,30	161	281	-20	6	455	810	708	495	127			
136,10	170	301	-20	6	475	864	749	525	140			
142,90	179	330	-18	9	501	917	800	545	156			
152,00	192	332	-19	7	538	991	880	534	183			

PLACA DE BASE DE COLUNA METÁLICA TUBULAR											
ENSAIO 2 - PROTÓTIPO 1		PLANILHA 1 - EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS									
Excentricidade: 168,3 mm		Data:	09/10/02			Folha:	2				
Detalhes	Carga (kN)	Leitura dos Extensômetros (Microstrain)									Obs.
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	
 <p>PROTÓTIPO 1 VISTA SUPERIOR DA PLACA</p>	158,70	205	363	-20	8	584	1073	930	503	213	
	165,50	215	393	-21	6	625	1139	917	509	244	
	170,10	222	413	-22	6	649	1175	935	506	263	
	176,90	233	448	-23	7	697	1238	957	492	293	
	185,90	268	495	-26	8	763	1321	971	462	338	
	190,50	279	524	-26	8	790	1373	999	467	357	
	195,00	288	555	-27	11	821	1436	1011	455	382	
	199,50	297	584	-27	8	861	1490	1023	441	409	
	206,30	307	614	-28	9	933	1558	1034	433	433	
	210,80	315	643	-28	8	988	1606	1045	422	456	
 <p>PROTÓTIPO 1 VISTA INFERIOR DA PLACA</p>	215,40	325	678	-33	8	989	1677	1060	409	485	
	219,90	333	707	-29	10	1024	1731	1071	400	506	
	224,40	347	750	-33	9	1085	1834	1090	387	525	
	229,00	357	781	-36	9	1161	1899	1103	372	540	
	235,80	375	822	-39	8	1253	2053	1117	356	563	
	240,30	388	845	-40	12	1298	2119	1131	352	565	
	247,10	403	875	-43	10	1343	2185	1149	344	567	
	251,60	428	919	-45	10	1401	2269	1168	323	577	
	260,70	457	961	-48	10	1483	2379	1194	312	585	
	267,50	495	1009	-50	11	1598	2522	1221	289	594	
276,50	525	1044	-53	11	1674	2642	1244	278	579		
281,10	557	1074	-55	11	1761	2789	1257	265	579		
287,90	598	1112	-58	12	1891	2996	1275	247	595		
290,10	625	1134	-60	13	1958	3167	1280	235	622		
294,70	644	1152	-62	12	1998	3260	1290	264	636		
301,50	663	1170	-64	14	2040	3364	1295	230	640		
0,00	103	141	-27	2	1349	1988	51	-664	378	Descarregado	

PLACA DE BASE DE COLUNA METÁLICA TUBULAR						
ENSAIO 2 - PROTÓTIPO 1		PLANILHA 2 - DEFLETÔMETRO E LVDT				
Excentricidade: 168,3 mm		Data:	09/10/02	Folha:	1	
Detalhes	Carga (kN)	Leitura (mm)				Obs.
		D ₁	D ₂	D ₃	LVDT	
	0,00	0	0	0	0	Sem Encostar
	0,00	0	0	0	0	Encostado
	6,98	0	0,34	-0,19	0,4218	
	11,51	0,02	0,54	-1,34	0,7029	
	20,77	0,02	0,63	-1,43	0,9839	
	29,63	0,02	0,7	-1,51	1,2649	
	34,16	0	0,75	-1,57	1,4059	
	38,69	-0,02	0,77	-1,6	1,4059	
	43,22	-0,04	0,78	-1,62	1,4059	
	47,75	-0,06	0,8	-1,66	1,8279	
	52,28	-0,06	0,81	-1,68	1,5469	
	56,81	-0,08	0,82	-1,72	1,5469	
	63,68	-0,08	0,84	-1,72	1,6869	
	68,14	-0,09	0,85	-1,75	1,8279	
	72,63	-0,11	0,85	-1,75	1,8279	
	74,94	-0,12	0,85	-1,78	1,9679	
	81,73	-0,13	0,86	-1,82	1,9679	
	88,53	-0,13	0,87	-1,84	2,1089	
	93,06	-0,14	0,87	-1,87	2,2499	
	99,85	-0,16	0,88	-1,89	2,2499	
106,60	-0,17	0,89	-1,91	2,3899		
111,20	-0,18	0,9	-1,93	2,3899		
118,00	-0,19	0,9	-1,94	2,5309		
124,80	-0,2	0,91	-0,97	2,6709	A partir desse ponto	
129,30	-0,23	0,91	-0,98	2,8129	houve erro de medida	
136,10	-0,25	0,91	-1,01	2,8119	do D3, corrigido gráfico.	
142,90	-0,27	0,92	-1,03	2,9519	Deslocamento do grout	
152,00	-0,3	0,93	-1,06	2,9519		

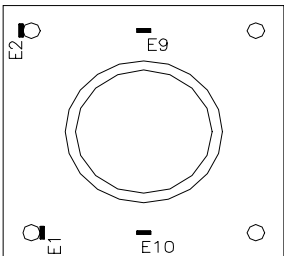
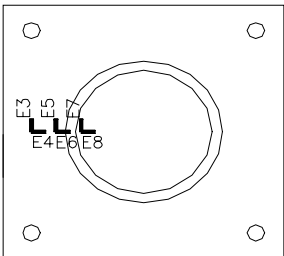
PLACA DE BASE DE COLUNA METÁLICA TUBULAR						
ENSAIO 2 - PROTÓTIPO 1		PLANILHA 2 - DEFLETÔMETRO E LVDT				
Excentricidade: 168,3 mm		Data:	09/10/02	Folha:	2	
Detalhes	Carga (kN)	Leitura (mm)				Obs.
		D ₁	D ₂	D ₂	LVDT	
	158,70	-0,31	0,93	-1,06	3,2339	
	165,50	-0,31	0,93	-1,07	3,3739	
	170,10	-0,32	0,93	-1,08	3,6549	
	176,90	-0,33	0,94	-1,1	3,6549	
	185,90	-0,34	0,94	-1,11	3,7959	
	190,50	-0,36	0,94	-1,13	3,9369	
	195,00	-0,36	0,94	-1,13	4,0769	
	199,50	-0,37	0,94	-1,14	4,2179	
	206,30	-0,38	0,94	-1,15	4,2179	
	210,80	-0,38	0,94	-1,15	4,3579	
	215,40	-0,39	0,94	-1,16	4,4989	
	219,90	-0,39	0,94	-1,17	4,6399	
	224,40	-0,41	0,94	-1,18	4,7799	
	229,00	-0,41	0,94	-1,18	4,9209	
	235,80	-0,42	0,94	-1,19	5,0609	
	240,30	-0,42	0,94	-1,19	5,0609	Reposicionamento D ₂
	247,10	-0,43	0,91	-1,2	5,2019	
	251,60	-0,44	0,91	-1,2	5,4829	
	260,70	-0,45	0,91	-1,21	5,7639	
	267,50	-0,46	0,91	-1,21	5,9049	
276,50	-0,47	0,91	-1,23	6,1859		
281,10	-0,47	0,9	-1,23	6,3269		
287,90	-0,48	0,89	-1,25	6,4669		
290,10	-0,49	0,88	-1,25	6,7479		
294,70	-0,5	0,88	-1,25	6,7479		
301,50	-0,5	0,88	-1,25	6,8889		
0,00	-0,35	0,41	-1,8	3,9369	Descarregado	

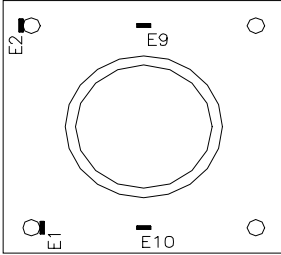
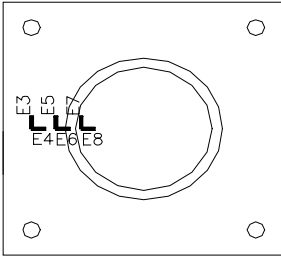
ENSAIO 3

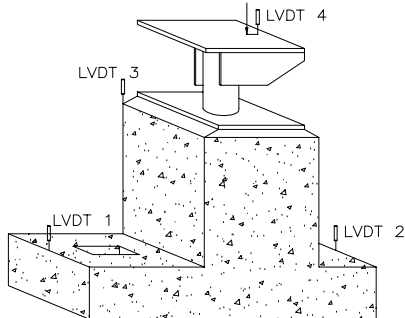
PLACA DE BASE DE COLUNAS METÁLICAS TUBULARES														
ENSAIO 3 - PROTÓTIPO 2 Excentricidade: 168,3 mm	PLANILHA 1 - EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS													
	Data:	02/12/02				Folha:	1							
Detalhes	Carga (kN)	Leitura dos Extensômetros (Microstrain)												
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁	E ₁₂	E ₁₃
 PROTÓTIPO 2 VISTA SUPERIOR DA PLACA	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,00	1	1	1	1	2	1	1	0	0	1	1	1	2
	9,25	4	6	21	25	27	21	20	-1	-4	4	2	0	11
	20,57	17	21	45	71	70	69	62	9	-25	10	-12	-6	16
	34,16	33	40	72	133	119	128	127	23	-68	14	-43	-11	20
	40,96	42	52	84	164	160	145	172	33	-91	17	-62	-14	23
	50,02	54	65	101	209	222	183	226	45	-125	19	-94	-19	25
	61,34	69	88	127	275	302	253	301	61	-174	25	-149	-22	27
	72,67	81	111	152	342	363	310	381	76	-222	27	-207	-26	29
	79,47	95	137	175	404	416	361	448	90	-258	29	-252	-29	27
	90,79	111	183	208	489	488	428	532	108	-307	33	-317	-31	26
	102,10	127	224	239	570	554	489	611	128	-350	35	-367	-29	29
	111,20	143	269	270	656	630	555	676	146	-395	38	-423	-29	27
	120,20	155	300	292	714	680	603	718	160	-426	41	-458	-26	29
	131,60	177	356	342	827	764	635	836	185	-485	44	-527	-25	24
	140,60	193	401	383	905	817	638	921	206	-534	47	-575	-18	28
	152,00	212	454	441	1001	867	672	1022	233	-594	49	-632	-11	25
	156,50	222	480	465	1052	890	682	1224	248	-625	52	-665	-7	29
	163,30	234	516	509	1117	911	695	1310	270	-668	55	-709	-3	29
	170,10	244	549	550	1169	915	701	1312	288	-707	57	-748	4	30
176,90	254	583	609	1224	935	697	1366	311	-754	59	-787	12	33	
181,40	262	609	636	1268	950	693	1409	328	-788	61	-825	16	32	
185,90	270	643	634	1340	967	685	1475	351	-837	64	-875	21	31	
190,50	278	671	670	1394	977	674	1540	373	-877	68	-918	26	30	
195,00	284	695	702	1439	983	664	1577	391	-907	75	-948	36	33	
199,50	295	722	751	1513	1002	662	1627	417	-942	77	-999	37	34	
204,10	298	753	1144	1527	1009	641	1681	441	-995	80	-1045	46	37	
210,80	306	783	1231	1578	1032	638	1736	463	-1037	86	-1086	49	40	

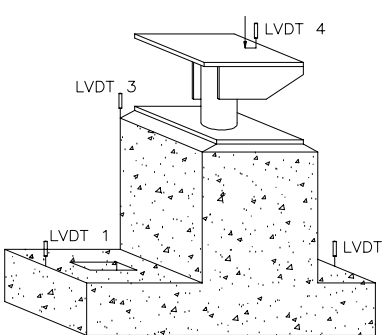
PLACA DE BASE DE COLUNAS METÁLICAS TUBULARES						
ENSAIO 3 - PROTÓTIPO 2		PLANILHA 2 - DEFLETÔMETRO E LVDT				
Excentricidade: 168,3 mm		Data:	02/12/02	Folha:	1	
Detalhes	Carga (kN)	Leitura (mm)				Obs.
		D ₁	D ₂	D ₂	LVDT	
	0,00	0	0	0	0	Sem Encostar
	0,00	0,01	0	0,01	0	Encostado
	9,25	-0,12	0,05	-0,13	0	
	20,57	-0,24	0,11	-0,22	0	
	34,16	-0,31	0,16	-0,31	0	
	40,96	-0,31	0,18	-0,33	0	
	50,02	-0,33	0,2	-0,38	0	
	61,34	-0,39	0,22	-0,43	0	
	72,67	-0,42	0,24	-0,48	0	
	79,47	-0,47	0,26	-0,5	0	
	90,79	-0,53	0,27	-0,54	0	
	102,10	-0,55	0,28	-0,57	0	
	111,20	-0,59	0,28	-0,58	0	
	120,20	-0,6	0,29	-0,6	0	
	131,60	-0,63	0,29	-0,63	0,64	
	140,60	-0,64	0,29	-0,64	0,64	
	152,00	-0,67	0,29	-0,66	0	Em 152,00 kN houve
	156,50	-0,71	0,3	-0,68	0,7807	início de deslocamento
	163,30	-0,71	0,3	-0,68	0	do grout / bloco.
	170,10	-0,72	0,3	-0,69	0	
176,90	-0,73	0,3	-0,7	0		
181,40	-0,74	0,3	-0,71	0	Oscilação em E11	
185,90	-0,76	0,3	-0,72	0		
190,50	-0,78	0,3	-0,73	0		
195,00	-0,79	0,3	-0,74	0		
199,50	-0,8	0,29	-0,74	0		
204,10	-0,81	0,29	-0,75	0		
210,80	-0,83	0,29	-0,76	0		

ENSAIO 4

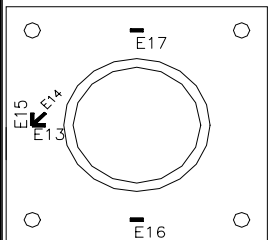
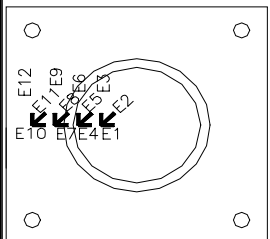
PLACA DE BASE DE COLUNAS METÁLICAS TUBULARES												
ENSAIO 4 - PROTÓTIPO 3		PLANILHA 1 - EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS										
Excentricidade: 168,3 mm		Data:		27/11/03		Folha:		1				
Detalhes	Carga (kN)	Leitura dos Extensômetros (Microstrain)										OBS.
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	
 <p>PROTÓTIPO 3 VISTA SUPERIOR DA PLACA</p>	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sem Encostar
	0,00	1	1	-6	-3	-4	-11	-1	-9	-4	-3	Encostado
 <p>PROTÓTIPO 3 VISTA INFERIOR DA PLACA</p>	13,77	8	7	-42	-13	-30	-43	-14	-29	-7	-5	
	27,37	20	20	-104	-23	-75	-77	-42	-54	-5	-5	
	36,43	27	28	-146	-28	-104	-101	-60	-70	-1	-1	
	45,49	35	37	-183	-40	-131	-126	-79	-86	3	4	
	54,55	47	51	-240	-50	-171	-155	-104	-105	11	9	
	65,87	61	65	-298	-59	-207	-182	-128	-124	19	16	
	74,94	74	77	-340	-67	-240	-203	-146	-140	24	24	
	84,00	94	95	-399	-75	-279	-230	-171	-159	30	34	
	95,32	114	117	-455	-84	-318	-257	-195	-177	33	46	
	104,40	165	143	-507	-87	-353	-271	-217	-189	34	60	
	108,90	181	160	-536	-90	-373	-286	-229	-198	37	66	
	115,70	215	203	-565	-94	-394	-297	-241	-208	39	72	
	122,50	234	224	-607	-100	-422	-319	-260	-225	38	82	
	129,30	255	245	-650	-105	-452	-338	-279	-238	41	90	
	136,10	275	265	-688	-110	-478	-354	-294	-250	43	96	
	142,90	296	288	-726	-111	-504	-368	-309	-262	44	104	
	147,40	349	315	-762	-114	-526	-378	-325	-270	46	113	
	154,20	375	342	-817	-113	-563	-403	-349	-289	48	122	
	161,00	399	369	-860	-118	-594	-425	-370	-306	47	129	
	167,80	418	390	-900	-117	-620	-441	-388	-321	48	136	
174,60	449	424	-956	-124	-661	-468	-414	-343	48	145		
181,40	474	452	-1003	-126	-694	-492	-437	-361	47	151		
190,50	509	488	-1062	-136	-736	-521	-464	-384	46	157		
195,00	527	504	-1093	-141	-756	-537	-479	-396	47	160		
199,50	548	531	-1229	-144	-782	-553	-497	-410	47	162		
206,30	572	557	-1171	-148	-814	-575	-517	-427	46	165		

