

**COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES VIGA-PILAR
DE ESTRUTURAS DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO
UTILIZANDO REBITE TUBULAR COM ROSCA INTERNA**

Guilherme Pinto Coelho de Almeida

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**“COMPORTAMENTO DE LIGAÇÕES VIGA-PILAR DE
ESTRUTURAS DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO
UTILIZANDO REBITE TUBULAR COM ROSCA INTERNA”**

Guilherme Pinto Coelho de Almeida

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

Comissão Examinadora:

Prof. Francisco Carlos Rodrigues, D.Sc.
DEES – UFMG – (Orientador)

Prof. Gilson Queiroz, D.Sc.
DEES – UFMG

Prof. Dr. Eduardo de Miranda Batista
COPPE – UFRJ

Belo Horizonte, 29 de abril de 2004.

Ao João Lincoln de Almeida,
Maria Sylvia Pinto Coelho de Almeida e,
especialmente, à Tatyana Santos da Silva.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, que me concedeu mais esta oportunidade de crescimento pessoal e profissional.

Aos meus pais, João Lincoln de Almeida e Maria Sylvia Pinto Coelho de Almeida.

À minha amada, Tatyana Santos da Silva, que sempre me apoiou e incentivou nos momentos de dificuldade.

Ao corpo docente do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Em especial, aos professores Francisco Carlos Rodrigues, pela importante orientação e amizade, e Gilson Queiroz pela contribuição no dimensionamento dos modelos.

Ao Erik da Cunha Cortes, Eliezer Sampaio dos Santos Junior e demais funcionários dos Laboratórios de Análise Experimental de Estruturas e de Mecânica Computacional da Escola de Engenharia da UFMG.

Aos amigos Pierre de Almeida e Danielly Borges Garcia pela importante presença. À colega Lourdiane Gontijo das Mercês Gonzaga pelo imprescindível auxílio na parte computacional.

À Pórtico Construções Metálicas pela fabricação e doação dos modelos utilizados nos ensaios.

Ao Grupo Böllhoff Brasil e seus representantes que acreditaram na proposta deste trabalho e cederam os rebites tubulares utilizados.

À USIMINAS pela bolsa de mestrado concedida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE FOTOS	VII
LISTA DE TABELAS	IX
NOTAÇÕES	X
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
INTRODUÇÃO	1
1.1 – GENERALIDADES	1
1.2 – JUSTIFICATIVAS.....	7
1.3 – OBJETIVO	9
1.4 – CONTEÚDO DO TRABALHO	10
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 – PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO	12
2.2 – LIGAÇÕES.....	15
2.3 – COMPORTAMENTO SEMI-RÍGIDO DAS LIGAÇÕES	16
2.4 – CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAÇÕES	19
2.4.1 – Sistema de Classificação Segundo a NBR8800	20
2.4.2 – Sistema de Classificação Segundo as Especificações Americanas	20
2.4.3 – Sistema de Classificação Segundo o Eurocode e BJORHOVDE <i>et al</i> (1990).....	21
2.4.4 – Sistema de Classificação Segundo HASAN <i>et al</i> (1998).....	23
2.4.5 – Sistema de Classificação Segundo NETHERCOT <i>et al</i> (1998).....	25
2.5 – MODELAGEM ANALÍTICA DA RELAÇÃO MOMENTO-ROTAÇÃO	28
2.5.1 – Método da Linha da Viga	29
2.5.2 – Modelo de Potência de Três Parâmetros	32
2.6 – MÉTODO PARA AJUSTE DA MODELAGEM ANALÍTICA	42

PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	46
3.1 – INTRODUÇÃO.....	46
3.2 – CONCEITOS E PRESCRIÇÕES DE NORMAS TÉCNICAS	47
3.3 – DESCRIÇÃO DOS MODELOS	47
3.3.1 – Rebite Tubular com Rosca Interna	55
3.4 – DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	57
3.4.1 – Sistema de Carregamento	58
3.4.2 – Instrumentação dos Modelos	62
3.4.3 – Sistema de Aquisição de Dados.....	69
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	70
4.1 – INTRODUÇÃO.....	70
4.2 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	71
4.2.1 – Modelos 01AF	71
4.2.2 – Modelos 01BR.....	81
4.2.3 – Modelos 01BF	92
4.2.4 – Modelos 04AF	101
4.2.5 – Modelos 04BR.....	107
4.3 – RESULTADOS DA MODELAGEM ANALÍTICA.....	117
4.4 – CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS ENSAIADOS SEGUNDO BJORHOVDE.....	121
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	128
5.1 – CONCLUSÕES	128
5.2 – RECOMENDAÇÕES	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	135

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Planta arquitetônica dos prédios construídos pela COHAB-MG.	5
FIGURA 1.2 – Seções utilizadas nos prédios do Sistema COHAB-MG.	6
FIGURA 1.3 – Rebite tubular com rosca interna.	9
FIGURA 2.1 – Seções transversais usuais de perfis formados a frio	13
FIGURA 2.2 – Processos de conformação a frio por perfilagem.	14
FIGURA 2.3 – Processos de conformação a frio por dobragem.	14
FIGURA 2.4 – Rotação relativa entre vigas e pilares.	17
FIGURA 2.5 – Diagramas de momento fletor e flecha para carregamento uniforme.	19
FIGURA 2.6 – Sistema de classificação segundo BJORHOVDE <i>et al</i> (1990).	22
FIGURA 2.7 – Sistema de classificação do EUROCODE 3 (1992).	23
FIGURA 2.8 – Sistema de classificação proposto por HASAN <i>et al</i> (1998).	24
FIGURA 2.9 – Sistema de classificação proposto por NETHERCOT <i>et al</i> (1998) no Estado Limite Último.	26
FIGURA 2.10 – Exemplos de aplicação no Estado Limite Último.	26
FIGURA 2.11 – Sistema de classificação proposto por NETHERCOT <i>et al</i> (1998) no Estado Limite de Utilização.	27
FIGURA 2.12 – Exemplos de aplicação no Estado Limite de Utilização.	27
FIGURA 2.13 – Viga com carregamento distribuído.	29
FIGURA 2.14 – Diagramas $M-\theta$ para os tipos de ligação, considerando-se a linha de viga.	32
FIGURA 2.15 – Testes 1 e 2 comparados ao ajuste de potência de três parâmetros [FOLEY e VINNAKOTA (1995)].	35
FIGURA 2.16 – Testes 3 e 4 comparados ao ajuste de potência de três parâmetros [FOLEY e VINNAKOTA (1995)].	35
FIGURA 2.17 – Testes 5 e 6 comparados ao ajuste de potência de três parâmetros [FOLEY e VINNAKOTA (1995)].	36
FIGURA 2.18 – Modelo 01A comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].	38
FIGURA 2.19 – Modelo 01B comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].	38
FIGURA 2.20 – Modelo 02A comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].	39

FIGURA 2.21 – Modelo 02B comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].	39
FIGURA 2.22 – Modelo 03A comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].	40
FIGURA 2.23 – Modelo 03B comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].	40
FIGURA 2.24 – Modelo 04A comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].	41
FIGURA 2.25 – Modelo 04B comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].	41
FIGURA 3.1 – Ligação 01AF: flexível na menor inércia do pilar.	49
FIGURA 3.2 – Ligação 01BF: flexível na maior inércia do pilar.	50
FIGURA 3.3 – Ligação 01BR: rígida na maior inércia do pilar.	51
FIGURA 3.4 – Ligação 04AF: flexível na menor inércia do pilar.	52
FIGURA 3.5 – Ligação 04BF: flexível na maior inércia do pilar.	53
FIGURA 3.6 – Ligação 04BR: rígida na maior inércia do pilar.	54
FIGURA 3.7 – Características da porca-rebite.	55
FIGURA 3.8 – Etapas de instalação da porca-rebite.	56
FIGURA 3.9 – Rebites utilizados nos modelos ensaiados.	57
FIGURA 3.10 – Esquema de montagem dos ensaios à flexão.	59
FIGURA 3.11 – Esquema de montagem dos ensaios ao cisalhamento.	60
FIGURA 3.12 – Esquema geral do posicionamento dos instrumentos de medição.	68
FIGURA 4.1 – Modelo 01AF-01: Momento médio no nó X rotação relativa.	75
FIGURA 4.2 – Modelo 01AF-01: Momento médio no nó X deformações específicas nas vigas.	76
FIGURA 4.3 – Modelo 01AF-01: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.	76
FIGURA 4.4 – Modelo 01AF-01: Momento médio no nó X deslocamentos vertical e horizontal da base do pilar.	77
FIGURA 4.5 – Modelo 01AF-01: Momento médio no nó X deslocamentos verticais das vigas medidos com os relógios comparadores (REC).	77
FIGURA 4.6 – Modelo 01AF-02: Carga vertical no nó X deslocamentos verticais das vigas (DT_{25}).	78
FIGURA 4.7 – Modelo 01AF-02: Carga vertical no nó X deslocamentos vertical e horizontal da base do pilar.	78
FIGURA 4.8 – Modelo 01AF-03: Momento médio no nó X rotação relativa.	79

FIGURA 4.9 – Modelo 01AF-03: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.	79
FIGURA 4.10 – Modelo 01AF-03: Carga vertical no nó X deslocamentos verticais das vigas (DT ₂₅).	80
FIGURA 4.11 – Modelo 01AF-03: Carga vertical no nó X deslocamentos vertical da base do pilar.	80
FIGURA 4.12 – Modelo 01BR-01: Momento médio no nó X rotação relativa.	84
FIGURA 4.13 – Modelo 01BR-01: Momento médio no nó X deformações específicas nas vigas.....	85
FIGURA 4.14 – Modelo 01BR-01: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.	85
FIGURA 4.15 – Modelo 01BR-01: Momento médio no nó X deslocamento vertical da base do pilar.....	86
FIGURA 4.16 – Modelo 01BR-01: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com relógios comparadores (REC).	86
FIGURA 4.17 – Modelo 01BR-02: Momento médio no nó X rotação relativa.	87
FIGURA 4.18 – Modelo 01BR-02: Momento médio no nó X deformações específicas nas vigas.....	87
FIGURA 4.19 – Modelo 01BR-02: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.	88
FIGURA 4.20 – Modelo 01BR-02: Momento médio no nó X deslocamentos vertical e horizontal da base do pilar.....	88
FIGURA 4.21 – Modelo 01BR-02: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com de relógios comparadores (REC).	89
FIGURA 4.22 – Modelo 01BR-03: Momento médio no nó X rotação relativa.	89
FIGURA 4.23 – Modelo 01BR-03: Momento médio no nó X deformações específicas nas vigas.....	90
FIGURA 4.24 – Modelo 01BR-03: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.	90
FIGURA 4.25 – Modelo 01BR-03: Momento médio no nó X deslocamentos vertical e horizontal da base do pilar.....	91
FIGURA 4.26 – Modelo 01BR-03: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com de relógios comparadores (REC).	91
FIGURA 4.27 – Modelo 01BF-01: Momento médio no nó X rotação relativa.....	95
FIGURA 4.28 – Modelo 01BF-01: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.	95
FIGURA 4.29 – Modelo 01BF-01: Momento médio no nó X deslocamento vertical da base do pilar.....	96

FIGURA 4.30 – Modelo 01BF-01: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com transdutores de deslocamentos (DT ₂₅).	96
FIGURA 4.31 – Modelo 01BF-02: Momento médio no nó X rotação relativa.....	97
FIGURA 4.32 – Modelo 01BF-02: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.	97
FIGURA 4.33 – Modelo 01BF-02: Momento médio no nó X deslocamento vertical da base do pilar.....	98
FIGURA 4.34 – Modelo 01BF-02: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com transdutores de deslocamento (DT ₂₅).	98
FIGURA 4.35 – Modelo 01BF-03: Momento médio no nó X rotação relativa.....	99
FIGURA 4.36 – Modelo 01BF-03: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.	99
FIGURA 4.37 – Modelo 01BF-03: Momento médio no nó X deslocamento vertical da base do pilar.....	100
FIGURA 4.38 – Modelo 01BF-03: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com transdutores de deslocamento (DT ₂₅).	100
FIGURA 4.39 – Modelo 04AF-01: Momento médio no nó X rotação relativa.	103
FIGURA 4.40 – Modelo 04AF-01: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.	104
FIGURA 4.41 – Modelo 04AF-01: Momento médio no nó X deslocamento vertical da base do pilar.....	104
FIGURA 4.42 – Modelo 04AF-01: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com transdutores de deslocamento (DT ₂₅).	105
FIGURA 4.43 – Modelo 04AF-02: Momento médio no nó X rotação relativa.	105
FIGURA 4.44 – Modelo 04AF-02: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.	106
FIGURA 4.45 – Modelo 04AF-02: Momento médio no nó X deslocamento vertical da base do pilar.....	106
FIGURA 4.46 – Modelo 04AF-02: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com transdutores de deslocamento (DT ₂₅).	107
FIGURA 4.47 – Modelo 04BR-01: Momento médio no nó X rotação relativa.	110
FIGURA 4.48 – Modelo 04BR-01: Momento médio no nó X deformações específicas nas vigas.....	110
FIGURA 4.49 – Modelo 04BR-01: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.	111

FIGURA 4.50 – Modelo 04BR-01: Momento médio no nó X deslocamentos vertical e horizontal da base do pilar.....	111
FIGURA 4.51 – Modelo 04BR-01: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com relógios comparadores (REC).	112
FIGURA 4.52 – Modelo 04BR-02: Momento médio no nó X rotação relativa.	112
FIGURA 4.53 – Modelo 04BR-02: Momento médio no nó X deformações específicas nas vigas.....	113
FIGURA 4.54 – Modelo 04BR-02: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.	113
FIGURA 4.55 – Modelo 04BR-02: Momento médio no nó X deslocamentos vertical e horizontal da base do pilar.....	114
FIGURA 4.56 – Modelo 04BR-02: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com relógios comparadores (REC).	114
FIGURA 4.57 – Modelo 04BR-03: Momento médio no nó X rotação relativa.	115
FIGURA 4.58 – Modelo 04BR-03: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.	115
FIGURA 4.59 – Modelo 04BR-03: Momento médio no nó X deslocamento vertical da base do pilar.....	116
FIGURA 4.60 – Modelo 04BR-04: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com transdutores de deslocamento (DT ₂₅).	116
FIGURA 4.61 – Modelo 01BR-01: Comparação o modelo de potência de três parâmetros e os resultados experimentais.	118
FIGURA 4.62 – Modelo 01BF-03: Comparação entre o modelo de potência de três parâmetros e os resultados experimentais.	118
FIGURA 4.63 – Modelo 04AF-01: Comparação entre o modelo de potência de três parâmetros e os resultados experimentais.	119
FIGURA 4.64 – Modelo 04BR-03: Comparação entre o modelo de potência de três parâmetros e os resultados experimentais.	119
FIGURA 4.65 – Modelo 01AF-01: Classificação segundo BJORHOVDE.	122
FIGURA 4.66 – Modelo 01BR-01: Classificação segundo BJORHOVDE.	122
FIGURA 4.67 – Modelo 01BR-02: Classificação segundo BJORHOVDE.	123
FIGURA 4.68 – Modelo 01BR-03: Classificação segundo BJORHOVDE.	123
FIGURA 4.69 – Modelo 01BF-01: Classificação segundo BJORHOVDE.	124
FIGURA 4.70 – Modelo 01BF-02: Classificação segundo BJORHOVDE.	124
FIGURA 4.71 – Modelo 01BF-03: Classificação segundo BJORHOVDE.	125
FIGURA 4.72 – Modelo 04AF-01: Classificação segundo BJORHOVDE.	125
FIGURA 4.73 – Modelo 04AF-02: Classificação segundo BJORHOVDE.	126

FIGURA 4.74 – Modelo 04BR-01: Classificação segundo BJORHOVDE.....	126
FIGURA 4.75 – Modelo 04BR-02: Classificação segundo BJORHOVDE.....	127
FIGURA 4.76 – Modelo 04BR-03: Classificação segundo BJORHOVDE.....	127

LISTA DE FOTOS

FOTO 1.1 – Visão geral dos prédios construídos pela COHAB-MG	6
FOTO 1.2 – Visão geral da estrutura de um prédio do Sistema COHAB-MG.	6
FOTO 1.3 – Prédios construídos pela CDHU-SP com o Sistema Usiteto.....	7
FOTO 3.1 – Sistema de carregamento: a) Atuador hidráulico; b) Bomba hidráulica com transdutor de pressão.	59
FOTO 3.2 – Esquema geral de montagem e instrumentação, modelo 04BR-01.....	60
FOTO 3.3 – Esquema geral de montagem e instrumentação para ensaio ao cisalhamento: a) Modelo 01AF-03; b) Modelo 01AF-02.	61
FOTO 3.4 – Extensômetro elétrico de resistência instalado no flange superior da viga (EER-N).	63
FOTO 3.5 – Medidores do deslocamento vertical do pilar (DT ₁₀₀).....	64
FOTO 3.6 – Aparelhos medidores do encurtamento e alongamento (DT ₅₀).....	64
FOTO 3.7 – Ganchos para suporte dos medidores (DT ₅₀) de encurtamento e alongamento.	65
FOTO 3.8 – DT ₂₅ realizando medição do deslocamento horizontal do modelo.....	65
FOTO 3.9 – Deslocamento vertical da viga: a) com relógios comparadores (REC) e b) com transdutores de deslocamento (DT ₂₅).....	66
FOTO 3.10 – Sistema de aquisição de dados.	69
FOTO 4.1 – Aspecto geral do modelo 01AF-01 no fim do ensaio.....	72
FOTO 4.2 – Deformações observadas no modelo 01AF-01.	73
FOTO 4.2 – Aspecto do modelo 01AF-02 após o ensaio.....	74
FOTO 4.3 – Deformação visível dos parafusos do modelo 01AF-03.	75
FOTO 4.4 – Modo de ruptura brusca dos rebites inferiores dos modelos 01BR: a) antes da ruptura e b) após a ruptura.....	81
FOTO 4.5 – Detalhe do modelo 01BR-01 após o ensaio.	82
FOTO 4.6 – Detalhe do modelo 01BR-02 após o ensaio.	83
FOTO 4.7 – Detalhe do rompimento dos rebites inferiores do modelo 01BR-03.....	84
FOTO 4.8 – Modo de colapso dos modelos 01BF.	93
FOTO 4.9 – Detalhe do modelo 01BF-01 após o ensaio.....	93
FOTO 4.10 – Detalhe do modelo 01BF-02 após o ensaio.....	94
FOTO 4.11 – Detalhe do modelo 01BF-03 após o ensaio.....	94
FOTO 4.12 – Formação de charneira plástica nos modelos 04AF após o ensaio.	102

FOTO 4.13 – Deformação por tração dos parafusos inferiores nos modelos 04AF.....	102
FOTO 4.14 – Efeito de flambagem local na alma das vigas do modelo 04AF-01.....	103
FOTO 4.15 – Efeito de flambagem local na alma das vigas do modelo 04BR-01.....	109
FOTO 4.16 – Modo de colapso do modelo 04BR-03.....	109

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Equações empíricas para o parâmetro de forma β	33
TABELA 2.2 – Modelos utilizados por IOANNIDES (1978).	34
TABELA 2.3 – Modelos utilizados por GONZAGA (2003).	37
TABELA 3.1 – Ligações dimensionadas e ensaiadas.	48
TABELA 3.2 – Modelos ensaiados.	58
TABELA 3.3 – Medições realizadas e tipos de aparelhos utilizados.	67
TABELA 4.1 – Resumo dos eventos ocorridos nos ensaios dos modelos 01AF.	72
TABELA 4.2 – Resumo dos eventos ocorridos nos ensaios dos modelos 01BR.	82
TABELA 4.3 – Resumo dos eventos ocorridos nos ensaios dos modelos 01BF.	92
TABELA 4.4 – Resumo dos eventos ocorridos nos ensaios dos modelos 04AF.	101
TABELA 4.5 – Resumo dos eventos ocorridos nos ensaios dos modelos 04BR.	108
TABELA 4.6 – Coeficientes finais da regressão de potência de três parâmetros.	120

NOTAÇÕES

α	:	razão de rigidez rotacional da viga-pilar,
α_i	:	expoentes determinados empiricamente
$[\alpha]$:	matriz de curvatura
β	:	parâmetro de forma da curva M- θ de Kishi-Chen
β_k	:	conjunto de equações lineares
ΔV	:	variação de tensão emitida
ϕ	:	diâmetro do parafuso
θ	:	rotação relativa entre os eixos longitudinais das vigas e dos pilares
$\bar{\theta}$:	relação entre a rotação atuante na ligação e a rotação no limite elástico
θ_0	:	razão entre o momento de plastificação da viga e a rigidez inicial da ligação
θ_i, θ_j	:	rotações nas extremidades i e j da viga
θ_{pilar}	:	rotação do eixo do pilar
θ_{viga}	:	rotação do eixo da viga
σ_i	:	desvio padrão
χ^2	:	função de mérito chi quadrado
λ	:	fator adimensional
δa_k	:	incremento para a aproximação
a	:	vetor de parâmetros
a, b	:	parâmetros ajustados por um modelo
a_j	:	parâmetros ajustáveis
d	:	altura da viga, altura da ligação
E	:	módulo de elasticidade do aço, $E = 205.000$ Mpa
ϕ	:	diâmetro do parafuso
f_y	:	resistência ao escoamento do aço
f_u	:	resistência à ruptura do aço à tração
I	:	momento de inércia da seção transversal da viga
i	:	nó inicial de uma barra prismática

j	:	nó final de uma barra prismática
K_c	:	somatório da rigidez de todos os membros conectados à ligação exceto da viga
$K_{ij}; K_0$:	rigidez inicial da ligação
L	:	comprimento da viga
M	:	momento atuante na ligação
\bar{M}	:	relação entre o momento atuante na ligação e o momento de plastificação
M_0	:	momento inicial da ligação
M_d	:	momento de cálculo
M_i, M_j	:	momentos reais nas extremidades i e j da viga para ligação real
M_{fi}, M_{fj}	:	momentos nas extremidades i e j da viga para ligação rígida
$M_p; M_{p,b}$:	momento de plastificação da viga, momento plástico da ligação
M_u	:	momento último da ligação
P	:	carga vertical aplicada
P_0 a P_5	:	pontos do polígono de controle da curva
P_u	:	carga última
t	:	espessura da chapa de extremidade
x_i, y_i	:	pontos ajustados por um modelo
$w; W$:	carga distribuída na viga

RESUMO

O comportamento não-linear da relação momento-rotação das ligações viga-pilar em perfis formados a frio ainda não é definido de modo satisfatório, pois o estudo da semi-rigidez dessas ligações encontra-se até o momento num estado incipiente.

Neste trabalho são apresentados os resultados da pesquisa experimental realizada para estudar o comportamento e a resistência de ligações semi-rígidas, projetadas para a estrutura em perfis de aço formados a frio de prédios de até 7 pavimentos utilizando como meio de ligação o rebite tubular com rosca interna.

Além disso, estes resultados são utilizados para o ajuste de um modelo analítico de potência de três parâmetros, apresentado por KISHI e CHEN (1990), para ligações parafusadas com chapa de extremidade estendida.

Como resultado deste trabalho, verificou-se que as ligações estudadas obedecem ao modelo analítico adotado, necessitando apenas de ajustes devido às características próprias do sistema proposto.

ABSTRACT

The non-linear behavior of the moment-rotation relationship of the beam-to-column connections in cold-formed profiles is not yet defined in a satisfactory way, because the study of the semi-rigid behavior of these connections is still in an incipient stage of knowledge.

In this work are presented the results of the experimental research accomplished to study the behavior and the resistance of semi-rigid connections, projected for a structure in cold-formed steel profiles of seven-story buildings using, as fastener, the tubular rivet with internal thread.

Besides, these results are used for the adjustment of an analytic model of potency of three parameters, proposed by KISHI and CHEN (1990), for screwed connections with end plate.

As a result of this work, it was verified that the studied connections obey the adopted analytical model, just needing adjustments due to their own characteristics.

1

INTRODUÇÃO

1.1 – Generalidades

A busca por informações que retratem fielmente o real déficit habitacional brasileiro se tornou um instrumento imprescindível tanto para os órgãos públicos, responsáveis pelo financiamento e formulação das políticas urbanas, quanto para as empresas privadas, que procuram melhores oportunidades para direcionar seus investimentos. O conhecimento desse déficit oferece importantes subsídios para tomadas de decisões e avaliação da eficácia das ações desencadeadas.

Os principais indicadores sociodemográficos brasileiros são divulgados pela Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios, PNAD (IBGE, 2002). Todas as informações, obtidas nas pesquisas domiciliares realizadas nos dois anos anteriores à publicação, são agrupadas em sete temas distintos e formam o conjunto mais completo e detalhado da atual situação socioeconômica da população brasileira.

Segundo um estudo publicado pela Fundação João Pinheiro – Centro de Estatística e Informações (FJP/ CEI, 2002), baseado na PNAD (IBGE, 1999), o déficit habitacional

foi estimado em 6.656.526 novas moradias, das quais 5.414.944 (81,3%) teriam de ser construídas na área urbana e 1.241.582 (18,7%) na área rural. A Região Nordeste lidera a demanda nacional, com necessidades estimadas em 2.631.790 unidades, vindo a seguir a Sudeste, com 2.412.460 unidades domiciliares. As áreas metropolitanas participam com 29,3% da demanda total, correspondendo a 1.951.677 unidades, concentradas principalmente nas Regiões Metropolitanas de São Paulo (596.232 unidades), Rio de Janeiro (390.805 unidades) e Recife (191.613 unidades). A maior parte do déficit é composta por moradias onde ocorre a coabitação familiar (56,1%), seguida pela habitação precária (24,2%) e pelo ônus excessivo com aluguel (18,2%).

Tais números revelam que, considerando a média de moradores por domicílio, cerca de 23,9 milhões de brasileiros (14,0% da população total residente) se enquadravam em situação de déficit de moradia. E a situação apresenta uma tendência de agravamento já que de 1991 a 2000, ou seja, em uma década, esse déficit aumentou em 21,7%. Isso é decorrente da ausência de financiamento público que deixa a tarefa de enfrentar o déficit à própria população, que o faz por meio de iniciativas privadas ou coletivas.

O conceito de necessidades habitacionais engloba, além do déficit habitacional, também as habitações que não proporcionam a seus moradores condições desejáveis de moradia, ainda que não necessitem, obrigatoriamente, de construção de novas moradias. Dentre os cinco fatores que classificam um domicílio como inadequado, dois fazem jus a um maior destaque, sendo eles o adensamento excessivo, quando há mais de três moradores por dormitório (2.024.939 domicílios), e a carência de serviços de infra-estrutura básica: energia elétrica, rede de abastecimento de água com canalização interna, rede coletora de esgoto ou fossa séptica e lixo coletado direta ou indiretamente (10.261.076 domicílios).

Além de todos esses fatores, temos ainda o atual cenário sócio-econômico brasileiro que reflete uma situação onde as famílias que têm renda mensal inferior a três salários mínimos são as mais atingidas pela falta de moradia representando 83,2% do déficit de habitacional no país.

Por essas razões pode-se concluir que o déficit habitacional brasileiro é um problema social que demanda soluções rápidas e eficientes. A maioria dos órgãos públicos e empresas privadas, envolvidas na indústria da construção civil, procura desenvolver seus projetos de edificações, desde a concepção até o acabamento, de uma forma cada vez mais econômica. Para isto, grande parte dos projetistas envolvidos busca, incessantemente, informações e novas tecnologias que possam ajudá-los a unir os conceitos de modernidade e qualidade ao baixo custo e dinamismo de seus empreendimentos.

Por outro lado, o aço, um elemento estrutural próprio para construção industrializada, pode proporcionar à construção civil novas perspectivas para a habitação popular, reduzindo esta carência consideravelmente. A construção industrializada, juntamente com novos avanços da ciência e da tecnologia, pode buscar um novo caminho para solucionar este problema no Brasil.

Conforme CEF (2002), atualmente, a construção metálica está atravessando um período de grande expansão no Brasil. Desde os anos oitenta têm-se vivenciado o crescimento do mercado de estruturas em aço, com o aparecimento de diversas edificações, o emprego de tecnologias avançadas nas obras, as publicações de livros e periódicos e constituição de associações profissionais, além da organização cada vez mais freqüente de congressos e seminários que tratam desse tema.

A estrutura metálica é hoje uma solução técnica comprovadamente viável, podendo apresentar resultados expressivos de qualidade e baixo custo para investidores e construtores. Várias inovações têm sido colocadas em prática na tentativa de fazer com que todos os processos de produção e montagem da estrutura sejam mais econômicos.

As siderurgias passaram a investir na produção de aços específicos para a engenharia e arquitetura. Com maior resistência mecânica e à corrosão atmosférica, além de melhor aderência à pintura, estes aços vêm proporcionando aos arquitetos e calculistas a execução de projetos com maior ousadia e economia.

Da parte dos produtores de estruturas metálicas, os investimentos vêm sendo aplicados na expansão de fábricas, automação de máquinas e modernização dos equipamentos de montagem.

Esses investimentos têm difundido a tecnologia da estrutura em aço como uma opção competitiva em relação a outros processos construtivos. Percebe-se hoje, sua aplicação em edificações de todo tipo e de todo porte, nas mais diversas e distantes regiões do país.

São de conhecimento público os vários convênios firmados entre fábricas de estruturas metálicas, órgãos de habitação e Universidades, a partir dos quais são desenvolvidos projetos de pesquisa para a construção metálica.

A Companhia de Habitação do Estado de Minas Gerais (COHAB-MG) e a Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano de São Paulo (CDHU-SP) são empresas de cunho eminentemente social e têm como objetivo o planejamento, a produção, a comercialização de unidades habitacionais e os repasses de financiamentos, especialmente destinados à população de baixa renda. A sua atuação no âmbito regional procura erradicar o problema do déficit habitacional em Minas Gerais e São Paulo.

O Sistema Usiteto, resultado de um convênio firmado entre a COHAB-MG, a USIMINAS e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), começou a ser implantado em 1997 com o desenvolvimento de prédios de 4 pavimentos. Nas diversas pesquisas realizadas pelo convênio ao longo dos últimos anos foram aprimoradas e desenvolvidas tecnologias estruturais e construtivas que, quando aplicadas aos prédios desse sistema, permitiram diminuir consideravelmente o custo final de suas construções e até aumentar o número de pavimentos, que atualmente chega a 7.

A construção dos prédios é realizada em regime de empreitada ou mutirão parcial e por isso o valor da entrada nos financiamentos é descontado, fazendo com que o valor médio de cada uma das 240 parcelas do financiamento seja condizente com a atual

realidade sócio-econômica do Brasil, sendo o programa voltado para o atendimento das famílias de baixa renda.

A planta dos prédios do Sistema Usiteto se desenvolve em forma de H, cujos lados simétricos contém 2 unidades habitacionais, totalizando 4 apartamentos por pavimento e de 16 a 28 por prédio. A ligação horizontal e vertical é feita por meio do elemento central da construção, no qual está também localizada a entrada principal no pavimento térreo.

Todos os pavimentos possuem pé-direito de 2,80 m e cada unidade habitacional possui área total de 46,69 m², sendo 42,54 m² de área útil, divididos entre dois quartos, sala, cozinha banheiro e área de serviço, conforme FIG. 1.1.

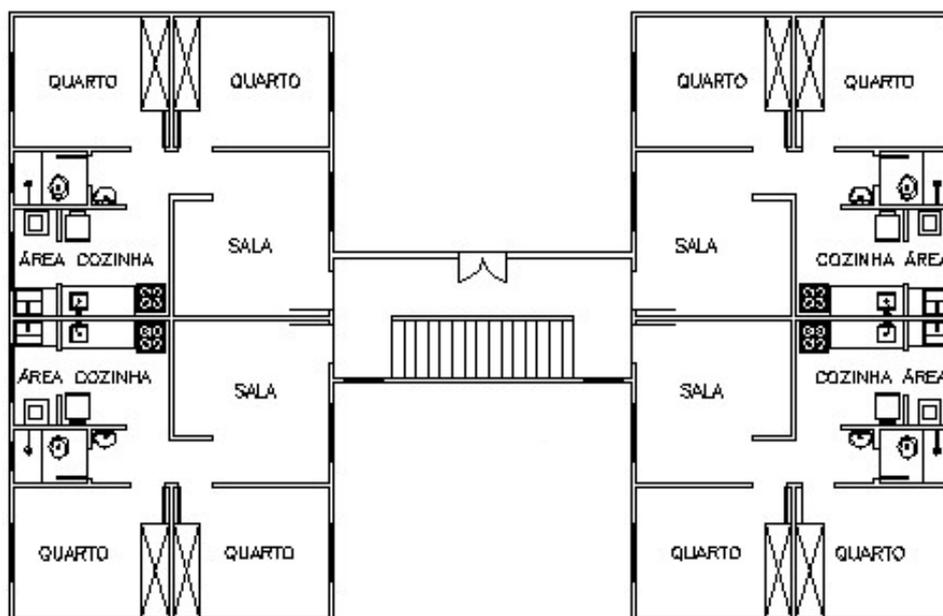


FIGURA 1.1 – Planta arquitetônica dos prédios construídos pela COHAB-MG.

Toda a estrutura utilizada nesses prédios é constituída de perfis formados a frio com as seções mostradas na FIG. 1.2. O aço utilizado é o USI-SAC-300, denominado anteriormente de USI-SAC-41E, e tem como característica principal a alta resistência à corrosão atmosférica. Os pilares possuem seção do tipo I e são produzidos a partir de dois perfis cartola soldados entre si. As vigas possuem seção caixa constituída por dois perfis U enrijecidos soldados entre si e os contraventamentos são formados por perfis U

simples. As fotos mostradas a seguir mostram uma visão geral da estrutura dos prédios construídos pela COHAB-MG (FOTOS 1.1 e 1.2) e CDHU-SP (FOTO 1.3).

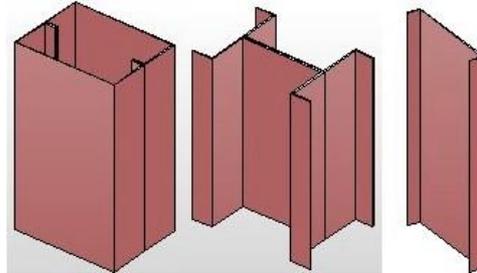


FIGURA 1.2 – Seções utilizadas nos prédios do Sistema COHAB-MG.



FOTO 1.1 – Visão geral dos prédios construídos pela COHAB-MG



FOTO 1.2 – Visão geral da estrutura de um prédio do Sistema COHAB-MG.



FOTO 1.3 – Prédios construídos pela CDHU-SP com o Sistema Usiteto.

1.2 – Justificativas

Existe, no Brasil, uma demanda muito grande de novas soluções habitacionais e esta necessidade está sendo percebida por algumas empresas e instituições relacionadas com a construção civil. Diversos órgãos públicos e empresas privadas já têm em desenvolvimento os próprios programas habitacionais.

Para o emprego em programas de habitação popular, as moradias devem ter seu custo extremamente reduzido, sem perda de segurança e durabilidade. Com isso, todas as soluções técnicas da engenharia devem ser aplicadas para racionalizar e industrializar cada vez mais os projetos de edificações.

Os perfis formados a frio, obtidos pela dobragem ou perfilagem a frio de chapas de aço, possuem baixo custo de produção, são de fabricação simples, sem a necessidade de grandes equipamentos, tendo ainda fácil manuseio para montagem em campo devido ao baixo peso, além de rapidez na execução. Por isso, vêm se mostrando uma boa alternativa para a execução de edificações industriais e residenciais, inclusive aquelas utilizadas nos programas de habitação popular.

Seguindo esta tendência e procurando cada vez mais reduzir o custo das edificações, uma das considerações que podem ser feitas no projeto é o estudo da semi-rigidez das ligações entre as vigas e pilares das estruturas de perfis formados a frio. Quando consideradas semi-rígidas tais ligações são de execução mais simples, têm menor consumo de aço que as ligações rígidas e proporcionam uma maior rigidez das estruturas se comparadas às ligações flexíveis, podendo dispensar em muitos casos o uso de contraventamentos.

No entanto, não existe uma quantidade suficiente de pesquisas sobre as ligações semi-rígidas em estruturas de perfis formados a frio. A falta de testes que definem de modo mais eficaz o comportamento dessas ligações deixa os projetistas sem ferramentas para poder tratá-las no dimensionamento de uma edificação. Além disto, as normas técnicas de dimensionamento de estruturas de aço em perfis formados a frio, incluindo a brasileira, não consideram em nenhum tópico de suas prescrições esse tipo de ligação.

As pesquisas nesses casos se mostram necessárias para obtenção de dados sobre as ligações semi-rígidas em estruturas de perfis leves, tornando o seu processo de cálculo mais preciso e confiável.

Uma outra forma de se tentar reduzir ainda mais o custo final de uma edificação de aço é tentar utilizar nas suas vigas e pilares perfis de seção fechada do tipo caixa ou tubular. Esses perfis podem apresentar vantagens estruturais em relação aos demais, porém são extremamente difíceis de serem unidos por meio de parafusos. Esta dificuldade é devida à quase impossibilidade de se apertar o parafuso à porca justamente porque não existem maneiras de segurá-la no interior do perfil. Uma alternativa seria soldar a porca junto ao furo antes da fabricação do perfil, porém esse procedimento é oneroso, lento e susceptível de imprecisões, o que vai de encontro com os principais objetivos desse trabalho. A utilização de rebites tubulares com rosca interna, proposta nesta dissertação, apresenta-se como a melhor solução para esse problema, pois a sua principal função é criar uma rosca em um local onde não existe uma espessura suficiente para tal. Pode-se ver na FIG. 1.3 que esse tipo de rebite é unido à chapa através de uma conformação de

sua parede lateral, que deixa de ser lisa e passa a apresentar uma saliência formando um tipo de arruela de fixação.



FIGURA 1.3 – Rebite tubular com rosca interna.

Analisando as características mecânicas fornecidas pelos fabricantes desses conectores, verifica-se que tais dispositivos têm a capacidade de absorver esforços cisalhantes e impedir a separação por tração das partes ligadas. Porém é necessária a realização de pesquisas que determinem se a utilização desses rebites nas ligações prediais é viável e, sobretudo, segura.

Esse trabalho procura ampliar o elenco de resultados das pesquisas que vêm sendo feitas no Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG onde a maioria dos itens da estrutura dos prédios desses sistemas construtivos foi projetada, testada e aprovada para utilização imediata, segundo conceitos de desempenho, segurança e funcionalidade.

1.3 – Objetivo

Neste trabalho são apresentados os resultados da pesquisa experimental realizada para estudar o comportamento e a resistência de ligações semi-rígidas, projetadas para a estrutura em perfis de aço formados a frio de prédios de até 7 pavimentos utilizando, como meio de ligação o rebite tubular de rosca interna.

Na pesquisa foram determinadas as relações entre o momento na ligação e a rotação relativa de suas partes para os diversos modelos ensaiados. A partir da determinação experimental do gráfico $M-\theta$ das ligações em estudo fica conhecida o seu grau de rigidez e poderá ser considerado um novo modelo de análise para a estrutura com maior exatidão e, portanto, com resultados ainda mais confiáveis quando comparados aos modelos de estruturas apertadas com ligações idealmente rígidas ou flexíveis.

Uma vez determinada a resistência de cada ligação estudada, foram estabelecidas as dimensões máximas dos furos em função do diâmetro do rebite, bem como a distância do centro do furo à borda do elemento conectado, os espaçamentos mínimos entre furos e distância máxima às bordas, dados ainda desconhecidos para este tipo de meio de ligação.

Este trabalho, além de apresentar à comunidade científica o rebite tubular de rosca interna como novo meio de ligação entre vigas e pilares, tem o intuito de montar um banco de dados experimentais que poderá ser utilizado em uma futura análise teórica dessas ligações.

1.4 – Conteúdo do Trabalho

No capítulo 2 são apresentadas as fundamentações teóricas do tema desta dissertação. São apresentados os perfis formados a frio, com os quais são fabricadas todas as barras da estrutura dos prédios pesquisados, e as ligações semi-rígidas, incluindo o rebite tubular de rosca interna que é utilizado como elemento de conexão entre os pilares e vigas.

No capítulo 3 descreve-se a análise experimental a que foram submetidos os modelos estudados, sendo detalhados cada um dos modelos e seus procedimentos de ensaio. É apresentada para cada ensaio realizado uma descrição dos componentes do sistema de aplicação de carga e de aquisição de dados digitais utilizados além de outros detalhes técnicos e de montagem.

São apresentados no capítulo 4 os resultados da análise experimental e de uma modelagem analítica além dos respectivos comentários e comparações.

As conclusões e recomendações estão descritas no capítulo 5. Por fim, as referências bibliográficas consultadas encerram o trabalho.

2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – Perfis de Aço Formados a Frio

Os perfis de aço formados a frio são obtidos por conformação a frio de chapa fina de aço e têm hoje sua utilização em fase de rápido crescimento no Brasil. Tal difusão se deve à grande diversidade de aplicações apresentadas pelo produto final, podendo-se obter concepções estruturais extremamente leves e eficientes para uso nas edificações residenciais e industriais, além de serem empregados na estrutura de carrocerias e chassis de automóveis.

Um fator que justifica a intensa utilização destes perfis é a sua concepção cada vez mais leve utilizando chapas com espessuras a partir de 0,43 mm. Portanto, podem representar uma economia na execução das estruturas metálicas, pois sendo mais leves esses perfis têm custo relativamente menor que os demais perfis.

A grande diversidade de aplicações é possível devido à variedade das formas de seções transversais, algumas apresentadas na FIG. 2.1, que podem ser obtidas até mesmo longe dos grandes fabricantes de aço e com equipamentos simples, quando comparados às

instalações necessárias à produção de perfis laminados ou soldados. Ainda na FIG. 2.1, pode-se perceber que, além das formas simples apresentadas, é possível ainda a fabricação de barras cuja seção transversal é obtida a partir da união entre dois ou mais perfis. Os perfis caixa, utilizados nas vigas e pilares das ligações desenvolvidas neste trabalho, são obtidos a partir de dois perfis U-enrijecido unidos por meio de solda elétrica. Esses perfis são muito utilizados em estruturas de maior porte, pois têm boa rigidez à torção (eliminando travamentos), menor área exposta (reduzindo a área de pintura e proteção passiva contra incêndios quando necessária) e menor possibilidade de retenção de líquidos (que reduz a probabilidade de ocorrência de corrosão).

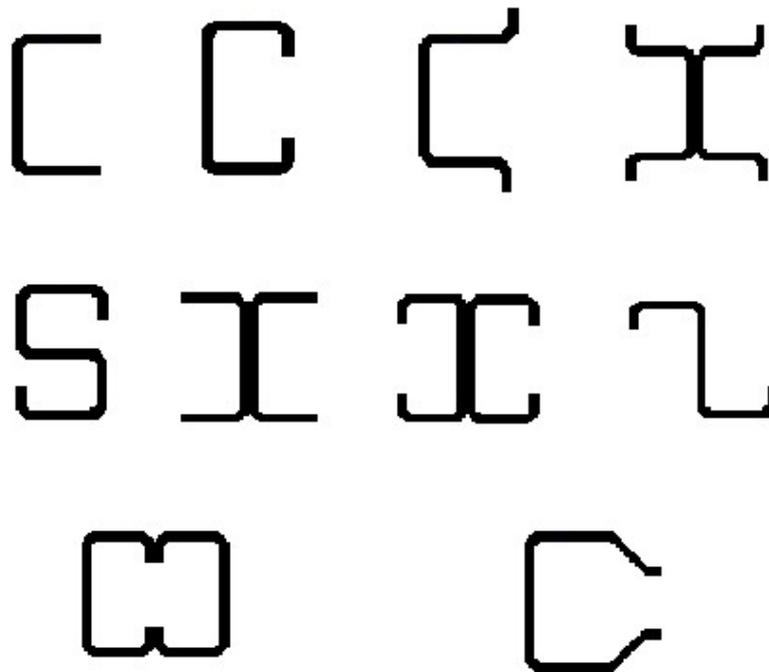


FIGURA 2.1 – Seções transversais usuais de perfis formados a frio

Os perfis de chapa dobrada podem ser produzidos através de dois métodos distintos de fabricação: por conformação a frio em mesa de roletes e por dobragem.

A conformação a frio em mesa de roletes, ilustrada pela FIG. 2.2, é um processo do tipo contínuo, também denominado de perfilagem. A seção transversal final é formada gradualmente através da passagem de uma tira de aço por entre uma série de pares de roletes devidamente ajustados, que conformam sucessivamente a tira de aço até que a

seção definitiva seja obtida. A quantidade de pares de roletes depende da complexidade da forma da seção que se quer obter. Uma das vantagens deste processo é a produção em larga escala, de 600 até 1500 metros de perfil por hora de trabalho. No final da linha de perfilação cada perfil é cortado no comprimento estabelecido no projeto.

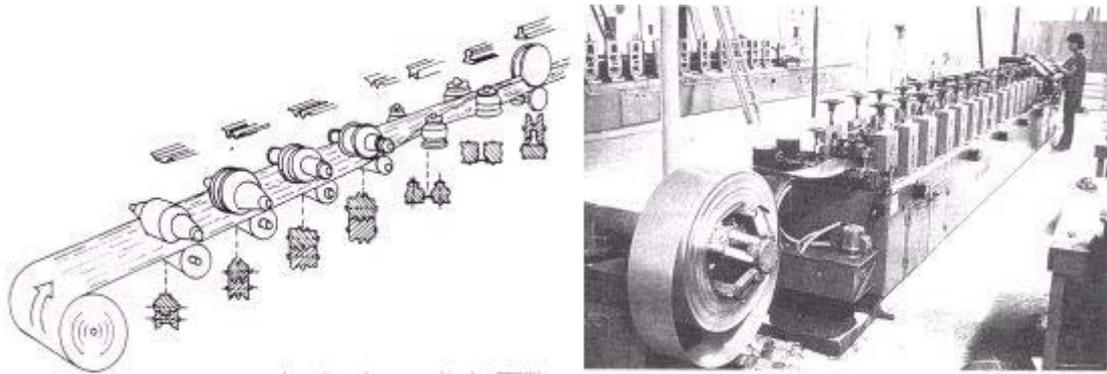


FIGURA 2.2 – Processos de conformação a frio por perfilação.

A dobragem é um processo de fabricação do tipo não contínuo realizado mediante o emprego de prensa dobradeira. Uma chapa de aço, cujo comprimento é limitado pela largura da prensa, é submetida a esforços aplicados em sentidos opostos para provocar a flexão e a deformação plástica, mudando a forma de uma superfície plana para duas superfícies concorrentes, em ângulo, com raio de concordância em sua junção. Estes esforços são obtidos quando a tira é prensada por punção contra uma matriz. A dobra também pode ser obtida por rotação da matriz. Nestes casos cada dobra é obtida isoladamente e a sua quantidade depende da geometria da seção exigida pelo projeto. A FIG. 2.3 ilustra este processo de fabricação.

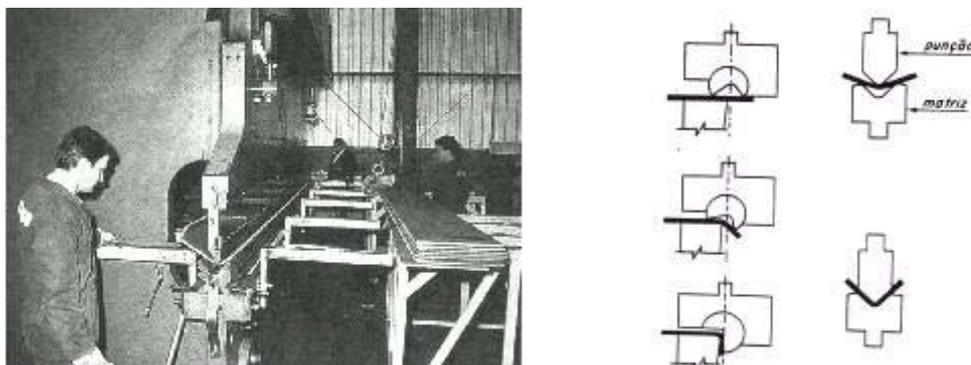


FIGURA 2.3 – Processos de conformação a frio por dobragem.

Quanto à normalização, até 2001 os projetistas brasileiros dispunham para o dimensionamento apenas da norma brasileira P-NB-143 (ABNT, 1967), que estava desatualizada e francamente em desuso. Por isso, os projetistas brasileiros passaram a utilizar normas estrangeiras, tais como as especificações americanas ou “*Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*” (AISI, 1996), a canadense “*Cold-Formed Steel Structural Members*” CAN-S136 (CSA, 1994) e a europeia “*Design of Steel Structures*” EC3 partes 1.1 e 1.3 (EUROCODE 3, 1998) que foram as mais utilizadas para suprir a falta de uma norma brasileira mais atualizada.

Atualmente, encontra-se em vigor no Brasil a norma de Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio, a NBR14762 (ABNT, 2001), que tem base nos princípios dos métodos dos estados limites.

Devido à intensa utilização dos perfis formados a frio, tornou-se prioritária a implantação de linhas de pesquisas relacionadas com o tema, fornecendo subsídios importantes para projetos mais racionais de estruturas e para a melhoria da qualidade desses perfis e das estruturas onde são utilizados.

2.2 – Ligações

O projeto de estruturas metálicas envolve, além do dimensionamento das vigas e pilares, o cálculo das ligações e seus diversos componentes, uma vez que a resposta do sistema estrutural às ações depende das propriedades estruturais das mesmas. O termo “ligações” empregado nesse trabalho refere-se à união viga-pilar. Apesar do termo ligações estar sendo utilizado sistematicamente ao longo da análise experimental, em alguns casos o mesmo deve ser interpretado como “nó”, isto é, uma região finita que engloba toda a região do pilar e das vigas, afetada pela ligação.

Em um projeto estrutural constituído por estruturas metálicas as ligações entre os seus diversos componentes devem ser especificadas e calculadas de forma que a sua resistência de cálculo seja igual ou superior aos máximos esforços solicitantes de

cálculo. Além disso, as partes constituintes de uma ligação, seus elementos e os meios de ligação, também devem ser dimensionados para resistir aos esforços a que são submetidos.

Os meios de ligação são os componentes que promovem a união entre as partes da estrutura para formar a ligação. São, por exemplo, os parafusos, as soldas e os pinos. Nesse trabalho será tratado como meio de ligação o rebite tubular com rosca interna.

Os elementos de ligação são componentes auxiliares usados na conexão que permitem ou facilitam a transmissão dos esforços entre as partes ligadas, tais como: enrijecedores, chapas de extremidades, cantoneiras, consolos, talas de alma e mesa, chapas de gusset, cobrejuntas, etc., bem como todas as partes das peças ligadas que são afetadas localmente pela ligação. No caso específico desse trabalho, procurou-se projetar as ligações de duas formas: com a utilização ou não de chapas de reforço (internas ao pilar e nos flanges superior e inferior das vigas), de forma que obtivéssemos uma comparação dos resultados.

2.3 – Comportamento Semi-Rígido das Ligações

O uso das ligações semi-rígidas nas estruturas metálicas tem como objetivo principal redistribuir os momentos fletores nas vigas e pilares e, conseqüentemente, reduzir o consumo de aço. Ao transmitirem uma parte do momento fletor ao pilar ou à viga adjacente, esse esforço nas extremidades e no meio da vão da viga podem ser balanceados de forma ótima.

A resposta do sistema estrutural às ações é em geral influenciada pelas propriedades estruturais das barras (vigas e pilares) e das ligações. As características de uma ligação relacionadas à sua flexibilidade e rigidez envolvem a relação momento-rotação, que são melhor descritas por curvas com o momento atuante (M) como ordenada e a rotação relativa entre as barras conectadas (θ) como abscissa. O grau de rigidez deve ser medido na interseção dos eixos das barras envolvidas sendo que, o ângulo θ expressa a rotação

relativa entre a seção transversal da viga e o eixo do pilar, após a atuação do carregamento, conforme esquematiza a FIG. 2.4.

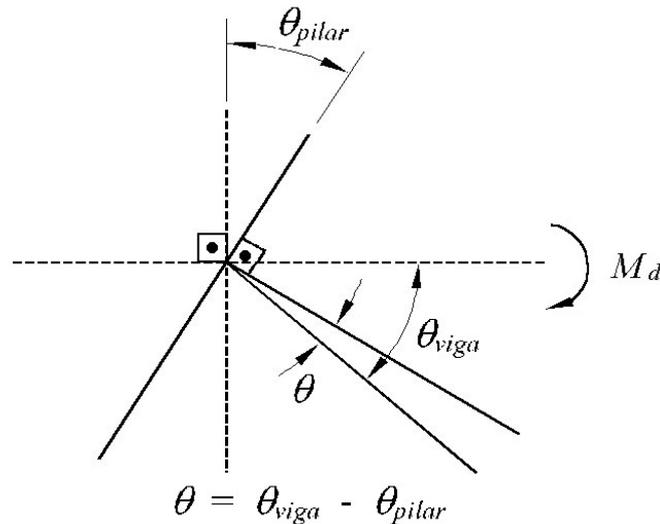


FIGURA 2.4 – Rotação relativa entre vigas e pilares.

Normalmente, na análise das estruturas metálicas, representa-se o comportamento das ligações por meio de duas hipóteses extremas, ou seja, como rígidas (sem rotação relativa) ou como flexíveis (rótulas). Para o propósito de projeto essas ligações são convenientes, já que seu procedimento de cálculo é relativamente fácil, mas não são adequadas para a grande maioria das estruturas. No entanto, existe uma tendência de se tratar as ligações como semi-rígidas, pois na realidade, as mesmas possuem rigidez situada entre os dois casos extremos (rígida ou flexível). Através de inúmeros testes experimentais chegou-se à conclusão de que até mesmo as ligações classificadas como perfeitamente rotuladas apresentavam alguma rigidez.

Nas ligações rígidas, conforme SIDERBRÁS (1988), o ângulo entre os elementos estruturais que se interceptam permanece essencialmente o mesmo após o carregamento da estrutura ($\theta_{pilar} = \theta_{viga}$, então $\theta = 0$). Existe uma restrição à rotação da ordem de 90%, isto é, desenvolve pelo menos 90% do momento correspondente ao engastamento perfeito. Neste tipo de ligação, é considerada a transmissão total do momento fletor da viga para o pilar através de esforços de tração e compressão nas mesas da viga. Além da força normal transmitida pelas mesas, a força cortante é transmitida pela alma da viga.

