

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM
PERFIS FORMADOS A FRIO**

ALEXANDRE CAMILLO DA SILVA

ORIENTADORA: Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas

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

Ouro Preto, agosto de 2006.

S586e Silva, Alexandre Camillo.
Estudo de ligações parafusadas em perfis formados a frio [manuscrito]. /
Alexandre Camillo Silva. - 2006.
xii, 143 f.: il. color., graf., tabs.

Orientador: Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Metálica.

1. Ligações parafusadas - Teses. 2. Perfis formados a frio - Teses.
3. Análise experimental - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. II. Título.

CDU: 624.014.2

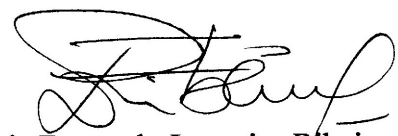
Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br


ESTUDO DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM PERFIS FORMADOS A FRIO

AUTOR: ALEXANDRE CAMILLO DA SILVA

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 17 de agosto de 2006, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:


Profa. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas (Orientadora / UFOP)


Prof. Dr. Luiz Fernando Loureiro Ribeiro (UFOP)


Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues (UFMG)


Prof. Dr. Renato Bertolino Júnior (UNESP)

AGRADECIMENTOS

Ninguém vai longe sozinho.

À professora e orientadora Arlene Maria Sarmanho Freitas, por ter acreditado em mim e neste trabalho. Levo comigo a admiração, amizade e respeito conquistados neste breve período de mestrado.

Aos meus verdadeiros amigos que sempre me dão forças para continuar aprendendo e prosperando mais e mais. O apoio incondicional de vocês é muito importante. Muito obrigado a todos vocês – os verdadeiros campeões que sempre estão do meu lado e apóiam minhas idéias de crescimento!

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PROPEC, pelos ensinamentos e conhecimentos que foram passados de forma competente durante esses dois anos de trabalho.

Aos colegas de Lamec, pelo saudável ambiente de trabalho, onde sempre prevaleceu o coleguismo, a amizade e a camaradagem.

À secretária do Propec, Róvia, pela solicitude e presteza em todos momentos de necessidade, e ao professor Walter Dornelas pela constante disponibilidade em ajudar.

A todos que deram suporte e contribuição na montagem e execução dos ensaios experimentais, Abel, Dequinha, Franco, Geraldo, João e em especial ao Flávio, cujo espírito solidário e amigo merece destaque.

À empresa Usiminas, pelo apoio e financiamento deste trabalho.

À empresa Pórtico S.A., pelo fornecimento dos protótipos ensaiados.

E finalmente, minha gratidão ao Grande Arquiteto que me presenteou com um poderoso espírito de curiosidade e uma forte certeza de que posso fazer uma diferença, fazendo do mundo um lugar melhor de se viver.

RESUMO

As ligações estruturais desempenham um papel fundamental nas estruturas metálicas influenciando no comportamento global das mesmas. Neste contexto, o presente trabalho apresenta estudos teórico-experimentais para a avaliação do comportamento de uma tipologia, não padronizada, de ligação viga-coluna parafusada, utilizando seções transversais em perfis de aço formados a frio. Os estudos deram continuidade às pesquisas anteriormente desenvolvidas no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PROPEC/EM/UFOP. Foi desenvolvido um programa experimental que consistiu na realização de quatro ensaios em quatro diferentes configurações de ligações viga-coluna, agrupadas em dois grupos: sem enrijecedores (SE) e com enrijecedores (CE) de alma soldados nos flanges da coluna, estabelecendo assim parâmetros de comparação; diferiram também as espessuras das vigas. Os resultados experimentais permitiram determinar as curvas momento-rotação e rigidezes, bem como os momentos últimos, os campos de deslocamento e deformação e os respectivos mecanismos de colapso de cada ligação ensaiada. Os resultados foram então confrontados com os resultados de pesquisas anteriores e mencionadas características particulares a cada modelo ensaiado. Como resultado, verificou-se que as ligações com enrijecedores de alma na coluna, têm o mecanismo de colapso alterado e, por consequência, suas resistências e rigidezes aumentadas.

ABSTRACT

Connections are very important in steel structures behavior. In this work, a theoretical-experimental study was carried-out to evaluate the behavior of a non standard cold formed beam-column bolted connection. This study is part of a comprehensive work that has been developed in the Post-Graduation Program in Civil Engineering of Federal University of Ouro Preto – PROPEC/EM/UFOP. There were tested four specimens with different settings, in two main types, in order to compare the behaviour of connections: with (CE) and without (SE) column web stiffeners. There were used beams with two thicknesses. The experimental results showed the moment-rotations curves, stiffnesses, ultimate moment, displacements and the strains in each tested connection. The results were compared with data obtained in previous research, and particular behaviour of each connection was determined. There was observed that the beam-column connection with column web stiffeners have their collapse mechanism modified and their stiffness and strength increased.

ÍNDICE

Resumo.....	IV
Abstract.....	V
Índice.....	VI
Lista de Figuras.....	VIII
Lista de Tabelas	XII
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. TIPOLOGIA DAS LIGAÇÕES EM ESTUDO	13
2.1. INTRODUÇÃO	13
2.2. LIGAÇÃO PADRÃO - MORAIS (2003)	14
2.3. LIGAÇÃO PADRÃO - CABRAL (2004).....	20
2.4. LIGAÇÕES VIGA-COLUNA.....	25
2.4.1. Determinação da Rigidez de uma Ligação com a Utilização de Ensaios Experimentais	28
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	31
3.1. INTRODUÇÃO	31
3.2. PROTÓTIPOS ENSAIADOS.....	31
3.3. GEOMETRIA DOS PROTÓTIPOS ENSAIADOS	32
3.3.1. Protótipos B-SE e C-SE	33
3.3.2. Protótipos B-CE e C-CE	34
3.4. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	37
3.5. ESQUEMA DE MONTAGEM DOS PROTÓTIPOS	38
3.6. SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA NOS PROTÓTIPOS.....	41
3.7. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DOS PROTÓTIPOS.....	42

3.8. METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	44
3.9. INSTRUMENTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	45
3.9.1. Instrumentação do Protótipo B-SE	45
3.9.2. Instrumentação do Protótipo C-SE	49
3.9.3. Instrumentação dos Protótipos B-CE e C-CE	51
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	54
4.1. INTRODUÇÃO	54
4.1.1. Protótipo B-SE	54
4.1.2. Protótipo B-CE	63
4.1.3. Protótipo C-SE	73
4.1.4. Protótipo C-CE	82
4.2. COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	90
4.2.1. Protótipos Morais	90
4.2.2. Protótipos Cabral	92
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
ANEXOS.....	106
ANEXO I: Planta Baixa e Esquema Estrutural do Projeto USIHAB	107
ANEXO II: Memória de Cálculo das Ligações Ensaçadas	113
ANEXO III: Planilhas dos ensaios experimentais	132

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 – Equipamento utilizado no processo descontínuo de fabricação dos perfis formados a frio.....	2
Figura 1.2 – Equipamento utilizado no processo contínuo de fabricação dos perfis formados a frio.....	2
Figura 1.3 – Seções transversais usuais do tipo perfil	4
Figura 1.4 – Seções transversais usuais do tipo painel	5

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Seções transversais utilizadas (mm).....	14
Figura 2.2 – Esquema dos modelos ensaiados.....	15
Figura 2.3 – Ligação padrão de Moraes	16
Figura 2.4 – Detalhe das dimensões dos componentes dos protótipos (mm).....	17
Figura 2.5 – Curvas momento-rotação da ligação dos protótipos de Moraes (2003).....	18
Figura 2.6 – Modelo experimental cruciforme	21
Figura 2.7 – Vista geral da ligação mista.....	21
Figura 2.8 – Detalhe das dimensões dos componentes dos protótipos (mm)	22
Figura 2.9 – Curvas momento-rotação das ligações dos Protótipos B	23
Figura 2.10 – Curvas momento-rotação das ligações dos Protótipos C	24
Figura 2.11 – Classificação das ligações	26
Figura 2.12 – Parâmetros estruturais da curva M- θ	27
Figura 2.13 – Método da Inclinação Inicial	29
Figura 2.14 – Métodos de determinação da rigidez.....	29

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Perspectiva do Protótipo B-SE	33
Figura 3.2 – Perspectiva do Protótipo C-SE.....	34
Figura 3.3 – Perspectiva do Protótipo B-CE.....	35
Figura 3.4 – Foto do Protótipo B-CE - detalhe dos enrijecedores de alma	36

Figura 3.5 – Perspectiva do Protótipo C-CE.....	36
Figura 3.6 –Foto dos Pórticos de Reação PR01, PR03 e PR02	39
Figura 3.7 – Fotos dos acessórios utilizados para fixação das colunas	39
Figura 3.8 – Esquema de montagem dos Protótipos B-SE e C-SE.....	40
Figura 3.9 – Foto da montagem da coluna e das vigas do Protótipo B-SE	41
Figura 3.10 – Detalhe do sistema de aplicação de carga	42
Figura 3.11 – Vistas de um módulo do Spider8	43
Figura 3.12 – Montagem do sistema de aquisição de dados.....	44
Figura 3.13 – Detalhe do posicionamento dos LVDT`s e dos defletômetros utilizados em todos protótipos.....	46
Figura 3.14 – Posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência no Protótipo B-SE.....	47
Figura 3.15 – Foto do posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência E1, E4, E6, E10, E12, E15, E17, E18 - Protótipo B-SE	48
Figura 3.16 – Posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência no Protótipo C-SE.....	50
Figura 3.17 – Posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência nos Protótipos B-CE e C-CE	52

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 – Gráfico Carga x Deformação da coluna do Protótipo B-SE	55
Figura 4.2 – Gráfico Carga x Deformação das vigas do Protótipo B-SE	55
Figura 4.3 – Gráfico Carga x Deformação do U Suporte do Protótipo B-SE.....	57
Figura 4.4 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da coluna do Protótipo B-SE.....	58
Figura 4.5 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 01 - Protótipo B-SE.....	59
Figura 4.6 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 02 - Protótipo B-SE.....	59
Figura 4.7 – Deformadas das vigas do Protótipo B-SE para a carga de 17,06 kN	60
Figura 4.8 – Curvas momento-rotação das ligações do Protótipo B-SE	61

Figura 4.9 – Mecanismo de plastificação nos enrijecedores de borda da coluna - Viga 02.....	62
Figura 4.10 – Deformação dos flanges da coluna do Protótipo B-SE	62
Figura 4.11 – Gráfico Carga x Deformação da coluna do Protótipo B-CE, extensômetros em sentido transversal à borda.....	64
Figura 4.12 – Gráfico Carga x Deformação da coluna do Protótipo B-CE, extensômetros em sentido longitudinal à borda.....	65
Figura 4.13 – Gráfico Carga x Deformação das vigas do Protótipo B-CE.....	66
Figura 4.14 – Gráfico Carga x Deformação dos enrijecedores de alma da coluna do Protótipo B-CE	67
Figura 4.15 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da coluna do Protótipo B-CE	68
Figura 4.16 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 01 - Protótipo B-CE	69
Figura 4.17 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 02 - Protótipo B-CE	69
Figura 4.18 – Deformadas das vigas do Protótipo B-CE para a carga de 21,96 kN.....	70
Figura 4.19 – Curvas momento-rotação das ligações do Protótipo B-CE.....	71
Figura 4.20 – Fotos que mostram os enrijecedores de alma e o colapso por rasgamento das cantoneiras de ligação superiores da viga 01	72
Figura 4.21 – Gráfico Carga x Deformação da coluna do Protótipo C-SE, extensômetros em sentido transversal à borda.....	74
Figura 4.22 – Gráfico Carga x Deformação da coluna do Protótipo C-SE, extensômetros em sentido longitudinal à borda.....	74
Figura 4.23 – Gráfico Carga x Deformação Específica das vigas do Protótipo C-SE ...	76
Figura 4.24 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da coluna do Protótipo C-SE.....	77
Figura 4.25 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 01 - Protótipo C-SE.....	78
Figura 4.26 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 02 - Protótipo C-SE.....	78
Figura 4.27 – Deformada das vigas do Protótipo C-SE para carga de 14,97 kN	79

Figura 4.28 – Curvas momento-rotação das ligações do Protótipo C-SE	79
Figura 4.29 – Mecanismo de plastificação dos enrijecedores de borda da coluna - viga01 vista inferior.....	80
Figura 4.30 – Deformação dos flanges da coluna do Protótipo C-SE.....	81
Figura 4.31 – Gráfico Carga x Deformação da coluna do Protótipo C-CE, extensômetros em sentido transversal à borda.....	82
Figura 4.32 – Gráfico Carga x Deformação da coluna do Protótipo C-CE, extensômetros em sentido longitudinal à borda.....	83
Figura 4.33 – Gráfico Carga x Deformação das vigas do Protótipo C-CE.....	84
Figura 4.34 – Gráfico Carga x Deformação dos enrijecedores de alma da coluna do Protótipo C-CE	85
Figura 4.35 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 01 - Protótipo C-CE	86
Figura 4.36 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 02 - Protótipo C-CE	87
Figura 4.37 – Deformadas das vigas do Protótipo C-CE para a carga de 21,00 kN.....	87
Figura 4.38 – Curvas momento-rotação das ligações do Protótipo C-CE.....	88
Figura 4.39 – Comparação do comportamento momento x rotação da ligação tipo "B", sem enrijecedores, com enrijecedores e mista	93
Figura 4.40 – Comparação do comportamento momento x rotação da ligação tipo "C", sem enrijecedores, com enrijecedores e mista	93
Figura 4.41 – Deformadas das vigas (2,00 mm) dos Protótipos B-SE, B-CE, B-E1, para cargas de 17 kN.....	94
Figura 4.42 – Deformadas das vigas (2,25 mm) dos Protótipos C-SE, C-CE, C-E1, para cargas de 15 kN.....	94

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 – Nomenclatura, dimensões e modelos avaliados por Moraes (2003)	17
Tabela 2.2 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios dos Protótipos PCP1V1.....	19
Tabela 2.3 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios dos Protótipos PEP2V1V2...	19
Tabela 2.4 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios dos Protótipos PCP1Vc1	19
Tabela 2.5 – Nomenclatura, dimensões e taxa de armadura avaliados por Cabral (2004)	23
Tabela 2.6 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios dos Protótipos A, B e C.....	24

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 – Resultados obtidos da caracterização do aço utilizado nas vigas e colunas dos protótipos.....	37
Tabela 3.2 – Resultados obtidos da caracterização do aço utilizado nos enrijecedores de alma da coluna dos Protótipos B-CE e C-CE	38
Tabela 3.3 – Localização e posicionamento dos extensômetros – Protótipo B-SE.....	48
Tabela 3.4 – Localização e posicionamento dos extensômetros – Protótipo C-SE.....	50
Tabela 3.5 – Localização e posicionamento dos extensômetros – Protótipos B-CE e C- CE	52

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 – Efeitos observados em cada ensaio.....	89
Tabela 4.2 – Principais resultados obtidos nos ensaios	90
Tabela 4.3 – Quadro de resultados obtidos nos ensaios do presente trabalho e de Moraes (2003)	91
Tabela 4.4 – Quadro comparativo dos resultados obtidos dos ensaios do presente trabalho e de Cabral (2004)	92

1. INTRODUÇÃO

Um dos mais antigos e graves problemas sociais do Brasil é o déficit habitacional. De acordo com a pesquisa da Fundação Getúlio Vargas, o déficit somou, em 2004, 7,890 milhões de moradias, que correspondem a 15,2% do total de domicílios no país. (PNAD, 2004, IBGE. Elaboração: GVconsult, fev.2006).

A relação entre a falta de moradia e renda é mais que intuitiva, é corroborada pelas estatísticas. A pesquisa revelou que 33% das moradias inadequadas estão na faixa de até 3 salários mínimos e 92% na faixa até 5 salários. (PNAD, 2004, IBGE. Elaboração: GVconsult, fev.2006).

Os números impressionam, sem dúvida, e conhecidos o tamanho, a composição e as características do déficit habitacional brasileiro, aparece naturalmente uma pergunta inevitável: quais as estratégias para reduzir a carência de moradias?

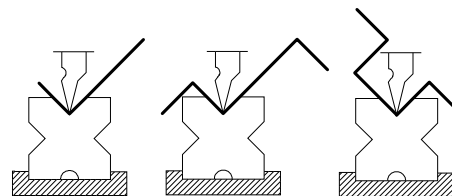
Em primeiro lugar, deve-se lembrar que o perfil das famílias que compõem o déficit habitacional são pessoas com baixo poder aquisitivo, então uma das alternativas que surgem, para combater essa carência, são os sistemas construtivos industrializados de baixo custo e rápida execução e, uma de suas vertentes são os sistemas que utilizam as estruturas metálicas em suas concepções.

Dentro desse campo, construção metálica, estão as estruturas constituídas em perfis de aço formados a frio, também conhecidos por perfis leves, ou ainda perfis de chapa dobrada, que mobilizam grande versatilidade, e podem ser usados eficazmente em muitas aplicações onde a utilização de perfis de aço laminados ou soldados não é econômica.

Estes perfis são obtidos por dobramento em temperatura ambiente de chapas de aço, cujas operações de conformação podem ser realizadas por dois processos distintos de fabricação: descontínuo, com a utilização de prensa dobradeira/viradeira, ou contínuo, através de perfiladeiras. As Figuras 1.1 e 1.2, ilustram os equipamentos e seqüências de cada processo.



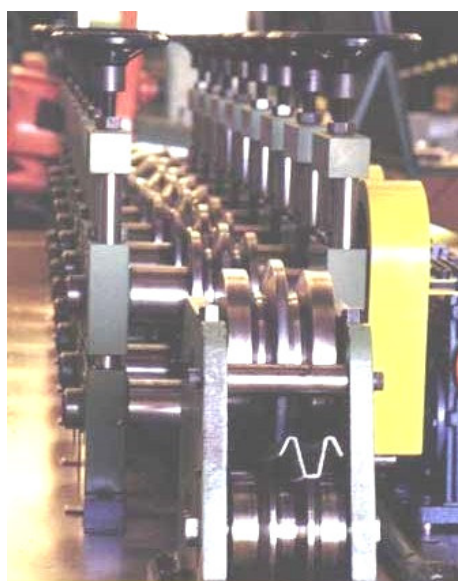
(a)



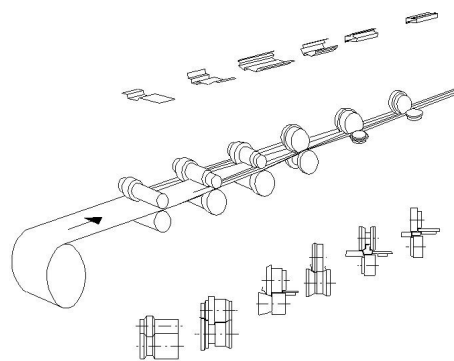
(b)

Figura 1.1 – Equipamento utilizado no processo descontínuo de fabricação dos perfis formados a frio: (a) prensa dobradeira; (b) sequência de fabricação do perfil.

Fonte: <<http://www.empremaq.com.br/530.jpg>> acessado 26/07/2006.



(a)



(b)

Figura 1.2 – Equipamento utilizado no processo contínuo de fabricação dos perfis formados a frio: (a) perfiladeira; (b) sequência de fabricação do perfil.

Fonte: (Rezende, 2005).

O processo de fabricação permite a flexibilidade geométrica, assim é possível obter uma grande variedade das formas de seções transversais, as quais podem ter dimensões peculiares calculadas em projeto, ou padronizadas com dimensões pré-estabelecidas por norma – NBR 6355:2003.

São conformadas chapas ou tiras com espessuras a partir de 0,4 mm, tendo como limite estabelecido por norma, NBR 14762:2001, até 8 mm, embora se possa ter perfis formados a frio com até 19 mm, desde que o equipamento disponível para executar as dobras sejam apropriados para tal.

O uso de perfis de paredes finas agrega em estruturas muito leves se comparadas com outras alternativas estruturais. Em geral apresentam uma maior relação inércia/peso que os laminados, resultando em menor consumo de material, reduzindo o custo final do produto. Suas vantagens em relação às estruturas compostas por outros materiais, podem ser assim resumidas:

- Economia, elegância e leveza;
- Variabilidade de seções transversais;
- Facilidade de produção em série;
- Disponibilidade no mercado para pequenas e elevadas quantidades;
- Forma e dimensionamento adequados à solicitação;
- Maior possibilidade de otimização de projetos;
- Baixo custo do equipamento de fabricação;
- Facilidade de transporte e montagem;
- Qualidade uniforme.

Segundo Yu (2000), o uso de perfis formados a frio na construção começou por volta de 1850 nos Estados Unidos e Inglaterra simultaneamente. Todavia, tais perfis não encontraram ampla utilização até 1940. Em 1946, as publicações das primeiras especificações para projetos pelo American Iron and Steel Institute (AISI) aceleraram a utilização e o desenvolvimento dos perfis leves. Ressalta-se que essa norma foi baseada nos estudos realizados na Universidade de Cornell desde 1939, com patrocínio do AISI e sob a direção do Professor George Winter.

No Brasil, o emprego desses perfis iniciou-se praticamente no final da década

de 60, quando algumas empresas adquiriram equipamentos específicos para a realização de operações de dobramentos a frio (Malite et al,1998), tendo uma divulgação maior a partir da publicação da norma NBR 14762:2001.

As aplicações dos perfis formados a frio são bastante amplas, sendo utilizados na indústria da construção civil, como material de vedação ou estruturalmente, podendo-se citar como aplicações mais comuns:

- Painéis de fechamento e telhas;
- Sistemas de armazenagem industriais: prateleiras, *racks* e mezaninos;
- Coberturas: estruturas espaciais, treliças e terças;
- Habitações e ampliação de edificações existentes: *steel-frames*, *dry wall*;
- Agroindústria: máquinas e implementos agrícolas, silos;
- Construção Civil em geral: construções residenciais, comerciais e industriais, torres de transmissão, reservatórios, estruturas de pontes, formas para concreto, estruturas mistas (lajes, vigas e colunas).

As seções transversais podem ser do tipo perfil, ou do tipo painel. As do tipo perfil incluem seções abertas, fechadas e compostas. As Figuras 1.3 e 1.4 apresentadas a seguir, ilustram respectivamente algumas das seções transversais usuais em perfis formados a frio.

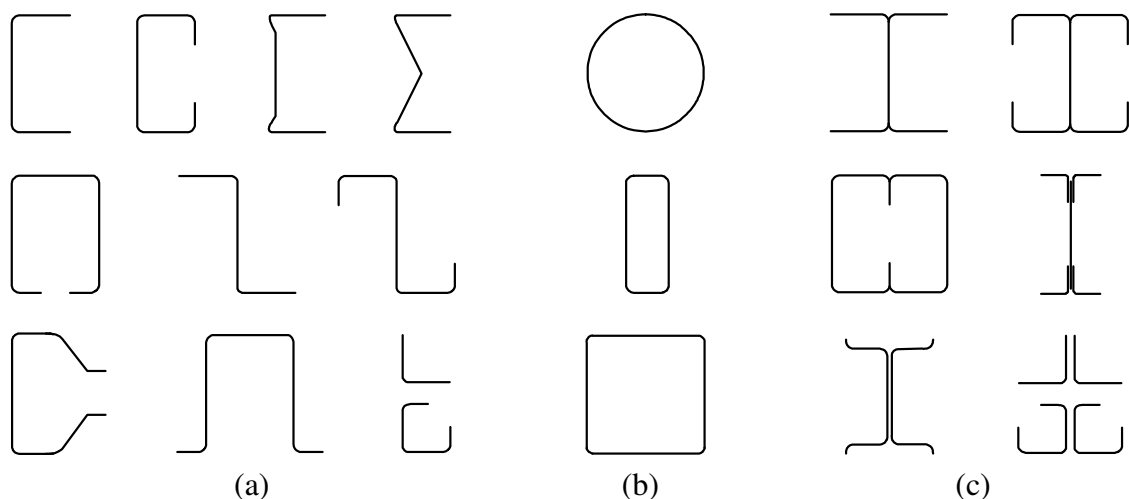


Figura 1.3 – Seções transversais usuais do tipo perfil:

(a) seção aberta; (b) seção fechada; (c) seção composta.

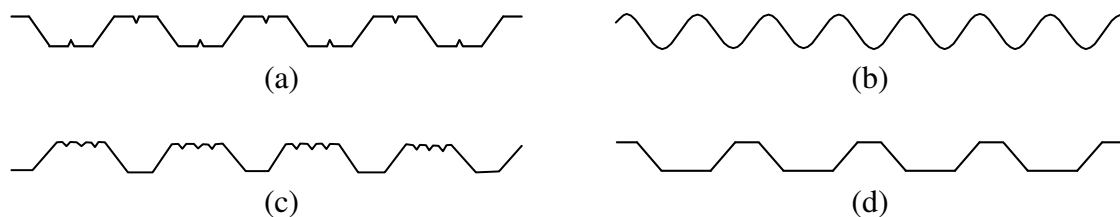


Figura 1.4 – Seções transversais usuais do tipo painel:

(a) steel deck; (b) telha; (c) chapa corrugada; (d) painel nervurado.

Uma expansão vem ocorrendo nas últimas décadas em relação ao uso dos perfis formados a frio em vigas e colunas pertencentes a pórticos principais e secundários de edificações de pequeno porte, devido à redução do custo final do produto. Entretanto para compatibilizar economia, leveza e flexibilidade de montagem, a otimização da edificação, do ponto de vista estrutural, envolve a sua concepção e, principalmente, o tipo de ligação, ou seja, um projeto possivelmente mais econômico, engloba um estudo mais profundo do comportamento das ligações, além da influência das mesmas no comportamento geral das estruturas.

As ligações entre elementos estruturais constituídos por perfis leves podem ser soldadas ou parafusadas e, na maioria das vezes, são executadas no campo, sendo usual o emprego das soldas para união de seus membros que, apesar de serem eficientes, estão sujeitas a execução de baixa confiabilidade. Por outro lado, as ligações parafusadas apresentam maior garantia de qualidade associada à rapidez de execução.

As ligações entre elementos de estruturas de aço podem ser classificadas como rígidas, flexíveis e semi-rígidas, em função do grau de rigidez que as mesmas apresentam. Comumente as ligações parafusadas são semi-rígidas, e para que esta semi-rigidez seja utilizada em um projeto, faz-se necessário à determinação do seu nível de engastamento. Diversos pesquisadores realizaram trabalhos experimentais e teóricos visando à determinação da real rigidez de ligações típicas entre elementos estruturais (Sommer, 1969; Frye e Morris, 1975; Richard-Abbott, 1975; Jones et al., 1980; Colson e Louveau, 1983; Ang e Morris, 1984; Chen e Lui, 1985; Yee e Melchers, 1986; Kishi e Chen, 1987a, b; Chan, 1994; Chan e Chui, 2000; Lee e Moon, 2002; entre outros). No entanto a grande maioria das pesquisas utilizaram perfis do tipo soldado e laminado nas suas composições.

Também é possível classificar as ligações segundo a sua resistência. Assim uma ligação será de resistência total caso o momento resistente da mesma for igual ou maior que o momento resistente dos membros conectados (vigas). Caso contrário, a ligação será dita de resistência parcial.

Devido ao grau de complexidade do cálculo de ligações semi-rígidas, pesquisas de caráter experimental, numérico e analítico vêm sendo desenvolvidas ao estudo dessa semi-rigidez envolvendo os perfis formados a frio, porém existe em número muito reduzido quando se compara aos tradicionais perfis laminados ou soldados. A seguir tem-se uma síntese dos principais trabalhos na área tendo como enfoque programas experimentais.

Tan e Rhodes (1994) realizaram uma investigação experimental em ligações parafusadas viga-coluna no qual todos elementos eram constituídos de perfis formados a frio. A configuração básica era composta por vigas e colunas de seções transversais tipo "U" simples, assim foram ensaiados 20 protótipos os quais variaram as espessuras das vigas, colunas e conectores. O objetivo do trabalho foi desenvolver um modelo matemático aproximado que traduzisse o comportamento da curva momento x rotação, o qual apresentou resultados bastante precisos.

Chung e Lau (1999) realizaram uma investigação experimental em ligações parafusadas em bases de colunas e em ligações parafusadas viga-coluna. As vigas e as colunas eram em perfis I enrijecido compostos por dois perfis U enrijecidos unidos pelas almas por meio de parafusos e nas ligações utilizavam-se as chapas de gusset. Os ensaios tinham como objetivo determinar os modos de colapso, as rigidezes e momentos resistentes das ligações em estudo. Assim concluíram que as ligações ensaiadas são viáveis e, com a utilização de suas rigidezes, os projetos podem se tornar mais econômicos.

Tan (2000) realizou um trabalho experimental semelhante a Rhodes (1994) envolvendo ligações parafusadas viga-coluna em perfis formados a frio, onde as seções transversais das vigas e colunas eram tipo "U" enrijecido, entretanto, nesse caso, os protótipos simulavam pórticos simétricos de dois pavimentos, com a finalidade de verificar a exatidão e a validade da análise. O comportamento semi-rígido da ligação foi modelado e desenvolvido um modelo matemático que representasse a rigidez da conexão ou o comportamento da curva momento-rotação.

Chung e Lawson (2000) realizaram uma investigação experimental que conteve 24 ensaios em quatro diferentes configurações de ligações. Essas eram compostas por cantoneiras parafusadas nas vigas e nas colunas, formando ligações viga-viga e viga-coluna e os perfis da viga e da coluna eram em chapa dobrada de seção tipo "U" enrijecido. Foi observado o comportamento dessas ligações e estabelecidos os modos de colapso, dessa forma concluíram que as ligações ensaiadas foram resistentes somente aos esforços de cisalhamento. Assim foram formulados um conjunto de preceitos em concordância com as prescrições da BS5950 parte 5 e Eurocode parte 1.3, calibrados pelos resultados experimentais.

Wong e Chung (2002) realizaram uma análise experimental em ligações parafusadas entre perfis formados a frio, envolvendo diferentes configurações, com o propósito de determinar o momento resistente, a rigidez e avaliar os modos de colapso. Assim ratificaram, mais uma vez, que a utilização dessas ligações envolvendo perfis leves e suas respectivas rigidezes podem ser utilizadas com segurança num projeto estrutural.

Gonzaga (2003) realizou oito ensaios de ligações, divididos em 2 grupos, um parafusado e outro soldado. As vigas e as colunas de todos os modelos ensaiados, eram constituídas de perfis em chapa dobrada, respectivamente, por seções caixa e "I" enrijecido. Foi avaliado o comportamento e a resistência dessas ligações, e com os resultados colhidos, feita uma analogia com modelagens analíticas propostas para perfis laminados e soldados, de modo a adequá-las para os perfis formados a frio. Obteve-se resultados satisfatórios, porém necessitam de ajustes devido às características próprias.

Morais (2003) desenvolveu estudos teórico-experimentais para avaliar o comportamento de ligações viga-coluna parafusadas utilizando seções transversais em perfis formados a frio. A investigação experimental, constituída por 8 ensaios, em 3 configurações de protótipos, envolveu ligações em escala real, a fim de se determinar as curvas momento-rotação e, por consequência, as rigidezes das mesmas. Também foram observados os momentos últimos, os modos de colapso, os campos de deslocamentos e deformações dos protótipos ensaiados. Em vista do presente trabalho envolver a mesma tipologia de ligação desenvolvida por Moraes, no capítulo seguinte tem-se um resumo com as principais conclusões e resultados desse trabalho.

Chung et al (2005) realizaram 16 ensaios em ligações viga-coluna, partilhados em ligações internas (modelo cruciforme) e externas (modelo "T"), simulando subestruturas em pórticos planos, submetidos a carregamentos laterais. As vigas como as colunas eram compostas por dois perfis em chapa dobradas de seção "U" enrijecido ligados pelas almas e a união entre as vigas e a coluna foram feitas através de chapas de gusset presas com parafusos. Assim apresentaram fórmulas semi-empíricas de cálculo das rigidezes das ligações parafusadas calibradas a partir de dados experimentais.

Existem poucos estudos envolvendo a sinergia das ligações mistas em perfis formados a frio, embora há algum tempo trabalhos relacionados a ligações mistas em perfis laminados ou soldados vêm sendo desenvolvidos.

Xião et al (1994) fizeram 20 ensaios experimentais em duas configurações de modelos: modelo cruciforme (duas vigas conectadas na coluna – coluna interna) e a outra modelo "T" (apenas uma viga conectada na coluna – coluna de canto). O objetivo dos ensaios foi avaliar a resistência, a rigidez e a ductilidade das ligações. Diferentes tipologias foram ensaiadas e os detalhes foram variados: taxa de armadura, relação cortante-momento e enrijecedores de alma na coluna. Os autores concluíram que a taxa de armadura tem influência direta na resistência da ligação; que ligações mistas em colunas de canto são de baixa eficiência e não devem ser consideradas como mistas e também que a presença de enrijecedores na alma da coluna aumenta a rigidez e a resistência da ligação e o mecanismo de colapso muda.

Anderson et al (1994) realizaram um programa experimental no qual os seis protótipos ensaiados foram em modelos cruciformes. Cinco ensaios constituíram em ligações mistas e, para efeito de comparação, foi executado um ensaio em ligação simples (sem laje). Os parâmetros avaliados foram as tipologias das ligações (chapa de topo estendida e não estendida), a altura das vigas e as taxas de armaduras. Concluíram que o aumento da taxa de armadura proporciona ganhos e resistência e capacidade rotacional, observaram também que o aumento da altura da viga resulta em ganhos de rigidez e perdas na capacidade de rotação.

Li et al (1996) realizaram seis ensaios experimentais envolvendo ligações mistas e um ensaio em ligação simples para fins comparativos. Os modelos ensaiados eram modelos cruciformes com trechos de vigas parafusados na coluna, e a mesma presa nas extremidades. Os parâmetros investigados foram o carregamento assimétrico (momento

não balanceado) e a relação cortante-momento no comportamento dessas ligações. Concluíram que a força cortante pouco influenciou a ligação em estudo, exceto quando ela é muito maior que a resistência à força cortante na alma da viga, e que o efeito dos momentos não equilibrados na resistência da ligação só é significativo quando a solicitação na armadura de concreto for maior que a resistência à força cortante da coluna ou que a resistência ao contato entre a laje de concreto e a face da coluna.

Nethercot et al (1996) efetuaram um programa experimental no qual ensaiaram uma estrutura tridimensional de dois pavimentos em escala real, com o objetivo de investigar a influência da semi-rigidez na ligação em vários níveis de carregamento, fornecer dados experimentais a fim de que métodos analíticos e numéricos possam ser validados, comparar o comportamento da ligações da estrutura tridimensional com o comportamento de ligações ensaiadas isoladamente, avaliar o grau de conservadorismo nos métodos de projetos oriundos das normas e fornecer dados experimentais do comportamento da viga-mista incluindo o desempenho dos conectores de cisalhamento. Os modos de colapso observados foram a flambagem local dos flanges adjacentes às colunas, o esmagamento da laje na região próxima as colunas quando submetida a elevados momentos não simétricos e o colapso local das colunas.

Liew et al (2000) realizaram seis ensaios envolvendo ligações mistas viga-coluna em escala real. As ligações em aço consistiam de chapas de topo soldadas nas vigas e parafusadas (4 furos) nos flanges da coluna. As seções das vigas e espessuras da laje foram idênticas em todos os ensaios. Porém três tipos de colunas foram usadas: coluna somente em aço, coluna em aço parcialmente revestida de concreto e coluna em aço totalmente revestida por concreto. Outros parâmetros também foram investigados: taxa de armadura e a inclusão dos enrijecedores de alma na região da ligação. Concluíram que a rigidez inicial da ligação e a resistência à fissuração do concreto aumentam significativamente com o aumento da taxa de armadura, mas que o aumento dessa taxa não conduz necessariamente a um aumento na capacidade de rotação. Observaram ainda que a ausência dos enrijecedores de alma na coluna pode causar a falha prematura da mesma.

David (2003) realizou dez ensaios experimentais envolvendo conectores de cisalhamento do tipo U formado a frio e quatro ensaios em vigas mistas também em perfis formados a frio, com laje maciça ou treliçada. Os parâmetros investigados nos

conectores foram a geometria e a resistência do concreto, e os ensaios foram de cisalhamento direto. Os resultados mostraram que o parâmetro que mais influenciou na interface concreto – viga foi a espessura do conector, seguido da altura do mesmo e pela resistência do concreto. O tipo de laje não afetou a resistência das vigas, visto que nos ensaios, a linha neutra posicionou-se na capa de concreto.

Cabral (2004) realizou um programa experimental composto de cinco ensaios em três diferentes configurações de ligações mistas, envolvendo os perfis formados a frio, com tipologia de ligações similares as de Morais (2003), assim foram determinados as respectivas curvas-momento-rotação, e rigidezes. Os resultados experimentais foram confrontados com os resultados obtidos de Morais, concluindo que a mesma estrutura analisada (Projeto USIHAB) quando se considera a configuração mista, apresentou uma redução de peso em aço na ordem de 8,63%. Analogamente ao trabalho de Morais, e tendo em vista o presente trabalho desenvolver estudos da mesma tipologia de ligação, no capítulo seguinte tem-se um resumo com as principais conclusões e resultados desse trabalho.

Figueiredo (2004) elaborou um programa experimental de caráter exploratório, envolvendo ligações mistas com chapa de topo estendida, foram ensaiados 4 configurações de protótipos, simulando colunas internas e de canto. A configuração básica de todos os modelos eram os perfis soldados para as vigas e colunas enrijecidas com chapas de 8 mm nas alturas correspondentes às mesas superior e inferior das vigas e taxa de armadura fixada em 1%. Os resultados experimentais foram comparados com os resultados da análise numérica e com os valores obtidos a partir do modelo analítico.

Fu e Lan (2005) efetuaram oito ensaios experimentais envolvendo a tipologia mista de ligação, tendo como variáveis o espaçamento dos conectores de cisalhamento, as taxas de armaduras longitudinais, e a espessura da laje, que foi composta por placas de concreto ocas pré-fabricadas onde posteriormente adiciona-se uma capa em concreto sobre a mesma. Baseado nos dados experimentais, um método simplificado para prever a rotação e a capacidade do momento para esse tipo de ligação foi proposto apresentando resultados satisfatórios.

Assim, pode-se constatar que os trabalhos mencionados acima visaram a determinação do comportamento de ligações parafusadas, mistas ou convencionais, no

que se refere as rigidezes rotacionais das mesmas. Simultaneamente a essa determinação foram analisados os momentos últimos, os mecanismos de colapso, os campos de deslocamentos, e comparações com resultados numéricos, via método dos elementos finitos, e procedimentos normativos de dimensionamento.

O presente trabalho é uma continuidade das dissertações de Mestrado desenvolvidas por Cassius Soares Morais (2003) e Juliano Bastos Cabral (2004) ambos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PROPEC/EM/UFOP, e teve como objetivo determinar, através de estudos teórico-experimentais, o comportamento de ligações viga-coluna parafusadas, em perfis formados a frio, incluindo a presença de enrijecedores de alma soldados nos flanges da coluna, no sentido de avaliar a influência e o acréscimo de rigidez referentes a tais enrijecedores.

Foi desenvolvido um programa experimental das ligações tipo em escala real, que seguiu procedimentos já estabelecidos em pesquisas anteriores, assim obteve-se as curvas momento x rotação das ligações e, por consequência as rigidezes das mesmas. Neste âmbito também foram determinados os momentos últimos, os modos de colapso, os campos de deslocamento e os campos de deformação dos protótipos ensaiados.

Neste capítulo introdutório foi mencionado os sistemas construtivos industrializados como uma das alternativas para se amenizar o problema habitacional no Brasil, apresentando as vantagens de se utilizar os perfis formados a frio em tal sistema e, expondo em seguida um breve histórico e a importância da ligação no contexto estrutural e por fim algumas pesquisas referentes a essa área e uma breve apresentação do tema.