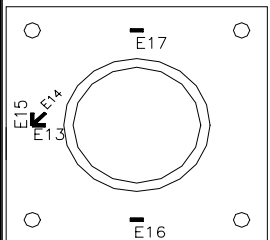
PLACA DE BASE DE COLUNAS METÁLICAS TUBULARES												
ENSAIO 4 - PROTÓTIPO 3		PLANILHA 1 - EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS										
Excentricidade: 168,3 mm		Data:		27/11/03		Folha:		2				
Detalhes	Carga (kN)	Leitura dos Extensômetros (Microstrain)										OBS.
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	
 <p>PROTÓTIPO 3 VISTA SUPERIOR DA PLACA</p>	210,80	592	578	-1208	-151	-839	-591	-536	-439	43	165	
	217,60	624	624	-1257	-155	-875	-615	-560	-458	39	169	
	226,70	664	666	-1324	-162	-923	-644	-594	-484	33	171	
	231,20	680	682	-1351	-165	-944	-658	-609	-496	32	172	
	242,60	723	726	-1426	-171	-998	-694	-648	-525	22	174	
	249,40	754	757	-1486	-177	-1043	-723	-677	-549	14	176	
	256,20	794	798	-1555	-180	-1093	-753	-715	-575	5	176	
	262,90	834	839	-1609	-184	-1137	-778	-747	-596	-2	178	
	272,00	864	872	-1677	-188	-1189	-810	-787	-624	-15	175	
	281,10	906	915	-1756	-192	-1252	-847	-836	-656	-27	173	
287,90	934	945	-1812	-195	-1295	-872	-870	-679	-37	171		
294,70	975	987	-1889	-198	-1358	-908	-920	-709	-50	166		
 <p>PROTÓTIPO 3 VISTA INFERIOR DA PLACA</p>	301,50	1015	1028	-1960	-200	-1418	-940	-967	-740	-61	164	
	308,30	1039	1054	-2010	-202	-1457	-962	-998	-759	-69	161	
	315,00	1087	1105	-2094	-204	-1528	-1002	-1053	-792	-83	158	
	321,80	1112	1132	-2154	-206	-1578	-1030	-1093	-818	-94	153	
	328,60	1141	1165	-2235	-208	-1646	-1068	-1148	-853	-111	146	
	335,40	1170	1199	-2306	-209	-1708	-1100	-1197	-882	-126	140	
	340,00	1205	1240	-2375	-209	-1765	-1128	-1242	-907	-140	137	
	344,50	1225	1262	-2424	-211	-1807	-1149	-1276	-928	-154	131	
	349,00	1248	1288	-2492	-212	-1865	-1178	-1324	-956	-166	124	
	358,10	1282	1334	-2597	-212	-1953	-1224	-1397	-997	-164	113	
364,90	1312	1370	-2680	-213	-2023	-1257	-1454	-1029	-171	106		
371,70	1346	1412	-2782	-213	-2108	-1300	-1529	-1070	-179	95		
378,50	1393	1415	-2890	-214	-2199	-1340	-1604	-1108	-188	61		
0,00	221	237	-984	41	-884	-362	-815	-344	-41	-68	Descarregado	

PLACA DE BASE DE COLUNAS METÁLICAS TUBULARES						
ENSAIO 4 - PROTÓTIPO 3		PLANILHA 2 - DEFLETÔMETRO E LVDT				
Excentricidade: 168,3 mm		Data:	27/11/03	Folha:	1	
Detalhes	Carga (kN)	Leitura (mm)				Obs.
		LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3	LVDT 4	
	0,00	0	0	0		Sem encostar
	0,00	-0,1377	-0,1406	0		Encostado
	13,77	0	0	-0,2021		
	27,37	-0,1377	0	-0,2021		
	36,43	0,1378	0,1406	-0,2021		Primeiras trincas no grout (azul)
	45,49	0	0	-0,2021		
	54,55	-0,1397	0	0		
	65,87	0,1378	0	-0,2021		
	74,94	0,1378	0	-0,2021		
	84,00	0	0	-0,2021		
	95,32	-0,1377	0	-0,2021		
	104,40	0	0,1406	0		
	108,90	0	0,1406	-0,2021		Placa soltando grout (trincas verde)
	115,70	0	0,1406	-0,2021		
	122,50	-0,1377	0	0		
	129,30	0	0,1406	-0,2021		
	136,10	0	0,1406	-0,2021		
	142,90	-0,1377	-0,2183	-0,2021		Trincas verde (duas)
	147,40	0	0,1406	-0,2021		
	154,20	0	-0,2183	-0,4042		
161,00	-0,1377	0,1406	-0,2021			
167,80	-0,1377	0,1406	-0,2021			
174,60	-0,2755	0,1406	-0,4042			
181,40	-0,2755	0,1406	-0,2021		Trincas marrom	
190,50	0	0,1406	-0,2021			
195,00	0	0,1406	-0,2021			
199,50	0	0	-0,2021			
206,30	-0,2755	0,1406	-0,2021			

PLACA DE BASE DE COLUNAS METÁLICAS TUBULARES						
ENSAIO 4 - PROTÓTIPO 3		PLANILHA 2 - DEFLETÔMETRO E LVDT				
Excentricidade: 168,3 mm		Data:	27/11/03	Folha:	2	
Detalhes	Carga (kN)	Leitura (mm)				Obs.
		LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3	LVDT 4	
 <p>Ocorreu deformações residuais nos chumbadores tracionados (escoamento)</p>	210,80	0	0,1406	-0,2021		Trincas rosa (deformação diminui e depois recupera)
	217,60	0,1378	0,1406	-0,2021		
	226,70	0	-0,1406	-0,2021		
	231,20	0	0,1406	-0,2021		
	242,60	-0,1377	0,1416	-0,2021		
	249,40	-0,1377	0	-0,2021		
	256,20	0	0,1406	-0,2021		Trincas amarela
	262,90	-0,1377	0,1406	-0,2021		
	272,00	-0,1377	0,1406	-0,2021		
	281,10	-0,1377	0	-0,2021		
	287,90	-0,1377	0,1406	-0,2021		
	294,70	-0,1377	-0,2183	-0,4042		
	301,50	-0,1377	0,1406	-0,2021		
	308,30	-0,1377	0	-0,2021		Trincas azul (grout quebrou) (foto 1)
	315,00	0	-0,2183	-0,2021		
	321,80	0	0,1406	-0,2021		
	328,60	-0,2755	0,1406	-0,2021		
	335,40	-0,1377	0,1406	-0,4042		
	340,00	-0,1377	0,1406	-0,2021		
	344,50	-0,1377	0,1406	-0,2021		
349,00	0	0,1406	-0,2021			
358,10	0	0,1406	-0,4042			
364,90	0,1378	0,1406	-0,2021			
371,70	0	0,2183	-0,2021		Terminou de soltar o grout (foto 2)	
378,50	-0,1377	0,1406	-0,2021			
0,00	0	0	-0,4042		Descarregado	

ENSAIO 5

PLACA DE BASE DE COLUNAS METÁLICAS TUBULARES																		
ENSAIO 5 - PROTÓTIPO 4		PLANILHA 1 - EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS																
Excentricidade = 168,3 mm		Data:		16/12/03		Folha:		1										
Detalhes	Carga (kN)	Leitura dos Extensômetros (Microstrain)																
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁	E ₁₂	E ₁₃	E ₁₄	E ₁₅	E ₁₆	E ₁₇
 <p>PROTÓTIPO 4 VISTA SUPERIOR DA PLACA</p>	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,00	0	1	1	-3	-4	0	-2	-3	-4	4	7	3	2	3	2	2	3
	6,98	-2	-3	-5	-22	-24	-11	-28	-22	-16	3	20	10	18	18	17	11	14
	22,84	-5	-3	-3	-53	-36	-32	-59	-38	-26	6	-2	-20	11	10	13	-5	-3
	40,96	-45	-36	-28	-94	-83	-68	-119	-100	-101	-18	-37	-99	60	86	126	16	12
	54,55	-73	-63	-58	-118	-116	-102	-159	-146	-154	-25	-133	-216	27	80	142	-21	-22
	70,40	-81	-68	-56	-136	-123	-116	-164	-187	-205	-26	-156	-269	54	137	217	3	3
	84,00	-227	-212	-198	-295	-273	-269	-314	-335	-362	-133	-270	-417	-11	101	205	-65	-64
	97,59	-244	-226	-212	-317	-292	-297	-339	-362	-401	-133	-319	-495	-22	111	236	-75	-73
	106,60	-259	-257	-235	-305	-315	-318	-357	-387	-434	-137	-347	-544	-26	122	262	-79	-75
 <p>PROTÓTIPO 4 VISTA INFERIOR DA PLACA</p>	115,70	-283	-262	-258	-332	-336	-346	-381	-418	-477	-135	-385	-603	-23	148	309	-73	-67
	122,50	-292	-274	-291	-338	-355	-364	-395	-444	-501	-135	-403	-641	-18	169	344	-68	-60
	129,30	-308	-289	-277	-357	-369	-393	-413	-465	-535	-137	-417	-677	-12	191	378	-64	-52
	138,40	-317	-311	-370	-369	-384	-402	-425	-481	-555	-137	-441	-712	-4	214	415	-58	-42
	142,90	-327	-309	-298	-377	-397	-434	-438	-498	-577	-139	-424	-719	19	249	457	-38	-19
	147,40	-334	-312	-347	-385	-406	-432	-444	-509	-590	-137	-463	-757	5	242	460	-53	-32
	156,50	-352	-352	-347	-407	-429	-458	-473	-540	-625	-141	-485	-790	23	280	512	-39	-13
	161,00	-362	-380	-385	-418	-442	-495	-482	-558	-646	-140	-508	-830	20	290	533	-47	-19
	167,80	-370	-352	-337	-425	-462	-477	-500	-576	-665	-139	-533	-872	20	304	559	-48	-16
	174,60	-382	-363	-355	-441	-473	-507	-513	-596	-692	-145	-547	-895	28	326	588	-44	-9
181,40	-394	-379	-378	-456	-461	-535	-536	-624	-731	-146	-568	-938	36	354	633	-42	0	
188,20	-407	-393	-411	-471	-509	-545	-558	-654	-758	-148	-594	-983	43	381	677	-41	6	
195,00	-422	-407	-396	-490	-526	-572	-581	-680	-790	-151	-628	-1028	41	397	706	-45	6	
199,50	-429	-417	-504	-511	-542	-581	-595	-697	-806	-150	-640	-1056	47	416	737	-44	10	
206,30	-443	-431	-427	-516	-556	-611	-619	-721	-835	-157	-650	-1081	61	445	776	-35	22	
210,80	-445	-436	-498	-522	-565	-623	-624	-731	-847	-156	-660	-1101	62	454	793	-40	20	
217,60	-465	-458	-450	-551	-640	-634	-633	-762	-885	-160	-691	-1151	67	484	839	-39	27	
224,40	-475	-465	-460	-559	-615	-660	-669	-785	-916	-160	-721	-1195	70	503	878	-43	28	

PLACA DE BASE DE COLUNAS METÁLICAS TUBULARES																		
ENSAIO 5 - PROTÓTIPO 4			PLANILHA 1 - EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS															
Excentricidade = 168,3 mm			Data:		16/12/03		Folha:		2									
Detalhes	Carga (kN)	Leitura dos Extensômetros (Microstrain)																
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁	E ₁₂	E ₁₃	E ₁₄	E ₁₅	E ₁₆	E ₁₇
 <p>PROTÓTIPO 4 VISTA SUPERIOR DA PLACA</p>	231,20	-488	-483	-497	-584	-624	-677	-692	-811	-942	-165	-744	-1229	77	527	912	-41	33
	235,80	-496	-496	-556	-592	-645	-730	-710	-837	-971	-164	-757	-1265	87	559	966	-39	40
	240,58	-503	-502	-503	-599	-650	-737	-723	-853	-989	-163	-787	-1301	82	566	982	-48	34
	247,10	-519	-534	-525	-615	-672	-751	-753	-880	-1019	-158	-797	-1330	92	593	1024	-44	42
	253,90	-529	-541	-615	-638	-693	-761	-772	-906	-1050	-171	-815	-1370	103	625	1073	-43	46
	260,70	-547	-556	-566	-659	-726	-788	-807	-944	-1094	-177	-853	-1432	101	646	1121	-50	40
	265,20	-556	-572	-655	-686	-732	-829	-832	-966	-1125	-178	-850	-1466	112	676	1170	-48	43
	272,00	-571	-588	-602	-691	-751	-831	-846	-991	-1152	-179	-903	-1519	104	689	1201	-57	37
	278,80	-573	-603	-612	-695	-765	-852	-862	-1006	-1177	-175	-908	-1548	115	718	1246	-95	41
	283,30	-587	-608	-662	-716	-796	-929	-887	-1036	-1209	-172	-920	-1583	122	738	1282	-56	41
290,10	-602	-625	-698	-730	-809	-950	-923	-1070	-1243	-182	-957	-1633	124	769	1336	-58	44	
294,70	-606	-637	-676	-744	-825	-928	-938	-1095	-1272	-173	-968	-1674	128	788	1374	-67	39	
299,20	-612	-651	-687	-754	-841	-961	-952	-1117	-1299	-181	-987	-1704	138	818	1421	-61	45	
306,00	-628	-671	-714	-780	-867	-987	-990	-1151	-1341	-182	-1027	-1766	136	847	1474	-75	35	
310,50	-637	-682	-734	-794	-883	-1020	-1017	-1178	-1375	-185	-1036	-1802	138	871	1518	-74	40	
317,30	-647	-697	-748	-815	-905	-1052	-1028	-1204	-1405	-193	-1071	-1848	140	892	1559	-82	34	
321,80	-661	-718	-777	-835	-936	-1076	-1069	-1234	-1449	-191	-1098	-1910	141	919	1613	-95	27	
326,40	-669	-733	-797	-855	-954	-1079	-1077	-1267	-1481	-183	-1138	-1958	140	946	1664	-101	24	
333,20	-669	-739	-810	-859	-966	-1105	-1114	-1288	-1505	-187	-1137	-1983	154	979	1711	-97	30	
340,00	-695	-765	-881	-907	-998	-1138	-1128	-1325	-1556	-193	-1184	-2052	150	1005	1768	-112	21	
344,50	-697	-773	-873	-916	-1012	-1163	-1151	-1350	-1585	-190	-1216	-2102	148	1029	1810	-119	17	
353,60	-714	-800	-899	-932	-1069	-1197	-1182	-1392	-1635	-188	-1246	-2171	150	1068	1886	-127	17	
360,40	-728	-822	-926	-975	-1082	-1253	-1226	-1441	-1696	-190	-1272	-2241	162	1122	1980	-130	22	
367,10	-747	-850	-984	-996	-1122	-1316	-1275	-1485	-1754	-192	-1327	-2321	163	1167	2060	-143	16	
376,20	-769	-883	-1013	-1032	-1162	-1368	-1313	-1536	-1817	-199	-1375	-2406	163	1207	2141	-159	7	
380,70	-783	-900	-1081	-1102	-1192	-1375	-1338	-1571	-1865	-200	-1391	-2461	170	1253	2211	-164	7	
392,10	-789	-918	-1071	-1105	-1221	-1441	-1374	-1602	-1911	-198	-1440	-2531	164	1272	2268	-183	-4	
398,90	-803	-938	-1102	-1109	-1247	-1452	-1410	-1639	-1956	-201	-1455	-2576	176	1314	2337	-185	-4	

PLACA DE BASE DE COLUNAS METÁLICAS TUBULARES

ENSAIO 5 - PROTÓTIPO 4

PLANILHA 1 - EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS

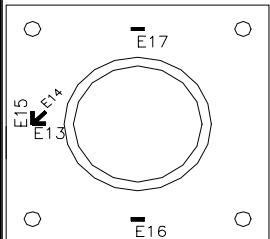
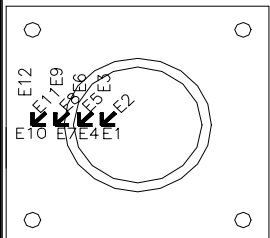
Excentricidade = 168,3 mm