O projeto dessas ligações assume que a deformação do nó deve ser suficientemente pequena (grande rigidez) para qualquer que seja a influência na distribuição dos momentos nas vigas e pilares. Tais ligações têm um custo bastante elevado uma vez que, para executá-las é necessário utilizar-se de muitos parafusos, porcas e soldas, aumentando o consumo final de aço. Além disso, sua execução na prática é bastante complicada e trabalhosa em comparação com qualquer outro tipo de ligação.

A ligação é considerada flexível quando a rotação relativa entre os componentes estruturais, após o carregamento, atinja 80% ou mais daquela teoricamente esperada se a conexão fosse rótula perfeita ($\theta_{pilar} = 0$, então $\theta = \theta_{viga}$). Nesse caso, os momentos fletores transmitidos através de tais componentes são aproximadamente nulos, e na prática são considerados nulos. As ligações flexíveis transmitem apenas esforços cortantes e, eventualmente, força normal das extremidades das vigas para os pilares. Tais ligações devem possuir capacidade adequada de rotação sem desenvolver momentos resistentes.

Para os demais casos, a ligação é tratada como semi-rígida. Isto é, a restrição à rotação está entre 20% (ligação flexível) e 90% (ligação rígida) daquela teoricamente necessária para evitar qualquer rotação ($\theta_{viga} > \theta_{pilar}$ então, $\theta = \theta_{viga} - \theta_{pilar}$). Desta forma, o momento imposto aos elementos de apoio não é nulo (ou quase nulo), como no caso de ligações flexíveis, nem máximo como no caso de conexões rígidas.

Os resultados dos esforços nas barras, deslocamentos e rotações, dependendo do tipo de ligação considerada, podem variar em cada caso. Desta forma, além das barras que compõem a estrutura, também as ligações deverão estar convenientemente concebidas e dimensionadas, sob pena da estrutura não se comportar conforme o desejado. Deve-se então indicar corretamente o grau de rigidez de cada ligação. A FIG. 2.5, adaptada de BAHARI e SHERBOURNE (1994), demonstra como o momento fletor nas barras e as deformações horizontais podem variar para cada tipo de apoio considerado, mesmo que o esforço aplicado na estrutura seja igual para todos os casos.

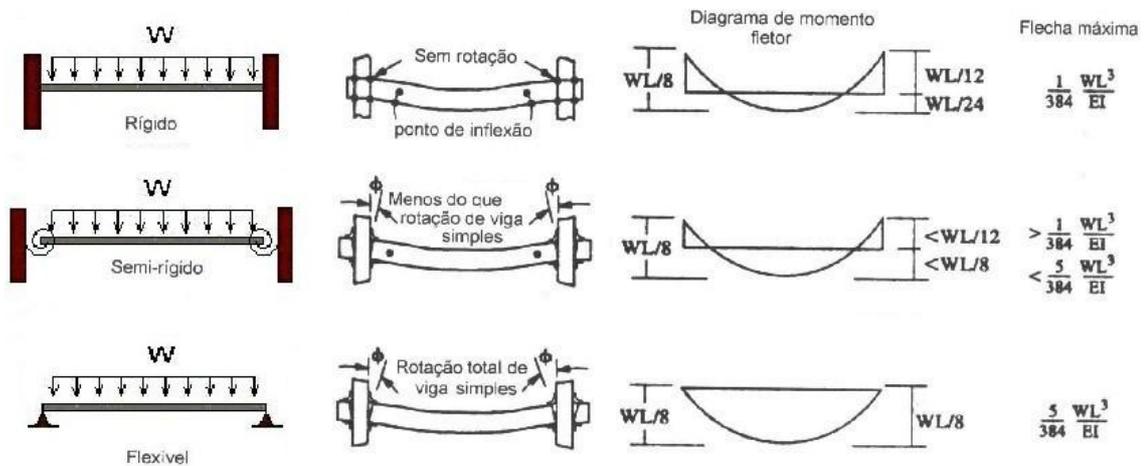


FIGURA 2.5 – Diagramas de momento fletor e flecha para carregamento uniforme.

Para a maioria das ligações, as deformações axiais e de cisalhamento são pequenas quando comparadas com a deformação rotacional. É por esse motivo que praticamente somente a deformação rotacional da ligação necessita ser considerada. Tal deformação rotacional é expressa como função do momento fletor atuante na ligação. Quando se aplica um momento M na ligação ela gira de uma quantidade θ .

O tratamento das ligações em seu comportamento real, ou seja, como semi-rígidas, considerando problemas como estabilidade da estrutura (comprimento efetivo, flambagem, etc) e plastificação das barras (vigas e pilares) permite se ter, ao final do projeto, uma estrutura mais leve e de menor custo, sem perda de resistência. Isto leva a projetos mais otimizados e com o mesmo nível de segurança à ruína que os projetos com ligações tratadas como rígidas ou flexíveis.

2.4 – Classificação das Ligações

Conforme já foi visto, as ligações são tradicionalmente classificadas como flexíveis, rígidas ou semi-rígidas, levando em consideração o seu grau de rigidez. Porém existem na literatura várias maneiras de se classificar as ligações, que diferem entre si na determinação dos limites entre cada tipo.

2.4.1 – Sistema de Classificação Segundo a NBR8800

A norma brasileira de Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios, NBR8800 (ABNT, 1986) define dois tipos de estruturas:

- Barras com ligações flexíveis nos apoios, que levam em conta apenas as reações de cálculo compatíveis com a hipótese de flexibilidade. Estas ligações flexíveis devem permitir a rotação de vigas simplesmente apoiadas nas extremidades;
- Barras com ligações rígidas nos apoios, que levam em conta os efeitos combinados de todos os esforços solicitantes de cálculo, provenientes da rigidez total ou parcial das ligações.

2.4.2 – Sistema de Classificação Segundo as Especificações Americanas

As especificações do “*Manual of Steel Construction: Allowable Stress Design*” ASD (AISC, 1989), com base no dimensionamento pelas tensões admissíveis, listam três tipos de estruturas:

- Estruturas do tipo 1 ou “*rigid-frame*”: a ligação viga-pilar possui rigidez suficiente para manter o ângulo geométrico original entre as barras;
- Estruturas do tipo 2 ou “*simple-framing*”: a viga e a ligação transferem apenas reações verticais (cisalhamento), sem momento fletor. A ligação é livre para girar sem qualquer restrição;
- Estruturas do tipo 3 ou “*semi-rigid-framing*”: considera-se que a ligação possui uma capacidade intermediária entre rígida (tipo 1) e flexível (tipo 2).

Já o “*Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design*” LFRD (AISC, 1999), com base no dimensionamento pela resistência última, indica dois tipos de estruturas:

- Estruturas do tipo FR ou “*fully restrained*”: a ligação é considerada completamente resistente;
- Estruturas do tipo PR ou “*partially restrained*”: a ligação é parcialmente restringida.

O tipo FR é análogo ao tipo 1 da especificação do ASD e, por sua vez, o tipo PR corresponde aos tipos 2 e 3, sendo que se esse for considerado, o efeito da rigidez da ligação pode ser incluso na análise e no projeto da estrutura.

2.4.3 – Sistema de Classificação Segundo o Eurocode e BJORHOVDE *et al* (1990)

As recomendações do EUROCODE 3 (1998), seguindo a classificação sugerida por BJORHOVDE *et al* (1990), baseia-se no momento atuante na ligação (M) em relação ao momento de plastificação da viga suportada (M_p), conforme Eq. 2.1.

$$\bar{M} = \frac{M}{M_p} \quad (2.1)$$

A rotação por sua vez é normalizada em relação à rigidez da viga ou de uma rotação de referência da mesma, conforme Eq. 2.2.

$$\bar{\theta} = \frac{\theta}{\theta_p} \quad (2.2)$$

Para as recomendações europeias, a rotação de referência (θ_p) dada por:

$$\theta_p = \frac{M_p}{(EI/L)} \quad (2.3)$$

e, para BJORHOVDE *et al* (1990) essa rotação é dada por:

$$\theta_p = \frac{M_p}{(EI/5d)} \quad (2.4)$$

Onde:

θ : rotação relativa da ligação;

θ_p : rotação de referência;

L : comprimento da viga;

d : altura da viga e

EI : rigidez à flexão da viga.

O aspecto do gráfico $M-\theta$ feito a partir do sistema de classificação de BJORHOVDE *et al* (1990), representado na FIG. 2.6, mostra as divisões entre as regiões de ligações rígidas, semi-rígidas e flexíveis.

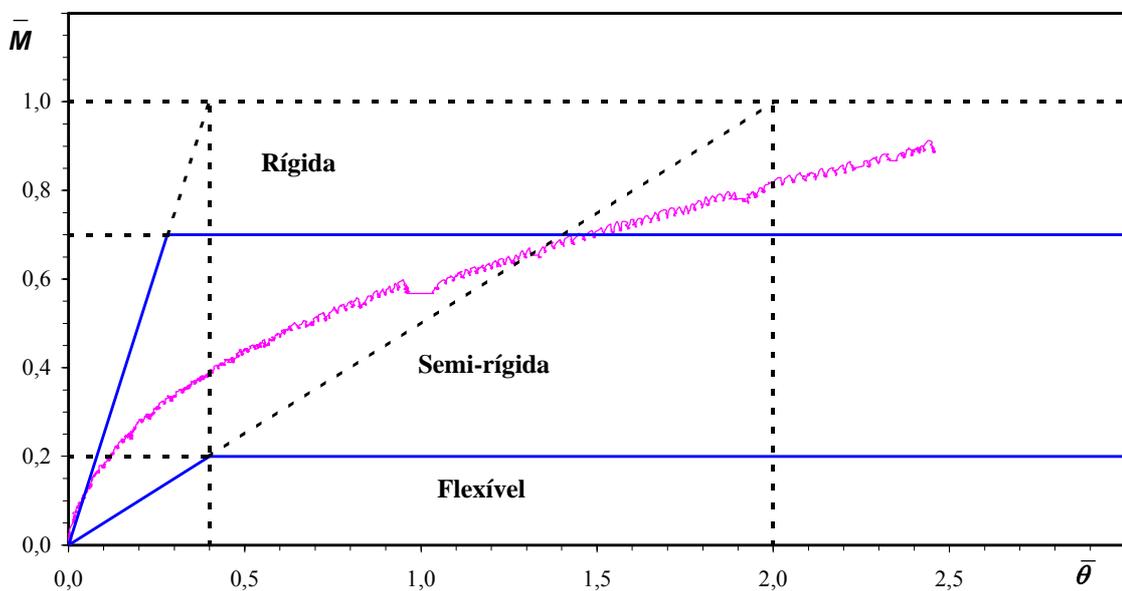


FIGURA 2.6 – Sistema de classificação segundo BJORHOVDE *et al* (1990).

O sistema de classificação do EUROCODE 3 (1998) indica diferentes limites entre as regiões de ligações rígidas e semi-rígidas, para estruturas contraventadas e não

contraventadas, conforme FIG. 2.2, enquanto o limite entre a região de ligações flexíveis e semi-rígidas é o mesmo para os dois tipos de estruturas.

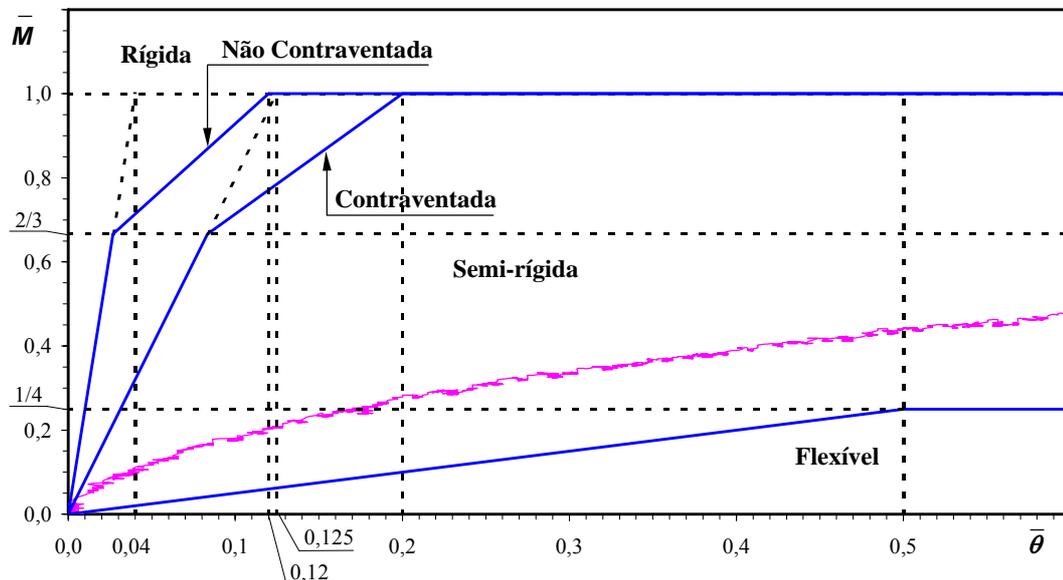


FIGURA 2.7 – Sistema de classificação do EUROCODE 3 (1998).

2.4.4 – Sistema de Classificação Segundo HASAN *et al* (1998)

Apesar de serem bem completos, os sistemas de classificação do EUROCODE 3 (1998) e BJORHOVDE *et al* (1990) não levam em consideração o comportamento não-linear das ligações e a sua rigidez. HASAN *et al* (1997) mostraram que a rigidez inicial de uma ligação não pode ser expressa em termos da rigidez à flexão da viga e tampouco em função da altura da viga. O sistema proposto por HASAN *et al* (1998) consiste em dividir o diagrama $M-\theta$, para estrutura não contraventada, em três zonas através de retas, cujas equações baseiam-se no modelo de potência de KISHI e CHEN (1990).

Este modelo de potência é composto de três parâmetros, que devem ser definidos para ajustar as curvas limítrofes entre as regiões do diagrama $M-\theta$, a rigidez inicial da ligação K_{ij} , o momento último da ligação M_u e parâmetro de forma β , e pode ser expresso conforme a Eq. 2.5.

$$M = \frac{K_{ij}\theta}{\left\{1 + \left(\frac{K_{ij}\theta}{M_u}\right)^\beta\right\}^{\frac{1}{\beta}}} \quad (2.5)$$

Os resultados obtidos por HASAN *et al* (1998) foram os seguintes:

- O maior e o menor valor de rigidez inicial de uma ligação semi-rígida (K_{ij}), deve estar entre 10^6 e $10^{4,5}$ kip.in/rad, respectivamente. Estes valores podem ser aproximados para $10^6/113$ e $10^{4,5}/113$ kN.m/rad.
- O momento último (M_u) das ligações semi-rígidas deve ser menor que o momento plástico da viga (M_p) e maior que 25% do mesmo. Ou seja, $0,25M_p \leq M_u \leq M_p$.
- O valor do parâmetro de forma é adotado por calibração. Foi observado que $\beta=1$ é suficiente para uma curva precisa e simples.

A FIG. 2.8 mostra a aparência do diagrama $M-\theta$ de acordo com a classificação proposta por HASAN *et al* (1998).

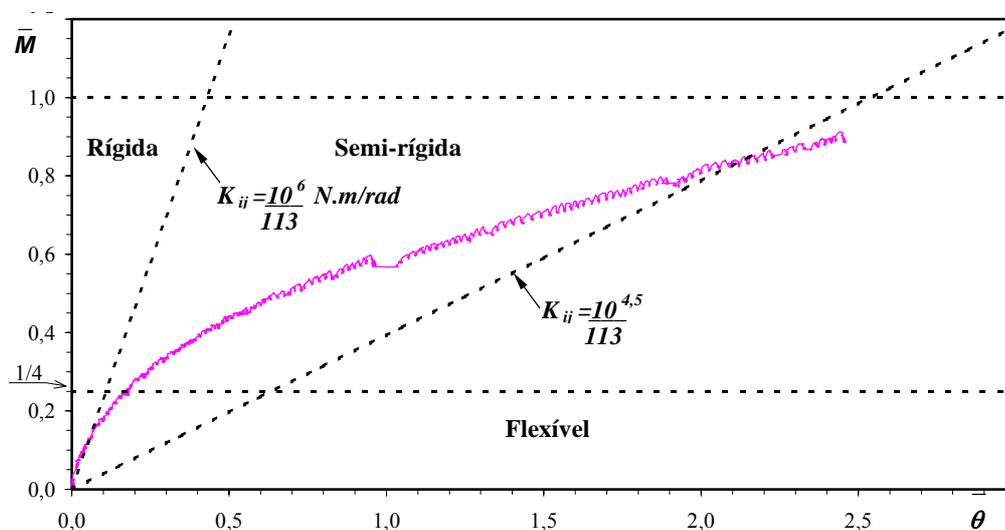


FIGURA 2.8 – Sistema de classificação proposto por HASAN *et al* (1998).

2.4.5 – Sistema de Classificação Segundo NETHERCOT *et al* (1998)

NETHERCOT *et al* (1998) apresentaram um novo sistema de classificação que leva em consideração, simultaneamente, a resistência e a rigidez da ligação bem como as características do pórtico onde as ligações estão presentes. Desta forma, novos termos foram propostos para definir as categorias de conexões, já que termos como “rígida” e “completamente resistente” são apropriados para nomear apenas um aspecto do comportamento da ligação. As ligações foram então divididas entre quatro categorias:

- Ligações completamente conectadas: aquelas que possuem grande rigidez e resistência. O momento fletor transferido é um pouco menor que aquele calculado em um pórtico rígido.
- Ligações parcialmente conectadas: têm rigidez e resistência moderadas;
- Ligações conectadas por rótulas: aquelas que possuem ou baixa resistência ou pouca rigidez;
- Ligações não estruturais: são aquelas que não satisfazem as exigências de resistência, rigidez ou ductilidade dos outros três tipos de conexões. Acrescenta-se também aquelas que falham antes de chegarem a níveis adequados de rotação e conseqüentemente devem ser reprojctadas.

A partir desse sistema de classificação, uma ligação pode ser considerada tanto no Estado Limite Último quanto no Estado Limite de Utilização.

Na FIG. 2.9 está demonstrada a aparência do diagrama $M-\theta$ para a classificação de acordo com o Estado Limite Último, e na FIG. 2.10 alguns exemplos de sua aplicação. A aparência do diagrama $M-\theta$ e seus exemplos, para o Estado Limite de Utilização, são apresentados nas FIG. 2.11 e 2.12 respectivamente.

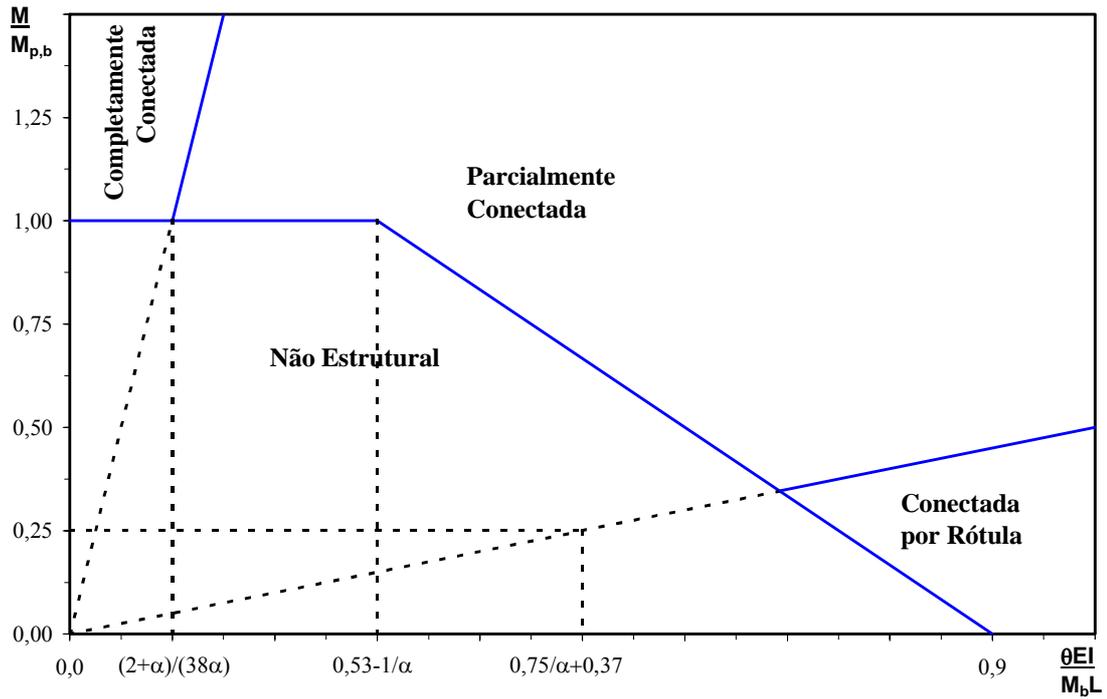


FIGURA 2.9 – Sistema de classificação proposto por NETHERCOT *et al* (1998) no Estado Limite Último.

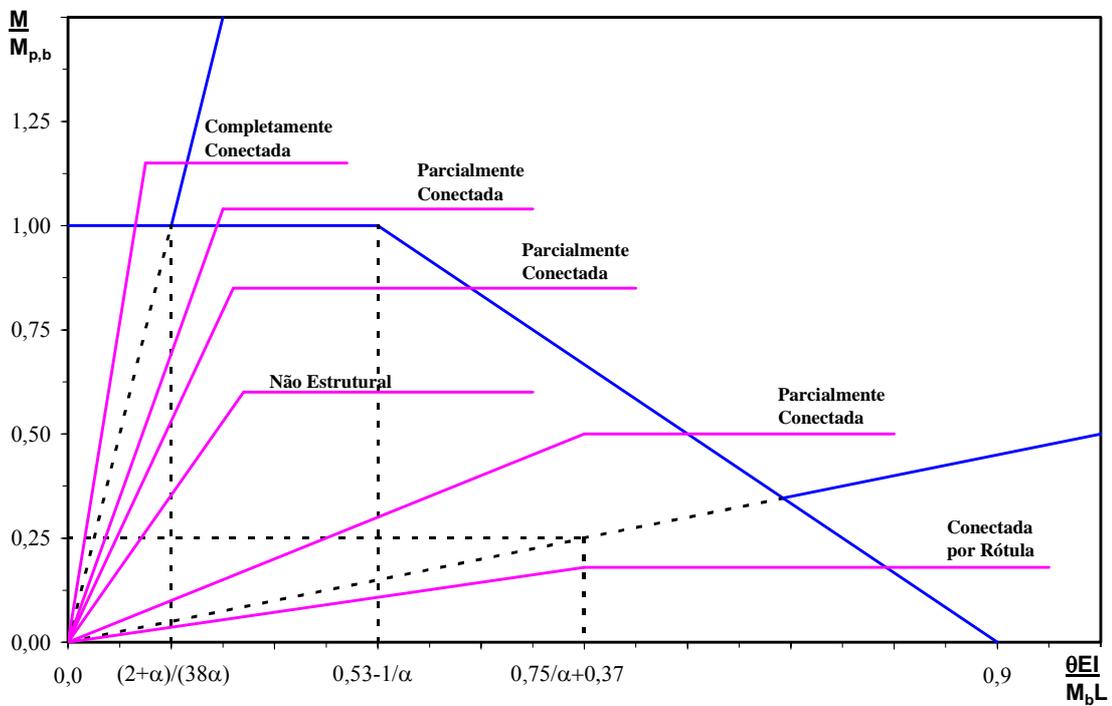


FIGURA 2.10 – Exemplos de aplicação no Estado Limite Último.

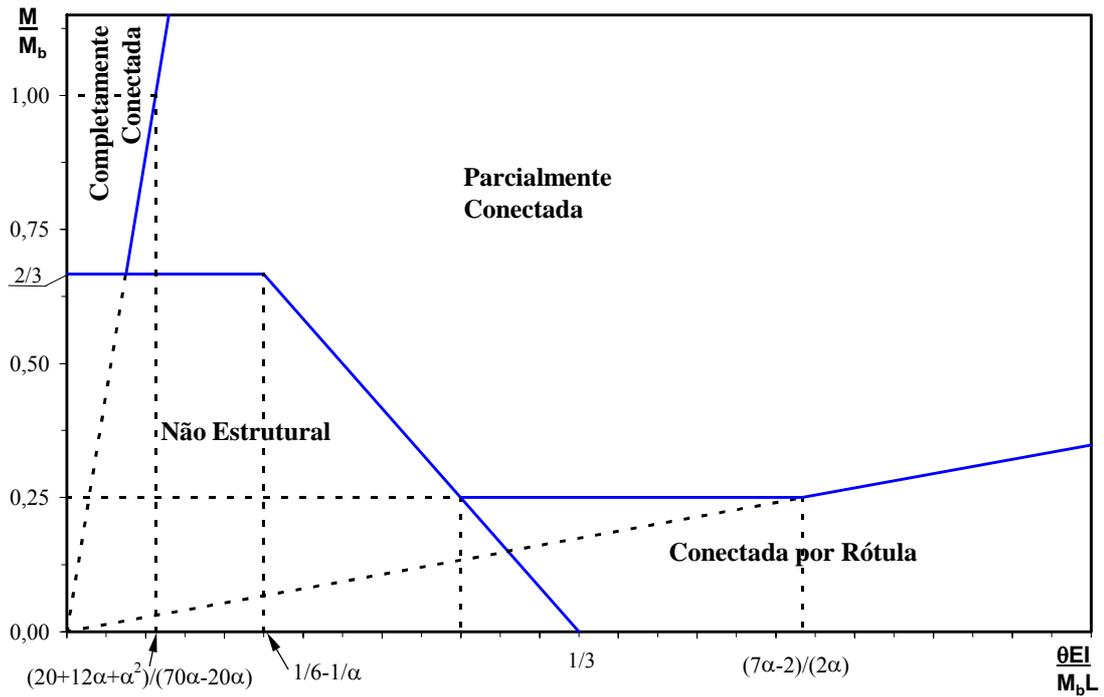


FIGURA 2.11 – Sistema de classificação proposto por NETHERCOT *et al* (1998) no Estado Limite de Utilização.

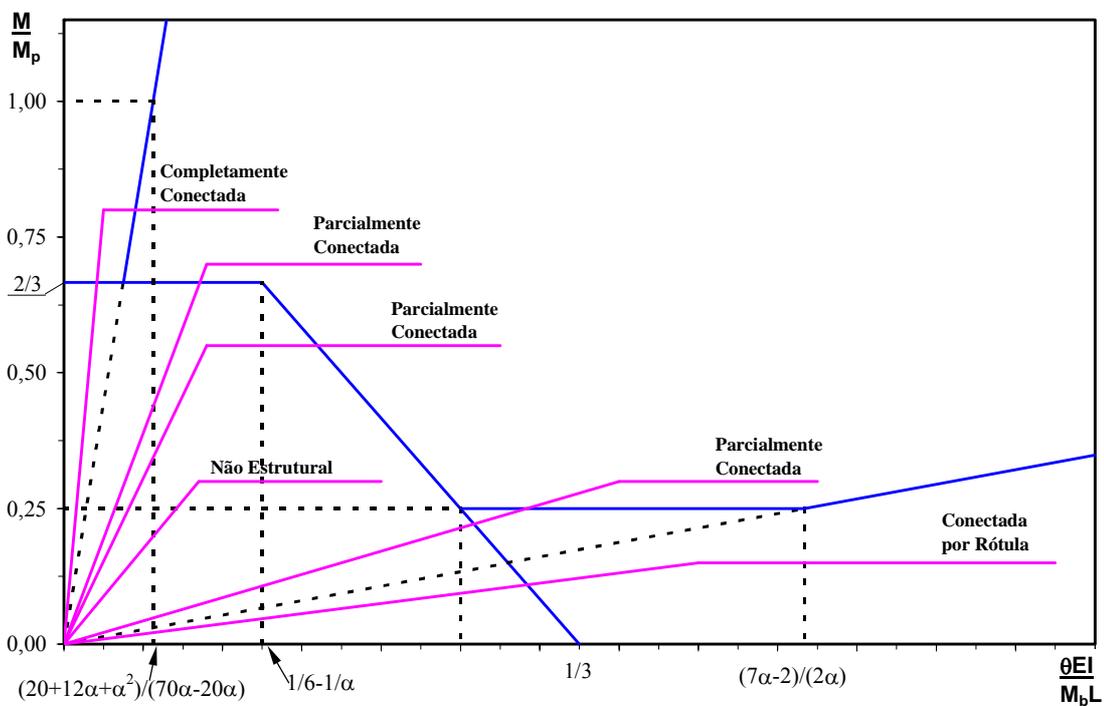


FIGURA 2.12 – Exemplos de aplicação no Estado Limite de Utilização.

Onde:

α : razão da rigidez rotacional da viga, expressa por $\alpha = \frac{K_c}{EI/L}$;

K_c : o somatório da rigidez rotacional de todas as barras conectadas ao nó com exceção da viga considerada. Para pilares internos, K_c deve ser considerado infinito;

L : comprimento da viga;

EI : rigidez à flexão da viga;

M_p : o momento de plastificação da ligação;

$M_{p,b}$: o momento de plastificação da viga; e

M_b : o momento na viga.

2.5 – Modelagem Analítica da Relação Momento-Rotação

Por ser extremamente dispendioso armazenar as relações momento-rotação para todos os tipos e dimensões de ligações, mesmo as mais usuais, uma solução atrativa é derivar e armazenar uma única curva padrão, expressa em termos dos parâmetros geométricos para cada tipo de ligação. Assim, em um programa de análise estrutural, os parâmetros geométricos podem ser introduzidos e substituídos em uma função padronizada a qual irá gerar dados de momento-rotação específicos para cada tipo de ligação na estrutura.

O comportamento das ligações de uma estrutura metálica tem efeito significativo sobre o comportamento global de toda a estrutura. A importância das ligações é reconhecida e muitos testes têm sido feitos nos mais diversos tipos de ligações entre vigas e pilares. Tais testes mostram que a relação momento-rotação ($M-\theta$) é essencialmente não linear.

Algumas pesquisas desenvolvidas têm como objetivo solucionar o problema relativo a proposições de modelos matemáticos que representem o comportamento não-linear das ligações semi-rígidas. Geralmente, os modelos matemáticos são baseados em dados

experimentais, mas é possível obter bons resultados a partir de procedimentos numéricos.

A seguir serão apresentados os modelos da Linha da Viga e o Modelo Analítico de Potência com 3 Parâmetros de KISHI e CHEN (1990), cujos resultados representaram com maior fidelidade as respostas obtidas experimentalmente por GONZAGA (2003). Em seu trabalho GONZAGA (2003) abordou também o modelo polinomial de FRYE e MORRIS (1975), o modelo de potência de quatro parâmetros de RICHARD-ABBOTT (1975) e KISHI E CHEN (1990) além da técnica de ajuste B-Spline tensionada.

2.5.1 – Método da Linha da Viga

Na situação onde o suporte de uma viga, submetida a um determinado carregamento, é rígido, podemos utilizar o método da linha da viga para encontrar o momento e a rotação de sua ligação. Este método consiste na construção da linha da viga e da curva momento-rotação ($M-\theta$) da ligação em um mesmo diagrama.

Considerando uma viga prismática ij , de comprimento L , FIG. 2.13, A partir da teoria estrutural pode-se demonstrar que a rotação θ_i na extremidade i é dada pela Eq. 2.6.

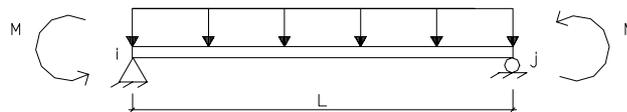


FIGURA 2.13 – Viga com carregamento distribuído.

$$\theta_i = \frac{L}{6EI} \left[2(M_{fi} - M_i) - (M_{fj} - M_j) \right] \quad (2.6)$$

Onde M_{fi} e M_{fj} são, respectivamente, os momentos nas extremidades i e j da viga para uma ligação perfeitamente rígida; M_i e M_j são, para as mesmas extremidades, os momentos parciais para uma ligação real.

Da mesma forma, e se considerarmos a extremidade j perfeitamente rígida, teremos que $\theta_j = 0$, portanto:

$$\theta_j = \frac{L}{6EI} \left[2(M_{fj} - M_j) - (M_{fi} - M_i) \right] = 0 \quad (2.7)$$

$$(M_{fj} - M_j) = (M_{fi} - M_i) / 2 \quad (2.8)$$

Substituindo a Eq. 2.8 na Eq. 2.6 obtém-se, considerando-se a extremidade j rígida:

$$\theta_i = \frac{L}{4EI} (M_{fi} - M_i) \quad (2.9)$$

Se a extremidade j for rotulada, então M_{fj} e M_j são nulos e a Eq. 2.6 reduz-se a:

$$\theta_i = \frac{L}{3EI} (M_{fi} - M_i) \quad (2.10)$$

Deve-se perceber que os denominadores das Eq. 2.9 e Eq. 2.10 possuem coeficientes de rigidez familiares quando a extremidade oposta é considerada fixa e rotulada, respectivamente. Se as ligações nas duas extremidades são idênticas e o carregamento simétrico, M_{fi} e M_{fj} possuem valores iguais e opostos, o mesmo ocorrendo para os valores de M_i e M_j . Portanto, ter-se-á:

$$(M_{fj} - M_j) = -(M_{fi} - M_i) \quad (2.11)$$

Desta forma, a Eq. 2.6 reduz-se a:

$$\theta_i = \frac{L}{2EI} (M_{fi} - M_i) \quad (2.12)$$

Considerando um carregamento uniforme w ao longo da barra tem-se que:

$$M_{fi} = \frac{wL^2}{12} \quad (2.13)$$

Para a extremidade i rotulada tem-se $M_i = 0$; portanto, a partir da Eq. 2.12 tem-se que a rotação na extremidade da barra é:

$$\theta_i = \frac{L}{2EI} \frac{wL^2}{12} = \frac{wL^3}{24EI} \quad (2.14)$$

As Eq. 2.13 e Eq. 2.14 representam, respectivamente, o resultado clássico dos momentos fletores e rotações para uma barra de comprimento L e carregamento uniforme.

Considerando uma ligação semi-rígida teremos que $M_i = M$; portanto, voltando à Eq. 2.12, tem-se que a rotação na extremidade da barra é:

$$\theta_i = \frac{L}{2EI} \left(\frac{wL^2}{12} - M \right) = \frac{wL^3}{24EI} - \frac{ML}{2EI} \quad (2.15)$$

Tem-se assim a equação de uma reta que descreve a linha da viga:

$$M = \frac{wL^2}{24EI} - \frac{wL^2}{24EI} \cdot \frac{\theta}{\frac{wL^3}{24EI}} = \frac{wL^2}{12} \left(1 - \frac{24EI}{wL^3} \cdot \theta \right) \quad (2.16)$$

A interseção da linha da viga com a curva $M-\theta$ da ligação determina o momento M_v e a rotação θ_v na extremidade da viga, como mostrado na FIG. 2.14.

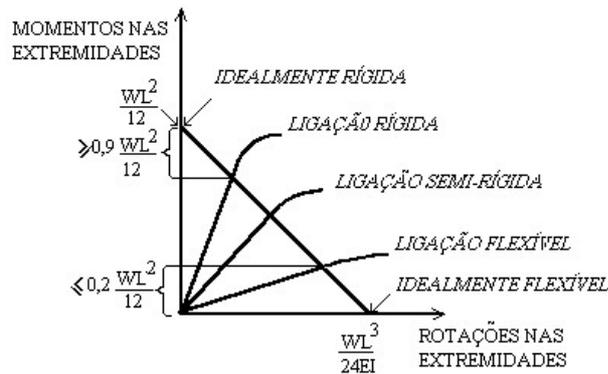


FIGURA 2.14 – Diagramas $M-\theta$ para os tipos de ligação, considerando-se a linha de viga.

2.5.2 – Modelo de Potência de Três Parâmetros

Um modelo de potência de três parâmetros foi proposto por KISHI e CHEN (1990) que estudaram o comportamento de ligações com duplas cantoneiras de alma, com e sem a presença de cantoneiras de topo e assento. O sistema de classificação proposto por HASAN et al (1998) baseia-se nesse modelo de potência, que é composto de três parâmetros e devem ser definidos para ajustar a curva do diagrama $M-\theta$, sendo expresso pela Eq. 2.17. Diversos pesquisadores basearam-se nesta equação para descrever o comportamento de curvas experimentais de momento-rotação, provando que esse modelo de ajuste pode ser utilizado para diversos tipos de ligações, desde que os parâmetros iniciais da equação sejam bem definidos.

$$M = \frac{K_i \theta}{\left\{ 1 + \left(\frac{K_i \theta}{M_p} \right)^\beta \right\}^{\frac{1}{\beta}}} \quad (2.17)$$

Onde:

K_i : rigidez inicial da ligação;

M_p : momento de plastificação da ligação;

β : parâmetro de forma da curva $M-\theta$.

Destes, apenas o parâmetro de forma não é determinado graficamente. Uma equação empírica para calcular seu valor foi proposta por CHEN e KISHI (1989) como uma função linear de $\log_{10}\theta_0$, sendo $\theta_0 = M_p/K_i$, onde as constantes foram determinadas por uma análise estatística de um banco de dados de testes realizados com modelos de ligações com cantoneiras de topo e assento. GOTO e MIYASHITA (1998) continuaram essa pesquisa e propuseram as equações de β para as ligações com chapa de extremidade estendida. A TAB. 2.1, conforme GOTO e MIYASHITA (1998), mostra algumas das equações obtidas por esses autores, além daquela obtida por CHEN e KISHI (1989):

TABELA 2.1 – Equações empíricas para o parâmetro de forma β .

Tipo de Ligação	Parâmetro β
Cantoneiras de topo e assento	1,398X+4,631 (X>-2,72)
	0,827 (X≤-2,72)
Chapa de extremidade estendida na região de tração e compressão sem enrijecedor no pilar	1,730X+6,077 (X>-2,81)
	1,216 (X≤-2,81)
Chapa de extremidade estendida na região de tração e compressão com enrijecedor no pilar	1,832X+5,021 (X>-2,00)
	1,357 (X≤-2,00)
Chapa de extremidade estendida apenas na região de tração sem enrijecedor no pilar	1,021X+4,392 (X>-2,36)
	1,982 (X≤-2,36)
Chapa de extremidade estendida apenas na região de tração com enrijecedor no pilar	0,896X+4,177 (X>-2,12)
	1,569 (X≤-2,12)

Nota: X = $\log_{10}\theta_0$.

O modelo de potência de três parâmetros foi utilizado em diversas pesquisas posteriores, visando sua validação ou adaptação, no caso das ligações com os perfis formados a frio. Dentre estas pesquisas, pode-se citar:

a) Comparação feita por FOLEY e VINNAKOTA (1995)

Para validar o modelo original de KISHI e CHEN (1990), FOLEY e VINNAKOTA (1995) usaram os resultados experimentais dos testes de ligações com chapa de extremidade realizados por IOANNIDES (1978). Seis ensaios foram feitos para estudar o comportamento da ligação e, em cada um, variou-se a espessura da chapa de extremidade e do flange do pilar. Todas as chapas e perfis utilizados eram de aço ASTM-A36 e os parafusos ASTM-A325.

O valor do parâmetro de forma foi fixado em $\beta = 0,95$ por descrever com melhor fidelidade as curvas dos seis ensaios. Esse valor pode ser estatisticamente determinado, desde que se disponha de uma maior quantidade de ensaios.

Na TAB. 2.2 são apresentadas as propriedades geométricas dos seis modelos ensaiados bem como os resultados dos valores da rigidez inicial das ligações e o momento de plastificação determinados após a análise dos dados experimentais. Os furos das chapas possuíam o diâmetro padronizado de 1/16in (1,50mm) maior que o diâmetro nominal dos parafusos.

TABELA 2.2 – Modelos utilizados por IOANNIDES (1978).

Teste	Viga	Pilar	t_{ep} (in)	ϕ Paraf. (in)	K_i (kip in/rad)	M_p (kip in)	β
1	W14x22	W8x35	0,625	3/4	286,104	1195	0,95
2	W18x35	W10x49	0,750	7/8	1245,84	2020	0,95
3	W24x55	W14x48	0,875	1	2770,88	3107	0,95
4	W14x22	W8x35	0,875	3/4	363,50	1195	0,95
5	W18x35	W10x49	1,250	7/8	1344,96	2257	0,95
6	W24x55	W14x48	1,250	1	3663,36	3140	0,95

As FIG. 2.15 a 2.17, conforme FOLEY e VINNAKOTA (1995), mostram os resultados do modelo matemático sobrepostos aos dados experimentais. Estes autores concluíram

que o ajuste de potência de três parâmetros prediz adequadamente os dados provenientes dos testes realizados. Os dados de momento e rotação além da rigidez inicial foram corretamente representados pelo modelo matemático.

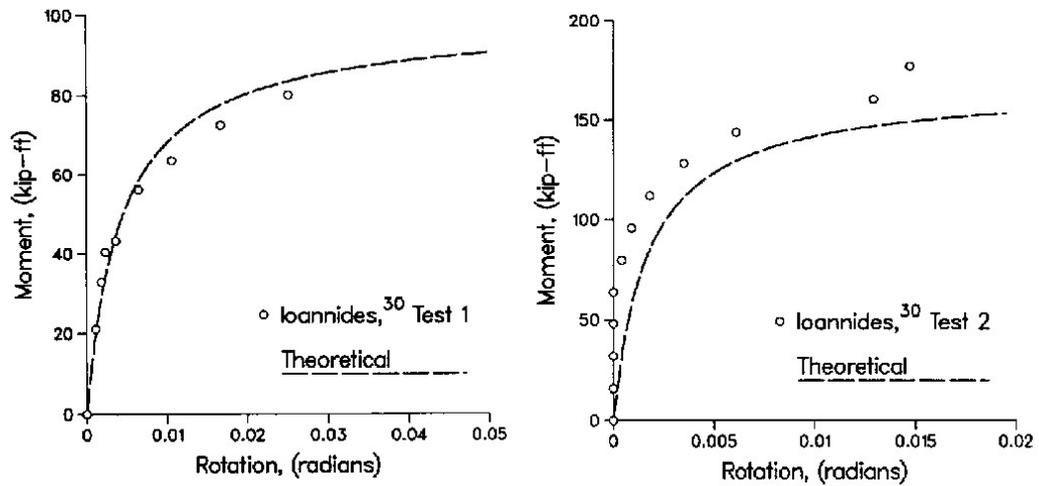


FIGURA 2.15 – Testes 1 e 2 comparados ao ajuste de potência de três parâmetros [FOLEY e VINNAKOTA (1995)].

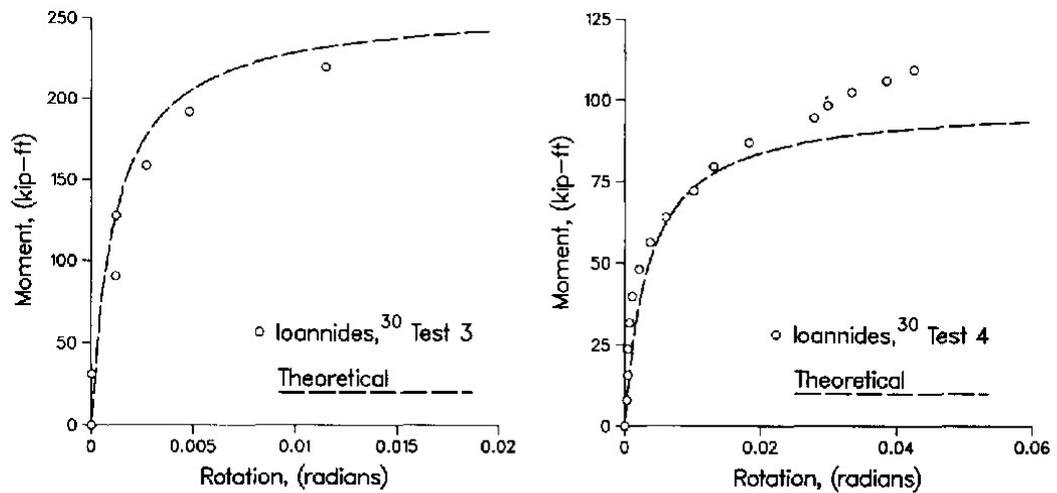


FIGURA 2.16 – Testes 3 e 4 comparados ao ajuste de potência de três parâmetros [FOLEY e VINNAKOTA (1995)].

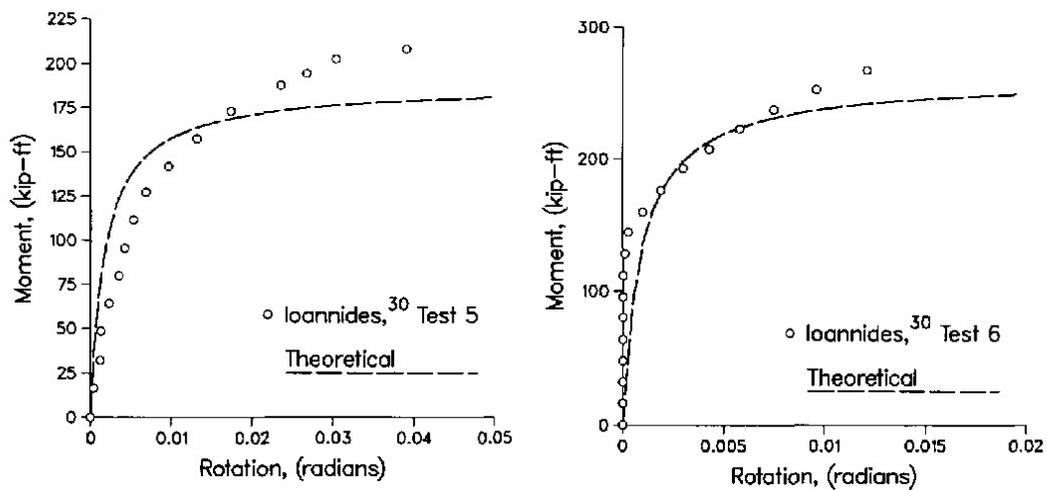


FIGURA 2.17 – Testes 5 e 6 comparados ao ajuste de potência de três parâmetros [FOLEY e VINNAKOTA (1995)].

b) Comparação feita por GONZAGA (2003)

GONZAGA (2003) realizou quatro ensaios em modelos com ligações parafusadas e quatro com ligações soldadas, todas utilizando perfis formados a frio. Na pesquisa foi utilizado o modelo de ajuste de potência de três parâmetros para tentar representar matematicamente o comportamento não linear das curvas $M-\theta$ obtidas, visando uma futura adaptação ou calibração do modelo para os perfis formados a frio.

Todos os modelos foram fabricados com aço USI-SAC-300 produzido pela USIMINAS e com parafusos ASTM-A325 de diâmetro $\phi 16\text{mm}$. Os eletrodos, quando utilizados, eram de classe E7018G. A TAB. 2.3 resume as principais características e diferenças entre os modelos ensaiados.

As chapas de reforço foram soldadas na mesa superior e inferior das vigas de forma a garantir a semi-rigidez dos modelos. O modelo 02A teve a rigidez da ligação garantida pela presença de quatro perfis U134x105x16 conectados por parafusos ao pilar, na altura das mesas da viga. No modelo 03B a rigidez foi garantida pela presença de dois troncos de perfis caixa 170x130x25x2 soldados um de cada lado do pilar, simulando a chegada de duas vigas perpendiculares ao plano da ligação. Maiores detalhes sobre os modelos ensaiados podem ser obtidos no trabalho citado.

TABELA 2.3 – Modelos utilizados por GONZAGA (2003).

Ligações	Parafusadas				Soldadas			
	01A	01B	02A	02B	03A	03B	04A	04B
Modelos	01A	01B	02A	02B	03A	03B	04A	04B
Classificação de Projeto	RG	RG	RG	SR	SR	RG	FL	SR
Classificação para carga de serviço	RG	RG	RG	SR	RG	RG	SR	SR
Classificação para estado limite último	RG	RG	RG	RG	RG	RG	SR RG	RG
Perfil U 134x105x16	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
Tronco de Viga 170x130x25x2	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim
CH de extremidade	128x439,5x16		128x399,5x16		Não			
CH de reforço na viga	134x170x4,75				130x300x3,75			
Perfil duplo cartola	134x134x30x4,75				134x134x30x3			
Viga seção caixa	250x134x25x2				170x130x25x2			

Nota: RG = rígida; SR = semi-rígida; FL = Flexível

Para todos os modelos experimentais o modelo de potência de três parâmetros foi eficaz para descrever o comportamento momento-rotação, sendo que os melhores resultados foram obtidos na análise das ligações soldadas. Para as ligações parafusadas os coeficientes ajustados não se mostraram coerentes aos coeficientes experimentais, diferença atribuída ao fato dos ensaios não terem alcançado o patamar horizontal da curva $M-\theta$, que teria caracterizado o momento último da ligação.

As FIG. 2.18 a 2.25, extraídas do trabalho de GONZAGA (2003), mostram os resultados do modelo matemático sobrepostos aos dados dos ensaios realizados. Tal como no trabalho de FOLEY e VINNAKOTA (1995), o ajuste de potência de três parâmetros prediz adequadamente os resultados provenientes dos testes realizados em laboratório.

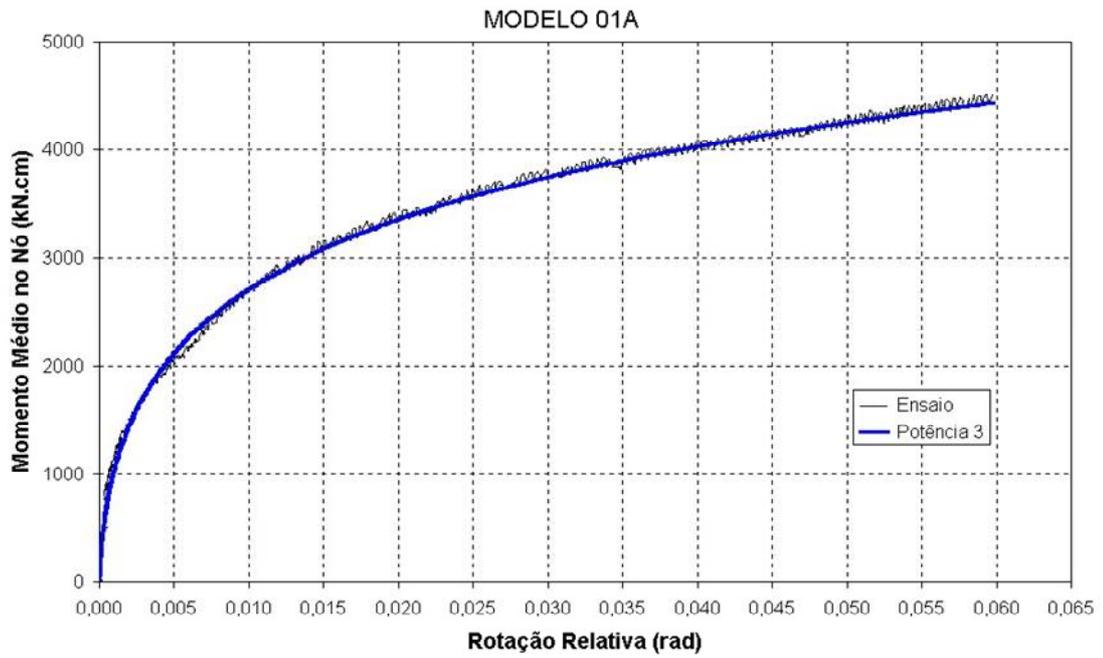


FIGURA 2.18 – Modelo 01A comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].

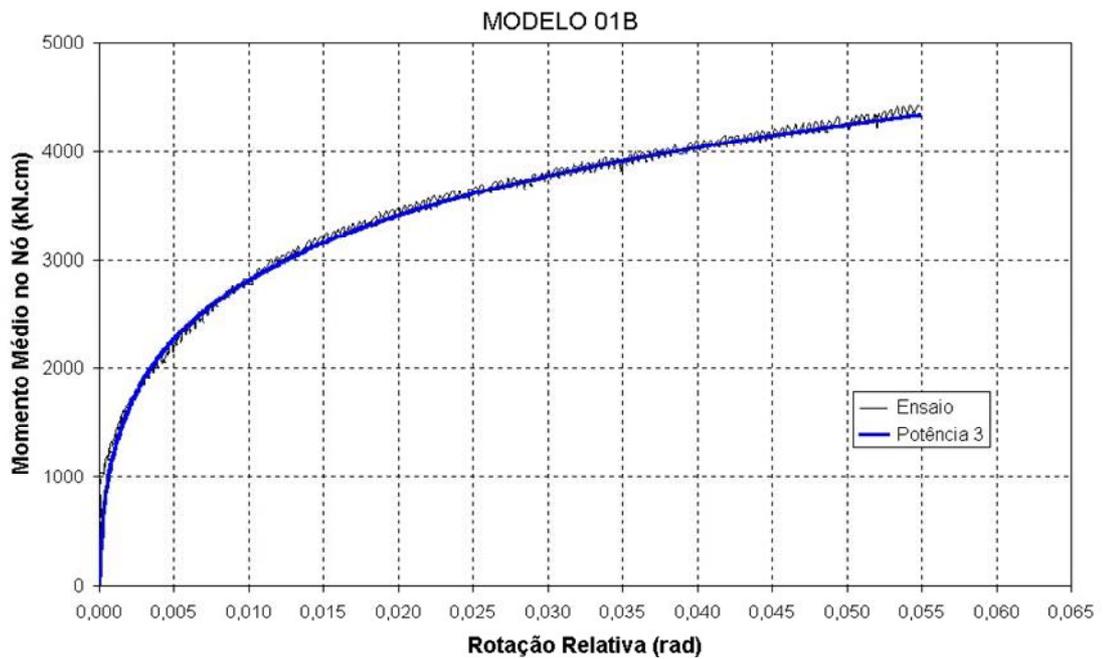


FIGURA 2.19 – Modelo 01B comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].