O Capítulo 2 é dedicado à apresentação e resultados dos trabalhos desenvolvidos por Morais (2003) e Cabral (2004), que envolveram estudos teórico-experimentais da tipologia de ligação em estudo. Neste mesmo capítulo é apresentada, também, uma breve descrição dos tipos de ligações quanto a sua rigidez e alguns métodos para a determinação desta rigidez através das curvas momento-rotação das mesmas.

No Capítulo 3 é descrito o programa experimental realizado. São apresentados as características geométricas das ligações, materiais utilizados, esquema de montagem, instrumentação e metodologia de ensaio para todos protótipos ensaiados neste trabalho.

No Capítulo 4 são apresentados, analisados e interpretados os principais resultados referentes ao programa experimental. Posteriormente, para esta mesma

tipologia de ligação, é feita a comparação de resultados do presente trabalho com os resultados de Moraes e Cabral.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões e considerações finais do estudo, assim como sugestões para trabalhos futuros.

Em relação aos anexos, no Anexo I têm-se as plantas arquitetônicas e estruturais do Projeto USIHAB, que deram origem à tipologia de ligação em estudo. No Anexo II são apresentadas as memórias de cálculo das ligações viga-coluna estudadas e no Anexo III tem-se um resumo, em forma de planilhas, com as leituras dos protótipos ensaiados neste presente trabalho.

2. TIPOLOGIA DAS LIGAÇÕES EM ESTUDO

2.1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho procurou estender o estudo e a avaliação do comportamento de ligações viga-coluna parafusadas, utilizando seções transversais em perfis de aço formados a frio de paredes finas, a partir da tipologia de ligação desenvolvida por Moraes (2003), que agrega condicionantes construtivos e de montagem de estruturas em aço.

Neste capítulo apresenta-se uma síntese dos trabalhos desenvolvidos por Moraes (2003) e Cabral (2004), que envolveram estudos teórico-experimentais da tipologia de ligação em estudo. Em seguida, com os dados experimentais dos mesmos, foi desenvolvido, no presente trabalho, um novo cálculo para a determinação das rigidezes, considerando os deslocamentos nos diversos pontos monitorados das vigas, em vez de assinalar somente um ponto isolado. Finalizando o capítulo, faz-se uma breve apresentação dos tipos de ligações viga-coluna e de métodos para a determinação das rigidezes destas através da curva momento-rotação.

As ligações desenvolvidas são destinadas a conectar vigas de seção "caixa" com colunas de seção "I enrijecido" e foram baseadas numa edificação de quatro pavimentos, projetada para utilização de perfis formados a frio (Anexo I – Projeto USIHAB, 2001).

A investigação experimental foi realizada no Laboratório de Estruturas do PROPEC/EM/UFOP e consistia em ensaios utilizando perfis em dimensões reais. Os protótipos, juntamente com os acessórios de montagem foram fabricados pela empresa Pórtico S.A.

A geometria da coluna e das vigas utilizadas nas tipologias de Moraes e Cabral, são ilustradas na Figura 2.1.

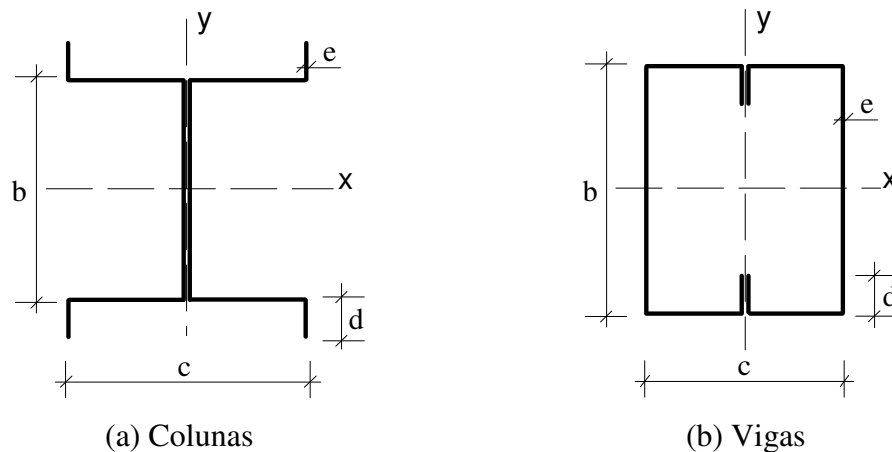


Figura 2.1 – Seções transversais utilizadas (mm):
(a) seção transversal das colunas; (b) seção transversal das vigas.

A seção transversal utilizada para as colunas é composta pela associação de dois perfis do tipo "cartola", unidos pelas almas, através de solda intermitente, ao longo do seu comprimento, (Figura 2.1a). Para as vigas, a seção transversal é formada pela união de dois perfis do tipo "U enrijecido" unidos por seus enrijecedores, da mesma forma que as colunas, (Figura 2.1b).

A análise estrutural e o dimensionamento desse projeto foram realizados, respectivamente, através dos softwares comerciais ANSYS (Ansys, 2001) e CFS (CFS, 2000), que é baseado nas prescrições da norma americana AISI (1996). Posteriormente, uma ligação padrão foi projetada e dimensionada para todos os protótipos, através das prescrições da norma americana AISI (1996) e das normas brasileiras NBR 14762:2001 e NBR 8800:1986, definindo-se os protótipos de ensaio.

2.2. LIGAÇÃO PADRÃO – MORAIS (2003)

A investigação realizada por Morais (2003) consistiu na realização de oito ensaios experimentais em três tipos de protótipos. Dois deles tiveram apenas um trecho de viga conectada à coluna, simulando uma coluna de canto sendo chamados de modelo "T" (forma de "T"). O outro foi composto por dois trechos de vigas conectados em cada

lado da coluna, representando uma coluna interna do pórtico e chamado de modelo cruciforme.

Embora o Projeto USIHAB defina laje maciça em concreto armado, a tipologia de Moraes não se beneficiou dessa disposição mista. A Figura 2.2 apresenta o esquema geral dos modelos ensaiados.

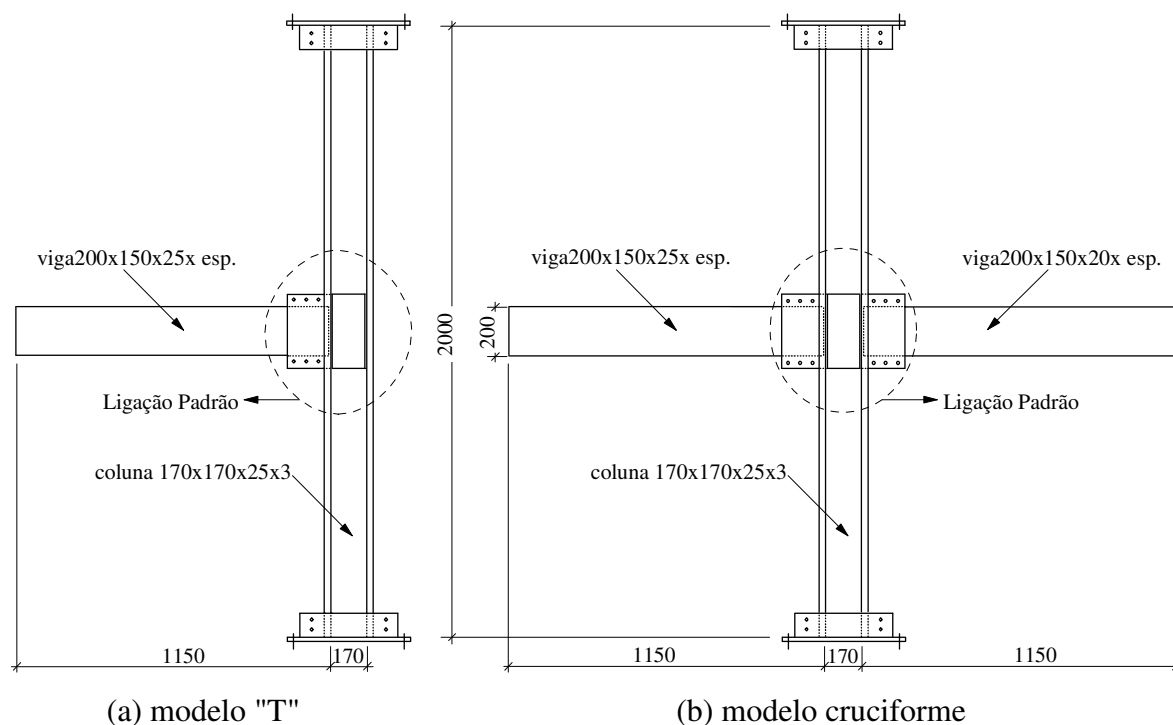
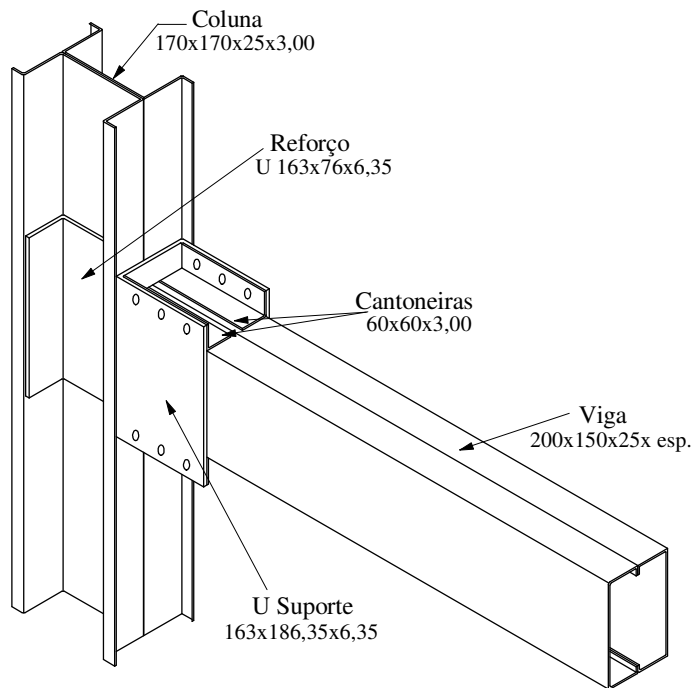
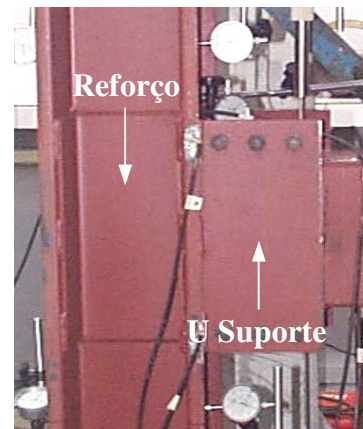


Figura 2.2 – Esquema dos modelos ensaiados.

A ligação padrão de Moraes (2003), apresentada na Figura 2.3, é composta por um "U Suporte" que é soldado no flange da coluna e em seus enrijecedores, em detalhe na foto da Figura 2.3b. O U suporte recebe uma furação nas partes superior e inferior de seus flanges, é utilizado para a conexão da viga através de Cantoneiras de Ligação soldadas a mesma. Outros componentes de ligação são os reforços internos em forma de "U" simples, Figura 2.3b, que são soldados na alma e nos flanges da coluna.



(a) vista geral



(b) detalhe da ligação padrão
Morais (2003)

Figura 2.3 – Ligação padrão de Morais.

A identificação dos componentes da ligação padrão utilizados em todos os protótipos, bem como as dimensões dos mesmos, exceto das vigas que variam de espessuras em função dos protótipos, são apresentados na Figura 2.4.

Os parafusos utilizados são ASTM A-325 de diâmetro 12,50 mm e a solda é do tipo filete com eletrodos revestidos da classe E60XX, de acordo com a AWS D1.1:2000.

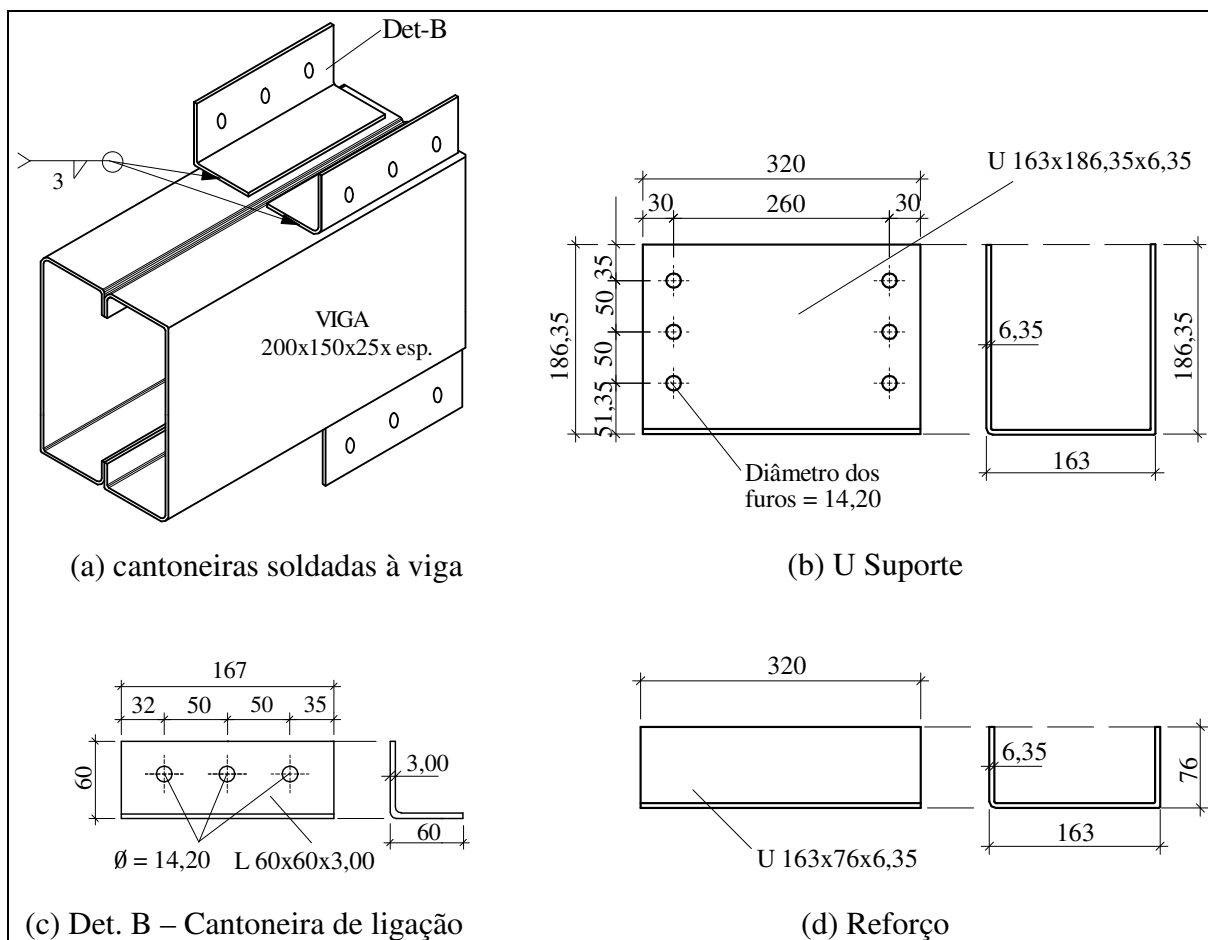


Figura 2.4 – Detalhe das dimensões dos componentes dos protótipos (mm).

Conforme já abordado anteriormente, os protótipos foram divididos em dois grupos. O primeiro incluiu as colunas de canto, (modelo "T"), com dois tipos de protótipos, e o segundo as colunas de extremidade, (modelo cruciforme) composto por um tipo de protótipo. A nomenclatura e dimensões dos perfis utilizados nesses modelos de protótipos são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Nomenclatura, dimensões e modelos avaliados por Moraes (2003).

Protótipo	Coluna(b x c x d x e)	Viga (b x c x d x e)	Modelo
PCP1V1	170x170x25x3,00	200x150x25x3,00	modelo "T"
PCP1Vc1	170x170x25x3,00	200x150x20x2,00	modelo "T"
PEP2V1V2	170x170x25x3,00	200x150x20x2,00	cruciforme

Assim, os oito ensaios de Morais (2003) foram divididos em quatro Protótipos tipo PCP1V1, dois Protótipos PCP1Vc1 e dois Protótipos PEP2V1V2.

Como pode ser visto na Tabela 2.1, todos protótipos têm a mesma seção para as colunas, e se diferenciam nas espessuras das vigas e no modelo ensaiado.

A partir dos resultados experimentais dos deslocamentos nos diversos pontos da viga, foi ajustada, através do método dos mínimos quadrados, a deformada da mesma e, em seguida, juntamente com a rotação da coluna, foi obtida a rotação relativa da ligação para as diversas etapas de carga. Com a rotação relativa, para cada passo de carga, foram traçadas as curvas momento-rotação dos protótipos, que são apresentadas na Figura 2.5.

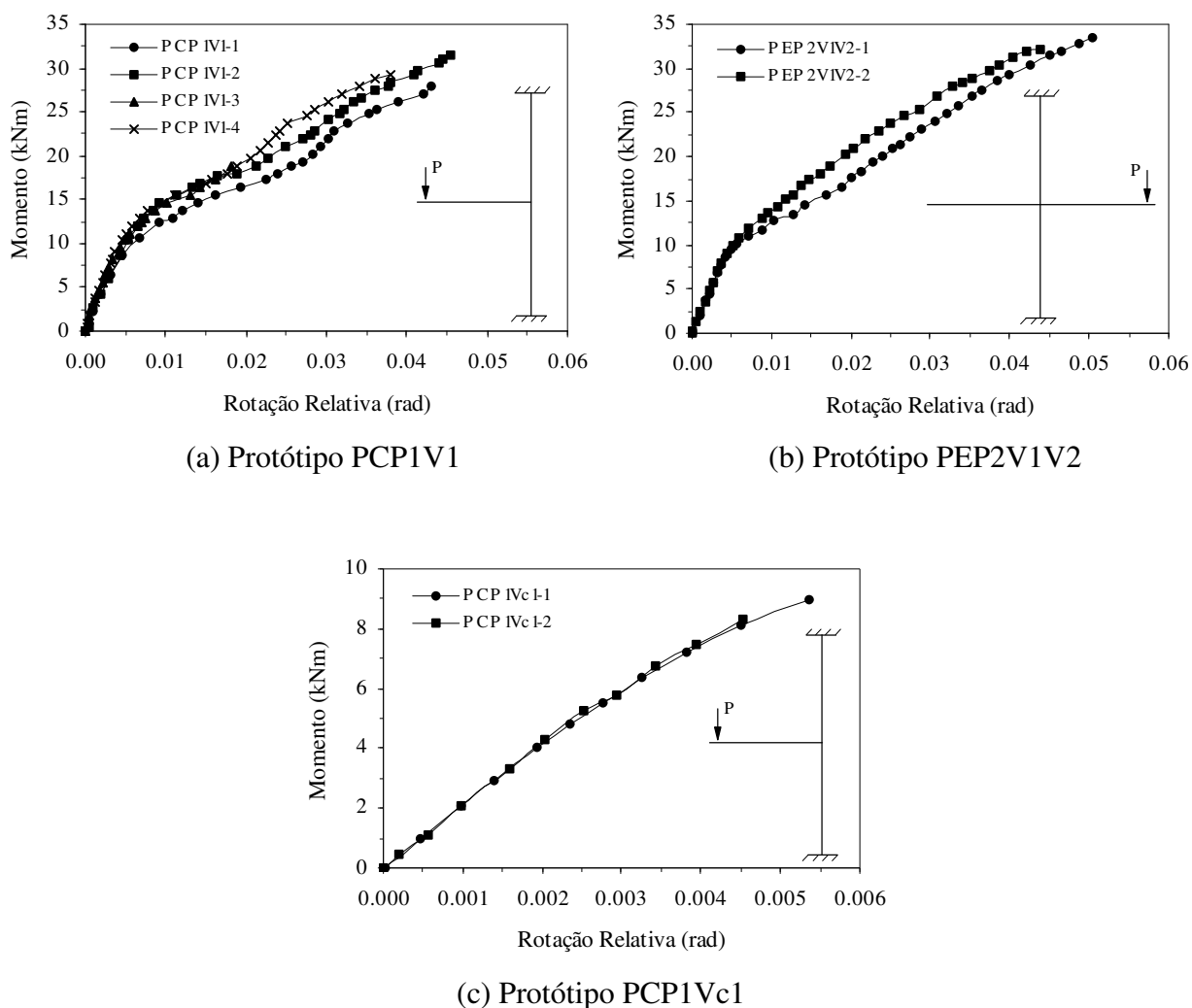


Figura 2.5 – Curvas momento-rotação da ligação dos protótipos de Morais (2003).

O resumo desses resultados está nas Tabelas 2.2, 2.3 e 2.4, onde se têm as cargas última e de colapso, momento de colapso e rigidez inicial para cada protótipo, assim como a rigidez inicial média, K_o (média), obtida pela média aritmética das rigidezes de cada protótipo.

Tabela 2.2 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios dos Protótipos PCP1V1.

Protótipos	Carga última (kN)	Carga de colapso (kN)	Momento de colapso (kNm)	Rigidezes (kNm/rad)	K_o(média) (kNm/rad)
PCP1V1-1	31,204	25,560	22,876	2126	2436
PCP1V1-2	35,046	27,840	24,917	2211	
PCP1V1-3	21,119	-	-	2703	
PCP1V1-4	32,645	29,280	26,206	2705	

Tabela 2.3 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios dos Protótipos PEP2V1V2.

Protótipos	Carga última (kN)	Carga de colapso (kN)	Momento de colapso (kNm)	Rigidezes (kNm/rad)	K_o(média) (kNm/rad)
PEP2V1V2-1	37,437	25,880	23,163	2232	2211
PEP2V1V2-2	35,589	23,420	20,961	2189	

Tabela 2.4 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios dos Protótipos PCP1Vc1.

Protótipos	Carga última (kN)	Carga de colapso (kN)	Momento de colapso (kNm)	Rigidezes (kNm/rad)	K_o(média) (kNm/rad)
PCP1Vc1-1	10,023	-	-	2010	2019
PCP1Vc1-2	9,253	-	-	2027	

Verificou-se que o mecanismo de colapso, caracterizado pelo escoamento dos enrijecedores de borda da coluna, na direção das linhas de parafusos do U Suporte, foi o mesmo para todos os protótipos, exceto para os Protótipos PCP1Vc1, onde o ensaio foi realizado somente na fase elástica do material, em função da sua utilização em série posterior de ensaios.

Observado esse mecanismo de colapso e também a deformação excessiva nos flanges da coluna, na região da ligação, optou-se para fins comparativos, avaliar uma

nova configuração de ligação, com a inclusão de enrijecedores de alma na coluna, de modo a minimizar essa deformação e, além disso, diminuir o nível de tensões nas bordas da coluna, que será objeto de estudo no presente trabalho.

Vale lembrar que no cálculo original da estrutura dessa edificação (Projeto USIHAB), nenhuma consideração foi feita a respeito de semi-rigidez de ligações, mas, uma vez determinadas essas semi-rigidezes no programa experimental, foi então realizada nova análise estrutural e novo dimensionamento.

Maiores detalhes sobre a tipologia de ligação idealizada, programa experimental, análise e dimensionamento estrutural podem ser encontrados na dissertação de Morais (2003).

2.3. LIGAÇÃO PADRÃO – CABRAL (2004)

As ligações investigadas por Cabral (2004) buscaram a otimização da tipologia de ligação desenvolvida por Morais (2003), considerando efeito da laje de concreto, presente no projeto USIHAB, e a ligação passou a ser chamada de ligação mista.

A análise estrutural e dimensionamento desse projeto seguiram os mesmos procedimentos da pesquisa anterior, e as vigas mistas foram calculadas considerando a seção transversal homogeneizada; então as dimensões das seções diminuíram e as chapas ficaram mais finas.

O trabalho experimental consistiu de ensaios em modelos cruciformes de ligações mistas, Figura 2.6. Nenhum protótipo foi formado por ligação de canto (modelo "T"), por não se considerar a rigidez desse tipo de ligação quando se trata de ligação mista.

Foram ensaiados cinco modelos simétricos, tanto na geometria quanto no carregamento, com três tipos de protótipos. As Figuras 2.6 e 2.7 ilustram, respectivamente, o modelo experimental e a perspectiva da ligação.

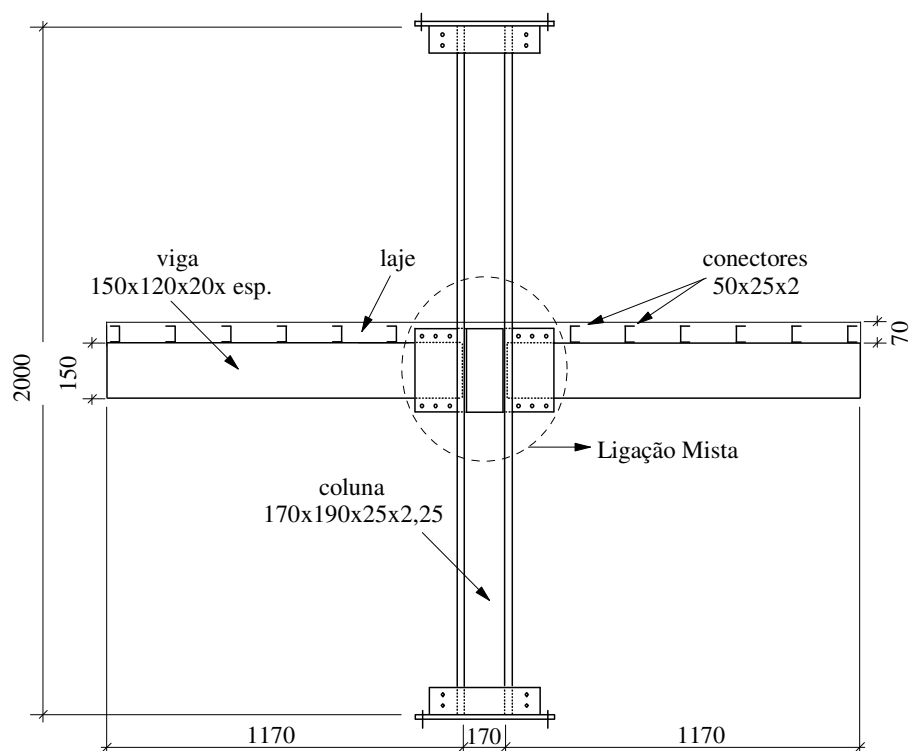


Figura 2.6 – Modelo experimental cruciforme.

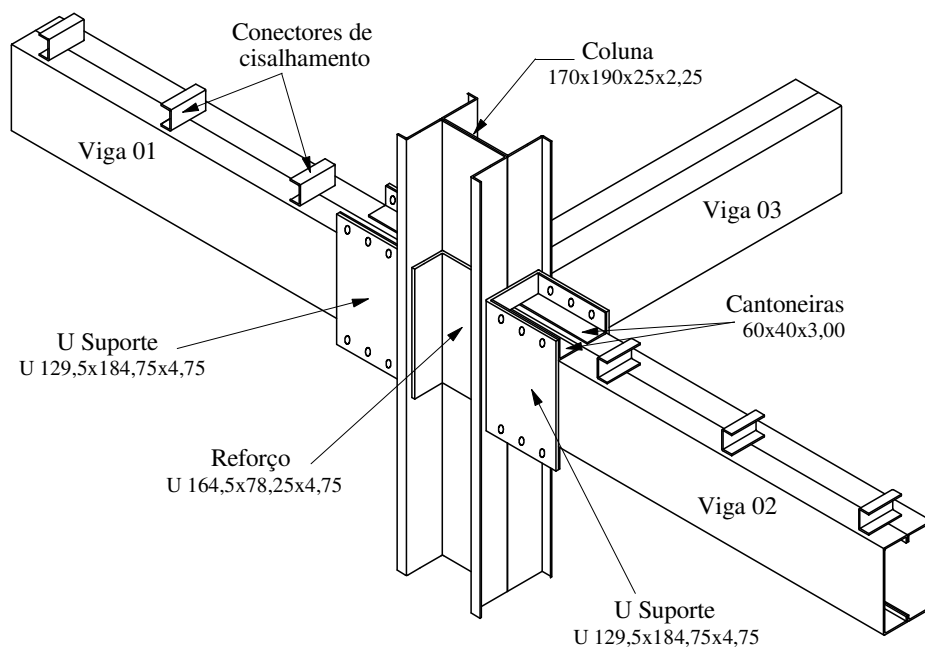


Figura 2.7 – Vista geral da ligação mista.

A coluna representada nas Figuras 2.6 e 2.7 é interna, com duas vigas conectadas através da ligação parafusada proposta. Os parafusos empregados são do tipo ASTM A-325 de diâmetro 12,50 mm. Uma terceira viga é soldada no reforço junto à alma da coluna, sendo a solda realizada na fábrica simulando a construção da edificação em estudo.

Os componentes utilizados na ligação mista de Cabral (U Suporte, Cantoneiras de ligação, e reforço) têm as mesmas formas que os utilizados por Moraes, diferindo somente no menor tamanho e espessura dos mesmos. A identificação e dimensões desses componentes são apresentados na Figura 2.8.

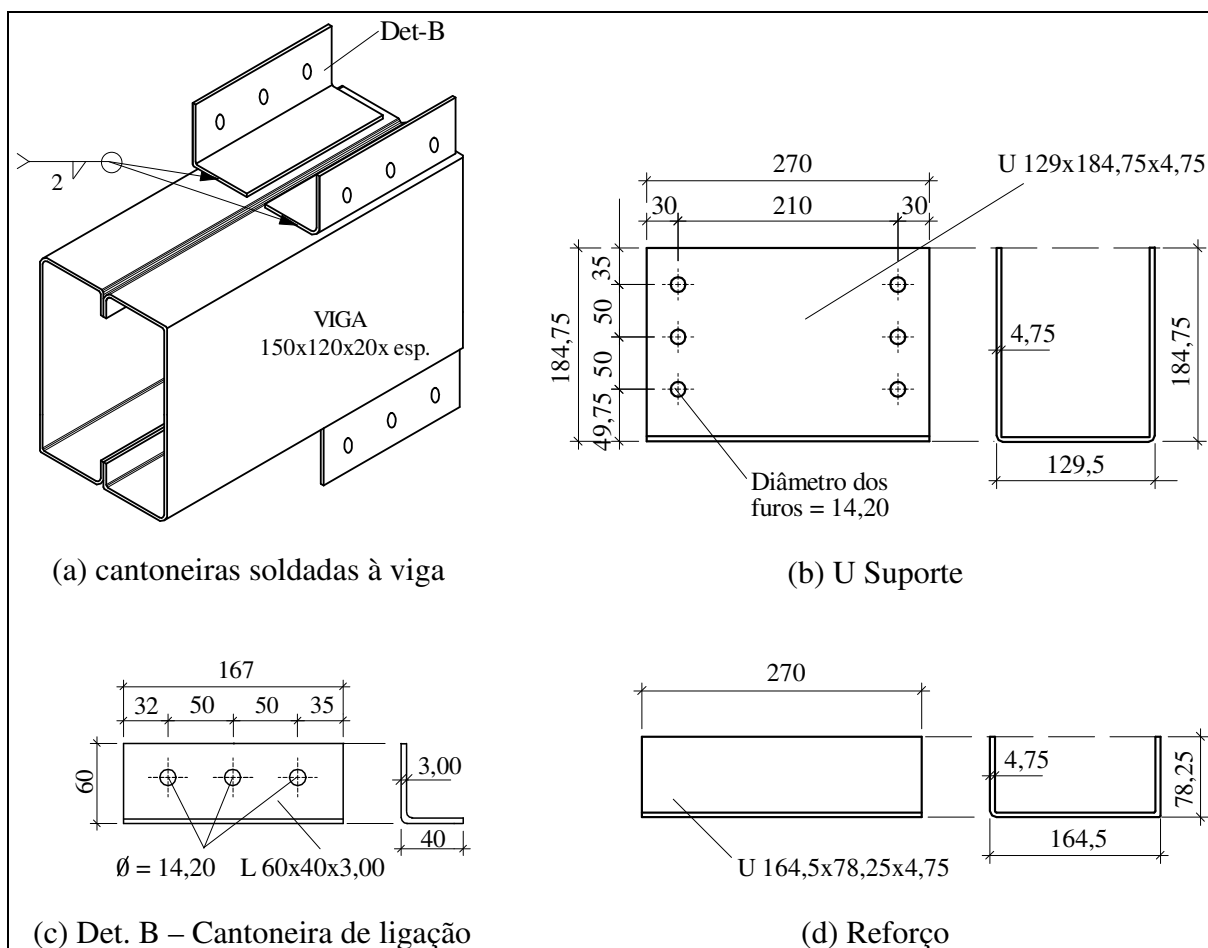


Figura 2.8 – Detalhe das dimensões dos componentes dos protótipos (mm).

A solda realizada para unir os componentes da ligação é do tipo filete com eletrodos revestidos, classe E60XX, de acordo com a AWS D1.1:2000.

Os ensaios foram realizados utilizando perfis em dimensões reais em três configurações de protótipos (A, B e C). A nomenclatura, dimensões dos perfis e taxa de armadura utilizados nesses protótipos são apresentadas na Tabela 2.5.

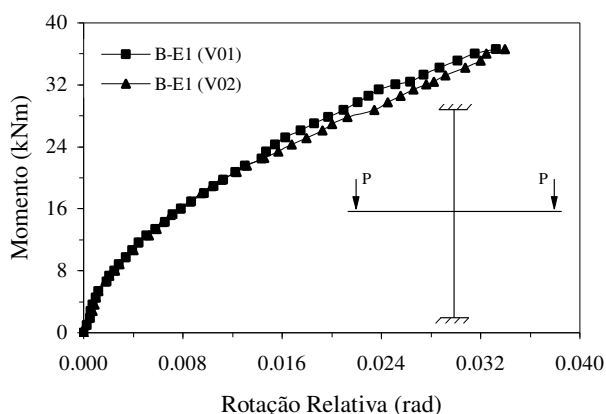
Tabela 2.5 – Nomenclatura, dimensões e taxa de armadura avaliados por Cabral (2004).

Protótipo	Coluna (b x c x d x e)	Viga (b x c x d x e)	Tx. de armadura
A	170x190x25x2,25	150x120x20x2,00	0,27 %
B	170x190x25x2,25	150x120x20x2,00	0,96 %
C	170x190x25x2,25	150x120x20x2,25	0,96 %

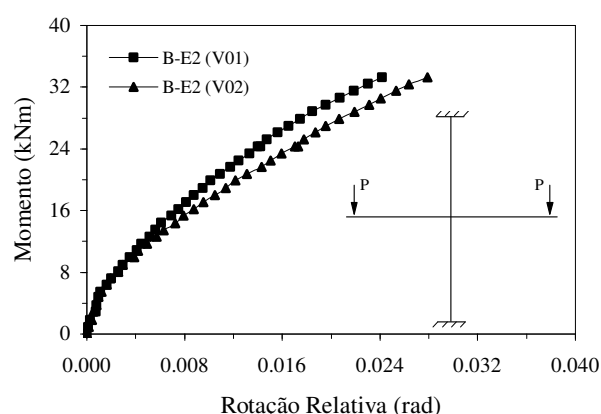
Assim, os cinco ensaios de Cabral (2004) foram divididos em um Protótipo tipo A, dois Protótipos tipo B e dois Protótipos tipo C.

Como pode ser visto na Tabela 2.5, todos protótipos têm a mesma seção para as colunas, e se diferenciam nas espessuras das vigas e taxas de armaduras.

A partir dos resultados experimentais dos deslocamentos nos diversos pontos das vigas, foi ajustada, através de regressão linear, a deformada da mesma e, foi obtida a rotação relativa da ligação para as diversas etapas de carga. Com a rotação relativa, para cada passo de carga, foram traçadas as curvas momento-rotação dos protótipos. Os gráficos das Figuras 2.9 e 2.10 apresentam, respectivamente, as curvas momento-rotação dos Protótipos B e C.

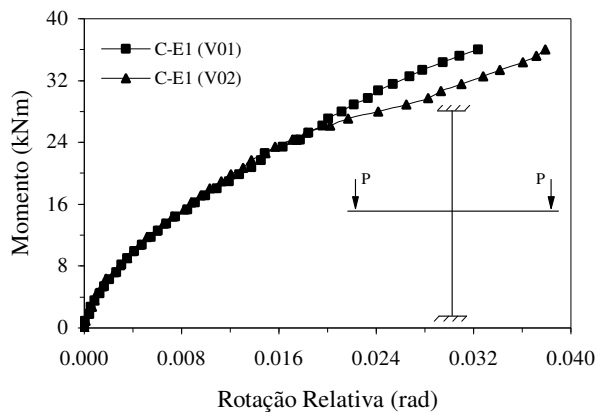


(a) Protótipo B-E1

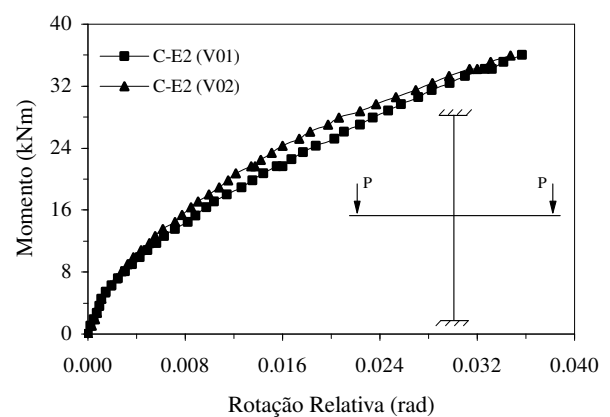


(b) Protótipo B-E2

Figura 2.9 – Curvas momento-rotação das ligações dos Protótipos B.



(a) Protótipo C-E1



(b) Protótipo C-E2

Figura 2.10 – Curvas momento-rotação das ligações dos Protótipos C.

A Tabela 2.6 apresenta os principais resultados dos ensaios realizados. O mecanismo de colapso exibido em todos protótipos foi o escoamento das armaduras negativas da laje.

Tabela 2.6 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios dos Protótipos A, B e C.

Protótipos	Ligação	Carga última (kN)	Carga de colapso (kN)	Momento de colapso (kNm)	Rigidezes (kNm/rad)	K_o (média) (kNm/rad)
A-E1	V01 - Coluna	18,37	15,09	13,66	2666	2948
	V02 - Coluna				3230	
B-E1	V01 - Coluna	40,68	32,84	29,72	4588	4690
	V02 - Coluna				4428	
B-E2	V01 - Coluna	37,00	22,95	20,77	4902	
	V02 - Coluna				4842	
C-E1	V01 - Coluna	40,00	29,90	27,05	3922	3953
	V02 - Coluna				4087	
C-E2	V01 - Coluna	40,00	36,52	33,05	3916	
	V02 - Coluna				3888	

Para fins comparativos, foi feito um novo dimensionamento dessa edificação (Projeto USIHAB), considerando-se a semi-rigidez das ligações e, ao quantificar os ganhos relativos ao efeito misto da ligação de Cabral, em comparação com as ligações em aço de Moraes, constatou-se uma redução de peso em aço de 8,63% da segunda análise em relação à primeira.

Maiores detalhes sobre a tipologia de ligação mista idealizada, programa experimental, análise e dimensionamento estrutural podem ser encontrados na dissertação de Cabral (2004).

2.4. LIGAÇÕES VIGA-COLUNA

A tipologia das ligações desempenham importante papel nas estruturas metálicas, influenciando no comportamento estrutural das mesmas. Assim, o grau de vinculação de cada tipo de ligação afeta diretamente no peso final (kg/m^2) da estrutura. Desta forma, as ligações são classificadas em três tipos: rígidas, semi-rígidas e flexíveis, e existem na literatura vários critérios e expressões para se classificar essa rigidez.