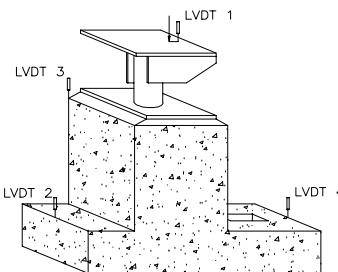
Data:

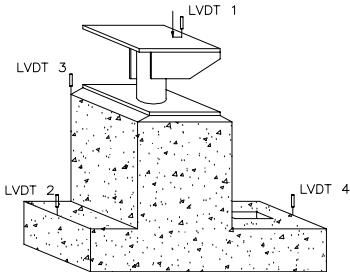
16/12/03

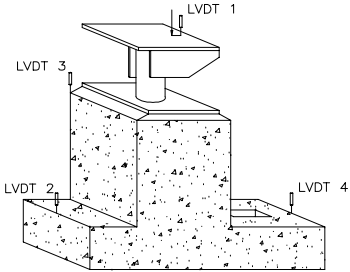
Folha:

3

Detalhes	Carga (kN)	Leitura dos Extensômetros (Microstrain)																	
		E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁	E ₁₂	E ₁₃	E ₁₄	E ₁₅	E ₁₆	E ₁₇	
 <p align="center">_PROTÓTIPO 4_ VISTA SUPERIOR DA PLACA</p>	401,10	-815	-960	-1138	-1137	-1279	-1504	-1443	-1676	-2013	-202	-1520	-2671	164	1344	2411	-210	-19	
	410,20	-826	-986	-1197	-1358	-1320	-1586	-1483	-1717	-2074	-206	-1551	-2748	167	1384	2505	-220	-22	
	414,70	-834	-1010	-1233	-1398	-1354	-1610	-1511	-1760	-2132	-210	-1590	-2828	168	1437	2588	-237	-37	
	420,00	-844	-1029	-1276	-1216	-1388	-1640	-1545	-1795	-2186	-209	-1638	-2902	169	1478	2667	-254	-46	
	0,00	-101	-332	-716	-494	-594	-797	-593	-652	-18	-77	-583	-1123	-161	466	1066	-247	-181	
 <p align="center">_PROTÓTIPO 4_ VISTA INFERIOR DA PLACA</p>																			

PLACA DE BASE DE COLUNAS METÁLICAS TUBULARES						
ENSAIO 5 - PROTÓTIPO 4		PLANILHA 2 - DEFLETÔMETRO E LVDT				
Excentricidade: 168,3 mm		Data:	16/12/03		Folha:	1
Detalhes	Carga (kN)	Leitura (mm)				Obs.
		LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3	LVDT 4	
	0,00	0	0	0		Sem Emcostar
	0,00	0	-0,1406	-0,2021		Encostado
	6,98	0,2756	-0,1406	-0,2021		
	22,84	0,1378	-0,1406	-0,2021		
	40,96	0,4134	-0,1406	-0,2021		
	54,55	0,4134	-0,1406	-0,2021		
	70,40	0,689	-0,1406	-0,2021		
	84,00	0,8268	0	-0,4042		Primeiras Trincas Vermelha
	97,59	1,1023	-0,1406	-0,2021		
	106,60	1,2403	-0,1406	-0,4042		
	115,70	1,2403	-0,1406	-0,4042		
	122,50	1,3779	-0,2812	-0,4042		
	129,30	1,3779	-0,2812	-0,2021		
	138,40	1,3779	-0,1406	-0,4042		
	142,90	1,5159	-0,2812	-0,6063		
	147,40	1,5159	-0,1406	-0,4042		
	156,50	1,5159	-0,1406	-0,4042		
	161,00	1,6539	-0,1406	-0,4042		
	167,80	1,5159	-0,2812	-0,6063		
	174,60	1,6539	-0,1406	-0,4042		
	181,40	1,9289	-0,1406	-0,4042		
	188,20	1,7909	-0,1406	-0,4042		Placa começou a soltar (verde)
	195,00	2,0669	-0,1406	-0,4042		Trincas azul
	199,50	2,0669	-0,1406	-0,4042		
206,30	2,0669	-0,2812	-0,4042			
210,80	2,2049	-0,1406	-0,4042			
217,60	2,3429	-0,1406	-0,4042			
224,40	2,3429	0,1406	-0,2021			

PLACA DE BASE DE COLUNAS METÁLICAS TUBULARES						
ENSAIO 5 - PROTÓTIPO 4		PLANILHA 2 - DEFLETÔMETRO E LVDT				
Excentricidade: 168,3 mm		Data:	16/12/03		Folha:	2
Detalhes	Carga (kN)	Leitura (mm)				Obs.
		LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3	LVDT 4	
	231,20	2,4799	-0,1406	-0,4042		
	235,80	2,4799	0	-0,6063		Trincas marrom
	247,10	2,4799	-0,1406	-0,4042		
	253,90	2,7559	0	-0,4042		
	260,70	2,8939	-0,1406	-0,6063		
	265,20	3,0309	-0,1406	-0,4042		
	272,00	3,1689	-0,1406	-0,6063		
	278,80	3,0309	-0,1406	-0,4042		
	283,30	3,1689	0	-0,2021		
	290,10	3,3069	0	-0,6063		
	294,70	3,4449	0	-0,4042		
	299,20	3,3069	-0,1406	-0,6063		
	306,00	3,5829	-0,1406	-0,2021		Trincas azul marinho
	310,50	3,7199	0	-0,4042		
	317,30	3,8579	0	-0,4042		
	321,80	3,8579	-0,1406	-0,2021		
	326,40	3,9959	-0,1406	-0,4042		
	333,20	3,9959	-0,1406	-0,4042		Trincas rosa - placa soltando grout
	340,00	4,1339	-0,1406	-0,4042		
	344,50	4,2719	0	-0,4042		
353,60	4,5469	-0,1406	-0,4042		Trinca preta	
360,40	4,9599	-0,1406	-0,2021			
367,10	4,8229	-0,1406	-0,2021			
376,20	5,0979	-0,1406	-0,4042		Trinca amarela	
380,70	5,0979	-0,1406	-0,2021			
392,10	5,5119	0	-0,4042			
398,90	5,6489	-0,1406	-0,2021			

PLACA DE BASE DE COLUNAS METÁLICAS TUBULARES						
ENSAIO 5 - PROTÓTIPO 4		PLANILHA 2 - DEFLETÔMETRO E LVDT				
Excentricidade: 168,3 mm		Data:	16/12/03		Folha:	3
Detalhes	Carga (kN)	Leitura (mm)				Obs.
		LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3	LVDT 4	
	401,10	5,8549	-0,1406	-0,6063		
	410,20	6,0629	-0,1406	-0,4042		
	414,70	6,0629	0,1406	-0,6063		
	0,00	2,8939	0	-0,6063		Descarregado

ANEXO II - Tabelas com os valores das tensões provenientes das deformações
medidas nos Ensaios 1, 2, 3, 4 E 5.

ENSAIO 1

ENSAIO 1 - EXTENSÔMETROS 3 E 4
CÁLCULO DAS TENSÕES

E4

E3

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0,00	0,00	E(GPa) = 205
2,449	-1	1	-0,15	0,15	
27,37	2	2	0,61	0,61	
29,63	1	0	0,23	0,08	G(GPa) = 78,85
40,96	4	0	0,92	0,30	
43,22	5	0	1,15	0,38	
47,75	8	1	1,92	0,84	
52,28	10	2	2,45	1,22	
56,81	13	1	3,07	1,22	
61,34	15	2	3,60	1,60	
65,87	20	2	4,75	1,98	
70,4	22	3	5,29	2,36	
81,73	29	2	6,82	2,66	
86,26	20	-3	4,37	0,83	
90,79	26	-4	5,68	1,05	
95,32	29	-2	6,52	1,74	
102,1	31	-4	6,83	1,43	
106,6	37	-4	8,21	1,89	
111,2	40	-3	8,97	2,35	
115,7	44	-7	9,59	1,73	
122,5	45	-7	9,82	1,81	
127	49	-7	10,74	2,11	
131,6	53	-9	11,51	1,95	
138,4	54	-10	11,66	1,80	
145,2	56	-10	12,12	1,95	
152	60	-11	12,97	2,02	
158,7	65	-13	13,97	1,94	
163,3	66	-10	14,42	2,71	
167,8	68	-9	14,96	3,09	
172,3	70	-11	15,27	2,78	
176,9	72	-11	15,73	2,94	
181,4	73	-13	15,81	2,55	
185,9	77	-13	16,73	2,85	
192,7	81	-12	17,72	3,39	
199,5	83	-14	18,03	3,08	
204,1	85	-15	18,42	3,00	
213,1	90	-17	19,41	2,92	
219,9	91	-17	19,64	3,00	
229	91	-18	19,57	2,77	
233,5	77	-17	16,42	1,93	
240,3	52	-19	10,52	-0,42	

ENSAIO 1 - EXTENSÔMETROS 3 E 4

CÁLCULO DAS TENSÕES

E4

E3

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
249,4	-57	-20	-14,63	-8,93	
253,9	-223	-22	-52,97	-21,99	E(GPa) = 205
262,9	-286	-23	-67,54	-27,00	
269,7	-326	-22	-76,67	-29,81	
276,5	-346	-20	-81,12	-30,87	G(GPa) = 78,85
283,3	-358	-28	-84,48	-33,62	
292,4	-360	-27	-84,87	-33,54	
303,7	-323	-12	-75,22	-27,28	
312,8	-325	-18	-76,13	-28,81	
319,6	-298	-62	-73,26	-36,89	
328,6	-237	-81	-60,67	-36,63	
335,4	-201	-85	-52,69	-34,81	
342,2	-174	-85	-46,48	-32,76	
349	-144	-83	-39,43	-30,03	
360,4	-91	-79	-26,93	-25,08	
369,4	-42	-70	-14,98	-19,29	
378,5	-30	-65	-11,84	-17,23	
392,1	-21	-58	-9,23	-14,94	
398,9	12	-53	-1,26	-11,28	
405,7	40	-52	5,25	-8,93	
412,5	67	-48	11,77	-5,96	
421,5	105	-44	20,82	-2,15	
430,6	155	-43	32,39	1,87	
441,9	202	-47	42,90	4,52	
453,2	224	-66	46,52	1,82	
460	248	-67	51,97	3,41	
469,1	284	-79	59,34	3,39	
475,9	333	-80	70,53	6,88	
487,2	353	-93	74,15	5,40	
498,5	410	-96	87,03	9,04	
500,8	356	-85	75,45	7,47	
509,9	391	-87	83,35	9,67	
521,2	456	-86	98,38	14,83	
528	444	-81	95,99	15,07	
539,3	474	-84	102,67	16,66	
548,4	511	-84	111,18	19,47	
559,7	561	-94	121,92	20,96	
566,5	549	-99	118,78	18,90	
573,3	552	-89	120,23	21,43	
580,1	556	-93	120,85	20,82	
591,4	603	-95	131,51	23,92	
600,5	617	-93	134,88	25,45	

ENSAIO 1 - EXTENSÔMETROS 5 E 6
CÁLCULO DAS TENSÕES

E5

E6

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0,00	0,00	E(GPa) = 205
2,449	0	0	0,00	0,00	
27,37	13	10	3,75	3,29	G(GPa) = 78,85
29,63	14	11	4,06	3,59	
40,96	19	15	5,51	4,89	
43,22	21	16	6,05	5,28	
47,75	23	17	6,58	5,66	
52,28	25	19	7,19	6,27	
56,81	28	21	8,04	6,96	
61,34	31	23	8,88	7,64	
65,87	35	26	10,03	8,64	
70,4	38	28	10,87	9,33	
81,73	43	35	12,55	11,32	
86,26	44	39	13,08	12,31	
90,79	44	40	13,16	12,54	
95,32	47	43	14,08	13,46	
102,1	47	46	14,30	14,15	
106,6	48	49	14,76	14,92	
111,2	50	53	15,53	15,99	
115,7	51	56	15,98	16,75	
122,5	52	59	16,44	17,52	
127	53	62	16,90	18,29	
131,6	54	65	17,36	19,05	
138,4	57	70	18,43	20,43	
145,2	58	74	18,96	21,43	
152	61	79	20,03	22,81	
158,7	63	84	20,87	24,11	
163,3	65	88	21,63	25,18	
167,8	66	91	22,09	25,95	
172,3	68	94	22,78	26,79	
176,9	69	97	23,24	27,55	
181,4	72	100	24,16	28,47	
185,9	75	105	25,23	29,85	
192,7	78	109	26,22	31,00	
199,5	78	114	26,60	32,15	
204,1	79	118	27,13	33,14	
213,1	86	126	29,35	35,52	
219,9	85	131	29,50	36,59	
229	87	137	30,42	38,12	
233,5	91	142	31,72	39,58	
240,3	91	148	32,17	40,96	

ENSAIO 1 - EXTENSÔMETROS 5 E 6

CÁLCULO DAS TENSÕES

E5

E6

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon_x(\mu)$	$\epsilon_y(\mu)$	$\sigma_x(\text{MPa})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
249,4	93	155	33,16	42,72	
253,9	95	160	34,00	44,02	E(GPa) = 205
262,9	98	165	35,07	45,40	
269,7	101	172	36,29	47,24	
276,5	103	179	37,28	49,00	G(GPa) = 78,85
283,3	106	183	38,28	50,15	
292,4	108	191	39,35	52,14	
303,7	113	202	41,33	55,05	
312,8	116	211	42,70	57,35	
319,6	119	217	43,85	58,96	
328,6	123	226	45,45	61,33	
335,4	125	232	46,37	62,86	
342,2	127	239	47,36	64,62	
349	130	246	48,58	66,46	
360,4	133	256	50,03	68,99	
369,4	138	271	52,32	72,82	
378,5	140	278	53,31	74,58	
392,1	147	293	56,06	78,57	
398,9	149	304	57,36	81,25	
405,7	151	311	58,35	83,01	
412,5	155	320	59,95	85,38	
421,5	159	330	61,63	87,99	
430,6	164	343	63,77	91,36	
441,9	170	358	66,29	95,26	
453,2	175	377	68,88	100,02	
460	180	390	71,02	103,39	
469,1	185	404	73,23	106,99	
475,9	192	419	75,98	110,97	
487,2	195	429	77,43	113,50	
498,5	200	448	80,02	118,25	
500,8	205	468	82,69	123,23	
509,9	209	477	84,29	125,60	
521,2	217	497	87,65	130,81	
528	224	516	90,71	135,71	
539,3	233	540	94,60	141,92	
548,4	241	561	98,03	147,36	
559,7	249	583	101,54	153,02	
566,5	255	606	104,67	158,77	
573,3	260	624	107,19	163,29	
580,1	265	639	109,48	167,12	
591,4	272	659	112,60	172,25	
600,5	280	687	116,57	179,30	

ENSAIO 1 - EXTENSÔMETROS 7 E 8
CÁLCULO DAS TENSÕES

E7

E8

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0,00	0,00	E(GPa) = 205
2,449	-1	0	-0,23	-0,08	
27,37	6	2	1,53	0,92	G(GPa) = 78,85
29,63	7	3	1,84	1,22	
40,96	11	2	2,68	1,30	
43,22	11	2	2,68	1,30	
47,75	12	1	2,84	1,14	
52,28	15	1	3,53	1,37	
56,81	18	1	4,22	1,60	
61,34	21	0	4,83	1,59	
65,87	24	-1	5,45	1,59	
70,4	27	-2	6,06	1,59	
81,73	33	-5	7,21	1,36	
86,26	38	-7	8,21	1,27	
90,79	36	-7	7,75	1,12	
95,32	40	-9	8,52	0,97	
102,1	43	-12	8,98	0,50	
106,6	45	-14	9,29	0,20	
111,2	47	-16	9,60	-0,11	
115,7	50	-19	10,06	-0,58	
122,5	53	-20	10,67	-0,58	
127	54	-22	10,75	-0,96	
131,6	57	-24	11,29	-1,19	
138,4	61	-26	12,06	-1,35	
145,2	64	-29	12,52	-1,81	
152	69	-32	13,44	-2,12	
158,7	72	-34	13,98	-2,36	
163,3	75	-36	14,52	-2,59	
167,8	78	-37	15,14	-2,59	
172,3	80	-39	15,44	-2,90	
176,9	83	-40	16,06	-2,90	
181,4	84	-41	16,21	-3,06	
185,9	88	-43	16,98	-3,21	
192,7	90	-45	17,29	-3,52	
199,5	94	-48	17,98	-3,91	
204,1	97	-49	18,60	-3,91	
213,1	102	-52	19,52	-4,22	
219,9	110	-54	21,21	-4,07	
229	117	-57	22,59	-4,23	
233,5	127	-59	24,74	-3,93	
240,3	131	-61	25,51	-4,09	