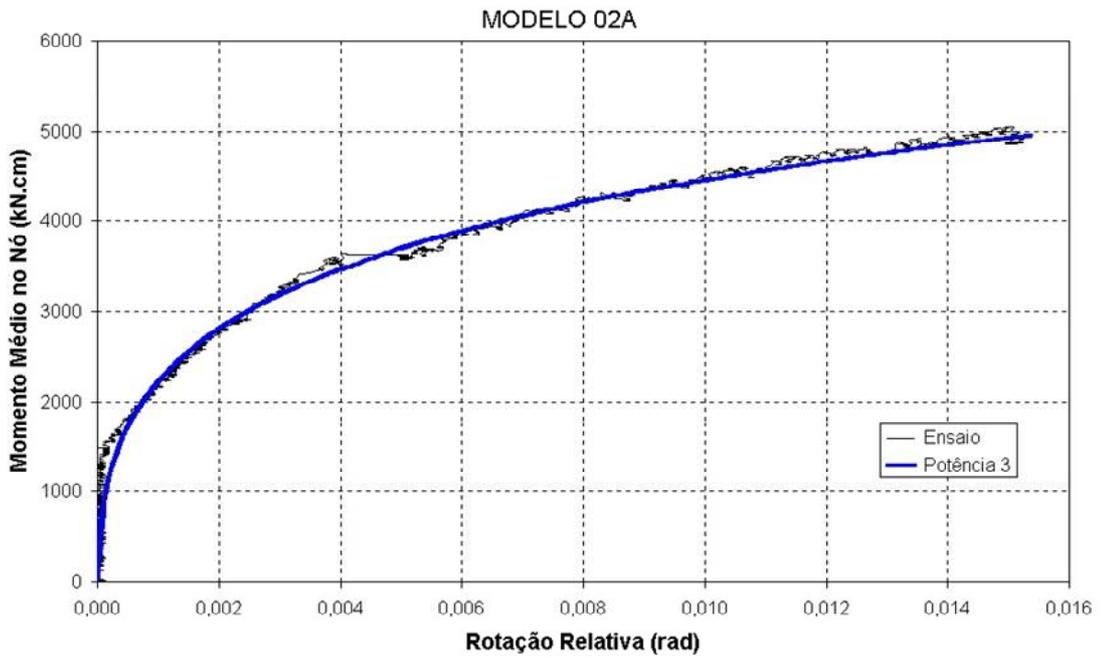


FIGURA 2.20 – Modelo 02A comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].

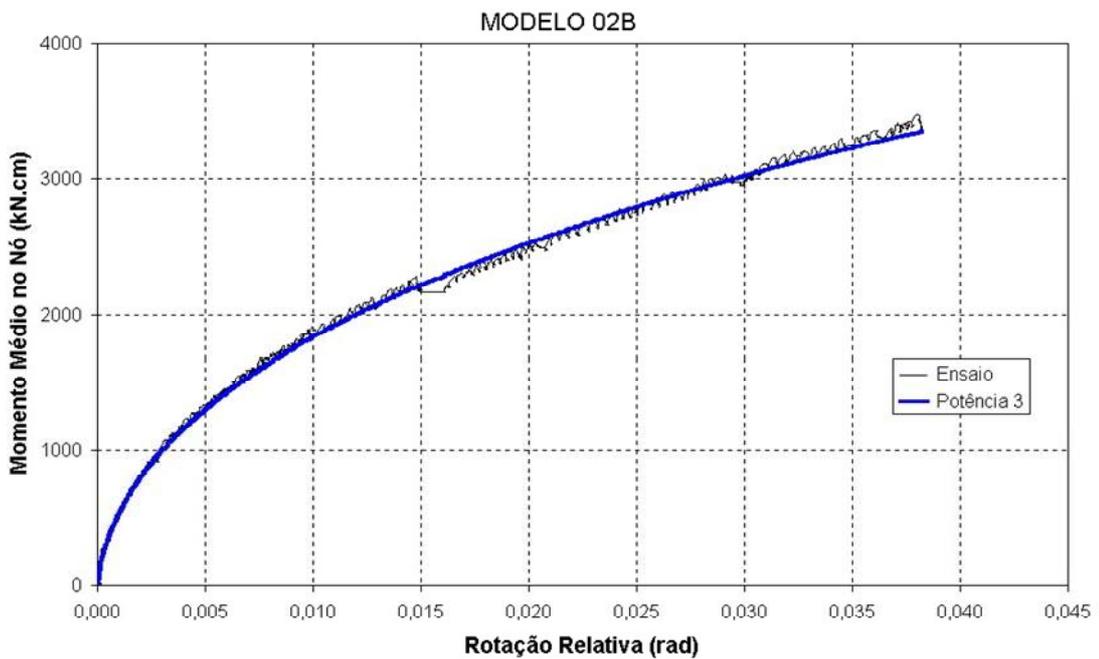


FIGURA 2.21 – Modelo 02B comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].

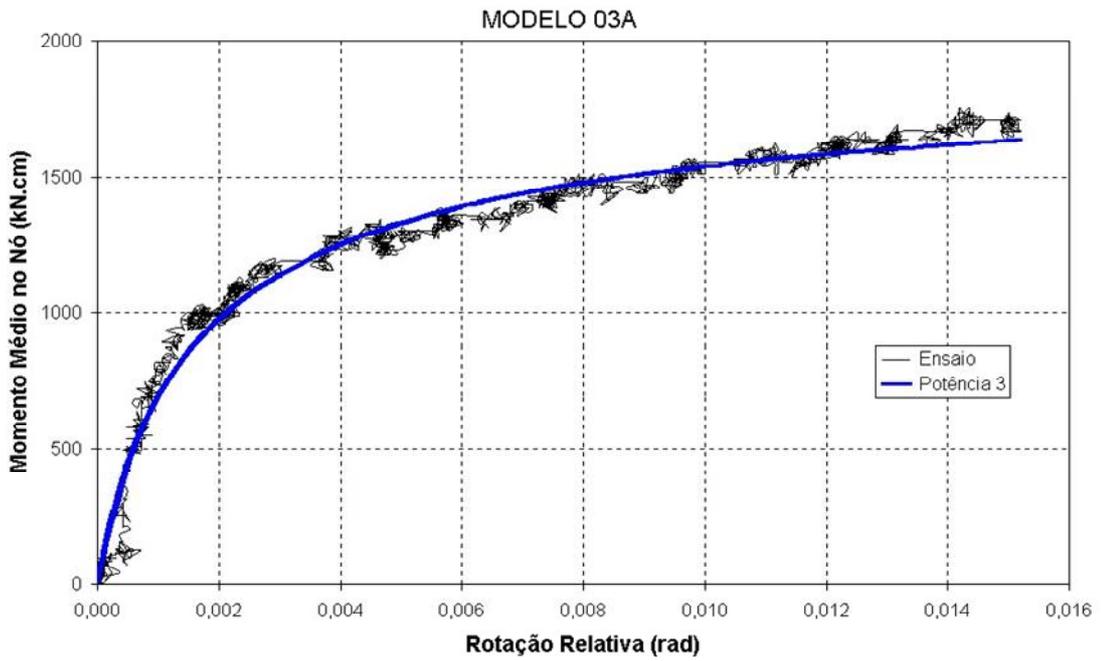


FIGURA 2.22 – Modelo 03A comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].

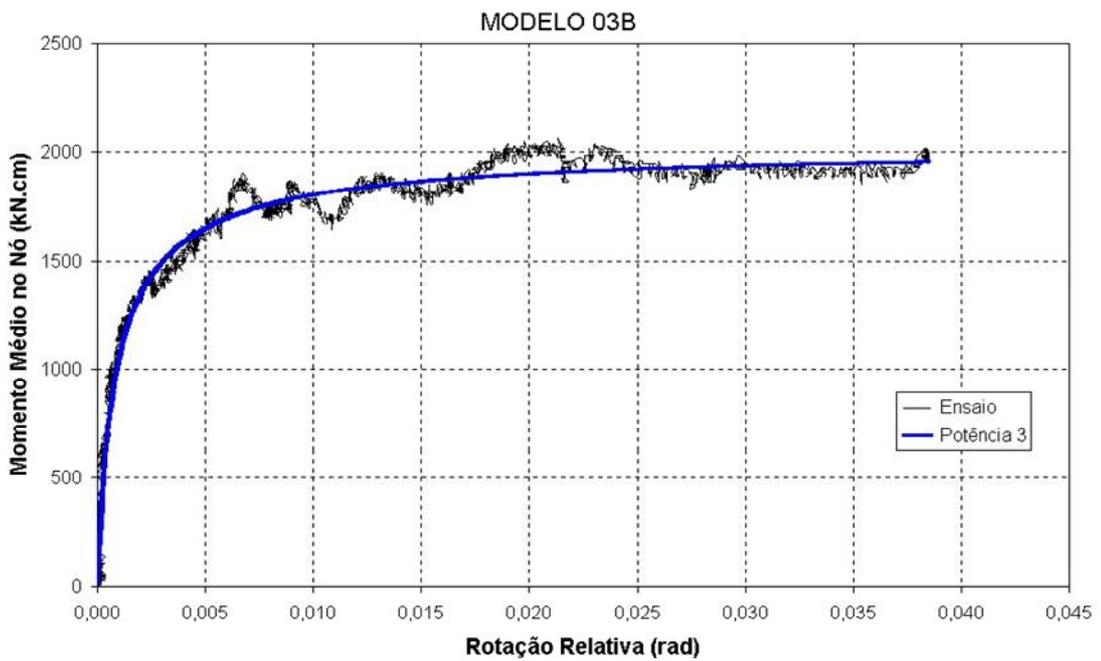


FIGURA 2.23 – Modelo 03B comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].

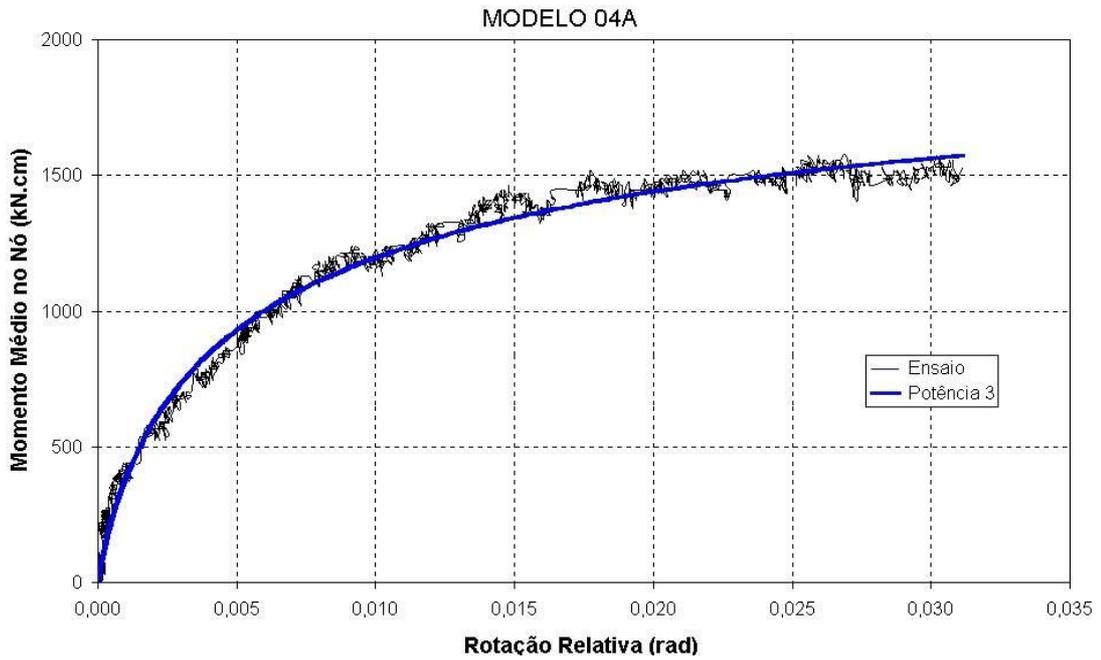


FIGURA 2.24 – Modelo 04A comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].

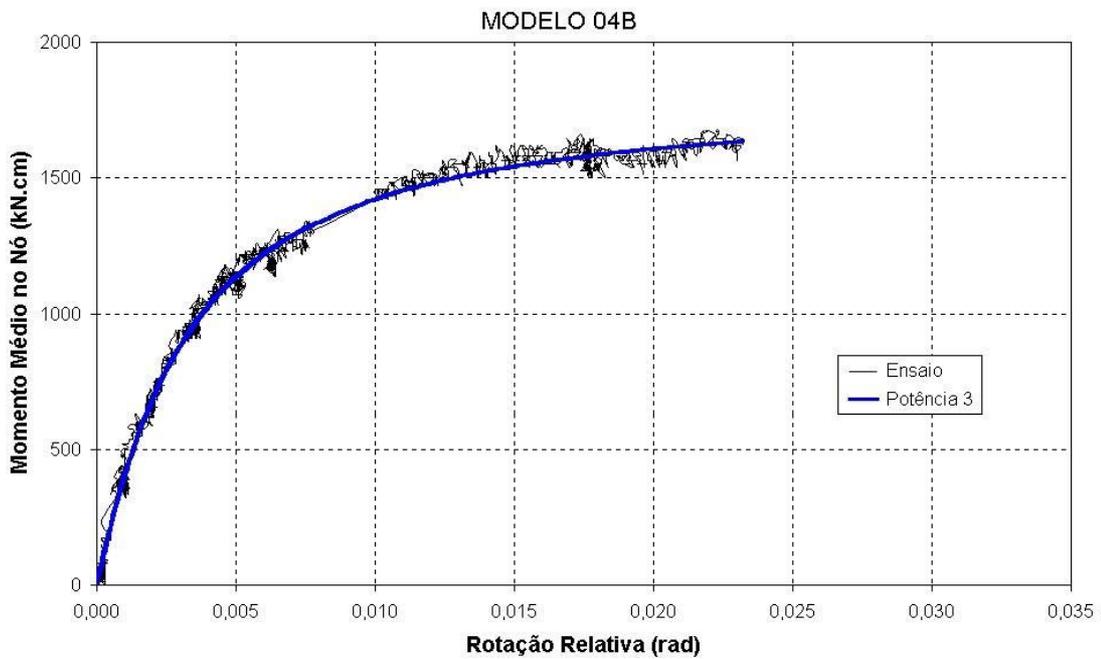


FIGURA 2.25 – Modelo 04B comparado ao ajuste de potência de três parâmetros [GONZAGA (2003)].

2.6 – Método para Ajuste da Modelagem Analítica

A partir das respostas obtidas dos ensaios experimentais das ligações é possível desenvolver novas técnicas de análise numérica que possibilitam a sua utilização na prática. Tais soluções podem ser descritas por meio de equações, gráficos ou tabelas em função dos parâmetros envolvidos no problema. No caso do uso de equações é necessário fazer o ajuste de coeficientes de funções pré-estabelecidas, de forma que tais funções possam representar os resultados com um erro aceitável.

Segundo PRESS *et al* (1992) a modelagem analítica é um procedimento que consiste, na maioria das vezes, em se escolher ou criar uma “função de mérito” que meça a diferença entre o resultado obtido experimentalmente e o obtido pelo modelo escolhido. A função de mérito e os parâmetros ajustáveis são então convenientemente arrumados para que a diferença entre os resultados seja minimizada.

Os dados estão sujeitos a ponderar erros, por isso não só é importante a determinação dos parâmetros, mas também, dos erros relativos a eles e de uma medida estatística da qualidade do ajuste.

PRESS *et al* (1992) concluíram que através do método de Levenberg-Marquardt encontram-se os melhores coeficientes para o ajuste. O mesmo é baseado em dois princípios elementares. O primeiro é que os componentes da matriz Hessiana, mesmo se não utilizáveis, fornecem alguma informação sobre a ordem de magnitude da escala do problema.

PIMENTA (2000) estudou o método e descreveu o seu funcionamento. A função de mérito χ^2 é adimensional, sendo portanto um número puro. Isto fica evidente na equação Eq. 2.18.

$$\chi^2(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_i - y(\chi_i; \mathbf{a})}{\sigma_i} \right]^2 \quad (2.18)$$

O gradiente de χ^2 com seus respectivos parâmetros \mathbf{a} , onde χ^2 pode ser zero, possui os seguintes componentes (Eq. 2.19):

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial a_k} = -2 \cdot \sum_{i=1}^N \frac{[y_i - y(x_i; \mathbf{a})]}{\sigma_i^2} \frac{\partial y(x_i; \mathbf{a})}{\partial a_k} \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (2.19)$$

Fazendo uma derivada parcial adicional e definindo,

$$\beta_k \equiv -\frac{1}{2} \frac{\partial \chi^2}{\partial a_k} \quad a_{kl} \equiv \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial a_k \cdot \partial a_l} \quad (2.20)$$

Remanejando os termos para a equação possa ser reescrita como um conjunto de equações lineares, (Eq. 2.21):

$$\sum_{i=1}^M a_{kl} \delta a_l = \beta_k \quad (2.21)$$

Por outro lado, β_k tem a dimensão de $1/a_k$, que pode ter dimensões tais como $1/\text{cm}$. A constante de proporcionalidade entre β_k e δa_k deve ter a dimensão de a_k^2 . Dentre os componentes de $[\alpha]$ o único que possui esta dimensão é $1/a_k$, referente aos elementos da diagonal. Porém a escala pode ser muito elevada, para solucionar este problema, divide-se a constante por um fator λ , que pode ser tomado $\gg 1$ para diminuir-se o passo. Portanto:

$$\delta a_l = \frac{1}{\lambda a_{ll}} \beta_l \therefore \lambda a_{ll} \cdot \delta a_l = \beta_l \quad (2.22)$$

É necessário que a_{ll} seja positivo, mas isto é garantido pela Eq. 2.23.

$$a_{kl} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \left[\frac{\partial y(x_i; \mathbf{a})}{\partial a_k} \frac{\partial y(x_i; \mathbf{a})}{\partial a_l} \right] \quad (2.23)$$

O segundo princípio de Marquardt é que a Eq. 2.21 e a Eq. 2.22 podem ser combinadas se for definida uma nova matriz α' segundo a Eq. 2.24.

$$\begin{aligned} \alpha'_{jj} &\equiv \alpha_{jj} (1 + \lambda) \\ \alpha'_{jk} &\equiv \alpha_{kj} \quad (j \neq k) \end{aligned} \quad (2.24)$$

e depois serem substituídas pela Eq. 2.25.

$$\sum_{i=1}^M a'_{kl} \delta a_l = \beta_k \quad (2.25)$$

Quando λ é muito grande, a matriz α' é forçada a ser diagonalmente dominante, assim a Eq. 2.25 se torna idêntica à Eq. 2.22. Por outro lado, quando λ se aproxima de zero, a Eq. 2.25 se torna a Eq. 2.21.

Dada uma estimativa inicial para um conjunto de parâmetros a ajustar \mathbf{a} , Marquardt recomenda que:

- Compute $\chi^2(\mathbf{a})$;
- Escolha um valor modesto para λ , por exemplo $\lambda=0,001$. (Neste estudo utilizamos preferencialmente $\lambda=1$);
- (*) Resolva as equações lineares Eq. 2.22 para $\delta\mathbf{a}$ e avalie $\chi^2(\mathbf{a} + \delta\mathbf{a})$;

- Se $\chi^2(\mathbf{a} + \delta\mathbf{a}) \geq \chi^2$, aumente λ por um fator de 10 (ou outro fator substancial qualquer) e retorne a (*).
- Se $\chi^2(\mathbf{a} + \delta\mathbf{a}) < \chi^2$, diminua λ por um fator de 10, atualize a solução $\mathbf{a} \leftarrow \mathbf{a} + \delta\mathbf{a}$, e volte para (*).

Também é necessária uma condição de parada. Fazendo-se iterações para convergência é geralmente desnecessário quando o mínimo dos parâmetros \mathbf{a} é estatisticamente o melhor. Quando se altera χ^2 por uma quantidade $\ll 1$ não é nunca estatisticamente significativo.

Neste trabalho utiliza-se o método de Levenberg-Marquardt através do módulo DR2LIN, que é uma rotina implementada na biblioteca interna IMSL do FORTRAN, utilizando-se um programa desenvolvido por PIMENTA (2000) no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 – Introdução

A análise experimental das estruturas consiste na realização de ensaios laboratoriais em modelos de escala natural ou reduzida, com a finalidade de investigar o seu comportamento mecânico e fazê-lo corresponder ao de uma estrutura real. Para tanto, os modelos são submetidos a carregamentos que simulam as situações reais de esforços e condições de contorno, por exemplo.

Neste capítulo é apresentado o comportamento experimental das ligações projetadas em escala real para estruturas de perfis formados a frio dos prédios construídos pela COHAB-MG e CDHU-SP. Serão apresentadas as descrições dos modelos projetados e de seus respectivos ensaios. Finalizando, são apresentados os resultados experimentais com a elaboração do gráfico $M-\theta$ para cada caso.

Os modelos foram ensaiados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) do Departamento de Engenharia de Estruturas (DEES) da Escola de Engenharia da UFMG (EE-UFMG).

3.2 – Conceitos e Prescrições de Normas Técnicas

Para o dimensionamento dos modelos foram consideradas as prescrições das normas técnicas NBR14762 (ABNT, 2001), NBR8800 (ABNT, 1986) e AISI:LRFD (AISI, 1996). As vigas adotadas possuem as mesmas propriedades geométricas e mecânicas daquelas dimensionadas para os prédios construídos pela COHAB-MG e a CDHU-SP. Os pilares ficaram com as mesmas dimensões externas, porém a seção transversal passou a ser fechada (seção Caixa) e não mais I enrijecido, como foi mencionado na seção 1.1 deste trabalho.

Foram dimensionados 6 tipos de modelos, conforme descrito na seção 3.3, cinco dos quais foram ensaiados. Nos ensaios com os modelos submetidos à flexão, os momentos atuantes na ligação e as rotações correspondentes foram determinadas em todas as fases de carregamento, de forma a se ter uma curva $M-\theta$ completa do início do carregamento até o colapso de cada modelo. Nos ensaios onde o esforço predominante era de cisalhamento, os modelos foram carregados até a sua carga de cálculo, ou segurança do ensaio, de forma a se comprovar a eficiência dos rebites de rosca interna quando submetidas à esse esforço.

3.3 – Descrição dos Modelos

A investigação experimental dessa pesquisa consistiu na fabricação de 18 modelos, dos quais 14 foram ensaiados. Apenas dois ensaios foram realizados com o modelo submetido à esforços predominantes de cisalhamento; os demais ensaios foram realizados submetendo os modelos à flexão.

Os perfis dos modelos ensaiados foram obtidos por perfilagem contínua em mesa de roletes de chapa fina de aço carbono USI-SAC-300 produzida pela USIMINAS, com as propriedades mecânicas nominais à tração: resistência ao escoamento, $f_y = 300$ MPa, e resistência à ruptura, $f_u = 450$ MPa.

Em todos os modelos foram utilizados parafusos REX-DIN 8.8 com diâmetro $\phi 13,7\text{mm}$. A porcas foram substituídas por rebites tubulares com rosca interna, ou “porcas-rebites”. Conforme detalhado na seção 3.3.1. Os eletrodos, quando utilizados, eram de classe E7018G.

Os seis tipos de modelos foram divididos em 2 grupos, de acordo com a dimensão de seus elementos, a rigidez do pilar e a presença ou ausência de chapas de reforço em seu interior. Foram utilizados, tanto nas vigas quanto nos pilares, perfis de seção caixa constituída por dois perfis U enrijecidos soldados entre si. Cada grupo foi subdividido entre as ligações conectadas na maior e na menor inércia do pilar sendo que as ligações na maior inércia do pilar poderiam ou não possuir chapas de reforço (localizadas nos flanges superior e inferior das vigas e na parte interna dos perfis caixa dos pilares). Para cada tipo de ligação foram fornecidos 3 modelos, totalizando 18 espécimes dos quais 4 foram inutilizados por razões que serão apresentadas adiante. A TAB. 3.1 mostra os tipos de ligações dimensionadas e o número de ensaios realizados com cada uma delas.

TABELA 3.1 – Ligações dimensionadas e ensaiadas.

Grupo de Ligação	Pilar	Viga	Inércia	CH de Reforço	Nº de Ensaios	Nome
1	134x134x30x3,75	175x130x25x2,0	Menor	Não	3	01AF
			Maior	Não	3	01BF
				Sim	3	01BR
4	150x150x30x6,3	300x150x25x2,0	Menor	Não	2	04AF
			Maior	Não	0	04BF
				Sim	3	04BR

A escolha dos nomes das ligações obedeceu a seguinte notação: os números 01 ou 04 para separá-las de acordo com o grupo de ligação, em seguida as letras A ou B para as ligações conectadas na menor ou na maior inércia respectivamente e, por ultimo, as letras F ou R indicando se a ligação foi dimensionada como flexível (sem chapas de reforço) ou rígida (com chapas de reforço) respectivamente.

Os grupos de ligação 2 e 3 foram projetados, mas descartados para a presente pesquisa.

Os esquemas das ligações são apresentados nas FIG. 3.1 a 3.5:

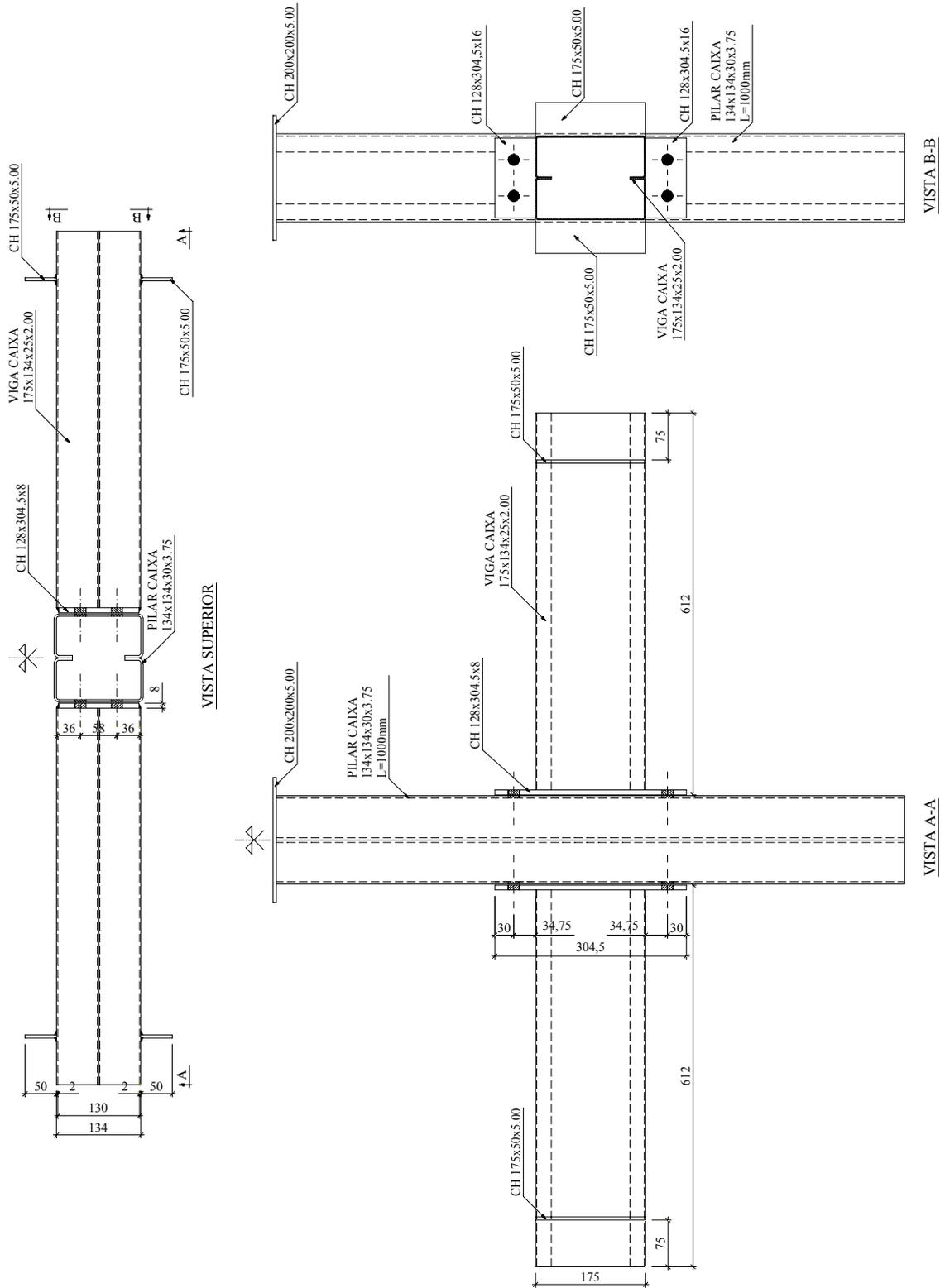


FIGURA 3.1 – Ligação 01AF: flexível na menor inércia do pilar.

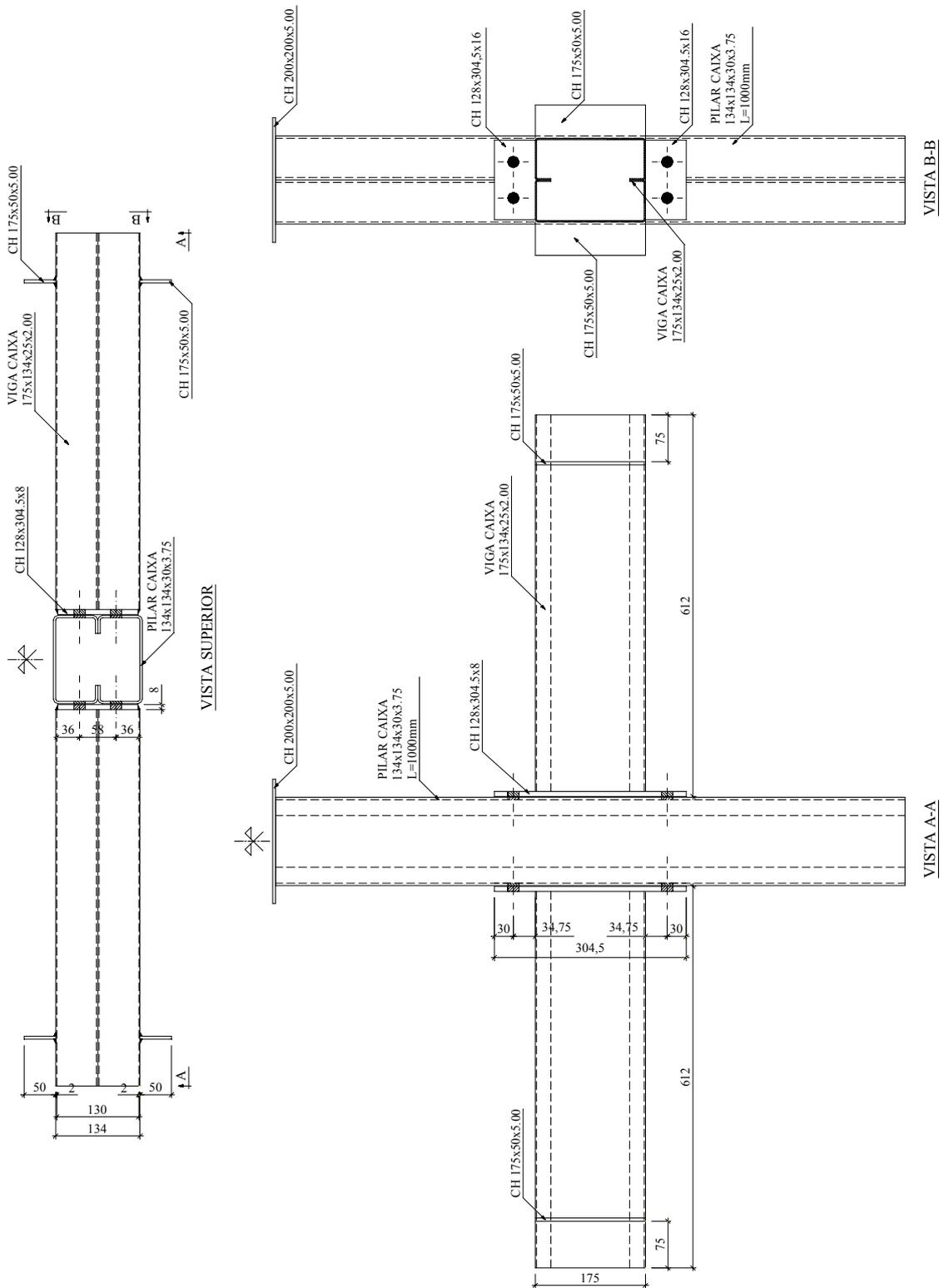


FIGURA 3.2 – Ligação 01BF: flexível na maior inércia do pilar.

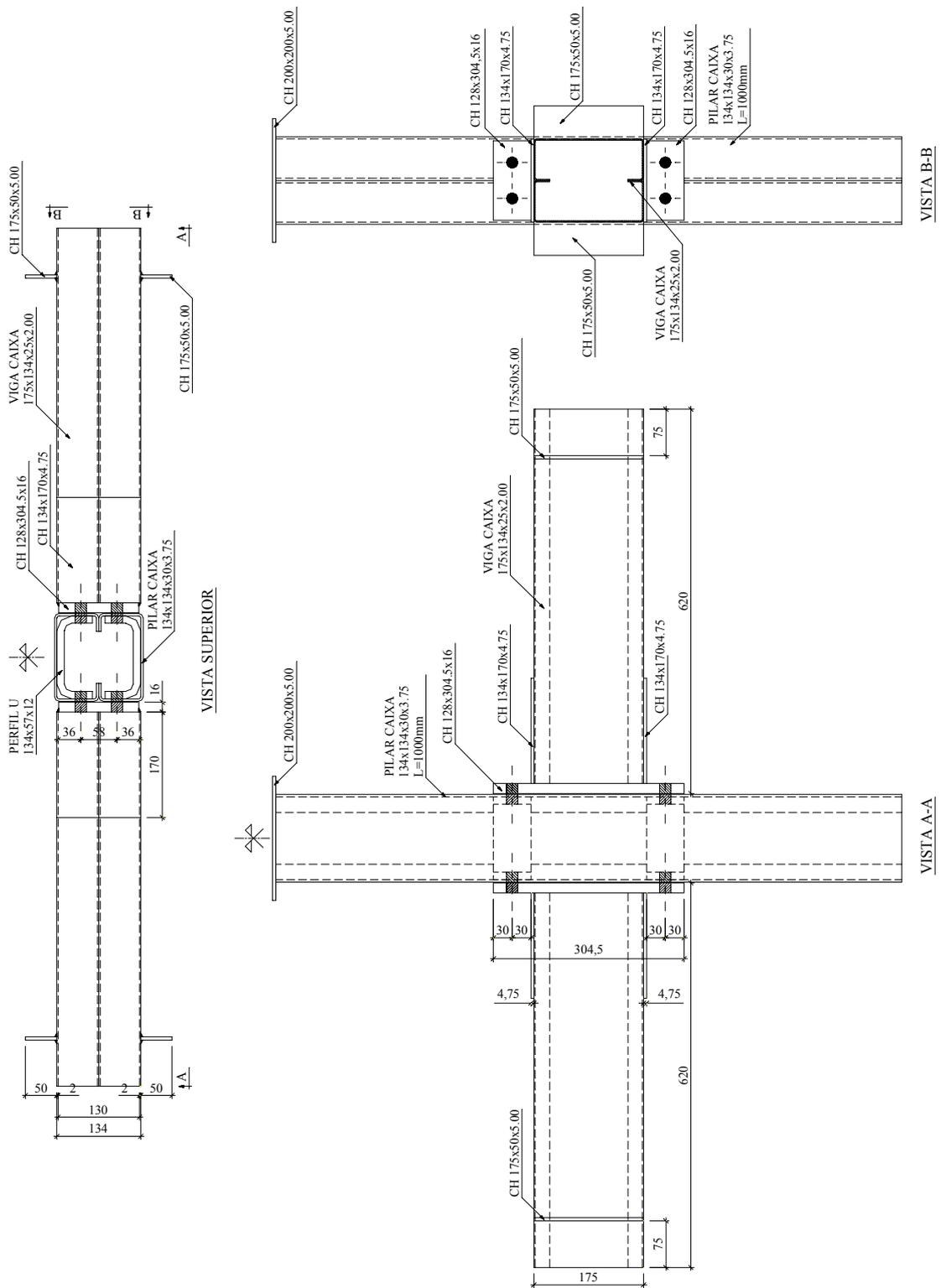


FIGURA 3.3 – Ligação 01BR: rígida na maior inércia do pilar.

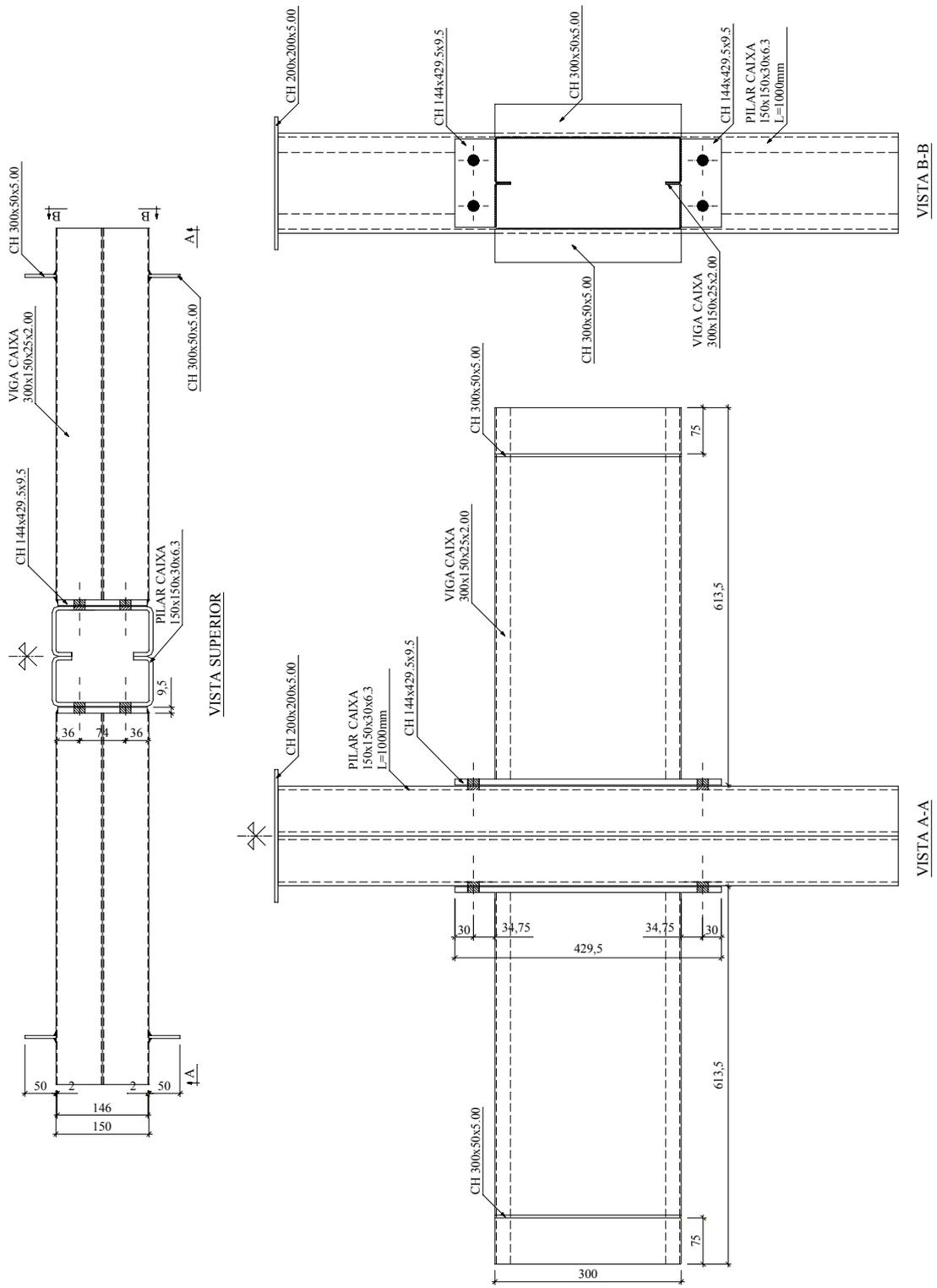


FIGURA 3.4 – Ligação 04AF: flexível na menor inércia do pilar.

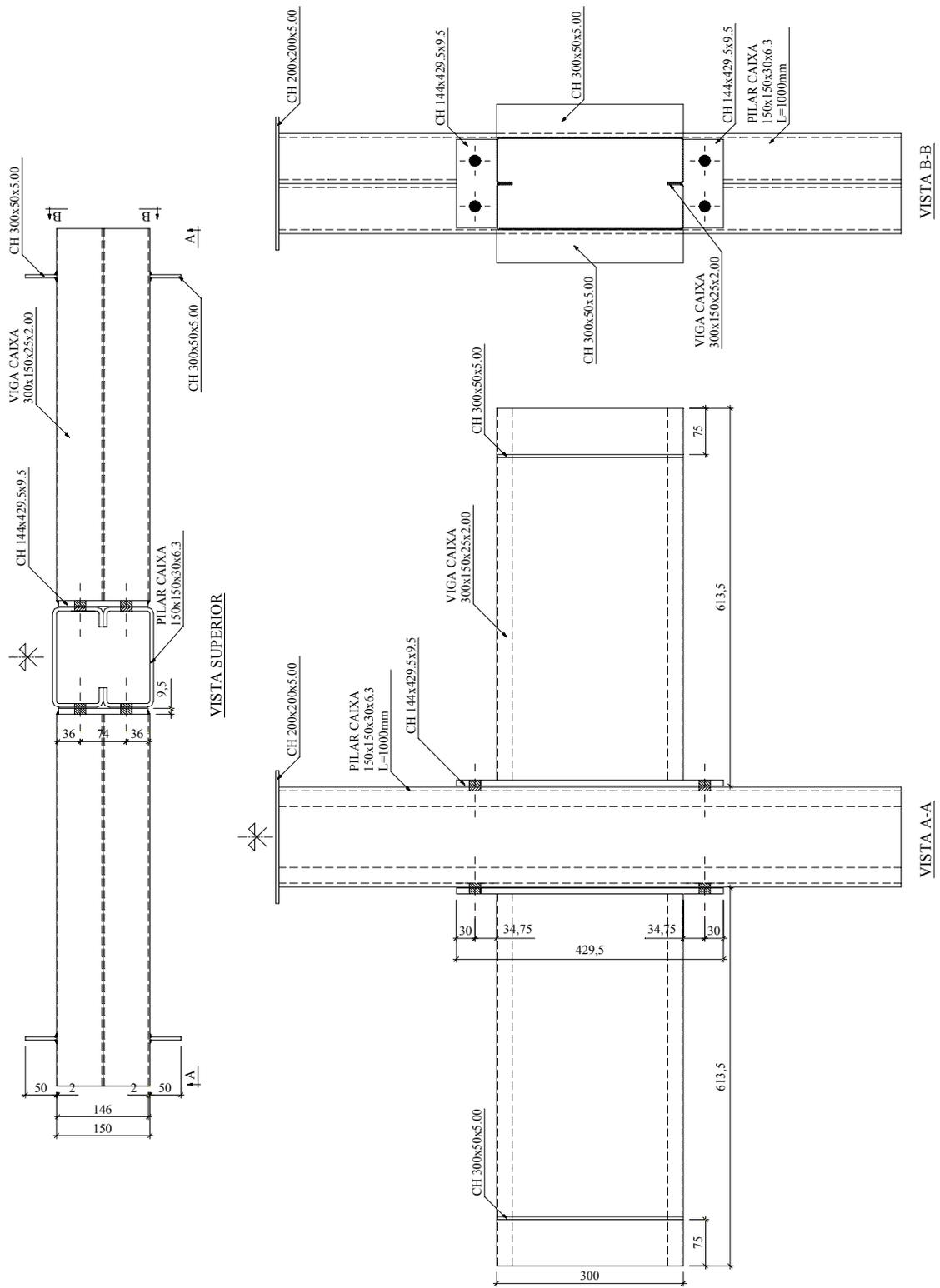


FIGURA 3.5 – Ligação 04BF: flexível na maior inércia do pilar.

3.3.1 – Rebite Tubular com Rosca Interna

Esse tipo de conector foi desenvolvido em 1936 para a indústria aeronáutica e tem hoje como finalidade principal fornecer uma rosca de alta resistência em chapas e perfis de paredes finas para a indústria automobilística. O mesmo é fabricado por estampagem em prensa progressiva e a sua produção chega a 120 unidades por minuto. As principais características são mostradas na figura 3.7:

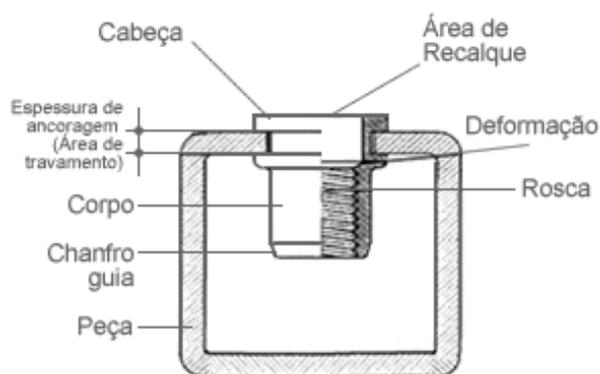


FIGURA 3.7 – Características da porca-rebite.

A porca rebite tem como grande vantagem a possibilidade de montagem onde o acesso só é possível de um único lado, sem operações secundárias, com alta precisão, dinamismo e baixo consumo de energia. A instalação é realizada por ferramentas manuais ou rebiteadeiras hidropneumáticas e não exige mão de obra especializada, podendo ser executada por qualquer funcionário após uma rápida demonstração sobre o funcionamento do equipamento. O ciclo de montagem dos rebites, FIG. 3.8, é muito rápido, podendo chegar a 4 segundos, de forma que o mesmo pode ser incluído sem problemas na linha de produção dos perfis. Toda instalação é realizada em quatro etapas: rosqueamento o rebite no pino; introdução no local a ser instalado; repuxo e desrosqueamento.

Analisando estas vantagens, o orientador da presente pesquisa propôs a utilização destes rebites nas ligações entre os perfis caixa, em substituição às porcas convencionais, constituindo assim uma ação pioneira na construção metálica.

Nesta pesquisa, na união entre o pilar e as vigas foram utilizados parafusos REX-DIN 8.8 com diâmetro de 13,7mm, e rebites tubulares de rosca interna, ou “porca-rebite”, com diâmetro interno, ϕ_{int} , igual a 14mm, em substituição às porcas convencionais.



FIGURA 3.8 – Etapas de instalação da porca-rebite.

Como nesta pesquisa os modelos projetados possuem furos com diferentes espessuras, foi necessário desenvolver dois tipos de rebites com diferentes comprimentos da área de recalque. Para os modelos 01BR e 04BR, que possuem um par de perfis U no interior dos pilares, foram desenvolvidos rebites com área de recalque com, no mínimo, 19mm de comprimento. Para os demais modelos essa necessidade é de no máximo 7mm. Todas as dimensões, em mm, dos dois tipos de rebites utilizados são apresentados na FIG. 3.9.

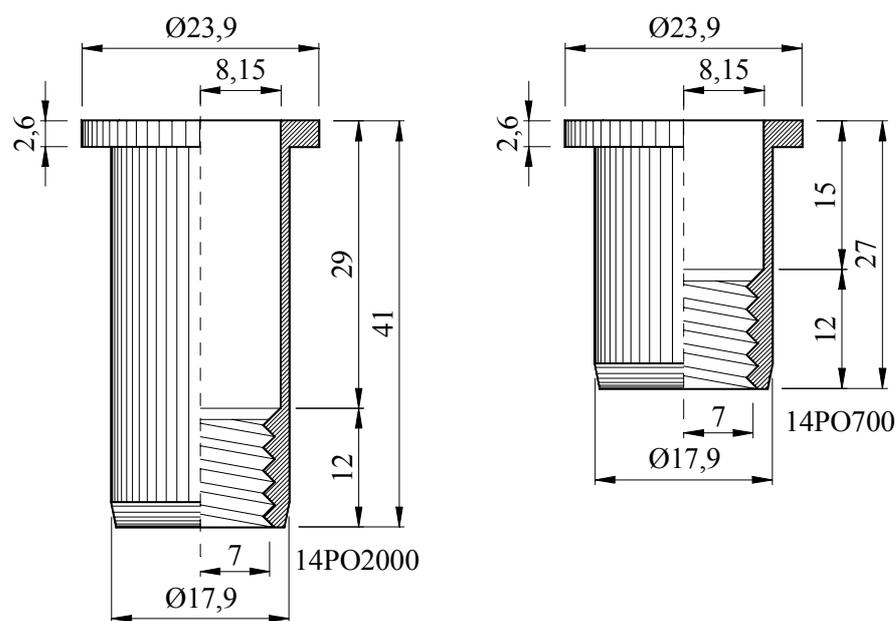


FIGURA 3.9 – Rebites utilizados nos modelos ensaiados.

3.4 – Descrição dos Ensaios

O principal objetivo dos ensaios é a determinação experimental das curvas $M-\theta$ dos modelos ensaiados, a partir das quais pode ser realizada a classificação das ligações estudadas nesta pesquisa. Os ensaios foram realizados de forma a simular o efeito da força cortante e momento fletor solicitantes em uma ligação e, simultaneamente, registrar os deslocamentos e deformações decorrentes do carregamento imposto.

Cada um dos ensaios foi nomeado de acordo com a designação da ligação, seguido de um número de ordem. A TAB. 3.2 apresenta cada um dos 14 ensaios realizados, mostrando ainda o tipo de ensaio e de rebite utilizado, lembrando que os modelos da ligação 04BF não foi ensaiada.

Nesta tabela, as letras A e B na designação indicam que o pilar da ligação é solicitado segundo sua maior ou menor inércia, respectivamente. As letras F e R indicam que a ligação foi projetada como flexível ou rígida, respectivamente.

TABELA 3.2 – Modelos ensaiados.

Designação do Modelo	Tipo de Ensaio	Tipo de Rebite
01AF-01	Flexão	M14PO700
01AF-02	Cisalhamento	
01AF-03	Cisalhamento	
01BF-01	Flexão	M14PO700
01BF-02	Flexão	
01BF-03	Flexão	
01BR-01	Flexão	M14PO2000
01BR-02	Flexão	
01BR-03	Flexão	
04AF-01	Flexão	M14PO700
04AF-02	Flexão	
04BR-01	Flexão	M14PO2000
04BR-02	Flexão	
04BR-03	Flexão	

3.4.1 – Sistema de Carregamento

Para a realização dos ensaios utilizou-se um pórtico de reação onde foi instalado um atuador hidráulico Enerpac[®] com capacidade de 500kN, equipado com bomba hidráulica de mesma marca. Na parte superior do pilar foi instalada uma rótula metálica esférica que tem como objetivo distribuir e centralizar a carga proveniente do atuador hidráulico. Junto à bomba hidráulica foi instalado um transdutor de pressão marca Sodemex[®], modelo HMI-2300, com capacidade de pressão de até 500bar, sendo responsável pela medição do carregamento imposto ao modelo. O conjunto de equipamentos destinado à aplicação de carga é mostrado na montagem da FOTO 3.1.

Os apoios dos modelos ensaiados a flexão constituem-se de roletes metálicos, montados sobre o pórtico de reação, com a função de restringir os deslocamentos verticais das extremidades das vigas deixando estas livres para se deslocar horizontalmente. A FIG. 3.10 e a FOTO 3.2 mostram a montagem geral desses ensaios.

Para os ensaios simulando o efeito de cisalhamento puro os apoios foram posicionados sob a chapa de extremidade da viga, modelo 01AF-3, ou próximos à mesma, modelo 01AF-2. A montagem desse tipo de ensaio é mostrada na FIG. 3.11 e FOTO 3.3.

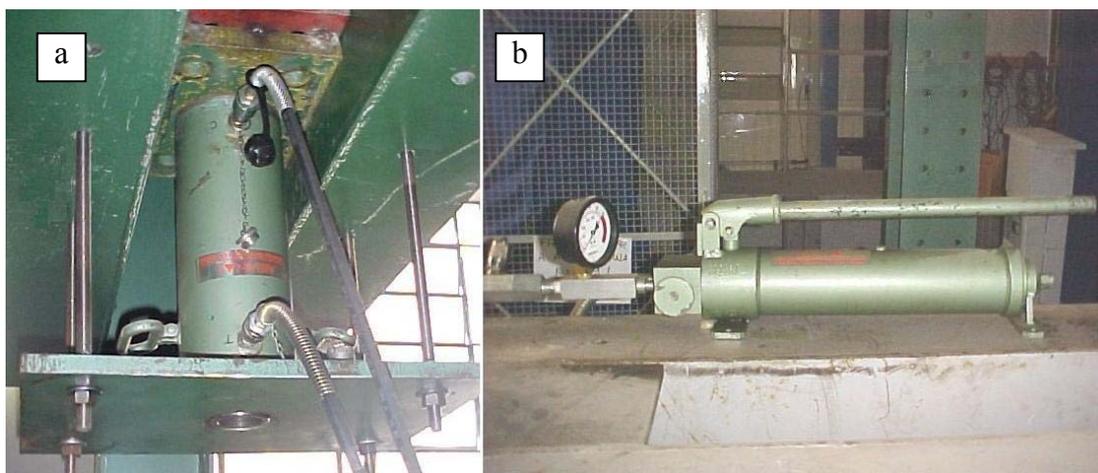


FOTO 3.1 – Sistema de carregamento: a) Atuador hidráulico; b) Bomba hidráulica com transdutor de pressão.

Durante os ensaios, os carregamentos foram realizados por controle de carga, sendo impostos nas etapas sucessivos incrementos de carga da ordem de 5kN ou menos, quando conveniente.