A ligação é classificada como *rígida*, segundo AISC (1994), quando o ângulo original entre os elementos estruturais permanece constante após o carregamento da estrutura, apresentando restrição rotacional de no mínimo 90% daquela teórica verificada sob condição de rótula perfeita. Este tipo de ligação tem a capacidade de garantir a continuidade da estrutura, resistindo a momentos de flexão ou torção.

Por outro lado, a ligação é classificada como *flexível* quando a restrição rotacional entre os elementos estruturais, após o carregamento, for no máximo 20% da rotação teórica, verificada sob condição de rótula ideal. Este tipo de ligação implica em nenhuma transferência de momento fletor, isto é, resistência apenas aos esforços cortantes e normais, AISC (1994).

Embora o uso de qualquer comportamento idealizado das conexões simplifique o procedimento e análise das estruturas, atenta-se que essas ligações idealizadas, rígidas e flexíveis, apresentam respostas estruturais que diferem dos resultados obtidos na condição real, o que é facilmente observado nas análises experimentais. A maioria das ligações usadas na prática transmitem algum momento ou experimentam alguma rotação; assim, as ligações apresentam rigidezes intermediárias às citadas, sendo classificadas como semi-rígidas.

Desta forma, a ligação é classificada como *semi-rígida* quando a restrição rotacional estiver contida na faixa entre 20% e 90% daquela teórica, verificada sob condição de rótula ideal, AISC (1994).

Também é possível classificar as ligações segundo à sua resistência. Assim, uma ligação será de resistência total caso o momento resistente da mesma for igual ou maior que o momento resistente da viga. Porém, se o momento resistente da ligação for menor que o momento resistente da viga, a ligação será dita de resistência parcial, CEN (1993).

Neste contexto, pode-se afirmar que os resultados experimentais são de suma importância e necessidade para compreender o comportamento real das ligações, oferecendo subsídios de projeto.

Com base na classificação descrita, o comportamento das ligações pode ser representado graficamente, como ilustra a Figura 2.11.

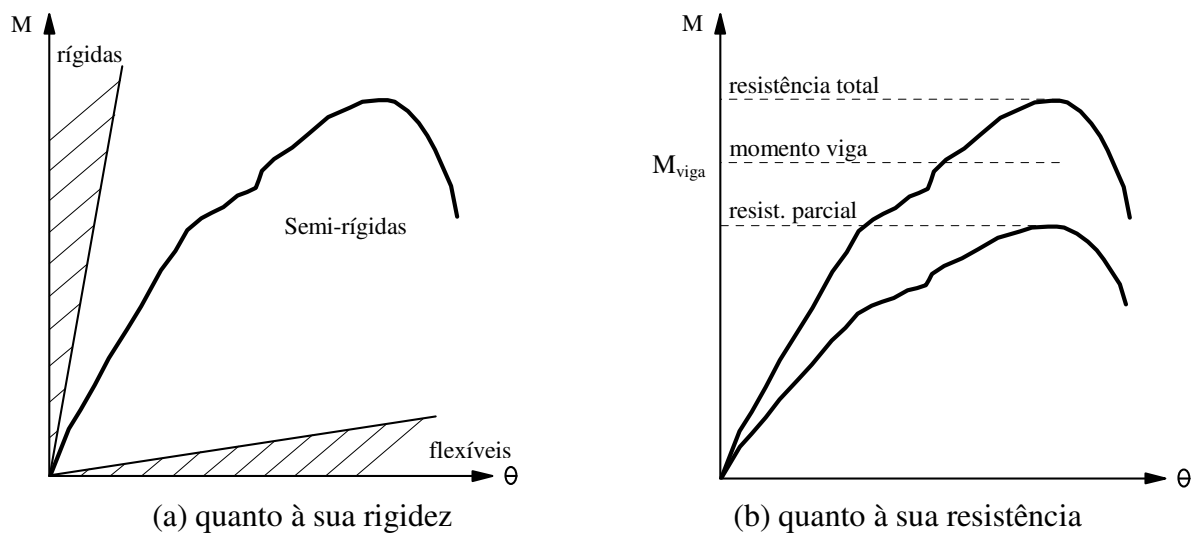


Figura 2.11 – Classificação das ligações.

A possibilidade de prever a curva momento-rotação para cada tipo de ligação é objeto fundamental das pesquisas nesta área, pois é um dado valioso que pode ser incluído no projeto estrutural, permitindo um processo de cálculo mais preciso e acima de tudo, mais econômico.

A curva fornece a relação entre o momento atuante na ligação (M) e a resposta rotacional (θ) em função desse momento. Essa relação entre momento e a rotação é a rigidez rotacional K.

$$K = \frac{\Delta M}{\Delta \theta} \quad (2.1)$$

Frisa-se ainda a existência de três parâmetros estruturais principais que governam o comportamento de uma ligação, que podem ser visualizados na Figura 2.12.

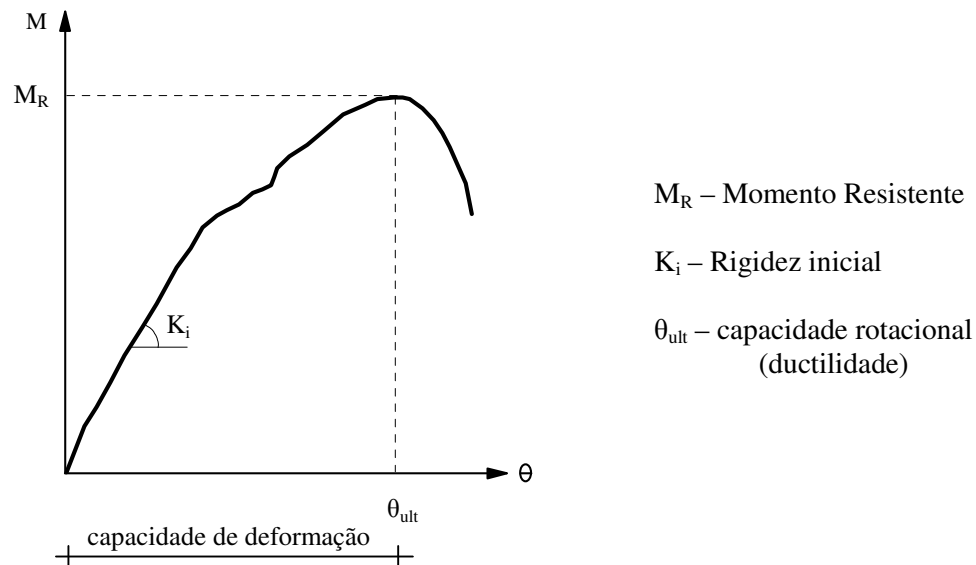


Figura 2.12 – Parâmetros estruturais da curva M-θ.

Como a tipologia de ligações estudadas por Moraes (2003), Cabral (2004) e também neste presente trabalho não são padronizadas, a análise experimental permite determinar as curvas momento-rotação. Assim, é possível avaliar a resistência, a rigidez e a ductilidade dessas ligações parafusadas compostas de perfis formados a frio.

O conjunto viga-coluna que compõem os protótipos de ensaio do presente estudo, bem como as configurações das ligações propostas para este, serão mostrados no capítulo 3.

No item seguinte são apresentados os métodos utilizados para a determinação das rigidezes das ligações, definindo qual destes será utilizado para determinar as rigidezes das ligações em estudo no presente trabalho.

2.4.1. Determinação da Rigidez de uma Ligação com a Utilização de Ensaio Experimentais

Como já mencionado, a determinação da rigidez se baseia primeiramente na obtenção da curva momento-rotação característica da ligação em estudo, através de ensaios experimentais. Posteriormente, aplica-se um método para determinar essa rigidez.

O método nomeado de Método da Inclinação Inicial (Godley, 1991), que é utilizado no presente trabalho, consiste em traçar uma reta passando pela origem da curva momento-rotação e interceptando a curva em seu trecho inicial. A inclinação dessa reta tangente representa a rigidez da ligação (Fig. 2.13). Assim, esse método é utilizado para determinar a rigidez de uma ligação na sua fase elástica-linear. Caso a ligação em estudo trabalhe a parte inelástica de sua curva momento-rotação, o método pode levar à determinação de valores de rigidez superestimados. No entanto, como já ilustrado na Figura 2.5, em curvas momento-rotação de um mesmo protótipo, as partes destas referentes à fase linear são similares, enquanto as partes referentes à fase não-linear se divergem consideravelmente. Além disso, sabe-se que os perfis formados a frio possuem baixa reserva de capacidade inelástica e por essas razões esse método é utilizado no presente trabalho.

Outro motivo pela qual foi definido esse método para a determinação das rigidezes das ligações é que, de acordo com Radziminski (1988), em certos estágios não há necessidade de uma completa definição da curva momento-rotação, sendo suficiente uma estimativa da rigidez inicial da ligação. Por exemplo, sob cargas gravitacionais e variações da ação do vento, o uso de uma variação linear de rigidez das ligações pode ser adequada para a análise estrutural, correspondente à resposta nominal elástica da estrutura. Entretanto, sob condições extremas de solicitação, tais como as impostas por eventos de natureza sísmica, a adoção do comportamento não-linear da curva momento-rotação é exigida para avaliar o desempenho estrutural.

A Figura 2.13 a seguir ilustra o Método da Inclinação Inicial.

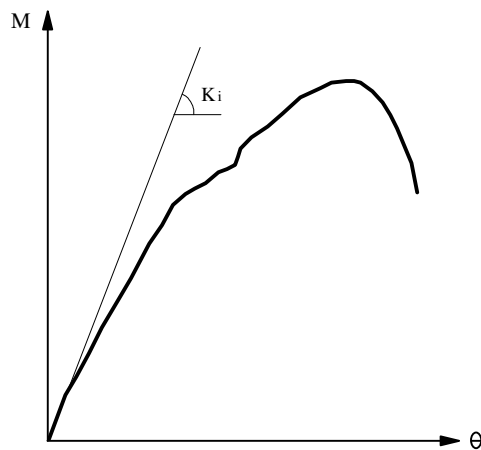


Figura 2.13 – Método da Inclinação Inicial.

Outro método, denominado Método da Inclinação a 50% do Momento Último de Ensaio (M_u), consiste em medir a inclinação de uma reta passando pela origem e pela coordenada correspondente a 50% do momento último (M_u). Um terceiro método, chamado Método das Áreas Iguais, desenvolvido por Godley (1991), determina a rigidez igualando as áreas A_1 e A_2 . Esse método não é comum em prescrições de normas devido à dificuldade de operacionalização. Os gráficos da Figura 2.14 ilustram esses métodos.

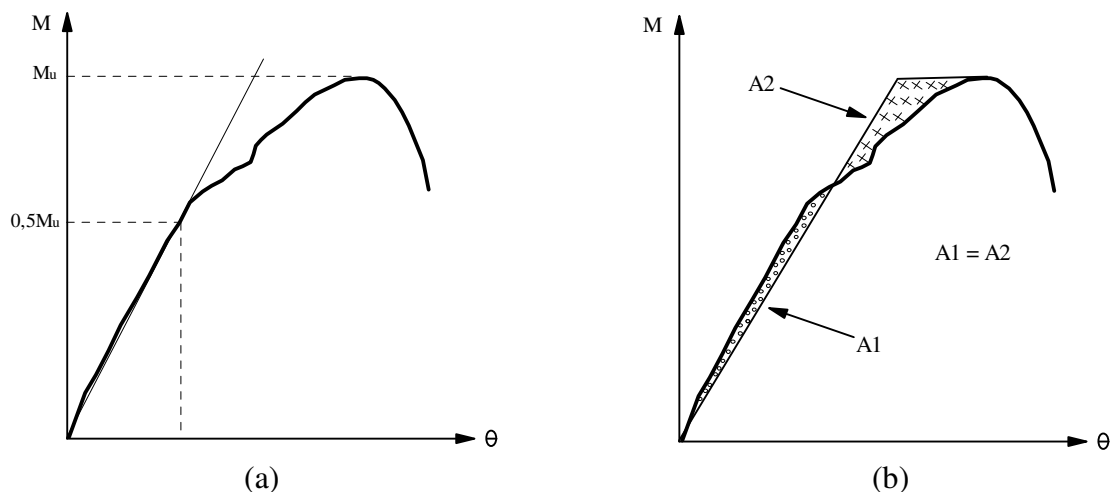


Figura 2.14 – Métodos de determinação da rigidez: (a) Método da Inclinação a 50 % do Momento Último de Ensaio (M_u); (b) Método das Áreas Iguais.

A partir dos estudos descritos neste capítulo, ao qual está inserido as pesquisas já realizadas desta tipologia de ligação, foram elaborados no presente trabalho novos estudos e ensaios experimentais que serão apresentados a seguir, envolvendo a mesma tipologia de ligação.

Para fins comparativos, utilizaram-se a idêntica tipologia e dimensões de Cabral (2004), doravante sem a contribuição da laje de concreto e a inclusão de enrijecedores de alma na coluna. Os resultados experimentais do presente trabalho são confrontados com os experimentos já realizados, o que permite a elaboração das conclusões finais do estudo.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as configurações das ligações propostas para o projeto em estudo e os procedimentos dos ensaios experimentais. A investigação experimental realizada no Laboratório de Estruturas do PROPEC/EM/UFOP consistiu de ensaios utilizando perfis em dimensões reais. Os protótipos, juntamente com os acessórios de montagem, foram fabricados pela empresa Pórtico S.A.

Os modelos foram definidos com dimensões idênticas aos ensaiados por Cabral (2004), porém sem a contribuição da laje de concreto e com a inclusão de enrijecedores de alma na coluna, conforme citado no capítulo 2.

Foram realizados ensaios em quatro configurações de protótipos. Todos simulando coluna interna de um pórtico, que consistiu de uma coluna com dois trechos de viga parafusados, um em cada lado da coluna. O objetivo dos ensaios, além de fins comparativos, foi avaliar a viabilidade, a resistência e o comportamento das ligações propostas. Determinaram-se também as rigidezes das ligações testadas, através das curvas momento x rotação, as deformações específicas em alguns pontos previamente selecionados, o campo de deslocamento e os modos de colapso da ligação, necessários à avaliação do dimensionamento final e do comportamento estrutural.

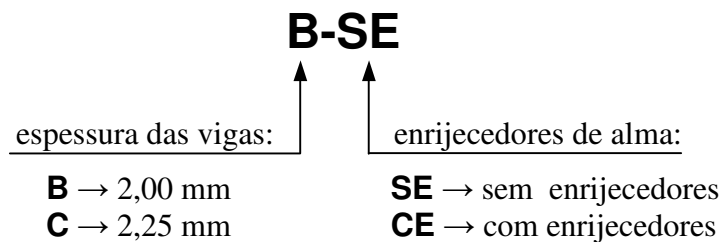
3.2. PROTÓTIPOS ENSAIADOS

A investigação experimental deste trabalho consistiu na realização de 4 ensaios de ligações em perfis formados a frio. Conforme discutido anteriormente, as ligações ensaiadas foram análogas às de Cabral (2004), diferindo na ausência da laje de concreto e a inclusão dos enrijecedores de alma na coluna para dois ensaios. Desta forma é possível comparar os resultados com Moraes, devido ao ganho de resistência com os

enrijecedores de alma e, com Cabral separar a influência da ligação de aço e da laje de concreto no comportamento da ligação com um todo.

As vigas acopladas à ligação, através de parafusos, tiveram espessuras de chapa de 2,00 e 2,25 mm e os protótipos ensaiados foram divididos em dois grupos: grupo dos SE (sem enrijecedores) e grupo dos CE (com enrijecedores) de alma soldados na coluna.

A nomenclatura utilizada na representação destes protótipos é apresentada a seguir, onde a primeira letra refere-se à espessura e as duas últimas a existência ou não de enrijecedores:



B-SE → protótipo com vigas de 2,00 mm sem enrijecedores de alma

B-CE → protótipo com vigas de 2,00 mm com enrijecedores de alma

C-SE → protótipo com vigas de 2,25 mm sem enrijecedores de alma

C-CE → protótipo com vigas de 2,25 mm com enrijecedores de alma

O dimensionamento das ligações destes protótipos, é apresentado no Anexo II. A seguir apresentam-se a geometria dos protótipos ensaiados, a caracterização dos materiais, o esquema de montagem, os sistemas de aplicação de carga e de aquisição de dados, a metodologia de ensaio e a instrumentação utilizada em cada protótipo ensaiado.

3.3. GEOMETRIA DOS PROTÓTIPOS ENSAIADOS

As colunas e componentes de ligação utilizados nos quatro protótipos tiveram as mesmas dimensões, conforme ilustrados na Tabela 2.5 e na Figura 2.8; isto é, todos protótipos tiveram a mesma seção para as colunas e componentes, sendo diferenciados somente nas espessuras das vigas. A seguir tem-se a descrição dos protótipos ensaiados agrupados segundo a existência ou não de enrijecedores.

3.3.1. Protótipos B-SE e C-SE

O Protótipo B-SE é composto pela coluna de seção "I enrijecido" 170x190x25x2,25 e por três vigas de seção caixa 150x120x20x2,00 e o Protótipo C-SE tem coluna com as mesmas dimensões e vigas 01 e 02 de 150x120x20x2,25. Os elementos de ligação empregados na conexão são as cantoneiras soldadas às vigas 01 e 02, os U suportes soldados aos flanges da coluna e os reforços soldados aos flanges e alma da coluna, apresentados na Figura 2.8. Todas as soldas são de filete em todo o contorno dos elementos. Destaca-se ainda que, nestes protótipos não há enrijecedores de alma. A Figura 3.1 ilustra a configuração do Protótipo B-SE e a Figura 3.2 do Protótipo C-SE.

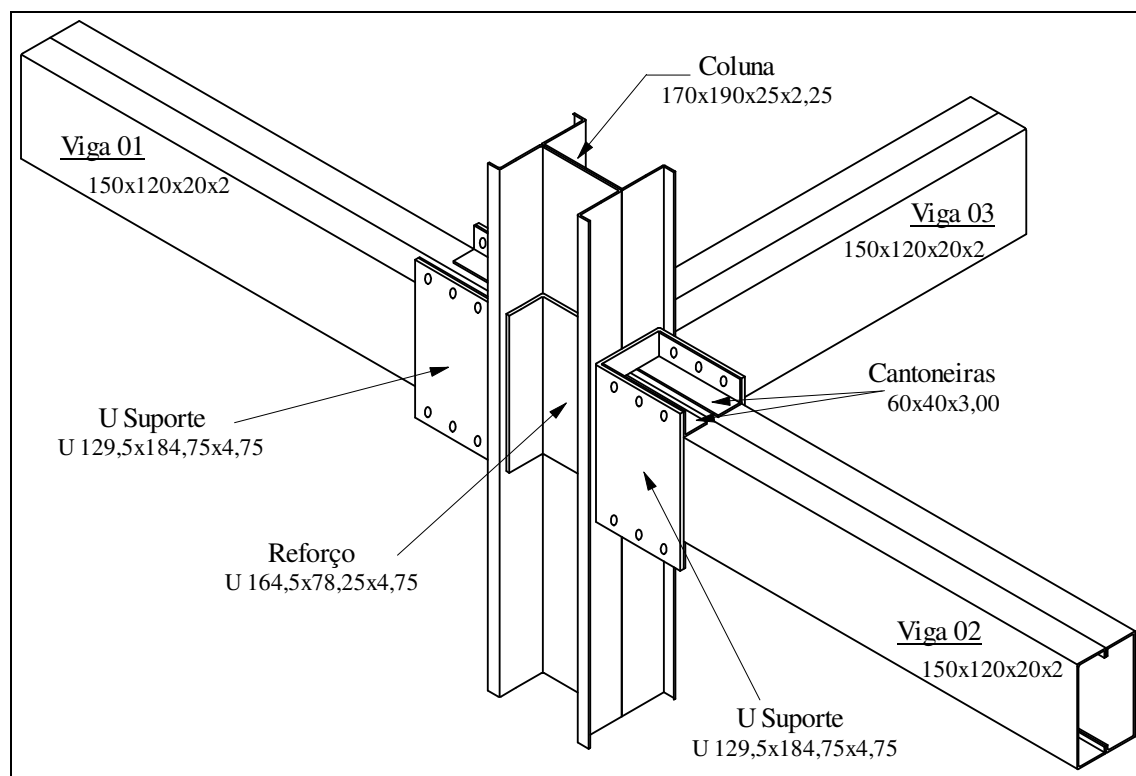


Figura 3.1 – Perspectiva do Protótipo B-SE.

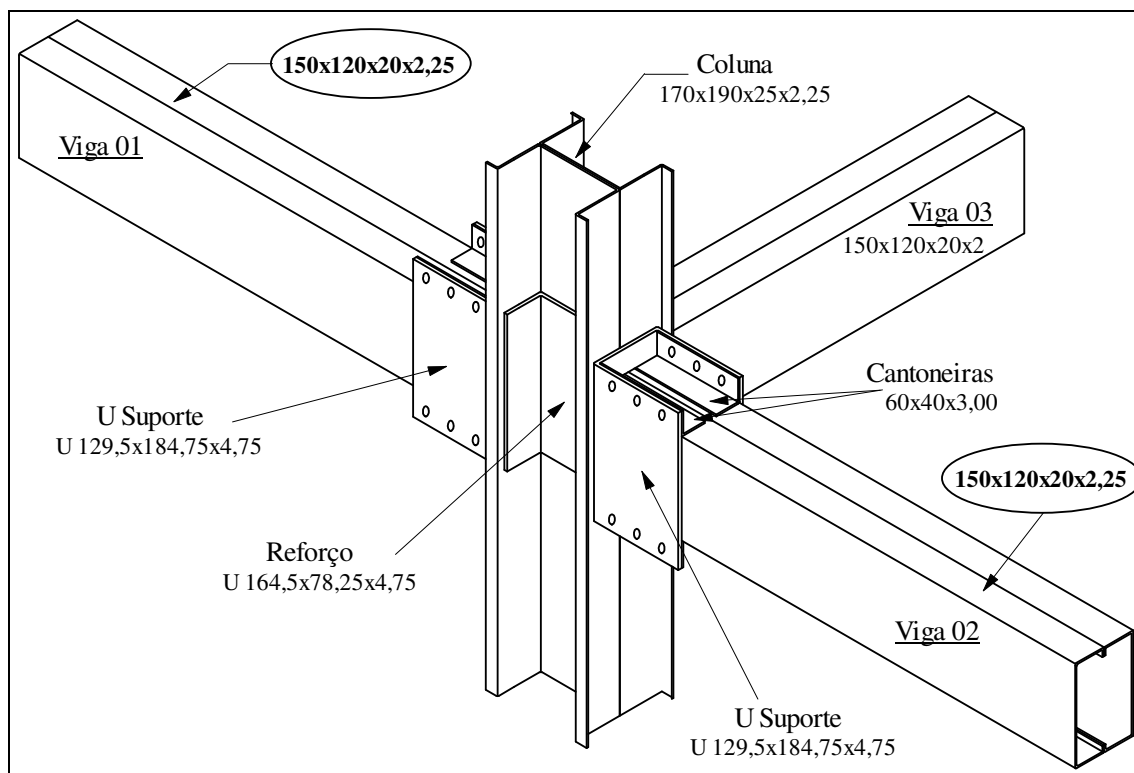


Figura 3.2 – Perspectiva do Protótipo C-SE.

O meio de ligação para unir as vigas 01 e 02 à coluna são os parafusos. Para cada viga são utilizados 12 parafusos, perfazendo um total de 24 parafusos com 12,50 mm de diâmetro em cada ligação. Estes são posicionados de forma que as porcas fiquem do lado externo, facilitando assim o aperto das mesmas e as arruelas posicionadas somente no lado das porcas.

3.3.2. Protótipos B-CE e C-CE

Conforme apresentado no capítulo 2, o mecanismo de colapso nas ligações de Moraes (sem enrijecedores de alma na coluna) foi caracterizado pelo escoamento dos enrijecedores das bordas da coluna, ocorrendo também uma deformação excessiva nos flanges da mesma, na região da ligação. Desta forma, o presente trabalho inclui enrijecedores de alma na coluna, de modo a minimizar essa deformação e, além disso, diminuir o nível de tensões nas bordas da mesma.

O Protótipo B-CE tem configuração e perfis iguais ao do Protótipo B-SE (item 3.3.1) sendo, também, composto pela coluna de seção "I enrijecido" 170x190x25x2,25 e por três vigas de seção caixa 150x120x20x2,00. Entretanto, como já mencionado, são soldados, nas alturas das linhas de furos do U Suporte, enrijecedores de alma, em ambos os lados da coluna. A Figura 3.3 ilustra a configuração deste protótipo.

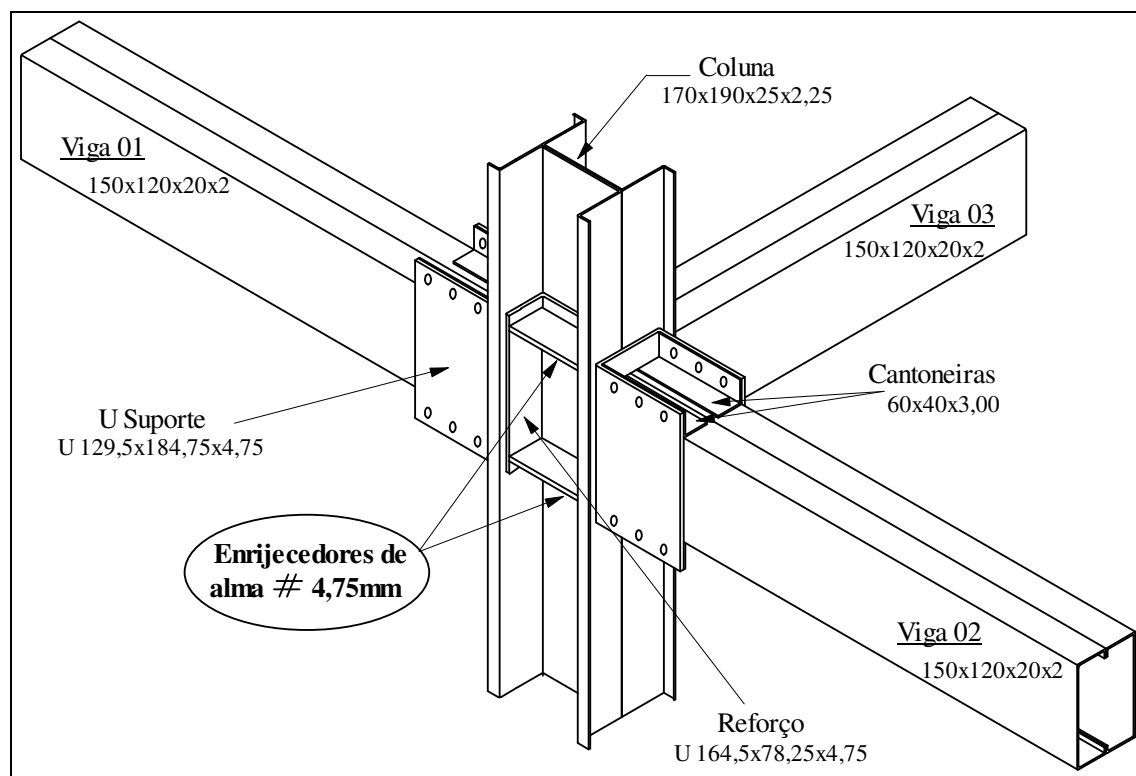


Figura 3.3 – Perspectiva do Protótipo B-CE.

Os detalhes dos elementos de ligação, cantoneiras, U Suporte e reforço são idênticos aos do Protótipo B-SE, conforme apresentados na Figura 2.8.



(a) Protótipo B-CE



(b) detalhe enrijecedores de alma

Figura 3.4 – Foto do Protótipo B-CE – detalhe dos enrijecedores de alma.

O Protótipo C-CE é idêntico ao C-SE, diferindo somente na inclusão de enrijecedores de alma soldados em ambos os lados da coluna, composto pela coluna de seção "I enrijecido" 170x190x25x2,25 e por três vigas de seção caixa; as vigas 01 e 02 de 150x120x20x2,25 e a viga 03 de 150x120x20x2,00. A Figura 3.5 ilustra a configuração deste protótipo.

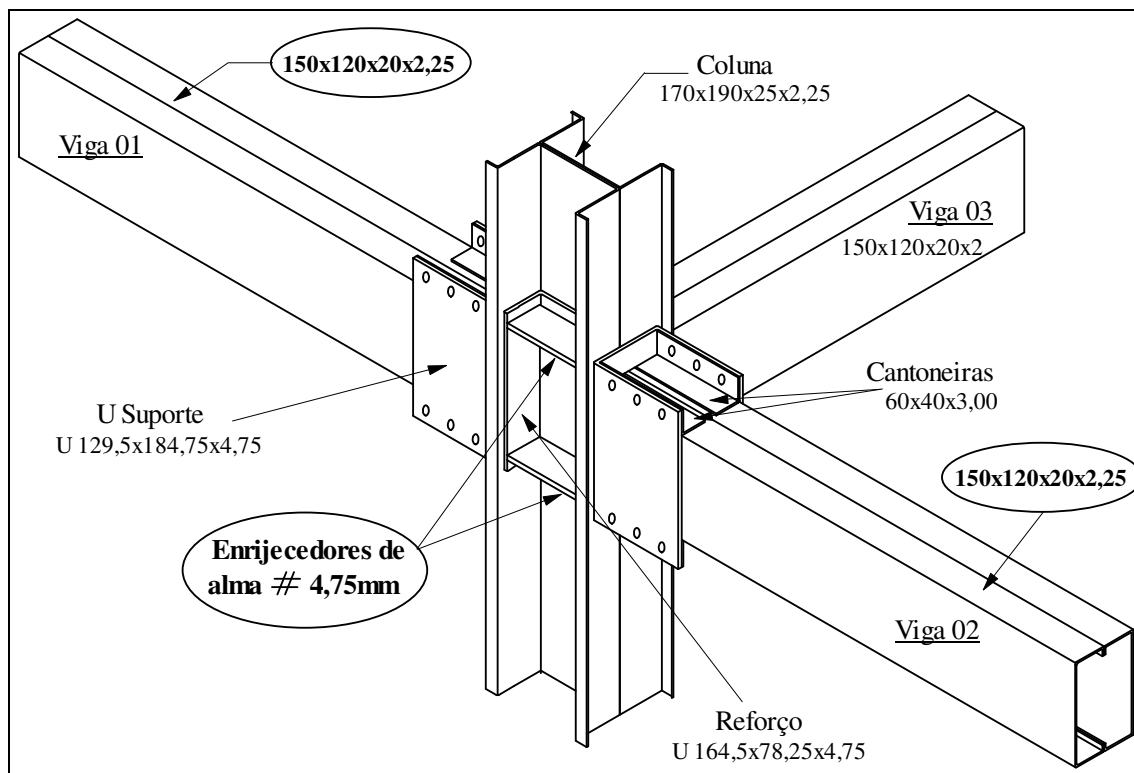


Figura 3.5 – Perspectiva do Protótipo C-CE.

Os detalhes dos elementos de ligação, cantoneiras, U Suporte e reforço são idênticos aos do Protótipo C-SE, conforme apresentados na Figura 2.8.

3.4. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nas Tabelas 3.1 e 3.2 são mostrados, respectivamente, os resultados dos ensaios de caracterização do aço utilizado nas vigas, colunas e enrijecedores dos protótipos. Seguindo as prescrições da NBR 6152:1992 – Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente – foram ensaiados corpos de prova à tração, sendo a base de medida utilizada para se determinar o alongamento residual das amostras igual a 50 mm. Os resultados utilizados são aqueles referentes às médias entre os valores obtidos para cada corpo de prova para a tensão limite de escoamento, f_y , a tensão limite de resistência à tração, f_u , e o alongamento residual após ruptura. Esses valores serão admitidos para avaliação de todos os ensaios dos protótipos.

Nas Tabelas 3.1 e 3.2 abaixo são mostrados os resultados de cada ensaio e as médias encontradas.

Tabela 3.1 – Resultados obtidos da caracterização do aço utilizado nas vigas e colunas dos protótipos.

Corpos de Prova	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Alongamento residual (%)
CP1	387,4	515,7	33,6
CP2	384,2	514,7	32,0
CP3	384,0	512,0	35,0
CP4	390,5	519,0	34,0
CP5	383,1	515,7	30,8
Média	385,8	515,4	33,1

O aço utilizado nas vigas e colunas é o USI-SAC-300. Este é um aço estrutural patinável que, devido à adição de elementos de liga (Cu, Cr, Ni, Si, Mn, etc), pode desenvolver uma camada de óxido aderente e protetora na superfície do material, durante o contato com o meio ambiente, conferindo melhor resistência à corrosão

atmosférica. Na construção civil, normalmente tal material é aplicado em edifícios, pontes, viadutos, galpões, coberturas, plataformas offshore, torres, e estruturas em geral.

Tabela 3.2 – Resultados obtidos da caracterização do aço utilizado nos enrijecedores de alma da coluna dos Protótipos B-CE e C-CE.

Corpos de Prova	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Alongamento residual (%)
CP1	325,5	435,4	27,3
CP2	326,6	441,0	21,3
CP3	329,3	441,6	25,5
CP4	325,2	436,6	27,0
CP5	326,0	431,4	21,9
CP6	314,2	431,5	25,6
CP7	336,0	439,2	24,8
CP8	334,5	437,3	23,9
Média	327,2	436,8	24,7

O aço utilizado nos enrijecedores é o SAE 1020, que não é um aço estrutural, sendo comumente utilizado em elementos estruturais secundários, placas de base, chumbadores, etc.

3.5. ESQUEMA DE MONTAGEM DOS PROTÓTIPOS

O esquema de montagem foi o mesmo para todos os ensaios realizados e é descrito a seguir.

Inicialmente foram instalados, paralelamente entre si, três pórticos de reação, denominados PR01, PR02 e PR03, conforme ilustra a Figura 3.6, sendo equidistantes de 1,0 m entre seus planos centrais.

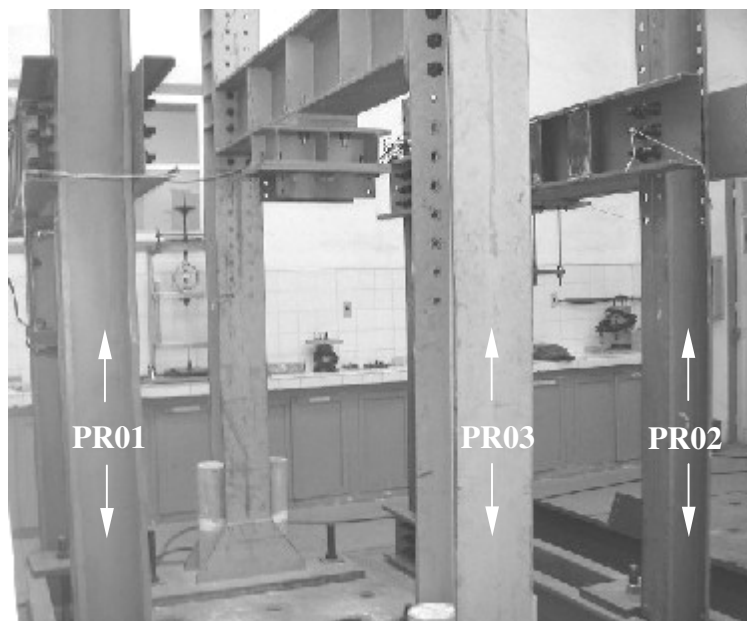
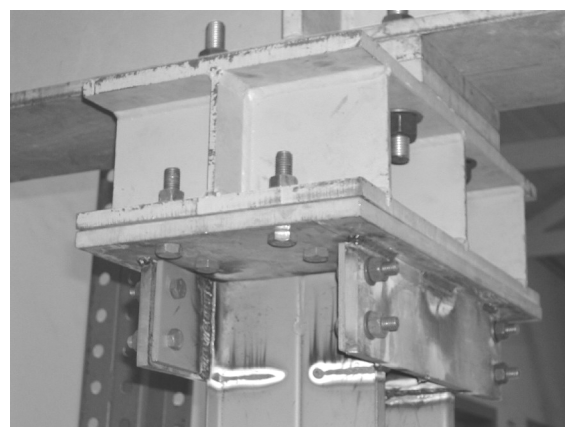


Figura 3.6 – Foto dos Pórticos de Reação PR01, PR03 e PR02.

Em seguida, foram instalados dois acessórios de montagem: a placa de base e a placa de topo (Figura 3.7). O primeiro foi parafusado junto à laje de reação, ao passo que o segundo foi parafusado no pórtico de reação PR03. O objetivo do uso desses acessórios foi tornar a coluna rigidamente presa em suas extremidades. A união entre a coluna e os acessórios foi feita através de perfis cartola, com espessuras de 8 mm, soldados na base e no topo da coluna e, posteriormente, parafusados nos sistemas da placa de base e da placa de topo, respectivamente. As fotos apresentadas na Figura 3.7 mostram esses acessórios.



a) Placa de base



b) Placa de topo

Figura 3.7 – Fotos dos acessórios utilizados para fixação das colunas.

Após a fixação da coluna, a viga 01 e a viga 02 foram conectadas à mesma por meio de ligações parafusadas, entre as cantoneiras de ligação inferiores e superiores e os perfis U suportes. Em seguida, em cada um dos pórticos de reação PR01 e PR02, foram instalados sistemas de aplicação de carga. A Figura 3.8 representa o esquema de montagem dos ensaios SE, sendo similar o esquema para os ensaios CE.

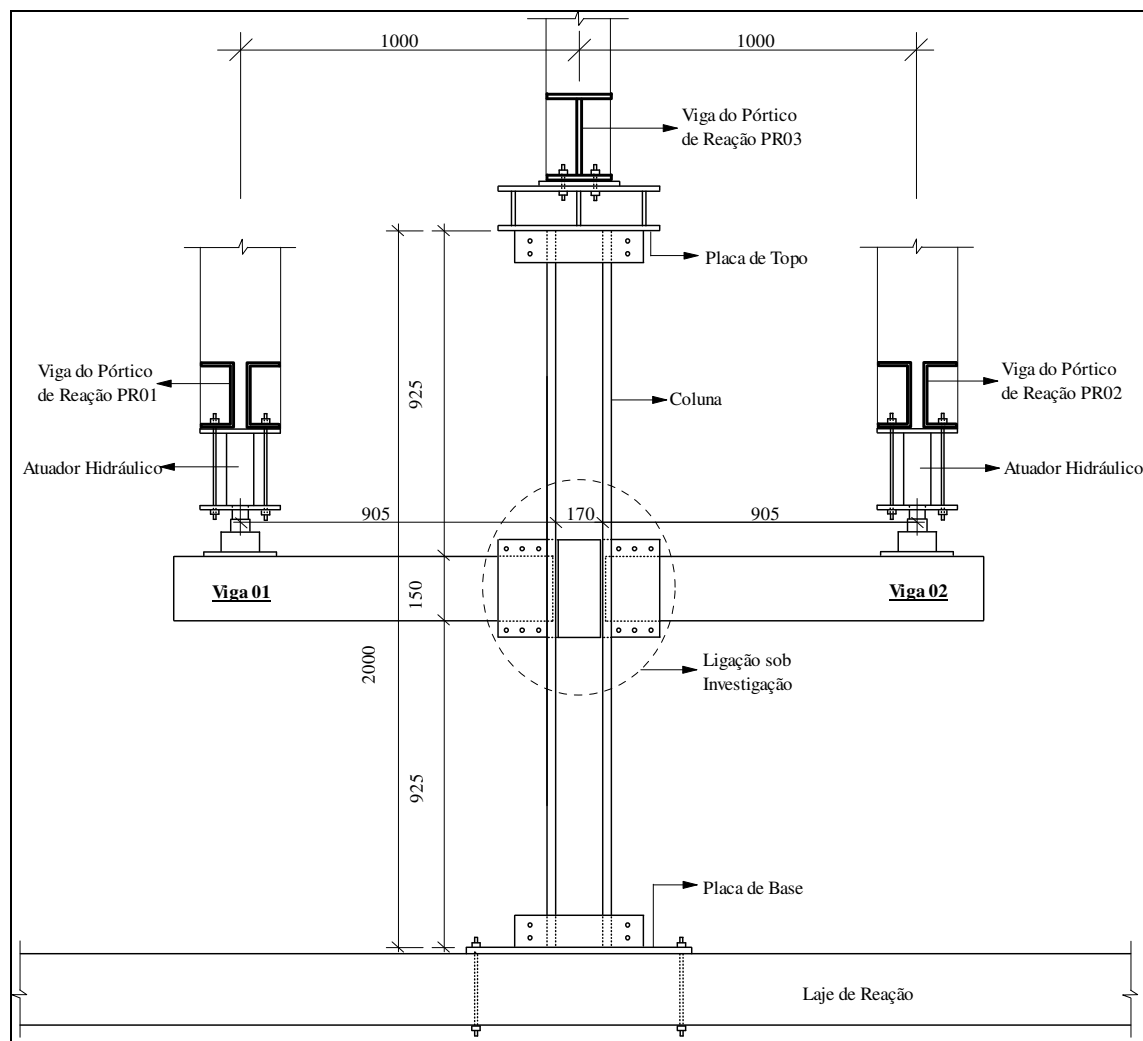


Figura 3.8- Esquema de montagem dos Protótipos B-SE e C-SE.