ENSAIO 1 - EXTENSÔMETROS 7 E 8

CÁLCULO DAS TENSÕES

E7

E8

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon_x(\mu)$	$\epsilon_y(\mu)$	$\sigma_x(\text{MPa})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
249,4	136	-64	26,43	-4,40	E(GPa) = 205
253,9	173	-65	34,86	-1,82	
262,9	181	-67	36,55	-1,67	G(GPa) = 78,85
269,7	188	-69	38,01	-1,60	
276,5	193	-71	39,01	-1,68	
283,3	199	-73	40,24	-1,69	
292,4	206	-75	41,70	-1,61	
303,7	217	-79	43,92	-1,70	
312,8	228	-82	46,23	-1,56	
319,6	237	-84	48,15	-1,33	
328,6	245	-86	49,83	-1,18	
335,4	251	-88	51,06	-1,19	
342,2	259	-90	52,75	-1,04	
349	266	-92	54,21	-0,97	
360,4	275	-95	56,05	-0,98	
369,4	289	-97	59,12	-0,37	
378,5	297	-99	60,81	-0,23	
392,1	313	-102	64,26	0,30	
398,9	328	-103	67,64	1,21	
405,7	334	-105	68,87	1,20	
412,5	347	-106	71,78	1,96	
421,5	359	-109	74,31	2,18	
430,6	372	-112	77,08	2,48	
441,9	387	-115	80,30	2,92	
453,2	410	-119	85,29	3,75	
460	426	-122	88,74	4,27	
469,1	437	-124	91,12	4,65	
475,9	451	-128	94,04	4,79	
487,2	458	-133	95,27	4,17	
498,5	469	-137	97,49	4,09	
500,8	489	-139	101,94	5,15	
509,9	496	-143	103,25	4,76	
521,2	507	-149	105,33	4,21	
528	519	-153	107,78	4,20	
539,3	529	-158	109,70	3,81	
548,4	543	-164	112,47	3,49	
559,7	557	-171	115,16	2,95	
566,5	576	-176	119,15	3,24	
573,3	591	-180	122,30	3,46	
580,1	599	-183	123,91	3,37	
591,4	607	-190	125,22	2,37	
600,5	615	-197	126,53	1,37	

ENSAIO 2

ENSAIO 2 - EXTENSÔMETROS 3 E 4
CÁLCULO DAS TENSÕES

E4

E3

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0,00	0,00	E(GPa) = 205
0	0	1	0,08	0,23	
6,979	3	0	0,69	0,23	G(GPa) = 78,85
11,51	3	1	0,77	0,46	
20,77	4	-7	0,39	-1,31	
29,63	4	-13	-0,07	-2,69	
34,16	6	-14	0,32	-2,77	
38,69	5	-15	0,01	-3,07	
43,22	5	-16	-0,06	-3,30	
47,75	4	-18	-0,45	-3,84	
52,28	7	-16	0,40	-3,15	
56,81	4	-15	-0,22	-3,15	
63,68	10	-18	0,93	-3,38	
68,14	6	-18	0,01	-3,69	
72,63	6	-19	-0,06	-3,92	
74,94	8	-20	0,32	-3,99	
81,73	6	-18	0,01	-3,69	
88,53	7	-20	0,09	-4,07	
93,06	11	-18	1,16	-3,31	
99,85	5	-20	-0,37	-4,22	
106,6	6	-22	-0,29	-4,61	
111,2	5	-21	-0,44	-4,45	
118	7	-22	-0,06	-4,53	
124,8	7	-20	0,09	-4,07	
129,3	6	-20	-0,14	-4,15	
136,1	6	-20	-0,14	-4,15	
142,9	9	-18	0,70	-3,46	
152	7	-19	0,17	-3,84	
158,7	8	-20	0,32	-3,99	
165,5	6	-21	-0,21	-4,38	
170,1	6	-22	-0,29	-4,61	
176,9	7	-23	-0,14	-4,76	
185,9	8	-26	-0,13	-5,37	
190,5	8	-26	-0,13	-5,37	
195	11	-27	0,48	-5,38	
199,5	8	-27	-0,21	-5,60	
206,3	9	-28	-0,06	-5,76	
210,8	8	-28	-0,29	-5,83	
215,4	8	-33	-0,66	-6,98	
219,9	10	-29	0,10	-5,91	
224,4	9	-33	-0,43	-6,91	

ENSAIO 2 - EXTENSÔMETROS 3 E 4
CÁLCULO DAS TENSÕES

E4

E3

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
229	9	-36	-0,66	-7,60	E(GPa) = 205
235,8	8	-39	-1,12	-8,36	
240,3	12	-40	-0,28	-8,29	G(GPa) = 78,85
247,1	10	-43	-0,96	-9,13	
251,6	10	-45	-1,12	-9,59	
260,7	10	-48	-1,34	-10,28	
267,5	11	-50	-1,27	-10,67	
276,5	11	-53	-1,49	-11,36	
281,1	11	-55	-1,64	-11,82	
287,9	12	-58	-1,64	-12,43	
290,1	13	-60	-1,56	-12,82	
294,7	12	-62	-1,95	-13,35	
301,5	14	-64	-1,64	-13,66	
0	2	-27	-1,59	-6,06	

ENSAIO 2 - EXTENSÔMETROS 5 E 6
CÁLCULO DAS TENSÕES

E5

E6

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0,00	0,00	
0	13	2	3,14	1,45	E(GPa) = 205
6,979	106	35	27,04	16,10	
11,51	131	89	36,89	30,42	G(GPa) = 78,85
20,77	158	147	47,51	45,81	
29,63	177	188	54,99	56,69	
34,16	190	218	60,26	64,58	
38,69	199	238	63,85	69,86	
43,22	208	259	67,51	75,37	
47,75	222	284	72,63	82,19	
52,28	228	303	75,45	87,02	
56,81	239	325	79,66	92,91	
63,68	251	347	84,09	98,88	
68,14	264	380	89,58	107,46	
72,63	289	409	97,54	116,03	
74,94	285	425	97,83	119,41	
81,73	299	456	103,40	127,60	
88,53	314	488	109,28	136,10	
93,06	330	524	115,70	145,60	
99,85	347	564	122,65	156,09	
106,6	368	612	131,12	168,73	
111,2	382	643	136,70	176,92	
118	407	696	146,47	191,02	
124,8	430	754	156,16	206,10	
129,3	455	810	166,17	220,89	
136,1	475	864	174,87	234,83	
142,9	501	917	184,87	248,99	
152	538	991	199,00	268,83	
158,7	584	1073	215,81	291,18	
165,5	625	1139	230,25	309,48	
170,1	649	1175	238,51	319,58	
176,9	697	1238	254,33	337,72	
185,9	763	1321	275,82	361,82	
190,5	790	1373	285,98	375,84	
195	821	1436	297,89	392,68	
199,5	861	1490	311,19	408,14	
206,3	933	1558	332,92	429,25	
210,8	988	1606	349,22	444,47	
215,4	989	1677	354,84	460,88	
219,9	1024	1731	366,99	475,96	
224,4	1085	1834	388,84	504,29	

ENSAIO 2 - EXTENSÔMETROS 5 E 6
CÁLCULO DAS TENSÕES

E5

E6

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
229	1161	1899	411,26	525,01	E(GPa) = 205
235,8	1253	2053	444,11	567,42	
240,3	1298	2119	459,48	586,02	G(GPa) = 78,85
247,1	1343	2185	474,84	604,62	
251,6	1401	2269	494,56	628,35	
260,7	1483	2379	521,78	659,88	
267,5	1598	2522	559,09	701,51	
276,5	1674	2642	585,68	734,89	
281,1	1761	2789	616,86	775,31	
287,9	1891	2996	662,48	832,80	
290,1	1958	3167	690,87	877,22	
294,7	1998	3260	707,14	901,65	
301,5	2040	3364	724,69	928,77	
0	1349	1988	461,26	559,76	

ENSAIO 2 - EXTENSÔMETROS 7 E 8
CÁLCULO DAS TENSÕES

E7

E8

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0,00	0,00	E(GPa) = 205
0	11	-5	2,15	-0,32	
6,979	99	-43	19,51	-2,38	G(GPa) = 78,85
11,51	154	-39	32,47	2,72	
20,77	210	-21	46,72	11,11	
29,63	245	5	56,74	19,75	
34,16	268	31	64,01	27,48	
38,69	285	51	69,44	33,37	
43,22	303	73	75,25	39,80	
47,75	322	99	81,59	47,22	
52,28	338	120	86,87	53,27	
56,81	357	144	93,06	60,23	
63,68	376	166	99,10	66,73	
68,14	403	200	107,89	76,61	
72,63	426	229	115,39	85,02	
74,94	439	246	119,67	89,92	
81,73	463	274	127,32	98,18	
88,53	490	305	135,88	107,37	
93,06	518	338	144,83	117,08	
99,85	549	371	154,46	127,03	
106,6	571	413	162,71	138,36	
111,2	585	437	167,76	144,94	
118	613	441	174,50	147,99	
124,8	646	473	184,52	157,86	
129,3	708	495	200,46	167,63	
136,1	749	525	212,17	177,64	
142,9	800	545	225,42	186,11	
152	880	534	242,99	189,66	
158,7	930	503	252,14	186,32	
165,5	917	509	249,60	186,71	
170,1	935	506	253,51	187,39	
176,9	957	492	257,51	185,84	
185,9	971	462	258,46	180,00	
190,5	999	467	265,28	183,28	
195	1011	455	267,13	181,43	
199,5	1023	441	268,82	179,12	
206,3	1034	433	270,75	178,11	
210,8	1045	422	272,44	176,42	
215,4	1060	409	274,91	174,56	
219,9	1071	400	276,75	173,33	
224,4	1090	387	280,14	171,78	

ENSAIO 2 - EXTENSÔMETROS 7 E 8
CÁLCULO DAS TENSÕES

E7

E8

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
229	1103	372	281,99	169,32	E(GPa) = 205
235,8	1117	356	284,00	166,70	
240,3	1131	352	286,91	166,84	G(GPa) = 78,85
247,1	1149	344	290,45	166,37	
251,6	1168	323	293,22	162,98	
260,7	1194	312	298,37	162,42	
267,5	1221	289	302,83	159,18	
276,5	1244	278	307,29	158,40	
281,1	1257	265	309,29	156,39	
287,9	1275	247	312,07	153,62	
290,1	1280	235	312,31	151,24	
294,7	1290	264	316,81	158,67	
301,5	1295	230	315,38	151,23	
0	51	-664	-38,68	-148,88	

ENSAIO 3

ENSAIO 3 - EXTENSÔMETROS 3 E 4
CÁLCULO DAS TENSÕES

E3

E4

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0,00	0,00	E(GPa) = 205
0	1	1	0,31	0,31	
9,245	21	25	6,73	7,35	G(GPa) = 78,85
20,57	45	71	15,74	19,75	
34,16	72	133	26,66	36,06	
40,96	84	164	31,77	44,11	
50,02	101	209	39,10	55,75	
61,34	127	275	50,09	72,91	
72,67	152	342	60,93	90,22	
79,47	175	404	70,93	106,23	
90,79	208	489	84,97	128,29	
102,1	239	570	98,26	149,27	
111,2	270	656	111,92	171,41	
120,2	292	714	121,38	186,43	
131,6	342	827	141,46	216,22	
140,6	383	905	156,82	237,27	
152	441	1001	177,45	263,76	
156,5	465	1052	186,84	277,32	
163,3	509	1117	201,90	295,61	
170,1	550	1169	215,28	310,69	
176,9	609	1224	233,03	327,82	
181,4	636	1268	242,58	339,99	
185,9	634	1340	247,58	356,40	
190,5	670	1394	259,96	371,56	
195	702	1439	270,74	384,34	
199,5	751	1513	287,63	405,08	
204,1	1144	1527	379,11	438,14	
210,8	1231	1578	402,99	456,48	
217,6	1588	1658	491,19	501,98	
224,4	1919	1744	573,87	546,90	
229	2116	1808	624,05	576,58	
235,8	2315	1861	673,85	603,88	
240,3	2528	1955	729,99	641,67	
247,1	2628	2043	759,68	669,51	
253,9	2849	2143	818,11	709,29	
260,7	3052	2266	874,15	753,00	
265,2	3203	2364	916,33	787,01	
272	3419	2467	973,84	827,10	
281,1	3619	2700	1037,54	895,89	
287,9	3847	2897	1104,95	958,52	
294,7	4056	3041	1163,96	1007,51	

ENSAIO 3 - EXTENSÔMETROS 3 E 4
CÁLCULO DAS TENSÕES

E3

E4

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
301,5	4213	3223	1213,89	1061,30	E(GPa) = 205
306	4432	3361	1274,75	1109,67	
0	3693	2020	1002,94	745,07	
					G(GPa) = 78,85

ENSAIO 3 - EXTENSÔMETROS 5 E 6

CÁLCULO DAS TENSÕES

E5

E6

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0,00	0,00	
0	2	1	0,54	0,38	E(GPa) = 205
9,245	27	21	7,81	6,88	
20,57	70	69	21,34	21,19	
34,16	119	128	37,09	38,48	G(GPa) = 78,85
40,96	160	145	47,82	45,50	
50,02	222	183	64,96	58,95	
61,34	302	253	88,68	81,13	
72,67	363	310	107,04	98,87	
79,47	416	361	123,11	114,63	
90,79	488	428	144,76	135,51	
102,1	554	489	164,57	154,55	
111,2	630	555	187,07	175,51	
120,2	680	603	202,21	190,35	
131,6	764	635	223,97	204,08	
140,6	817	638	236,39	208,80	
152	867	672	250,47	220,42	
156,5	890	682	256,52	224,46	
163,3	911	695	262,34	229,05	
170,1	915	701	263,72	230,73	
176,9	935	697	268,01	231,33	
181,4	950	693	271,16	231,55	
185,9	967	685	274,46	231,00	
190,5	977	674	275,93	229,23	
195	983	664	276,55	227,38	
199,5	1002	662	280,77	228,36	
204,1	1009	641	280,79	224,06	
210,8	1032	638	285,85	225,12	
217,6	1065	614	291,62	222,10	
224,4	1109	572	298,55	215,78	
229	1135	565	304,00	216,15	
235,8	1149	559	306,77	215,83	
240,3	1172	553	311,60	216,19	
247,1	1204	546	318,43	217,01	
253,9	1239	547	326,56	219,90	
260,7	1273	546	334,31	222,25	
265,2	1293	545	338,83	223,54	
272	1323	548	345,96	226,51	
281,1	1361	553	355,08	230,54	
287,9	1360	523	352,58	223,57	
294,7	1380	538	358,32	228,53	

ENSAIO 3 - EXTENSÔMETROS 5 E 6**CÁLCULO DAS TENSÕES**

E5

E6

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
301,5	1395	541	361,99	230,36	E(GPa) = 205
306	1401	540	363,30	230,59	
0	118	-607	-18,94	-130,68	G(GPa) = 78,85