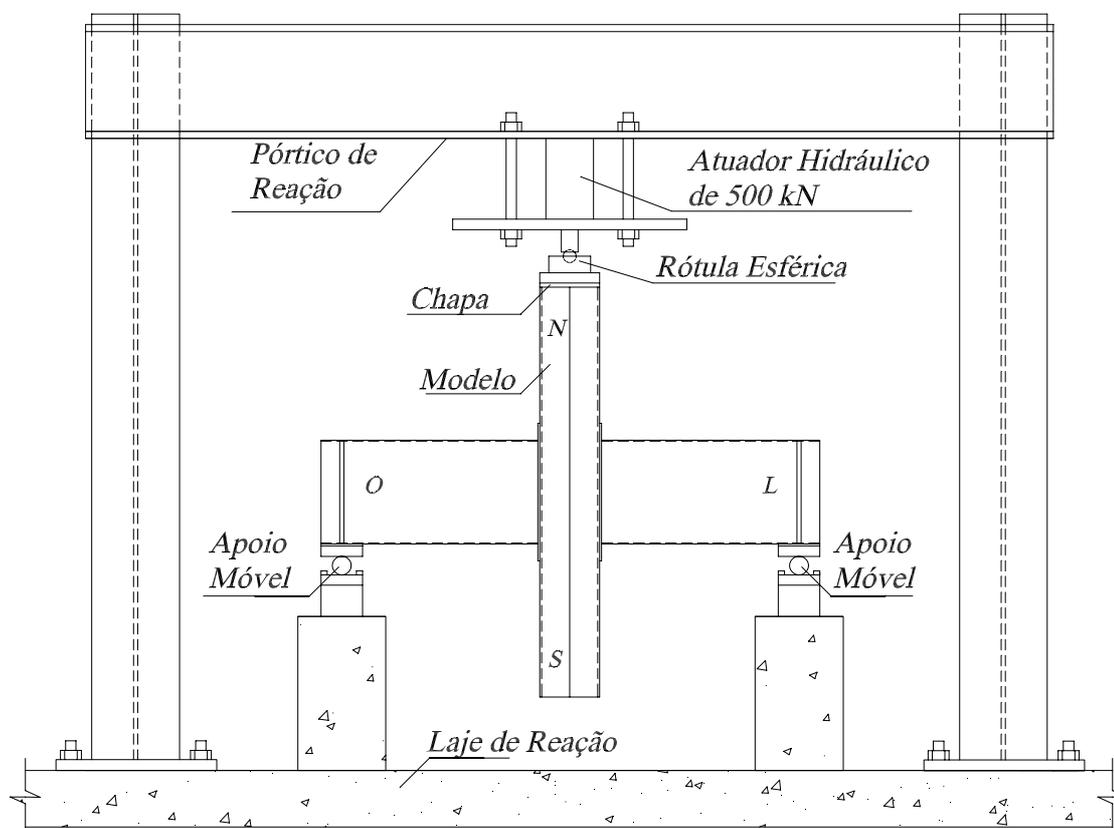


FIGURA 3.10 – Esquema de montagem dos ensaios à flexão.

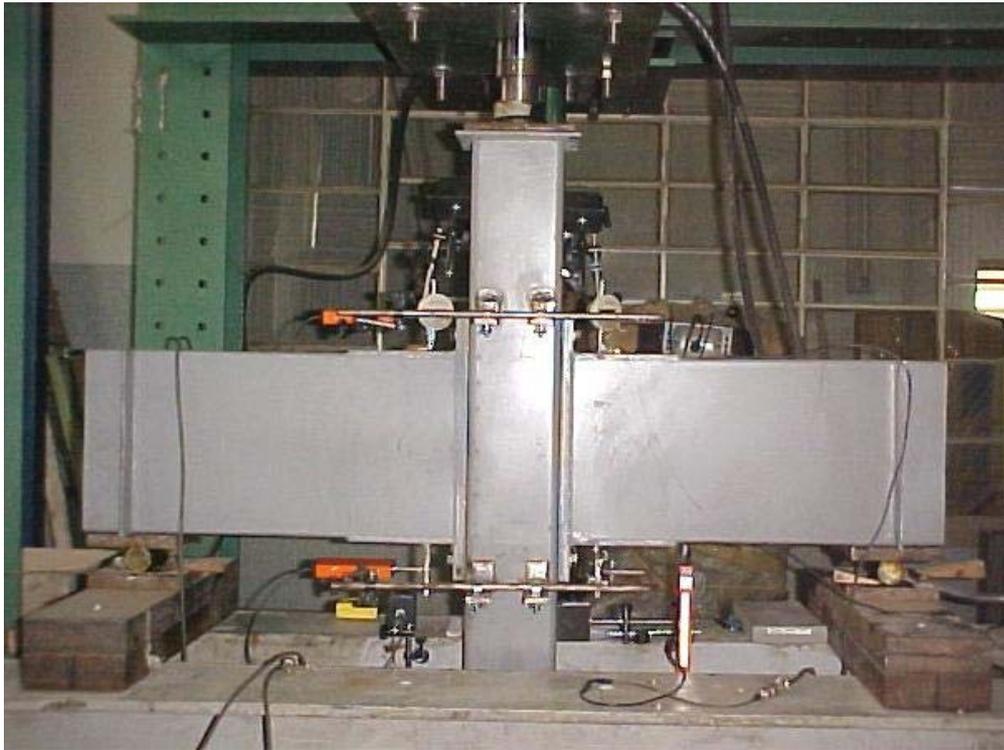


FOTO 3.2 – Esquema geral de montagem e instrumentação, modelo 04BR-01.

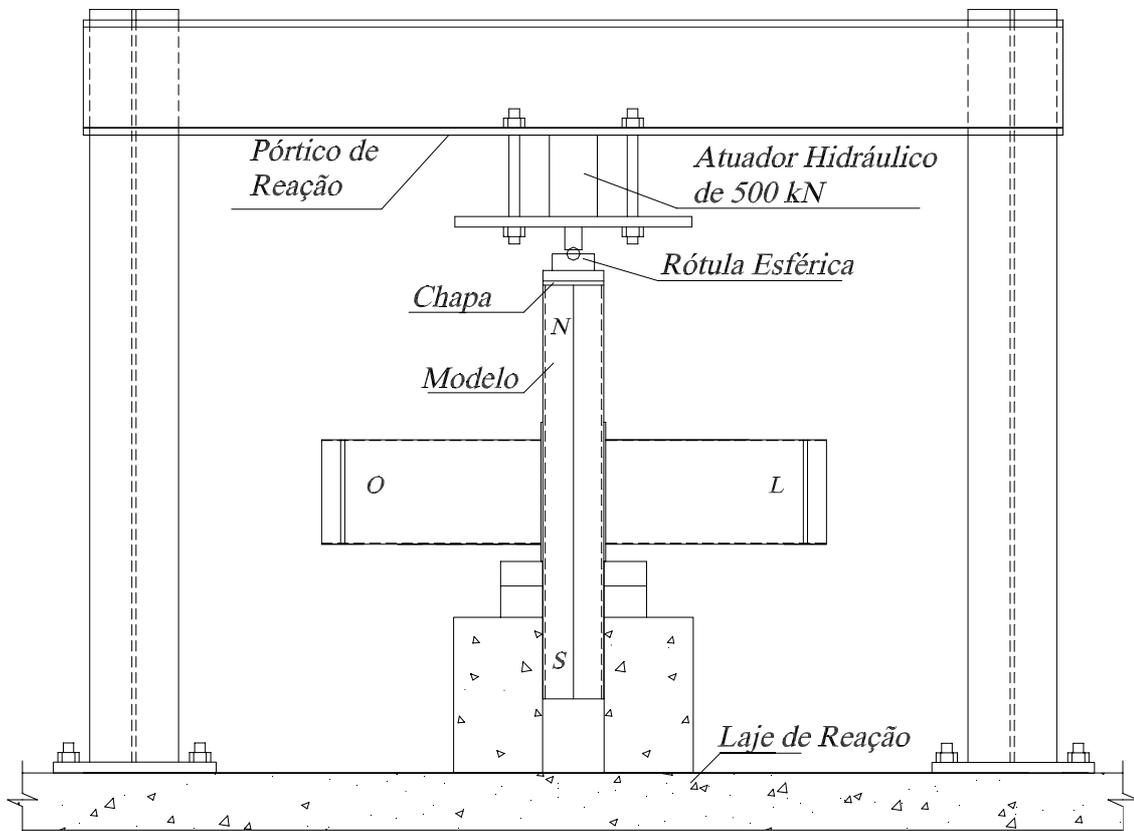


FIGURA 3.11 – Esquema de montagem dos ensaios ao cisalhamento.

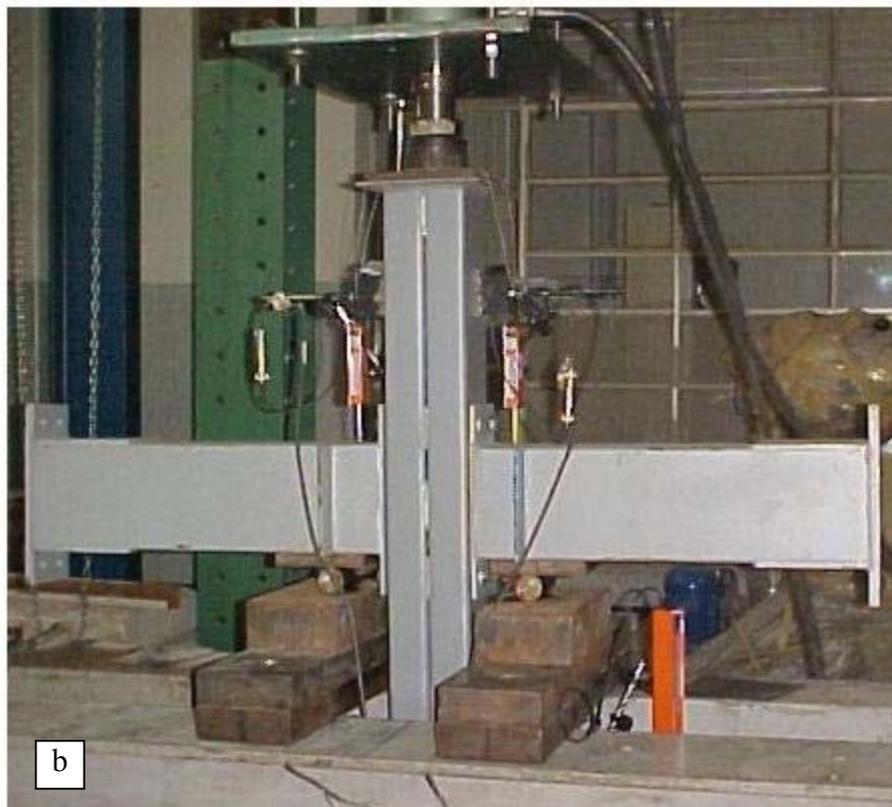
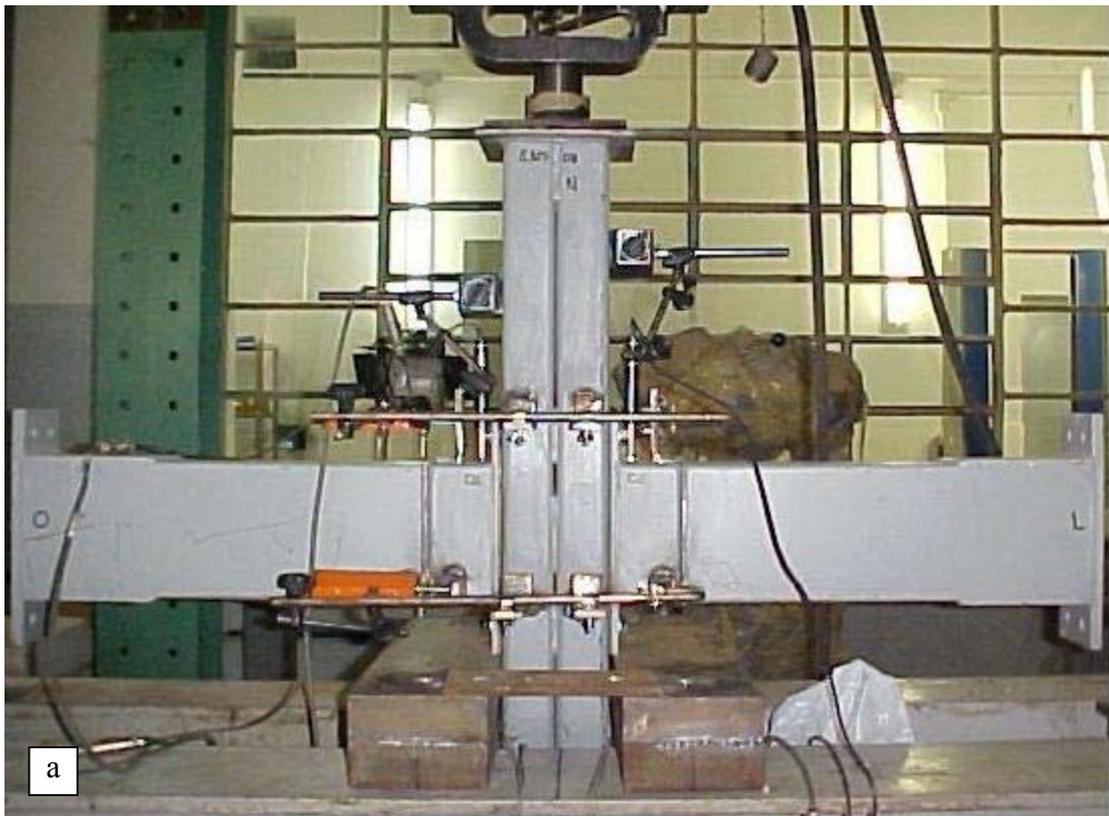


FOTO 3.3 – Esquema geral de montagem e instrumentação para ensaio ao cisalhamento: a) Modelo 01AF-03; b) Modelo 01AF-02.

3.4.2 – Instrumentação dos Modelos

Conforme foi mencionado na seção anterior, em todos os modelos a medição de carga foi realizada a partir de um transdutor de pressão. Para a leitura das respostas ao carregamento sobre a estrutura, foram instalados diferentes dispositivos de medição, principalmente na região da união entre a viga e o pilar.

Apresentam-se abaixo os instrumentos utilizados nos 14 ensaios realizados e suas principais características:

- Dois relógios comparadores digitais (REC), com capacidade de leitura igual a 12mm e precisão de $\pm 0,05\text{mm}$, marca Mitutoyo e modelo IDS-1012-5.
- Extensômetros elétricos de resistência (EER), uniaxiais, do fabricante Kyowa, tipo KFC-5-C1-11 (auto compensador de temperatura), base 5mm, fator *gage* $2,15\pm 1\%$ e resistência de $119,8\pm 0,2\Omega$.
- Dois transdutores de deslocamento linear com capacidade de leitura igual a 50mm (DT_{50}) e precisão de $\pm 0,0005\text{mm}$, funcionando com voltagem de excitação variando de 1 a 5V, marca Tokyo Kenkyujo e modelo SDP-50C.
- Três transdutores de deslocamento linear com capacidade de leitura igual a 25mm (DT_{25}) e precisão de $\pm 0,0005\text{mm}$, funcionando com voltagem de excitação variando de 1 a 5V, marca Tokyo Kenkyujo e modelo CDP-25.
- Dois transdutores de deslocamento linear com capacidade de leitura igual a 100mm (DT_{100}) e precisão de $\pm 0,0005\text{mm}$, funcionando com voltagem de excitação variando de 1 a 5V, sendo um da marca Kyowa e tipo DT-100A e o outro da marca Tokyo Kenkyujo e modelo SDP-100C.

As ligações dos EER à placa de aquisição de dados foram realizadas utilizando um quarto de ponte com três fios condutores, de modo a minimizar o efeito da variação da

temperatura nos mesmos. A ligação dos transdutores de pressão e deslocamento foi feita utilizando uma ponte completa de quatro fios condutores.

Os EER foram colados na metade dos flanges superior e inferior de um dos perfis U enrijecido que compõem a seção transversal das vigas, obedecendo sempre uma distância mínima de 5cm das soldas, evitando assim leituras afetadas pelas tensões residuais originadas no processo de soldagem da chapa de reforço. A medição proveniente do EER superior foi denominada de EER-N e a inferior de EER-S. A partir das medidas desses dispositivos foi possível medir as deformações específicas longitudinais do aço ao longo de todo o ensaio (FOTO 3.4).

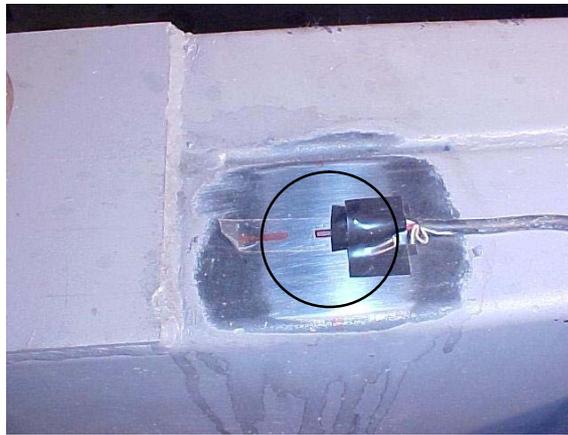


FOTO 3.4 – Extensômetro elétrico de resistência instalado no flange superior da viga (EER-N).

Para todos os modelos, na extremidade oposta à aplicação de carga, colocou-se um DT_{100} para a leitura do deslocamento vertical do pilar. O aparelho foi fixado ao pilar por meio de base magnética, e a medida foi feita com referência a um ponto independente do modelo ou do pórtico de reação (FOTO 3.5). A medida proveniente do aparelho instalado nesse ponto foi nomeada como DT-VERT.

A medição do encurtamento (DH-N) e alongamento (DH-S) na região superior e inferior, respectivamente, da viga da ligação foi realizada com dois DT_{50} (FOTO 3.6) fixados em ganchos metálicos (FOTO 3.7). As ponteiros dos ganchos e dos transdutores de deslocamento são posicionadas em cantoneiras soldadas nas vigas, em posições simétricas relativamente ao pilar. Outros dois suportes em cantoneira, soldados no pilar,

garantem o apoio plano e rígido para os ganchos. Esse conjunto de medidas permitiu o cálculo da rotação relativa da viga ao longo de todo o ensaio.



FOTO 3.5 – Medidores do deslocamento vertical do pilar (DT₁₀₀).

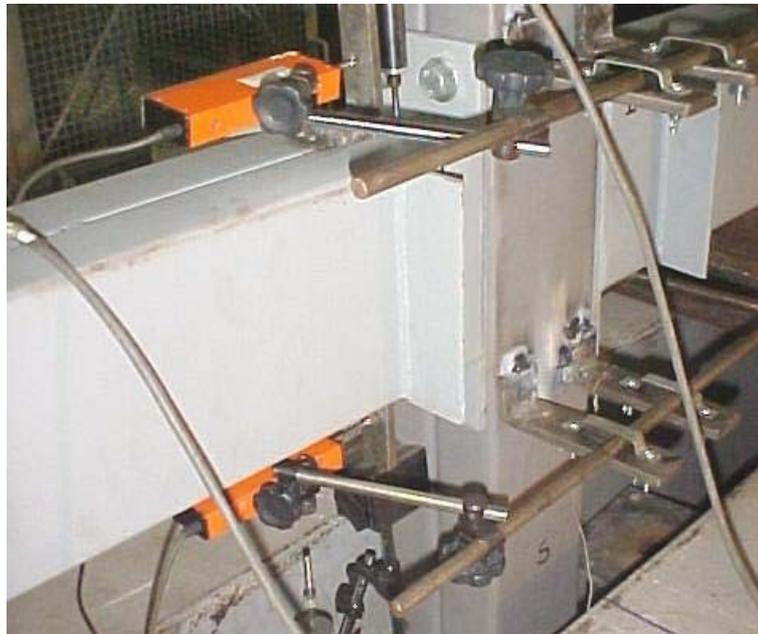


FOTO 3.6 – Aparelhos medidores do encurtamento e alongamento (DT₅₀).



FOTO 3.7 – Ganchos para suporte dos medidores (DT_{50}) de encurtamento e alongamento.

Em alguns modelos foi realizada a medida do deslocamento horizontal da parte inferior do pilar. Essa medição foi feita nos primeiros ensaios realizados com o intuito de se monitorar a verticalidade do modelo e evitar acidentes, preservando a integridade física das pessoas e dos equipamentos eletrônicos. Como se comprovou que os modelos não apresentavam deslocamentos significativos, mantendo sua verticalidade, essa medição foi omitida nos ensaios posteriores. Esse deslocamento foi medido com a utilização de um DT_{25} fixado, por meio de base magnética, ao pórtico de reação e apontado contra o pilar do modelo (FOTO 3.8). As medições provenientes desse ponto foram designadas como D-HOR.



FOTO 3.8 – DT_{25} realizando medição do deslocamento horizontal do modelo.

Em todos os modelos ensaiados foi realizada uma medição do deslocamento vertical da viga com relação ao pilar, utilizando-se tanto relógios comparadores (REC) quanto DT_{50} . Os instrumentos foram fixados ao pilar, por meio de base magnética, e apontados verticalmente contra a mesa da viga, em um ponto o mais próximo possível da chapa de extremidade da mesma. As medições provenientes desses aparelhos são chamadas DVV-L e DVV-O, isto é: deslocamento vertical da viga no lado leste e deslocamento vertical da viga no lado oeste, respectivamente. A montagem das FOTOS 3.9 mostra como esses aparelhos foram instalados nos modelos.

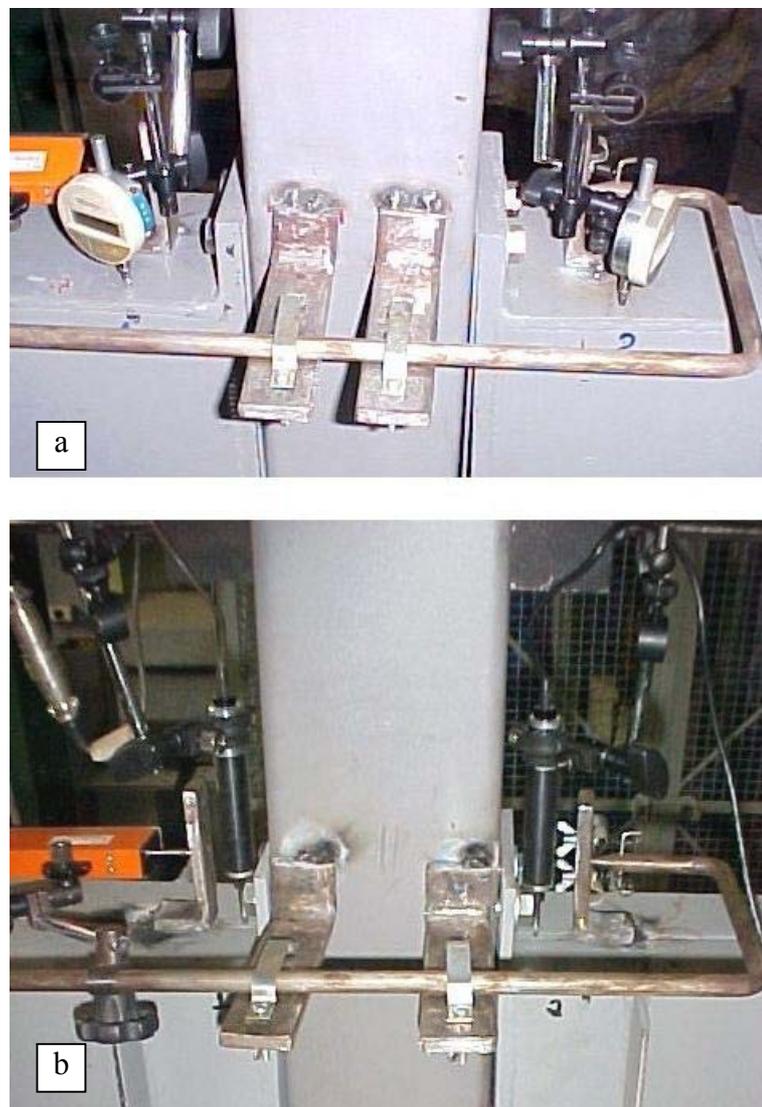


FOTO 3.9 – Deslocamento vertical da viga: a) com relógios comparadores (REC) e b) com transdutores de deslocamento (DT_{25}).

A TAB. 3.3 mostra os tipos de medições que foram realizadas em cada ensaio, além de informar os aparelhos utilizados.

TABELA 3.3 – Medições realizadas e tipos de aparelhos utilizados.

Modelo	DH-N DH-S	DVV-L DVV-O	D-VERT	D-HOR	EER-N EER-S
01AF-01	DT ₅₀	REC	DT ₁₀₀	DT ₂₅	Sim
01AF-02	DT ₅₀	DT ₂₅	DT ₁₀₀	-	-
01AF-03	DT ₅₀	DT ₂₅	DT ₁₀₀	-	-
01BF-01	DT ₅₀	DT ₂₅	DT ₁₀₀	-	-
01BF-02	DT ₅₀	DT ₂₅	DT ₁₀₀	-	-
01BF-03	DT ₅₀	DT ₂₅	DT ₁₀₀	-	-
01BR-01	DT ₅₀	REC	DT ₁₀₀	-	Sim
01BR-02	DT ₅₀	REC	DT ₁₀₀	DT ₂₅	Sim
01BR-03	DT ₅₀	REC	DT ₁₀₀	DT ₂₅	Sim
04AF-01	DT ₅₀	DT ₂₅	DT ₁₀₀	-	-
04AF-02	DT ₅₀	DT ₂₅	DT ₁₀₀	-	-
04BR-01	DT ₅₀	REC	DT ₁₀₀	DT ₂₅	Sim
04BR-02	DT ₅₀	REC	DT ₁₀₀	DT ₂₅	Sim
04BR-03	DT ₅₀	DT ₂₅	DT ₁₀₀	-	-

O posicionamento dos aparelhos descritos na TAB. 3.3 é mostrado na FIG. 3.12.

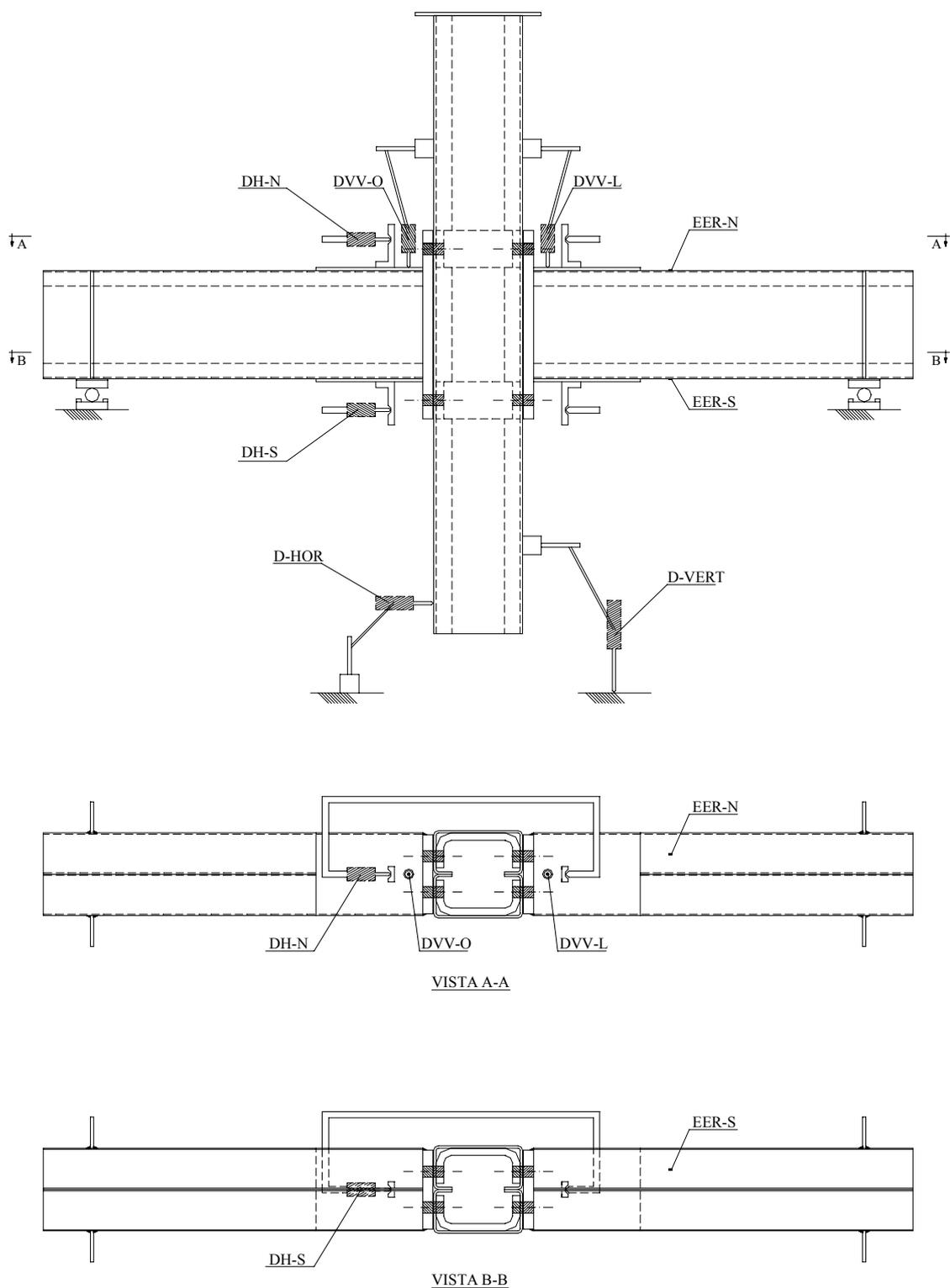


FIGURA 3.12 – Esquema geral do posicionamento dos instrumentos de medição.

3.4.3 – Sistema de Aquisição de Dados

A determinação das leituras com os equipamentos eletrônicos utilizados (transdutores e extensômetros) foi efetuada de forma automatizada, via placa eletrônica de aquisição de dados com 16 canais da Lynx Eletrônica e modelo AC-2120. Esta placa capta a variação de tensão, ΔV , emitida pelo sensor eletrônico e automaticamente grava o valor do parâmetro correspondente (carga, deslocamento, deformação, etc.).

A placa de aquisição é ligada a um microcomputador que, por sua vez, possui instalado o software AqDados, versão 4.0, próprio para a aquisição, armazenamento e tratamento dos sinais obtidos (FOTO 3.10). A frequência de aquisição foi estabelecida em 5Hertz e os ensaios tiveram duração efetiva de aquisição variando de 12 a 60 minutos, resultando em um número elevado de amostras para cada ensaio.

Para filtragem e ajustes das amostras utilizou-se de recursos oferecidos pelo próprio programa, que trata convenientemente os dados, mantendo a confiabilidade dos mesmos. Esse programa também é capaz de converter os arquivos de dados, gravados em uma linguagem própria, em arquivos do formato ASCii compatível com as planilhas eletrônicas hoje disponíveis



FOTO 3.10 – Sistema de aquisição de dados.

4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 – Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados da análise experimental obtidos nos ensaios de flexão e cisalhamento dos modelos descritos na seção 3.3. A avaliação qualitativa e quantitativa dos dados é realizada a partir dos gráficos e tabelas apresentadas em função da rigidez das ligações e suas deformações.

São apresentados também os resultados numéricos do modelo analítico de potência de 3 parâmetros aplicado a alguns modelos pré-selecionados, na forma de gráficos $M-\theta$, juntamente com os resultados experimentais.

Os decréscimos de carga, registrados ao longo das curvas experimentais $M-\theta$, são devidos ao retorno de uma pequena quantidade de óleo para a bomba hidráulica durante os intervalos de tempo necessários para leitura e anotação dos valores apresentados pelos instrumentos de medição, bem como para uma inspeção visual do modelo naquele momento.

4.2 – Resultados Experimentais

Os ensaios foram conduzidos até o estado de plastificação ou ruptura dos meios de ligação, como soldas e rebites, além do início de escoamento da chapa de extremidade, caracterizando a formação de charneira plástica e colapso do modelo.

Para cada tipo de modelo projetado foram ensaiados de dois a três exemplares. Por isto, os resultados foram agrupados e apresentados de acordo com o tipo de modelo. Para melhor entendimento e comparação entre os resultados dos ensaios é apresentado um resumo dos eventos ocorridos ao longo dos respectivos ensaios, e uma descrição mais detalhada dos mesmos, além dos gráficos e tabelas correspondentes.

4.2.1 – Modelos 01AF

Conforme foi apresentado na TAB. 3.2 para essa ligação foram realizados três ensaios, sendo um à flexão e os demais ao cortante. Na TAB. 4.1 são apresentados alguns eventos ocorridos durante esses ensaios e a carga correspondente.

O modelo 01AF-01, solicitado ao momento fletor, atingiu carga a última (P_u) de 38,55kN, que corresponde a um momento último (M_u) de 1134,42kN·cm. Para a carga de 35kN o modelo passou a ter uma deflexão excessiva (FOTO 4.1) e, por medida de segurança, optou-se pelo término do ensaio. Durante todo o experimento não foram detectadas tensões longitudinais nas vigas maiores que àquela correspondente à resistência ao escoamento do aço. Com a carga de 19,27kN (556,51kN·cm) foram percebidos os primeiros indícios de “*pull out*” na alma do pilar, observado a partir da separação entre a chapa de extremidade da viga e o próprio pilar (tração exercida pelos parafusos inferiores). Para a carga de 25,45kN (749,15kN·cm) foi verificada uma deformação das chapas de extremidade das vigas junto às mesas superiores, caracterizando a formação de charneira plástica. Ambos os fenômenos descritos são ilustrados pela FOTO 4.2.

TABELA 4.1 – Resumo dos eventos ocorridos nos ensaios dos modelos 01AF.

Modelo 01AF-01	
Carga (kN)	Evento
15,27	Deformação da chapa de extremidade da viga
19,27	Deformada da alma do pilar devido ao efeito “ <i>pull out</i> ”, início de rasgamento dos furos inferiores
25,45	Flexão excessiva da CH de extremidade da viga. Charneira plástica
38,55	Fim de ensaio devido à deflexão excessiva do modelo
Modelo 01AF-02	
Carga (kN)	Evento
70,91	Início de flexão da chapa de extremidade da viga
90,91	Efeito “ <i>pull out</i> ” no pilar, início de rasgamento dos furos inferiores
130,6	Distorção do pilar; presença de pequena parcela de momento fletor
177,1	Interrupção do ensaio por motivos de segurança
Modelo 01AF-03	
Carga (kN)	Evento
163,5	Deformação por cortante na região parafuso-rebite-chapa conectada
240,0	Interrupção do ensaio por motivo de segurança, depois de verificada a proximidade da carga correspondente à resistência ao cisalhamento dos parafusos



FOTO 4.1 – Aspecto geral do modelo 01AF-01 no fim do ensaio.

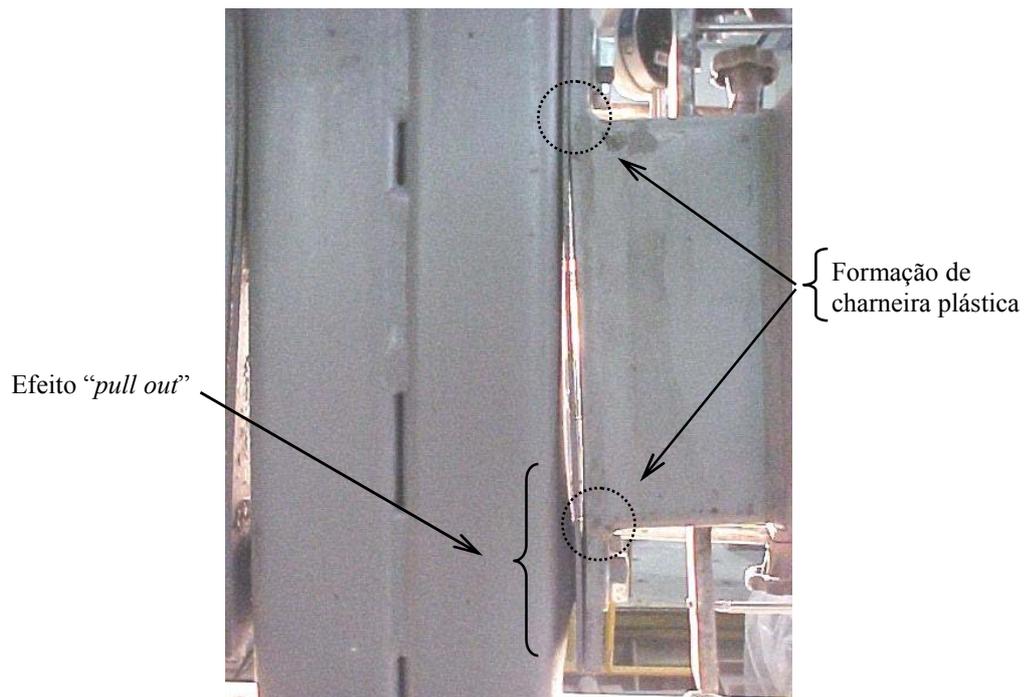


FOTO 4.2 – Deformações observadas no modelo 01AF-01.

Os modelos 01AF-02 e 01AF-03 foram ensaiados simulando o efeito da força cortante na ligação. Para tanto, optou-se pela utilização de apoios bem próximos do pilar, tentando minimizar os efeitos devidos ao momento fletor na ligação.

Primeiramente, no ensaio do modelo 01AF-02, o apoio foi montado utilizando-se um par de roletes dispostos sob as vigas, conforme se pode observar na FOTO 3.3-b. Para a carga de 70,91kN foi verificado o início da flexão da chapa de extremidade de ambas as vigas e, para a carga de 90,91kN verificou-se o início de escoamento da alma do pilar, caracterizado pelo efeito de “*pull out*” visível devido à força de tração exercida pelos parafusos inferiores. Para a carga de 130,6kN, a deformação global do modelo, composta de “*pull out*” e pelas charneiras plásticas em ambas as chapas de extremidade, indicou que a montagem dos apoios não eliminou o aparecimento de momento fletor, fazendo-se necessário a realização de um novo ensaio com os apoios exatamente nas chapas de extremidade. O ensaio seguiu até a carga de 177,1kN quando, por medida de segurança, optou-se pelo seu término. O aspecto desse modelo após o ensaio é mostrado na FOTO 4.3, onde se pode observar os fenômenos descritos.



FOTO 4.2 – Aspecto do modelo 01AF-02 após o ensaio.

O ensaio do modelo 01AF-03 foi realizado com os apoios posicionados o mais próximo possível do pilar, exatamente sob as chapas de extremidades das vigas, conforme se pode observar na FOTO 3.3-a. Desta forma, garantiu-se que a ligação estaria sendo solicitada apenas a esforços cortantes. Todo o ensaio foi realizado com o máximo de cautela possível já que a área do apoio do modelo era muito pequena e a carga prevista muito alta. Mesmo neste ensaio, observou-se o aparecimento de alguma deformação devida ao momento fletor. Para esse ensaio os aparelhos de medição de rotação foram montados, tendo sido detectadas rotações desprezíveis no modelo, conforme se pode observar na FIG. 4.8. Para a carga de 163,5kN foi observado o início da deformação dos parafusos, devido aos esforços de cisalhamento, ficando mais evidente com o acréscimo de carga, conforme FOTO 4.3. O ensaio prosseguiu até que a resistência de cálculo ao cisalhamento dos parafusos (259kN) fosse quase superada, portanto, para a carga de 240,0kN foi decretado o fim do ensaio por motivos de segurança.



FOTO 4.3 – Deformação visível dos parafusos do modelo 01AF-03.

As respostas gráficas dos ensaios da ligação 01AF encontram-se representadas nas FIG. 4.1 a 4.11.

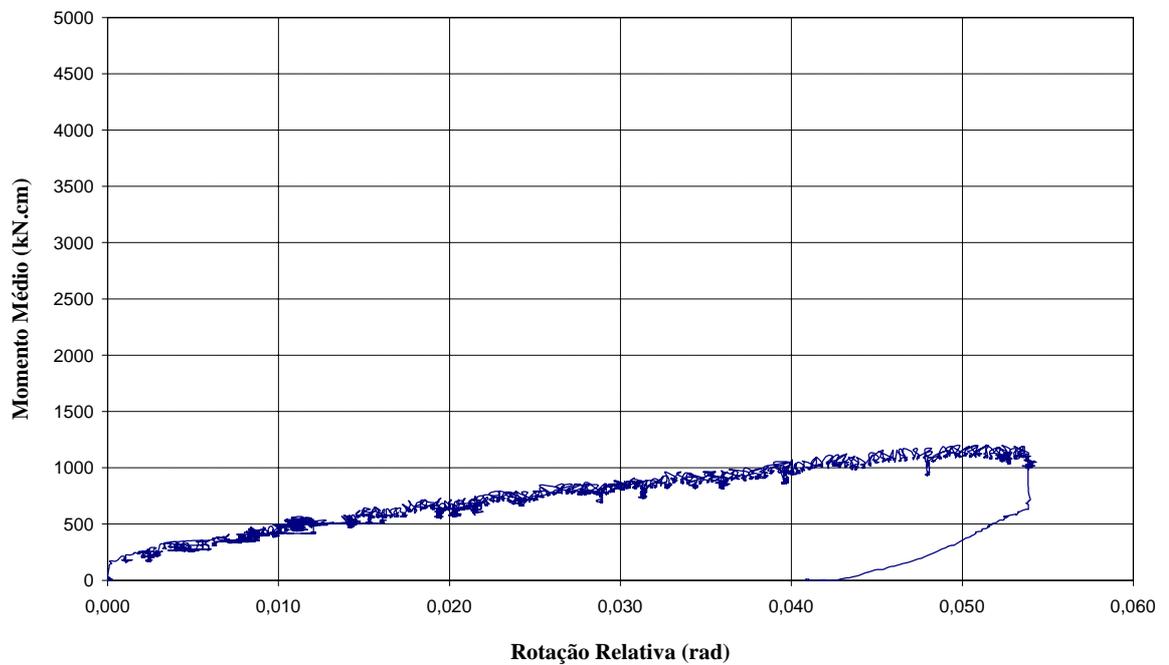


FIGURA 4.1 – Modelo 01AF-01: Momento médio no nó X rotação relativa.

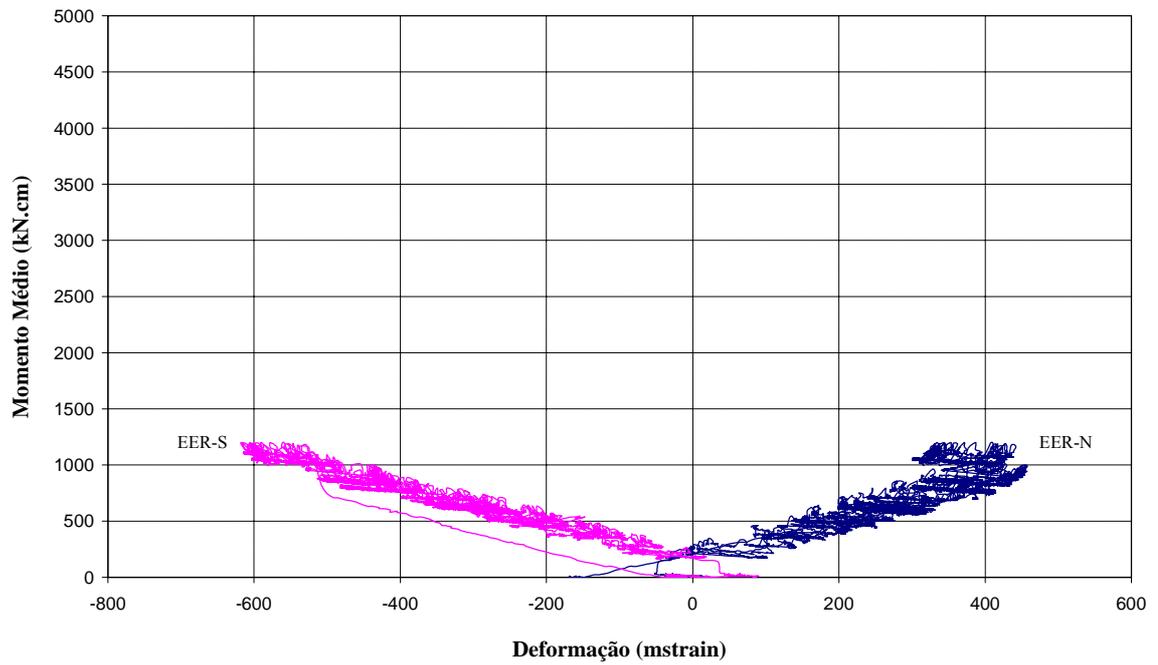


FIGURA 4.2 – Modelo 01AF-01: Momento médio no nó X deformações específicas nas vigas.

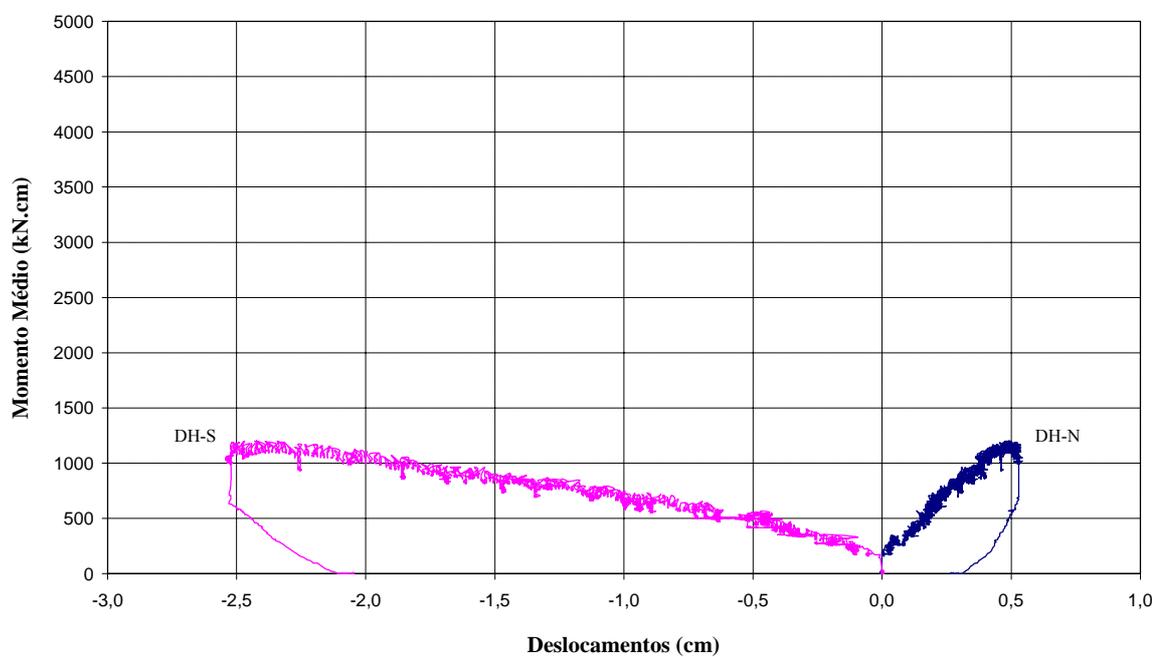


FIGURA 4.3 – Modelo 01AF-01: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.

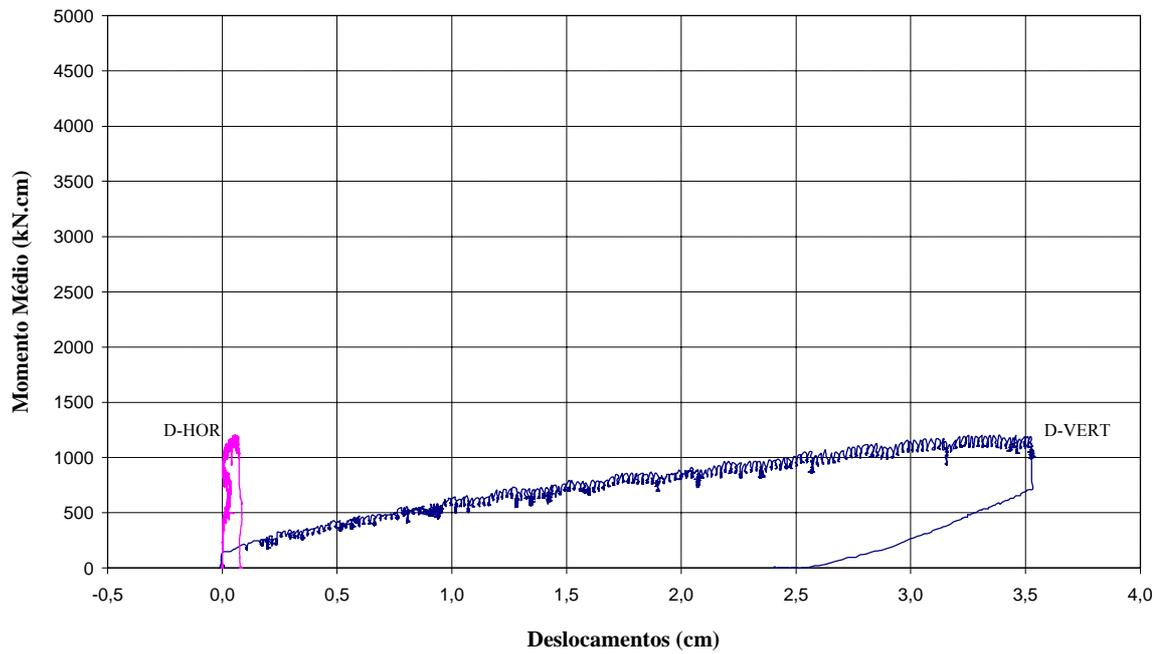


FIGURA 4.4 – Modelo 01AF-01: Momento médio no nó X deslocamentos vertical e horizontal da base do pilar.

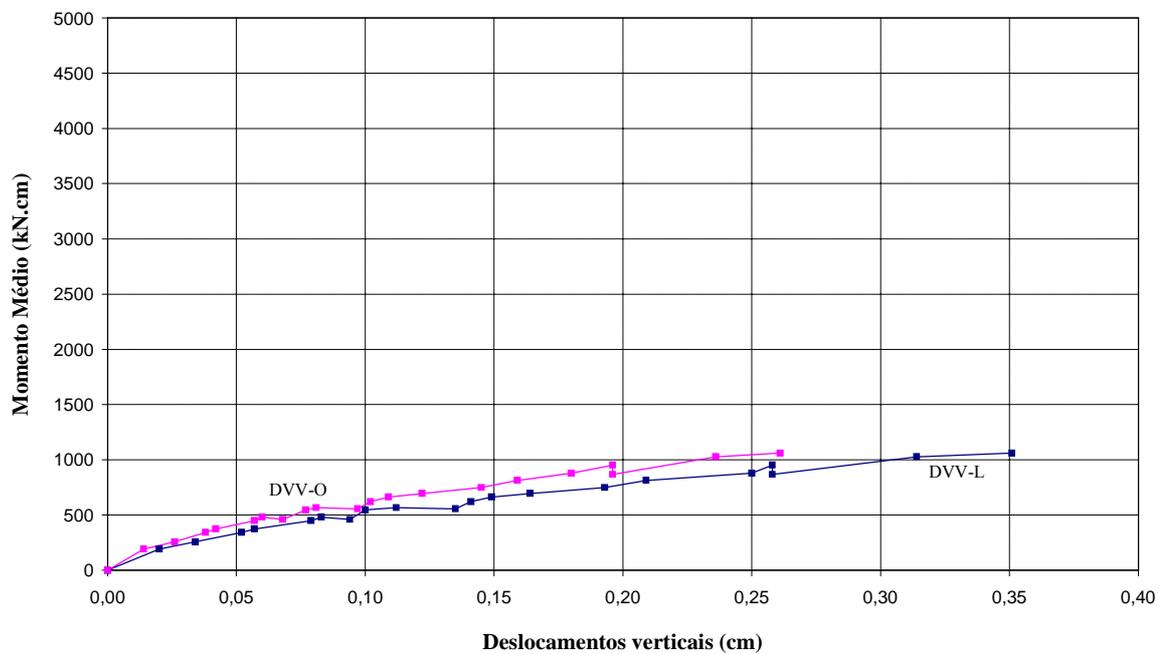


FIGURA 4.5 – Modelo 01AF-01: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com os relógios comparadores (REC).

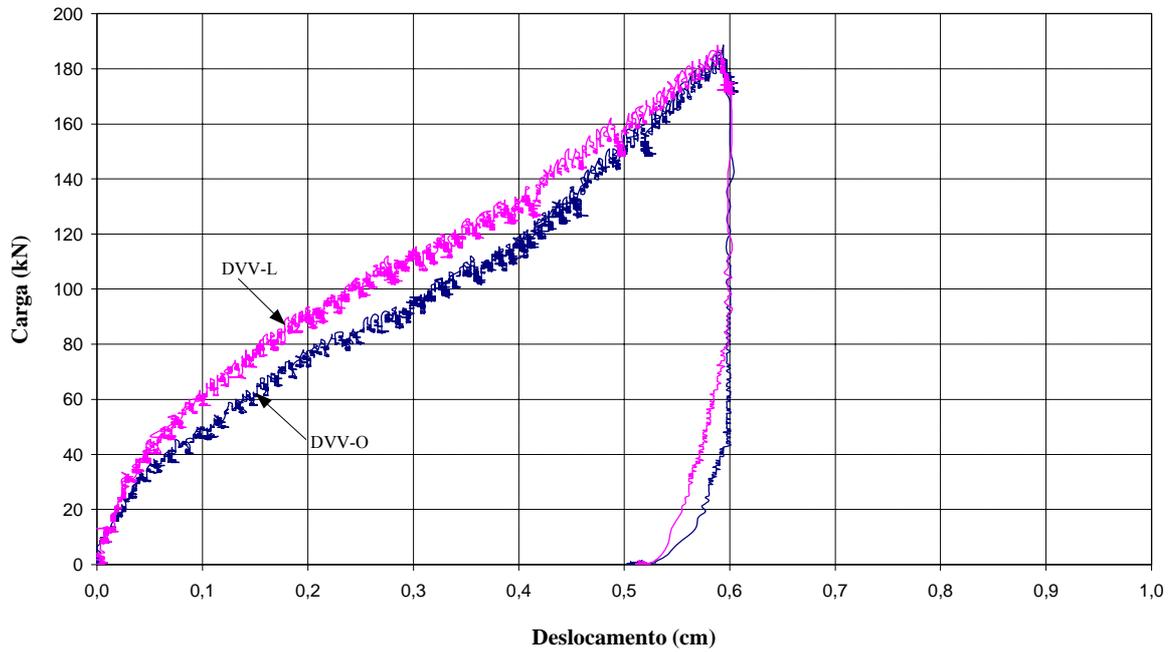


FIGURA 4.6 – Modelo 01AF-02: Carga vertical no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas (DT₂₅).