Destaca-se a existência da viga 03 soldada no reforço junto à alma da coluna. Isso se fez com o propósito de igualar ao experimento de Cabral (2004), porém, sem a laje. Desta maneira, pretendeu-se, através da análise teórico-experimental, comparar os

modelos experimentais e quantificar as possíveis divergências entre os mesmos. Assim, o carregamento foi aplicado somente na viga 01 e na viga 02.

A Figura 3.9 ilustra a montagem da coluna e das vigas do Protótipo B-SE.



Figura 3.9 – Foto da montagem da coluna e das vigas do Protótipo B-SE.

3.6. SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA NOS PROTÓTIPOS

O sistema de aplicação de cargas foi o mesmo para todos os ensaios realizados e é descrito a seguir.

Esse sistema de aplicação de carga foi instalado nos pórticos de reação PR01 e PR02. Cada um era composto por um pórtico de reação, um atuador hidráulico, uma célula de carga, uma rótula de carga e acessórios. Assim, um sistema de aplicação de carga foi posicionado na extremidade da viga 01 e o outro na extremidade da viga 02 do protótipo. A Figura 3.10 mostra a configuração do sistema de aplicação de carga.

Dentre os acessórios, utilizou-se uma placa de carga, com espessura de 10 mm, que foi instalada entre a viga e o sistema de aplicação. Essa placa tinha a finalidade de distribuir o carregamento em uma maior região do flange e da alma, diminuindo o nível de concentrações de tensões na região de aplicação do carregamento.

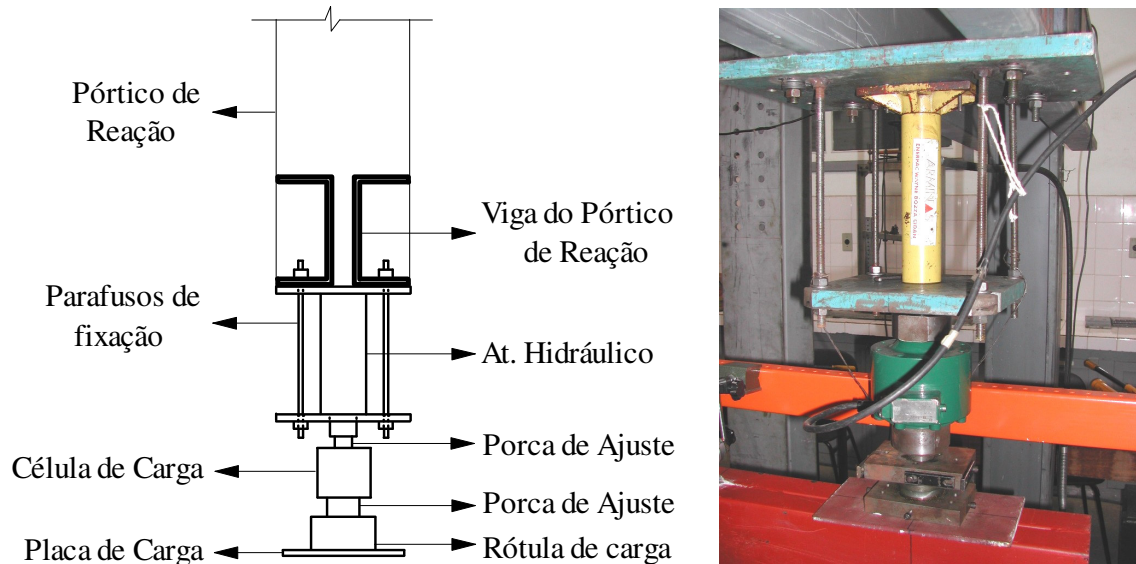


Figura 3.10 – Detalhe do sistema de aplicação de carga.

Os carregamentos foram aplicados simultaneamente na viga 01 e na viga 02 através de atuadores hidráulicos de 100 kN, fabricados pela ENERPAC, e foram registrados por células de cargas também de 100 kN. A célula 1 da marca TRANSTEC, com sensibilidade de 1,9 mV/V e a célula 2 da marca SODMEX, com sensibilidade de 1,963 mV/V.

3.7. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DOS PROTÓTIPOS

Analogamente aos itens anteriores, o sistema de aquisição de dados utilizado foi o mesmo para todos os protótipos ensaiados.

Nesse sistema, foi utilizado um computador Pentium III de 900MHz e cinco módulos Spider8 (Hottinger Baldwin Messtechnik (2003a)).

O Spider8 é um sistema eletrônico de medição para PCs e se destina à medição elétrica de variáveis mecânicas tais como tensão, força, pressão, deslocamento,

aceleração e temperatura. Todo o condicionamento de sinais – excitação para transdutores passivos e amplificação, digitalização, interface com computador e tecnologia de conexão para um máximo de 8 canais – está combinado em um módulo. A Figura 3.11 apresenta um módulo do Spider8.

Todos os parâmetros dos equipamentos de medida são feitos através de software de controle Catman 4.5 (Hottinger Baldwin Messtechnik (2003b)).

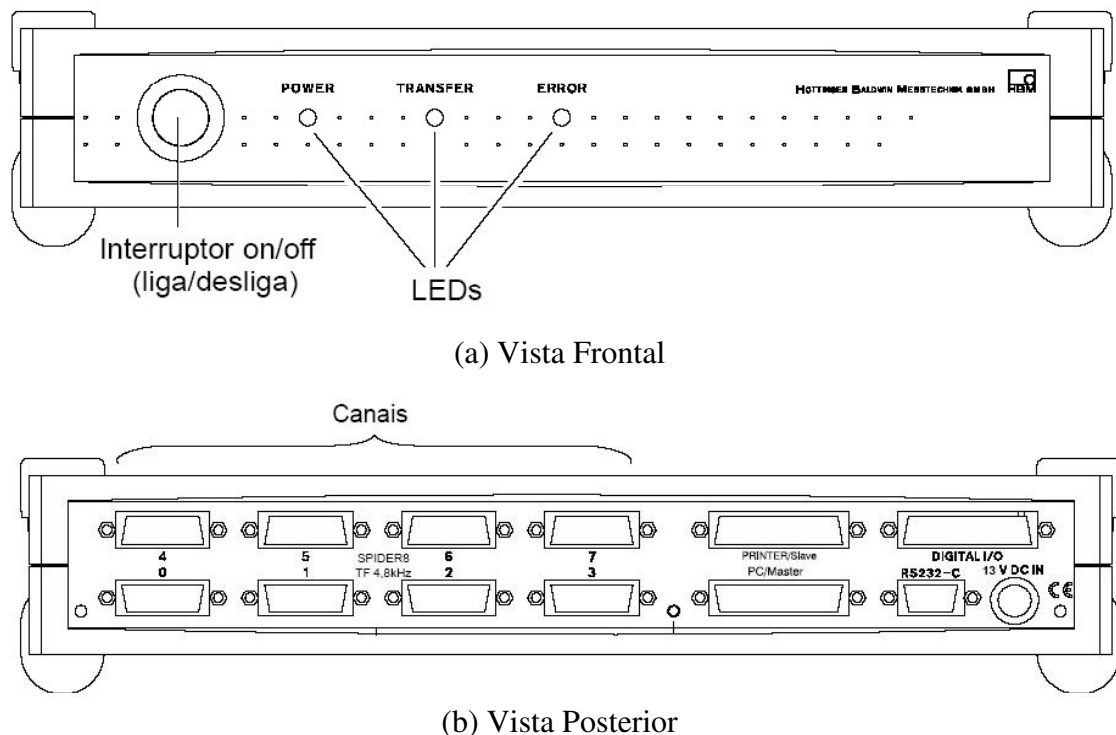


Figura 3.11 – Vistas de um módulo do Spider8.

Foram utilizados no ensaio dois tipos de Spider8, totalizando cinco módulos. Dois deles são módulos de frequência portadora de 4,8 kHz, onde os canais de 4 a 6 possuem a entrada necessária para a conexão dos transdutores indutivos, sendo portanto estes módulos utilizados para a conexão dos LVDT's. Os outros três módulos utilizados possuem frequência portadora de 600 Hz e neles foram conectados os extensômetros elétricos de resistência (EER) e as células de carga.

Para a conexão dos LVDT's ao Spider8, foi feita a ligação de adaptadores a um amplificador de sinal, da marca Measurements Group. As funções deste equipamento

são a conversão e a amplificação do sinal, de modo que o Spider8 consiga captá-lo de forma adequada. A foto da Figura 3.12 apresenta a montagem do sistema de aquisição de dados.

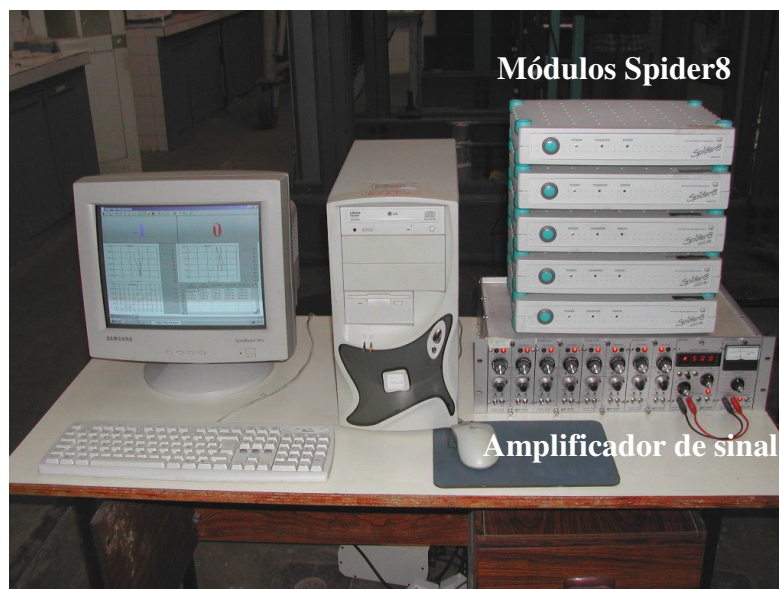


Figura 3.12 – Montagem do sistema de aquisição de dados.

Através do software Catman utilizado na aquisição foram criadas as saídas numéricas e gráficas necessárias para o acompanhamento dos ensaios e posterior análise dos resultados.

3.8. METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

A metodologia aplicada em todos os ensaios realizados foi idêntica e está descrita a seguir.

Inicialmente foi realizado um pré-ensaio, dentro da fase elástica dos materiais das ligações, com o objetivo de eliminar as folgas de montagem e verificar o funcionamento dos sistemas de aquisição de dados e dos equipamentos utilizados.

Foram utilizados atuadores hidráulicos independentes para a viga 01 e para a viga 02, porém as cargas foram iguais e aplicadas simultaneamente. Registrou-se, portanto, um carregamento balanceado (simétrico).

Após o pré-ensaio foram aplicados carregamentos incrementais, com aproximadamente 1,00 kN de passo de carga, até que fosse atingido o colapso do protótipo. É importante lembrar que, ao final de cada passo, eram lidos os defletômetros e computado os dados por meio do sistema automático de aquisição de dados. Assim, com a obtenção e tratamento desses resultados, gerou-se a curva momento-rotação do protótipo em estudo.

3.9. INSTRUMENTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A apresentação deste item consiste em ensaios descritos separadamente para os Protótipos B-SE e C-SE, e agrupados para os Protótipos B-CE e C-CE, visto que estes últimos possuem a mesma instrumentação extensométrica.

A configuração empregada para o posicionamento dos LVDT's e defletômetros, foi a mesma para todos os ensaios, sendo ilustrada na instrumentação do Protótipo B-SE (Fig.3.13).

3.9.1. Instrumentação do Protótipo B-SE

Para medição de deslocamentos, foram utilizados os LVDT's (Load Variational Displacement Transducers) e os defletômetros mecânicos.

Os LVDT's, fabricados pela SENSOTEC, possuem sensibilidade de 0,001 mm, e com curso de 25 mm. Os defletômetros mecânicos, do fabricante MITUTOYO, possuem um campo de medida de 10 mm e precisão de 0,01 mm.

Para medição de deformações específicas, foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER), da marca KYOWA, com resistência de $120,2 \pm 0,2 \Omega$, comprimento do gage 5 mm e sensibilidade 0,4%.

A partir das medidas obtidas através dos LVDT's e dos defletômetros foram determinados os campos de deslocamentos, as rotações das vigas e da coluna e, conseqüentemente, as rotações relativas das ligações. A Figura 3.13 ilustra o posicionamento desses LVDT's e defletômetros.

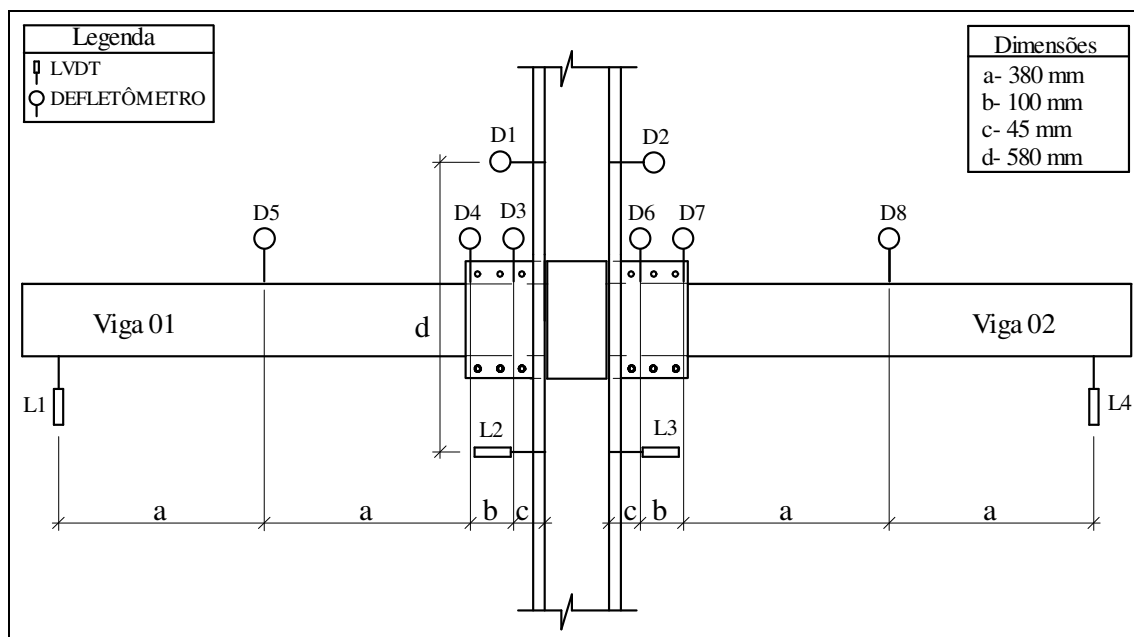


Figura 3.13 – Detalhe do posicionamento dos LVDT's e dos defletômetros utilizados em todos protótipos.

Os extensômetros foram colados próximos às ligações e mediram as deformações específicas nos flanges superiores e inferiores das vigas, nos enrijecedores e flanges da coluna e também no U Suporte. A Figura 3.14 ilustra o posicionamento desses extensômetros e a nomenclatura utilizada.

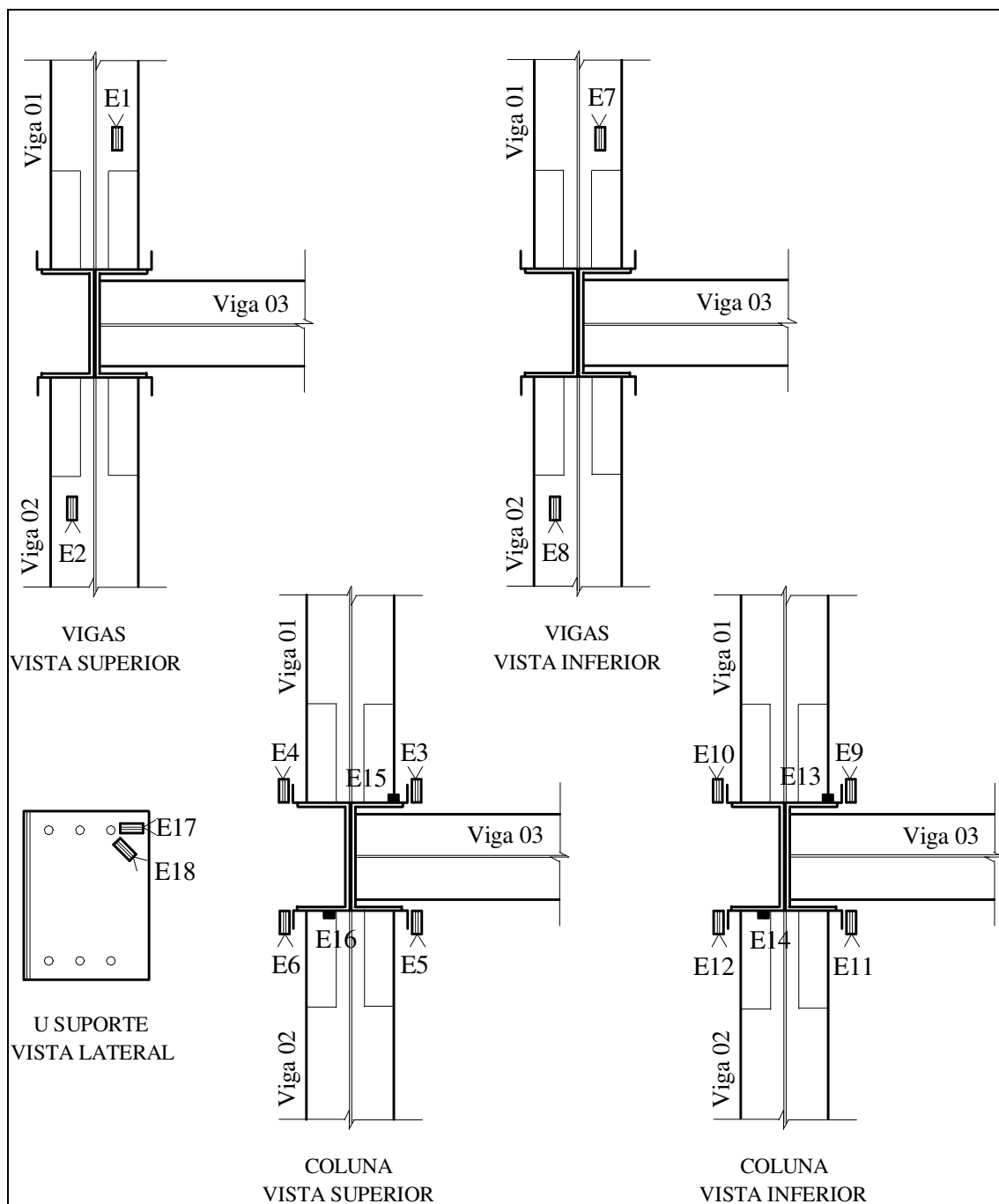


Figura 3.14 – Posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência no Protótipo B-SE.

Na Figura 3.14 os extensômetros estão dispostos de forma que, para observar o efeito nas vigas, foram posicionados os extensômetros E1, E2, E7, E8 em ambos os flanges, e ficaram distantes 3,5 cm das Cantoneiras de Ligação. Na coluna foram colados os extensômetros E3, E4, E5, E6, E9, E10, E11 e E12, localizados nos

enrijecedores da mesma, na direção da linha de furos do U Suporte, de modo a possibilitar a avaliação desses enrijecedores. Conjuntamente, ainda na coluna, foram instalados extensômetros localizados nos flanges colados 3,5 cm abaixo, no caso dos inferiores (E13 e E14), e 3,5 cm acima, no caso dos superiores (E15 e E16), do U Suporte.

No U Suporte foram posicionados os extensômetros E17 e E18 de modo a possibilitar a avaliação desse componente, que de acordo com o dimensionamento do Anexo II, observou-se a possibilidade de rasgamento da chapa junto ao furo do parafuso. A Tabela 3.3 abaixo resume a localização e a posição de cada extensômetro.

Tabela 3.3 – Localização e posicionamento dos extensômetros – Protótipo B-SE.

EXTENSÔMETROS	LOCALIZAÇÃO	POSIÇÃO
E1	Viga 1	Flange superior
E2	Viga 2	Flange superior
E7	Viga 1	Flange inferior
E8	Viga 2	Flange inferior
E3, E4, E5, E6	Enrijecedores de borda da coluna	Direção da linha de furos superiores do U Suporte
E9, E10, E11, E12	Enrijecedores de borda da coluna	Direção da linha de furos inferiores do U Suporte
E13, E14	Flanges da coluna	3,5 cm abaixo do U Suporte
E15, E16	Flanges da coluna	3,5 cm acima do U Suporte
E17, E18	U Suporte	Junto ao furo do parafuso

A foto da Figura 3.15 indica o posicionamento de alguns desses extensômetros.

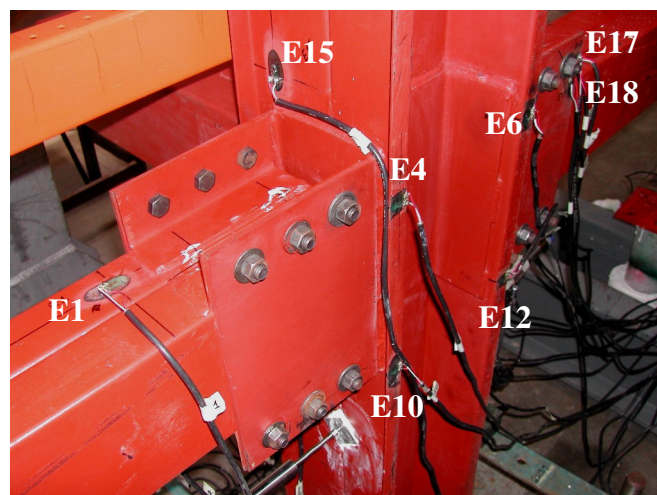


Figura 3.15 – Foto do posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência E1, E4, E6, E10, E12, E15, E17, E18 – Protótipo B-SE.

3.9.2. Instrumentação do Protótipo C-SE

A instrumentação foi semelhante à utilizada para o Protótipo B-SE, porém foram eliminados os extensômetros E17, E18 que estavam posicionados no U Suporte, pois esses apresentaram valores de deformações específicas relativamente baixos e distantes do escoamento do material.

Os extensômetros E13, E14, E15, E16 foram arranjados em posições diferentes em relação ao ensaio do Protótipo B-SE, mas a nomenclatura se manteve. É oportuno lembrar que esse rearranjo foi possível devido aos baixos valores de deformações específicas registrados nesses extensômetros.

Assim, no Protótipo C-SE, os extensômetros E13, E14 foram posicionados longitudinalmente nos enrijecedores de borda da coluna, 50 mm abaixo da linha de furos inferiores do U Suporte, pontos esses passíveis de ocorrer o efeito localizado resultante da concentração de tensões (mecanismo de plastificação), conforme registrado no ensaio do Protótipo B-SE. Por conseguinte, pôde-se monitorar tais pontos. No capítulo 4 serão apresentados os resultados das medições que justificaram a mudança na instrumentação.

A Figura 3.16 e a Tabela 3.4 apresentam, respectivamente, o posicionamento e a localização dos extensômetros empregados no Protótipo C-SE.

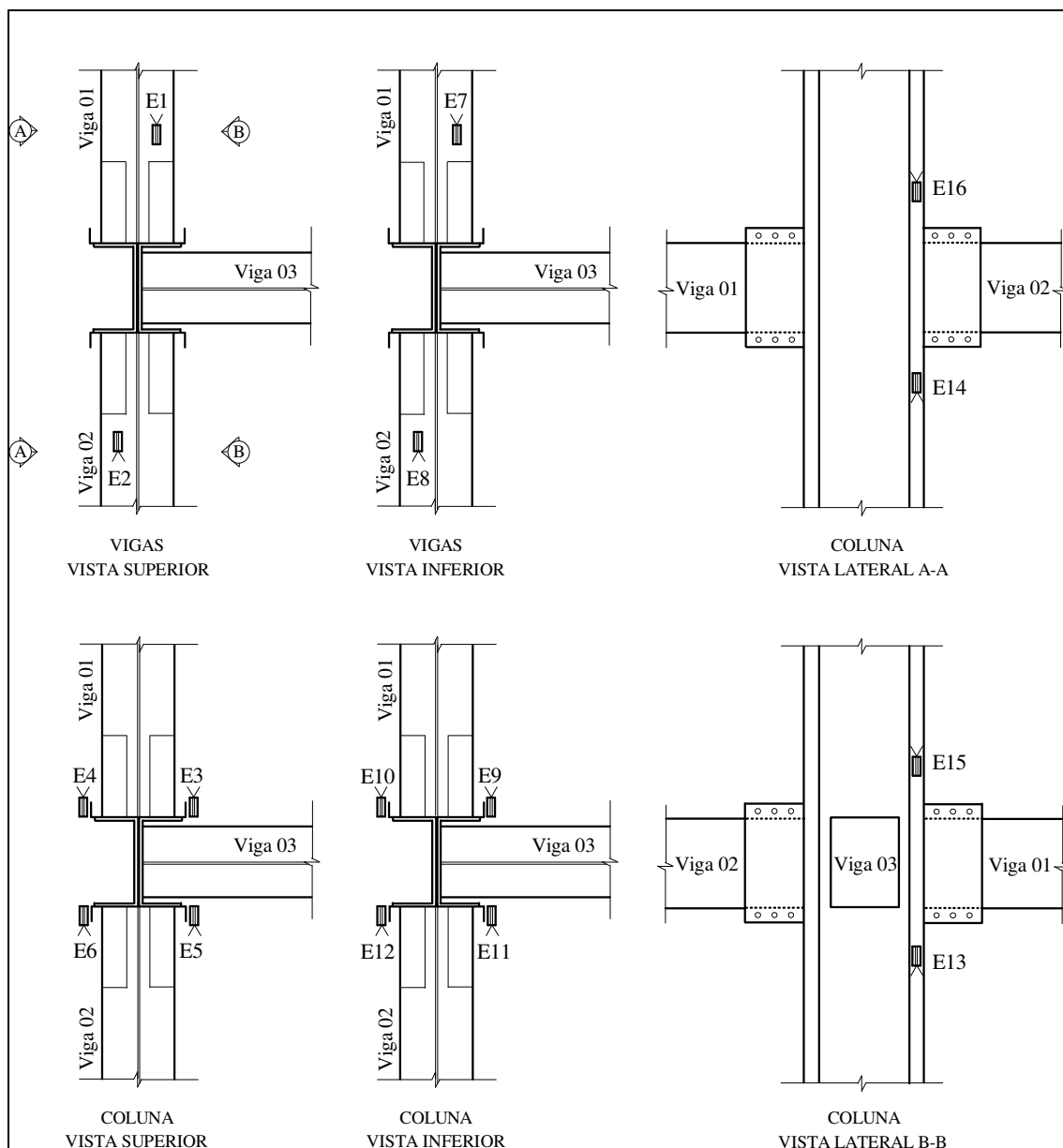


Figura 3.16 – Posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência no Protótipo C-SE.

Tabela 3.4 – Localização e posicionamento dos extensômetros – Protótipo C-SE.

EXTENSÔMETROS	LOCALIZAÇÃO	POSIÇÃO
E1	Viga 1	Flange superior
E2	Viga 2	Flange superior
E7	Viga 1	Flange inferior
E8	Viga 2	Flange inferior
E3, E4, E5, E6	Enrijecedores de borda da coluna	Direção da linha de furos superiores do U Suporte (colados no sentido transversal)

E9, E10, E11, E12	Enrijecedores de borda da coluna	Direção da linha de furos inferiores do U Suporte (colados no sentido transversal)
E13, E14	Enrijecedores de borda da coluna	5,0 cm abaixo da linha de furos inferiores do U Suporte (colados no sentido longitudinal)
E15, E16	Enrijecedores de borda da coluna	5,0 cm acima da linha de furos superiores do U Suporte (colados no sentido longitudinal)

3.9.3. Instrumentação dos Protótipos B-CE e C-CE

A instrumentação dos Protótipos B-CE e C-CE foram idênticas, e aproximadamente parecida à utilizada para os protótipos sem enrijecedores (SE), porém a existência dos enrijecedores de alma na coluna, impôs a necessidade de instrumentá-los. Assim os extensômetros E3, E11, E13, E14, E15, E16, E17, E18 foram arranjados em posições diferentes ao ensaio B-SE, mas a nomenclatura se manteve.

Desta maneira, conseguiu-se instrumentar os quatro enrijecedores de alma soldados na coluna, sendo utilizados os extensômetros E3, E11, E17, E18. Lembrando-se novamente que, em relação ao Protótipo B-SE, esse novo arranjo foi possível devido aos extensômetros E3, E11, E13, E14, E15, E16, E17, E18 não terem apresentados valores de deformações específicas que pudessem caracterizar o escoamento do material.

Os extensômetros E13, E14, E15, E16 foram afixados nos enrijecedores de borda da coluna, no sentido longitudinal, pois conforme verificado no primeiro ensaio, B-SE, houve um mecanismo de plastificação, 50 mm abaixo da linha de furos inferiores do U Suporte. Por conseguinte, pôde-se monitorar tais pontos. No capítulo 4 serão apresentados os resultados das medições que justificaram a mudança na instrumentação.

A Figura 3.17 e a Tabela 3.5 apresentam, respectivamente, o posicionamento e a localização dos extensômetros empregados nos Protótipos B-CE e C-CE.

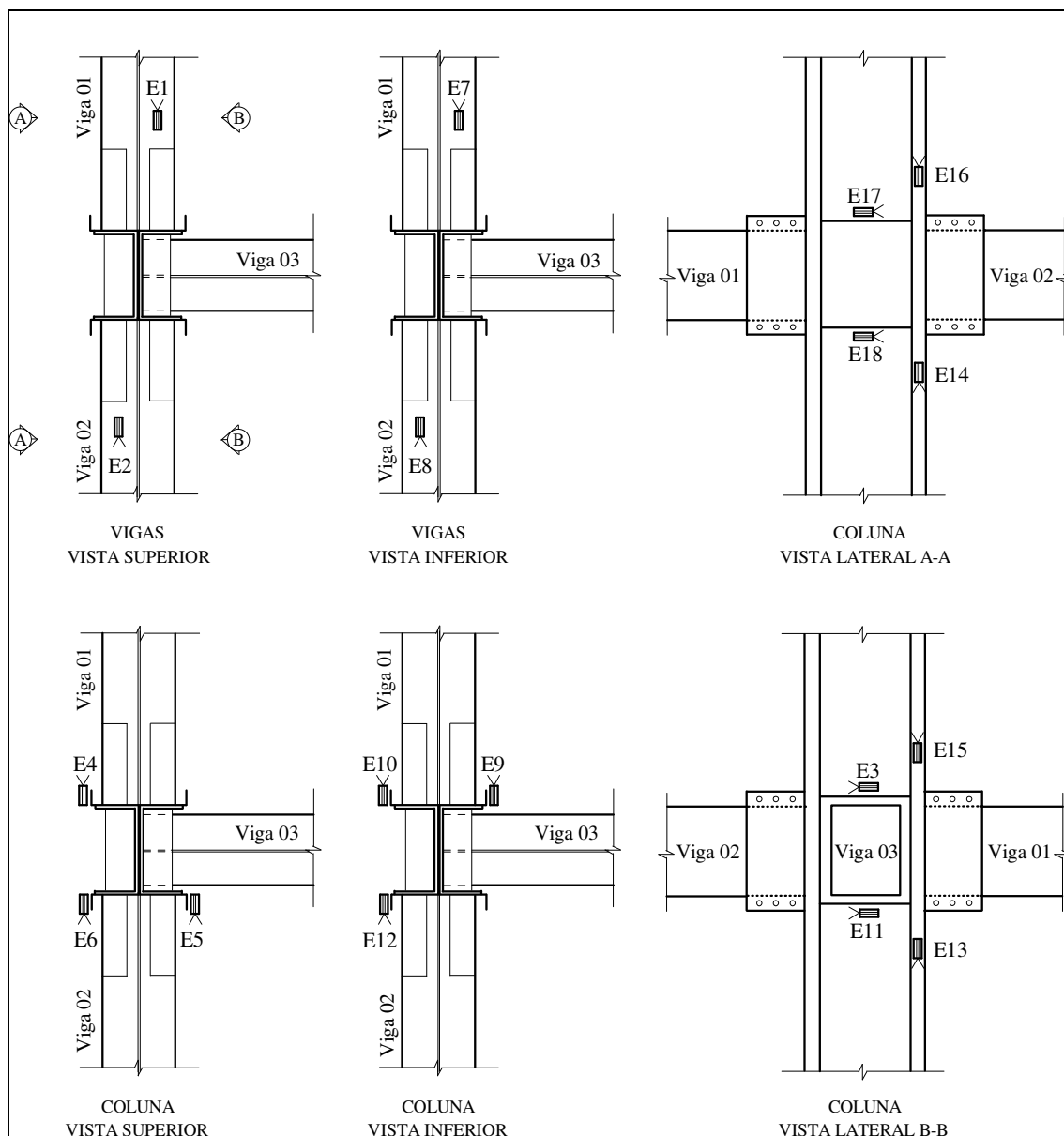


Figura 3.17 – Posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência nos Protótipos B-CE e C-CE.

Tabela 3.5 – Localização e a posicionamento dos extensômetros – Protótipos B-CE e C-CE.

EXTENSÔMETROS	LOCALIZAÇÃO	POSIÇÃO
E1	Viga 1	Flange superior
E2	Viga 2	Flange superior
E7	Viga 1	Flange inferior
E8	Viga 2	Flange inferior
E3, E11	Enrijecedores de alma soldados na coluna (face V3)	Centro do enrijecedor, superior e inferior respectivamente

E4, E5, E6	Enrijecedores de borda da coluna	Direção da linha de furos superiores do U Suporte (colados no sentido transversal)
E9, E10, E12	Enrijecedores de borda da coluna	Direção da linha de furos inferiores do U Suporte (colados no sentido transversal)
E13, E14	Enrijecedores de borda da coluna	5,0 cm abaixo da linha de furos inferiores do U Suporte (colados no sentido longitudinal)
E15, E16	Enrijecedores de borda da coluna	5,0 cm acima da linha de furos superiores do U Suporte (colados no sentido longitudinal)
E17, E18	Enrijeecedores de alma soldados na coluna	Centro do enrijecedor, superior e inferior respectivamente

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. INTRODUÇÃO

Para cada etapa de carga dos ensaios experimentais foram medidos os deslocamentos e as deformações específicas nos protótipos. A partir dos deslocamentos foi possível obter o valor das rotações nas ligações. Essas foram utilizadas para determinar as respectivas curvas momento x rotação e rigidezes.

As deformações específicas foram computadas através de extensômetros elétricos de resistência (EER), colados em posições previamente definidas, sendo adotados valores positivos para indicar tração e valores negativos para indicar compressão.

Assim, serão apresentados os principais resultados obtidos para os Protótipos B-SE, B-CE, C-SE e C-CE. As análises, discussões e comparações são desenvolvidas ao longo da apresentação dos resultados obtidos em cada ensaio. Os cálculos do dimensionamento de cada protótipo são apresentados no Anexo II.

4.1.1. Protótipo B-SE

O protótipo denominado B-SE possui vigas 01 e 02 com espessuras de 2,00 mm e não contém enrijecedores de alma soldados na coluna. Foi realizado um único ensaio, e a carga última obtida foi de 17,06 kN, correspondendo a solicitação de 15,44 kNm nas ligações.

Os gráficos das Figuras 4.1 e 4.2 mostram as deformações específicas da coluna e das vigas, respectivamente, de acordo com a localização dos extensômetros elétricos de resistência posicionados segundo apresentado na Figura 3.14, item 3.9.1.

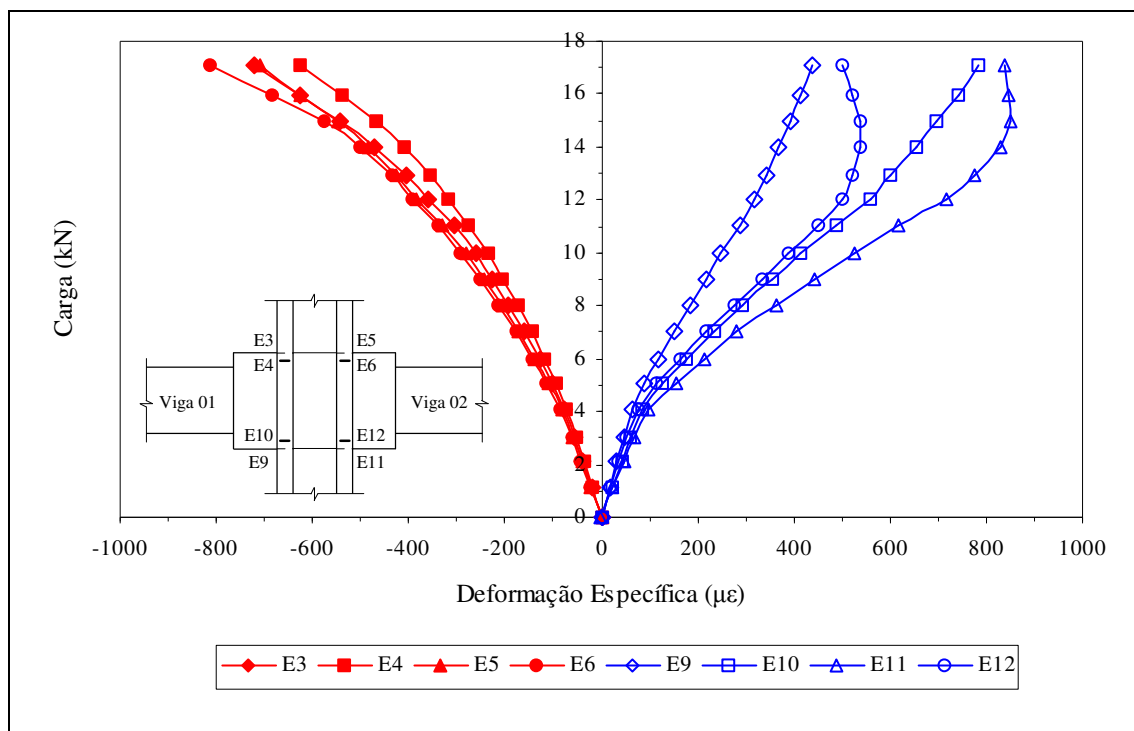


Figura 4.1 – Gráfico Carga x Deformação da coluna do Protótipo B-SE.