ENSAIO 3 - EXTENSÔMETROS 10 E 11

CÁLCULO DAS TENSÕES

E11

E10

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0,00	0,00	E(GPa) = 205
0	1	1	0,31	0,31	
9,245	2	4	0,76	1,07	G(GPa) = 78,85
20,57	-12	10	-2,00	1,39	
34,16	-43	14	-8,83	-0,04	G(GPa) = 78,85
40,96	-62	17	-12,97	-0,80	
50,02	-94	19	-20,18	-2,77	G(GPa) = 78,85
61,34	-149	25	-32,38	-5,56	
72,67	-207	27	-45,57	-9,50	G(GPa) = 78,85
79,47	-252	29	-55,77	-12,46	
90,79	-317	33	-70,42	-16,47	G(GPa) = 78,85
102,1	-367	35	-81,77	-19,81	
111,2	-423	38	-94,43	-23,37	G(GPa) = 78,85
120,2	-458	41	-102,25	-25,34	
131,6	-527	44	-117,90	-29,89	G(GPa) = 78,85
140,6	-575	47	-128,71	-32,84	
152	-632	49	-141,67	-36,71	G(GPa) = 78,85
156,5	-665	52	-149,04	-38,52	
163,3	-709	55	-158,93	-41,17	G(GPa) = 78,85
170,1	-748	57	-167,75	-43,67	
176,9	-787	59	-176,57	-46,17	G(GPa) = 78,85
181,4	-825	61	-185,16	-48,60	
185,9	-875	64	-196,44	-51,70	G(GPa) = 78,85
190,5	-918	68	-206,03	-54,05	
195	-948	75	-212,40	-54,72	G(GPa) = 78,85
199,5	-999	77	-223,98	-58,13	
204,1	-1045	80	-234,33	-60,93	G(GPa) = 78,85
210,8	-1086	86	-243,31	-62,66	
217,6	-1146	96	-256,35	-64,92	G(GPa) = 78,85
224,4	-1188	102	-265,56	-66,72	
229	-1226	111	-273,62	-67,54	G(GPa) = 78,85
235,8	-1259	116	-280,83	-68,89	
240,3	-1294	123	-288,35	-69,94	G(GPa) = 78,85
247,1	-1326	131	-295,10	-70,53	
253,9	-1360	142	-302,09	-70,58	G(GPa) = 78,85
260,7	-1391	142	-309,22	-72,93	
265,2	-1409	147	-312,98	-73,15	G(GPa) = 78,85
272	-1431	154	-317,51	-73,21	
281,1	-1460	168	-323,12	-72,19	G(GPa) = 78,85
287,9	-1478	176	-326,66	-71,72	
294,7	-1492	184	-329,27	-70,94	G(GPa) = 78,85

ENSAIO 3 - EXTENSÔMETROS 10 E 11
CÁLCULO DAS TENSÕES

E11

E10

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
301,5	-1506	191	-331,96	-70,39	E(GPa) = 205
306	-1519	201	-334,19	-69,08	
0	-722	91	-159,19	-33,88	
					G(GPa) = 78,85

ENSAIO 3 - EXTENSÔMETROS 12 E 13

CÁLCULO DAS TENSÕES

E13

E12

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon_x(\mu)$	$\epsilon_y(\mu)$	$\sigma_x(\text{MPa})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0,00	0,00	
0	2	1	0,54	0,38	E(GPa) = 205
9,245	11	0	2,53	0,84	
20,57	16	-6	3,23	-0,17	
34,16	20	-11	3,77	-1,01	G(GPa) = 78,85
40,96	23	-14	4,23	-1,47	
50,02	25	-19	4,31	-2,47	
61,34	27	-22	4,54	-3,01	
72,67	29	-26	4,70	-3,78	
79,47	27	-29	4,01	-4,62	
90,79	26	-31	3,63	-5,16	
102,1	29	-29	4,47	-4,47	
111,2	27	-29	4,01	-4,62	
120,2	29	-26	4,70	-3,78	
131,6	24	-25	3,62	-3,93	
140,6	28	-18	5,07	-2,02	
152	25	-11	4,92	-0,63	
156,5	29	-7	6,14	0,59	
163,3	29	-3	6,44	1,51	
170,1	30	4	7,21	3,20	
176,9	33	12	8,50	5,27	
181,4	32	16	8,58	6,11	
185,9	31	21	8,73	7,18	
190,5	30	26	8,88	8,26	
195	33	36	10,32	10,79	
199,5	34	37	10,63	11,09	
204,1	37	46	12,00	13,39	
210,8	40	49	12,92	14,31	
217,6	42	57	13,99	16,30	
224,4	53	69	17,43	19,90	
229	55	74	18,27	21,20	
235,8	58	76	19,11	21,89	
240,3	60	79	19,80	22,73	
247,1	68	81	21,79	23,80	
253,9	73	91	23,70	26,48	
260,7	82	95	26,08	28,08	
265,2	88	100	27,84	29,69	
272	95	104	29,75	31,14	
281,1	105	109	32,43	33,05	
287,9	112	112	34,27	34,27	
294,7	122	116	36,87	35,95	

ENSAIO 3 - EXTENSÔMETROS 12 E 13
CÁLCULO DAS TENSÕES

E13

E12

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
301,5	132	123	39,70	38,32	E(GPa) = 205
306	141	122	41,70	38,77	
0	66	475	51,24	114,29	G(GPa) = 78,85

ENSAIO 4

ENSAIO 4 - EXTENSÔMETROS 3 E 4
CÁLCULO DAS TENSÕES

E4

E3

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0,00	0,00	E(GPa) = 205
0	-3	-6	-1,15	-1,61	
13,77	-13	-42	-6,18	-10,65	G(GPa) = 78,85
27,37	-23	-104	-13,19	-25,67	
36,43	-28	-146	-17,53	-35,71	
45,49	-40	-183	-23,09	-45,14	
54,55	-50	-240	-29,72	-59,01	
65,87	-59	-298	-36,20	-73,03	
74,94	-67	-340	-41,23	-83,30	
84	-75	-399	-47,55	-97,48	
95,32	-84	-455	-53,87	-111,05	
104,4	-87	-507	-58,50	-123,24	
108,9	-90	-536	-61,40	-130,14	
115,7	-94	-565	-64,52	-137,12	
122,5	-100	-607	-69,09	-147,23	
129,3	-105	-650	-73,50	-157,51	
136,1	-110	-688	-77,54	-166,63	
142,9	-111	-726	-80,65	-175,45	
147,4	-114	-762	-84,08	-183,95	
154,2	-113	-817	-88,02	-196,53	
161	-118	-860	-92,44	-206,80	
167,8	-117	-900	-95,24	-215,93	
174,6	-124	-956	-101,10	-229,34	
181,4	-126	-1003	-105,13	-240,31	
190,5	-136	-1062	-111,91	-254,64	
195	-141	-1093	-115,42	-262,15	
199,5	-144	-1229	-126,43	-293,67	
206,3	-148	-1171	-122,95	-280,63	
210,8	-151	-1208	-126,45	-289,37	
217,6	-155	-1257	-131,09	-300,94	
226,7	-162	-1324	-137,78	-316,89	
231,2	-165	-1351	-140,52	-323,33	
242,6	-171	-1426	-147,60	-341,04	
249,4	-177	-1486	-153,53	-355,30	
256,2	-180	-1555	-159,46	-371,40	
262,9	-184	-1609	-164,48	-384,12	
272	-188	-1677	-170,56	-400,07	
281,1	-192	-1756	-177,48	-418,55	
287,9	-195	-1812	-182,42	-431,66	
294,7	-198	-1889	-188,96	-449,60	
301,5	-200	-1960	-194,81	-466,09	

ENSAIO 4 - EXTENSÔMETROS 3 E 4
CÁLCULO DAS TENSÕES

E4

E3

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
308,3	-202	-2010	-199,06	-477,74	E(GPa) = 205
315	-204	-2094	-205,90	-497,22	
321,8	-206	-2154	-210,92	-511,17	G(GPa) = 78,85
328,6	-208	-2235	-217,53	-529,96	
335,4	-209	-2306	-223,15	-546,37	
340	-209	-2375	-228,38	-562,24	
344,5	-211	-2424	-232,56	-573,67	
349	-212	-2492	-237,96	-589,39	
358,1	-212	-2597	-245,93	-613,54	
364,9	-213	-2680	-252,46	-632,71	
371,7	-213	-2782	-260,20	-656,18	
378,5	-214	-2890	-268,63	-681,10	
0	41	-984	-65,27	-223,26	

ENSAIO 4 - EXTENSÔMETROS 5 E 6
CÁLCULO DAS TENSÕES

E6

E5

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0,00	0,00	
0	-11	-4	-2,83	-1,76	E(GPa) = 205
13,77	-43	-30	-12,17	-10,17	
27,37	-77	-75	-23,41	-23,10	
36,43	-101	-104	-31,13	-31,59	G(GPa) = 78,85
45,49	-126	-131	-38,93	-39,70	
54,55	-155	-171	-48,64	-51,11	
65,87	-182	-207	-57,58	-61,44	
74,94	-203	-240	-64,92	-70,62	
84	-230	-279	-74,09	-81,65	
95,32	-257	-318	-83,27	-92,67	
104,4	-271	-353	-89,14	-101,78	
108,9	-286	-373	-94,11	-107,52	
115,7	-297	-394	-98,24	-113,19	
122,5	-319	-422	-105,42	-121,30	
129,3	-338	-452	-112,07	-129,64	
136,1	-354	-478	-117,73	-136,84	
142,9	-368	-504	-122,92	-143,88	
147,4	-378	-526	-126,89	-149,70	
154,2	-403	-563	-135,45	-160,11	
161	-425	-594	-142,87	-168,92	
167,8	-441	-620	-148,52	-176,11	
174,6	-468	-661	-157,85	-187,59	
181,4	-492	-694	-165,87	-197,01	
190,5	-521	-736	-175,73	-208,87	
195	-537	-756	-180,93	-214,69	
199,5	-553	-782	-186,59	-221,88	
206,3	-575	-814	-194,08	-230,92	
210,8	-591	-839	-199,66	-237,88	
217,6	-615	-875	-207,91	-247,99	
226,7	-644	-923	-218,23	-261,23	
231,2	-658	-944	-223,04	-267,12	
242,6	-694	-998	-235,42	-282,28	
249,4	-723	-1043	-245,51	-294,83	
256,2	-753	-1093	-256,21	-308,61	
262,9	-778	-1137	-265,30	-320,63	
272	-810	-1189	-276,61	-335,03	
281,1	-847	-1252	-289,90	-352,33	
287,9	-872	-1295	-298,92	-364,12	
294,7	-908	-1358	-311,98	-381,34	
301,5	-940	-1418	-323,90	-397,58	

ENSAIO 4 - EXTENSÔMETROS 5 E 6
CÁLCULO DAS TENSÕES

E6

E5

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
308,3	-962	-1457	-331,92	-408,22	E(GPa) = 205
315	-1002	-1528	-346,51	-427,59	
321,8	-1030	-1578	-356,75	-441,22	G(GPa) = 78,85
328,6	-1068	-1646	-370,66	-459,75	
335,4	-1100	-1708	-382,72	-476,44	
340	-1128	-1765	-393,49	-491,68	
344,5	-1149	-1807	-401,51	-502,93	
349	-1178	-1865	-412,59	-518,48	
358,1	-1224	-1953	-429,85	-542,22	
364,9	-1257	-2023	-442,76	-560,82	
371,7	-1300	-2108	-459,10	-583,64	
378,5	-1340	-2199	-475,21	-607,62	
0	-362	-884	-150,39	-230,85	

ENSAIO 4 - EXTENSÔMETROS 7 E 8
CÁLCULO DAS TENSÕES

E8

E7

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0,00	0,00	E(GPa) = 205
0	-9	-1	-2,15	-0,91	
13,77	-29	-14	-7,73	-5,42	G(GPa) = 78,85
27,37	-54	-42	-15,61	-13,76	
36,43	-70	-60	-20,66	-19,12	
45,49	-86	-79	-25,78	-24,70	
54,55	-105	-104	-32,05	-31,90	
65,87	-124	-128	-38,24	-38,86	
74,94	-140	-146	-43,29	-44,22	
84	-159	-171	-49,56	-51,41	
95,32	-177	-195	-55,52	-58,30	
104,4	-189	-217	-59,95	-64,27	
108,9	-198	-229	-62,94	-67,71	
115,7	-208	-241	-66,15	-71,23	
122,5	-225	-260	-71,50	-76,90	
129,3	-238	-279	-75,93	-82,25	
136,1	-250	-294	-79,83	-86,61	
142,9	-262	-309	-83,73	-90,98	
147,4	-270	-325	-86,79	-95,26	
154,2	-289	-349	-92,98	-102,23	
161	-306	-370	-98,49	-108,35	
167,8	-321	-388	-103,30	-113,63	
174,6	-343	-414	-110,34	-121,28	
181,4	-361	-437	-116,22	-127,94	
190,5	-384	-464	-123,57	-135,90	
195	-396	-479	-127,47	-140,26	
199,5	-410	-497	-132,05	-145,46	
206,3	-427	-517	-137,48	-151,35	
210,8	-439	-536	-141,68	-156,64	
217,6	-458	-560	-147,88	-163,60	
226,7	-484	-594	-156,44	-173,40	
231,2	-496	-609	-160,34	-177,76	
242,6	-525	-648	-169,97	-188,93	
249,4	-549	-677	-177,70	-197,42	
256,2	-575	-715	-186,56	-208,14	
262,9	-596	-747	-193,82	-217,10	
272	-624	-787	-203,30	-228,42	
281,1	-656	-836	-214,38	-242,13	
287,9	-679	-870	-222,25	-251,69	
294,7	-709	-920	-232,95	-265,47	
301,5	-740	-967	-243,65	-278,64	

ENSAIO 4 - EXTENSÔMETROS 7 E 8
CÁLCULO DAS TENSÕES

E8

E7

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
308,3	-759	-998	-250,38	-287,21	E(GPa) = 205
315	-792	-1053	-262,14	-302,37	
321,8	-818	-1093	-271,16	-313,55	G(GPa) = 78,85
328,6	-853	-1148	-283,39	-328,86	
335,4	-882	-1197	-293,78	-342,33	
340	-907	-1242	-302,95	-354,58	
344,5	-928	-1276	-310,36	-364,00	
349	-956	-1324	-320,45	-377,17	
358,1	-997	-1397	-335,42	-397,07	
364,9	-1029	-1454	-347,11	-412,62	
371,7	-1070	-1529	-362,23	-432,98	
378,5	-1108	-1604	-376,67	-453,12	
0	-344	-815	-141,01	-213,61	

ENSAIO 5

ENSAIO 5 - EXTENSÔMETROS 1, 2 E 3
CÁLCULO DAS TENSÕES QUE PRODUZIRAM AS DEFORMAÇÕES NO ELEMENTO

Carga (kN)	E1	E3	E2	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	τ_{xy} (MPa)	$\psi = 0,33$
	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\epsilon^{OB}(\mu)$				
0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	
0	0	1	1	0,08	0,23	0,08	E(GPa) = 205
6,979	-2	-5	-3	-0,84	-1,30	0,08	
22,84	-5	-3	-3	-1,38	-1,07	0,16	
40,96	-45	-28	-36	-12,48	-9,86	0,08	G(GPa) = 78,85
54,55	-73	-58	-63	-21,20	-18,89	0,39	
70,4	-81	-56	-68	-22,89	-19,03	0,08	
84	-227	-198	-212	-67,25	-62,78	0,08	
97,59	-244	-212	-226	-72,23	-67,30	0,32	
106,6	-259	-235	-257	-77,42	-73,73	-1,58	
115,7	-283	-258	-262	-84,69	-80,84	1,34	
122,5	-292	-291	-274	-89,27	-89,11	2,76	
129,3	-308	-277	-289	-91,89	-87,11	0,55	
138,4	-317	-370	-311	-101,02	-109,19	5,13	
142,9	-327	-298	-309	-97,85	-93,38	0,55	
147,4	-334	-347	-312	-103,18	-105,18	4,49	
156,5	-352	-347	-352	-107,32	-106,55	-0,39	
161	-362	-385	-380	-112,51	-116,05	-1,03	
167,8	-370	-337	-352	-110,70	-105,62	0,24	
174,6	-382	-355	-363	-114,83	-110,67	0,87	
181,4	-394	-378	-379	-119,34	-116,87	1,10	
188,2	-407	-411	-393	-124,83	-125,45	2,52	
195	-422	-396	-407	-127,15	-123,14	0,32	
199,5	-429	-504	-417	-136,95	-148,52	7,81	
206,3	-443	-427	-431	-134,33	-131,86	0,63	
210,8	-445	-498	-436	-140,18	-148,35	5,60	
217,6	-465	-450	-458	-141,14	-138,83	-0,08	
224,4	-475	-460	-465	-144,20	-141,89	0,39	
231,2	-488	-497	-483	-150,00	-151,38	1,50	
235,8	-496	-556	-496	-156,32	-165,56	4,73	
240,58	-503	-503	-502	-153,90	-153,90	0,16	
247,1	-519	-525	-534	-159,25	-160,18	-1,89	
253,9	-529	-615	-541	-168,39	-181,64	4,89	
260,7	-547	-566	-556	-168,81	-171,74	0,08	
265,2	-556	-655	-572	-177,64	-192,89	5,28	
272	-571	-602	-588	-177,06	-181,84	-0,24	
278,8	-573	-612	-603	-178,28	-184,29	-1,66	
283,3	-587	-662	-608	-185,30	-196,86	2,60	
290,1	-602	-698	-625	-191,48	-206,28	3,94	
294,7	-606	-676	-637	-190,73	-201,52	0,63	
299,2	-612	-687	-651	-192,95	-204,51	-0,24	