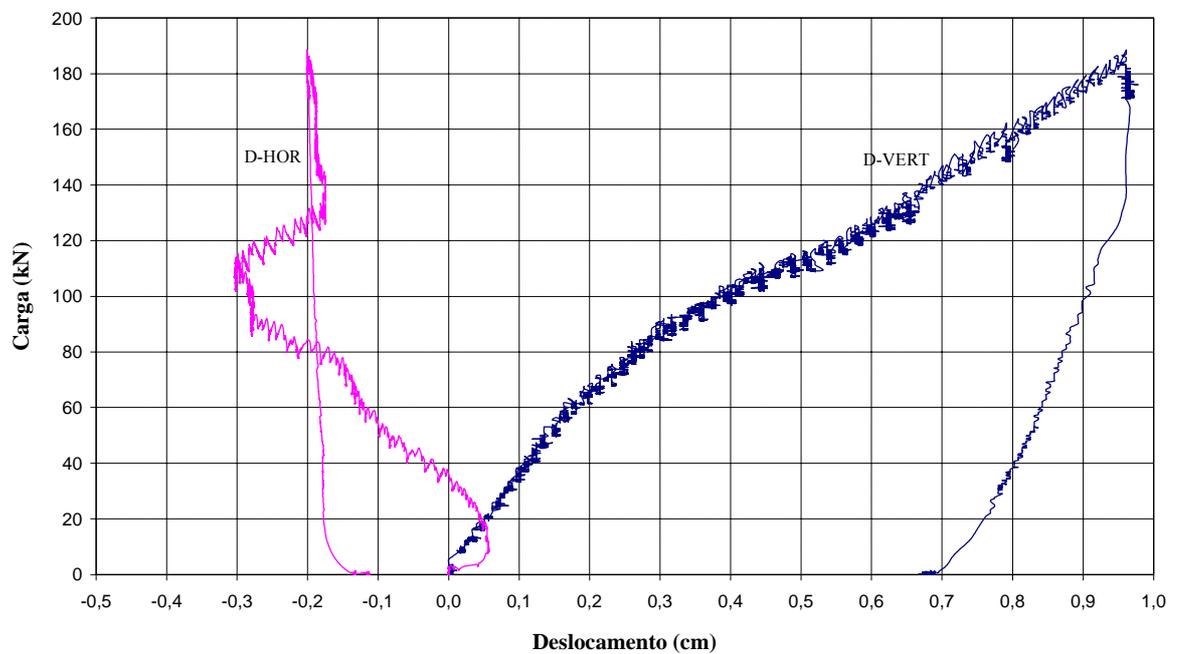


FIGURA 4.7 – Modelo 01AF-02: Carga vertical no nó X deslocamentos vertical e horizontal da base do pilar.

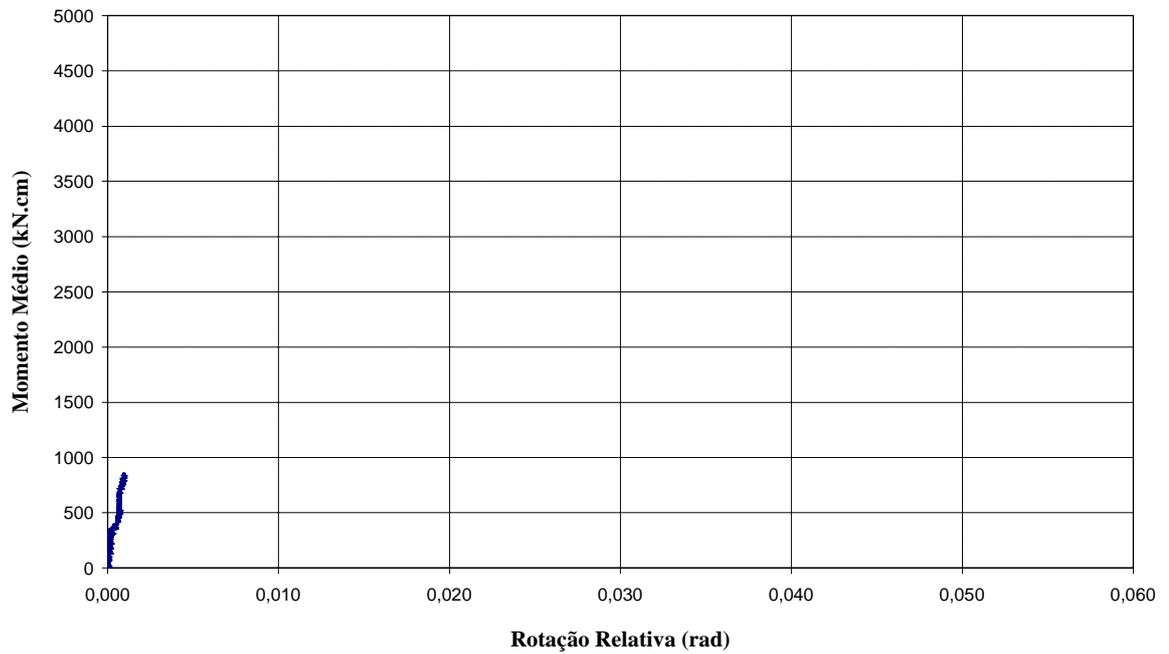


FIGURA 4.8 – Modelo 01AF-03: Momento médio no nó X rotação relativa.

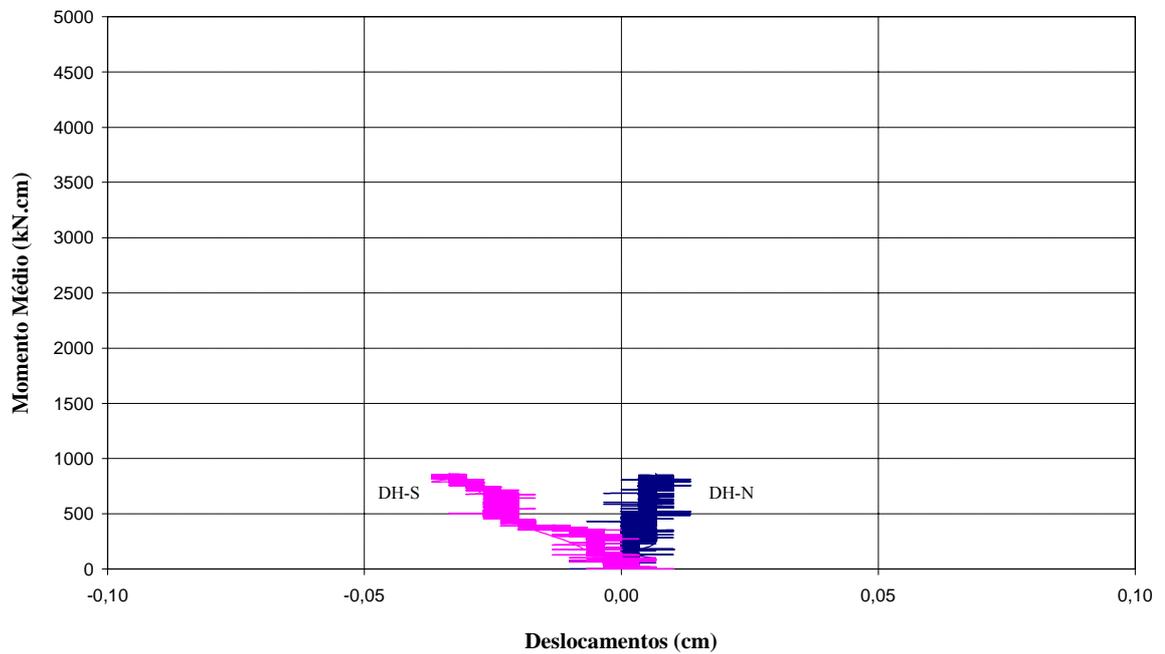


FIGURA 4.9 – Modelo 01AF-03: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.

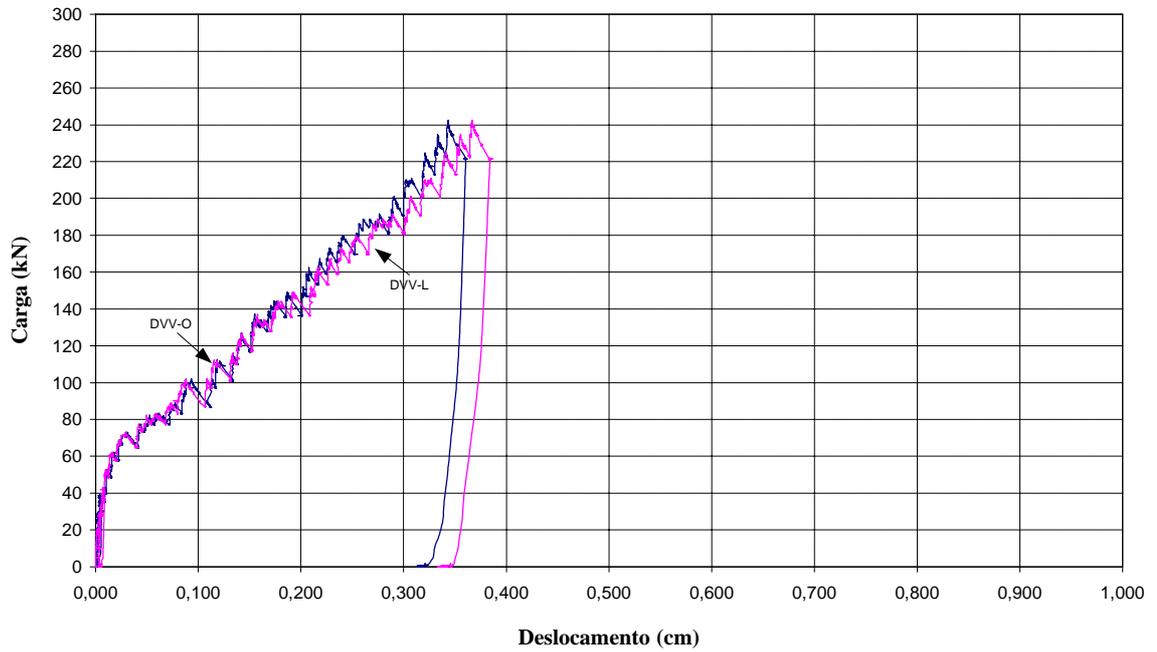


FIGURA 4.10 – Modelo 01AF-03: Carga vertical no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas (DT₂₅).

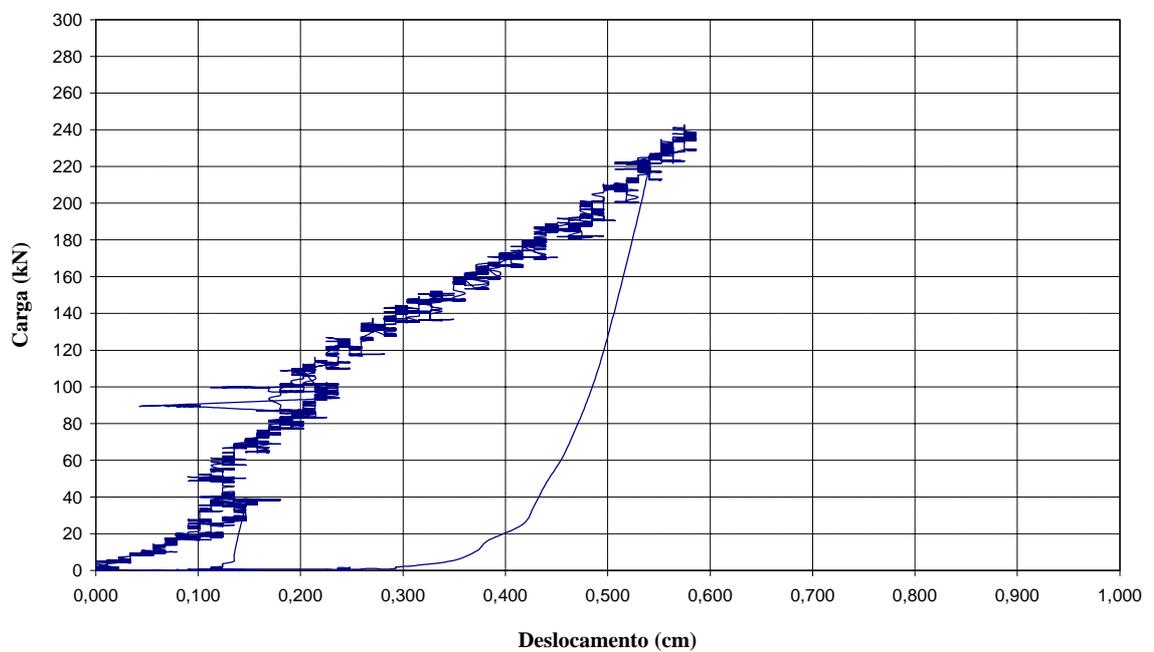


FIGURA 4.11 – Modelo 01AF-03: Carga vertical no nó X deslocamentos vertical da base do pilar.

4.2.2 – Modelos 01BR

Conforme foi apresentado na TAB. 3.2, para essa ligação foram realizados três ensaios ao momento fletor, com os apoios instalados nas extremidades das vigas. Em todos os modelos, o final do ensaio foi caracterizado pelo rompimento brusco dos rebites inferiores das ligações. A ruptura ocorreu devido ao alto esforço de tração nos parafusos inferiores combinado à grande rigidez do conjunto pilar e chapas internas de reforço. A FOTO 4.4 mostra, comparativamente, como ocorreu o rompimento dos rebites desses modelos.

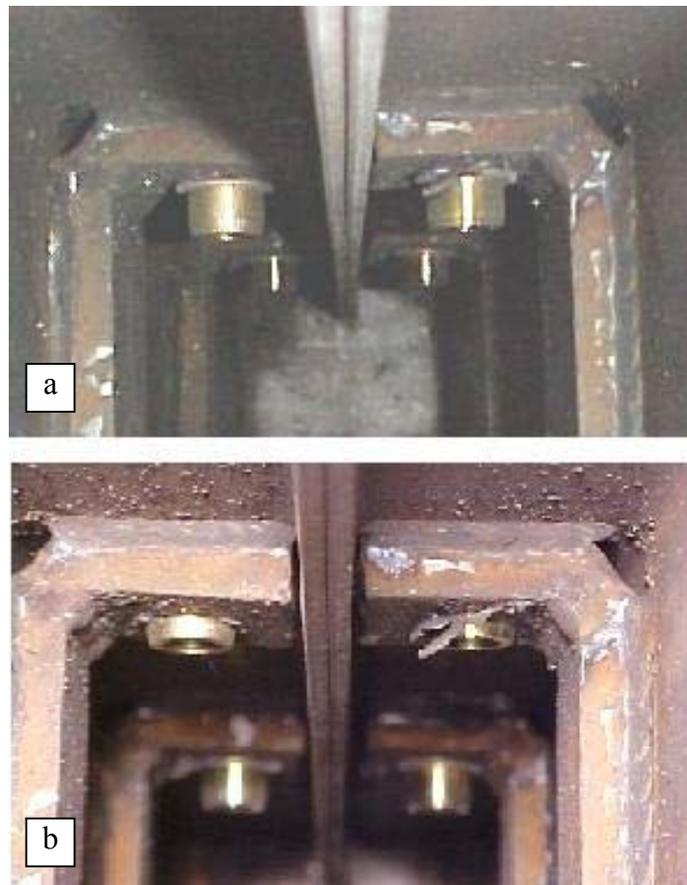


FOTO 4.4 – Modo de ruptura brusca dos rebites inferiores dos modelos 01BR: a) antes da ruptura e b) após a ruptura.

Na TAB. 4.2 são apresentados resumidamente alguns eventos ocorridos durante esses ensaios e as respectivas cargas.

TABELA 4.2 – Resumo dos eventos ocorridos nos ensaios dos modelos 01BR.

Modelo 01BR-01	
Carga (kN)	Evento
46,45	Separação visível entre o pilar e a chapa de extremidade da viga
90,91	Maior carga registrada antes da ruptura dos rebites
85,82	Rompimento dos rebites inferiores do lado L
Modelo 01BR-02	
Carga (kN)	Evento
53,10	Estalos indicando acomodamento da estrutura
87,27	Maior carga registrada antes da ruptura dos rebites
72,00	Rompimento dos rebites inferiores do lado L
Modelo 01BR-03	
Carga (kN)	Evento
81,09	Deformação visível dos rebites inferiores
95,64	Maior carga registrada antes da ruptura dos rebites
84,37	Rompimento dos rebites do lado O

O modelo 01BR-01 atingiu sua carga última (P_u) em 90,91kN, o que corresponde a um momento último (M_u) de 2731,83kN·cm. Durante todo o experimento não foram detectadas tensões longitudinais na viga maiores que àquela correspondente à resistência ao escoamento do aço. O final do ensaio ocorreu com o rompimento brusco dos rebites inferiores do lado leste e a última leitura realizada foi de 85,82kN. A FOTO 4.5 mostra uma vista inferior do modelo onde é possível ver a folga entre a chapa de extremidade da viga e o pilar, devido ao rompimento dos rebites.



FOTO 4.5 – Detalhe do modelo 01BR-01 após o ensaio.

O modelo 01BR-02 atingiu sua carga última (P_u) em 87,27kN, correspondendo a um momento último (M_u) de 2628,97kN·cm. Tal como foi verificado no ensaio do modelo 01AF-01, não foram detectadas tensões maiores que àquela correspondente à resistência ao escoamento do aço e, da mesma forma, o final do ensaio ocorreu com o rompimento brusco dos rebites inferiores do lado leste, sendo que a última leitura realizada foi de 72,00kN (2168,90kN·cm). A FOTO 4.6 mostra um detalhe do modelo ensaiado, onde é possível observar a folga entre a chapa de extremidade da viga e o pilar devido ao rompimento dos rebites.

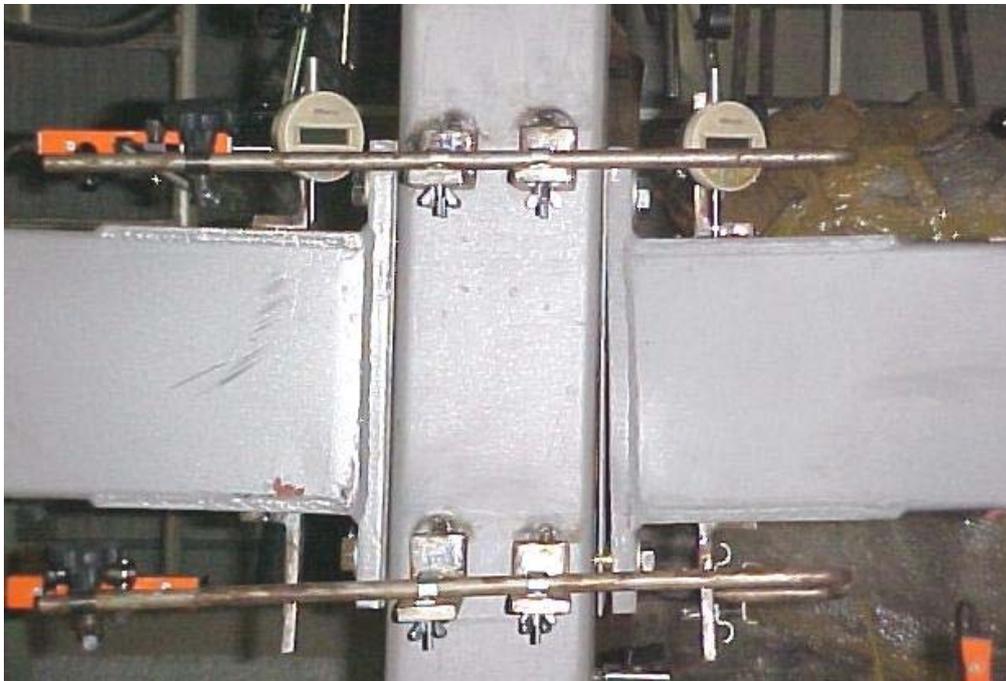


FOTO 4.6 – Detalhe do modelo 01BR-02 após o ensaio.

Para o modelo 01BR-03 foram obtidos qualitativamente os mesmos resultados dos dois ensaios anteriores, indicando uma reprodutibilidade da ligação. O modelo foi solicitado e atingiu sua carga última (P_u) em 95,64kN, correspondendo a um momento último (M_u) de 2880,92kN·cm. As tensões nas mesas superior e inferior das vigas não superaram, na região monitorada, a resistência ao escoamento do aço e o rompimento dos rebites inferiores ocorreu no lado oeste com uma carga de 84,37kN (2541,34kN·cm). Na FOTO 4.7 é possível observar em detalhe os rebites que romperam.

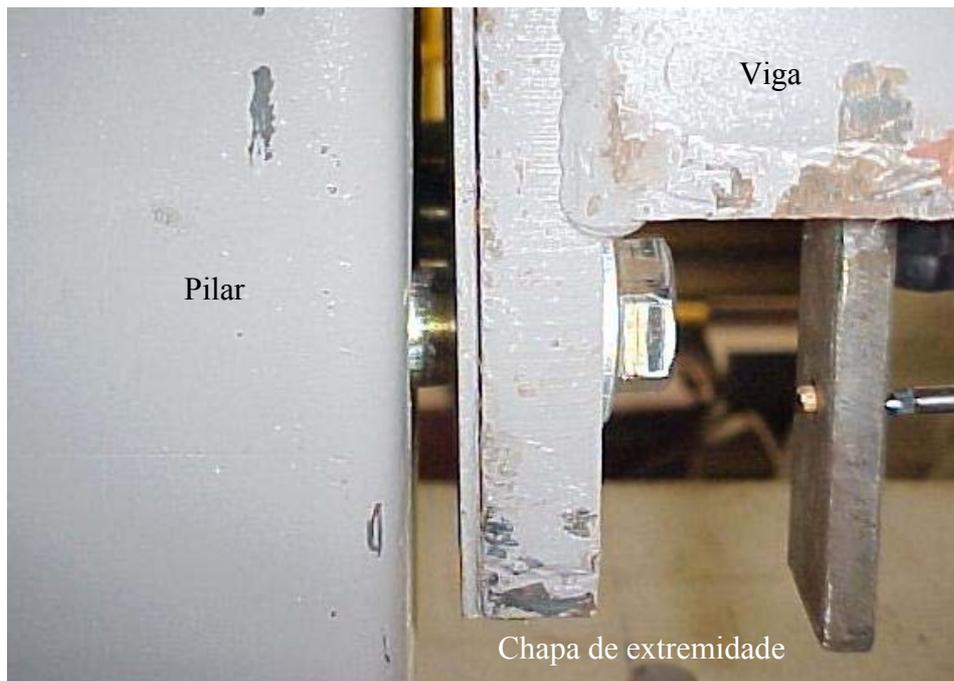


FOTO 4.7 – Detalhe do rompimento dos rebites inferiores do modelo 01BR-03.

As respostas gráficas dos ensaios da ligação 01BR encontram-se representadas nas FIG. 4.12 a 4.26.

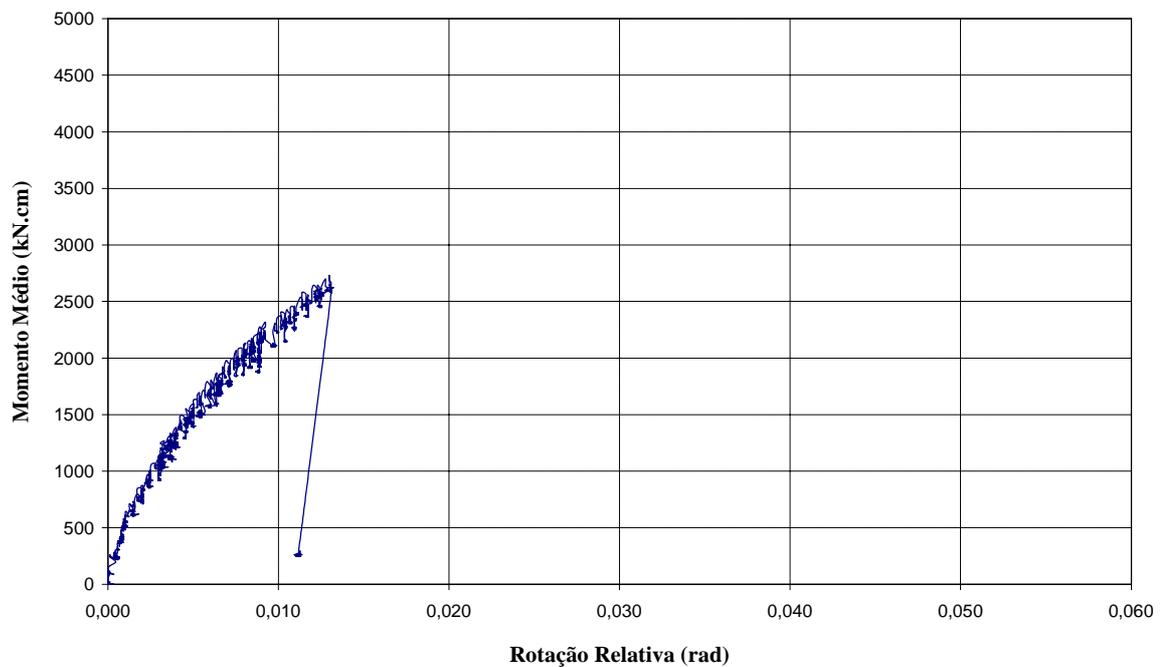


FIGURA 4.12 – Modelo 01BR-01: Momento médio no nó X rotação relativa.

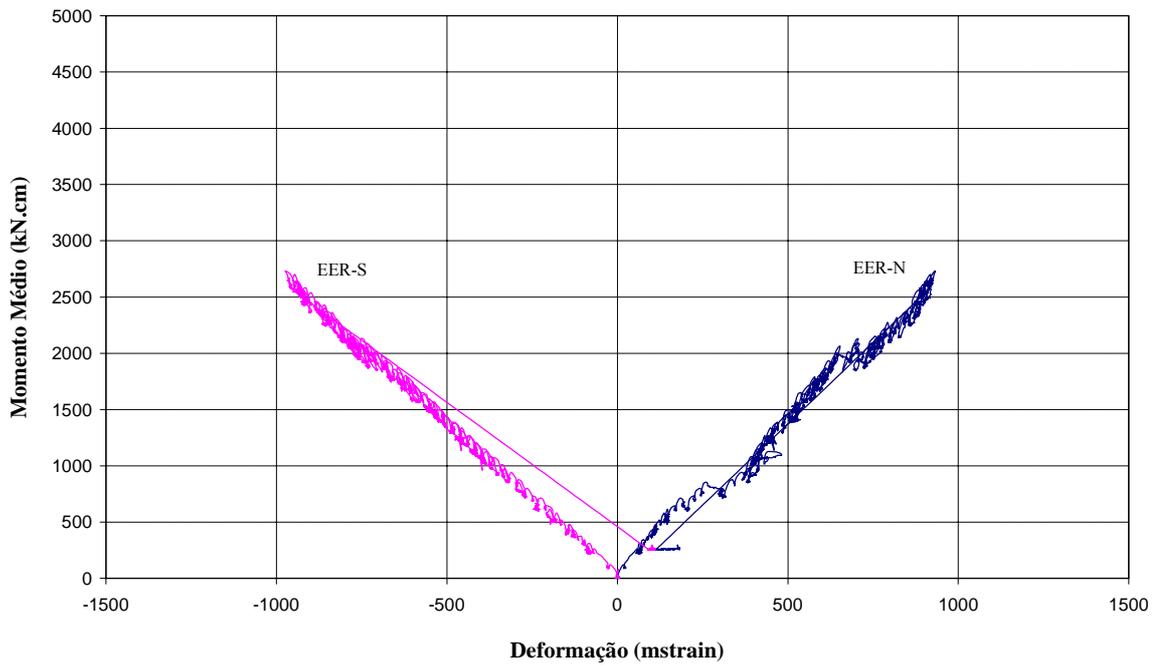


FIGURA 4.13 – Modelo 01BR-01: Momento médio no nó X deformações específicas nas vigas.

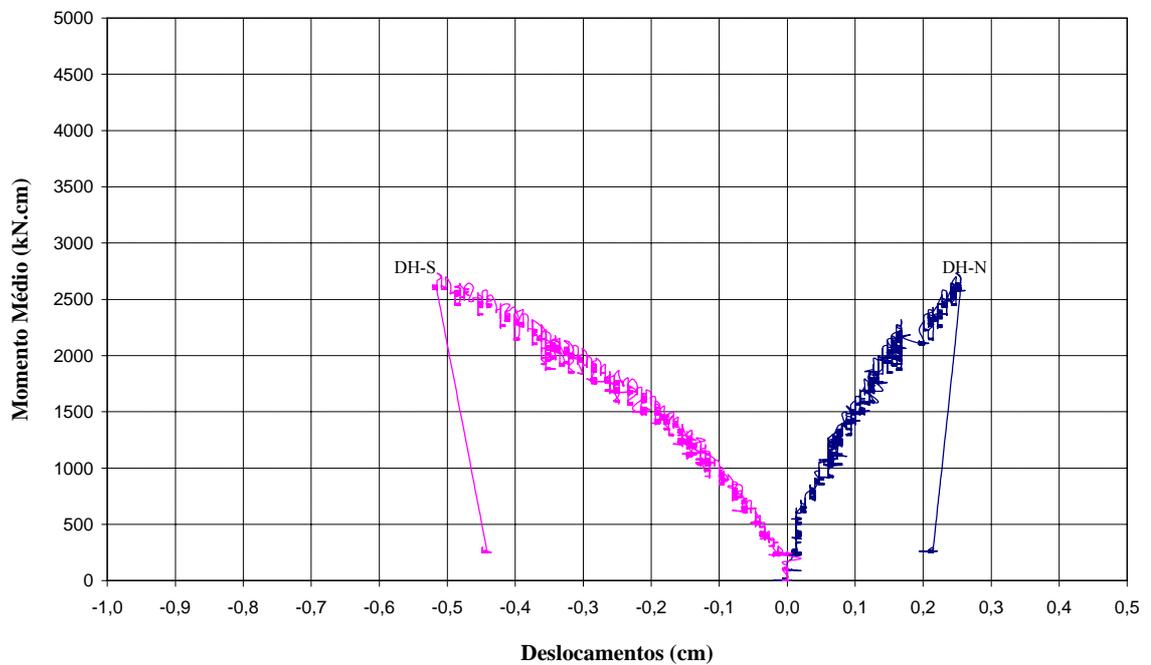


FIGURA 4.14 – Modelo 01BR-01: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.

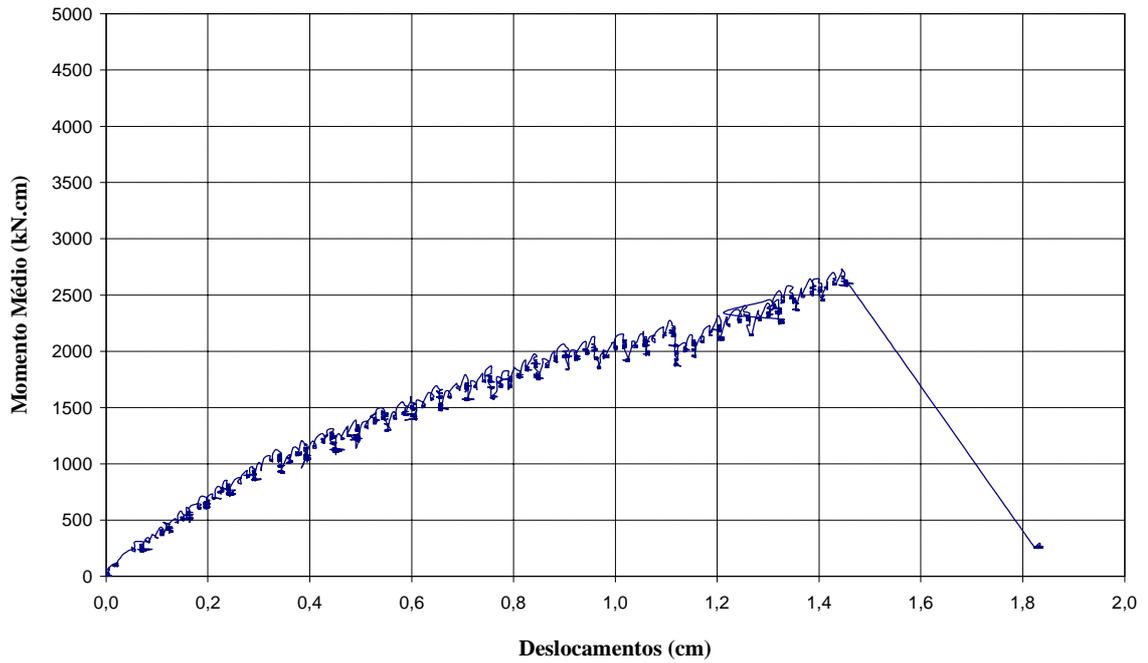


FIGURA 4.15 – Modelo 01BR-01: Momento médio no nó X deslocamento vertical da base do pilar.

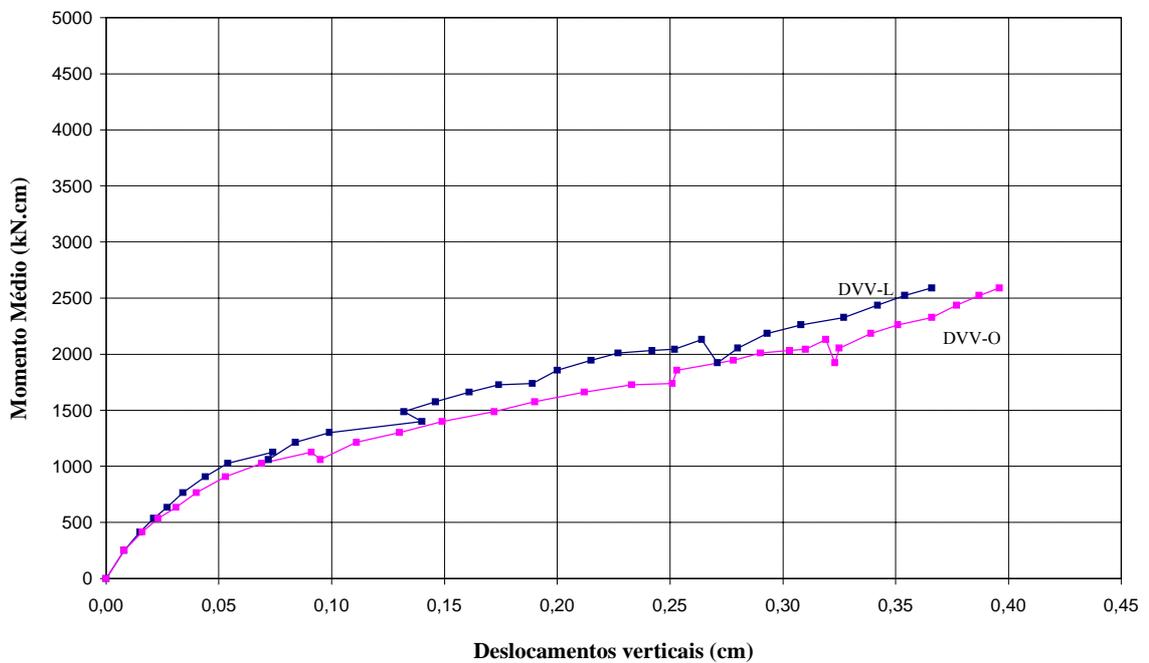


FIGURA 4.16 – Modelo 01BR-01: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com relógios comparadores (REC).

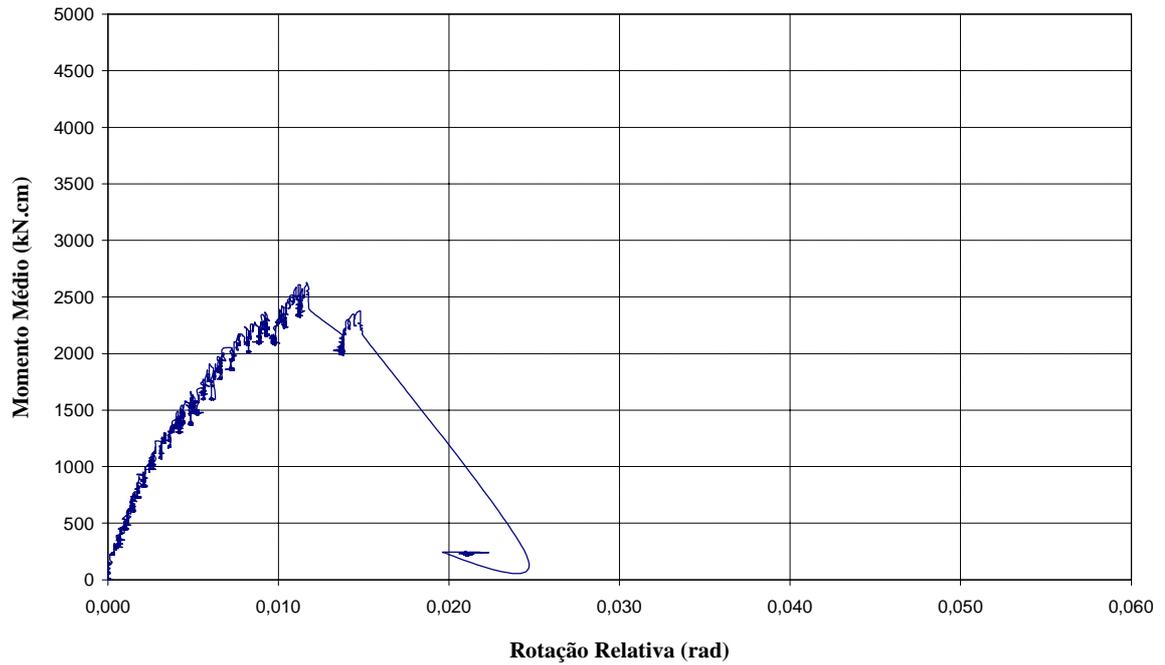


FIGURA 4.17 – Modelo 01BR-02: Momento médio no nó X rotação relativa.

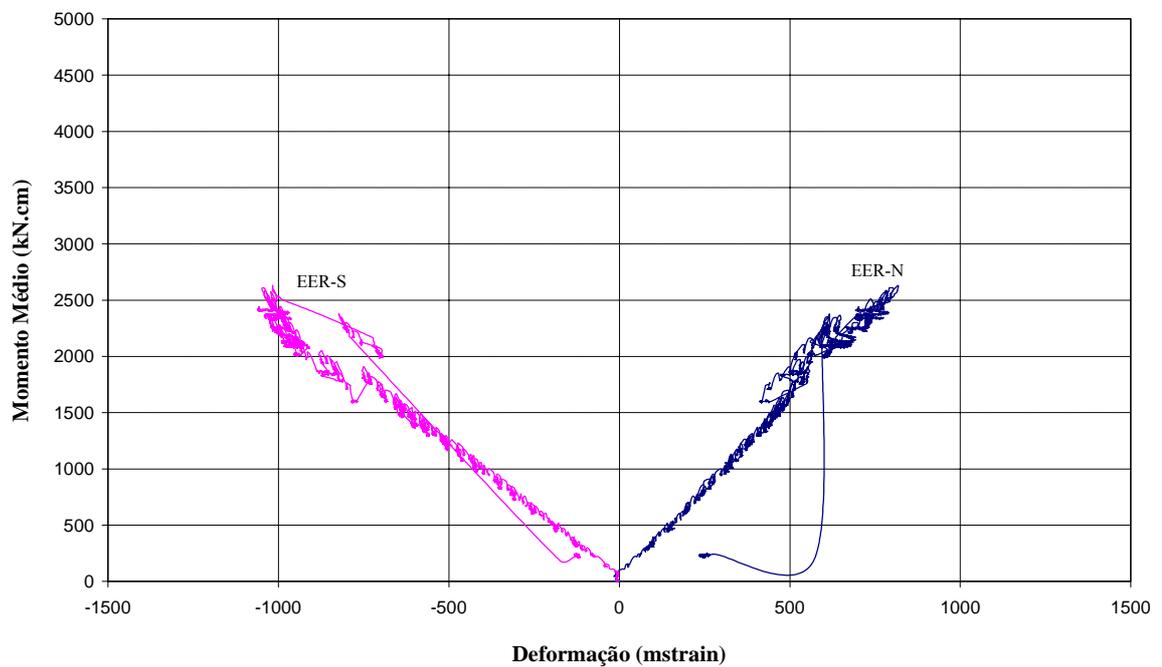


FIGURA 4.18 – Modelo 01BR-02: Momento médio no nó X deformações específicas nas vigas.

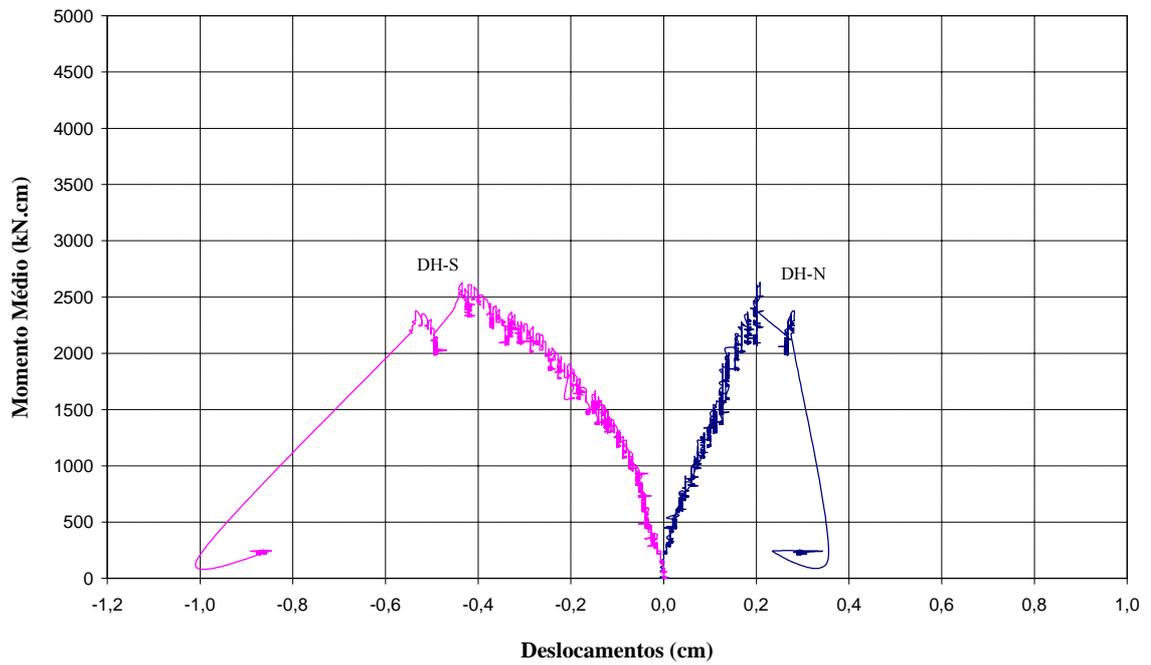


FIGURA 4.19 – Modelo 01BR-02: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.

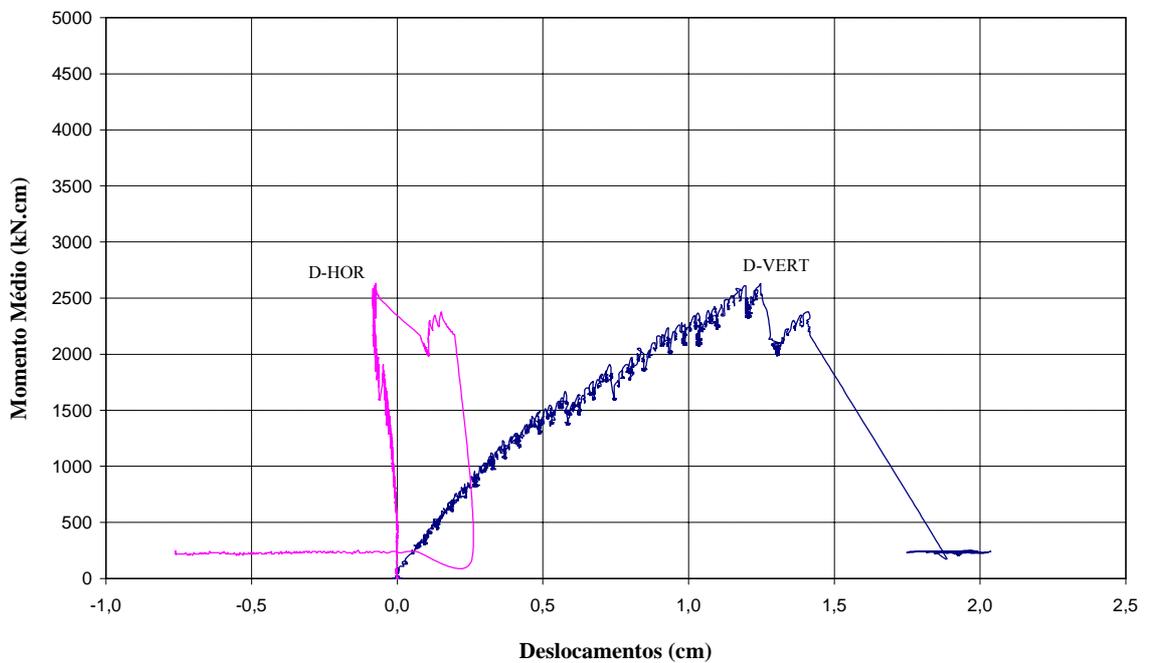


FIGURA 4.20 – Modelo 01BR-02: Momento médio no nó X deslocamentos vertical e horizontal da base do pilar.

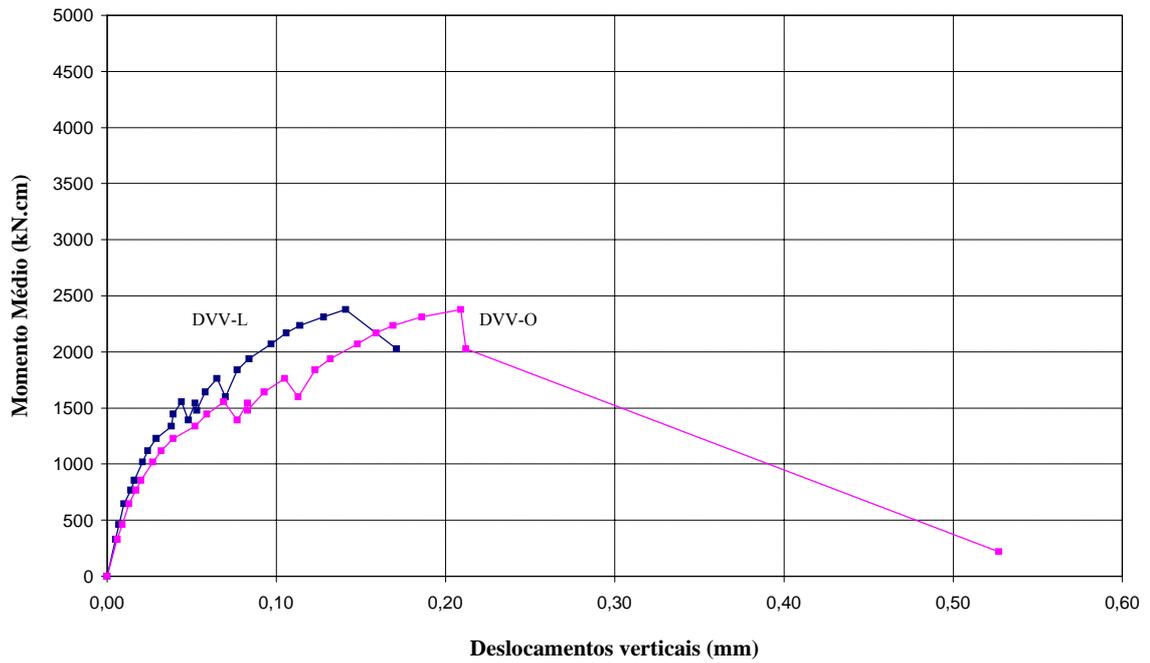


FIGURA 4.21 – Modelo 01BR-02: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com de relógios comparadores (REC).

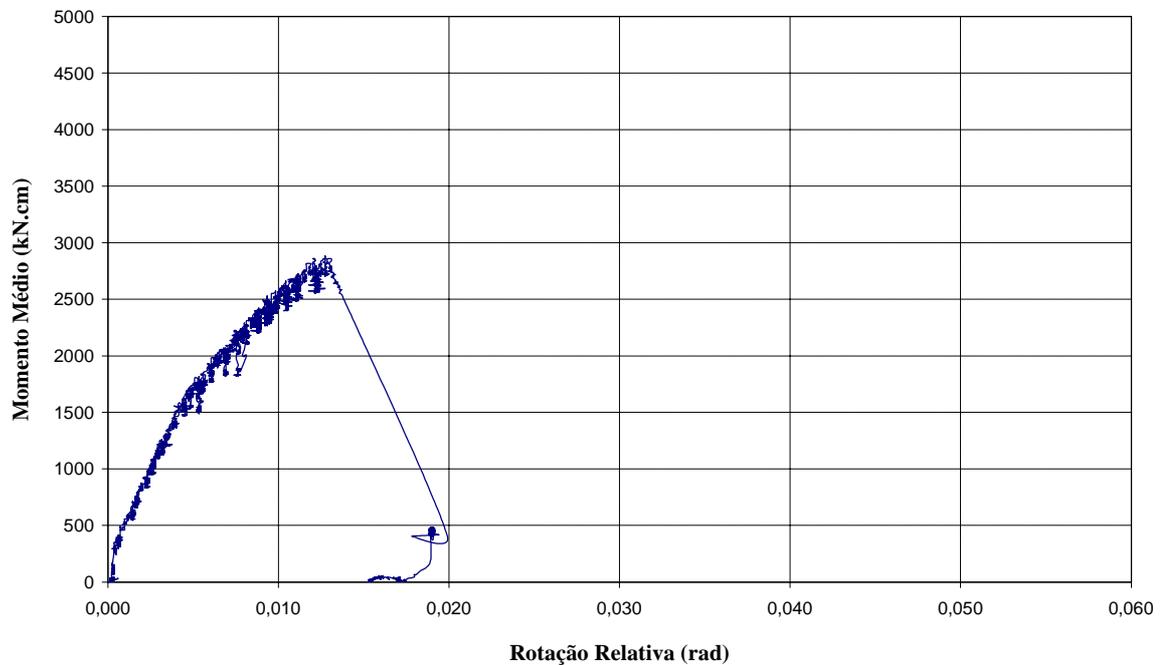


FIGURA 4.22 – Modelo 01BR-03: Momento médio no nó X rotação relativa.

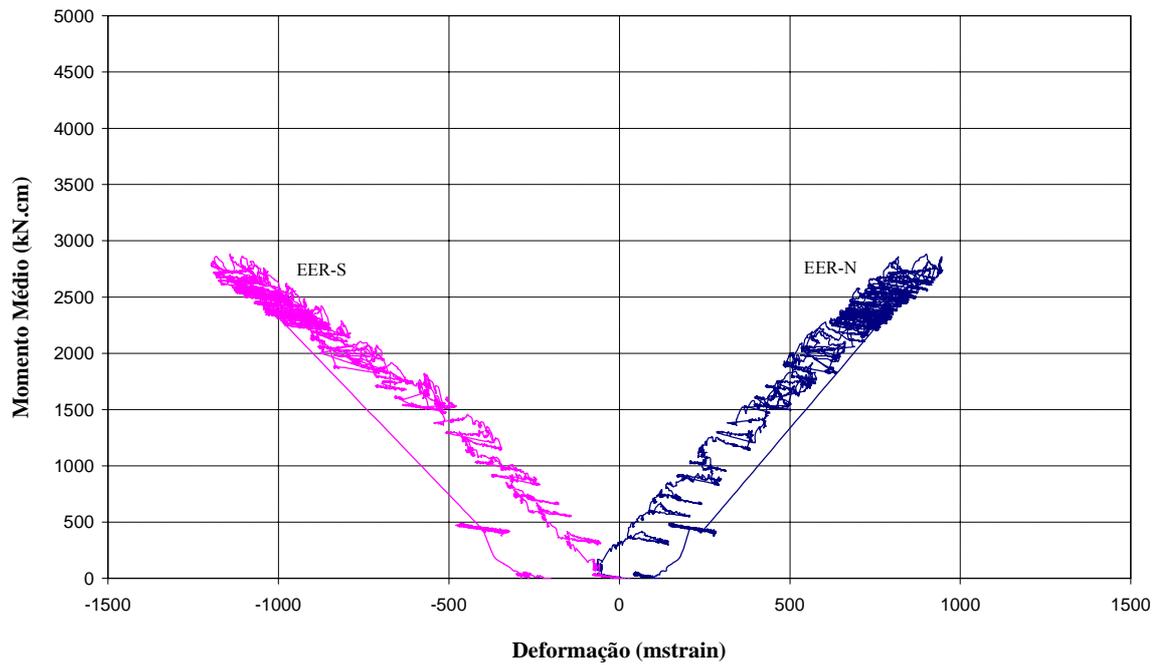


FIGURA 4.23 – Modelo 01BR-03: Momento médio no nó X deformações específicas nas vigas.

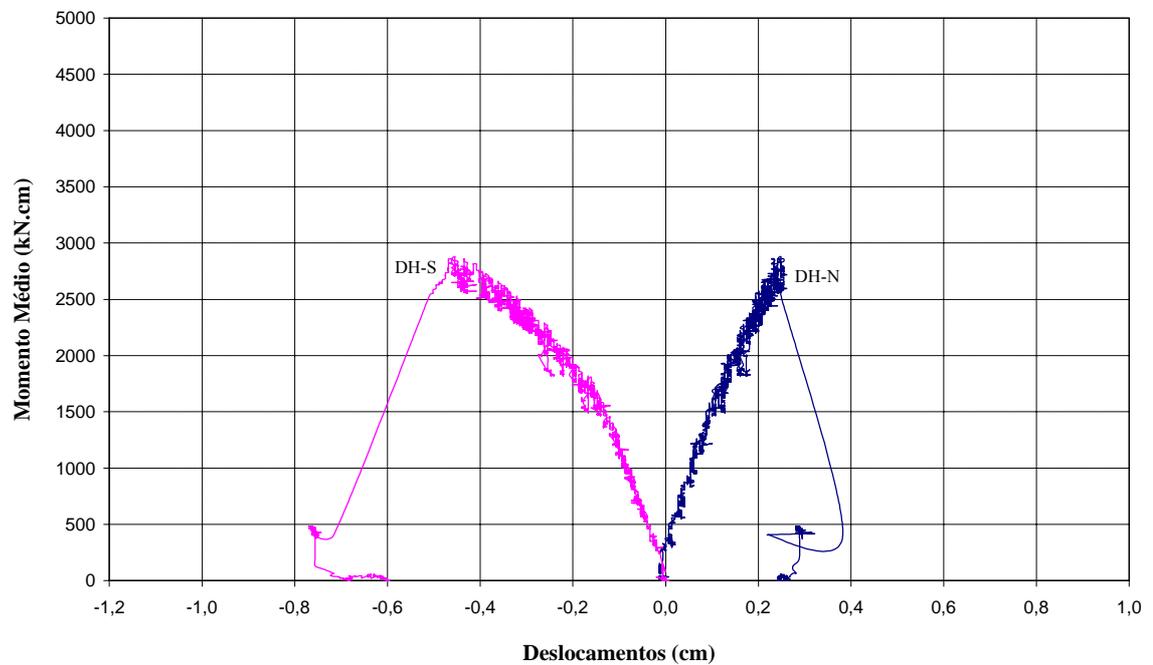


FIGURA 4.24 – Modelo 01BR-03: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.