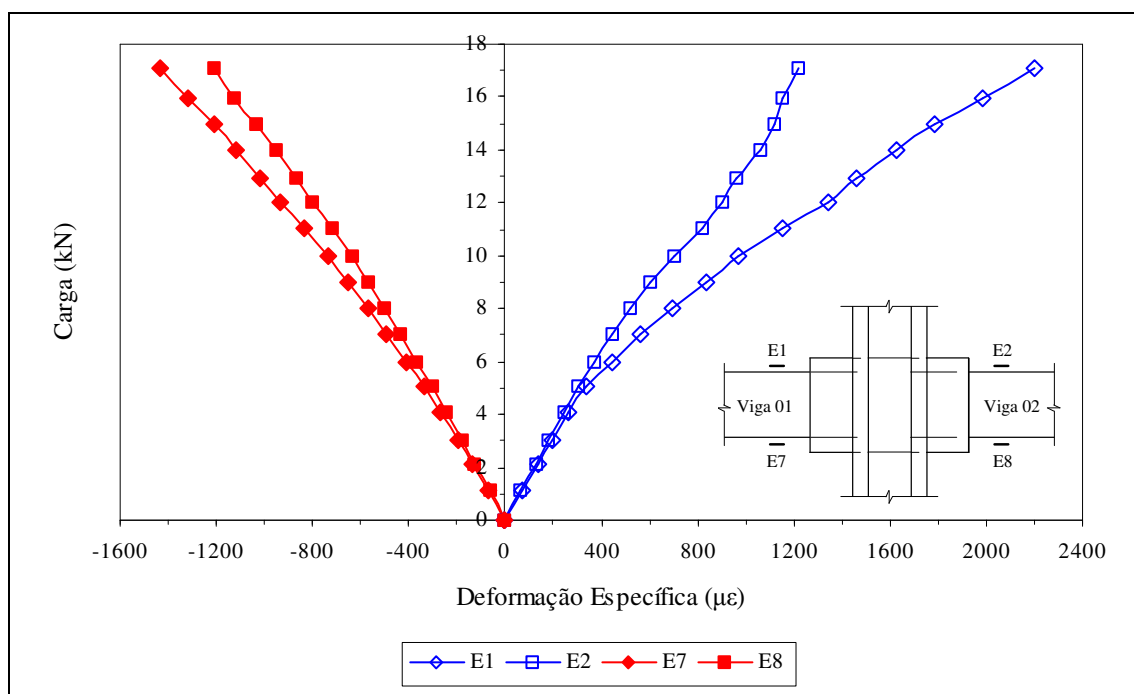


Figura 4.2 – Gráfico Carga x Deformação das vigas do Protótipo B-SE.

Os valores máximos das deformações específicas registradas pelos extensômetros colados na coluna, para a carga última experimental de 17,06 kN, foram de $-811,44 \mu \text{ strain}$ (E6) localizado no enrijecedor de borda da região superior às vigas, e $849,36 \mu \text{ strain}$ (E11) no enrijecedor de borda da região inferior às vigas.

Em relação as vigas, os valores máximos das deformações específicas, para a mesma carga, 17,06 kN, foram de $-1431,84 \mu \text{ strain}$ (E7) e $2202,24 \mu \text{ strain}$ (E1) para os flanges inferiores e superiores, respectivamente, da viga 01, e de $-1210,32 \mu \text{ strain}$ (E8) e $1221,12 \mu \text{ strain}$ (E2) para os flanges inferiores e superiores, respectivamente, da viga 02. Sendo, obviamente, tracionados os flanges superiores e comprimidos os inferiores.

Os resultados dos ensaios de caracterização do material das colunas e das vigas, apresentados no item 3.4 indicam $f_y = 385,8 \text{ MPa}$ e $f_u = 515,4 \text{ MPa}$. Assim, a deformação específica de escoamento é na ordem de $1882,0 \mu \text{ strain}$, obtida da divisão da tensão nominal $385,8 \text{ MPa}$ pelo módulo de elasticidade considerado 205000 MPa .

Portanto, verifica-se que os extensômetros posicionados na coluna não indicam que os pontos analisados tenham atingido a tensão de escoamento, pois, conforme apresentado na Figura 4.1, vê-se que todos estes pontos apresentam valores de deformações específicas menores que $850 \mu \text{ strain}$.

Para os extensômetros posicionados nas vigas, constata-se que para a carga de 15,96 kN ocorreu o escoamento do flange superior da viga 01, no qual o extensômetro E1 registrou uma deformação específica de $1987,44 \mu \text{ strain}$.

Pelo gráfico da Figura 4.2, ainda é possível observar que, quando a carga aplicada atingiu por volta de 5 kN, o extensômetro E1 começou a apresentar disparidade em relação aos demais. Essa divergência supostamente deve-se a imperfeições físicas e geométricas da peça, visto que as vigas foram compostas pela união de dois perfis independentes, através de solda intermitente.

A Figura 4.3 apresenta o gráfico Carga x Deformação específica dos extensômetros instalados na chapa do U Suporte na altura do parafuso.

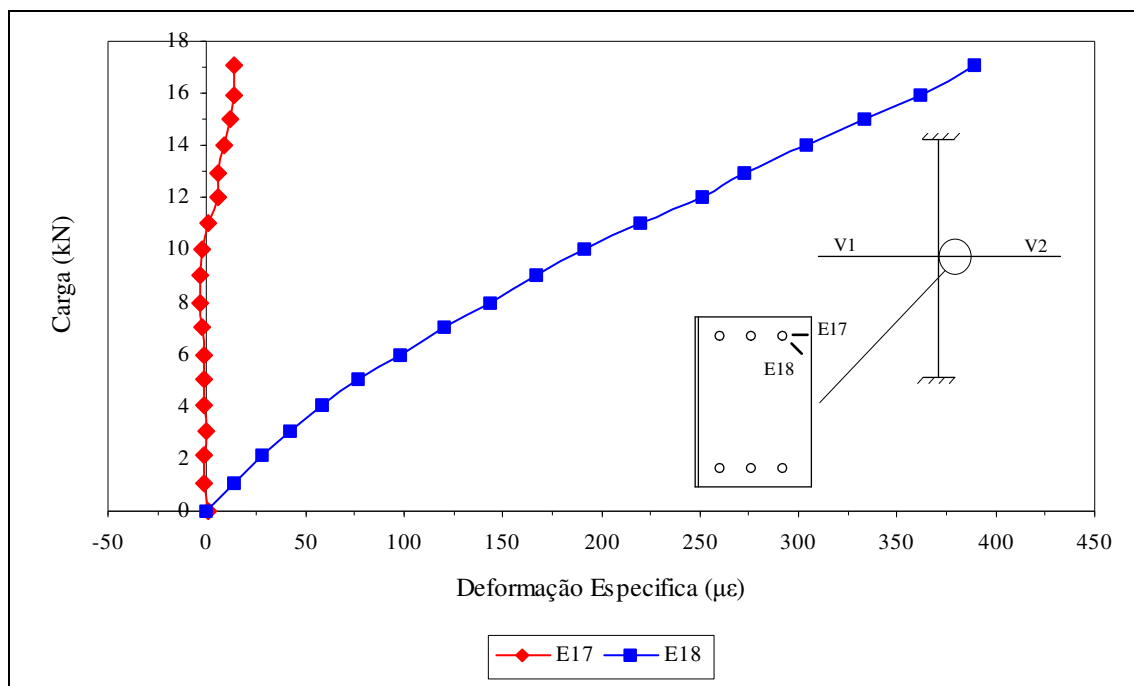


Figura 4.3– Gráfico Carga x Deformação do U Suporte do Protótipo B-SE.

O extensômetro E17, que em conjunto com E18, verificavam a possibilidade de rasgamento da chapa do U Suporte, apresentaram, respectivamente, deformação máxima de 13,68 μ strain e 389,28 μ strain. Com isso, certificou-se que os pontos analisados na ligação não atingiram o escoamento e que o efeito de rasgamento da chapa do U Suporte, na altura do parafuso, não foi o predominante, como constatado no dimensionamento apresentado no Anexo II. Destaca-se que esses extensômetros foram colados nessa posição visando o monitoramento similar aos ensaios realizados nas pesquisas anteriores.

O comportamento da coluna é ilustrado na Figura 4.4 em função dos deslocamentos indicados nos defletômetros D1 e D2 e nos LVDT's L2 e L3. Os valores máximos dos deslocamentos indicados em D1 e D2, para a carga última de ensaio, 17,06 kN, foram, em módulo, de 0,93 mm e 0,92 mm, respectivamente. Os LVDT's L2 e L3 registraram valores de deslocamentos ínfimos, próximos a zero, e por isso não estão indicados no gráfico da Figura 4.4.

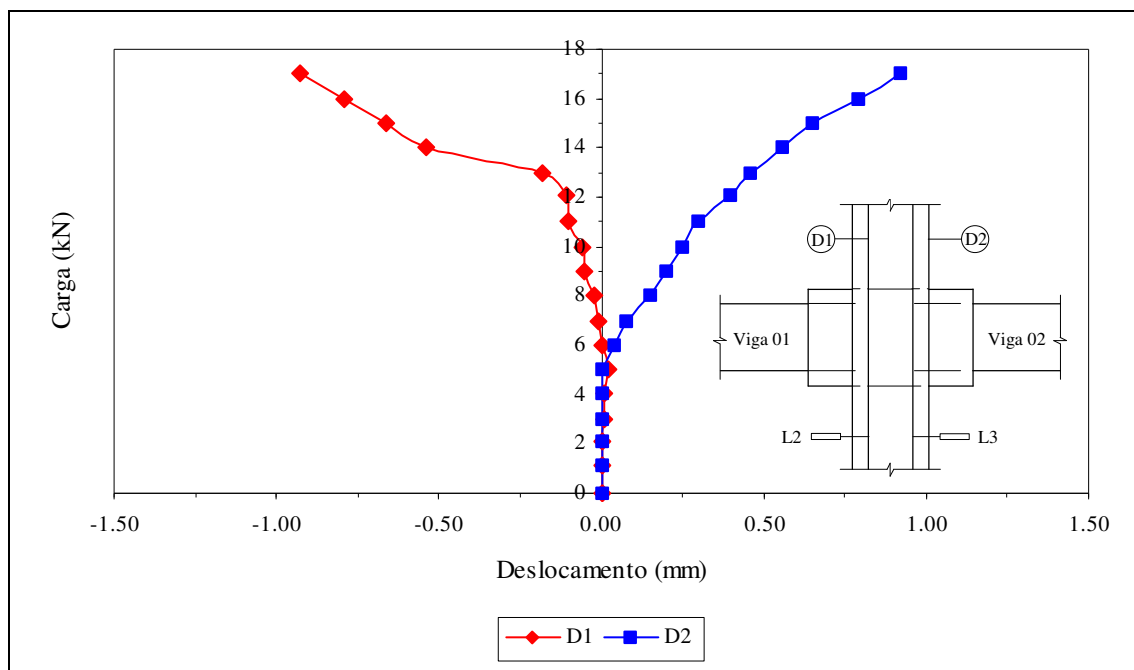


Figura 4.4 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da coluna do Protótipo B-SE.

Analisando o campo de deslocamento das vigas, têm-se para a viga 01, as leituras dos defletômetros D3, D4 e D5 e do LVDT L1 e, para viga 02, as leituras dos defletômetros D6, D7 e D8 e do LVDT L4. Os gráficos das Figuras 4.5 e 4.6 mostram os valores dos deslocamentos registrados pela instrumentação posicionada nas vigas 01 e 02, respectivamente, do Protótipo B-SE.

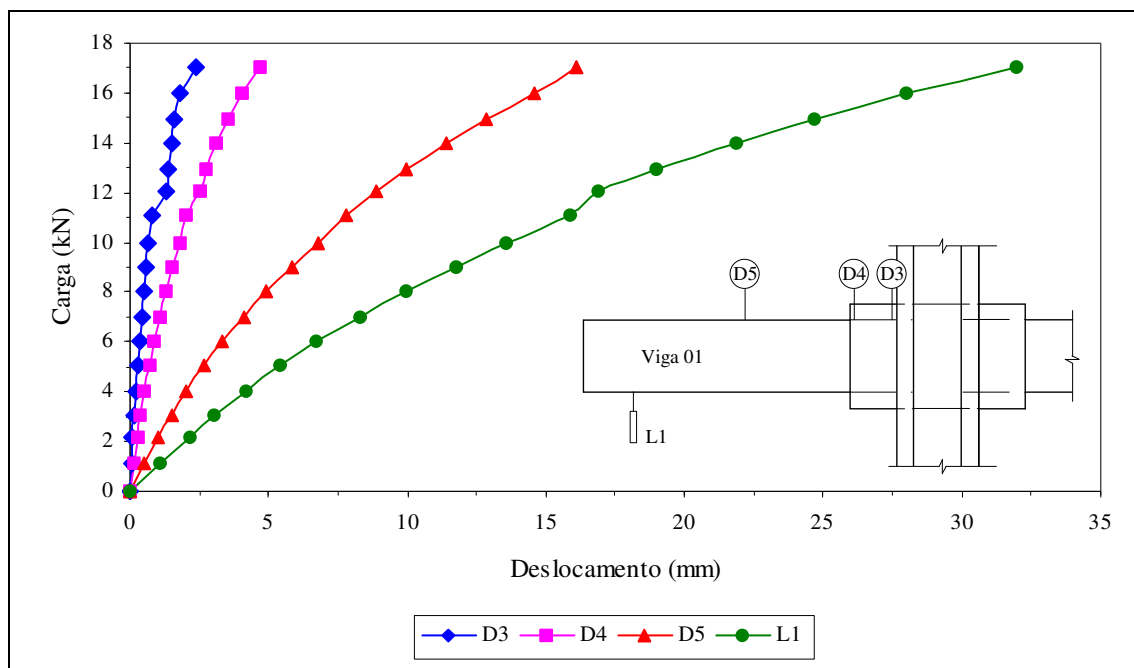


Figura 4.5 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 01
Protótipo B-SE.

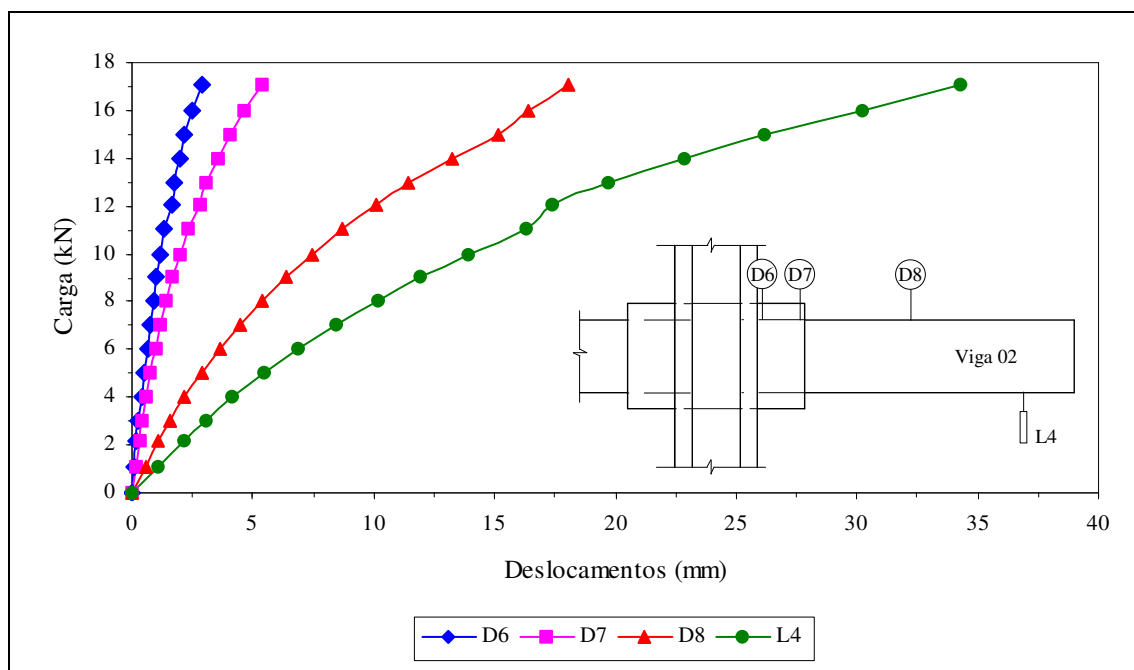


Figura 4.6 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 02
Protótipo B-SE.

No gráfico da Figura 4.7 são apresentadas, para a carga última de ensaio, 17,06 kN, as deformadas da viga 01 e da viga 02.

Observa-se que os deslocamentos máximos foram, obviamente, nas extremidades das vigas, medidos pelos LVTD's L1 e L4. Atenta-se também a simetria de deformadas e aos deslocamentos nulos próximo a coluna.

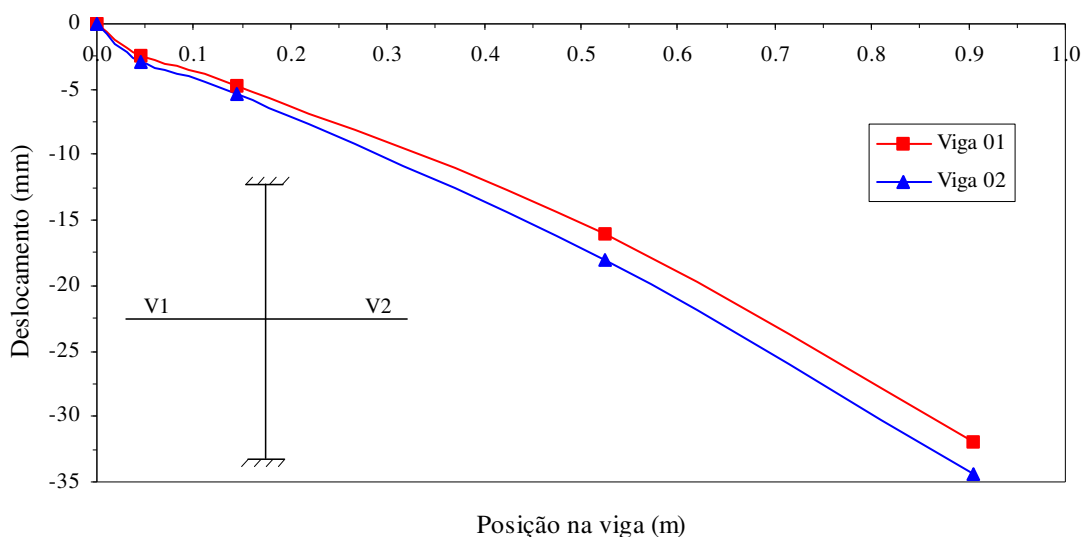


Figura 4.7 – Deformadas das vigas do Protótipo B-SE para a carga de 17,06 kN.

As rotações das vigas foram determinadas para cada passo de carga. Assim, as rotações foram calculadas de forma a medir as inclinações das vigas em relação ao eixo reto inicial das mesmas. Constata-se acima, Figura 4.7, que esses pontos, onde foram registrados as deformadas, não resultam numa deformada retilínea, desta forma foi feito um ajuste linear, após a aplicação de cada passo de carga, utilizando para isso o método dos mínimos quadrados.

As curvas momento x rotação, Figura 4.8, foram determinadas através dos momentos fletores para cada passo de carga e as suas respectivas rotações relativas. Os momentos fletores foram definidos multiplicando a carga aplicada na viga pela distância entre o ponto de aplicação da mesma e a face da coluna. Como o carregamento foi simétrico, não houve rotação da coluna em relação às vigas, e a rotação relativa utilizada para cada passo de carga foi somente a rotação das vigas.

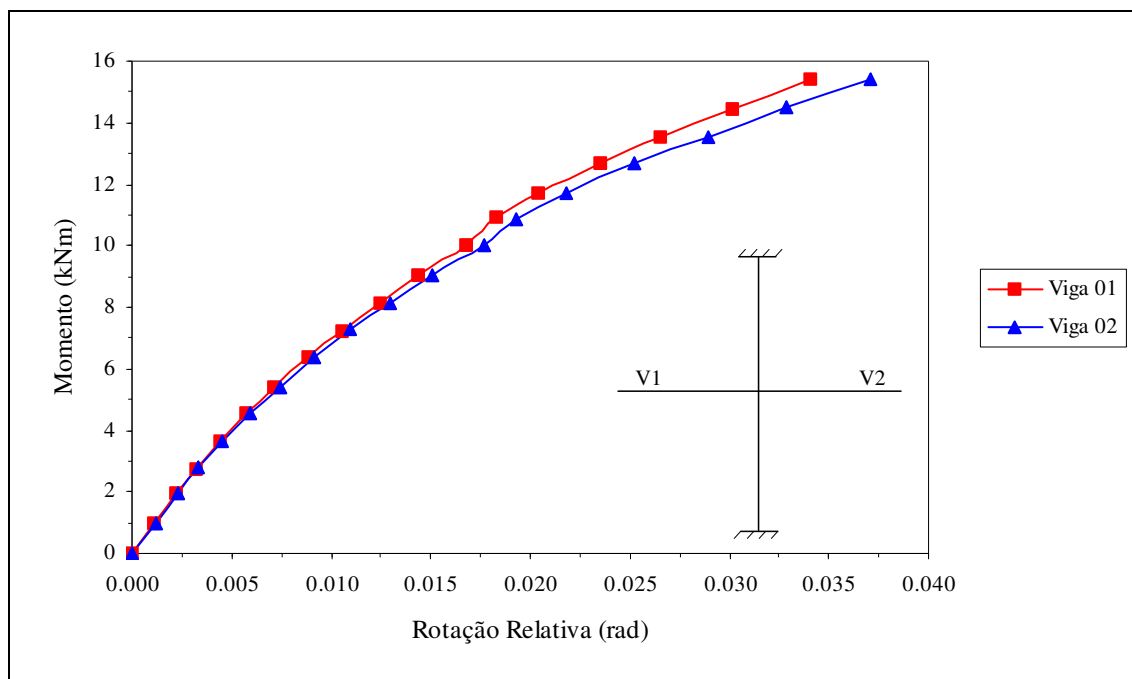


Figura 4.8 – Curvas momento-rotação das ligações do Protótipo B-SE.

Os valores máximos das rotações relativas observados no ensaio foram de 0,03412 rad e 0,03709 rad, respectivamente para a viga 01 e viga 02, para um momento último experimental igual a 15,44 kNm.

As rigidezes iniciais das ligações foram calculadas de acordo com o método da inclinação inicial, indicado no item 2.4.1, sendo assim, encontrados os valores $k = 819,84$ kNm/rad, para a ligação viga 01–coluna e $k = 802,95$ kNm/rad, para a ligação viga 02–coluna.

A carga última aplicada atingiu 17,06 kN, mas o escoamento se deu para uma carga inferior. O mecanismo de colapso observado foi a plastificação devido a concentração de tensões nos enrijecedores de borda da coluna, na região inferior a viga 02, para a carga de 12,45 kN, conforme ilustram as fotos da Figura 4.9.

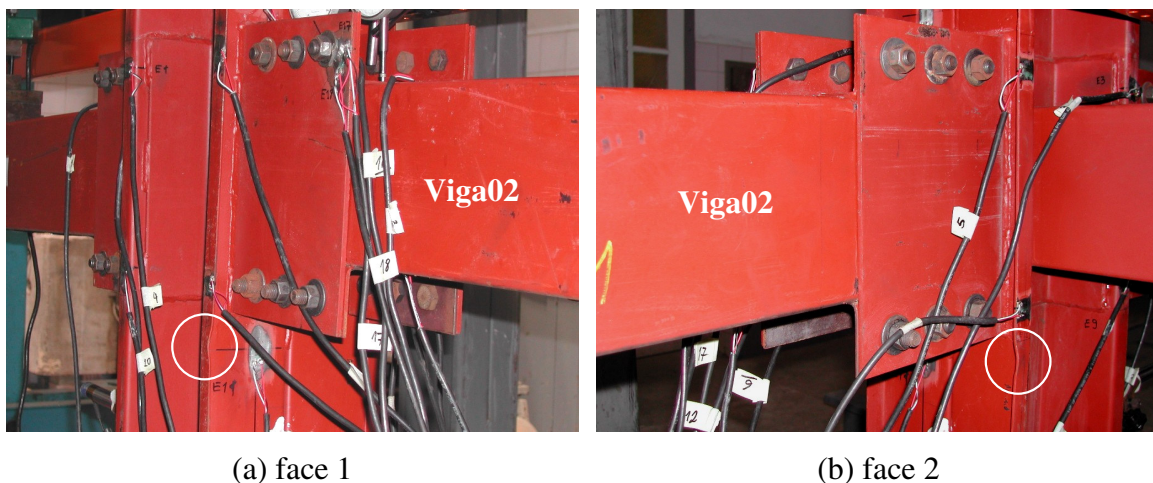


Figura 4.9 – Mecanismo de plastificação nos enrijecedores de borda da coluna – Viga 02.

Devido a esse colapso observado tornou-se indispensável a monitoração desses pontos nos ensaios seguintes.

Atentou-se também que, a cada incremento de carga, os flanges da coluna foram se deformando nas posições superiores e inferiores do U suporte, ocorrendo, assim, uma alteração de forma na região da ligação. Foi mensurado, para carga de 17,06 kN, uma abertura e um fechamento da ordem de 11 mm, em relação à posição inicial. A Figura 4.10 ilustra essa deformação.

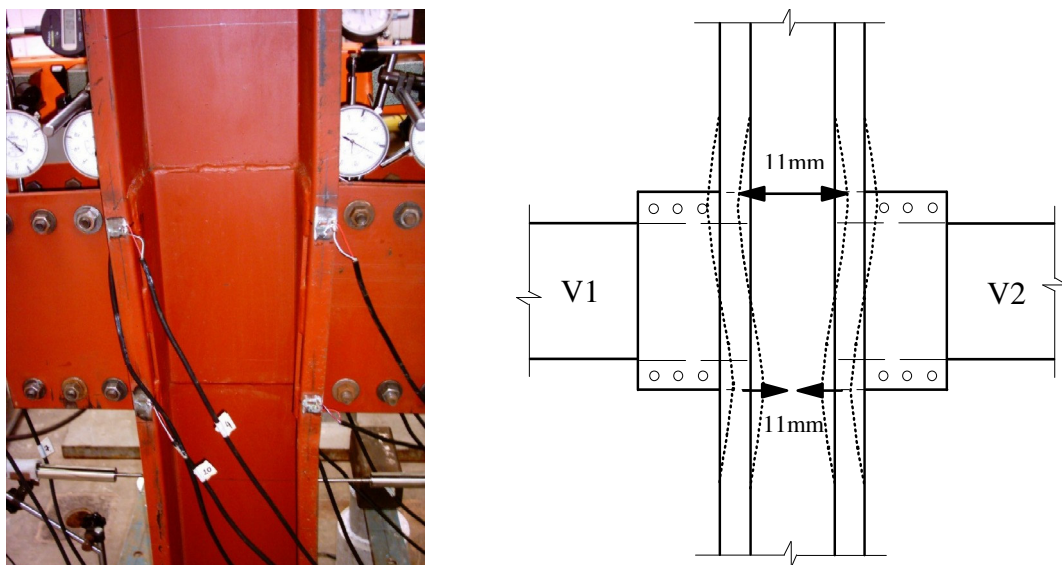


Figura 4.10 – Deformação dos flanges da coluna do Protótipo B-SE.

Essa deformação considerável nos flanges da coluna, já era prevista conforme dimensionamento apresentado nos cálculos, os quais foram feitos segundo as prescrições da norma americana AISI (2001) e das normas brasileiras NBR 14762:2001 e NBR 8800:1986 e são apresentados no Anexo II. Ressalta-se que esses cálculos foram feitos com valores de resistência de cada material obtidos experimentalmente em ensaios de caracterização.

Assim, a ausência dos enrijecedores precipitou o colapso da ligação e, comparando os resultados experimentais com o dimensionamento proposto no Anexo II, observa-se que no dimensionamento, a capacidade resistente da ligação é superior à obtida nos resultados de ensaio.

No item seguinte são apresentados os resultados de um novo protótipo, semelhante ao Protótipo B-SE, porém, com enrijecedores de alma na coluna, de modo a quantificar a resistência e o aumento de rigidez da ligação.

4.1.2. Protótipo B-CE

Conforme já mencionado, o Protótipo B-CE é idêntico ao Protótipo B-SE, diferindo somente na inclusão de enrijecedores de alma soldados nos flanges da coluna. Assim devido a necessidade de instrumentar tais enrijecedores, optou-se em eliminar os extensômetros que apresentaram no ensaio precedente valores de deformações específicas baixos e distantes do escoamento do material. Então os extensômetros posicionados nos flanges da coluna e no U suporte foram retirados.

Foram também posicionados, no sentido longitudinal, extensômetros nos enrijecedores de borda da coluna, em locais onde pôde-se comprovar visualmente a ocorrência do mecanismo de plastificação (Fig. 4.9), porém a numeração se manteve, conforme descrito no capítulo anterior.

Os resultados e as análises do ensaio experimental do Protótipo B-CE são apresentados na mesma sequência mostrada para o Protótipo B-SE. A carga última de ensaio foi de 21,96 kN, correspondendo a solicitação de 19,87 kNm nas ligações.

Os gráficos das Figuras 4.11 e 4.12 expõem as deformações específicas da coluna, de acordo com a localização dos EER posicionados segundo apresentado na Figura 3.17, item 3.9.3.

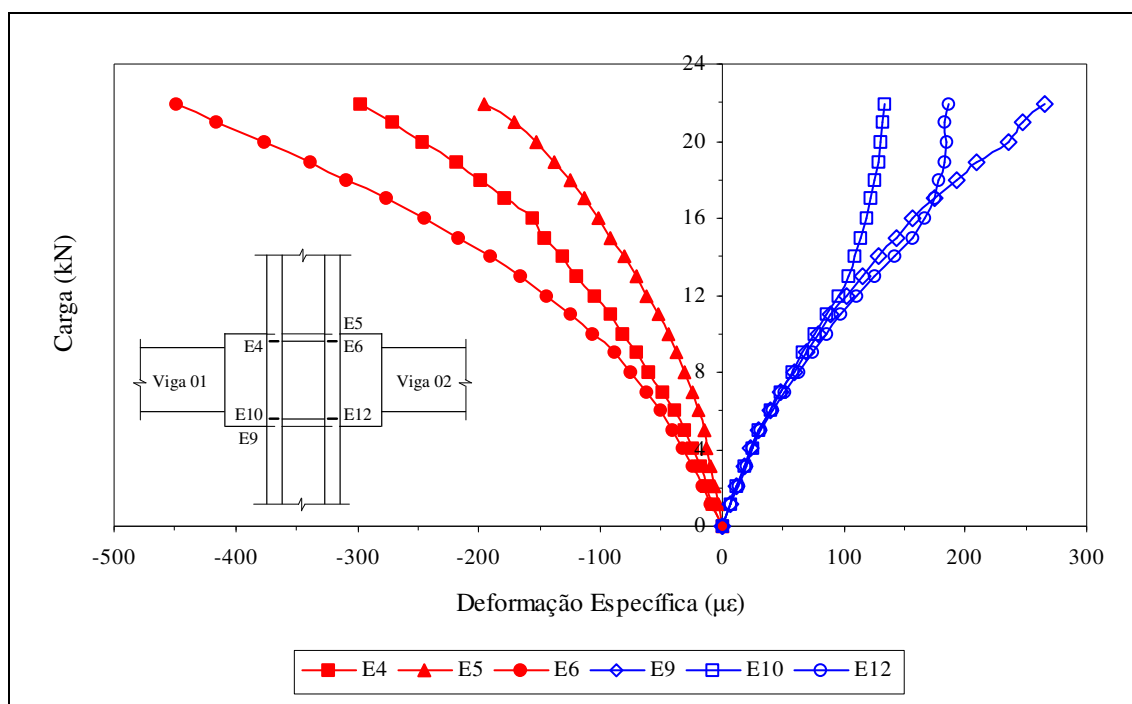


Figura 4.11 – Gráfico Carga x Deformação da coluna do Protótipo B-CE, extensômetros em sentido transversal à borda.

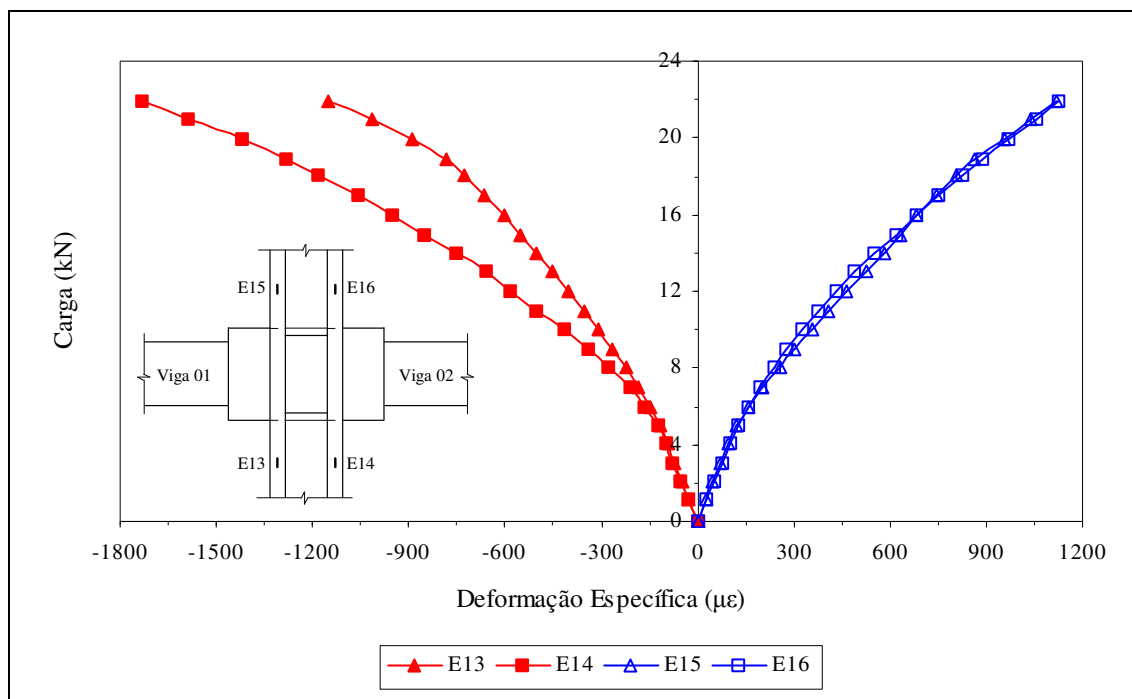


Figura 4.12 – Gráfico Carga x Deformação da coluna do Protótipo B-CE, extensômetros em sentido longitudinal à borda.

Como pode ser visto, todos extensômetros posicionados na coluna, foram colados nos enrijecedores de borda, região essa susceptível a ocorrência de colapso local e, portanto considerada a parte frágil da coluna.

Constata-se que os extensômetros colados em sentido transversal a borda, direção da linha de furos do U Suporte, (E4, E5, E6, E9, E10, E12), Figura 4.11, apresentaram deformações específicas baixas e inferiores à tensão de escoamento do material. Com relação ao ensaio antecedente, sem os enrijecedores de alma soldados na coluna, Protótipo B-SE, observa-se que, após a inclusão dos enrijecedores de alma, Protótipo B-CE, os níveis de deformação nos enrijecedores de borda da coluna reduziram em média 75%. Esse resultado já era esperado, como consequência direta da utilização dos enrijecedores.

Por outro lado, atenta-se que, os extensômetros colados no sentido longitudinal dos enrijecedores (E13, E14, E15, E16), Figura 4.12, exibiram para carga última de ensaio, 21,96 kN, valores de deformações específicas altos e bem próximos à tensão de escoamento do aço. O valor máximo de deformação específica medido foi $-1729,92 \mu$

strain (E14). Em relação ao ensaio antecedente sem enrijecedores, não se têm esses valores para efeitos comparativos, porém observa-se que com a utilização dos enrijecedores de alma soldados nos flanges da coluna, a ligação suportou uma maior carga de ensaio (21,96 kN) e ainda sim não ocorreu o mecanismo de plastificação nas bordas da coluna, conforme ilustrado na Figura 4.9.

A Figura 4.13 apresenta o gráfico Carga x Deformação específica dos extensômetros posicionados nos flanges das vigas.

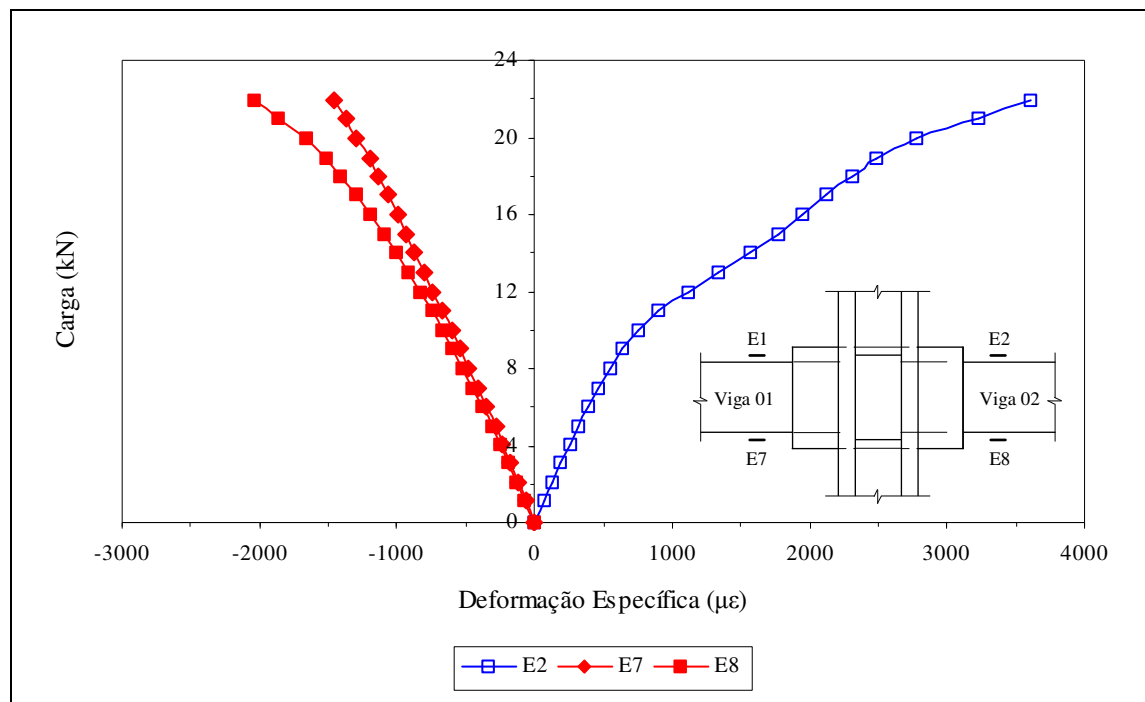


Figura 4.13– Gráfico Carga x Deformação das vigas do Protótipo B-CE.

Os valores máximos das deformações específicas das vigas do Protótipo B-CE, para a carga última do ensaio, 21,96 kN, foram de 3600,24 μ strain (E2) e – 2034,72 μ strain (E8) para o flange superior e inferior da viga 02, e de –1454,4 μ strain (E7) para o flange inferior da viga 01. Semelhantemente ao Protótipo B-SE, o escoamento da viga se deu com uma carga próxima de 16 kN, onde o extensômetro E2 posicionado no flange superior da viga 02 indicou uma deformação específica de 1953,84 μ strain.