ENSAIO 5 - EXTENSÔMETROS 1, 2 E 3
CÁLCULO DAS TENSÕES QUE PRODUZIRAM AS DEFORMAÇÕES NO ELEMENTO

E1

E3

E2

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon_x(\mu)$	$\epsilon_y(\mu)$	$\epsilon_{OB}(\mu)$	$\sigma_x(\text{MPa})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\tau_{xy}(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
306	-628	-714	-671	-198,68	-211,93	0,00	E(GPa) = 205
310,5	-637	-734	-682	-202,27	-217,22	0,55	
317,3	-647	-748	-697	-205,63	-221,20	0,08	
321,8	-661	-777	-718	-211,05	-228,93	0,16	G(GPa) = 78,85
326,4	-669	-797	-733	-214,41	-234,14	0,00	
333,2	-669	-810	-739	-215,40	-237,13	0,08	
340	-695	-881	-765	-226,77	-255,44	3,63	
344,5	-697	-873	-773	-226,62	-253,75	1,89	
353,6	-714	-899	-800	-232,51	-261,02	1,03	
360,4	-728	-926	-822	-237,78	-268,30	0,79	
367,1	-747	-984	-850	-246,55	-283,08	2,44	
376,2	-769	-1013	-883	-253,81	-291,42	1,26	
380,7	-783	-1081	-900	-262,20	-308,13	5,05	
392,1	-789	-1071	-918	-262,82	-306,29	1,89	
398,9	-803	-1102	-938	-268,39	-314,48	2,29	
401,1	-815	-1138	-960	-273,89	-323,67	2,60	
410,2	-826	-1197	-986	-280,90	-338,08	4,02	
414,7	-834	-1233	-1010	-285,47	-346,97	3,71	
420	-844	-1276	-1029	-291,04	-357,62	4,89	
0	-101	-716	-332	-77,59	-172,39	12,06	

ENSAIO 5 - EXTENSÔMETRO 4, 5 E 6
CÁLCULO DAS TENSÕES QUE PRODUZIRAM AS DEFORMAÇÕES NO ELEMENTO

E4

E6

E5

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon_x(\mu)$	$\epsilon_y(\mu)$	$\epsilon_{OB}(\mu)$	$\sigma_x(\text{MPa})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\tau_{xy}(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	
0	-3	0	-4	-0,69	-0,23	-0,39	E(GPa) = 205
6,979	-22	-11	-24	-5,90	-4,20	-1,18	
22,84	-53	-32	-36	-14,62	-11,39	1,03	
40,96	-94	-68	-83	-26,79	-22,78	-0,32	G(GPa) = 78,85
54,55	-118	-102	-116	-34,89	-32,42	-0,95	
70,4	-136	-116	-123	-40,09	-37,01	0,47	
84	-295	-269	-273	-88,29	-84,28	1,42	
97,59	-317	-297	-292	-95,47	-92,39	2,37	
106,6	-305	-318	-315	-94,31	-96,31	-0,55	
115,7	-332	-346	-336	-102,64	-104,80	0,47	
122,5	-338	-364	-355	-105,39	-109,40	-0,63	
129,3	-357	-393	-369	-111,96	-117,51	0,95	
138,4	-369	-402	-384	-115,41	-120,49	0,24	
142,9	-377	-434	-397	-119,68	-128,46	1,34	
147,4	-385	-432	-406	-121,37	-128,61	0,39	
156,5	-407	-458	-429	-128,40	-136,26	0,55	
161	-418	-495	-442	-133,74	-145,61	2,29	
167,8	-425	-477	-462	-133,99	-142,00	-1,73	
174,6	-441	-507	-473	-139,94	-150,12	0,16	
181,4	-456	-535	-461	-145,52	-157,70	5,44	
188,2	-471	-545	-509	-149,73	-161,14	-0,16	
195	-490	-572	-526	-156,15	-168,79	0,79	
199,5	-511	-581	-542	-161,66	-172,45	0,63	
206,3	-516	-611	-556	-165,09	-179,74	1,18	
210,8	-522	-623	-565	-167,38	-182,95	1,18	
217,6	-551	-634	-640	-174,89	-187,68	-7,49	
224,4	-559	-660	-615	-178,70	-194,27	-0,87	
231,2	-584	-677	-624	-185,75	-200,08	1,03	
235,8	-592	-730	-645	-191,61	-212,88	2,52	
240,58	-599	-737	-650	-193,75	-215,02	2,84	
247,1	-615	-751	-672	-198,50	-219,46	1,73	
253,9	-638	-761	-693	-204,55	-223,51	1,03	
260,7	-659	-788	-726	-211,43	-231,31	-0,39	
265,2	-686	-829	-732	-220,75	-242,79	4,02	
272	-691	-831	-751	-222,05	-243,63	1,58	
278,8	-695	-852	-765	-224,57	-248,77	1,34	
283,3	-716	-929	-796	-235,25	-268,08	4,18	
290,1	-730	-950	-809	-240,06	-273,97	4,89	
294,7	-744	-928	-825	-241,61	-269,97	1,73	
299,2	-754	-961	-841	-246,42	-278,32	2,60	

ENSAIO 5 - EXTENSÔMETRO 4, 5 E 6
CÁLCULO DAS TENSÕES QUE PRODUZIRAM AS DEFORMAÇÕES NO ELEMENTO

E4

E6

E5

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon_x(\mu)$	$\epsilon_y(\mu)$	$\epsilon_{OB}(\mu)$	$\sigma_x(\text{MPa})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\tau_{xy}(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
306	-780	-987	-867	-254,37	-286,28	2,60	E(GPa) = 205
310,5	-794	-1020	-883	-260,10	-294,93	3,78	
317,3	-815	-1052	-905	-267,36	-303,89	4,49	
321,8	-835	-1076	-936	-273,78	-310,93	3,08	G(GPa) = 78,85
326,4	-855	-1079	-954	-278,61	-313,14	2,05	
333,2	-859	-1105	-966	-281,50	-319,42	2,52	
340	-907	-1138	-998	-295,05	-330,66	3,86	
344,5	-916	-1163	-1012	-299,02	-337,09	4,34	
353,6	-932	-1197	-1069	-305,28	-346,13	-0,71	
360,4	-975	-1253	-1082	-319,43	-362,28	5,05	
367,1	-996	-1316	-1122	-329,04	-378,36	5,36	
376,2	-1032	-1368	-1162	-341,27	-393,06	5,99	
380,7	-1102	-1375	-1192	-357,90	-399,98	7,33	
392,1	-1105	-1441	-1221	-363,61	-415,39	8,20	
398,9	-1109	-1452	-1247	-365,36	-418,23	5,28	
401,1	-1137	-1504	-1279	-375,75	-432,32	6,54	
410,2	-1358	-1586	-1320	-432,82	-467,96	23,97	
414,7	-1398	-1610	-1354	-443,84	-476,52	23,66	
420	-1216	-1640	-1388	-404,25	-469,60	6,31	
0	-494	-797	-594	-174,15	-220,86	8,12	

ENSAIO 5 - EXTENSÔMETROS 7, 8 E 9
CÁLCULO DAS TENSÕES QUE PRODUZIRAM AS DEFORMAÇÕES NO ELEMENTO

	E7	E9	E8				Folha 1/2
Carga (kN)	$\epsilon_x(\mu)$	$\epsilon_y(\mu)$	$\epsilon_{OB}(\mu)$	$\sigma_x(\text{MPa})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\tau_{xy}(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	E(GPa) = 205
0	-2	-4	-3	-0,76	-1,07	0,00	
6,979	-28	-16	-22	-7,66	-5,81	0,00	G(GPa) = 78,85
22,84	-59	-26	-38	-15,55	-10,46	0,71	
40,96	-119	-101	-100	-35,04	-32,27	1,58	
54,55	-159	-154	-146	-48,27	-47,50	1,66	
70,4	-164	-205	-187	-53,29	-59,61	-0,39	
84	-314	-362	-335	-99,72	-107,12	0,47	
97,59	-339	-401	-362	-108,43	-117,99	1,26	
106,6	-357	-434	-387	-115,08	-126,95	1,34	
115,7	-381	-477	-418	-123,86	-138,66	1,73	
122,5	-395	-501	-444	-128,91	-145,24	0,63	
129,3	-413	-535	-465	-135,63	-154,43	1,42	
138,4	-425	-555	-481	-139,91	-159,94	1,42	
142,9	-438	-577	-498	-144,57	-165,99	1,50	
147,4	-444	-590	-509	-146,93	-169,44	1,26	
156,5	-473	-625	-540	-156,26	-179,69	1,42	
161	-482	-646	-558	-159,93	-185,21	0,95	
167,8	-500	-665	-576	-165,51	-190,94	1,03	
174,6	-513	-692	-596	-170,55	-198,14	1,03	
181,4	-536	-731	-624	-178,80	-208,86	1,50	
188,2	-558	-758	-654	-185,91	-216,74	0,63	
195	-581	-790	-680	-193,64	-225,85	0,87	
199,5	-595	-806	-697	-198,07	-230,59	0,55	
206,3	-619	-835	-721	-205,79	-239,09	0,95	
210,8	-624	-847	-731	-207,85	-242,23	0,71	
217,6	-633	-885	-762	-212,81	-251,65	-0,47	
224,4	-669	-916	-785	-223,45	-261,52	1,18	
231,2	-692	-942	-811	-230,71	-269,24	0,95	
235,8	-710	-971	-837	-237,05	-277,28	0,55	
240,58	-723	-989	-853	-241,41	-282,41	0,47	
247,1	-753	-1019	-880	-250,59	-291,59	0,95	
253,9	-772	-1050	-906	-257,31	-300,16	0,79	
260,7	-807	-1094	-944	-268,71	-312,94	1,03	
265,2	-832	-1125	-966	-276,81	-321,97	1,97	
272	-846	-1152	-991	-282,08	-329,25	1,26	
278,8	-862	-1177	-1006	-287,66	-336,21	2,13	
283,3	-887	-1209	-1036	-295,84	-345,47	1,89	
290,1	-923	-1243	-1070	-306,70	-356,03	2,05	
294,7	-938	-1272	-1095	-312,36	-363,84	1,58	
299,2	-952	-1299	-1117	-317,63	-371,11	1,34	

ENSAIO 5 - EXTENSÔMETROS 7, 8 E 9
CÁLCULO DAS TENSÕES QUE PRODUZIRAM AS DEFORMAÇÕES NO ELEMENTO

Carga (kN)	E7	E9	E8	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	τ_{xy} (MPa)	$\psi = 0,33$
	$\epsilon_x(\mu)$	$\epsilon_y(\mu)$	$\epsilon_{OB}(\mu)$				
306	-990	-1341	-1151	-329,56	-383,66	2,29	E(GPa) = 205
310,5	-1017	-1375	-1178	-338,35	-393,53	2,84	
317,3	-1028	-1405	-1204	-343,16	-401,27	1,97	
321,8	-1069	-1449	-1234	-355,93	-414,50	3,94	G(GPa) = 78,85
326,4	-1077	-1481	-1267	-360,20	-422,47	1,89	
333,2	-1114	-1505	-1288	-370,53	-430,80	3,39	
340	-1128	-1556	-1325	-377,63	-443,60	2,68	
344,5	-1151	-1585	-1350	-385,12	-452,01	2,84	
353,6	-1182	-1635	-1392	-396,05	-465,87	2,60	
360,4	-1226	-1696	-1441	-410,80	-483,24	3,15	
367,1	-1275	-1754	-1485	-426,48	-500,31	4,65	
376,2	-1313	-1817	-1536	-440,00	-517,69	4,57	
380,7	-1338	-1865	-1571	-449,40	-530,63	4,81	
392,1	-1374	-1911	-1602	-461,17	-543,94	6,39	
398,9	-1410	-1956	-1639	-472,87	-557,03	6,94	
401,1	-1443	-2013	-1676	-484,79	-572,64	8,20	
410,2	-1483	-2074	-1717	-498,62	-589,71	9,70	
414,7	-1511	-2132	-1760	-509,47	-605,18	9,70	
420	-1545	-2186	-1795	-521,39	-620,19	11,12	
0	-593	-18	-652	-137,79	-49,16	-54,64	

ENSAIO 5 - EXTENSÔMETROS 10, 11 E 12
CÁLCULO DAS TENSÕES QUE PRODUZIRAM AS DEFORMAÇÕES NO ELEMENTO

	E10	E12	E11				Folha 1/2
Carga (kN)	$\epsilon_x(\mu)$	$\epsilon_y(\mu)$	$\epsilon_{OB}(\mu)$	$\sigma_x(\text{MPa})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\tau_{xy}(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	E(GPa) = 205
0	4	3	7	1,15	0,99	0,55	
6,979	3	10	20	1,45	2,53	2,13	G(GPa) = 78,85
22,84	6	-20	-2	-0,14	-4,15	0,79	
40,96	-18	-99	-37	-11,66	-24,14	3,39	
54,55	-25	-216	-133	-22,15	-51,59	-1,97	
70,4	-26	-269	-156	-26,40	-63,86	-1,34	
84	-133	-417	-270	-62,25	-106,03	0,79	
97,59	-133	-495	-319	-68,18	-123,97	-0,79	
106,6	-137	-544	-347	-72,82	-135,55	-1,03	
115,7	-135	-603	-385	-76,84	-148,97	-2,52	
122,5	-135	-641	-403	-79,72	-157,71	-2,37	
129,3	-137	-677	-417	-82,91	-166,15	-1,58	
138,4	-137	-712	-441	-85,57	-174,20	-2,60	
142,9	-139	-719	-424	-86,56	-175,96	0,79	
147,4	-137	-757	-463	-88,99	-184,55	-2,52	
156,5	-141	-790	-485	-92,41	-192,45	-3,08	
161	-140	-830	-508	-95,22	-201,57	-3,63	
167,8	-139	-872	-533	-98,18	-211,16	-4,34	
174,6	-145	-895	-547	-101,30	-216,91	-4,26	
181,4	-146	-938	-568	-104,80	-226,87	-4,10	
188,2	-148	-983	-594	-108,67	-237,38	-4,49	
195	-151	-1028	-628	-112,78	-247,96	-6,07	
199,5	-150	-1056	-640	-114,68	-254,32	-5,83	
206,3	-157	-1081	-650	-118,18	-260,61	-4,89	
210,8	-156	-1101	-660	-119,47	-265,13	-4,97	
217,6	-160	-1151	-691	-124,19	-276,94	-5,60	
224,4	-160	-1195	-721	-127,53	-287,06	-6,86	
231,2	-165	-1229	-744	-131,26	-295,26	-7,41	
235,8	-164	-1265	-757	-133,76	-303,47	-6,70	
240,58	-163	-1301	-787	-136,27	-311,67	-8,67	
247,1	-158	-1330	-797	-137,32	-317,97	-8,36	
253,9	-171	-1370	-815	-143,35	-328,15	-7,02	
260,7	-177	-1432	-853	-149,43	-342,87	-7,65	
265,2	-178	-1466	-850	-152,24	-350,77	-4,42	
272	-179	-1519	-903	-156,50	-363,04	-8,52	
278,8	-175	-1548	-908	-157,78	-369,41	-7,33	
283,3	-172	-1583	-920	-159,75	-377,23	-6,70	
290,1	-182	-1633	-957	-165,84	-389,49	-7,81	
294,7	-173	-1674	-968	-166,88	-398,24	-7,02	
299,2	-181	-1704	-987	-171,00	-405,75	-7,02	