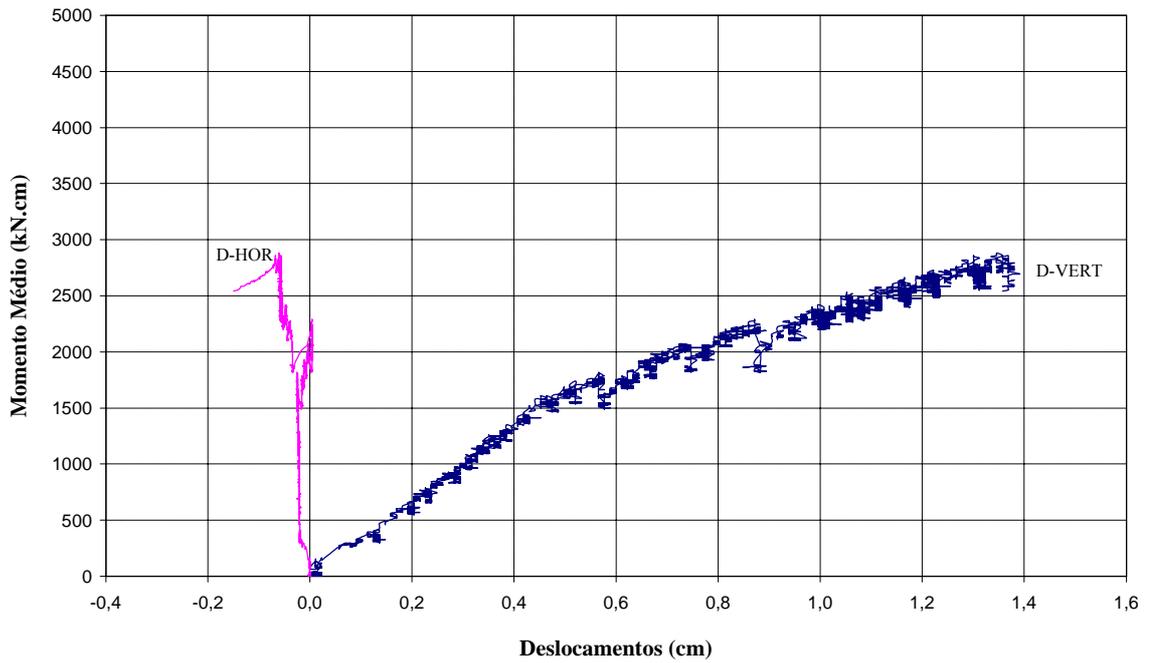


FIGURA 4.25 – Modelo 01BR-03: Momento médio no nó X deslocamentos vertical e horizontal da base do pilar.

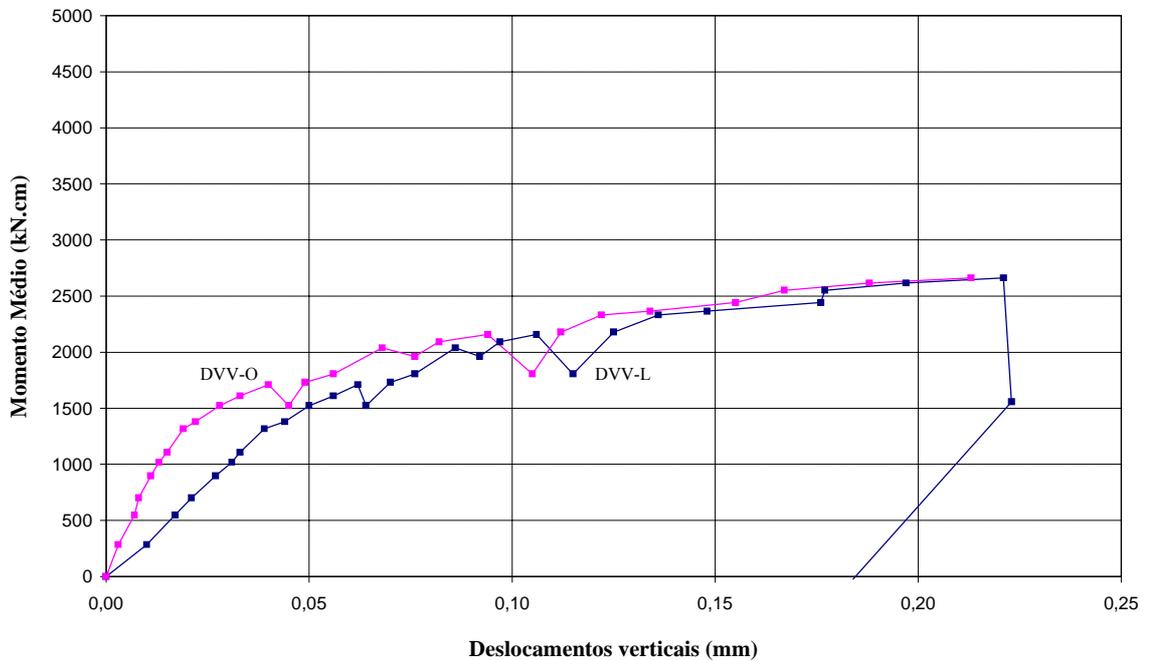


FIGURA 4.26 – Modelo 01BR-03: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com de relógios comparadores (REC).

4.2.3 – Modelos 01BF

Conforme foi apresentado na TAB. 3.2, para essa ligação foram realizados três ensaios com os modelos solicitados ao momento fletor, ou seja, com os apoios localizados nas extremidades das vigas. Na TAB. 4.3 são apresentados alguns eventos ocorridos durante os testes. O modo de ruína, mostrado na FOTO 4.8, foi idêntico para todos os exemplares dessa série, sendo caracterizado pela ocorrência de efeito “*pull out*” na região dos furos inferiores e deformação plástica da chapa de extremidade das vigas (charneira plástica).

TABELA 4.3 – Resumo dos eventos ocorridos nos ensaios dos modelos 01BF.

Modelo 01BF-01	
Carga (kN)	Evento
25,46	Início de deformação da chapa de extremidade da viga
40,01	“ <i>Pull out</i> ” na região dos furos inferiores
47,27	Máximo carregamento registrado, charneira plástica bem definida
39,46	Início do descarregamento
Modelo 01BF-02	
Carga (kN)	Evento
22,91	Início de deformação da chapa de extremidade da viga
28,37	Início de “ <i>pull out</i> ” na região dos furos inferiores
33,82	Máximo carregamento registrado, charneira plástica bem definida
29,09	Início do descarregamento
Modelo 01BF-03	
Carga (kN)	Evento
25,10	Início de deformação da chapa de extremidade da vida
32,01	Formação de “ <i>pull out</i> ” na região dos furos inferiores
43,27	Máximo carregamento registrado, charneira plástica bem definida
36,73	Início do descarregamento

Analisando as cargas e os eventos da TAB. 4.3, verifica-se que os três modelos ensaiados tiveram praticamente a mesma resposta às primeiras etapas de carregamento. O início da deformação da chapa de extremidade das vigas ocorreu, em media, com 25,49kN, que corresponde a um momento fletor de 749,15kN·cm (para o modelo 01BF-01). A partir da formação da charneira plástica nas chapas de extremidade das vigas os modelos passaram a reagir ao carregamento imposto de maneira ligeiramente diferenciada.

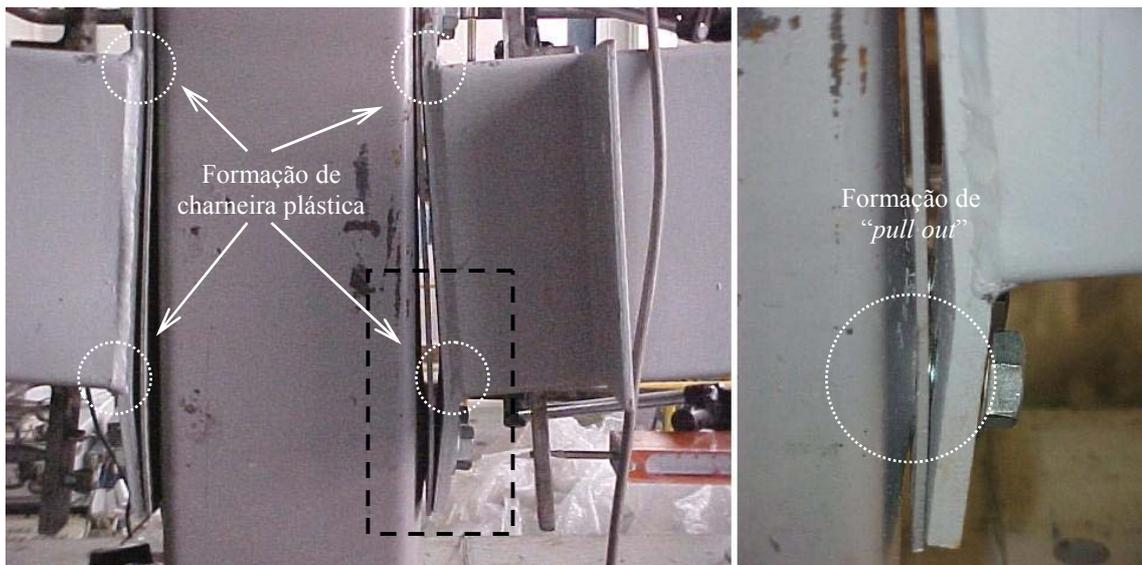


FOTO 4.8 – Modo de colapso dos modelos 01BF.

O modelo 01BF-01 atingiu sua carga última (P_u) em 47,27kN, o que corresponde a um momento último (M_u) de 1391,27kN·cm. Para todos os modelos dessa série não foram coletadas informações referentes às tensões nas vigas. Mesmo em condições mais desfavoráveis, verificou-se que a resistência ao escoamento não foi atingida pelos modelos anteriores. Com uma carga de 40,01kN (1177,23kN·cm) foram percebidos os primeiros indícios de “pull out” devido à força de tração exercida pelos parafusos inferiores. A deformação da chapa de extremidade da viga ficou evidente com o acréscimo da carga podendo ser observada na FOTO 4.9, tirada no término do ensaio.



FOTO 4.9 – Detalhe do modelo 01BF-01 após o ensaio.

O modelo 01BF-02 teve o pior desempenho da série, atingindo sua carga última em 33,82kN ($M_u = 1013,41\text{kN}\cdot\text{cm}$). A plastificação da chapa do pilar ficou evidente a partir de 28,37kN (849,96kN·cm). A FOTO 4.10, tirada no término do ensaio, mostra a deformação na chapa de extremidade da viga além efeito de “*pull out*” na região dos furos inferiores.



FOTO 4.10 – Detalhe do modelo 01BF-02 após o ensaio.

O modelo 01BF-03 teve comportamento parecido com o do primeiro dessa série, porém com carga última um pouco inferior, $P_u = 43,27\text{kN}$ ($M_u = 1267,18\text{kN}\cdot\text{cm}$). Para a carga de 32,01kN (937,07kN·cm) foram percebidos os primeiros indícios de formação de “*pull out*” devido à força de tração exercida pelos parafusos inferiores. A FOTO 4.11 mostra um detalhe da ligação no final do ensaio.



FOTO 4.11 – Detalhe do modelo 01BF-03 após o ensaio.

As respostas gráficas dos ensaios da ligação 01BF encontram-se representadas nas FIG. 4.27 a 4.38.

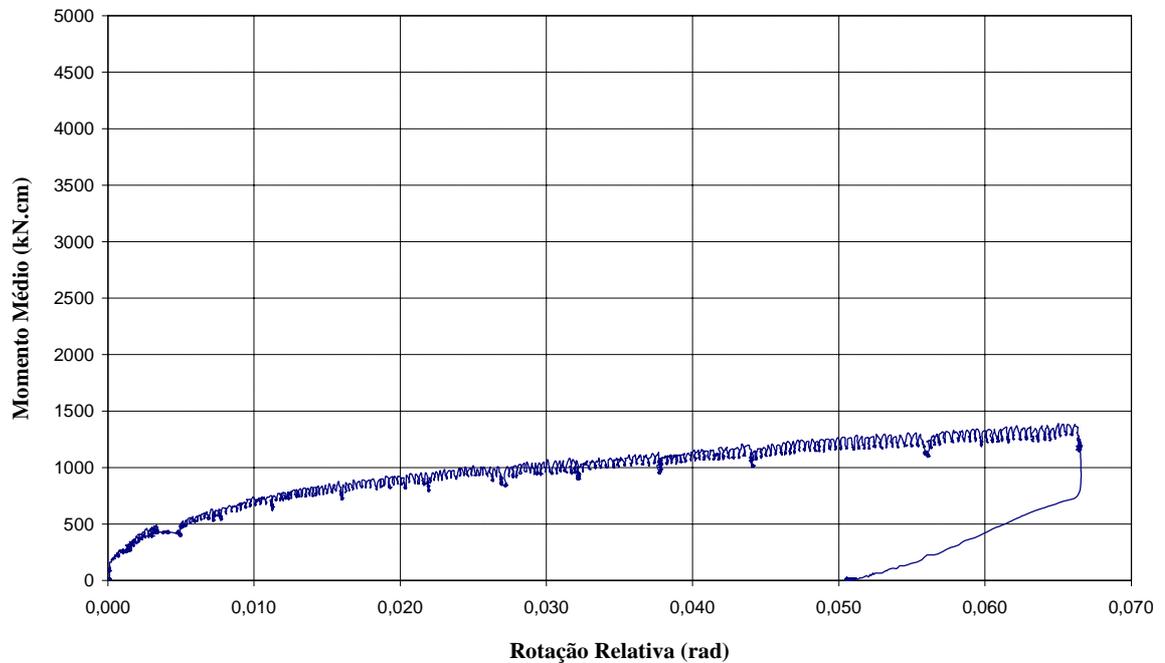


FIGURA 4.27 – Modelo 01BF-01: Momento médio no nó X rotação relativa.

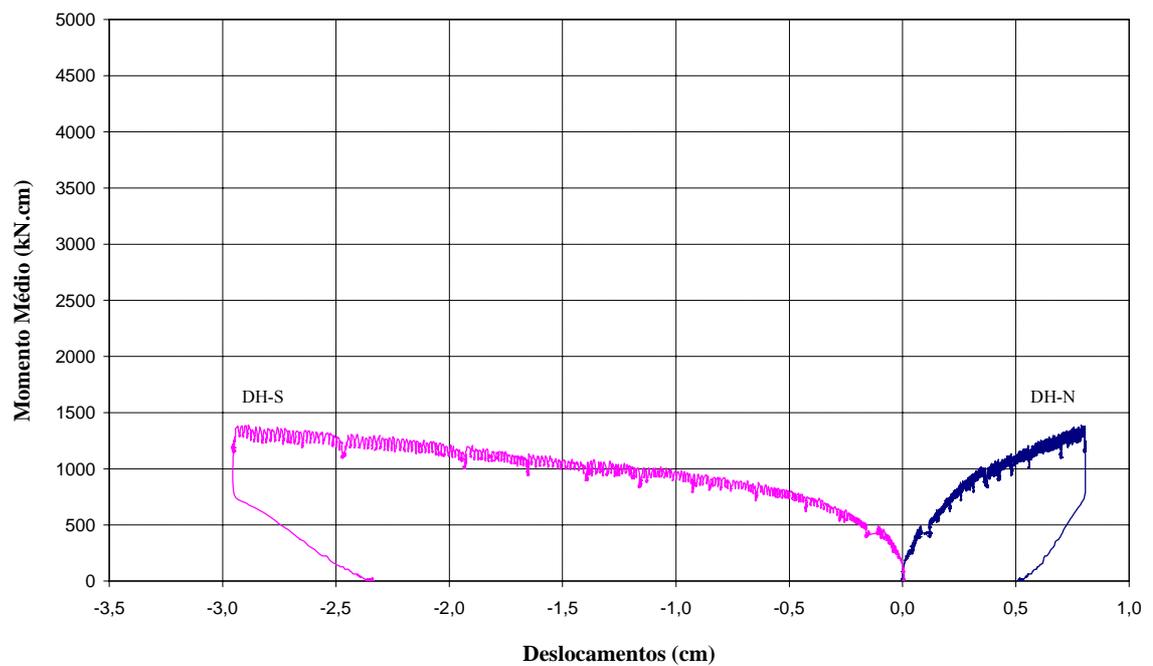


FIGURA 4.28 – Modelo 01BF-01: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.

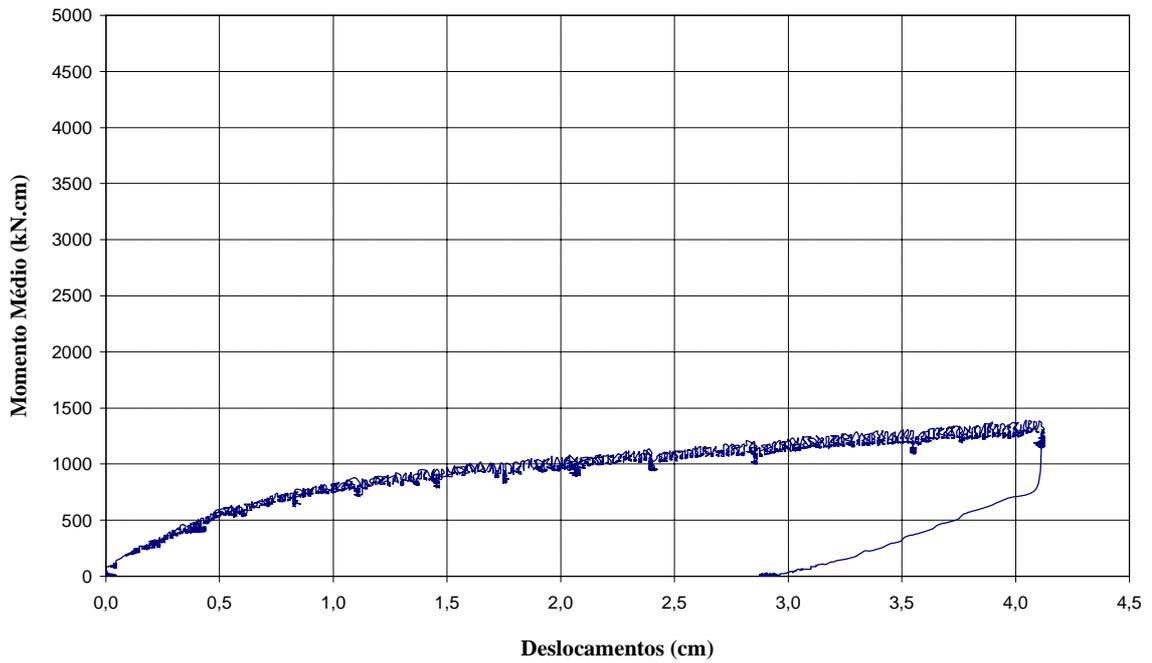


FIGURA 4.29 – Modelo 01BF-01: Momento médio no nó X deslocamento vertical da base do pilar.

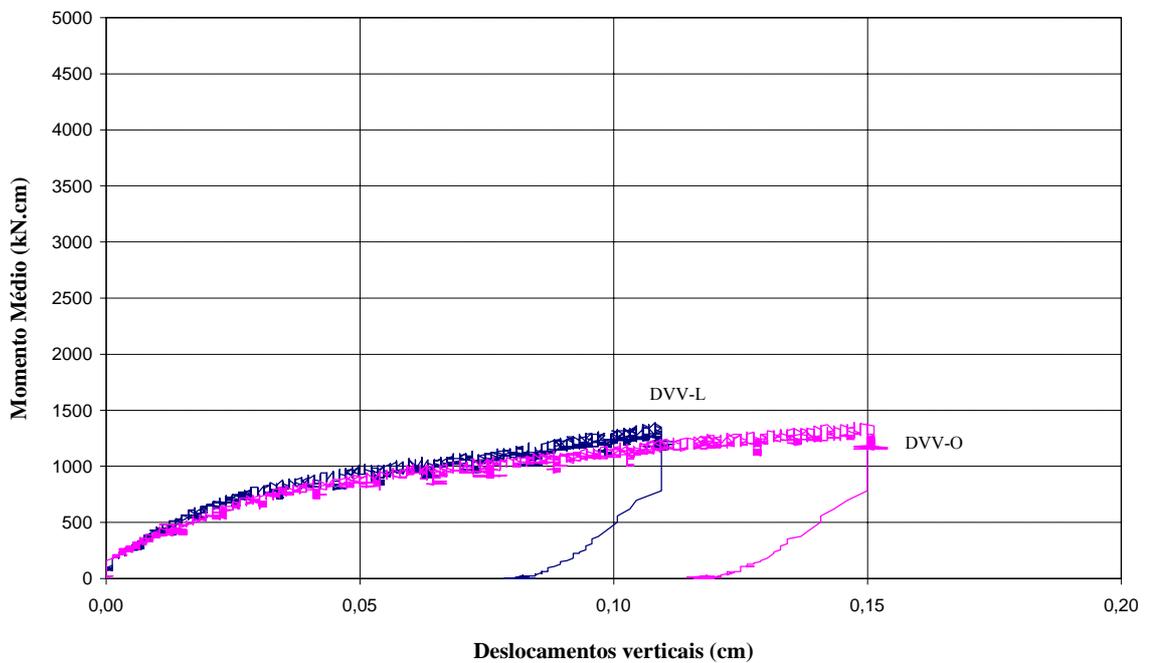


FIGURA 4.30 – Modelo 01BF-01: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com transdutores de deslocamentos (DT₂₅).

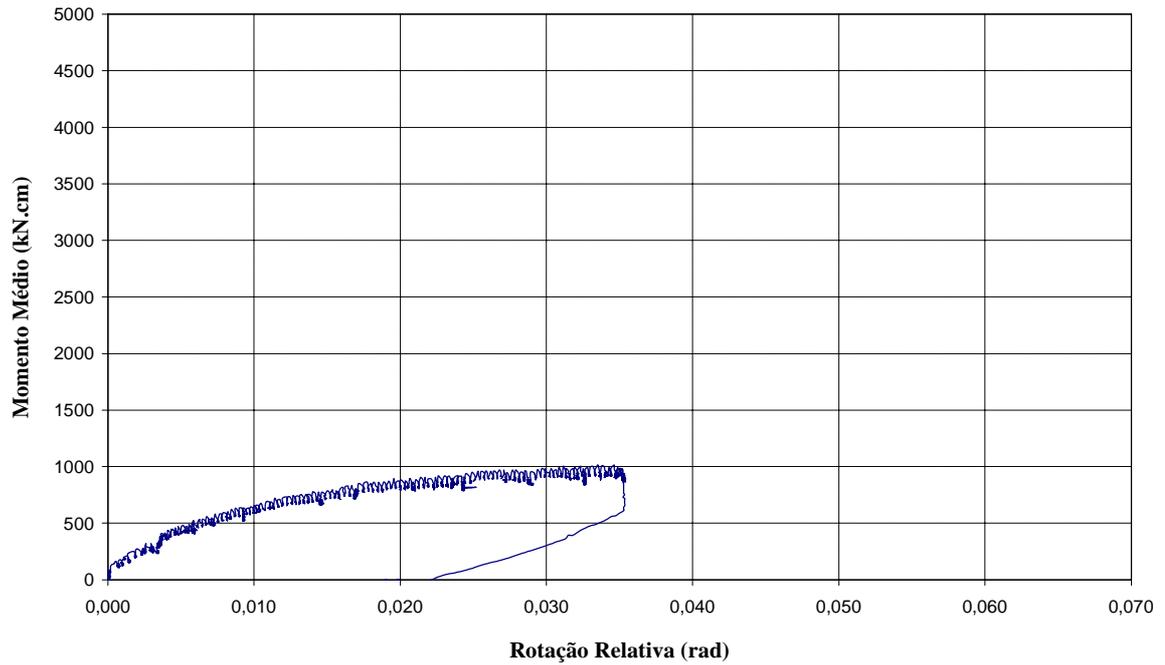


FIGURA 4.31 – Modelo 01BF-02: Momento médio no nó X rotação relativa.

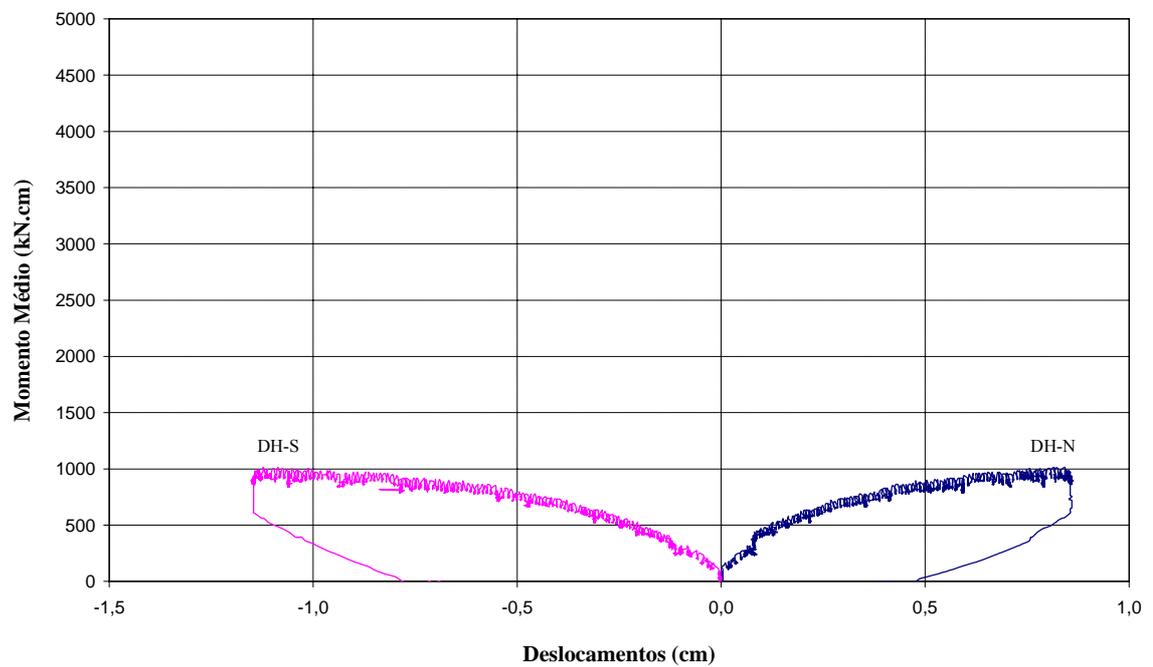


FIGURA 4.32 – Modelo 01BF-02: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.

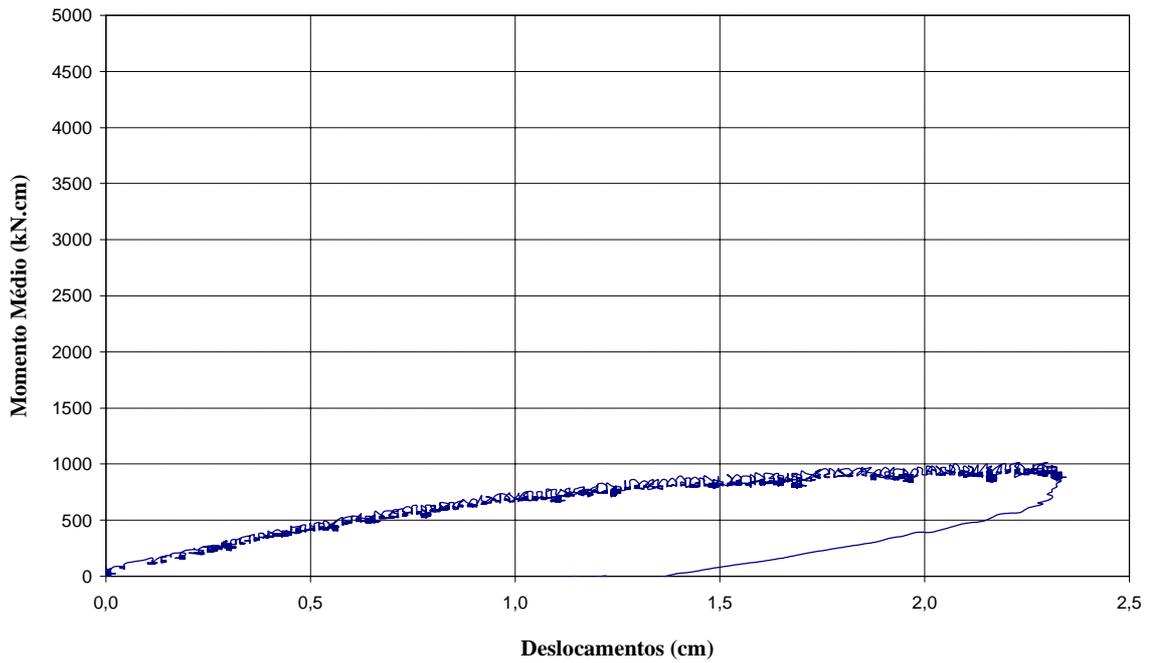


FIGURA 4.33 – Modelo 01BF-02: Momento médio no nó X deslocamento vertical da base do pilar.

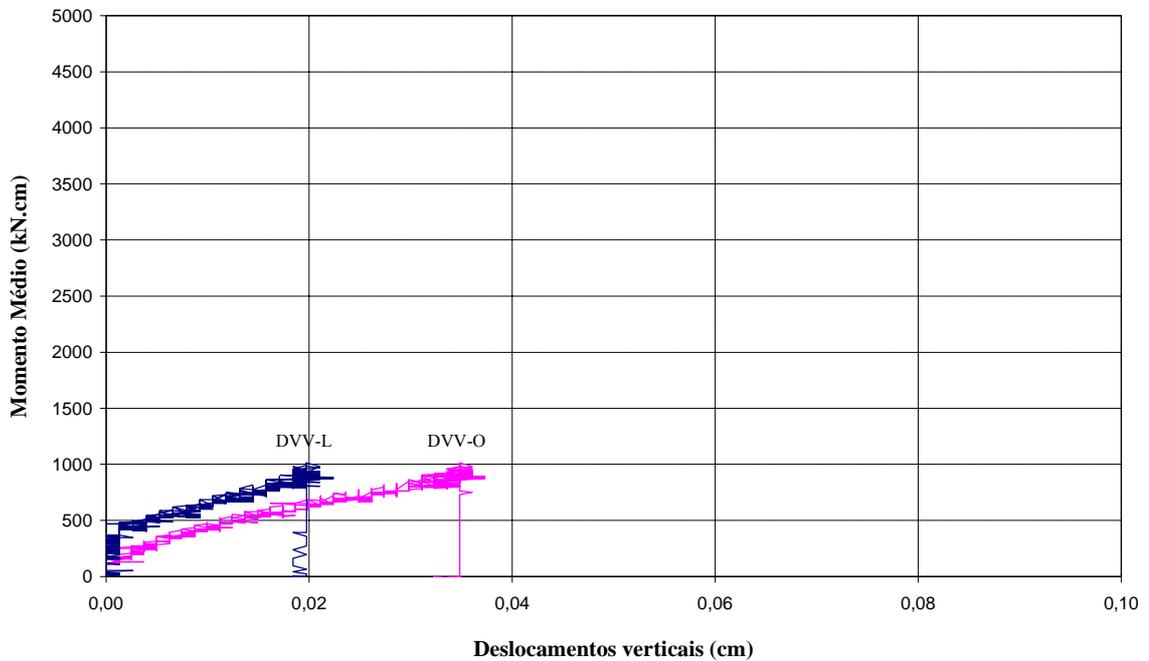


FIGURA 4.34 – Modelo 01BF-02: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com transdutores de deslocamento (DT₂₅).

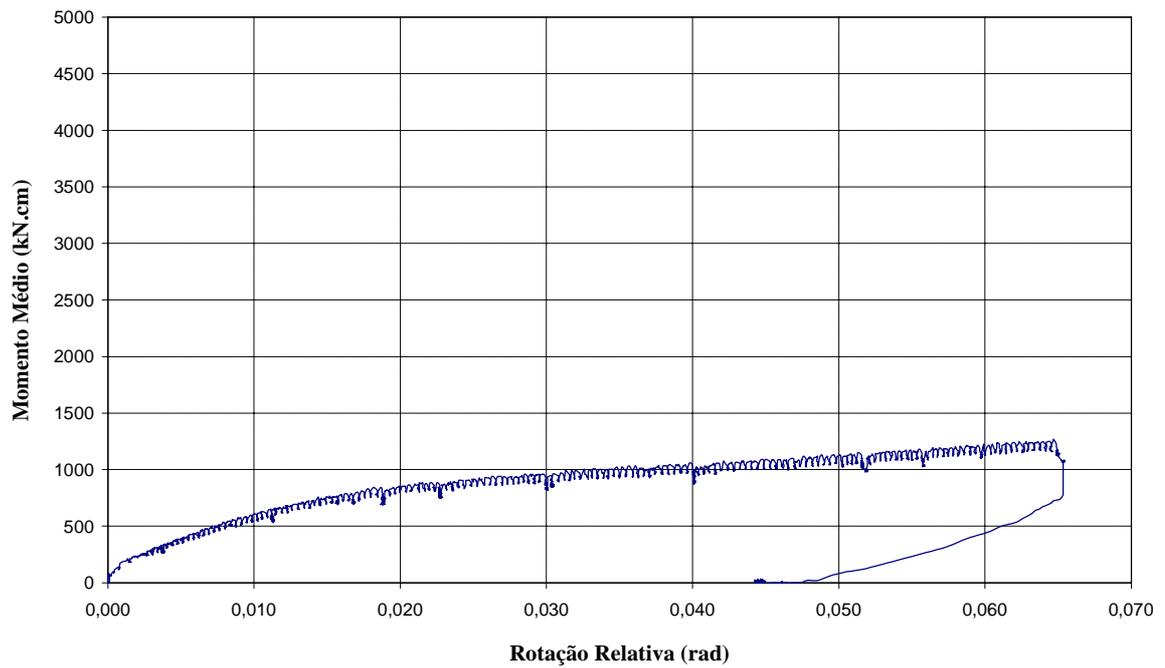


FIGURA 4.35 – Modelo 01BF-03: Momento médio no nó X rotação relativa.

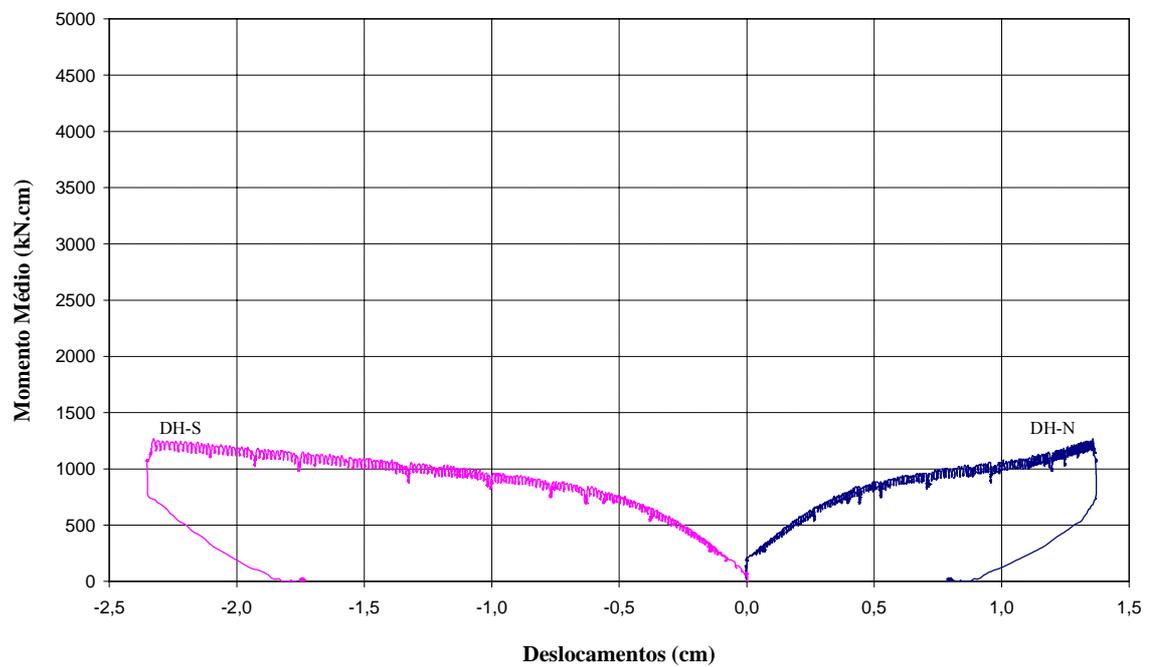


FIGURA 4.36 – Modelo 01BF-03: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.

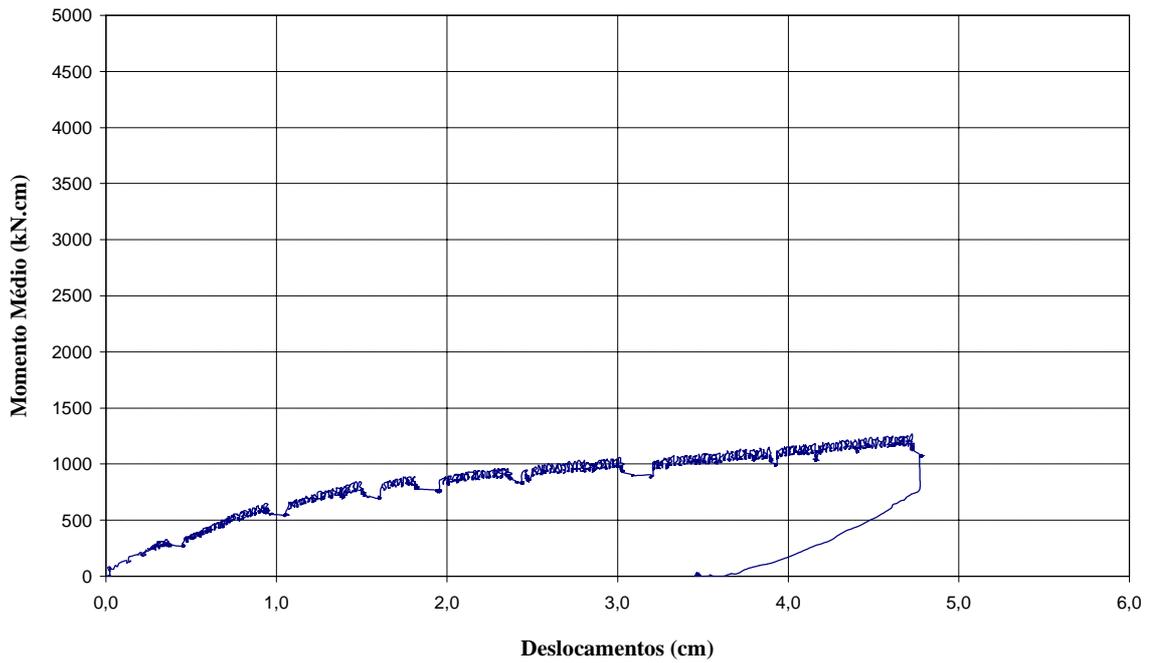


FIGURA 4.37 – Modelo 01BF-03: Momento médio no nó X deslocamento vertical da base do pilar.

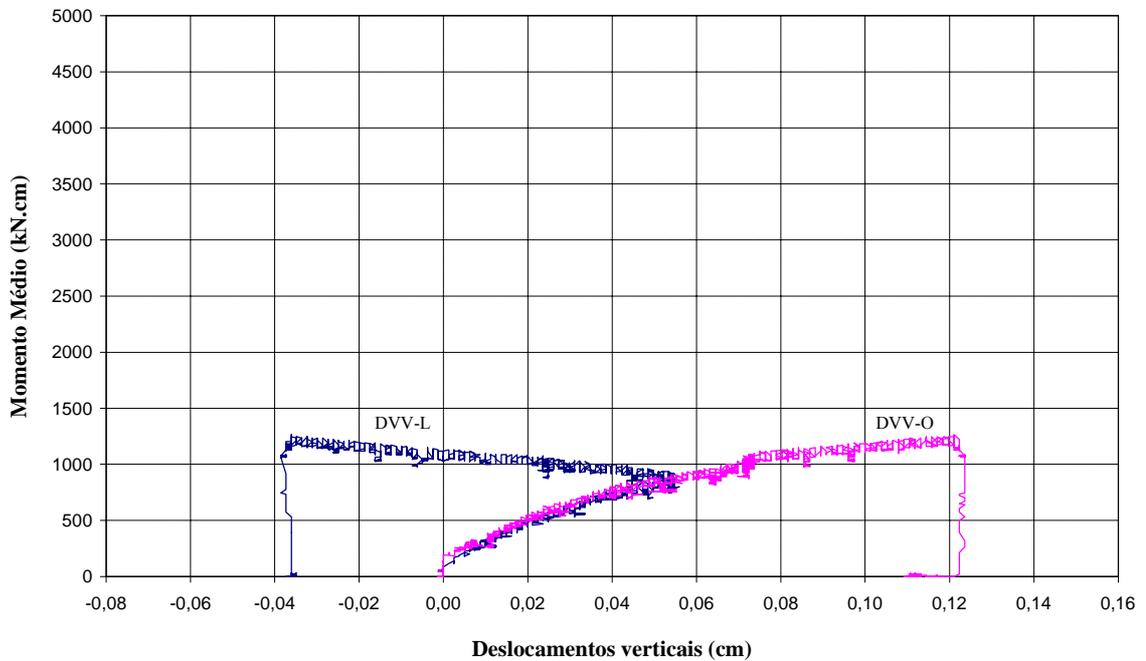


FIGURA 4.38 – Modelo 01BF-03: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com transdutores de deslocamento (DT₂₅).

4.2.4 – Modelos 04AF

Conforme consta na TAB. 3.2, para essa ligação foram realizados dois ensaios, solicitados ao momento fletor. Na TAB. 4.3 são apresentados alguns eventos ocorridos durante esses ensaios e as respectivas cargas.

TABELA 4.4 – Resumo dos eventos ocorridos nos ensaios dos modelos 04AF.

Modelo 04AF-01	
Carga (kN)	Evento
55,28	Início de deformação da chapa de extremidade da viga
78,19	Flambagem local da alma da viga, na região do apoio, devido à cortante
82,92	Formação evidente de charneira plástica
101,09	Máximo carregamento registrado
90,55	Início do descarregamento
Modelo 04AF-02	
Carga (kN)	Evento
53,46	Início de deformação da chapa de extremidade da viga
77,46	Formação evidente de charneira plástica
109,09	Máximo carregamento registrado
98,91	Início do descarregamento

Pela análise das cargas e eventos da TAB. 4.4 pode-se verificar que ambos os modelos apresentavam comportamentos semelhantes, diferenciando-se apenas na carga máxima aplicada. O início da deformação da chapa de extremidade das vigas ocorreu no modelo 04AF-01 para uma carga 55,28kN, e o no modelo 04AF-02 para 53,46kN (1642,98 kN·cm e 1585,01 kN·cm, respectivamente). A formação de charneira plástica também ficou evidente nos dois modelos, porém no modelo 04AF-01 esse fenômeno foi verificado com carregamento superior ao do modelo 04AF-02 (82,92kN-2464,48kN·cm e 77,46kN-2296,65kN·cm, respectivamente). A FOTO 4.12 mostra como a charneira plástica ficou evidente nos ensaios da ligação 04AF e a FOTO 4.13 mostra claramente os resultados da aplicação de um alto carregamento de tração nos parafusos inferiores.

Para o modelo 04AF-01 o máximo carregamento registrado foi $P_u = 101,09\text{kN}$, que corresponde a um momento fletor $M_u = 3004,93\text{kN}\cdot\text{cm}$. O segundo modelo dessa série apresentou carga última um pouco superior, pois como foi ensaiado posteriormente já

tínhamos conhecimento da real capacidade da ligação, possibilitando um acréscimo de carga ainda dentro do limite de segurança do ensaio. Desta forma, o modelo 04AF-02 foi submetido a um maior carregamento vertical, registrado em 109,09kN e correspondente a um momento de 3234,71kN·cm.

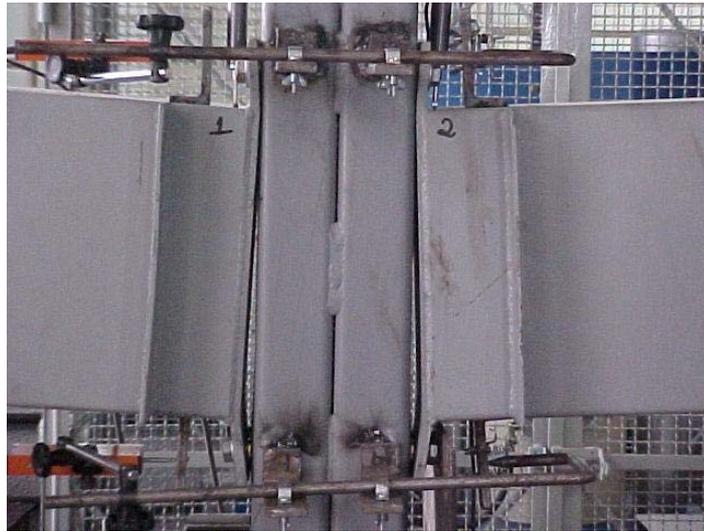


FOTO 4.12 – Formação de charneira plástica nos modelos 04AF após o ensaio.



FOTO 4.13 – Deformação por tração dos parafusos inferiores nos modelos 04AF.

No modelo 04AF-01 para uma carga de 78,19kN (2323,96 kN·cm) ocorreu flambagem local por cortante na alma das vigas, na região dos apoios. A FOTO 4.14 mostra a localização e a orientação desse fenômeno.



FOTO 4.14 – Efeito de flambagem local na alma das vigas do modelo 04AF-01.

As respostas gráficas dos ensaios dos modelos 04AF são apresentadas nas FIG. 4.39 a 4.46. É importante ressaltar que a queda de carga apresentada nos gráficos do ensaio do modelo 04AF-04 decorreu de um pequeno problema apresentado durante a aplicação de carga. Para solucioná-lo, foi necessário aliviar a pressão no atuador hidráulico e depois retomar o carregamento. Nota-se que essa queda, apesar de significativa, não acarretou em descontinuidade das curvas, que retomaram a mesma tendência de resposta após a retomada do carregamento.

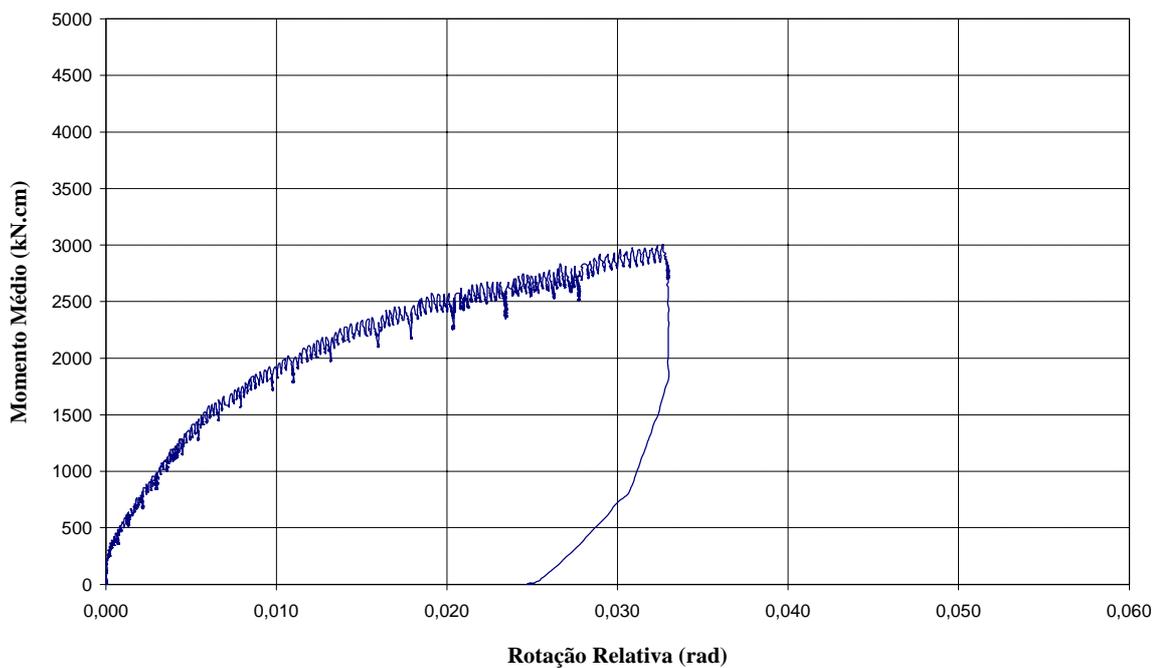


FIGURA 4.39 – Modelo 04AF-01: Momento médio no nó X rotação relativa.

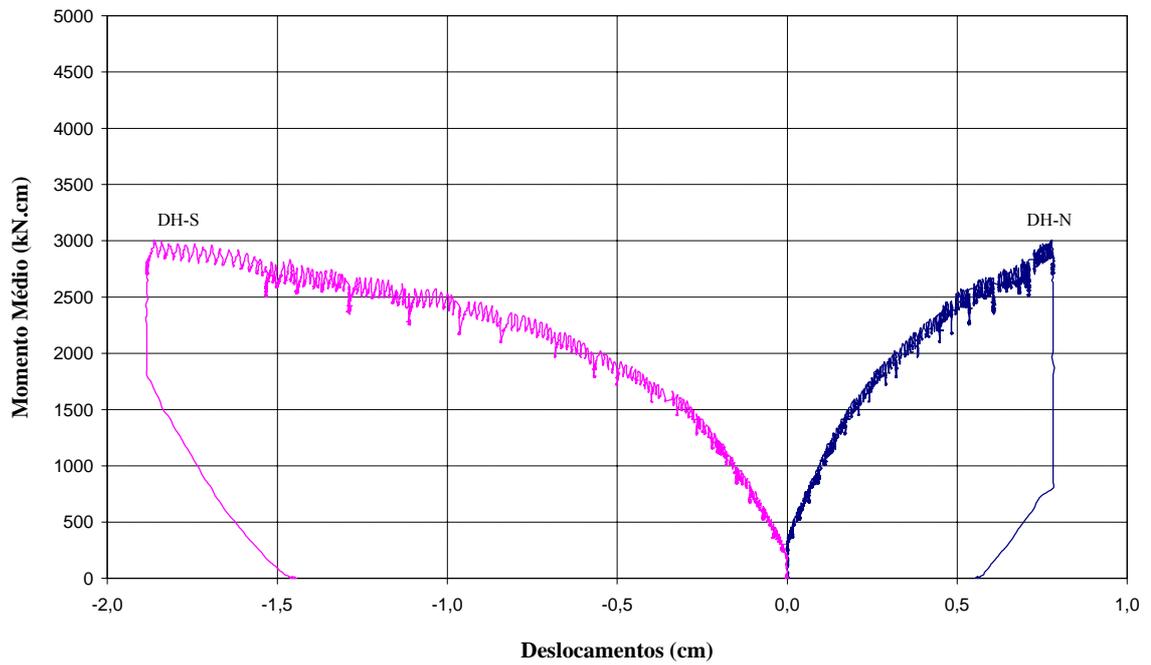


FIGURA 4.40 – Modelo 04AF-01: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.

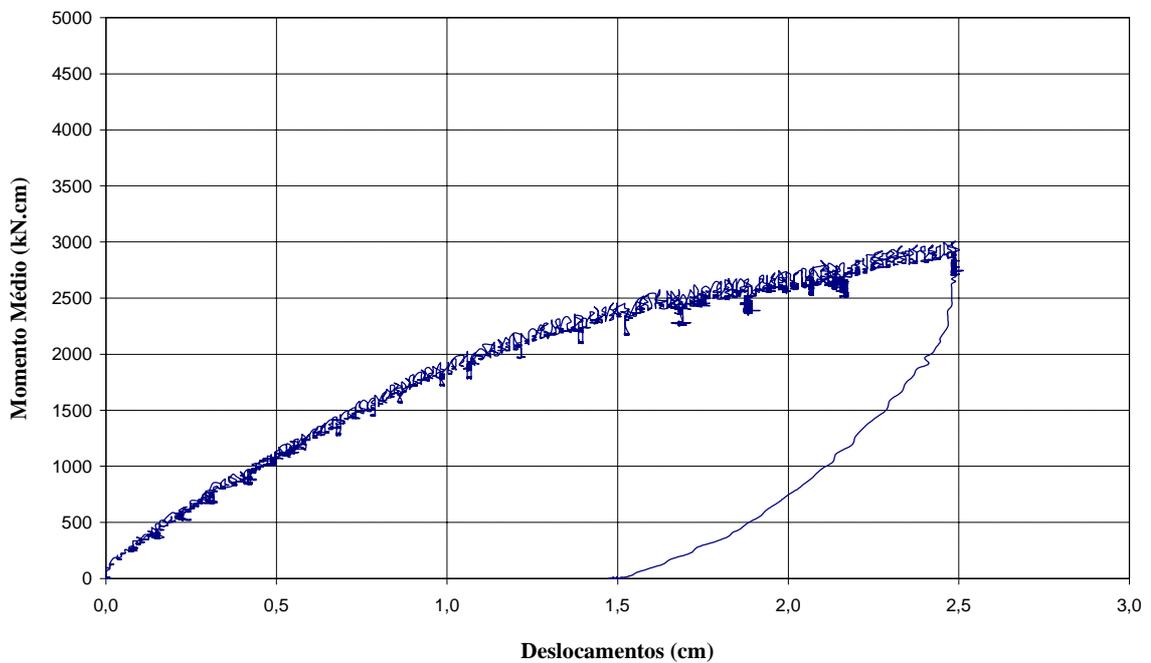


FIGURA 4.41 – Modelo 04AF-01: Momento médio no nó X deslocamento vertical da base do pilar.