O extensômetro E1 apresentou problemas de leitura e por isso não está indicado no gráfico da Figura 4.13 e, em relação ao extensômetro E2, observa-se uma deformação superior aos demais, essa divergência se deve supostamente a imperfeições

físicas e geométricas da peça, visto que as vigas foram compostas pela união de dois perfis independentes, através de solda intermitente.

A Figura 4.14 apresenta o gráfico Carga x Deformação específica dos extensômetros instalados em cada enrijecedor de alma soldado nos flanges da coluna, os extensômetros E3 e E11 estão em posições opostas à vista apresentada (face a viga 03).

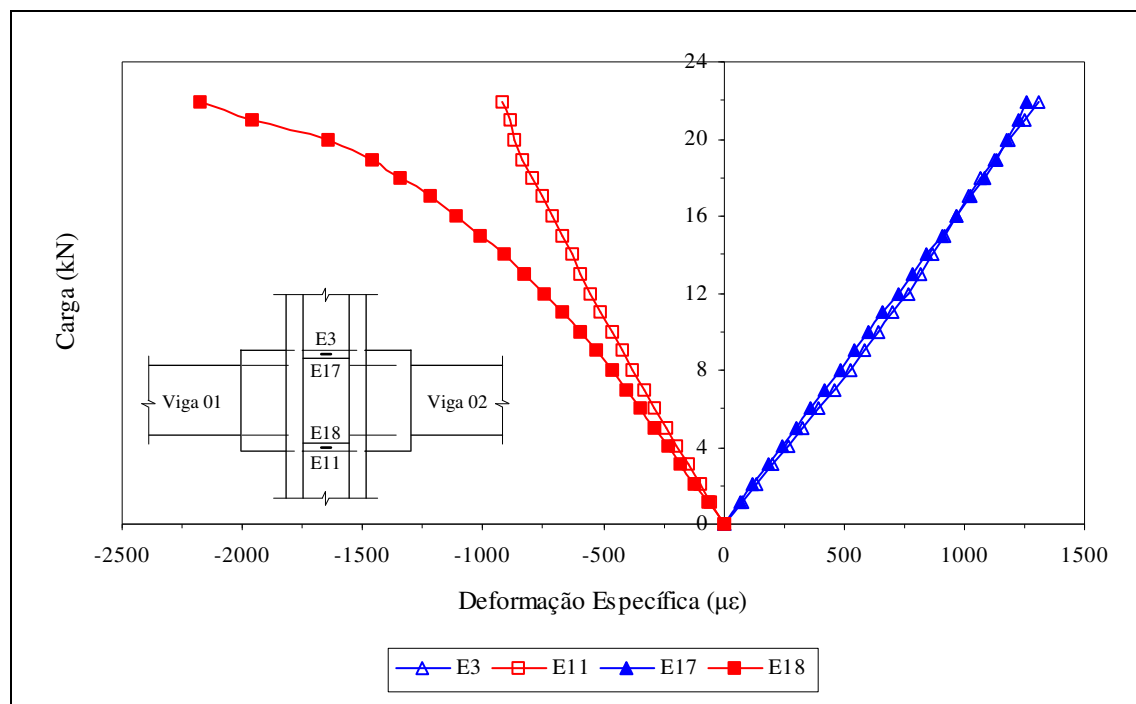


Figura 4.14 – Gráfico Carga x Deformação dos enrijecedores de alma da coluna do Protótipo B-CE.

Neste gráfico pode-se observar tração nos enrijecedores superiores (E3, E17) e, compressão nos enrijecedores inferiores (E11, E18). Assim os valores máximos das deformações específicas registradas nesses enrijecedores, para a carga última do ensaio, 21,96 kN, foram de 1309,44 µ strain (E3) e 1261,44 µ strain (E17) para os enrijecedores superiores e de -922,8 µ strain (E11) e -2174,4 µ strain (E18) para os enrijecedores inferiores.

Os resultados dos ensaios de caracterização do material dos enrijecedores, apresentados no item 3.4, indicam $f_y = 327,2$ MPa e $f_u = 436,8$ MPa. A deformação específica de escoamento é na ordem de 1596,0 µ strain (Tab. 3.2). Assim, o

escoamento do enrijecedor se deu para carga de 19,93 kN, onde o extensômetro E18 indicou uma deformação específica de $-1645,44 \mu \text{ strain}$.

O comportamento da coluna é ilustrado na Figura 4.15 em função dos deslocamentos indicados nos defletômetros D1 e D2 e nos LVDT's L2 e L3. Os valores máximos dos deslocamentos indicados em D1 e D2, para a carga última de ensaio, 21,96 kN, foram, em módulo, de 0,35 mm e 0,26 mm, respectivamente. Esses valores não são significativos, e cabe salientar que, eles correspondem somente a 16% dos valores registrados no Protótipo B-SE, onde não havia enrijecedores de alma soldados na coluna. Os LVDT's L2 e L3 registraram valores de deslocamentos nulos, e por isso não estão indicados no gráfico da Figura 4.15.

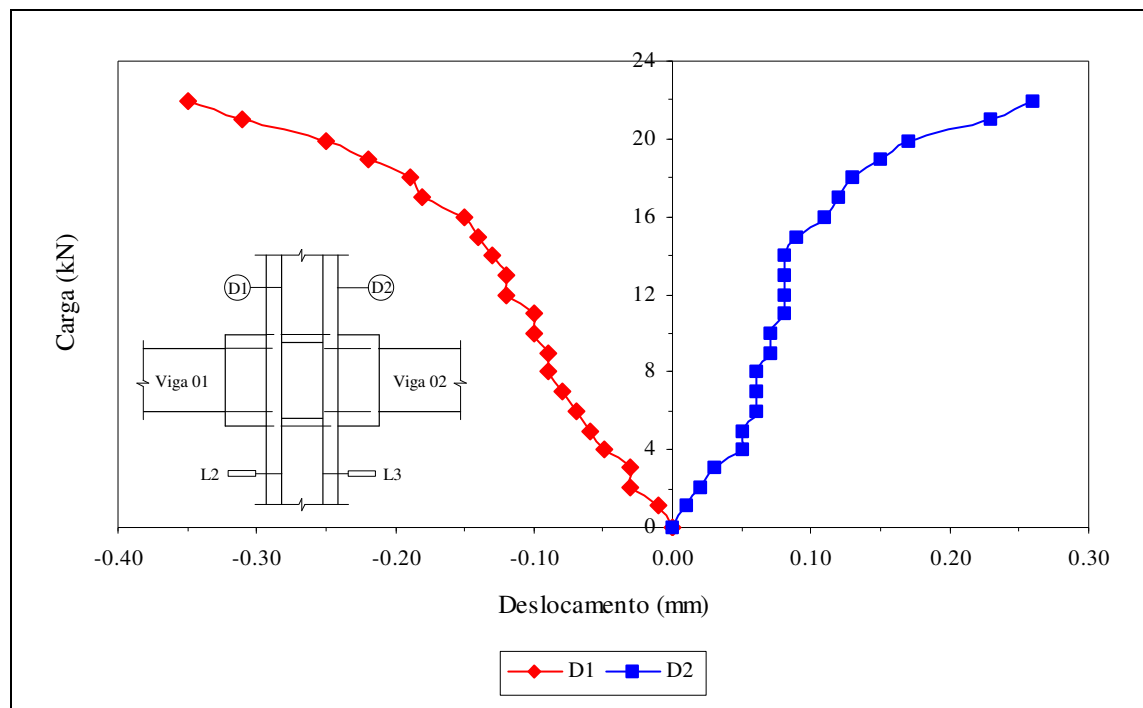


Figura 4.15 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da coluna do Protótipo B-CE.

Analisando o campo de deslocamento das vigas, têm-se para a viga 01, as leituras dos defletômetros D3, D4 e D5 e do LVDT L1 e, para viga 02, as leituras dos defletômetros D6, D7 e D8 e do LVDT L4. Os gráficos das Figuras 4.16 e 4.17 mostram os valores dos deslocamentos registrados pela instrumentação posicionada nas vigas 01 e 02, respectivamente, do Protótipo B-CE.

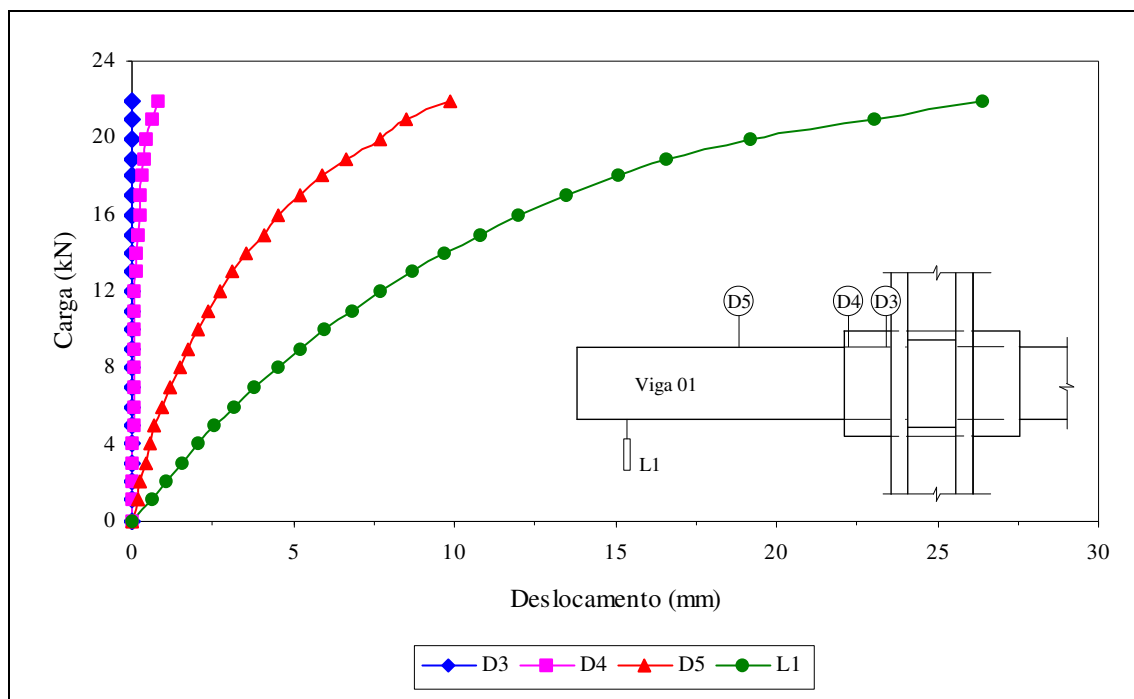


Figura 4.16 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 01 – Protótipo B-CE.

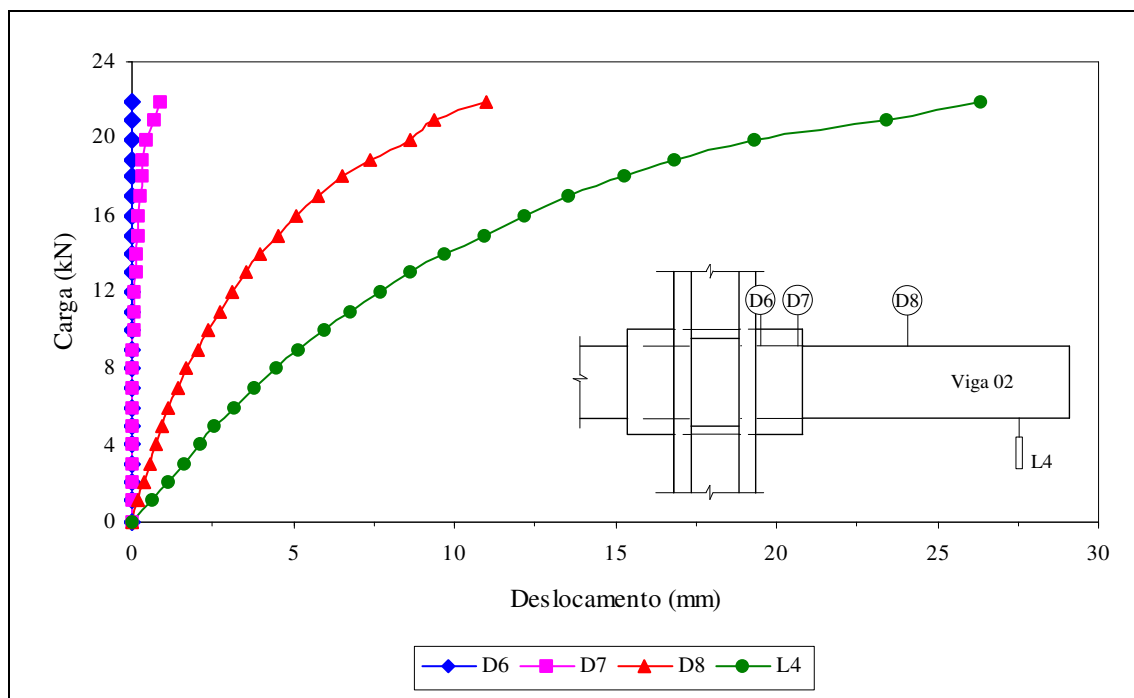


Figura 4.17 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 02 – Protótipo B-CE.

No gráfico da Figura 4.18 são apresentadas, para a carga última de ensaio, 21,96 kN, as deformadas da viga 01 e da viga 02. Analogamente ao ensaio precedente, ocorreu simetria de deformadas e deslocamentos nulos próximo à coluna.

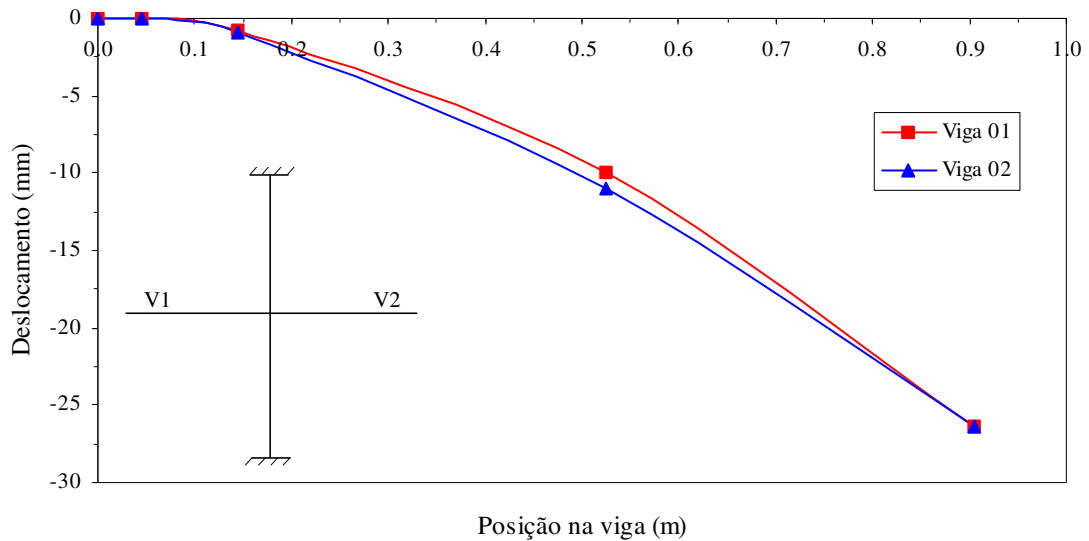


Figura 4.18 – Deformadas das vigas do Protótipo B-CE para a carga de 21,96 kN.

Comparando o resultado das deformadas do Protótipo B-CE com o Protótipo B-SE, verifica-se que a presença dos enrijecedores de alma soldados nos flanges da coluna, na região da ligação, atenuou as deformadas em 59%. Essa redução já era esperada, visto a contenção dos flanges pelos enrijecedores.

O procedimento adotado para a determinação das rotações relativas e rigidezes das ligações, foi o mesmo utilizado para o Protótipo B-SE. As curvas momento x rotação estão indicadas no gráfico da Figura 4.19.

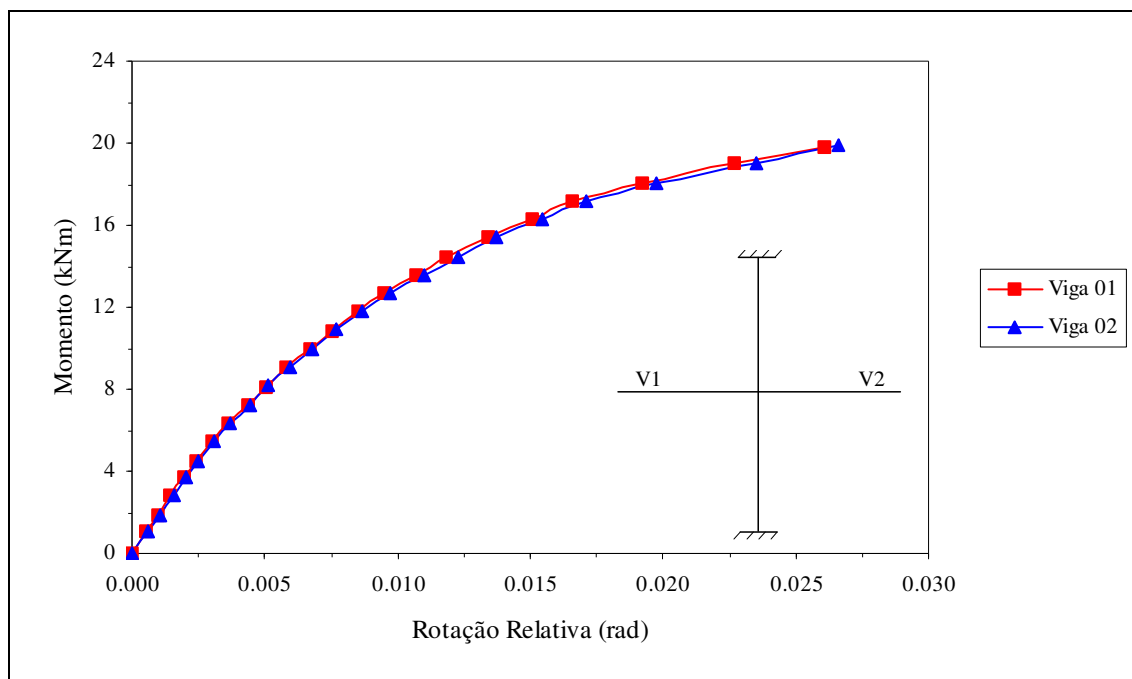


Figura 4.19 – Curvas momento-rotação das ligações do Protótipo B-CE.

Os valores máximos das rotações relativas observados no ensaio foram de 0,02611 rad e 0,02661 rad, respectivamente, para a viga 01 e viga 02, para um momento último experimental igual a 19,87 kNm.

As rigidezes iniciais das ligações viga-coluna encontradas, de acordo com o método da inclinação inicial, indicado no item 2.4.1 foram: $k = 1882,17 \text{ kNm/rad}$, para a ligação viga 01–coluna e $k = 1795,71 \text{ kNm/rad}$, para a ligação viga 02–coluna.

A carga última aplicada atingiu 21,96 kN, mas o mecanismo de colapso se deu com uma carga inferior. Esse mecanismo foi caracterizado pelo colapso da viga 02, por escoamento do flange superior, para a carga de 15,98 kN.

Verificou-se também ao princípio de rasgamento das cantoneiras de ligação que ligavam a viga 01 ao U suporte, caracterizado pela ruptura das mesmas nas quinas, quando a carga de ensaio era de 17,45 kN. A Figura 4.20b mostra, em detalhe, esse efeito.

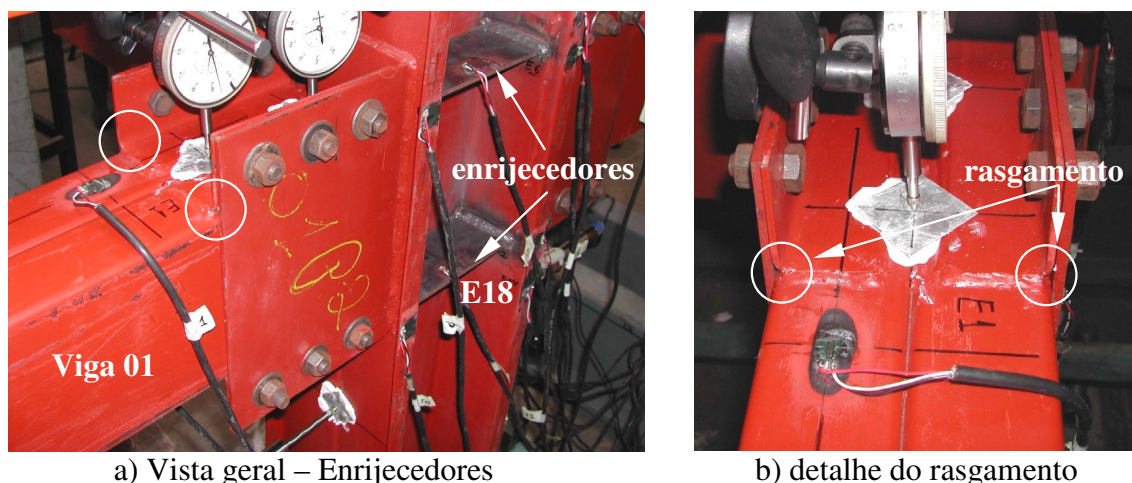


Figura 4.20 – Fotos que mostram os enrijecedores de alma e o colapso por rasgamento das cantoneiras de ligação superiores da viga 01.

Comparando a resistência experimental das cantoneiras com o dimensionamento proposto no Anexo II, observa-se que no dimensionamento, a capacidade resistente das cantoneiras são superiores. Isso pode ser explicado ao fato de se ter maior concentração de tensões nas quinas das cantoneiras, visto o esforço solicitante estar excêntrico às mesmas.

Nota-se que para esse ensaio, onde se tinha enrijecedores na alma da coluna, não houve o deslocamento entre os flanges da mesma. Verificou-se que os deslocamentos, do Protótipo B-CE, foram inferiores a 2 mm, evidenciando assim, a eficiência dos enrijecedores de alma soldados na coluna. Nesse caso, observou-se o escoamento do enrijecedor inferior no qual estava posicionado o extensômetro E18, Figura 4.20a, para uma carga de ensaio de 19,93 kN.

Comparando os resultados experimentais com o dimensionamento proposto no Anexo II observa-se que no dimensionamento, a capacidade resistente da ligação é superior, à obtida nos resultados experimentais. Essa diferença observada pode ser explicada em função das hipóteses adotadas para o comportamento da ligação (Anexo II), tais como determinação dos esforços solicitantes de cálculo nas soldas, parafusos, Cantoneiras de Ligação, U Suporte e na alma e flanges da coluna junto a ligação.

4.1.3. Protótipo C-SE

O Protótipo C-SE é similar ao B-SE, item 4.2, diferindo somente nas espessuras das vigas 01 e 02, que mudam de 2,00 para 2,25 mm, porém, como já citado, a instrumentação desse foi alterada de modo a monitorar os enrijecedores de bordas da coluna, em locais onde pôde-se comprovar visualmente o mecanismo de plastificação.

Assim os extensômetros que no Protótipo B-SE estavam posicionados nos flanges da coluna, onde constatarem valores de deformações específicas baixos e distantes do escoamento do material, foram, então, reposicionados nos enrijecedores de borda da mesma, no sentido longitudinal, de modo a mensurar possíveis pontos onde ocorrem o mecanismo de plastificação, e os extensômetros E17 e E18 foram eliminados.

A carga última aplicada no ensaio do Protótipo C-SE, foi de 14,97 kN, correspondendo a solicitação de 13,55 kNm nas ligações.

Os gráficos das figuras a seguir revelam as deformações específicas dos enrijecedores de borda da coluna, de acordo com a localização dos EER posicionados segundo apresentado na Figura 3.16, item 3.9.2.

A Figura 4.21 têm-se os extensômetros colados na direção da linha de furos superiores e inferiores do U Suporte, no sentido transversal à borda, ao passo que, a Figura 4.22 têm-se os extensômetros posicionados no sentido longitudinal à borda.

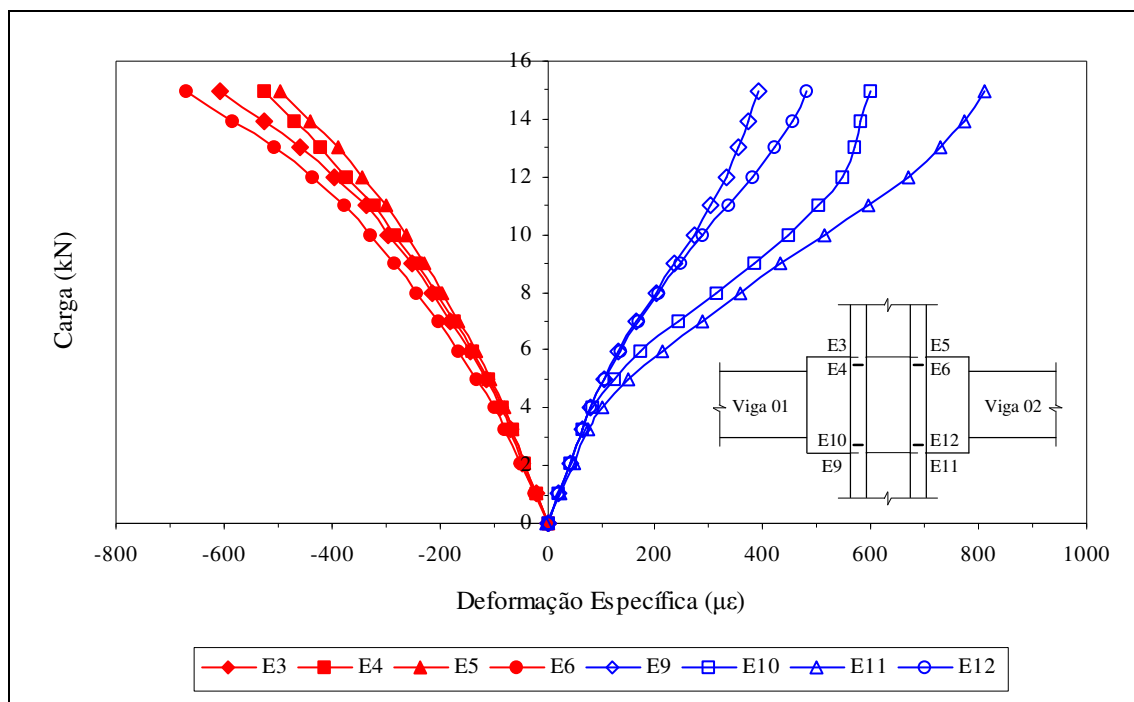


Figura 4.21 – Gráfico Carga x Deformação da coluna do Protótipo C-SE, extensômetros em sentido transversal à borda.

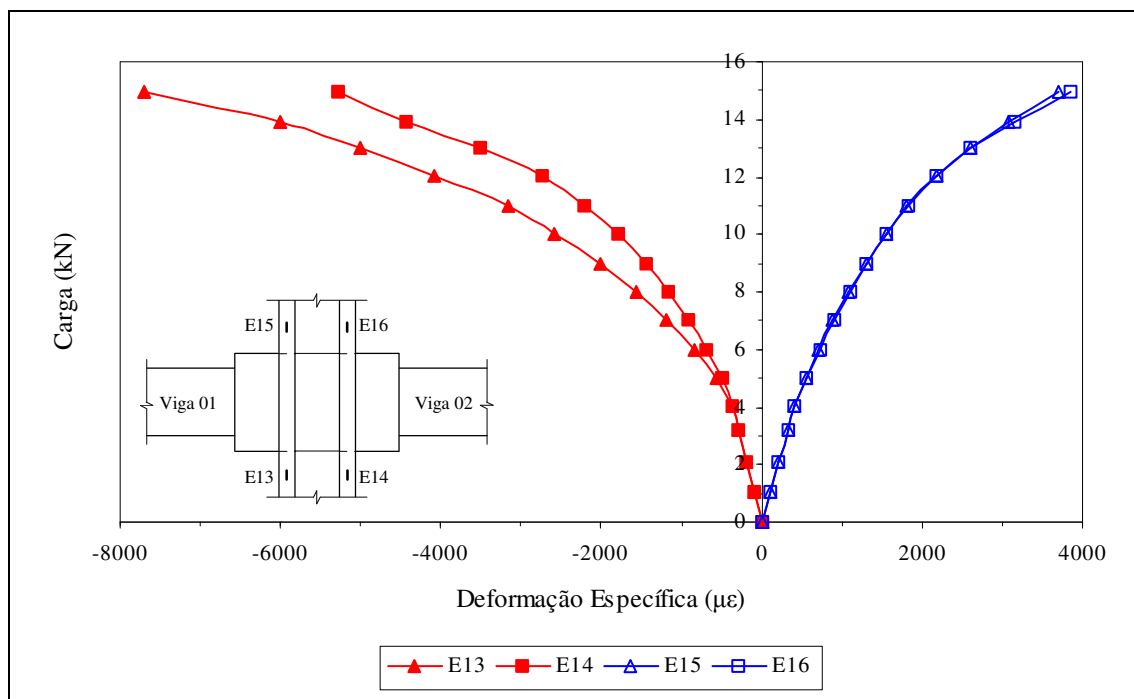


Figura 4.22 – Gráfico Carga x Deformação da coluna do Protótipo C-SE, extensômetros em sentido longitudinal à borda.

Na Figura 4.21, para carga última do ensaio, 14,97 kN, os extensômetros colocados no sentido transversal à borda não alcançaram níveis de deformação que resultassem no escoamento do material, tendo como maior valor registrado, o extensômetro E11 que apontou 809,28 μ strain, valor esse, bem distante dos 1882,0 μ strain necessários ao escoamento do material. Pode-se observar que os extensômetros inferiores indicam o efeito localizado, com a tendência de inversão para compressão.

Constata-se, entretanto, Figura 4.22, que os extensômetros dispostos no sentido longitudinal à borda apresentaram valores elevados de deformações. O escoamento ocorreu primeiramente no extensômetro E13, para uma carga aplicada de 8,99 kN. Para a carga última do ensaio, 14,97 kN, os valores indicados pelos extensômetros foram: -7707,36 μ strain (E13) e -5279,04 μ strain (E14), estando os mesmos comprimidos e posicionados 50 mm abaixo da linha de furos inferiores do U suporte; na parte acima da linha de furos do U suporte tiveram os extensômetros registrando tração, 3693,60 μ strain (E15) e 3850,80 μ strain (E16).

O mecanismo de plastificação nos enrijecedores de borda da coluna, começou a ser percebida, visualmente, quando a carga aproximou-se dos 13 kN mas, como citado acima, o escoamento já era iniciado para carga de 8,99 kN.

A Figura 4.23 exhibe o gráfico Carga x Deformação específica dos extensômetros posicionados nos flanges das vigas.

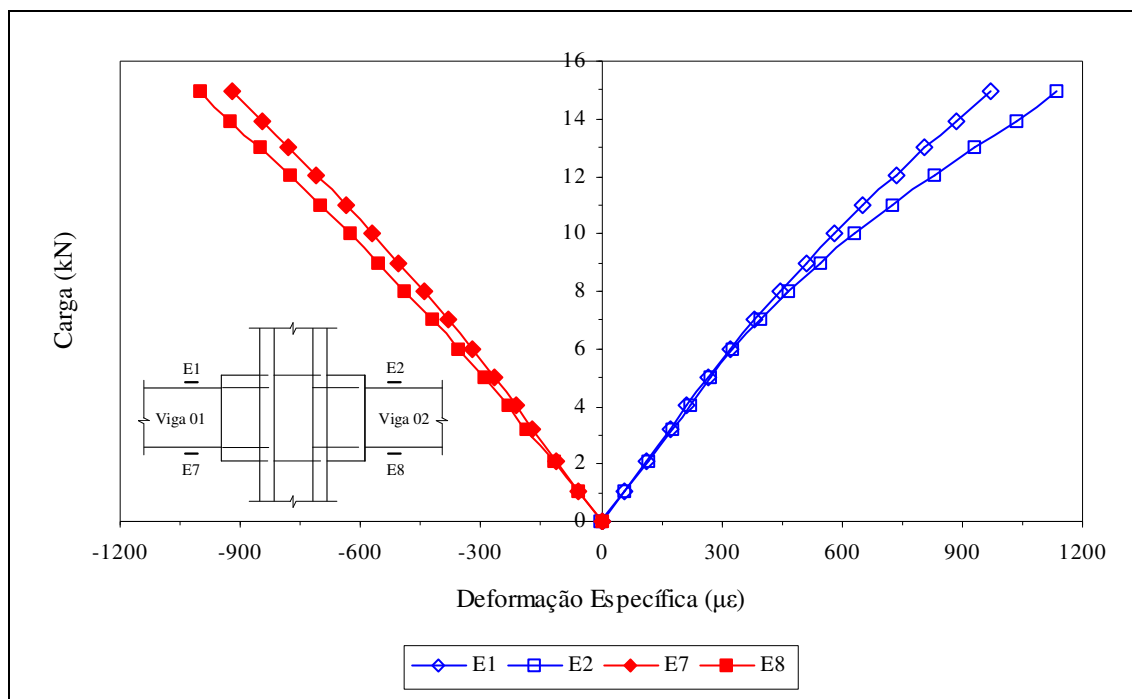


Figura 4.23 – Gráfico Carga x Deformação Específica das vigas do Protótipo C-SE.

Os valores máximos das deformações específicas das vigas do Protótipo C-SE, para a carga última do ensaio, foram de 971,76 μ strain (E1) e -922,56 μ strain (E7) para os flanges superiores e inferiores, respectivamente, da viga 01, e de 1134,96 μ strain (E2) e -1000,8 μ strain (E8) para os flanges superiores e inferiores, respectivamente, da viga 02. Portanto para a carga última experimental, 14,97 kN, não foi atingido o escoamento das vigas.

Cumpr-se destacar que nos protótipos anteriores, B-SE e B-CE, as vigas escoaram, mas neste não houve o escoamento; isto se deve obviamente ao fato do Protótipo C-SE ter tido cargas últimas de ensaio inferiores e espessuras de vigas mais espessas. Assim, a maior rigidez das vigas leva a contribuição dos elementos de ligação serem mais importantes, confirmando os cálculos do Anexo II.

O campo de deslocamento da coluna é ilustrado no gráfico da Figura 4.24 em função dos valores apontados nos defletômetros D1 e D2 e nos LVDT's L2 e L3. O defletômetro D1 apresentou problemas de leitura e D2 registrou, para carga última de ensaio, 14,97 kN, um efeito localizado de 1,26 mm.

Analogamente aos protótipos anteriores, os LVDT's L2 e L3 registraram valores de deslocamentos ínfimos, próximos a zero, e por isso não estão indicados no gráfico da Figura 4.24.

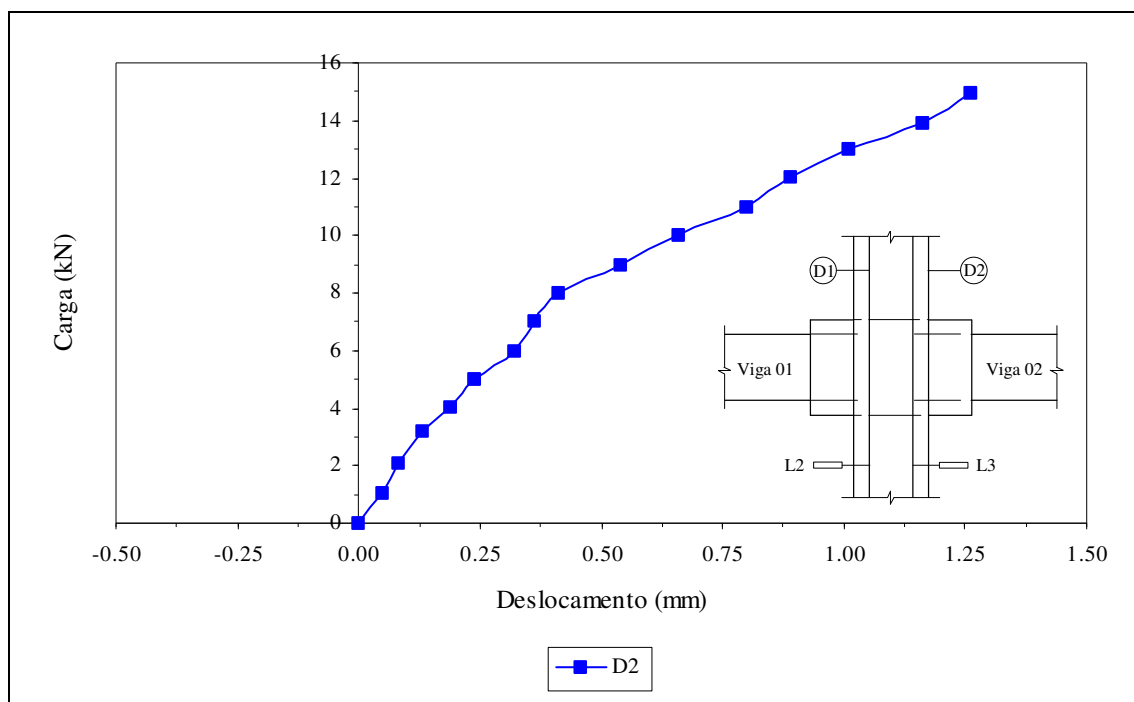


Figura 4.24 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da coluna do Protótipo C-SE.

Nos gráficos das Figuras 4.25 e 4.26 têm-se os valores dos deslocamentos registrados pelos defletômetros e LVDT's posicionados nas vigas 01 e 02 do Protótipo C-SE.

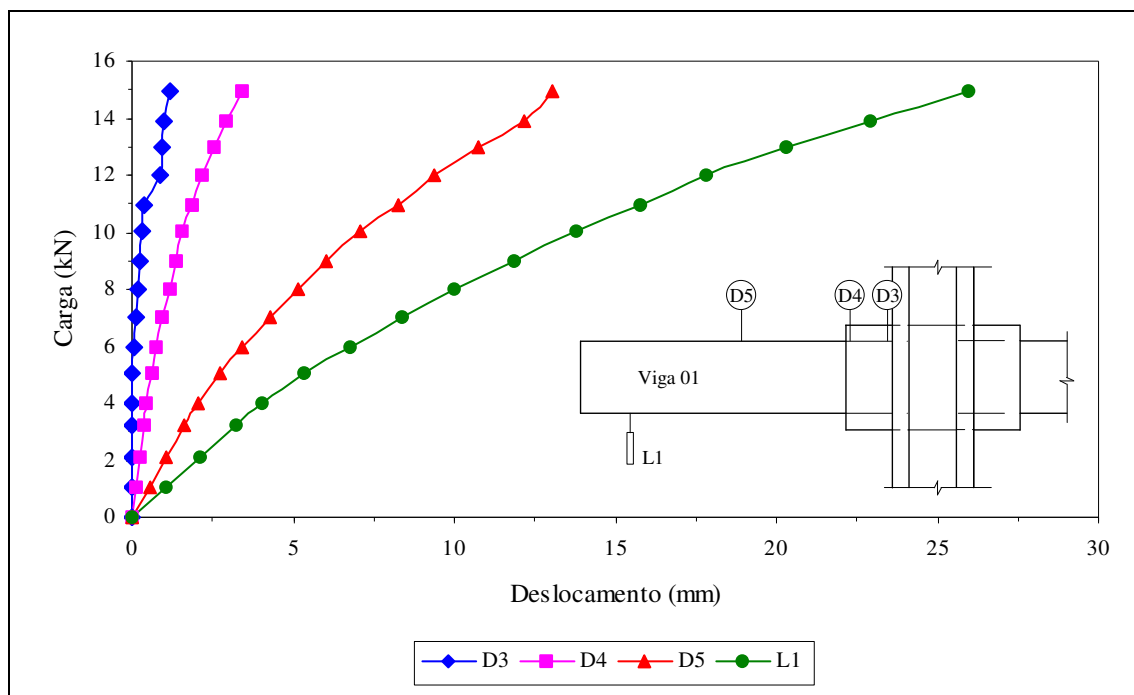


Figura 4.25 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 01 – Protótipo C-SE.