ENSAIO 5 - EXTENSÔMETROS 10, 11 E 12
CÁLCULO DAS TENSÕES QUE PRODUZIRAM AS DEFORMAÇÕES NO ELEMENTO

E10

E12

E11

Folha 2/2

Carga (kN)	$\epsilon_x(\mu)$	$\epsilon_y(\mu)$	$\epsilon_{OB}(\mu)$	$\sigma_x(\text{MPa})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\tau_{xy}(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
306	-182	-1766	-1027	-175,94	-420,09	-8,36	E(GPa) = 205
310,5	-185	-1802	-1036	-179,36	-428,60	-6,70	
317,3	-193	-1848	-1071	-184,70	-439,79	-7,96	
321,8	-191	-1910	-1098	-188,94	-453,90	-7,49	G(GPa) = 78,85
326,4	-183	-1958	-1138	-190,75	-464,34	-10,64	
333,2	-187	-1983	-1137	-193,56	-470,39	-8,20	
340	-193	-2052	-1184	-200,18	-486,72	-9,70	
344,5	-190	-2102	-1216	-203,29	-498,00	-11,04	
353,6	-188	-2171	-1246	-208,07	-513,72	-10,49	
360,4	-190	-2241	-1272	-213,84	-529,97	-8,91	
367,1	-192	-2321	-1327	-220,37	-548,53	-11,12	
376,2	-199	-2406	-1375	-228,44	-568,61	-11,43	
380,7	-200	-2461	-1391	-232,84	-581,34	-9,54	
392,1	-198	-2531	-1440	-237,70	-597,30	-11,91	
398,9	-201	-2576	-1455	-241,80	-607,88	-10,49	
401,1	-202	-2671	-1520	-249,25	-629,81	-13,17	
410,2	-206	-2748	-1551	-256,01	-647,82	-11,67	
414,7	-210	-2828	-1590	-263,01	-666,53	-11,20	
420	-209	-2902	-1638	-268,39	-683,48	-13,01	
0	-77	-1123	-583	-102,97	-264,19	2,68	

ENSAIO 5 - EXTENSÔMETROS 13, 14 E 15
CÁLCULO DAS TENSÕES QUE PRODUZIRAM AS DEFORMAÇÕES NO ELEMENTO

E13

E15

E14

Folha 1/2

Carga (kN)	$\epsilon^x(\mu)$	$\epsilon^y(\mu)$	$\epsilon^{OB}(\mu)$	$\sigma^x(\text{MPa})$	$\sigma^y(\text{MPa})$	$\tau^{xy}(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	
0	2	2	3	0,61	0,61	0,16	E(GPa) = 205
6,979	18	17	18	5,43	5,28	0,08	
22,84	11	13	10	3,52	3,83	-0,32	
40,96	60	126	86	23,37	33,54	-1,10	G(GPa) = 78,85
54,55	27	142	80	16,99	34,72	-0,71	
70,4	54	217	137	28,90	54,02	0,24	
84	-11	205	101	13,03	46,33	0,63	
97,59	-22	236	111	12,86	52,62	0,63	
106,6	-26	262	122	13,91	58,30	0,63	
115,7	-23	309	148	18,17	69,34	0,79	
122,5	-18	344	169	21,97	77,77	0,95	
129,3	-12	378	191	25,94	86,05	1,26	
138,4	-4	415	214	30,59	95,17	1,34	
142,9	19	457	249	39,07	106,58	1,73	
147,4	5	460	242	36,07	106,20	1,50	
156,5	23	512	280	44,16	119,53	1,97	
161	20	533	290	45,07	124,14	2,13	
167,8	20	559	304	47,04	130,12	2,29	
174,6	28	588	326	51,08	137,40	2,84	
181,4	36	633	354	56,34	148,36	3,08	
188,2	43	677	381	61,29	159,01	3,31	
195	41	706	397	63,03	165,53	3,71	
199,5	47	737	416	66,76	173,12	3,78	
206,3	61	776	445	72,95	183,15	4,18	
210,8	62	793	454	74,47	187,14	4,18	
217,6	67	839	484	79,11	198,10	4,89	
224,4	70	878	503	82,76	207,30	4,57	
231,2	77	912	527	86,95	215,65	5,13	
235,8	87	966	559	93,35	228,84	5,13	
240,58	82	982	566	93,42	232,14	5,36	
247,1	92	1024	593	98,90	242,56	5,52	
253,9	103	1073	625	105,15	254,67	5,83	
260,7	101	1121	646	108,34	265,56	5,52	
265,2	112	1170	676	114,59	277,66	5,52	
272	104	1201	689	115,10	284,19	5,76	
278,8	115	1246	718	121,05	295,38	5,91	
283,3	122	1282	738	125,39	304,19	5,68	
290,1	124	1336	769	129,95	316,76	6,15	
294,7	128	1374	788	133,76	325,81	5,83	
299,2	138	1421	818	139,63	337,38	6,07	

ENSAIO 5 - EXTENSÔMETROS 13, 14 E 15
CÁLCULO DAS TENSÕES QUE PRODUZIRAM AS DEFORMAÇÕES NO ELEMENTO

E13

E15

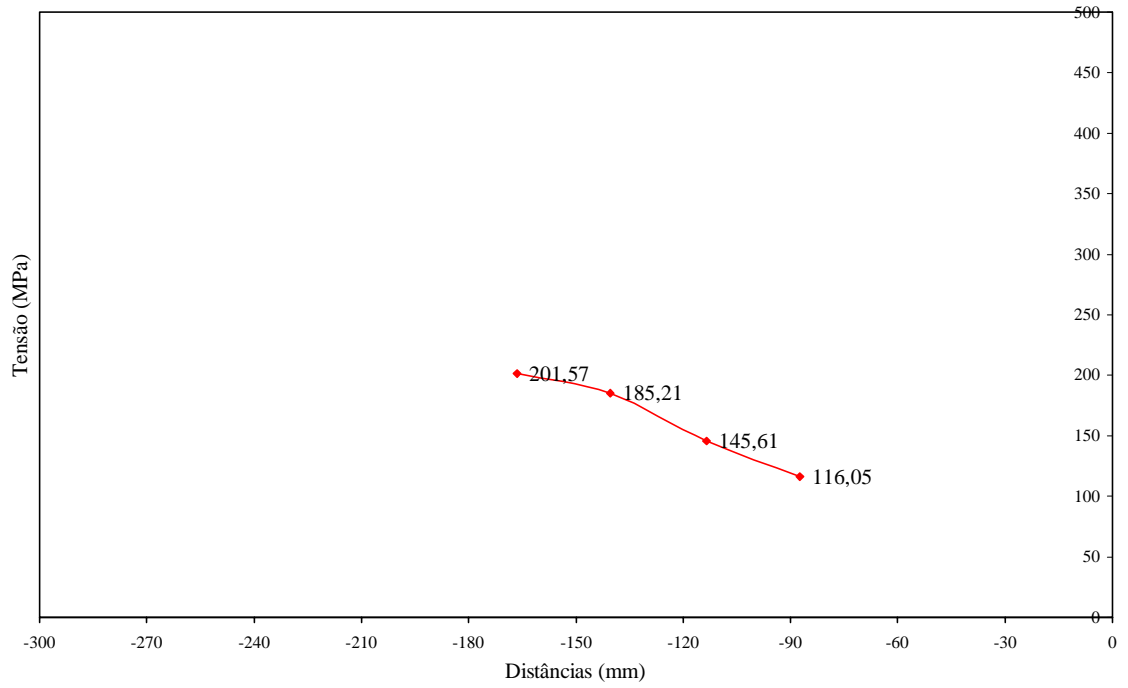
E14

Folha 2/2

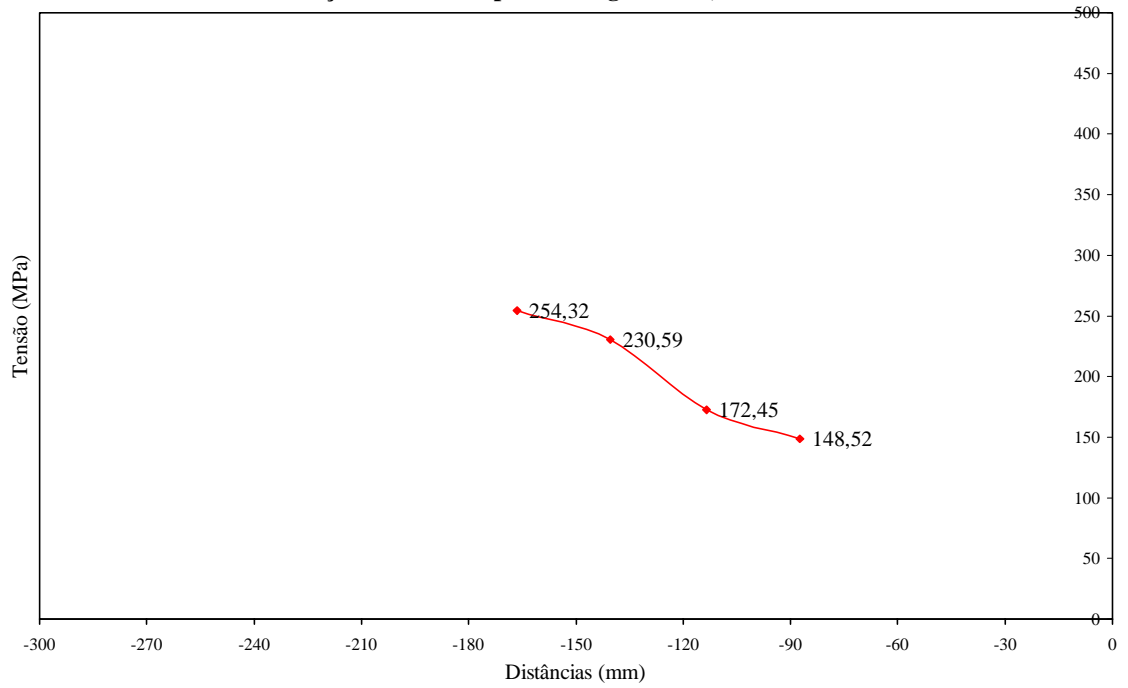
Carga (kN)	$\epsilon_x(\mu)$	$\epsilon_y(\mu)$	$\epsilon_{OB}(\mu)$	$\sigma_x(\text{MPa})$	$\sigma_y(\text{MPa})$	$\tau_{xy}(\text{MPa})$	$\psi = 0,33$
306	136	1474	847	143,19	349,42	6,62	$E(\text{GPa}) = 205$
310,5	138	1518	871	146,99	359,70	6,78	
317,3	140	1559	892	150,56	369,28	6,70	
321,8	141	1613	919	154,89	381,78	6,62	$G(\text{GPa}) = 78,85$
326,4	140	1664	946	158,53	393,44	6,94	
333,2	154	1711	979	165,32	405,31	7,33	
340	150	1768	1005	168,73	418,12	7,25	
344,5	148	1810	1029	171,46	427,63	7,89	
353,6	150	1886	1068	177,69	445,27	7,89	
360,4	162	1980	1122	187,59	467,80	8,04	
367,1	163	2060	1167	193,89	486,28	8,75	
376,2	163	2141	1207	200,04	504,92	8,67	
380,7	170	2211	1253	206,96	521,55	9,86	
392,1	164	2268	1272	209,91	534,21	8,83	
398,9	176	2337	1314	217,91	550,99	9,07	
401,1	164	2411	1344	220,77	567,11	8,91	
410,2	167	2505	1384	228,59	588,96	7,57	
414,7	168	2588	1437	235,12	608,13	9,30	
420	169	2667	1478	241,35	626,38	9,46	
0	-161	1066	466	43,89	233,01	2,13	

ANEXO III – Distribuição de Tensões no Ensaio 5.

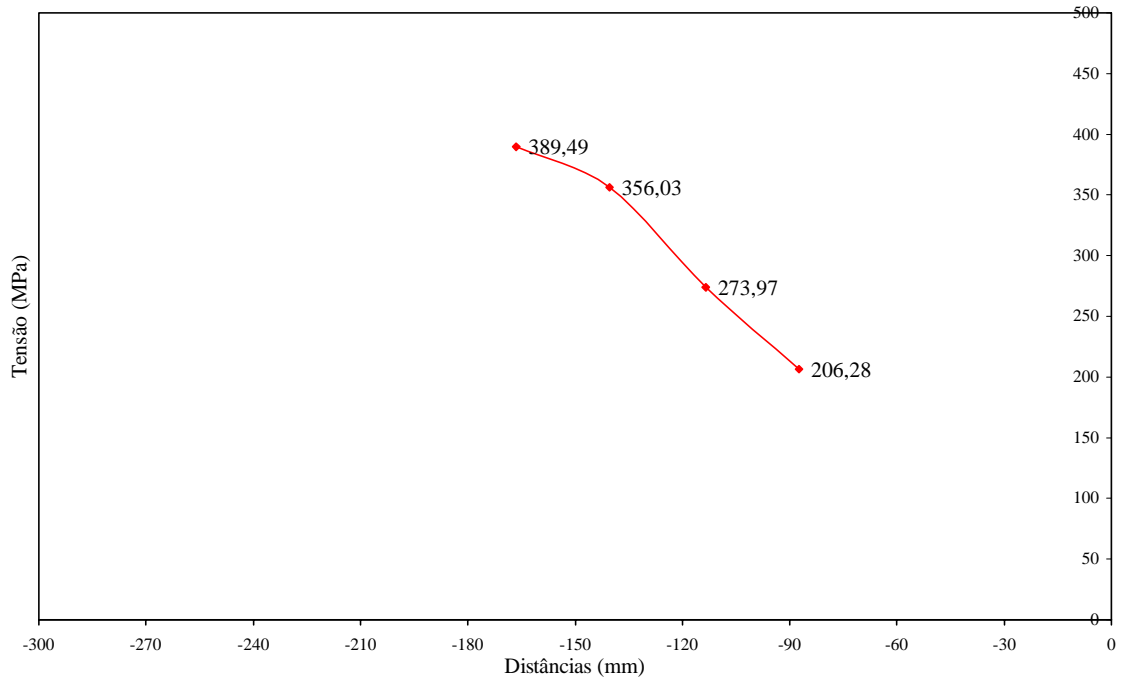
Distribuição de Tensões para a carga de 161 kN no Ensaio 5



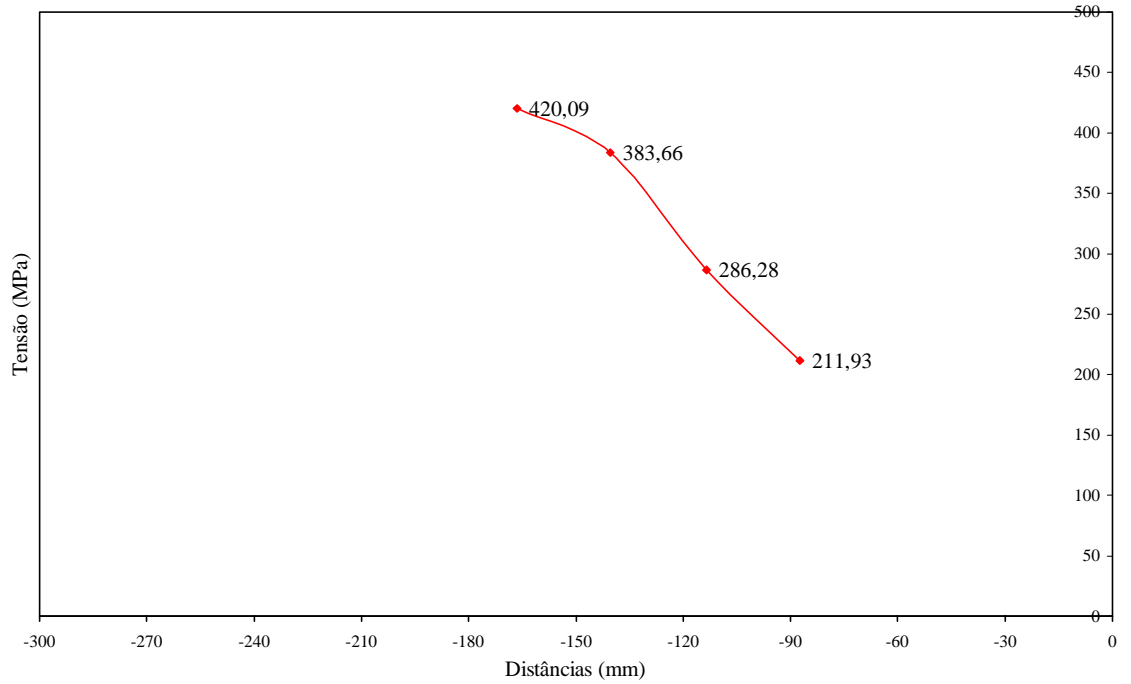
Distribuição de Tensões para a carga de 199,50 kN no Ensaio 5



Distribuição de Tensões para a carga de 290,10 kN no Ensaio 5



Distribuição de Tensões para a carga de 306 kN no Ensaio 5



ANEXO IV – Tabelas de comparação entre os resultados das análises teórica,
experimentais e as formulações propostas.