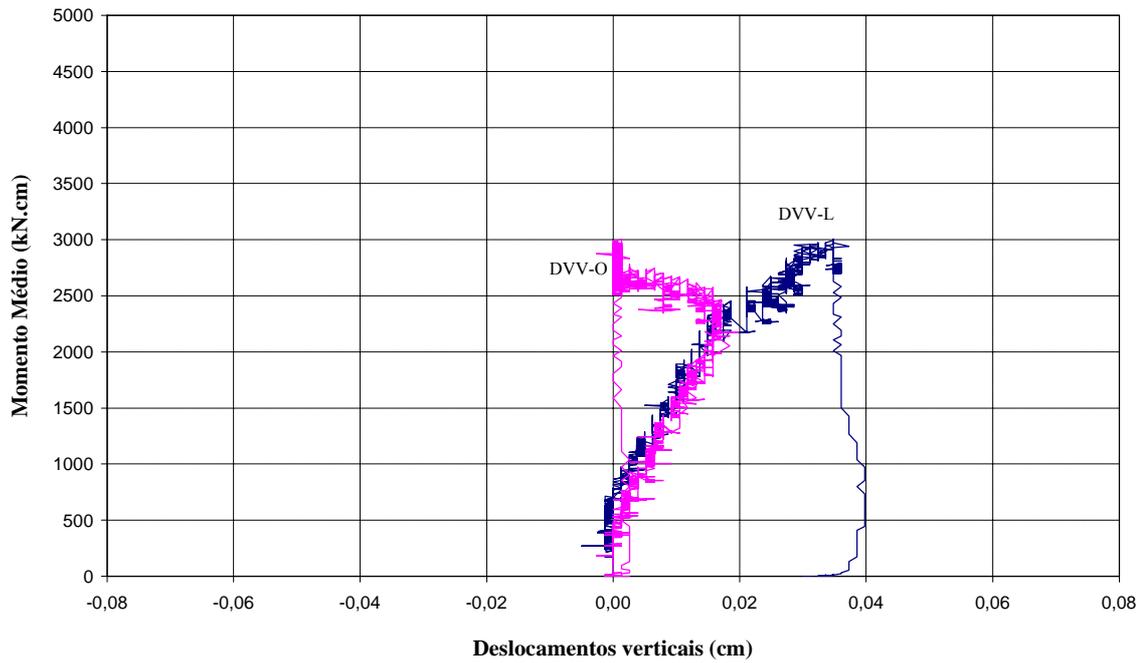


FIGURA 4.42 – Modelo 04AF-01: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com transdutores de deslocamento (DT₂₅).

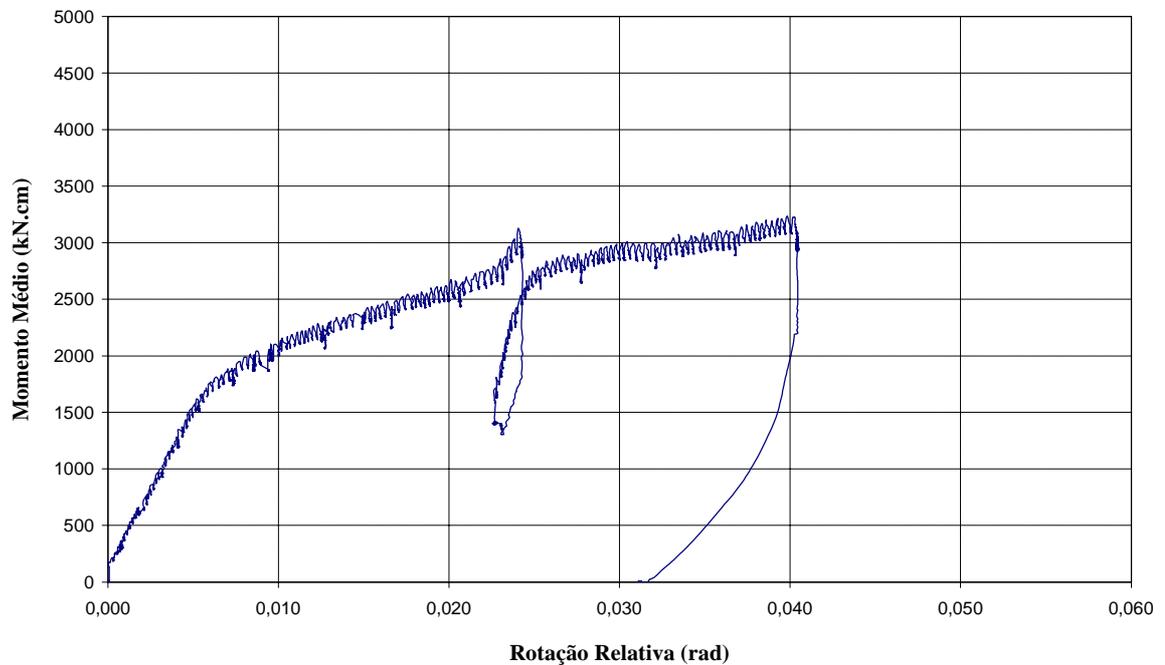


FIGURA 4.43 – Modelo 04AF-02: Momento médio no nó X rotação relativa.

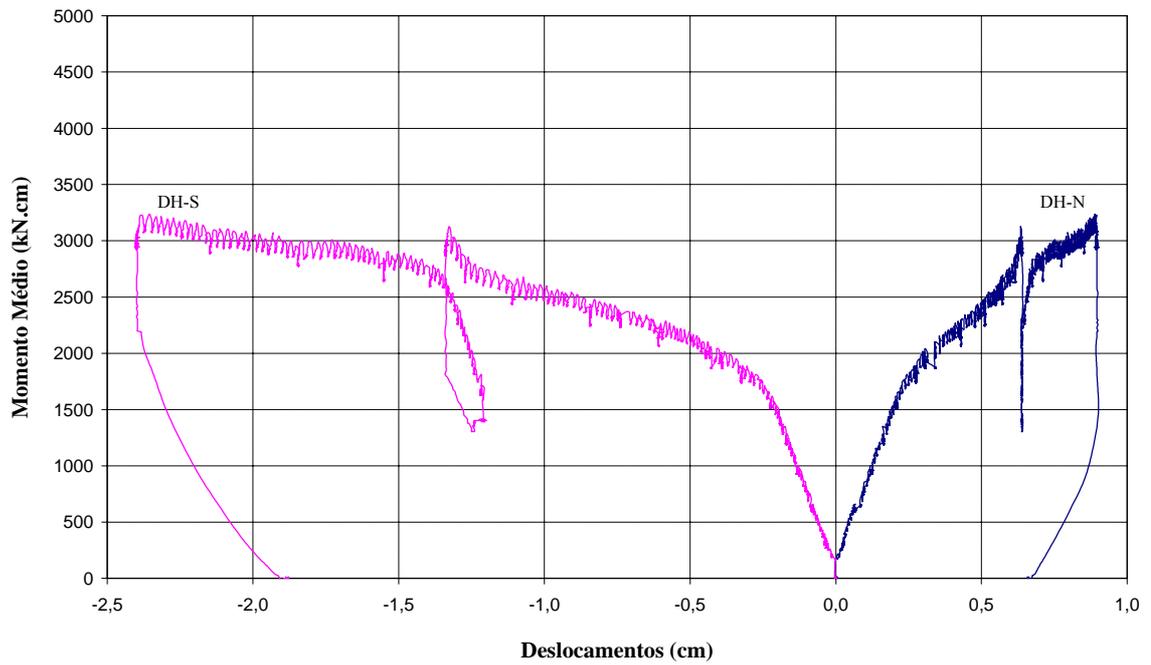


FIGURA 4.44 – Modelo 04AF-02: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.

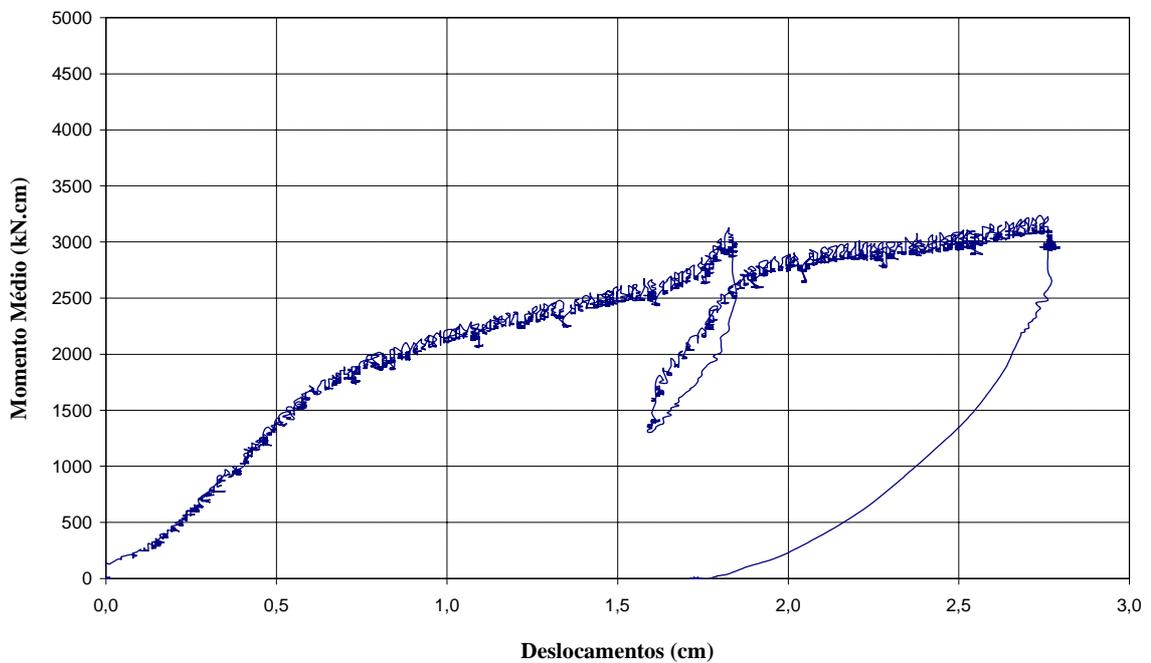


FIGURA 4.45 – Modelo 04AF-02: Momento médio no nó X deslocamento vertical da base do pilar.

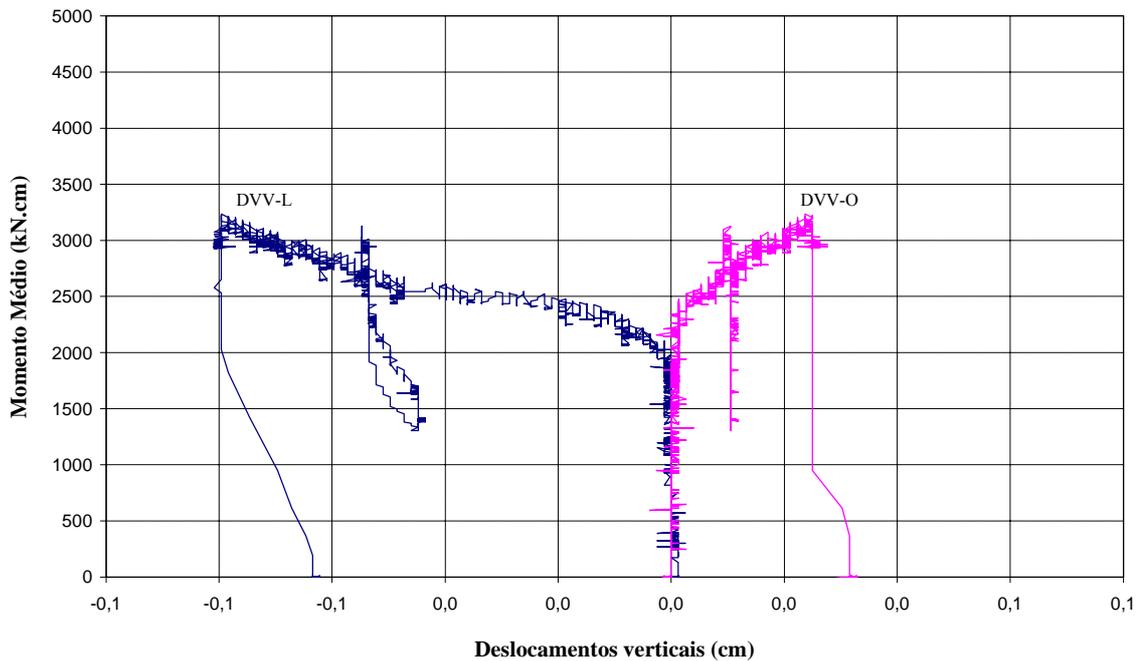


FIGURA 4.46 – Modelo 04AF-02: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com transdutores de deslocamento (DT₂₅).

4.2.5 – Modelos 04BR

Para essa ligação foram realizados três ensaios, todos solicitados ao momento fletor. Na TAB. 4.5 é apresentado o resumo dos eventos ocorridos durante os ensaios. Como estas ligações são rígidas, uma vez que possuem chapa interna nos pilares e chapas espessas na extremidade das vigas, as mesmas apresentaram comportamento distinto dos demais modelos ensaiados nesse trabalho. Não ocorreu charneira plástica e tampouco plastificação da chapa do pilar na região dos furos. O limiar do estado limite para a ligação 04BR caracterizou-se pelo aparecimento de flambagem local na alma das vigas, na região da ligação, mas isso não acarretou a interrupção dos ensaios, já que os modelos ainda suportaram algum acréscimo de carregamento. Os dois primeiros modelos dessa série foram ensaiados até a aparente estabilização do carregamento aplicado e o último até o rompimento dos conectores.

TABELA 4.5 – Resumo dos eventos ocorridos nos ensaios dos modelos 04BR.

Modelo 04BR-01	
Carga (kN)	Evento
71,88	Separação visível entre a chapa de extremidade da viga e o pilar
105,46	Flambagem local por cortante na alma viga do lado O
113,49	Flambagem local por cortante na alma viga do lado L
124,00	Máximo carregamento registrado
111,28	Início de descarregamento
Modelo 04BR-02	
Carga (kN)	Evento
72,00	Separação visível entre a chapa de extremidade da viga e o pilar
87,28	Flambagem local por cortante na alma viga do lado L
106,19	Afastamento entre o pilar e a chapa de extremidade = 4,8mm
112,73	Máximo carregamento registrado
105,09	Início de descarregamento
Modelo 04BR-03	
Carga (kN)	Evento
78,18	Separação visível entre a chapa de extremidade da viga e o pilar
113,79	Início de ruptura dos rebites
124,73	Máximo carregamento registrado
105,09	Ruptura dos rebites inferiores do lado L
39,27	Leitura feita após rompimento dos rebites

Analisando as cargas e os eventos na TAB. 4.5 pode-se observar que todos os modelos ensaiados obtiveram cargas últimas com valores muito próximos entre si. O modelo 04BR-01 foi o que mais resistiu (sem o rompimento dos conectores) atingindo a carga máxima de $P_u = 124,00\text{kN}$ ($M_u = 3747,50\text{kN}\cdot\text{cm}$). O modelo 04BR-02 apresentou a menor solicitação máxima ($P_u = 112,73\text{kN}$ - $3412,84\text{kN}\cdot\text{cm}$), já que seu ensaio foi interrompido por medida de segurança quando começou a apresentar uma deformação excessiva entre a chapa de extremidade e o pilar. O modelo 04BR-03 foi solicitado até o rompimento dos rebites, que ocorreu para a carga de $105,09\text{kN}$ ($3077,44\text{kN}\cdot\text{cm}$). Esta carga foi registrada quando o modelo estava sendo inspecionado visualmente após o registro do carregamento máximo atingido ($124,73\text{kN}$), o que corresponde a um momento de $3652,46\text{kN}\cdot\text{cm}$.

Para os ensaios dos modelos 04BR-01 e 04BR-02 foram determinadas as tensões nos flanges superior e inferior das vigas, porém não foi atingida a resistência ao escoamento

do aço. Nestes ensaios foi detectado o aparecimento de deformações características de flambagem local por cortante na alma das vigas. A FOTO 4.15 mostra a posição onde ocorreu esse fenômeno, podendo-se notar que a sua orientação parte da chapa de reforço no topo da viga e segue, diagonalmente a 45°, em direção ao nó da ligação.



FOTO 4.15 – Efeito de flambagem local na alma das vigas do modelo 04BR-01.

Na FOTO 4.16 mostra em detalhe como ocorreu o rompimento dos rebites inferiores do lado L do modelo 04BR-03.



FOTO 4.16 – Modo de colapso do modelo 04BR-03.

As respostas gráficas dos ensaios da ligação 04BR são apresentadas nas FIG. 4.47 a 4.60.

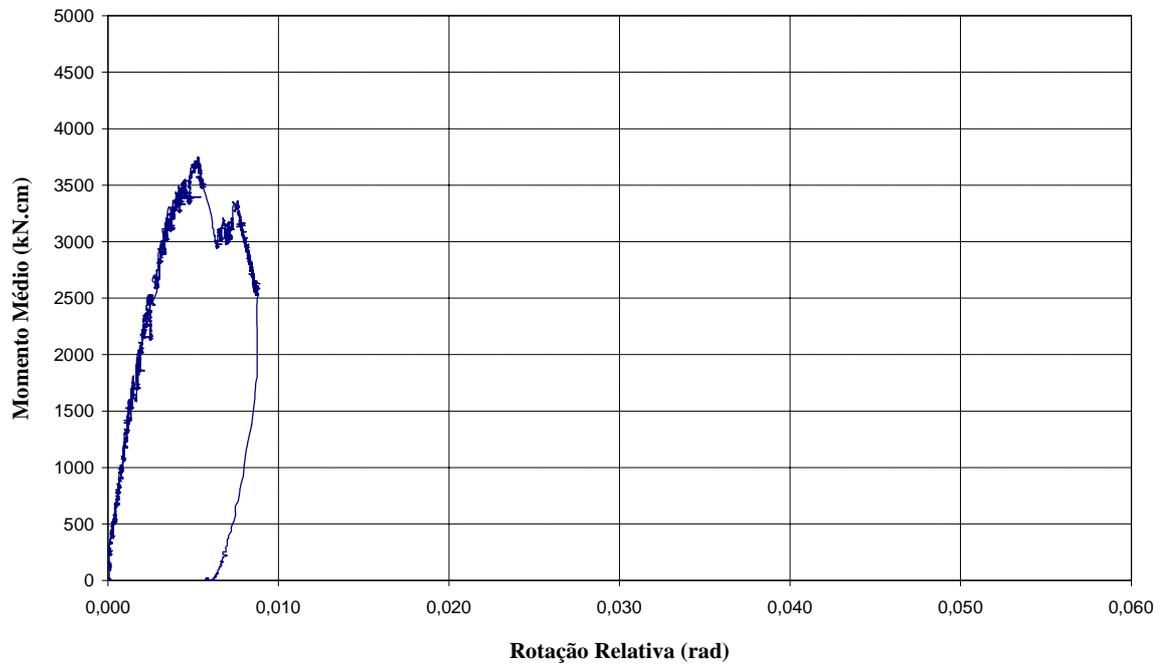


FIGURA 4.47 – Modelo 04BR-01: Momento médio no nó X rotação relativa.

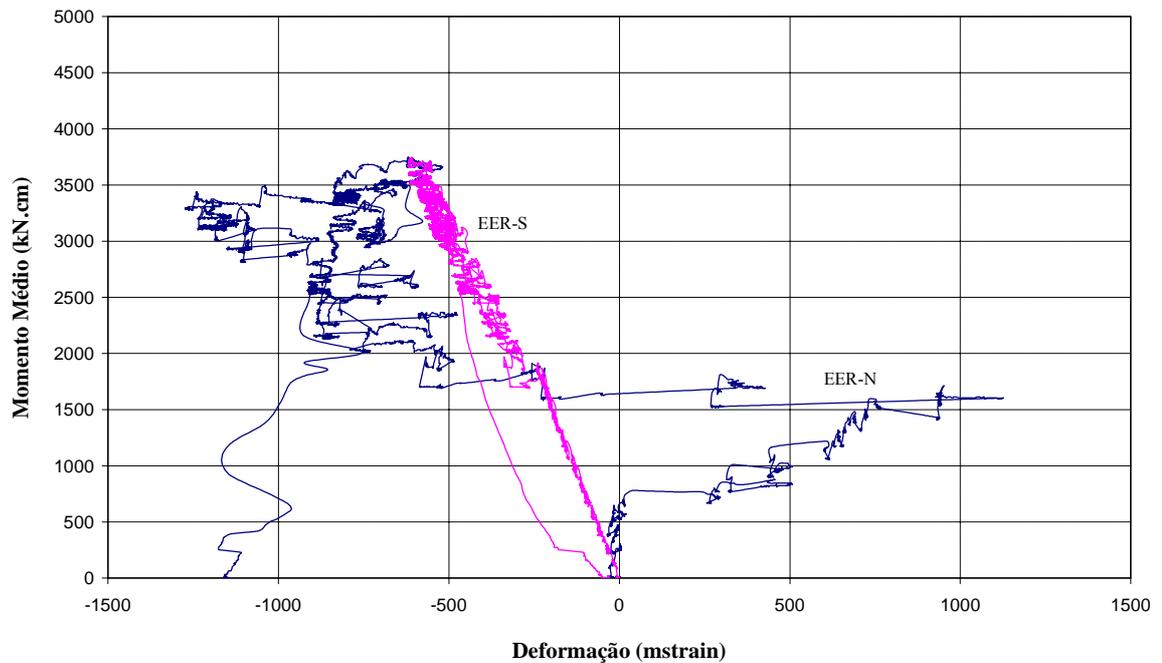


FIGURA 4.48 – Modelo 04BR-01: Momento médio no nó X deformações específicas nas vigas.

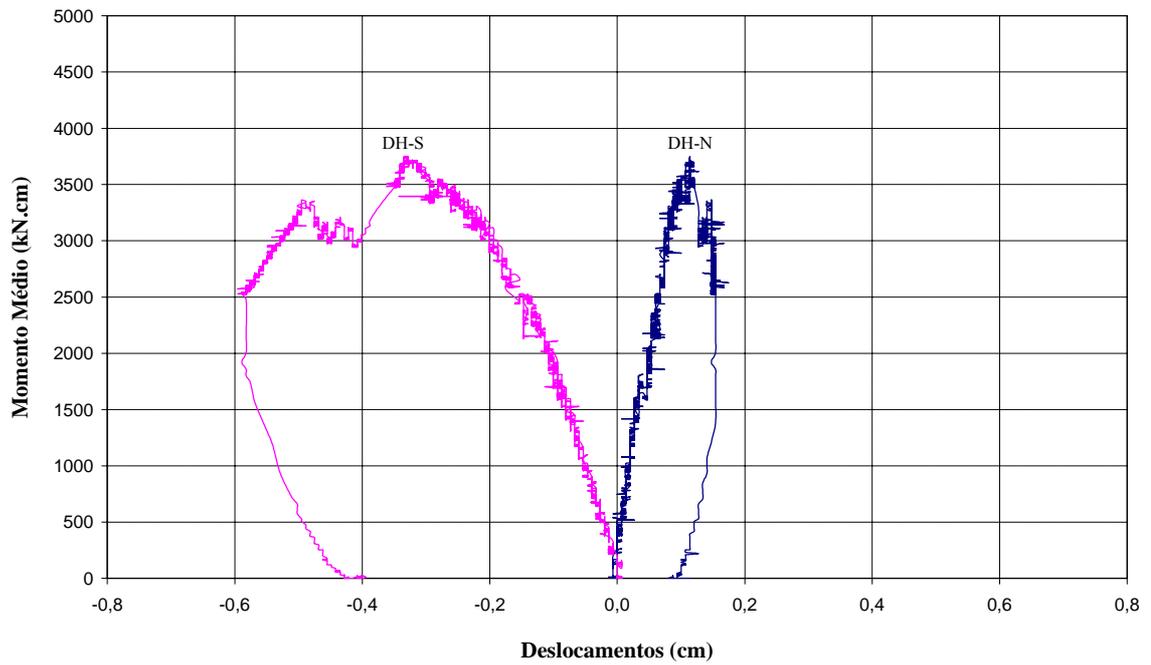


FIGURA 4.49 – Modelo 04BR-01: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.

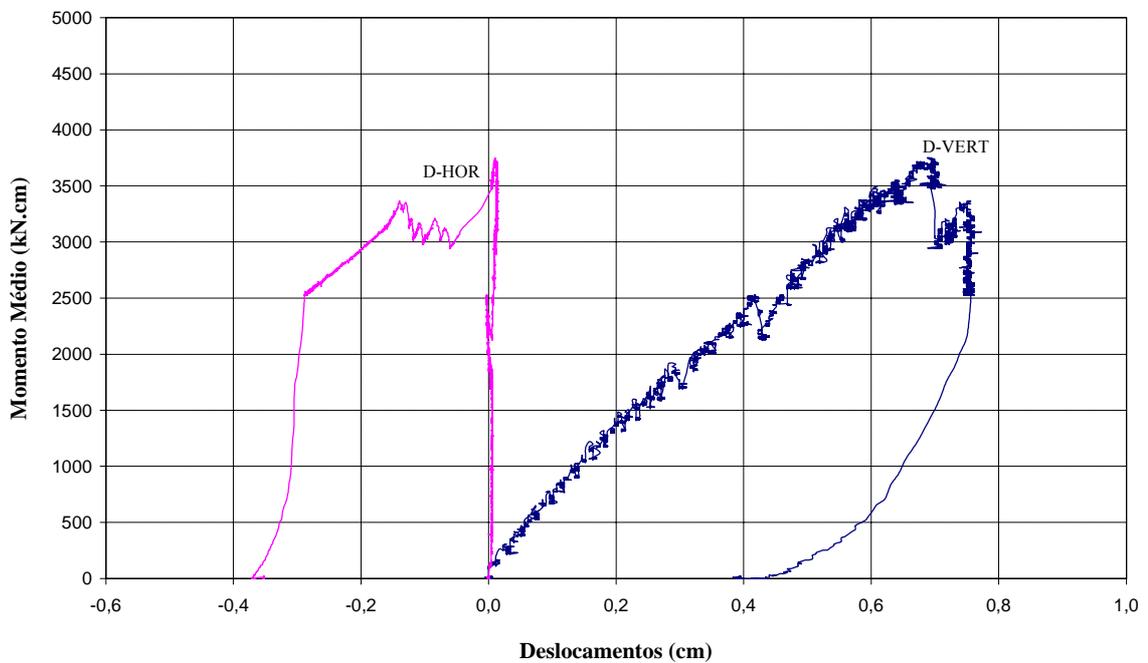


FIGURA 4.50 – Modelo 04BR-01: Momento médio no nó X deslocamentos vertical e horizontal da base do pilar.

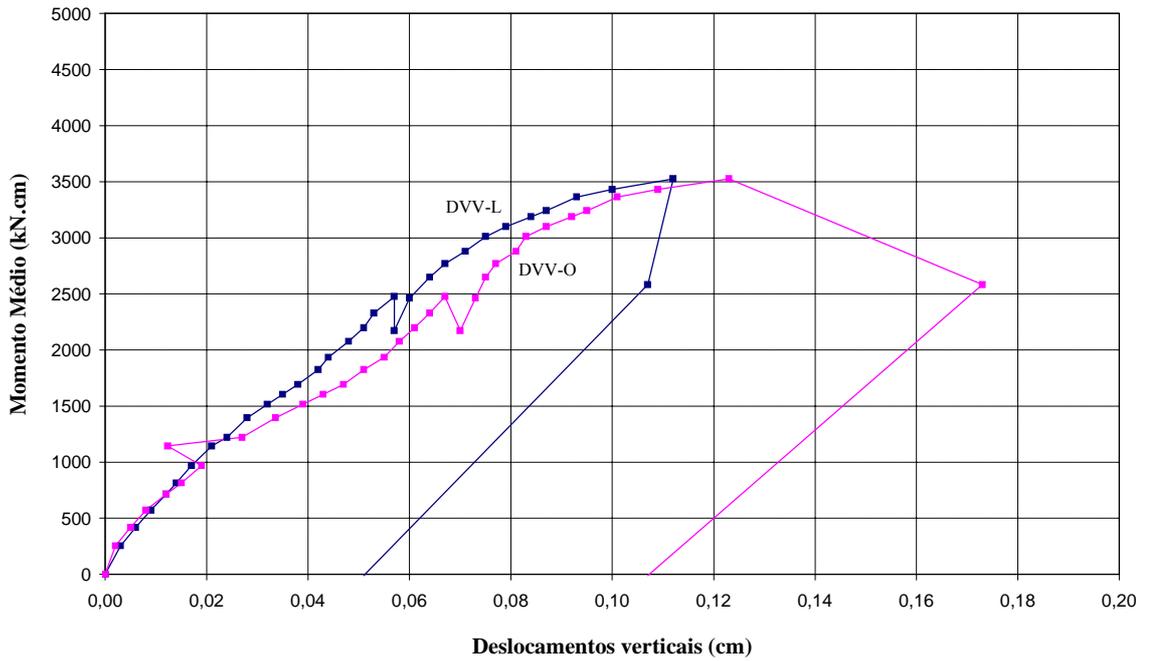


FIGURA 4.51 – Modelo 04BR-01: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com relógios comparadores (REC).

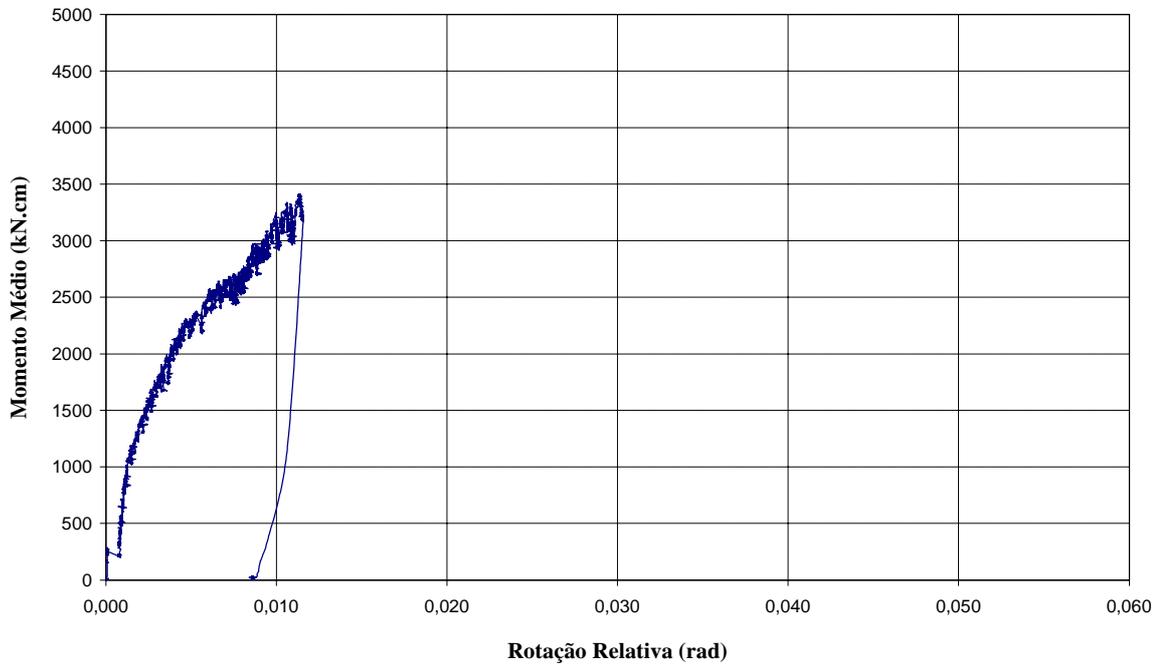


FIGURA 4.52 – Modelo 04BR-02: Momento médio no nó X rotação relativa.

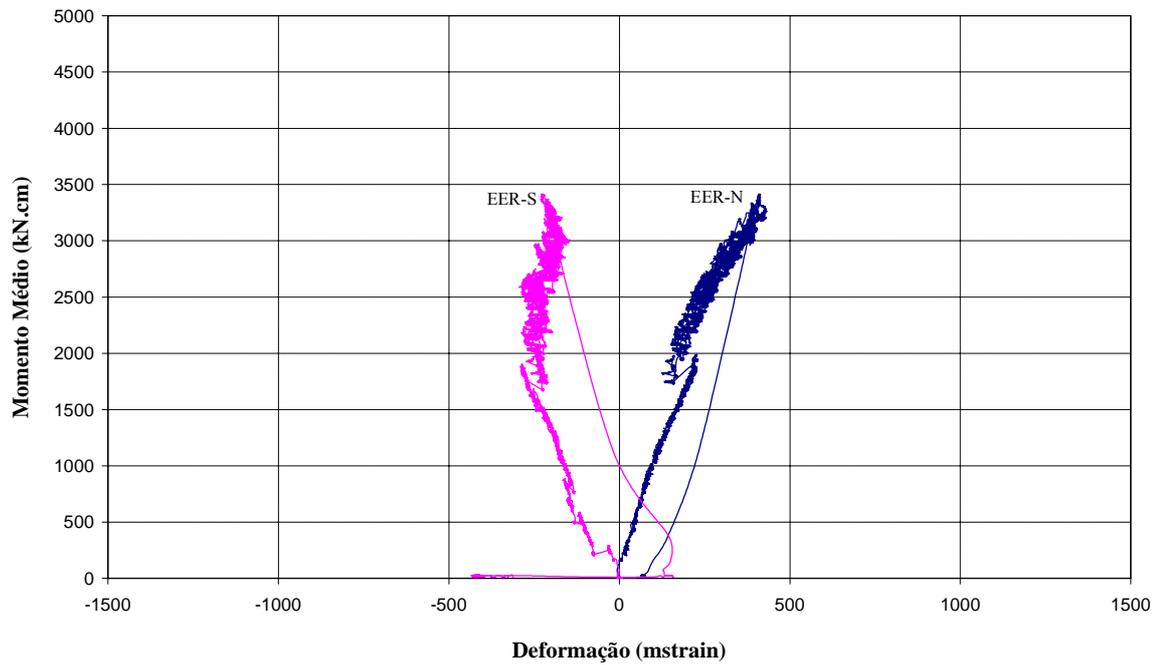


FIGURA 4.53 – Modelo 04BR-02: Momento médio no nó X deformações específicas nas vigas.

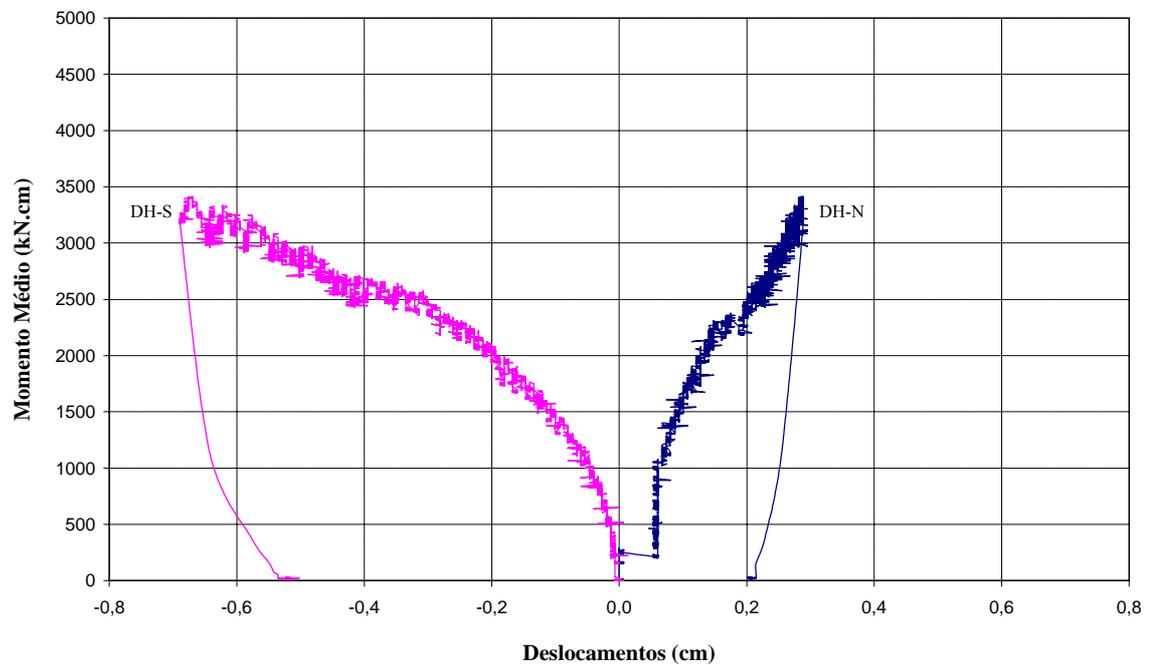


FIGURA 4.54 – Modelo 04BR-02: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.

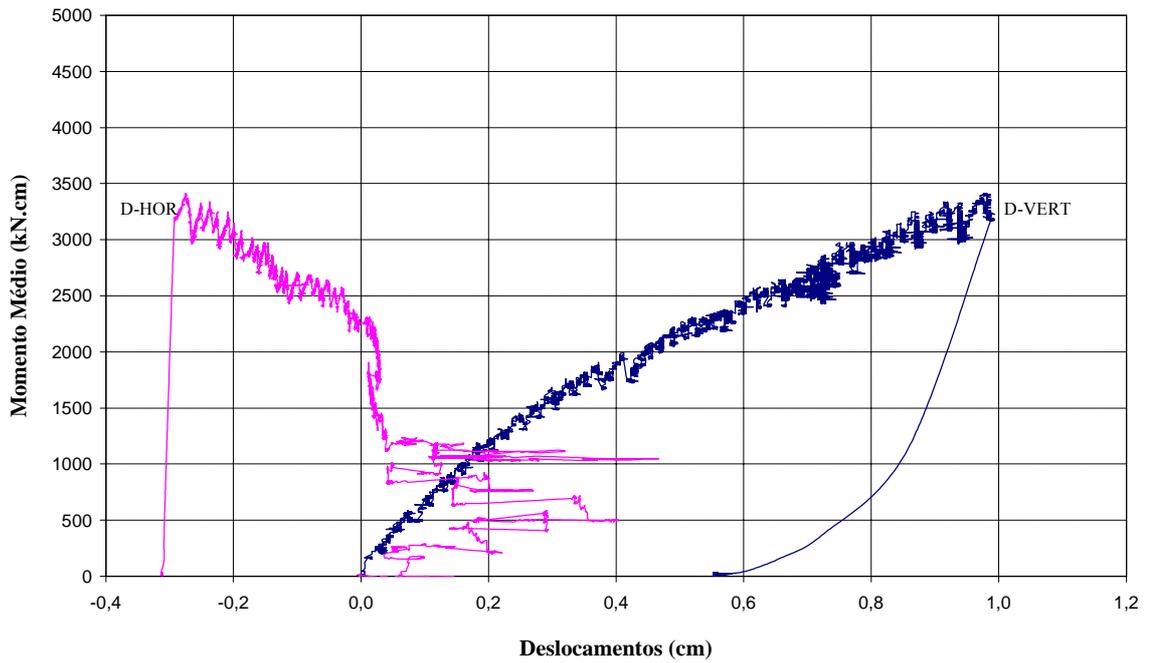


FIGURA 4.55 – Modelo 04BR-02: Momento médio no nó X deslocamentos vertical e horizontal da base do pilar.

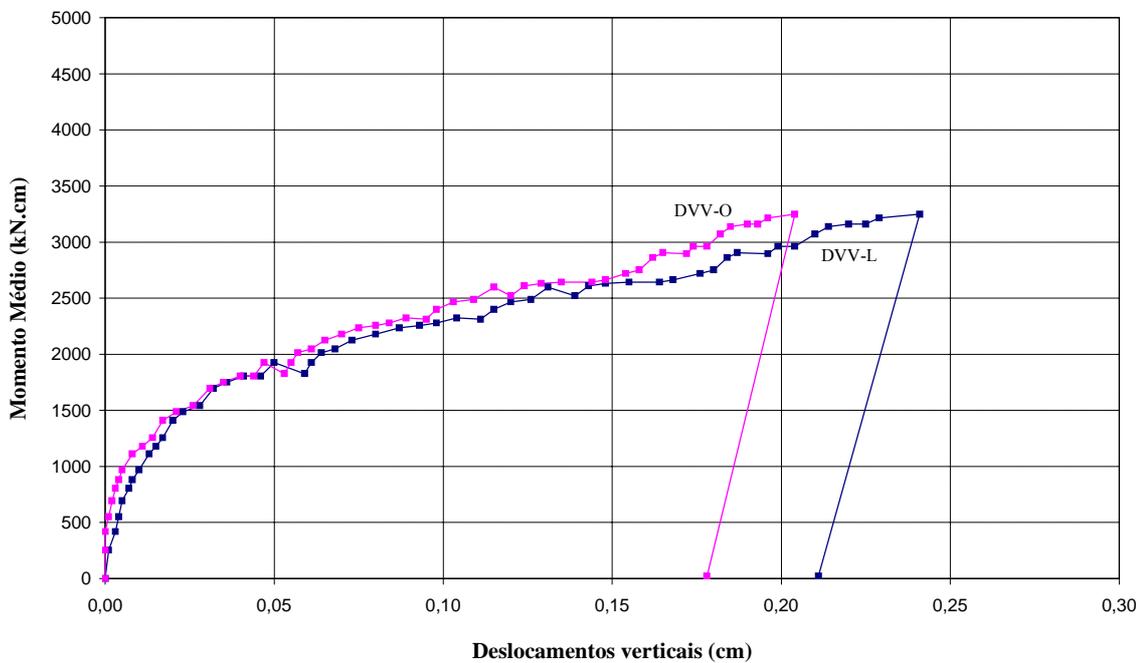


FIGURA 4.56 – Modelo 04BR-02: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com relógios comparadores (REC).

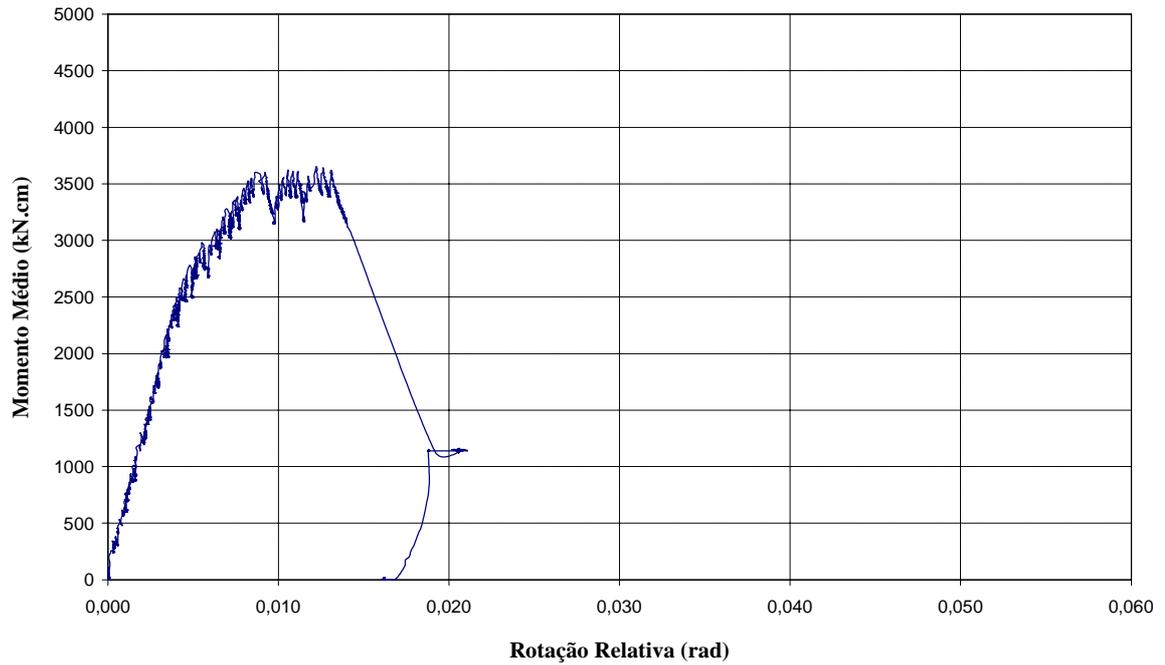


FIGURA 4.57 – Modelo 04BR-03: Momento médio no nó X rotação relativa.

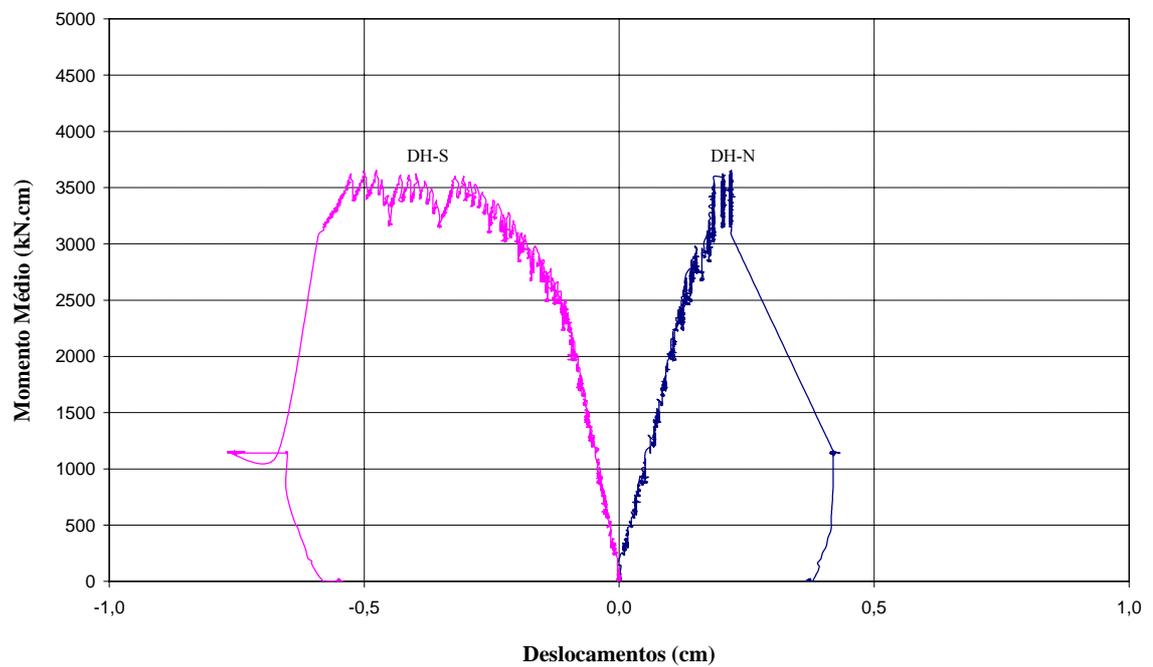


FIGURA 4.58 – Modelo 04BR-03: Momento médio no nó X deslocamentos horizontais do aparato de medição de rotação relativa.

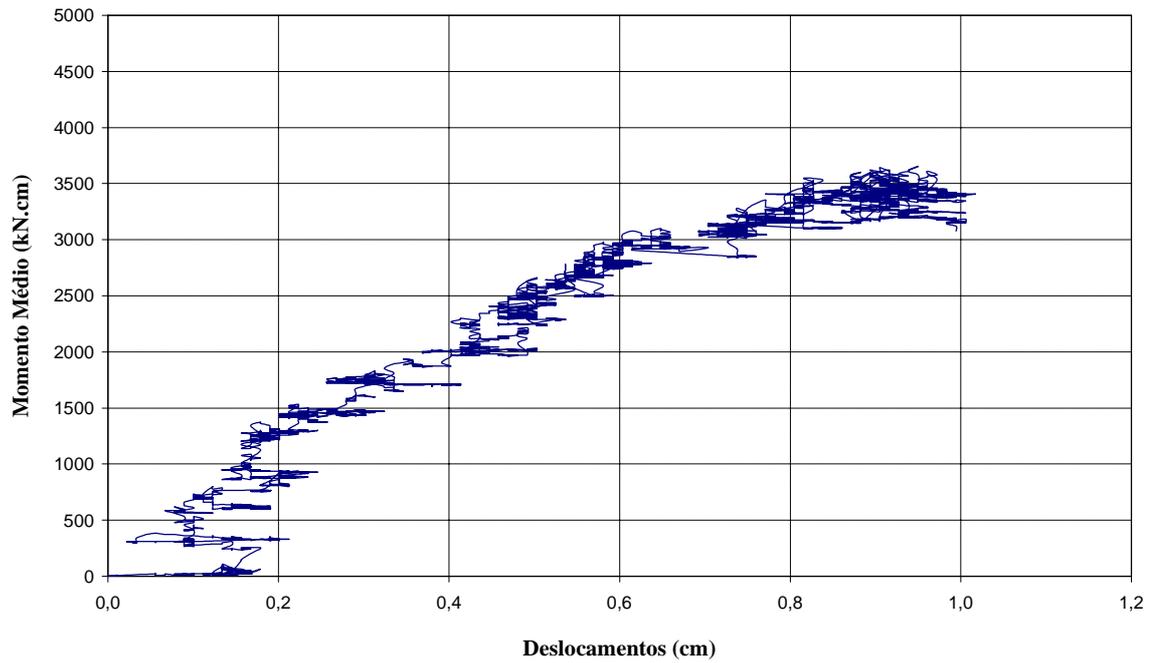


FIGURA 4.59 – Modelo 04BR-03: Momento médio no nó X deslocamento vertical da base do pilar.

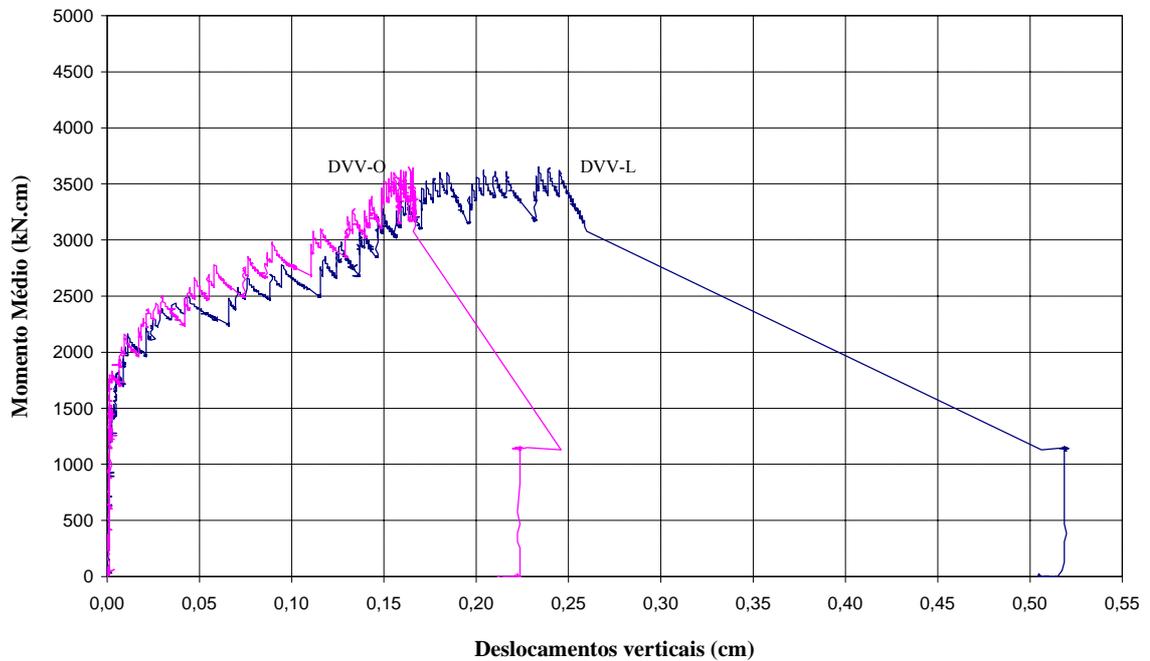


FIGURA 4.60 – Modelo 04BR-04: Momento médio no nó X deslocamentos verticais relativos das vigas medidos com transdutores de deslocamento (DT₂₅).

4.3 – Resultados da Modelagem Analítica

Para fazer o ajuste por regressão de potência com 3 parâmetros (Potência 3) foram utilizadas as séries de dados obtidos experimentalmente nesta pesquisa. Este modelo analítico é apresentado no presente trabalho e com maiores detalhes por GONZAGA (2003), que analisou outros três modelos. Para isto, foram adicionadas ao programa original elaborado por PIMENTA (200) quatro sub-rotinas referentes à cada função.

Em seu trabalho, GONZAGA (2003) concluiu que para as ligações constituídas de perfis formados a frio com chapa de extremidade parafusada, o método de potência de três parâmetros representa com maior fidelidade as respostas obtidas experimentalmente. Portanto, optou-se por analisar os resultados experimentais deste trabalho empregando-se apenas o método citado.

Dentre as ligações estudadas nesta pesquisa, apenas os dados referentes à ligação 01AF não foram analisados segundo método proposto. Isto se deve ao fato dessa ligação ter sido ensaiada à flexão em um único modelo (01AF-01), cujos resultados experimentais apresentaram oscilações excessivas e comprometeram o ajuste numérico.

Apenas um exemplar de cada tipo modelo foi escolhido para ter seus dados utilizados nos ajustes do modelo teórico, uma vez que os resultados dos ensaios em um mesmo grupo apresentaram-se bem próximos entre si. Desta forma, foram escolhidos os modelos 01BR-01, 01-BF-03, 04AF-01 e 04BR-03.

No item 2.5.2 encontra-se a equação padronizada no modelo desenvolvido por KISHI e CHEN (1990) e as variáveis K_i , M_p e β usadas por FOLEY e VINNAKOTA (1995). Nas FIG. 4.61 a 4.64 são apresentadas as curvas obtidas pelo método de ajuste de potencia de três parâmetros em comparação com os dados experimentais.