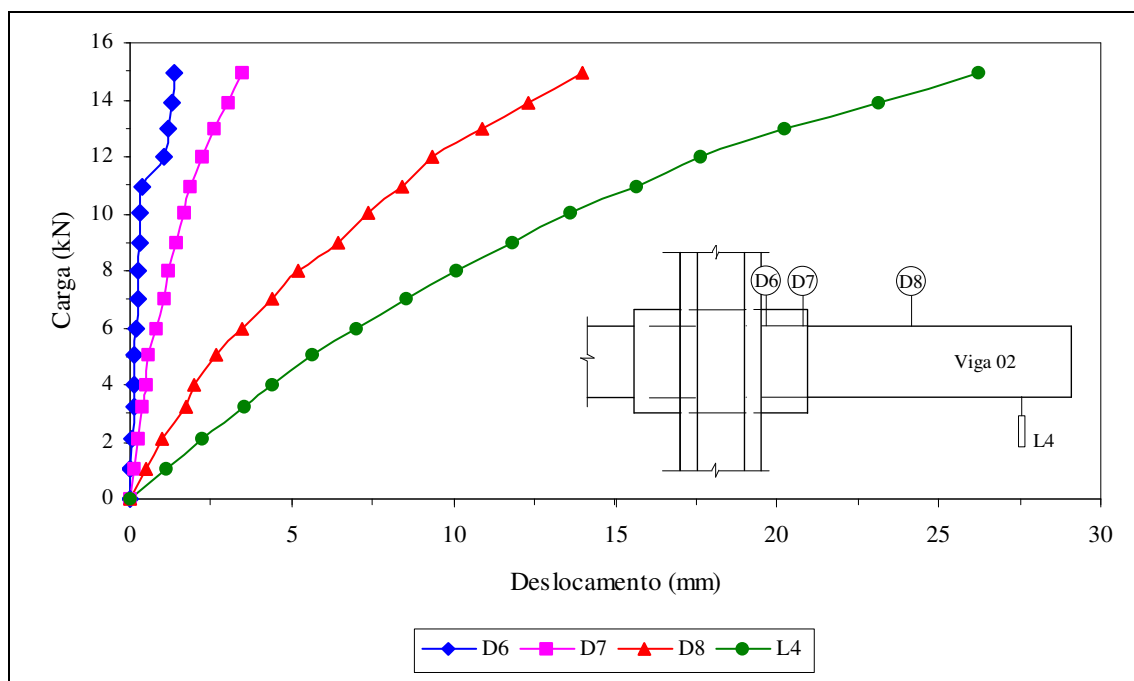


Figura 4.26 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 02 – Protótipo C-SE.

No gráfico da Figura 4.27 são apresentadas, para a carga última de ensaio, 14,97 kN, as deformadas da viga 01 e da viga 02.

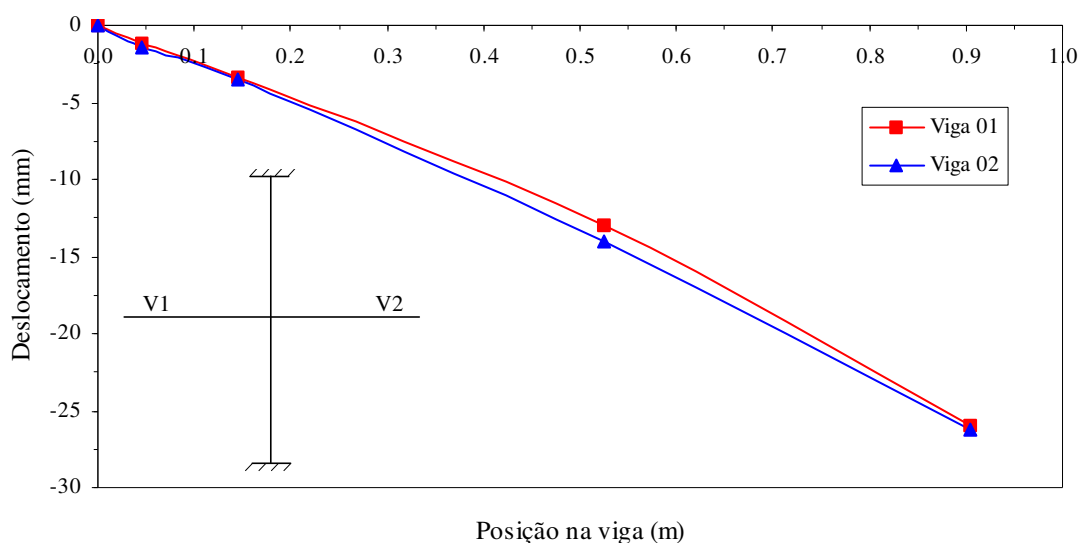


Figura 4.27 – Deformadas das vigas do Protótipo C-SE para a carga de 14,97 kN.

O procedimento adotado para a determinação das rotações relativas e rigidezes das ligações, foi o mesmo utilizado para os protótipos anteriores. As curvas momento x rotação estão indicadas no gráfico da Figura 4.28.

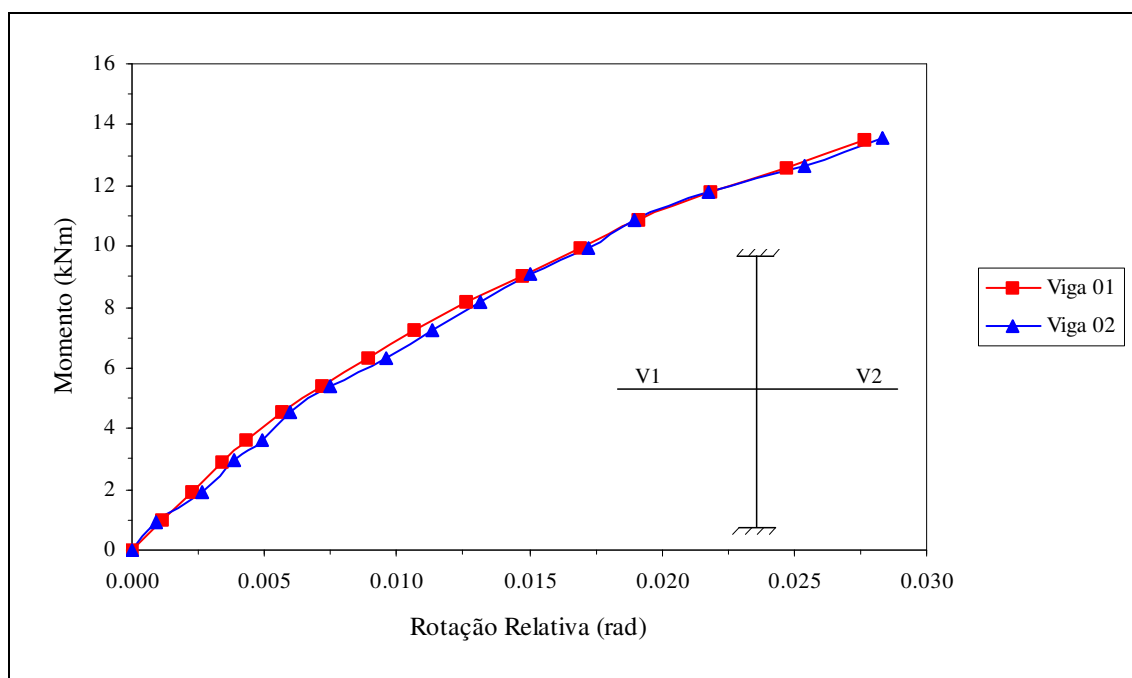


Figura 4.28 – Curvas momento-rotação das ligações do Protótipo C-SE.

Os valores máximos das rotações relativas observados no ensaio foram de 0,02765 rad e 0,02832 rad, respectivamente, para a viga 01 e viga 02, para um momento fletor último experimental igual a 13,55 kNm.

As rigidezes iniciais das ligações viga-coluna encontradas, de acordo com o método da inclinação inicial, indicado no item 2.4.1 foram: $k = 825,11$ kNm/rad, para a ligação viga 01–coluna e $k = 750,59$ kNm/rad, para a ligação viga 02–coluna.

Comparando as curvas momento-rotação dos Protótipos B-SE e C-SE é possível observar que os dois modelos tiveram rigidezes iniciais de mesma ordem de grandeza, porém fica evidente pequena diferença na capacidade rotacional, em função da maior rigidez nas vigas do Protótipo C-SE.

A carga última aplicada atingiu 14,97 kN, mas o mecanismo de colapso se deu com uma carga inferior. Esse mecanismo foi caracterizado pelo escoamento do enrijecedor de borda da coluna no qual estava posicionado o extensômetro E13, Figura 4.29, para uma carga de ensaio de 8,99 kN.

Na seqüência, foi observado o mecanismo de plastificação dos enrijecedores de borda da coluna, na região inferior à viga 01, para a carga de 13,00 kN. A foto da Figura 4.29 ilustra essa plastificação.

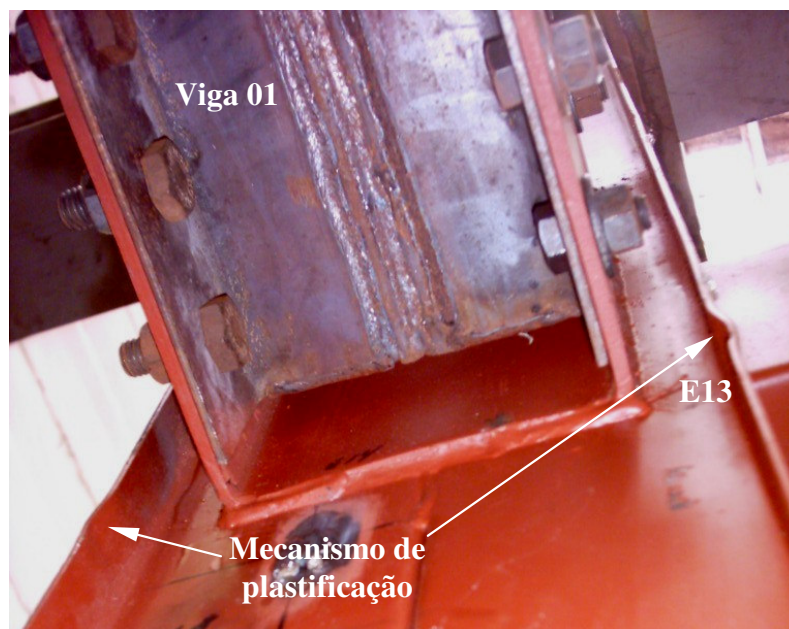


Figura 4.29 – Mecanismo de plastificação dos enrijecedores de borda da coluna, Viga 01 – Vista inferior.

Semelhantemente ao Protótipo B-SE, onde também não existiam enrijecedores de alma na coluna, neste também ocorreu a deformação na região da ligação. Foi mensurado, para carga de 14,97 kN, uma abertura e um fechamento da ordem de 9 mm, em relação à posição inicial. A Figura 4.30 expõe essa deformação.

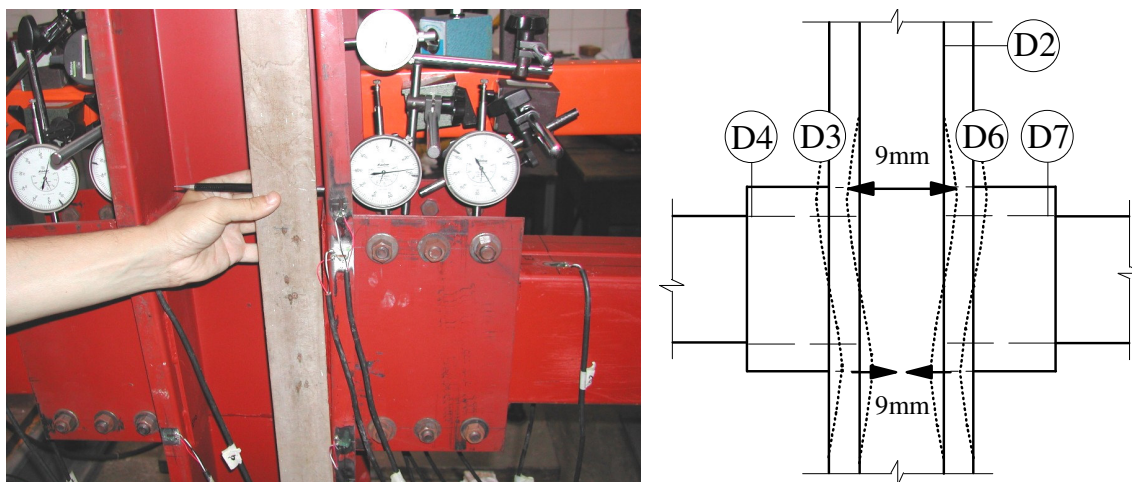


Figura 4.30 – Deformação dos flanges da coluna do Protótipo C-SE.

A deformação na região da ligação, já era prevista nos Protótipos B-SE e C-SE conforme dimensionamento apresentado no Anexo II, observa-se que nesse dimensionamento, a capacidade resistente da ligação é superior à obtida nos resultados experimentais. Essa diferença pode ser explicada em função das hipóteses adotadas para o comportamento da ligação, e acima de tudo a não utilização dos enrijecedores de alma na coluna.

No item seguinte são apresentados os resultados de um novo protótipo, semelhante ao Protótipo C-SE, porém, com enrijecedores de alma na coluna, de modo a quantificar a resistência e o aumento de rigidez da ligação.

4.1.4. Protótipo C-CE

O Protótipo C-CE é similar ao Protótipo C-SE, diferindo somente na inclusão de enrijecedores de alma soldados na coluna, objetivando assim, minimizar deformações observadas no ensaio anterior e aumentar a rigidez da ligação.

A localização, posicionamento e nomenclatura dos extensômetros foram idênticos ao Protótipo B-CE, item 4.1.2, o qual também tinha enrijecedores de alma soldados nos flanges da coluna.

A carga última aplicada no ensaio do Protótipo C-CE, foi de 21,00 kN, correspondendo a sollicitação de 19,00 kNm nas ligações.

Os gráficos das Figuras 4.31 e 4.32 indicam as deformações específicas nos enrijecedores de borda da coluna, de acordo com a localização dos EER posicionados segundo apresentado na Figura 3.17, item 3.9.3.

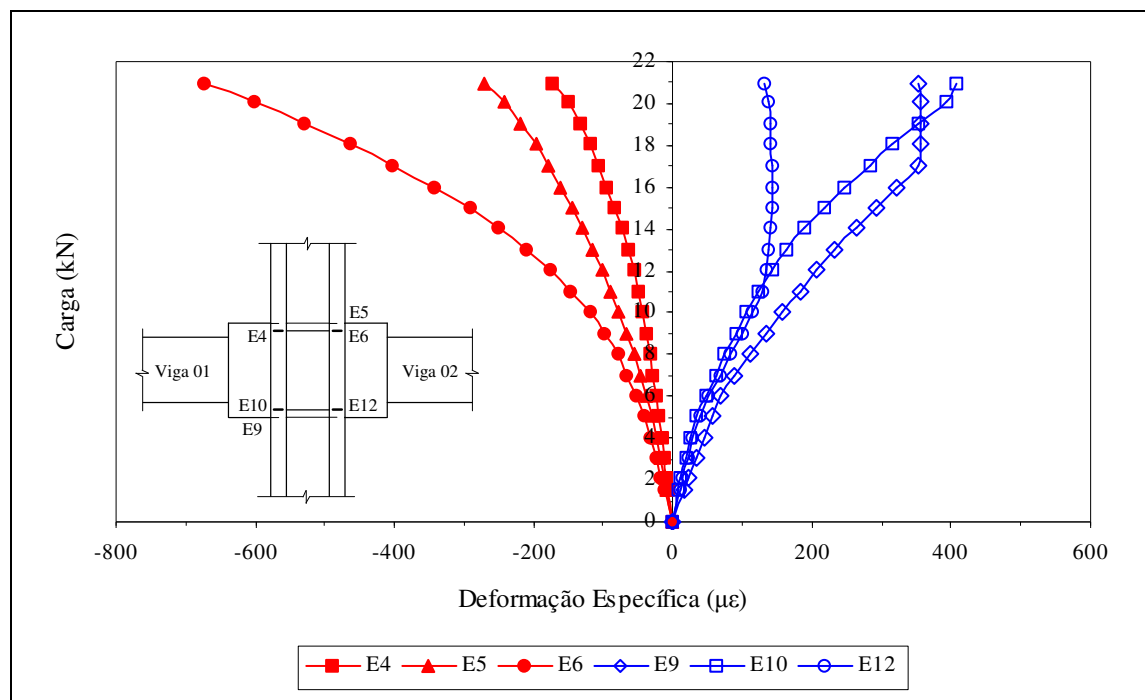


Figura 4.31 – Gráfico Carga x Deformação da coluna do Protótipo C-CE, extensômetros em sentido transversal à borda.

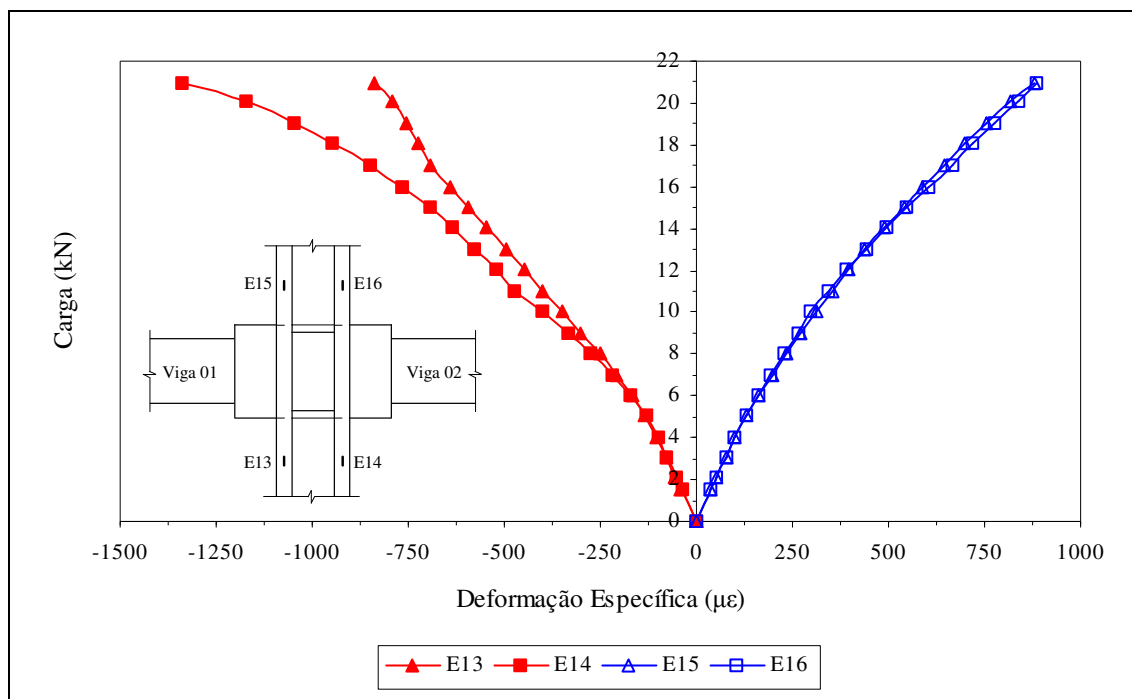


Figura 4.32 – Gráfico Carga x Deformação da coluna do Protótipo C-CE, extensômetros em sentido longitudinal à borda.

Igualmente ao Protótipo C-SE, confirma-se que os extensômetros colados em sentido transversal à borda, direção da linha de furos do U Suporte, (E4, E5, E6, E9, E10, E12), Figura 4.31, apresentaram deformações específicas inferiores e longe da tensão de escoamento do material, porém, nesse protótipo onde se tinha os enrijecedores de alma soldados nos flanges da coluna, nota-se que o nível dessas deformações específicas reduziram em média 63%. Frisa-se ainda que, o Protótipo C-CE, como em todos os outros precedentes, os extensômetros inferiores (E9, E10, E12) indicaram o efeito localizado, com a tendência de inversão para compressão.

Constata-se também que, os extensômetros colados no sentido longitudinal dos enrijecedores de borda (E13, E14, E15, E16), Figura 4.32, exibiram valores de deformações específicas inferiores se comparados com o Protótipo C-SE onde não havia enrijecedores de alma soldados nos flanges da coluna. Nesses extensômetros os níveis de deformação reduziram em média 88%, ficando, portanto, bem abaixo dos valores apresentados quando se tem a ausência dos enrijecedores.

Os valores máximos das deformações específicas para carga última de 21,00 kN, computados pelos extensômetros localizados longitudinalmente nos enrijecedores de borda da coluna foram de $-836,88 \mu\text{ strain}$ (E13), $-1339,2 \mu\text{ strain}$ (E14), para os posicionados 50 mm abaixo da linha de furos inferiores do U Suporte, e $881,28 \mu\text{ strain}$ (E15), $885,12 \mu\text{ strain}$ (E16) para os posicionados 50 mm acima da linha de furos superiores do U Suporte.

Nota-se portanto, que as deformações específicas apresentadas pelos extensômetros, posicionados na coluna, não indicaram escoamento dos pontos monitorados, sendo conveniente lembrar que, no Protótipo C-SE onde não existiam os enrijecedores de alma, soldados nos flanges da coluna, foram registrados valores superiores a $-7700 \mu\text{ strain}$ (E13), evidenciando assim, a influência e eficiência de tais enrijecedores.

Assim, nesse Protótipo C-CE, o colapso não ocorreu pelo mecanismo de plastificação dos enrijecedores de borda da coluna, ou seja, a presença dos enrijecedores de alma soldados nos flanges da coluna, diminuiu o nível de deformações na mesma, e por consequência alterou o mecanismo de colapso da ligação. A Figura 4.33 apresenta o gráfico Carga x Deformação específica dos EER posicionados nos flanges das vigas.

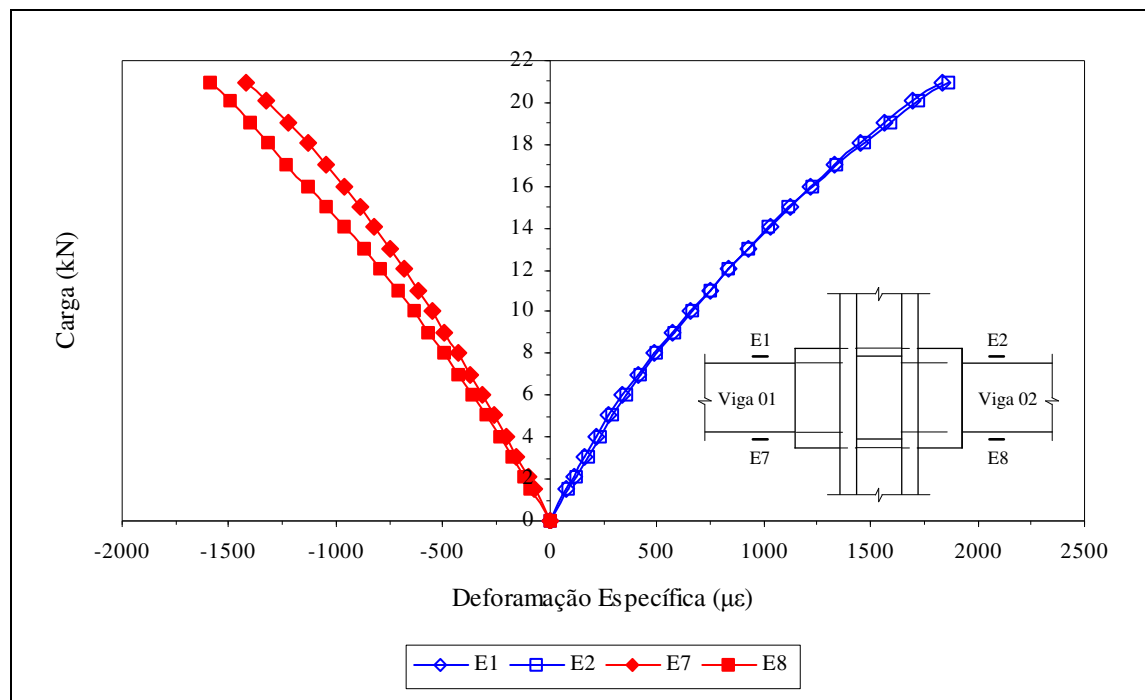


Figura 4.33 – Gráfico Carga x Deformação das vigas do Protótipo C-CE.

Os valores máximos das deformações específicas das vigas do Protótipo C-CE, para a carga última do ensaio, 21,00 kN, foram de 1832,16 μ strain (E1) e -1420,08 μ strain (E7) para os flanges superior e inferior, respectivamente da viga 01, e de 1866,72 μ strain (E2) e -1592,64 μ strain (E8) para os flanges superior e inferior, respectivamente da viga 02. Cabe lembrar que a deformação específica de escoamento resultante dos ensaios de caracterização é de 1882,0 μ strain (Tab. 3.1), assim constata-se que as vigas permaneceram na fase elástica, confirmando-se os cálculos do Anexo II.

Ressalta-se que os Protótipos C-SE e C-CE onde as vigas são de espessuras 2,25 mm, não houve o escoamento das mesmas, tendo o colapso dos protótipos ocorrido, respectivamente, pelo mecanismo de plastificação dos enrijecedores de borda da coluna e pelo princípio de rasgamento nas cantoneiras de ligação. Frisa-se ainda, que a maior rigidez das vigas leva a contribuição dos enrijecedores e elementos de ligação serem mais importantes.

A Figura 4.34 apresenta o gráfico Carga x Deformação específica dos extensômetros instalados nos enrijecedores de alma soldados nos flanges da coluna, de acordo com a localização dos EER posicionados segundo apresentado na Figura 3.17, item 3.9.3.

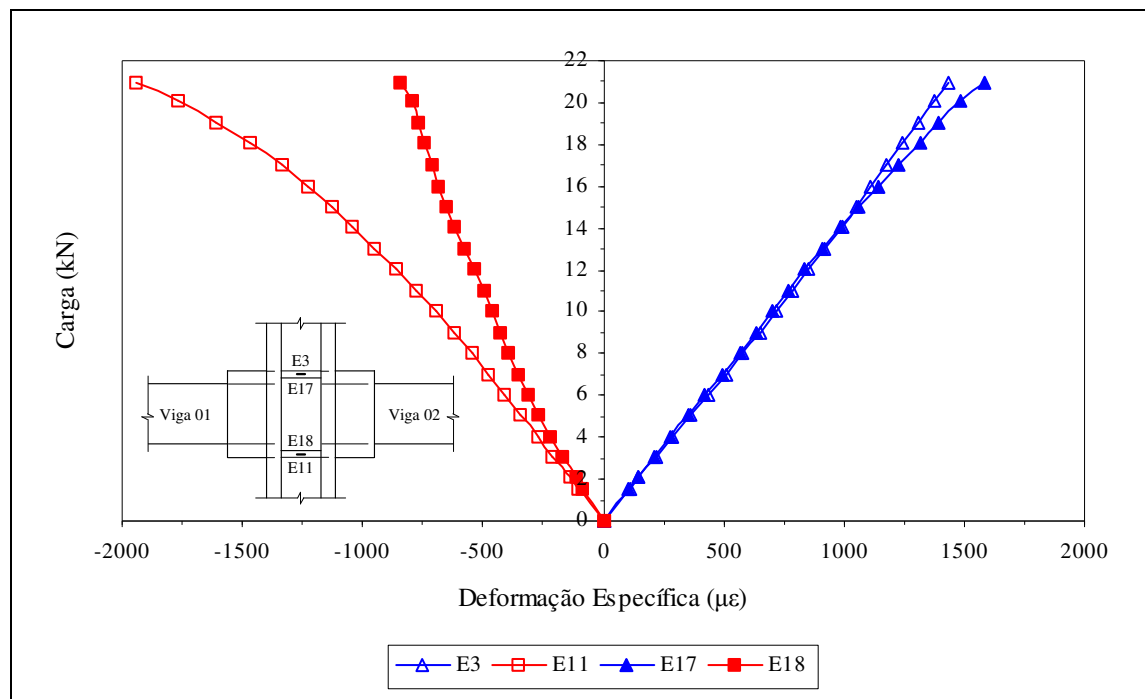


Figura 4.34 – Gráfico Carga x Deformação dos enrijecedores de alma da coluna do Protótipo C-CE.

Os valores máximos das deformações específicas registradas nos enrijecedores de alma soldados nos flanges da coluna do Protótipo C-CE, para a carga última do ensaio, 21,00 kN, foram de 1437,36 μ strain (E3) e 1587,84 μ strain (E17) indicando tração para os enrijecedores superiores e de -1940,16 μ strain (E11) e -845,76 μ strain (E18) indicando compressão para os enrijecedores inferiores.

Não foi observado deslocamento relativo nos flanges da coluna e escoamento do enrijecedor se deu para carga de 19,05 kN, onde o extensômetro E11 indicou uma deformação específica de -1610,40 μ strain. Vale lembrar que a deformação específica de escoamento resultante dos ensaios de caracterização para o aço utilizado nos enrijecedores é de 1596 μ strain (Tab.3.2).

Os gráficos das Figuras 4.35 e 4.36 mostram os valores dos deslocamentos registrados pela instrumentação posicionada nas vigas 01 e 02, respectivamente, do Protótipo C-CE.

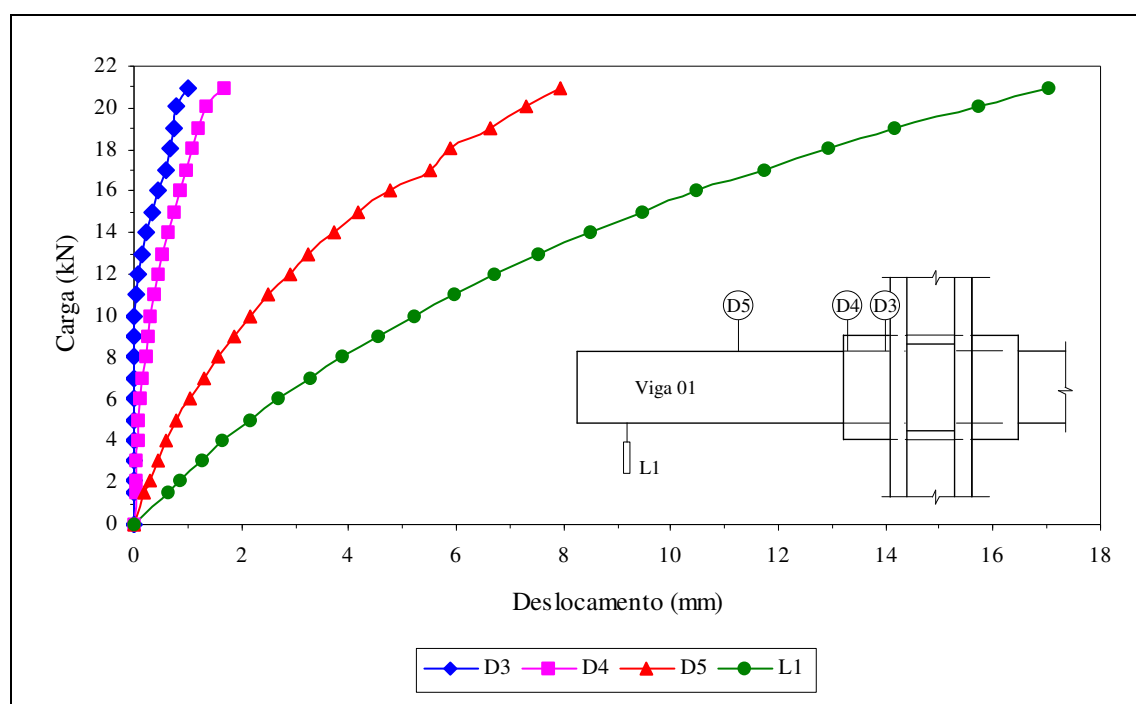


Figura 4.35 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 01 – Protótipo C-CE.

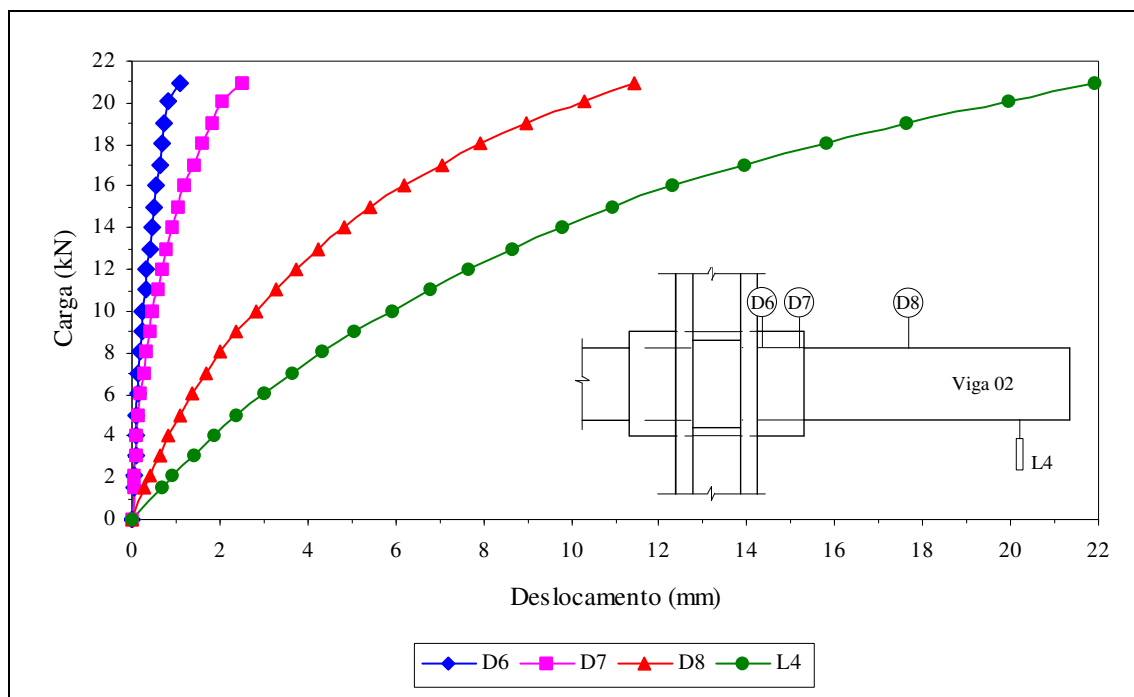


Figura 4.36 – Gráfico Carga x Deslocamento dos pontos analisados da viga 02 – Protótipo C-CE.

No gráfico da Figura 4.37 são apresentadas, para a carga última de ensaio, 21,00 kN, as deformadas da viga 01 e da viga 02.

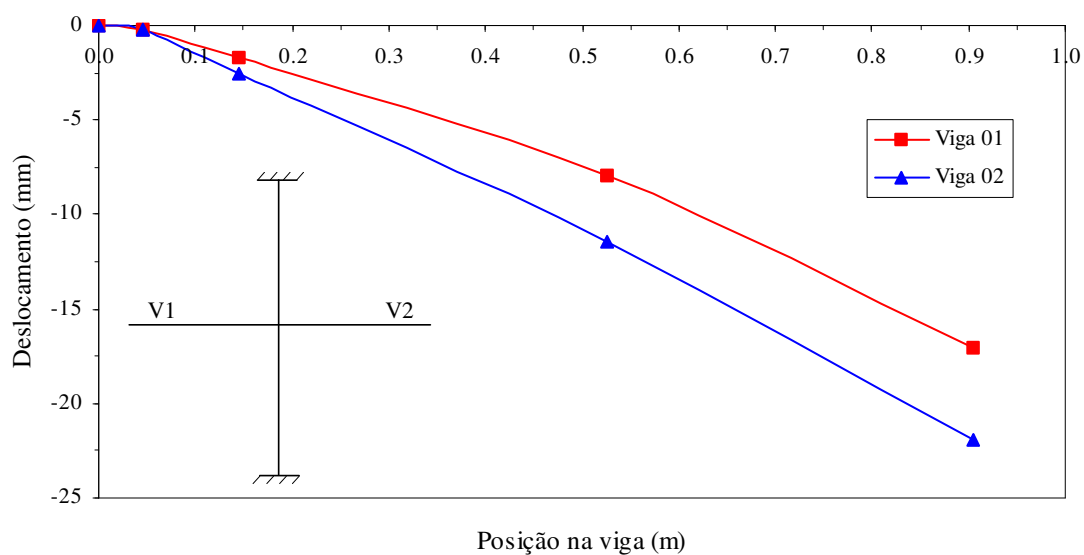


Figura 4.37 – Deformadas das vigas do Protótipo C-CE para a carga de 21,00 kN.

Comparando o resultado das deformadas do Protótipo C-CE com o Protótipo C-SE, verifica-se que a presença dos enrijecedores de alma soldados nos flanges da coluna, na região da ligação, reduziu as deformadas em 61%. Essa redução já era esperada, visto a contenção dos flanges pelos enrijecedores.

O procedimento adotado para a determinação das rotações relativas e rigidezes das ligações, foi o mesmo utilizado para os protótipos anteriores. As curvas momento x rotação estão indicadas no gráfico da Figura 4.38.

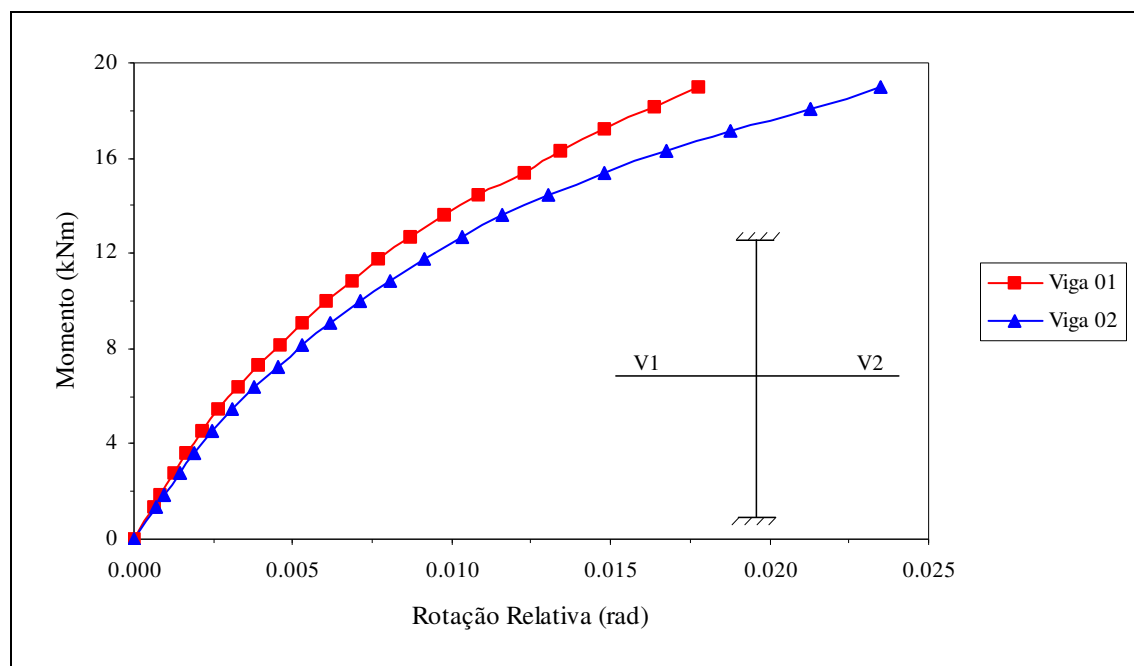


Figura 4.38 – Curvas momento-rotação das ligações do Protótipo C-CE.