Analogia de viga em balanço com vão da viga = a_1

$t_p = 12,50$ mm

Ensaio 2 e 3

f_y (MPa)	L (mm)	L/ t_p	N (kN)	e (mm)	M (kN mm)	Vão da viga (mm)	p_1 (N/mm ²)	p_2 (N/mm ²)	$M_{engaste}$ (N mm)	t_p (mm)
308	300	24	86	168,3	14473,8	65,85	4,17	2,76	2.407.441,91	12,50
308	310	24,8	81,6	168,3	13733,28	70,85	3,62	2,35	2.484.809,75	12,50
308	320	25,6	78,1	168,3	13144,23	75,85	3,17	2,03	2.567.460,01	12,50
308	330	26,4	75,1	168,3	12639,33	80,85	2,80	1,77	2.648.076,00	12,50
308	340	27,2	72,5	168,3	12201,75	85,85	2,49	1,55	2.726.750,65	12,50
308	350	28	70,3	168,3	11831,49	90,85	2,23	1,37	2.806.584,78	12,50
308	360	28,8	68,4	168,3	11511,72	95,85	2,01	1,22	2.886.401,95	12,50
308	370	29,6	66,8	168,3	11242,44	100,85	1,82	1,09	2.968.504,11	12,50
308	380	30,4	65,3	168,3	10989,99	105,85	1,65	0,98	3.045.809,59	12,50
308	390	31,2	64,1	168,3	10788,03	110,85	1,51	0,89	3.128.967,14	12,50
308	400	32	63	168,3	10602,9	115,85	1,39	0,81	3.209.934,51	12,50

Analogia de viga em balanço com vão da viga = a_1

$t_p = 16,00$ mm

Ensaio 4 e 5

f_y (MPa)	L (mm)	L/ t_p	N (kN)	e (mm)	M (kN mm)	Vão da viga (mm)	p_1 (N/mm ²)	p_2 (N/mm ²)	$M_{engaste}$ (N mm)	t_p (mm)
435	300	18,75	199	168,3	33491,7	65,85	9,65	6,39	5.570.708,61	16,00
435	310	19,38	189	168,3	31808,7	70,85	8,37	5,44	5.755.257,89	16,00
435	320	20	180,7	168,3	30411,81	75,85	7,33	4,69	5.940.333,21	16,00
435	330	20,63	173,6	168,3	29216,88	80,85	6,47	4,08	6.121.251,59	16,00
435	340	21,25	167,8	168,3	28240,74	85,85	5,76	3,59	6.311.017,37	16,00
435	350	21,88	162,8	168,3	27399,24	90,85	5,16	3,17	6.499.459,49	16,00
435	360	22,5	158,4	168,3	26658,72	95,85	4,65	2,82	6.684.299,24	16,00
435	370	23,13	154,5	168,3	26002,35	100,85	4,21	2,53	6.865.776,71	16,00
435	380	23,75	151,3	168,3	25463,79	105,85	3,83	2,28	7.057.136,17	16,00
435	390	24,38	148,3	168,3	24958,89	110,85	3,50	2,06	7.239.092,45	16,00
435	400	25	145,7	168,3	24521,31	115,85	3,21	1,88	7.423.610,44	16,00

Viga em balanço com vão da viga = m

$t_p = 12,50$ mm

Ensaio 2 e 3

f_y (MPa)	L (mm)	L/ t_p	N (kN)	e (mm)	M (kN mm)	Vão da viga (mm)	p_1 (N/mm ²)	p_2 (N/mm ²)	$M_{engaste}$ (N mm)	t_p (mm)
308	300	24	56,4	168,3	9492,12	82,68	2,74	1,57	2.408.111,78	12,50
308	310	24,8	55	168,3	9256,5	87,68	2,44	1,38	2.484.594,23	12,50
308	320	25,6	53,9	168,3	9071,37	92,68	2,19	1,23	2.565.426,33	12,50
308	330	26,4	53	168,3	8919,9	97,68	1,98	1,09	2.648.116,43	12,50
308	340	27,2	52,2	168,3	8785,26	102,68	1,79	0,98	2.729.141,34	12,50
308	350	28	51,5	168,3	8667,45	107,68	1,63	0,89	2.809.454,22	12,50
308	360	28,8	50,85	168,3	8558,055	112,68	1,49	0,80	2.887.129,05	12,50
308	370	29,6	50,3	168,3	8465,49	117,68	1,37	0,73	2.965.660,59	12,50
308	380	30,4	49,9	168,3	8398,17	122,68	1,26	0,67	3.048.947,35	12,50
308	390	31,2	49,5	168,3	8330,85	127,68	1,17	0,62	3.128.632,72	12,50
308	400	32	49,15	168,3	8271,945	132,68	1,08	0,57	3.208.130,68	12,50

Viga em balanço com vão da viga = m

$t_p = 16,0$ mm

Ensaio 4 e 5

f_y (MPa)	L (mm)	L/ t_p	N (kN)	e (mm)	M (kN mm)	Vão da viga (mm)	p_1 (N/mm ²)	p_2 (N/mm ²)	$M_{engaste}$ (N mm)	t_p (mm)
435	300	18,75	130,4	168,3	21946,32	82,68	6,33	3,64	5.567.691,07	16,00
435	310	19,38	127,4	168,3	21441,42	87,68	5,64	3,20	5.755.223,73	16,00
435	320	20	124,8	168,3	21003,84	92,68	5,06	2,84	5.939.985,26	16,00
435	330	20,63	122,6	168,3	20633,58	97,68	4,57	2,53	6.125.642,91	16,00
435	340	21,25	120,7	168,3	20313,81	102,68	4,15	2,27	6.310.485,82	16,00
435	350	21,88	119,1	168,3	20044,53	107,68	3,78	2,05	6.497.203,84	16,00
435	360	22,5	117,7	168,3	19808,91	112,68	3,46	1,86	6.682.695,95	16,00
435	370	23,13	116,5	168,3	19606,95	117,68	3,17	1,70	6.868.776,51	16,00
435	380	23,75	115,5	168,3	19438,65	122,68	2,93	1,55	7.057.182,74	16,00
435	390	24,38	114,5	168,3	19270,35	127,68	2,70	1,43	7.236.938,31	16,00
435	400	25	113,8	168,3	19152,54	132,68	2,51	1,32	7.427.981,12	16,00

Viga engastada e apoiada com vão da viga = $y_{teórico}$

$t_p = 12,50$

Ensaio 2 e 3

f_y (MPa)	L (mm)	L/ t_p	N (kN)	e (mm)	M (kN mm)	Vão da viga (mm)	p_1 (N/mm ²)	p_2 (N/mm ²)	$M_{engaste}$ (N mm)	t_p (mm)
308	300	24	119,5	168,3	20111,85	131,6468	5,80	1,87	2407973,45	12,50
308	310	24,8	121,2	168,3	20397,96	136,66325	5,37	1,75	2487854,85	12,50
308	320	25,6	122,5	168,3	20616,75	141,8822	4,97	1,62	2565405,35	12,50
308	330	26,4	123,6	168,3	20801,88	147,3204	4,61	1,51	2644797,06	12,50
308	340	27,2	124,5	168,3	20953,35	152,9946	4,28	1,40	2726130,41	12,50
308	350	28	125,2	168,3	21071,16	158,9218	3,97	1,29	2809467,02	12,50
308	360	28,8	125,4	168,3	21104,82	165,11895	3,68	1,19	2887909,13	12,50
308	370	29,6	125,4	168,3	21104,82	171,6027	3,42	1,10	2967933,06	12,50
308	380	30,4	125,2	168,3	21071,16	178,38937	3,17	1,01	3049378,65	12,50
308	390	31,2	124,7	168,3	20987,01	185,4941	2,94	0,92	3129484,45	12,50
308	400	32	123,9	168,3	20852,37	192,9310	2,73	0,84	3207670,46	12,50

Viga engastada e apoiada com vão da viga = $y_{teórico}$

$t_p = 16,0$

Ensaio 4 e 5

f_y (MPa)	L (mm)	L/ t_p	N (kN)	e (mm)	M (kN mm)	Vão da viga (mm)	p_1 (N/mm ²)	p_2 (N/mm ²)	$M_{engaste}$ (N mm)	t_p (mm)
435	300	18,75	276,4	168,3	46518,12	131,6468	13,41	4,34	5569572,05	16,00
435	310	19,38	280,4	168,3	47191,32	136,66325	12,42	4,04	5755730,19	16,00
435	320	20	283,5	168,3	47713,05	141,8822	11,51	3,76	5937080,95	16,00
435	330	20,63	286,4	168,3	48201,12	147,3204	10,68	3,49	6128397,06	16,00
435	340	21,25	288,3	168,3	48520,89	152,9946	9,90	3,23	6312798,37	16,00
435	350	21,88	289,5	168,3	48722,85	158,9218	9,18	2,99	6496331,50	16,00
435	360	22,5	290	168,3	48807,00	165,11895	8,51	2,76	6678577,73	16,00
435	370	23,13	290	168,3	48807,00	171,6027	7,90	2,54	6863641,05	16,00
435	380	23,75	289,5	168,3	48722,85	178,38937	7,33	2,33	7051079,24	16,00
435	390	24,38	288,6	168,3	48571,38	185,4941	6,81	2,14	7242736,26	16,00
435	400	25	286,7	168,3	48251,61	192,931	6,32	1,95	7422430,36	16,00

Viga engastada e apoiada com vão da viga = $4,8t_p + 0,32(L/2)$

$t_p = 12,50$

Ensaio 2 e 3

f_y (MPa)	L (mm)	L/ t_p	N (kN)	e (mm)	M (kN mm)	Vão da viga (mm)	p_1 (N/mm ²)	p_2 (N/mm ²)	$M_{engaste}$ (N mm)	t_p (mm)
308	300	24	161	168,3	27096,30	108,00	7,81	3,47	2404856,38	12,50
308	310	24,8	169,5	168,3	28526,85	109,60	7,51	3,45	2486775,24	12,50
308	320	25,6	178	168,3	29957,40	111,20	7,22	3,41	2567264,93	12,50
308	330	26,4	186,5	168,3	31387,95	112,80	6,95	3,37	2646524,82	12,50
308	340	27,2	195,2	168,3	32852,16	114,40	6,70	3,33	2727524,87	12,50
308	350	28	204	168,3	34333,20	116,00	6,47	3,29	2808920,48	12,50
308	360	28,8	212,5	168,3	35763,75	117,60	6,24	3,23	2885367,34	12,50
308	370	29,6	221,5	168,3	37278,45	119,20	6,03	3,19	2967877,44	12,50
308	380	30,4	230,5	168,3	38793,15	120,80	5,84	3,14	3049690,16	12,50
308	390	31,2	239,2	168,3	40257,36	122,40	5,64	3,09	3126994,32	12,50
308	400	32	248,3	168,3	41788,89	124,00	5,47	3,04	3209069,49	12,50

Viga engastada e apoiada com vão da viga = $4,8t_p + 0,32(L/2)$

$t_p = 16,0$

Ensaio 4 e 5

f_y (MPa)	L (mm)	L/ t_p	N (kN)	e (mm)	M (kN mm)	Vão da viga (mm)	p_1 (N/mm ²)	p_2 (N/mm ²)	$M_{engaste}$ (N mm)	t_p (mm)
435	300	18,75	298,7	168,3	50271,21	124,80	14,49	5,20	5567972,76	16,00
435	310	19,38	314,5	168,3	52930,35	126,40	13,93	5,24	5755545,86	16,00
435	320	20	330,5	168,3	55623,15	128,00	13,41	5,26	5942072,72	16,00
435	330	20,63	346,5	168,3	58315,95	129,60	12,92	5,27	6124394,51	16,00
435	340	21,25	363	168,3	61092,90	131,20	12,47	5,27	6311709,43	16,00
435	350	21,88	379,5	168,3	63869,85	132,80	12,04	5,25	6495499,53	16,00
435	360	22,5	396,5	168,3	66730,95	134,40	11,64	5,23	6684614,27	16,00
435	370	23,13	413,5	168,3	69592,05	136,00	11,26	5,20	6870755,74	16,00
435	380	23,75	430,5	168,3	72453,15	137,60	10,90	5,17	7054278,27	16,00
435	390	24,38	447,5	168,3	75314,25	139,20	10,56	5,12	7235499,48	16,00
435	400	25	465	168,3	78259,50	140,80	10,24	5,08	7422685,93	16,00

Viga engastada e apoiada em mola com vão da viga = a_1

$t_p = 12,5$ mm

Ensaio 2 e 3

Espessura Placa de Base (mm)	f_y (MPa)	L (mm)	L/t_p	N (kN)	e (mm)	M (kN mm)	Vão da Viga (mm)	p_1 (N/mm ²)	p_2 (N/mm ²)	k da mola	$M_{engaste}$ (N mm)	t_p (mm)
12,5	308	300	24	162	168,3	27264,6	65,85	7,86	5,20	550,00	2.404.882,80	12,50
12,5	308	310	24,8	166,5	168,3	28022	70,85	7,38	4,80	550,00	2.488.339,42	12,50
12,5	308	320	25,6	171	168,3	28779,3	75,85	6,94	4,44	550,00	2.565.069,30	12,50
12,5	308	330	26,4	176	168,3	29620,8	80,85	6,56	4,14	550,00	2.646.513,47	12,50
12,5	308	340	27,2	181	168,3	30462,3	85,85	6,22	3,87	550,00	2.728.112,95	12,50
12,5	308	350	28	185,6	168,3	31236,5	90,85	5,89	3,62	550,00	2.805.916,97	12,50
12,5	308	360	28,8	190,3	168,3	32027,5	95,85	5,59	3,39	550,00	2.888.886,28	12,50
12,5	308	370	29,6	194,3	168,3	32700,7	100,85	5,29	3,18	550,00	2.965.761,48	12,50
12,5	308	380	30,4	198,4	168,3	33390,7	105,85	5,03	2,99	550,00	3.049.185,91	12,50
12,5	308	390	31,2	202	168,3	33996,6	110,85	4,77	2,81	550,00	3.130.165,47	12,50
12,5	308	400	32	205	168,3	34501,5	115,85	4,52	2,64	550,00	3.207.010,07	12,50

Viga engastada e apoiada em mola com vão da viga = a_1

$t_p = 16,0$ mm

Ensaio 4 e 5

Espessura Placa de Base (mm)	f_y (MPa)	L (mm)	L/t_p	N (kN)	e (mm)	M (kN mm)	Vão da Viga (mm)	p_1 (N/mm ²)	p_2 (N/mm ²)	k da mola	$M_{engaste}$ (N mm)	t_p (mm)
16,0	435	300	18,75	296,5	168,3	49901	65,85	14,38	9,52	550,00	5.568.248,29	16,00
16,0	435	310	19,38	300,5	168,3	50574,2	70,85	13,31	8,66	550,00	5.752.851,24	16,00
16,0	435	320	20	306,6	168,3	51600,8	75,85	12,44	7,96	550,00	5.936.735,60	16,00
16,0	435	330	20,63	314,5	168,3	52930,4	80,85	11,73	7,39	550,00	6.124.502,78	16,00
16,0	435	340	21,25	323,5	168,3	54445,1	85,85	11,11	6,91	550,00	6.311.108,60	16,00
16,0	435	350	21,88	333	168,3	56043,9	90,85	10,56	6,49	550,00	6.491.948,26	16,00
16,0	435	360	22,5	343,5	168,3	57811,1	95,85	10,09	6,13	550,00	6.682.680,18	16,00
16,0	435	370	23,13	354	168,3	59578,2	100,85	9,64	5,80	550,00	6.868.691,15	16,00
16,0	435	380	23,75	364,5	168,3	61345,4	105,85	9,23	5,50	550,00	7.053.964,96	16,00
16,0	435	390	24,38	375	168,3	63112,5	110,85	8,85	5,22	550,00	7.241.653,58	16,00
16,0	435	400	25	385	168,3	64795,5	115,85	8,48	4,96	550,00	7.424.547,11	16,00