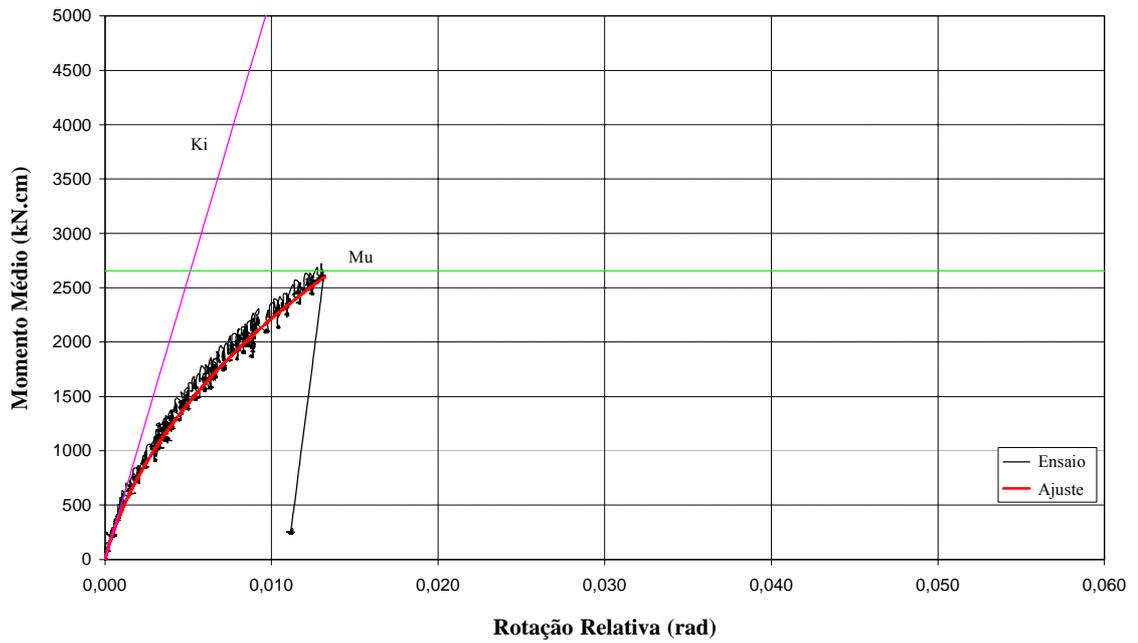


FIGURA 4.61 – Modelo 01BR-01: Comparação entre o modelo de potência de três parâmetros e os resultados experimentais.

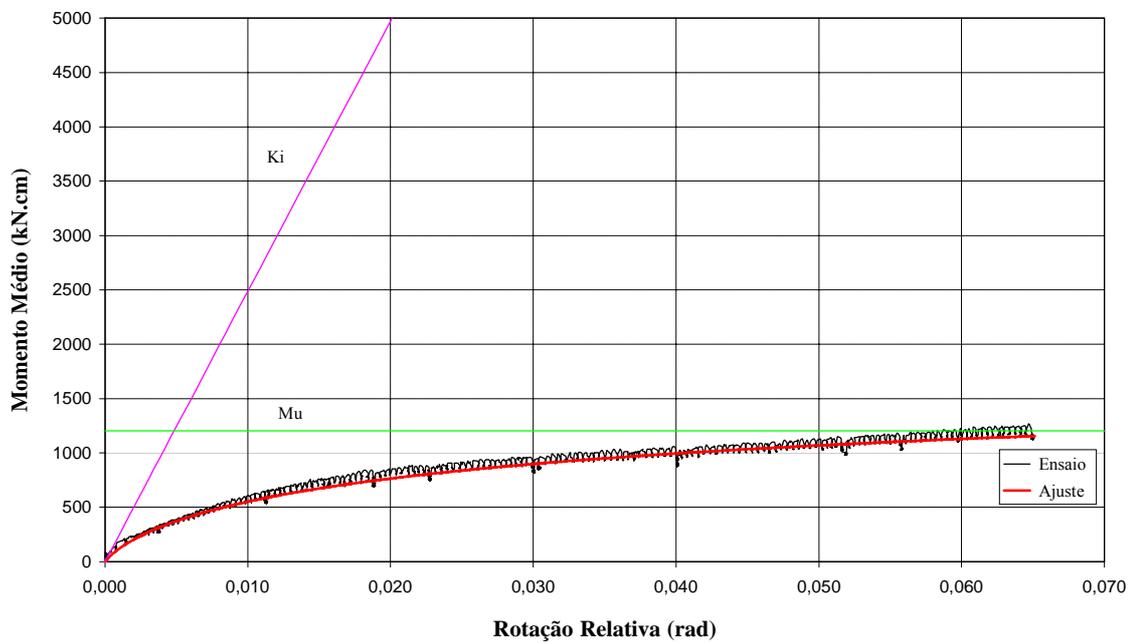


FIGURA 4.62 – Modelo 01BF-03: Comparação entre o modelo de potência de três parâmetros e os resultados experimentais.

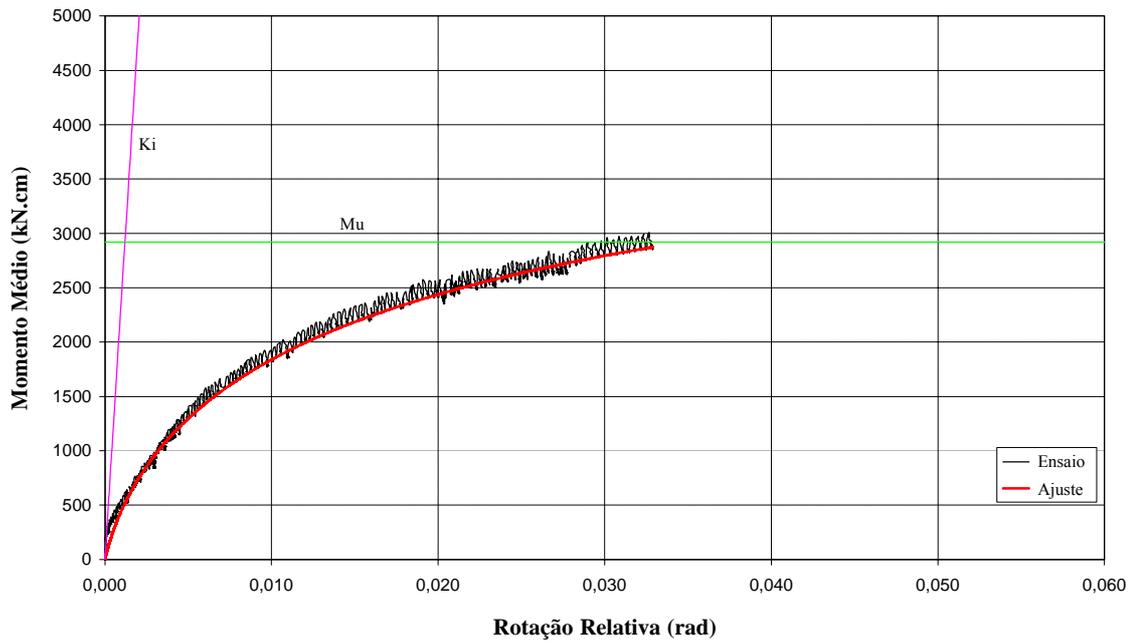


FIGURA 4.63 – Modelo 04AF-01: Comparação entre o modelo de potência de três parâmetros e os resultados experimentais.

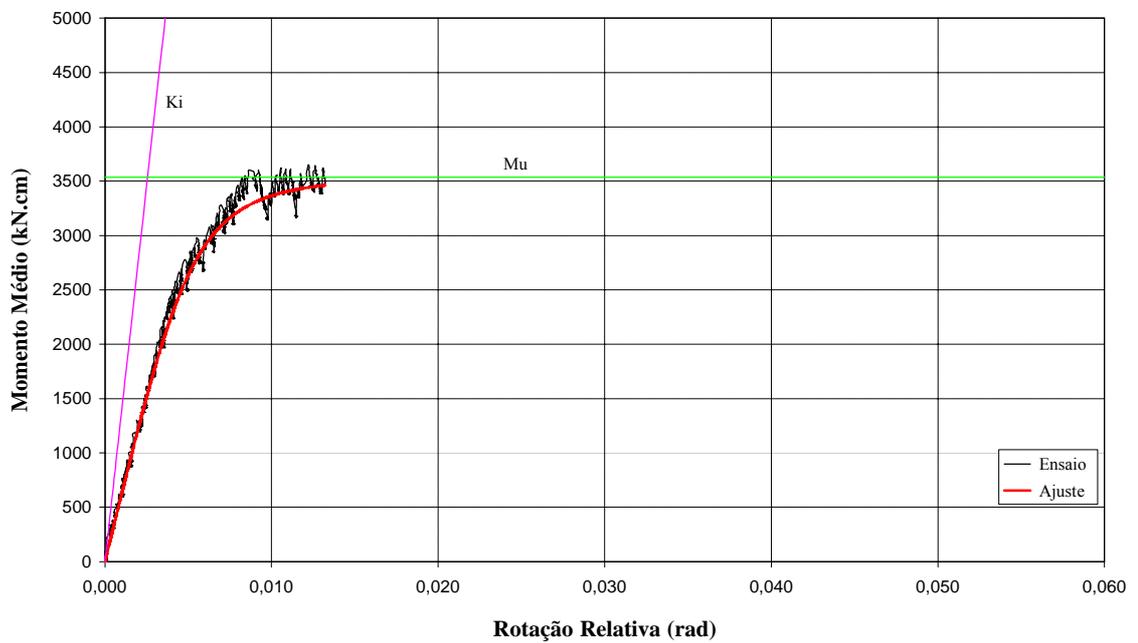


FIGURA 4.64 – Modelo 04BR-03: Comparação entre o modelo de potência de três parâmetros e os resultados experimentais.

A TAB. 4.6 apresenta os coeficientes experimentais observados e os ajustados pelo programa usando-se o método de Levenberg-Marquardt.

TABELA 4.6 – Coeficientes finais da regressão de potência de três parâmetros.

Modelo	Valores Experimentais Observados			Valores Estimados pelo Programa		
	K_i (kN.cm/rad)	M_u (kN.cm)	β	K_i (kN.cm/rad)	M_u (kN.cm)	β
01BR-01	518229	2655	1	823996	20618	0,401
01BF-03	248552	1203	1	184344	2111	0,544
04AF-01	2433106	2918	1	704278	5449	0,558
04BR-03	1382996	3535	1	618161	3537	3,16

Para as ligações analisadas, apesar das respostas teóricas estimadas pelo programa estarem bem ajustadas aos resultados observados experimentalmente, os coeficientes finais ajustados não se mostraram coerentes aos coeficientes experimentais observados, com exceção do modelo 04-BR-03.

Esta diferença se atribui ao fato de que nos ensaios dos demais modelos o patamar horizontal da curva $M-\theta$ não foi obtido e conseqüentemente, não ficou caracterizado o momento último da ligação, como previsto na formulação do programa. Talvez adicionando um quarto parâmetro, como K_p , ou fazendo uma análise estatística mais elaborada para analisar β , pode-se melhorar este resultado.

Neste estudo, pode-se comprovar que o modelo teórico é eficaz no comportamento momento-rotação para ligações parafusadas com chapa de extremidade estendida, empregando-se perfis formados a frio e rebites com rosca interna e não se limita apenas ao uso de pilares em perfis duplo cartola, conforme estudo realizado por GONZAGA (2003).

4.4 – Classificação dos Modelos Ensaiaados Segundo Bjorhovde

As FIG. 4.65 a 4.76 apresentam a classificação dos modelos estudados segundo o sistema proposto por BJORHOVDE *et al* (1990) descrito no item 2.4.3 deste trabalho. Analisando os gráficos, pode-se inferir para os modelos analisados a classificação segundo BJORHOVDE *et al* (1990) como segue:

- Modelos 01AF: foram projetados como flexíveis, porém o único modelo ensaiado à flexão (01AF-01) apresentou um comportamento semi-rígido ao longo de quase todo o ensaio.
- Modelos 01BR: foram projetados como rígidos e, até a ruptura dos rebites, apresentaram esse comportamento.
- Modelos 01BF: foram projetados como flexíveis, no entanto apresentaram comportamento semi-rígido durante todas as etapas de carregamento.
- Modelos 04AF: foram projetados como flexíveis, sendo que no início de ambos os ensaios os modelos apresentaram comportamento rígido e, a partir de aproximadamente 10% da rotação elástica (θ_p), os dois modelos passaram a apresentar comportamento semi-rígido.
- Modelos 04BR: foram projetados como rígidos e apresentaram esse comportamento ao longo de todos os ensaios.

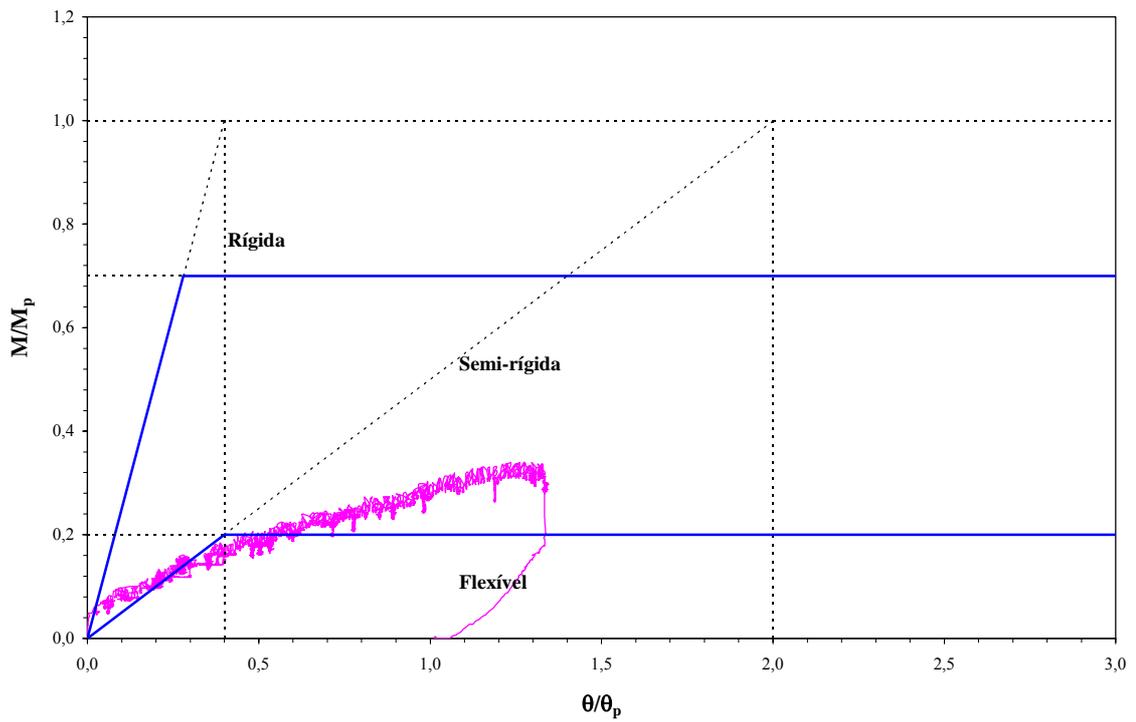


FIGURA 4.65 – Modelo 01AF-01: Classificação segundo BJORHOVDE.

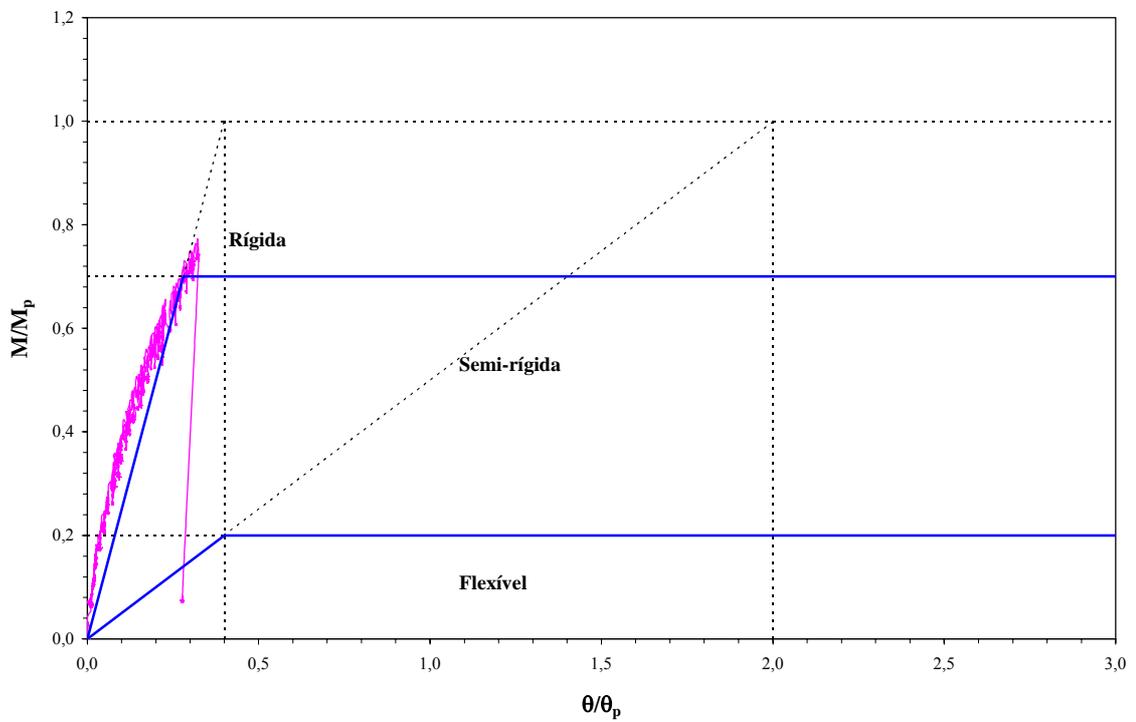


FIGURA 4.66 – Modelo 01BR-01: Classificação segundo BJORHOVDE.

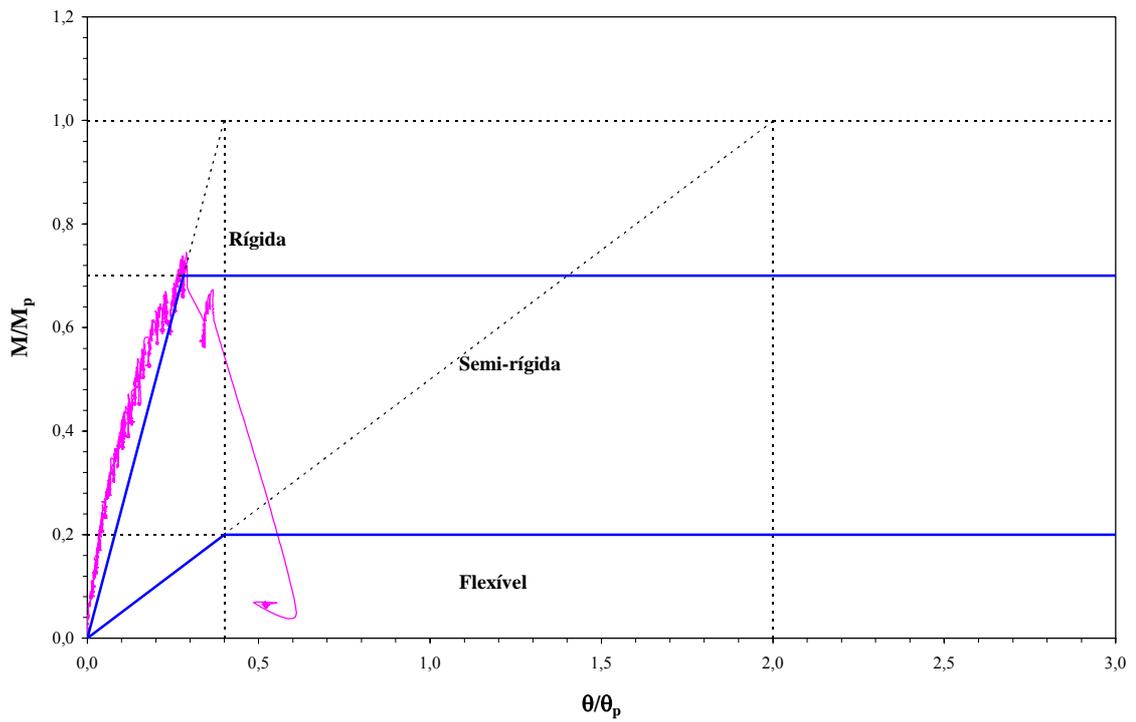


FIGURA 4.67 – Modelo 01BR-02: Classificação segundo BJORHOVDE.

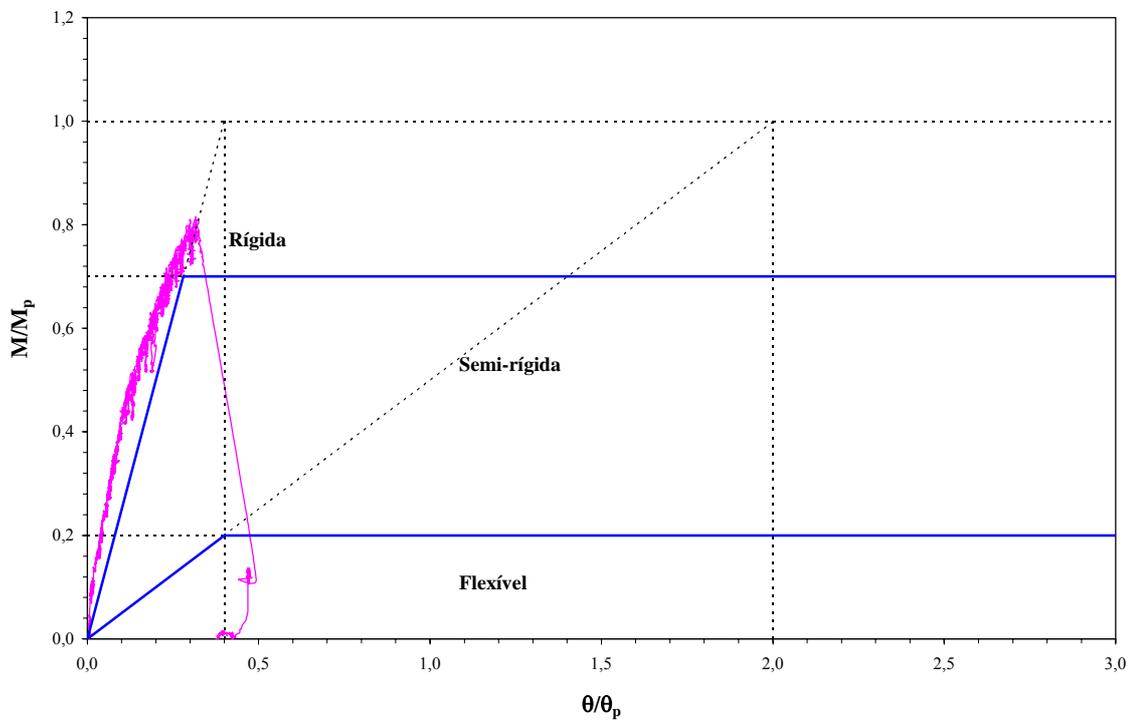


FIGURA 4.68 – Modelo 01BR-03: Classificação segundo BJORHOVDE.

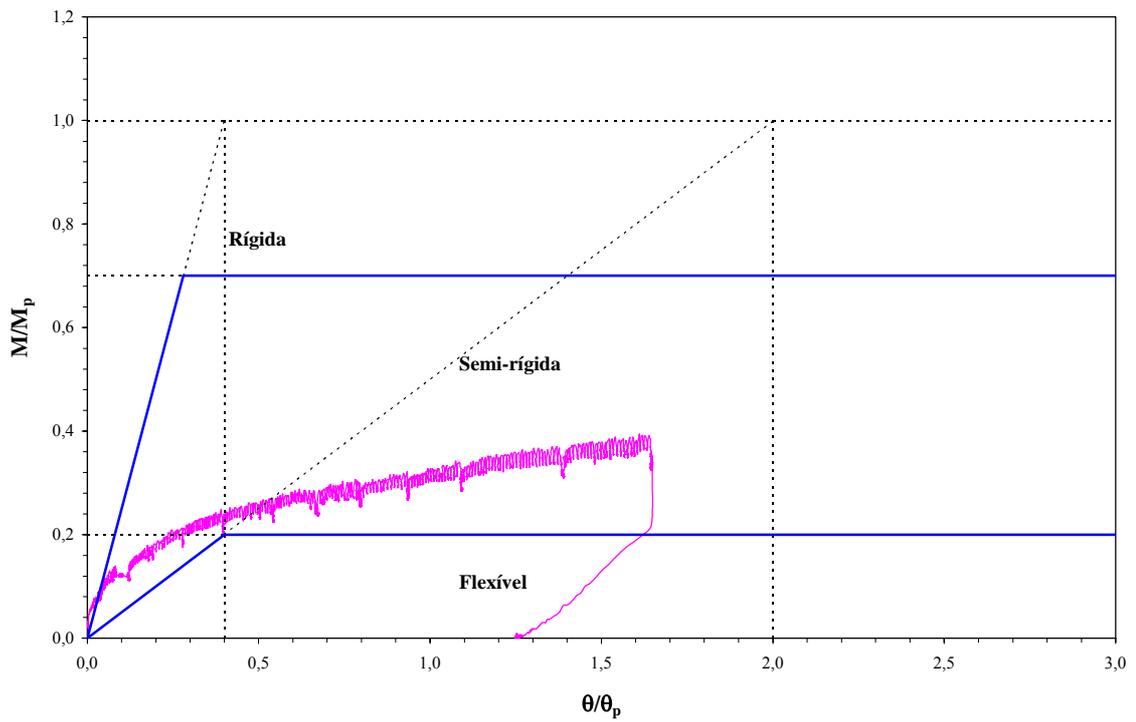


FIGURA 4.69 – Modelo 01BF-01: Classificação segundo BJORHOVDE.

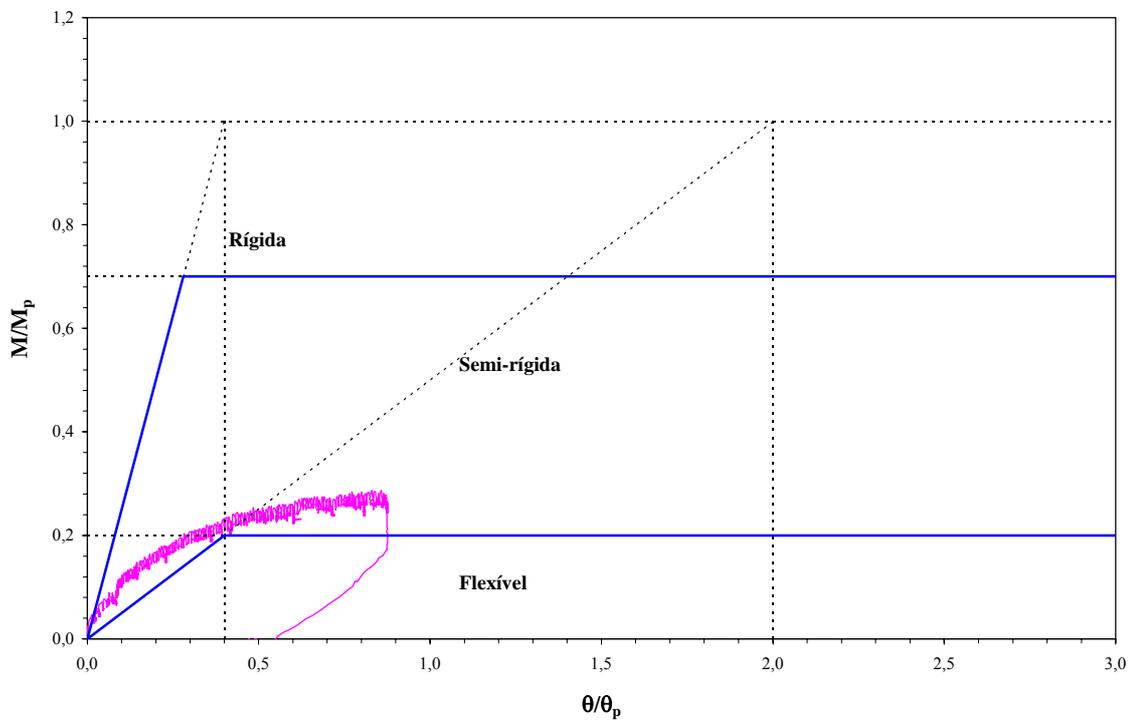


FIGURA 4.70 – Modelo 01BF-02: Classificação segundo BJORHOVDE.

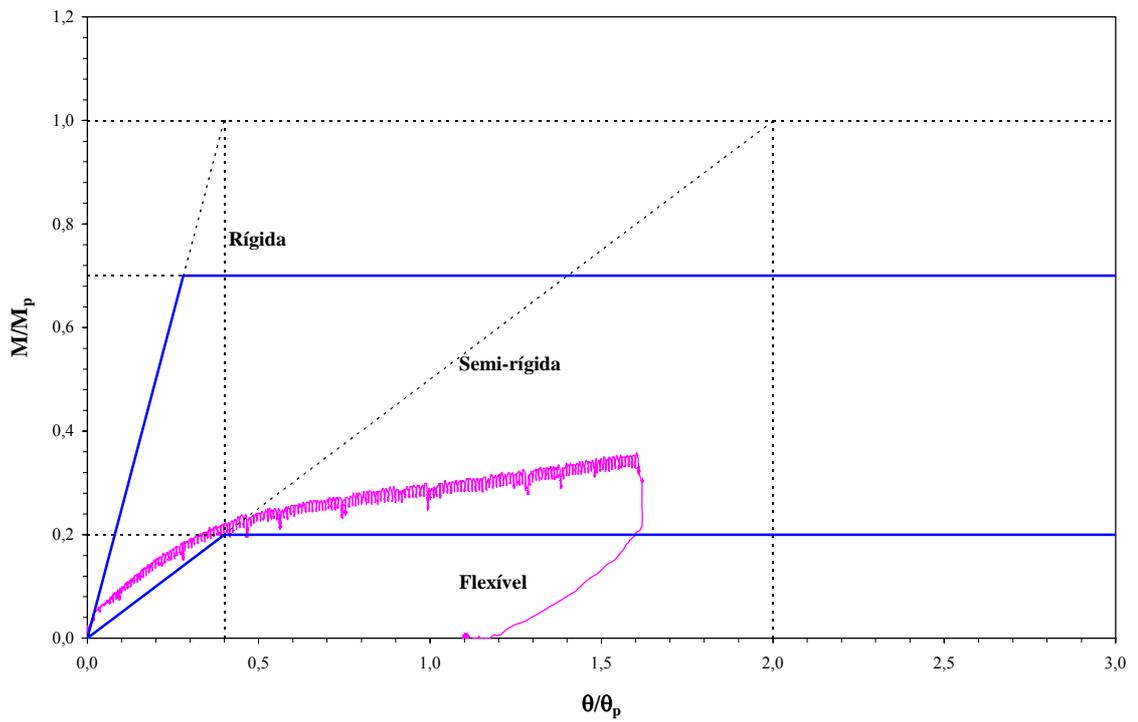


FIGURA 4.71 – Modelo 01BF-03: Classificação segundo BJORHOVDE.

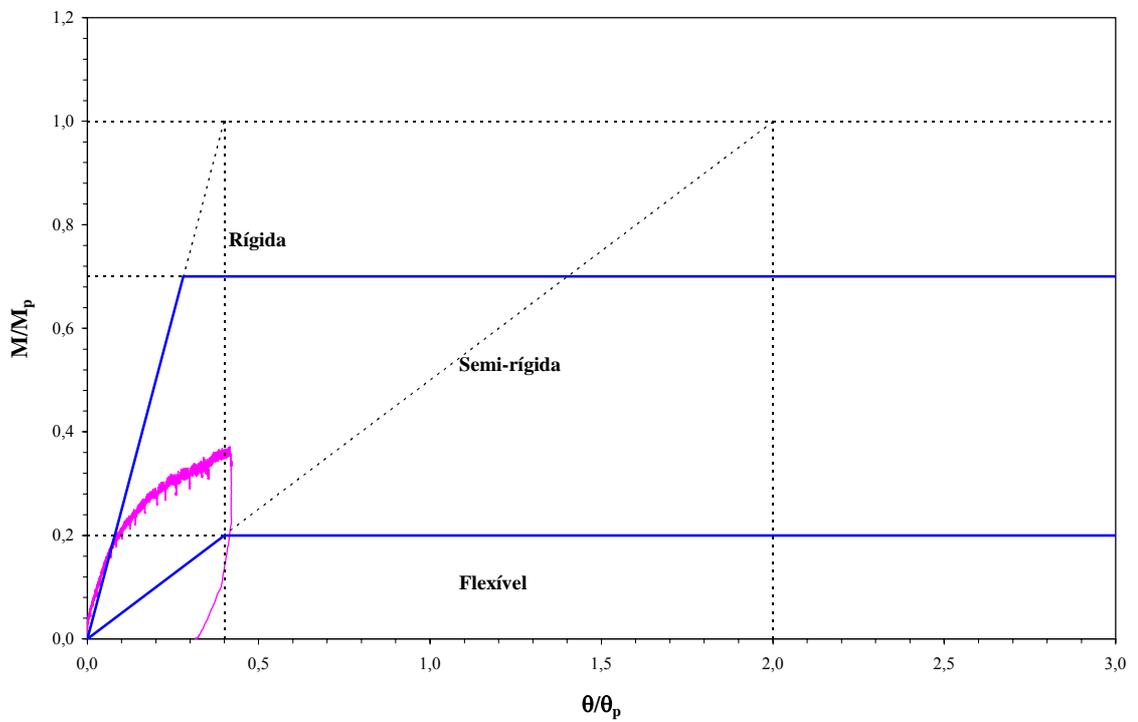


FIGURA 4.72 – Modelo 04AF-01: Classificação segundo BJORHOVDE.

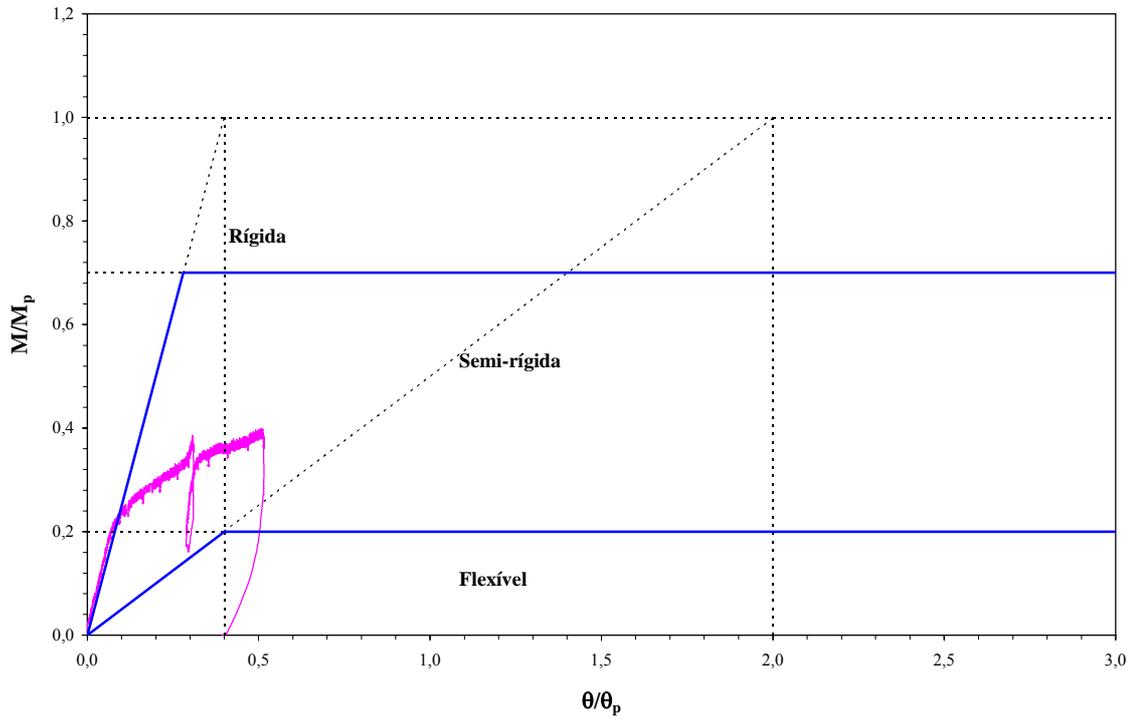


FIGURA 4.73 – Modelo 04AF-02: Classificação segundo BJORHOVDE.

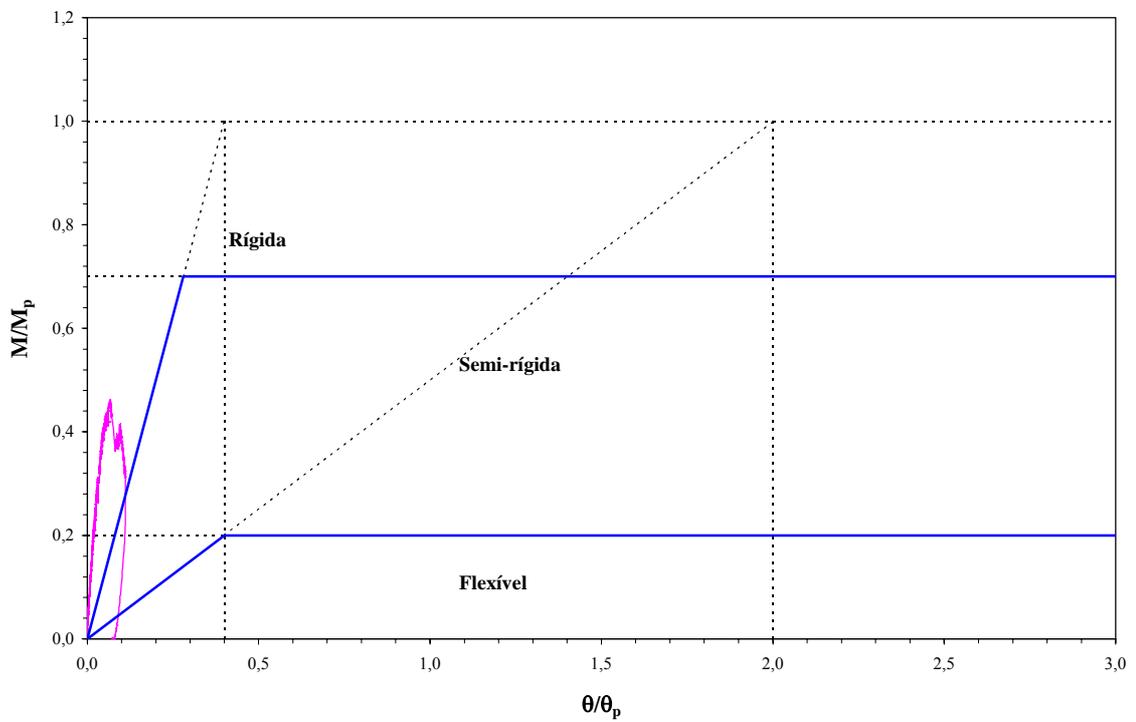


FIGURA 4.74 – Modelo 04BR-01: Classificação segundo BJORHOVDE.

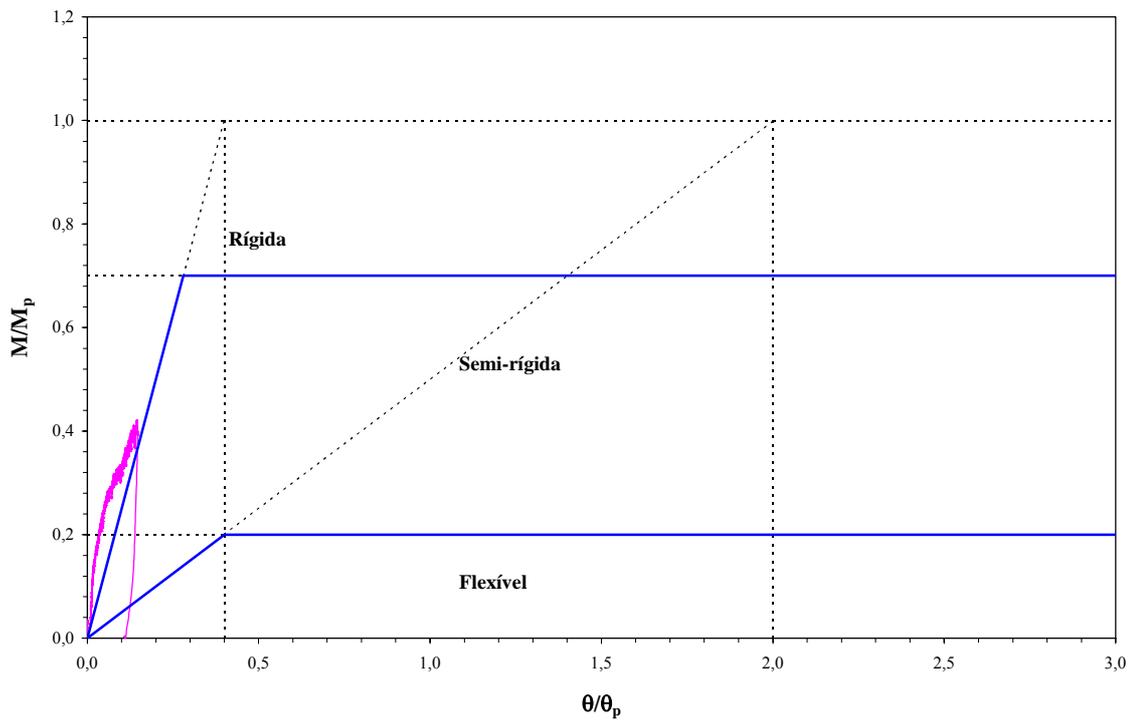


FIGURA 4.75 – Modelo 04BR-02: Classificação segundo BJORHOVDE.

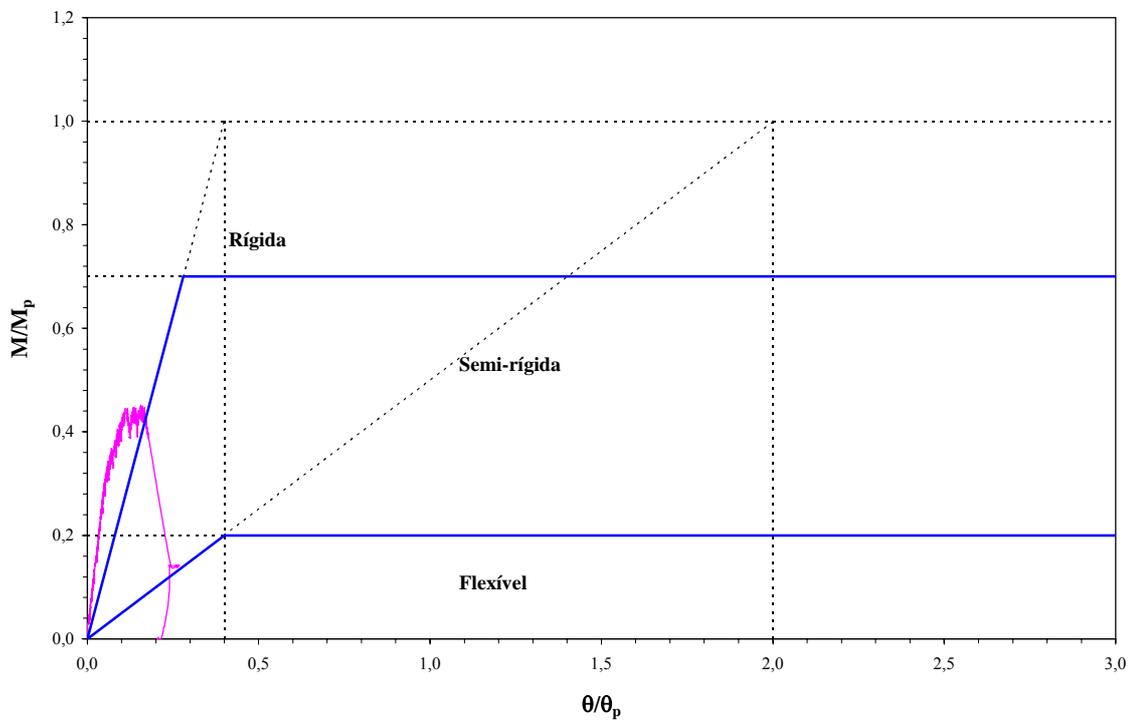


FIGURA 4.76 – Modelo 04BR-03: Classificação segundo BJORHOVDE.

5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 – Conclusões

Os objetivos pretendidos inicialmente para este trabalho consistiram no desenvolvimento de uma pesquisa de caráter fundamentalmente experimental sobre a resistência e o comportamento de ligações viga-pilar parafusadas, constituídas por perfis de aço formados a frio, com chapa de extremidade estendida e rebites com rosca interna como meios de ligação.

O sistema assim proposto constitui uma inovação tecnológica para a construção metálica, uma vez que até o momento não se tem conhecimento de uma solução análoga, no Brasil ou no exterior.

Foram realizados ensaios em 14 modelos de ligações, sendo 12 submetidos ao momento fletor e 2 solicitados essencialmente ao esforço cortante. Os ensaios foram instrumentados e controlados de modo a permitir a obtenção de resultados experimentais confiáveis, tendo em vista a complexidade da montagem e da

instrumentação empregada e também a sensibilidade a efeitos de imperfeições, que é o caso de elementos estruturais esbeltos.

Durante as investigações experimentais foi possível detectar os principais fenômenos relacionados às deformações plásticas e à ruptura - que serviram para definir os modos de colapso dos modelos, tais como: formação de charneira plástica na chapa de extremidade da viga; efeito “*pull out*” nos elementos do perfil do pilar devido aos esforços de tração nos parafusos inferiores da ligação e ruptura brusca de alguns rebites com rosca interna. Foi possível detectar também – em dois modelos - os mecanismos de flambagem local por esforço cortante na alma das vigas, ocorridos na região das chapas de reforço próximo ao pilar e na região dos apoios.

Concluídas as etapas experimentais programadas e considerando-se a ausência de modelos teóricos relativos às ligações com perfis formados a frio, foi também realizada uma análise visando ajustes por regressão em um modelo de potência com 3 parâmetros (Modelo de Potência 3), tendo sido utilizadas as séries de resultados experimentais gerados nessa pesquisa. O modelo teórico utilizado foi o modelo analítico de potência de três parâmetros apresentado por KISHI e CHEN (1990) e calibrado por FOLEY E VINNAKOTA (1995) e GONZAGA (2003).

Pode-se afirmar que num aspecto geral todos os objetivos foram alcançados, uma vez que se conseguiu monitorar experimentalmente o comportamento estrutural dos exemplares testados e verificar que as ligações obedecem a um dos poucos modelos analíticos encontrados na bibliografia, mesmo que esse não seja direcionado para as ligações analisadas na pesquisa.

Avaliando os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A metodologia empregada para a realização dos ensaios resultou plenamente satisfatória. O sistema de aquisição e digitalização de sinais apresentou-se eficiente, possibilitando a análise posterior dos dados obtidos.

- O modelo analítico de potência com 3 parâmetros, apresentado por KISHI e CHEN (1990) é eficaz no comportamento momento-rotação para ligações parafusadas, com chapa de extremidade estendida, perfis formados a frio e rebites com rosca interna como meios de ligação, uma vez que foi atingida uma excelente performance de resposta.
- Para as ligações semi-rígidas, a concordância entre os resultados teóricos e experimentais foi verificada não só para os resultados obtidos dentro da faixa de cargas de serviço, mas também para aqueles próximos ao limiar da capacidade de rotação.

5.2 – Recomendações

Durante a pesquisa bibliográfica ficou evidente a carência de mais estudos do comportamento de ligações em estruturas de perfis formados a frio. Por isto, para a continuidade da pesquisa são sugeridos os seguintes estudos:

- Analisar de modo mais preciso, com o apoio dos conhecimentos da Metalurgia, da Mecânica e com o acompanhamento do fabricante, as razões do rompimento brusco de alguns rebites com rosca interna utilizados como meios de ligação. Até o momento, devido a estas ruínas súbitas e por questões ainda desconhecidas, os autores da presente pesquisa sugerem cautela com a utilização dos referidos conectores, necessitando de um maior número de ensaios;
- Com a realização de um maior número de ensaios, controlando melhor a resistência dos rebites, procurar a aferir ainda mais o modelo teórico analisado e incluir outros na análise, de forma a ter mais subsídios para, enfim, propor uma curva Momento-Rotação padronizada e específica para as ligações em perfis formados a frio. Para isto, devem ser realizadas análises parametrizadas via Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando-se os modelos estudados, a fim

de estender os resultados obtidos para o mesmo tipo de ligação, porém variando as dimensões e o número de parafusos.

- Estudar o comportamento de ligações mistas aço-concreto viga-pilar utilizando perfis formados a frio com conectores do tipo rebite tubular com rosca interna
- As ligações desenvolvidas nesse trabalho foram ensaiadas sem qualquer solicitação nos pilares. É recomendado analisar o comportamento das mesmas quando existe o efeito da força normal de compressão atuando no pilar.
- Estudar o comportamento das ligações quando existe, no pilar, a interação de vigas ligadas em dois planos perpendiculares (ex: pilares de canto e pilares interiores).
- Nos ensaios realizados nesse trabalho, simulou-se o efeito do momento fletor atuando na ligação entre vigas e pilares. Pela simetria da montagem, este momento é igual nas duas faces do pilar. Propõe-se uma análise que determine qual é o efeito da atuação de momentos fletores desequilibrados na face do pilar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AISC – American Institute of Steel Construction, Inc., “Manual of Steel Construction: Allowable Stress Design (ASD)”. AISC, Chicago, 1989
- AISC – American Institute of Steel Construction, Inc., “Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD)”. AISC, Chicago, 1999.
- AISI – American Iron and Steel Institute, “Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members: Load and Resistance Factor Design (LRFD)”. AISI, 1996
- BAHAARI, M. R. e SHERBOURNE, A. N., “Computer Modeling of Extended End-Plate Bolted Connection”. Computers & Structures, Vol. 52, No. 5, p. 879-893. Elsevier Science Ltd., Great Britain, 1994.
- BJORHOVDE, R., BROZZETTI, J. e COLSON, A., “Classification System for Beam-to-Column Connections”. Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No 11, p. 3059-3076. ASCE, 1990.
- CAN-S136, “Cold Formed Steel Structural Members”. Canadian Standards Association (CSA), Toronto, 1994.
- CEF – Caixa Econômica Federal, “Edificações Habitacionais Convencionais Estruturadas em Aço: Requisitos e Critérios Mínimos para Financiamento pela Caixa Econômica Federal”. CEF, 2002.
- EUROCODE 3, “Design of Steel Structures, Part1.1”. European Committee for Standardization, CEN, Brussels, 1998.
- FOLEY, C. M. e VINNAKOTA, S., “Toward Design Office Momento-Rotation Curves for End-Plate Beam-to-Column Connections”. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 35, p. 217-253. Elsevier Science Ltd., Great Britain, 1995.
- GONZAGA, L. G. M., “Comportamento e Resistência de Ligações Viga-Pilar Parafusadas e Soldadas de Estruturas de Aço Perfis Formados a Frio”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

- GOTO, Y. e MIYASHITA, S., "Classification, System for Rigid and Semirigid Connections". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No 7, p. 750-757. ASCE, 1998.
- HASAN, R., KISHI, N., GOTO, Y. e KOMURO, M., "Relation Between Connection Stiffness and Beam Stiffness". 5th IABSE International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, p. 397-404, Nagoya, 1997.
- HASAN, R., KISHI, N. e CHEN, W.F., "A New Nonlinear Connection Classification System". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 11, p. 119-140. Elsevier Science Ltd., Great Britain, 1998.
- FJP – Fundação João Pinheiro, "Déficit Habitacional no Brasil 2000". FJP – Centro de Estatística e Informações (CEI), Belo Horizonte, 2002.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, "Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios: síntese de indicadores (PNAD)". IBGE, Rio de Janeiro, 2002.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, "Sinopse Preliminar da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD)". IBGE, Rio de Janeiro, 1999.
- IOANNIDES, S. A., "Flange Behavior in Bolted End-Plate Moment Connections". Tese de Ph.D., Vanderbilt University, Nashville, EUA, 1978.
- NBR8800, "Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios (Método dos Estados Limitas)". Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1986.
- NBR14762, "Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio". Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 2001.
- NETHERCOT, D. A., LI, T. Q. e AHMED, B., "Unified Classification System for Beam-to-Column Connections". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 45, No. 1, p. 39-65. Elsevier Science Ltd., Great Britain, 1998.
- P-NB-143, "Cálculo de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Leves". Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 1967.

PIMENTA, A. S., “Ajuste de Funções de Múltiplas Variáveis a Séries de Dados Obtidas Experimentalmente ou Numericamente”. Relatório Final de Programa de Iniciação Científica. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Julho de 2000.

PRESS, W. H., TEUSKOLSKY, S. A., VETTERLING, W. T. e FLANNERY, B. P., “Numerical Recipes in Fortran: The Art of Scientific Computing”. 2a ed. Cambridge University Press, 1992.

SIDERBRÁS – Siderurgia Brasileira S. A., “Ligações em Estruturas Metálicas: publicações técnicas para o desenvolvimento da construção metálica”. Vol.II. Ed. Santa Edwiges Ltda., Belo Horizonte 1988.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- CHEN, W.F e KISHI, N., “Semi-Rigid Steel Beam-to-Column Connections: Data Base and Modeling”. Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 7, p. 105-119. ASCE, 1989.
- FRYE, C. M. e MORRIS , G. A., “Analysis of Flexibly Connected Steel Frames”. Canadian Journal of Civil Engineers, Vol. 2, No. 3, p. 208-291. 1975
- KISHI, N. e CHEN, W.F., “Moment-Rotation Relations of Semi-rigid Connections With Angles”. Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No. 7, p. 1813-1834. ASCE, 1990.
- KRISHNAMURTHY, N., HUANG, H-T, JEFFREY, P. K. e AVERY, L., “Analytical $M-\theta$ Curves for End-Plate Connections”. Journal of the Division, Vol. 105, No. ST1, p. 133-145. 1979.
- McGUIRE, J., “Notes on Semi-Rigid Connections”. FEMCI – Finite Element Modeling Continuous Improvement. NASA Goddard Space Flight Center, EUA, 1995. <http://analyst.gsfc.nasa.gov/FEMCI/semirigid/>, acessado em 26/02/2003.
- QUEIROZ, G., “Análise Experimental de Ligações Soldadas”. Tese de doutorado, Universidade de Innsbruck, 1995.
- QUEIROZ, G., “Elementos das Estruturas de Aço”. 4a ed., 1993.
- RIVNUT-PLUSNUT, “Design Guide” – Catálogo de Produtos da RIVNUT Engineered Products, Inc., EUA, 1995.
- SALMON, C. G. e JOHNSON, J. E., “Steel Structures: Design and Behavior, Emphasizing Load and Resistance Factor Design, Fourth Edition”. HarperCollins College Publishers, Nova York, EUA, 1996.