Os valores máximos das rotações relativas observados no ensaio foram de 0,01778 rad e 0,02348 rad, respectivamente, para a viga 01 e viga 02, para um momento fletor último experimental igual a 19,00 kNm.

As rigidezes iniciais das ligações viga-coluna encontradas, de acordo com o método da inclinação inicial, indicado no item 2.4.1 foram: $k = 2137,98$ kNm/rad, para a ligação viga 01–coluna e $k = 1889,22$ kNm/rad, para a ligação viga 02–coluna.

A carga última aplicada atingiu 21,00 kN, mas o mecanismo de colapso se deu com uma carga inferior. O mecanismo observado foi o princípio de rasgamento das cantoneiras de ligação superiores às vigas, caracterizado pela ruptura das mesmas nas

quinas, quando a carga de ensaio era de 17,80 kN, análogo ao efeito apresentado no Protótipo B-CE, (Figura 4.20b).

Comparando a resistência experimental das cantoneiras com o dimensionamento proposto no Anexo II, observa-se que no dimensionamento, a capacidade resistente das cantoneiras são superiores. Isso pode ser explicado ao fato de se ter maior concentração de tensões nas quinas das cantoneiras, visto o esforço solicitante estar excêntrico às mesmas.

De forma geral, os efeitos já observados no Protótipo B-CE são semelhantes ao Protótipo C-CE. A única particularidade de efeitos foi o escoamento das vigas do Protótipo B-CE, devido as mesmas possuírem menor espessura.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam, respectivamente, os efeitos observados com as respectivas cargas e momentos de colapso, assim como os principais resultados dos ensaios realizados.

Tabela 4.1 – Efeitos observados em cada ensaio.

Protótipo	Efeitos observados	Carga de colapso (kN)	Mom. de colapso (kNm)
B-SE	escoamento dos enrijecedores de borda da coluna	não computado	não computado
	mecanismo de plastificação dos enrijecedores de borda da coluna	12,45	11,27
	escoamento flange superior viga 01	15,96	14,44
B-CE	escoamento flange superior viga 02	15,98	14,46
	rasgamento cantoneiras de ligação	17,45	15,79
	escoamento enrijecedor de alma	19,93	18,04
C-SE	escoamento dos enrijecedores de borda da coluna	8,99	8,14
	mecanismo de plastificação dos enrijecedores de borda da coluna	13,00	11,77
C-CE	rasgamento cantoneiras de ligação	17,80	16,11
	escoamento enrijecedor de alma	19,05	17,24

Tabela 4.2 – Principais resultados obtidos nos ensaios.

Protótipo	Ligação	Mom. último experimental (kNm)	Momento de colapso (kNm)	Rigidezes (kNm/rad)	K _o (média) (kNm/rad)
B-SE	Viga01 – Coluna	15,44	-	819,84	811,40
	Viga02 – Coluna			802,95	
B-CE	Viga01 – Coluna	19,87	14,46	1882,17	1838,94
	Viga02 – Coluna			1795,71	
C-SE	Viga01 – Coluna	13,55	8,14	825,11	787,85
	Viga02 – Coluna			750,59	
C-CE	Viga01 – Coluna	19,00	16,11	2137,98	2013,60
	Viga02 – Coluna			1889,22	

4.2. COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste item são apresentados comparações e comentários dos resultados experimentais da pesquisa desenvolvida no presente trabalho em relação aos estudos de Moraes (2003) e Cabral (2004).

4.2.1. Protótipos Moraes

Como apresentado no item 2.2, Moraes ensaiou ligações em aço sem enrijecedores de alma com tipologia semelhante à apresentada no presente trabalho, porém as vigas continham dimensões maiores, e a coluna chapas mais espessas. A Tabela 4.3 reproduz as dimensões de alguns protótipos, os quais as vigas tiveram espessuras de 2 mm, e o resumo dos resultados.

Tabela 4.3 – Quadro de resultados obtidos nos ensaios do presente trabalho e de Moraes (2003).

Protótipo	Dimensões (mm)		M. Colapso (kNm)	K _o (média) (kNm/rad)
	Vigas	Coluna		
B-SE (presente trabalho)	150x120x20x2,00	170x190x25x2,25	11,27	811,4
B-CE (presente trabalho)	150x120x20x2,00	170x190x25x2,25	14,46	1838,9
PEPE2V1V2-1 (Moraes 2003)	200x150x20x2,00	170x170x25x3,00	23,16	2232
PEPE2V1V2-2 (Moraes 2003)	200x150x20x2,00	170x170x25x3,00	20,96	2189

Comparando os modelos, Tabela 4.3, pode se observar que os protótipos de Moraes, apesar de não terem enrijecedores de alma, exibem maiores momentos de colapso e rigidezes. Cabe salientar que, essa maior resistência advém de:

- i. maior espessura da coluna, que gera maior área e maior inércia, resultando em um menor nível de tensões, e retardando os efeitos do escoamento e plastificação nos enrijecedores de borda, razão pela qual ocorreu o colapso do Protótipo B-SE;
- ii. maior inércia das vigas, diminuindo a tensão nos flanges das mesmas e, combatendo assim o escoamento, razão pela qual ocorreu o colapso do Protótipo B-CE;
- iii. maior distância (devido a maior altura das vigas) entre as linhas de parafusos superior e inferior que conectam a ligação, confere o aumento do braço de alavanca entre os elementos da área tracionada e comprimida, fazendo com que o momento resistente aumente e a capacidade rotacional diminua.

Cumpr-se destacar, mais uma vez, que Moraes não utilizou enrijecedores de alma soldados na região da ligação. Por analogia, pode-se afirmar que se os protótipos de Moraes tivessem esses enrijecedores, os momentos de colapso e rigidezes teriam valores bem mais elevados, visto a influência e eficiência dos mesmos mostrada no presente trabalho.

4.2.2. Protótipos Cabral

Quanto à comparação aos ensaios de Cabral, item 2.3, nos quais a ligação tinha adicionada em si, a laje de concreto incorporada – ligação mista – não se percebeu diferenças da ausência dos enrijecedores de alma, devido ao monolitismo oriundo da laje. Assim, o mecanismo de colapso se deu pelo escoamento das armaduras de flexão, sendo verificada também elevada concentração de tensões nos enrijecedores da coluna. Porém, a resistência e a rigidez com a presença da laje foram maiores.

A Tabela 4.4 apresenta um paralelo com os resultados da idêntica tipologia de ligação entre os ensaios do presente trabalho e os de Cabral (B-E1, C-E1). Destaca-se nesta tabela, as diferenças no mecanismo de colapso, momento de colapso e rigidez inicial, provenientes da particularidade de cada protótipo ensaiado.

Tabela 4.4 – Quadro comparativo dos resultados obtidos dos ensaios do presente trabalho e de Cabral (2004).

Protótipo	Ligação	Mecanismo de colapso	M. Colapso (kNm)	K _o (média) (kNm/rad)
B-SE	em aço	plastificação enrijecedores de borda	11,27	811,4
B-CE		escoamento flange da viga	14,46	1838,9
B-E1	mista	escoamento armadura de flexão	29,72	4508,0
C-SE	em aço	escoamento enrijecedores de borda	8,14	787,9
C-CE		rasgamento cantoneiras de ligação	16,11	2013,6
C-E1	mista	escoamento armadura de flexão	27,05	4004,5

A influência do conjunto de elementos no comportamento da ligação pode ser visualizada nos gráficos das Figuras 4.39 e 4.40, onde são apresentados os gráficos M- θ da mesma tipologia, sem enrijecedores, com enrijecedores e mista.

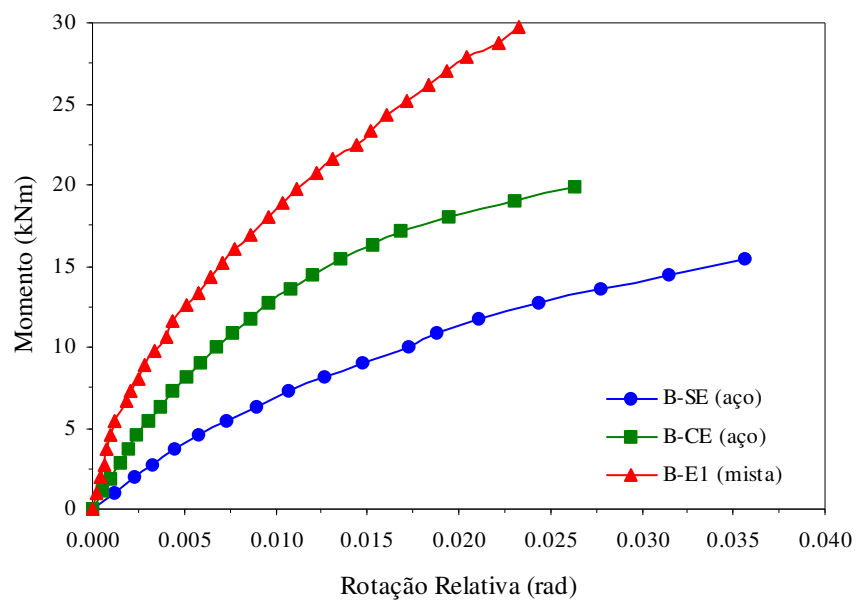


Figura 4.39 – Comparação do comportamento momento x rotação da ligação tipo "B", sem enrijecedores, com enrijecedores e mista.

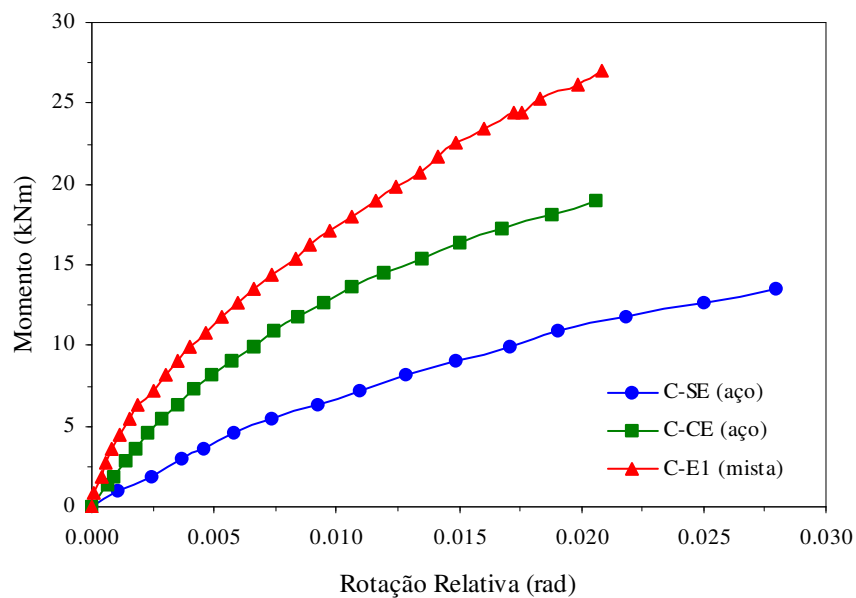


Figura 4.40 – Comparação do comportamento momento x rotação da ligação tipo "C", sem enrijecedores, com enrijecedores e mista.

Observa-se nas curvas momento x rotação ilustradas nas Figuras 4.39 e 4.40 que as ligações mistas apresentam maior resistência e menor capacidade de deformação. Por outro lado, as ligações em aço sem enrijecedores conduzem menor resistência e maior ductilidade. Neste meio termo, com resistência e capacidade rotacional intermediárias estão as ligações em aço com enrijecedores de alma.

Nos gráficos das Figuras 4.41 e 4.42, são apresentadas, para as mesmas cargas de ensaio, as deformadas das vigas, assim observa-se, de maneira visual, que diferenças na rigidez da ligação, obviamente, originam deslocamentos bem distintos.

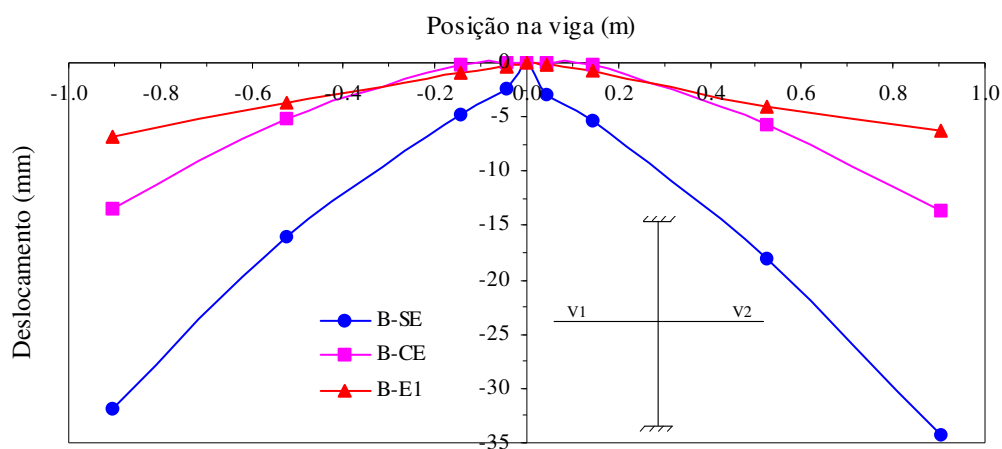


Figura 4.41 – Deformada das vigas (2,00 mm) dos Protótipos B-SE, B-CE, B-E1, para cargas de 17 kN.

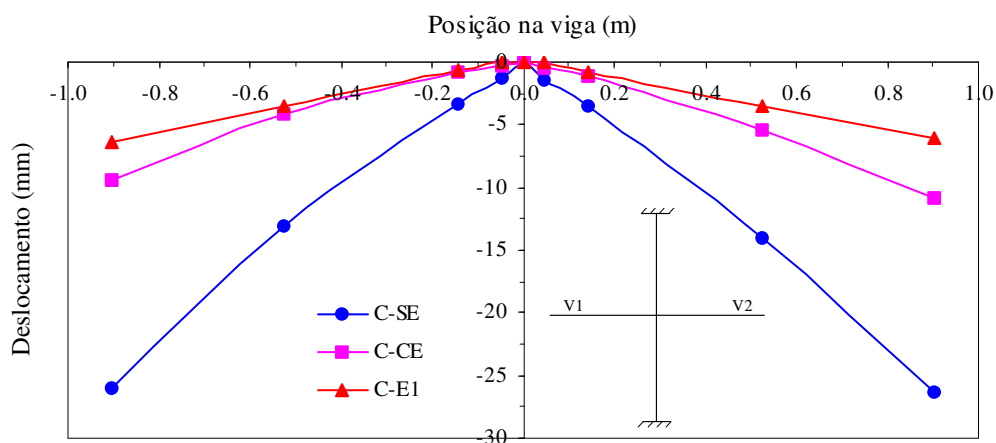


Figura 4.42 – Deformada das vigas (2,25 mm) dos Protótipos C-SE, C-CE, C-E1, para cargas de 15 kN.

A tipologia de ligação em aço com enrijecedores de alma se mostrou eficiente, mas de qualquer modo, quando se tem uma ligação mista, é possível haver sinergia, suprimindo mecanismos de colapso predominantes com ganhos em resistência e rigidez.

A maior rigidez das ligações mistas, na tipologia ensaiada por Cabral (2004), justifica-se:

- i. pelo revestimento de concreto, que funciona como enrijecedores de alma na coluna;
- ii. pelas inércias das vigas que aumentam consideravelmente com a inclusão da laje.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral do trabalho foi avaliar e dar continuidade ao estudo do comportamento de ligações viga-coluna parafusadas em perfis de aço formados a frio, a partir de análises teórico-experimentais. O trabalho se concentrou na tipologia dos protótipos ensaiados por Cabral (2004), que deu seqüência às pesquisas desenvolvidas por Moraes (2003), exceto quanto à laje de concreto, a fim de estabelecer comparações com o modelo misto.

No dimensionamento prévio ponderou-se a necessidade dos enrijecedores de alma na região da ligação, porém para fins comparativos, foram testados também protótipos sem enrijecedores. Assim, foram avaliadas algumas configurações de protótipos, divididos em dois grupos: sem enrijecedores (SE) e com enrijecedores (CE), sendo distintas também as espessuras das vigas.

Neste contexto, os dimensionamentos dos elementos das ligações foram obtidos de acordo com as prescrições da AISI (2001), NBR 14762:2001 e da NBR 8800:1986, baseados em hipóteses adotadas para o comportamento dos mesmos, uma vez que a tipologia das ligações foi diferente dos casos existentes nos procedimentos normativos.

O programa experimental foi elaborado de maneira semelhante ao modelo misto, com modelos cruciformes (ligações internas) e carregamento simétrico, composto por quatro ensaios, de ligações-tipo em escala real.

O desenvolvimento deste trabalho possibilitou uma avaliação do comportamento real da ligação (SE e CE) quanto à sua resistência, deslocamentos e deformações associadas, permitindo com os resultados determinar as curvas momento-rotação, rigidezes, bem como os momentos últimos e mecanismos de colapso.

A partir dos experimentos realizados neste trabalho pode-se concluir que:

Em ligações não mistas, a tipologia apresentada se mostrou pouco resistente, quando na ausência de enrijecedores de alma soldados na região da ligação. O Protótipo B-SE, o qual não dispôs desses enrijecedores, mostrou claramente a baixa resistência, caracterizada pela maior concentração de tensões nos enrijecedores da coluna. Isso

precipitou o colapso pelo escoamento desses, iniciando então, de forma gradual, a plastificação local nos enrijecedores da coluna.

Por outro lado, quando se utilizou os enrijecedores de alma na ligação, Protótipo B-CE, o nível de tensões nos enrijecedores da coluna diminuiu consideravelmente e não ocorreu a plastificação. Assim a capacidade resistente da ligação aumentou e o mecanismo de colapso passou a ser o escoamento nos flanges das vigas. Aumentando progressivamente a carga aplicada, percebeu-se que os próximos modos de colapso apresentados, foram respectivamente, o princípio de rasgamento nas cantoneiras de ligação e o escoamento dos enrijecedores utilizados.

Portanto, a utilização de enrijecedores de alma, que diferiu o Protótipo B-SE do B-CE, mudou o mecanismo de colapso, aumentando a resistência da ligação, com acréscimo de rigidez em torno de 127%.

A ligação do Protótipo C-SE foi idêntica ao Protótipo B-SE, diferindo somente na espessura das vigas parafusadas, também apresentou como modo de falha predominante, o escoamento precoce dos enrijecedores de borda da coluna, e posterior plastificação dos mesmos; assim a maior espessura das vigas conectadas não alteraram o comportamento da ligação. Outro aspecto a ser destacado nesses protótipos, sem enrijecedores de alma, foi a abertura exposta pelos flanges da coluna, desconfigurando a ligação na altura da mesma.

A ligação do Protótipo C-CE, devido aos enrijecedores de alma, não apresentou escoamento e nem plastificação nas bordas da coluna, tendo como mecanismo de colapso o rasgamento das cantoneiras de ligação, seguido pelo escoamento dos enrijecedores de alma. Cabe lembrar que no Protótipo C-CE não houve o escoamento nos flanges das vigas conectadas, devido a maior espessuras das mesmas.

Assim, a tipologia estudada evidencia que o enrijecimento na região da ligação, em forma de revestimento de concreto (laje) ou chapas soldadas, influencia fortemente o comportamento da mesma; e portanto ao considerar essa semi-continuidade entre as vigas separadas por uma coluna, o mecanismo de colapso muda e as ligações ficam mais resistentes e rígidas.

Enfim, os resultados obtidos nesta dissertação, conjuntamente aos trabalhos de Moraes (2003) e Cabral (2004), permitem iniciar discussões envolvendo as características específicas da tipologia de ligação avaliada, desde o levantamento

preliminar dos parâmetros para análise experimental e numérica, ao cálculo do momento resistente, rigidez inicial e capacidade rotacional. Neste sentido, foram fornecidos subsídios importantes para o desenvolvimento de novas pesquisas que envolvam a tipologia apresentada.

Entre as sugestões para trabalhos futuros, destacam-se:

i. Maior série de ensaios, visto que um único ensaio para cada configuração de ligação foi realizado, assim poderia aferir os valores encontrados e aumentar a confiabilidade de resultados;

ii. análise experimental envolvendo outros detalhes na tipologia da ligação, como o enrijecimento dos enrijecedores de borda da coluna, visto que os mesmos apresentaram uma elevada concentração de tensões e se mostraram susceptíveis a plastificação;

iii. desenvolvimento de um modelo teórico de cálculo para se determinar as rigidezes de ligações com configurações semelhantes às utilizadas;

iv. com base no método dos elementos finitos, desenvolver modelos a fim de estabelecer um padrão de modelagem numérica confiável para essa tipologia de ligação, partindo-se dos modelos já ensaiados, os quais possivelmente calibrarão os modelos numéricos;

v. análise da influência dessas ligações no comportamento de pórticos;

vi. desenvolvimento de uma formulação para determinação das forças atuantes nos enrijecedores de borda da coluna e dimensionamento da ligação;

vii. avaliação comparativa da viabilidade técnico-econômica (custo-benefício) da tipologia apresentada versus ligação soldada;

viii. estudar alternativas de ligação envolvendo os perfis formados a frio, mantendo as mesmas seções das vigas e colunas, de modo a aperfeiçoar a tipologia apresentada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (1986). NBR 8800 - Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasil.

ABNT (1992). NBR 6152 - Materiais Metálicos – Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasil.

ABNT (2001). NBR 14762 - Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasil.

ABNT (2003). NBR 6355 – Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasil.

AISC (1994). Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design. 2nd ed., Vol. 1 and 2. Chicago: American Institute of Steel Construction.

AISI (1996). Cold Formed Steel Design Manual. American Iron and Steel Institute, Washington, DC.

Anderson, D. e Najafi A. A. (1994). Performance of Composite Connections: Major Axis End Plate Joints. Journal of Constructional Steel Research, v. 31, p. 31-57.

Ang, K. M. e Morris, G. A. (1984). Analysis of Three-Dimensional Frames with Flexible Beam-Column Connections. Canadian Journal of Civil Engineers, v. 11, p. 245-254.

Ansys (2001). User's Manual for Revision 6. Swanson Analysis Systems Inc., Houston, PA.

ASCE (1998). Task Committee on Design Criteria for Composite Structures in Steel and Concrete. "Design Guide for Partially Restrained Composite Connections". Journal of Structural Engineering, Oct., p. 1099-1114.

AWS D1.1:2000. American Welding Society. Structural Welding Code – Steel.

Cabral, J. B. (2004). Análise Teórico-Experimental de Ligações Mistas em Perfis Formados a Frio. Dissertação de Mestrado. UFOP, Ouro Preto, MG.

Cabral, J. B., Freitas, A. M. S. e Silva, A. C. (2006). Ligações Mistas em Perfis Formados a Frio. XXXII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Campinas, SP.

Cabral, J. B. e Freitas, A. M. S. (2006). Análise Teórico-Experimental de Ligações Mistas em Perfis Formados a Frio. REM – Revista Escola de Minas, v.59, n.1, p. 89-95.

Carvalho, P. R. M., Grigoletti, G., Tamagna, A. e Iturrioz, I. (2004). Curso Básico de Perfis de Aço Formados a Frio. Porto Alegre.

Chan, S. L e Chui, P. P. T. (2000). Non-Linear Static and Cyclic Analysis of Steel Frames with Semi-Rigid Connections, Elsevier, Oxford.

CEN: ENV1993. Eurocode 3 – Design of Steel Structures. European Committee for Standardization, 1993.

CFS Version 4.14 (2004). RSG Software, Inc. <http://www.rsgsoftware.com>.

Chen, W. F. e Toma, S. (1994). Advanced Analysis of Steel Frames: Theory, Software and Applications. Editora CRC Press LLC, Boca Raton, Florida.

Chen, W. F. (1988). Steel Beam-to-Column building Connections. Ed. Chen, W. F. Elsevier Science Publishers LTD, New York, NY.

Chung, K. F. e Lau, L. (1999). Experimental investigation on bolted moment connections among cold formed steel members. Engineering Structures, v. 21, p. 898-911.

Chung, K. F. e Lawson, R. M. (2000). Structural performance of shear resisting connections between cold-formed steel sections using web cleats of cold-formed steel strip. *Engineering Structures*, v. 22, p. 1350-1366.

Chung, K. F. e Ip, K. H. (2001). Finite element investigation on the structural behaviour of cold-formed steel bolted connections. *Engineering Structures*, v. 23, p. 1115-1125.

Chung, K. F., Wong, M. F. e Yu, W. K. (2005). Analysis of bolted moment connections in cold-formed steel beam-column sub-frames. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 61, p. 1332-1352.

Colson, A. e Louveau, J. M. (1983). Connections Incidence on the Inelastic behavior of Steel Structures. *Euromech Coll.*, 174, Oct.

David, D. L. (2003). Vigas Mistas com Laje Treliçada e Perfis Formados a Frio: Análise do Comportamento Estrutural. Dissertação de Mestrado. UFG, Goiânia, GO.

Dias, L. A. M. (2002). Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem. Quarta edição, editora Ziguarte, São Paulo, SP.

Empremaq (2006). Máquinas Operatrizes Ltda - <http://www.empremaq.com.br>. Consulta em 26/07/2006.

Faella, C., Piluso, V. e Rizzano, G. (1999). *Structural Steel Semirigid Connections: Theory, Design and Software*. Primeira edição, editora CRC Press LLC , Boca Raton, Florida.

Figueiredo, L. M. B. (2004). Ligações mistas viga-pilar – análise teórica e experimental. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP.

Frye, M. J. e Morris, G. A. (1975). Analysis of Flexibly Connected Steel Frames. *Canadian Journal of Civil Engineers*, v.2(3), p. 280-291.

Fu, F. e Lam, D. (2005). Experimental study on semi-rigid composite joints with steel beams and precast hollowcore slabs. *Journal of Constructional Steel Research*, v.62, p.771-782.

Fundação Getulio Vargas (2006). <http://www.GVconsult.com.br>

Godley, M. H. R. (1991). Storage Racking in Design of Cold Formed Steel Members, Chapter 11, Ed. Rhodes, J. Elsevier Applied Science, Amsterdam, p. 361-399.

Gonzaga, L. G. M. (2003). Comportamento e Resistência de Ligações Viga-Pilar Parafusadas e Soldadas de Estruturas de Perfis de Aço Formados a Frio. Dissertação de Mestrado. UFMG, Belo Horizonte, MG.

Hanaor, A. (2000). Tests of composite beams with cold-formed sections. Journal of Constructional Steel Research, v. 54, p. 245-264.

Leon, R. T. (1990). Semi-Rigid Composite Connection. Journal of Constructional Steel Research, v. 15, p. 99-120.

Hottinger Baldwin Messtechnik (2003a). Manual de operação Spider8 e Spider8-30.

Hottinger Baldwin Messtechnik (2003b). Catman 4.5 Operating Manual.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

Kishi, N. E Chen, W. F. (1987). Moment-Rotation Relation of Top and Seat Angle Connections. Structural Engineering Report, n. CE-STR-87-4, School of Civil Engineering, Purdue Univ., West Lafayette, IN.

Li, T. Q.; Nethercot, D. A. e Choo B. S. (1996). Behaviour of Flush End-plate Composite Connections with Unbalanced Moment and Variable Shear/Moment Ratios-I. Experimental Behaviour. Journal of Constructional Steel Research, v. 38, p. 125-164.

Li, T. Q.; Nethercot, D. A. e Lawson, R. M. (2000). Required rotation of composite connections. Journal of Constructional Steel Research, v. 56, p. 151-173.

Liew, J. Y. R., Teo, T. H., Shanmugam, N. E. e Yu, C. H. (2000). Testing of steel-concrete composite connections and appraisal of results. Journal of Constructional Steel Research, v. 56, p. 117-150.

Malite, M., Sáles, J. J., Gonçalves, R. M. (1998). Algumas considerações sobre a nova norma brasileira de estruturas de aço em perfis formados a frio. Artigo Técnico, Revista Construção Metálica, n. 33, p. 22-26, 1998.

Mathcad (2001). Mathcad User's Guide with Reference Manual 2001. Editora MathSoft Engineering & Education, Inc., Cambridge, USA.

Morais, C. S. (2003). Análise Teórico-Experimental de Ligações Parafusadas em Perfis Formados a Frio. Dissertação de Mestrado. UFOP, Ouro Preto, MG.

Morais, C. S., Silva, A. C., Ribeiro, L. F. L. e Freitas, A. M. S. (2005). Análise Teórico-Experimental de Ligações Parafusadas em Perfis Formados a Frio. REM – Revista Escola de Minas, v.58, n.4, p. 347-353.

Nethercot, D. A., Li, T. Q., Moore D. B. e Choo, B. S. (1996). The Experimental Behaviour of a Full-scale, Semi-rigidly Connected Composite Frame: Overall Considerations. Journal of Constructional Steel Research, v. 39, p. 167-191.

Oliveira, A. M. (2000). Análise Teórico-Experimental de Sistemas Industriais de Armazenagem ("Racks"). Dissertação de Mestrado. UFOP, Ouro Preto, MG.

PNAD (2004). Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios.

Pinheiro, L. (2003). Análises Não-Lineares de Sistemas Estruturais Metálicos Rotulados e Semi-Rígidos. Dissertação de Mestrado. UFOP, Ouro Preto, MG.

Protótipo USIHAB (2001). Projetos Arquitetônicos do Projeto USIHAB. Belo Horizonte, MG.

Puhali, R. e Smotlak I. (1990). Semi-Rigid Composite Action: Experimental Analysis and a Suitable Model. Journal of Constructional Steel Research, v. 15, p. 121-151.

Queiroz, G.; Pimenta, R. J. e da Mata, L. A. C. (2001). Elementos das Estruturas Mistas Aço-Concreto. Primeira edição, editora O Lutador, Belo Horizonte, MG.

- Radziminsk, J. B. e Azizinamini, A. (1988). Prediction of Moment-Rotation Behavior of Semi-Rigid Beam-to-Column Connections. In: Bjorhovde, R.; Brozzetti, J.; Colson, A., ed. Connections in Steel Structures, London, Elsevier, p. 33-40.
- Resende, P. G. (2005). Análise da Resposta Numérica de Ligações Parafusadas em Chapas Finas e Perfis Formados a Frio. Dissertação de Mestrado. USP, São Carlos, SP.
- Richard, R. M. e Abbott, B. J. (1975). Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, v. 101(4), p. 511-515.
- Rondal, J. (2000). Cold formed steel members and structures general report. Journal of Constructional Steel Research, v. 55, p. 155-158.
- Shakourzadeh, H.; Guo, Y. Q. e Batoz, J. L. (1999). Modeling of connections in the analyses of thin-walled space frames. Computers and Structures, v. 71, p. 423-433.
- Sommer, S. H. (1969). Behavior of Welded-Header Plate Connections. M.S. Thesis, University of Toronto, Toronto, Canada.
- Tan, S. H. e Rhodes, J. (1994). Semi-Rigid in Cold Formed Thin-Walled Structures. Journal of Constructional Steel Research, v. 28, p. 279-293.
- Tan, S. H e Seah, L. K. e Fox, S. C. (1996). Connections in Cold-Formed Thin-Walled Structures. Computers & Structures, v.60, p. 169-172.
- Tan, S. H. (2000). Channel Frames with Semi-Rigid Joints. Computers & Structures, v.79, p. 715-725.
- Usiminas (2000). Revista Catálogo do 2º Prêmio Usiminas Arquitetura em Aço. Belo Horizonte, MG.
- Usiminas (2006). Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais - <http://www.usiminas.com.br>. Consulta em 06/2006.

Wong, M. F. e Chung, K. F. (2002). Structural Behaviour of Bolted Moment Connections in Cold-Formed Steel Beam-Column Sub-Frames. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 58, p. 253-274.

Xiao, Y., Choo, B.S. e Nethercot D. A. (1994). Composite Connections in Steel and Concrete. I. Experimental Behaviour of Composite Beam-Column Connections. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 31, p. 3-30.

Yee, Y. L. e Melchers, R. E. (1986). Moment-Rotation Curves for Bolted Connections. *Journal of Structural Engineering*, v. 112(3), p. 615-633.

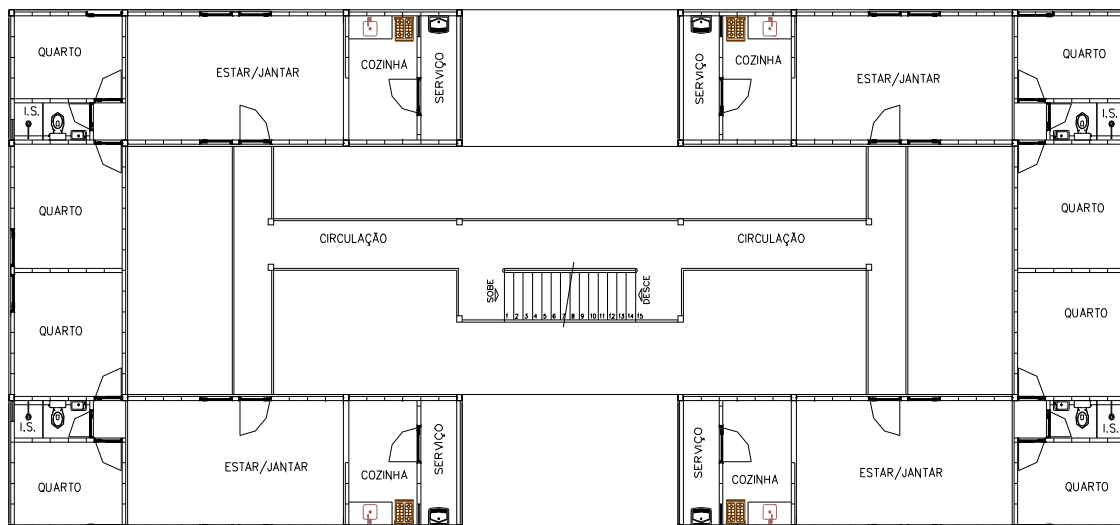
Yu, W. W. (2000). *Cold Formed Steel Design*. Terceira edição, editora John Wiley & Sons, Inc., New York, New York.

ANEXOS

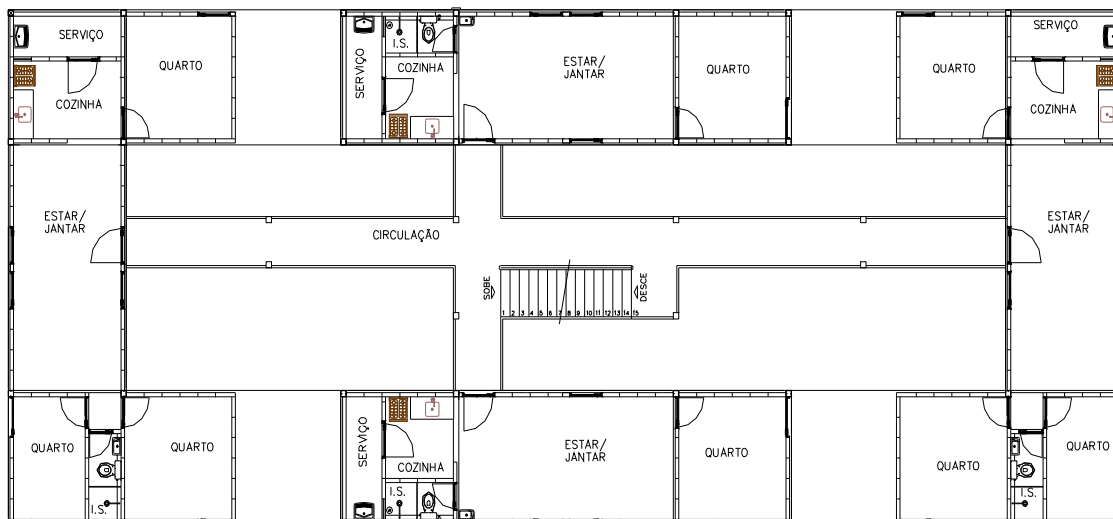
ANEXO I

Planta baixa e Esquema Estrutural do Projeto USIHAB

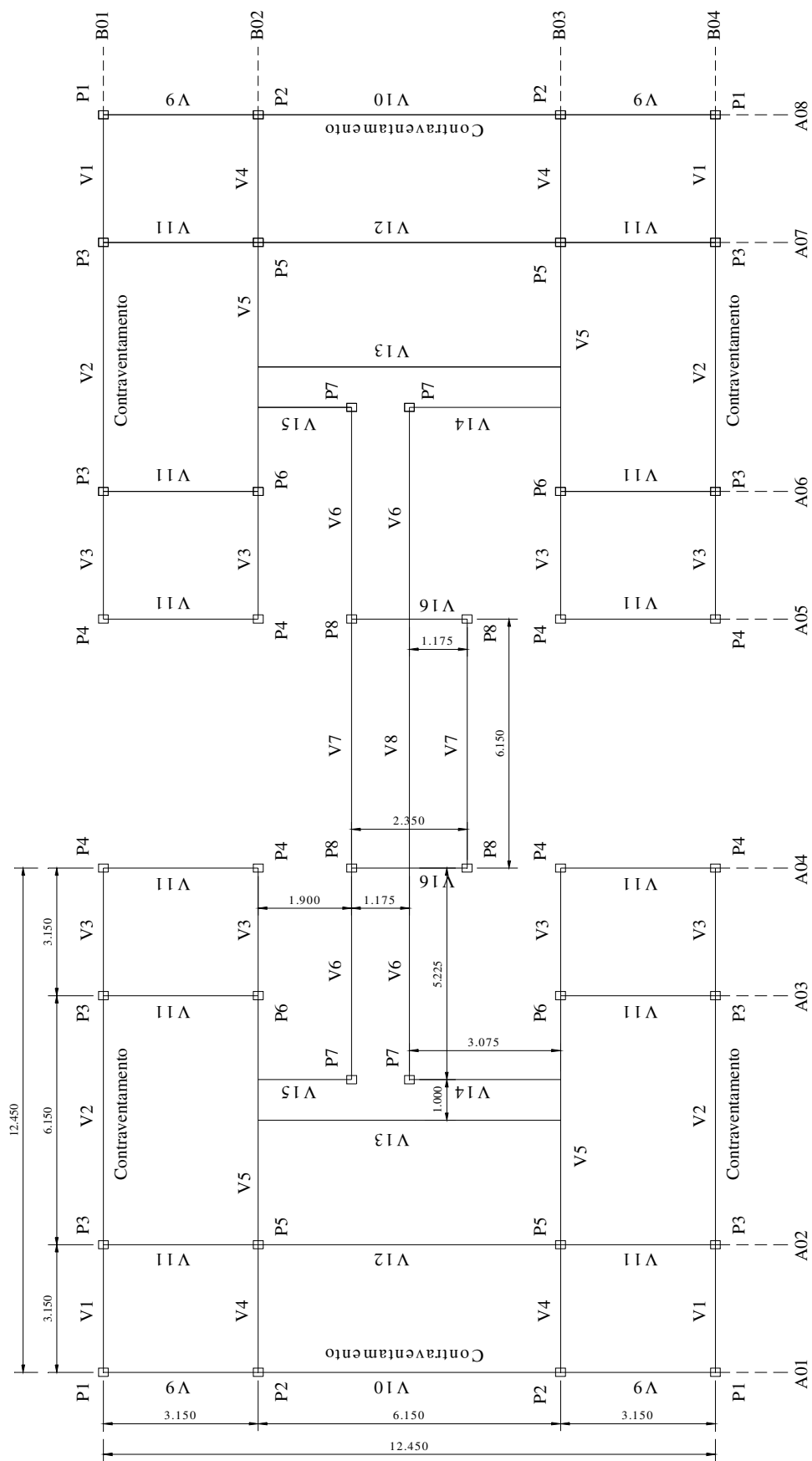
PLANTA BAIXA DO 1º, 2º, 3º e 4º PAVIMENTOS – PROJETO USIHAB



Planta Baixa do 1º, 2º e 4º pavimentos (Projeto USIHAB, 2001).

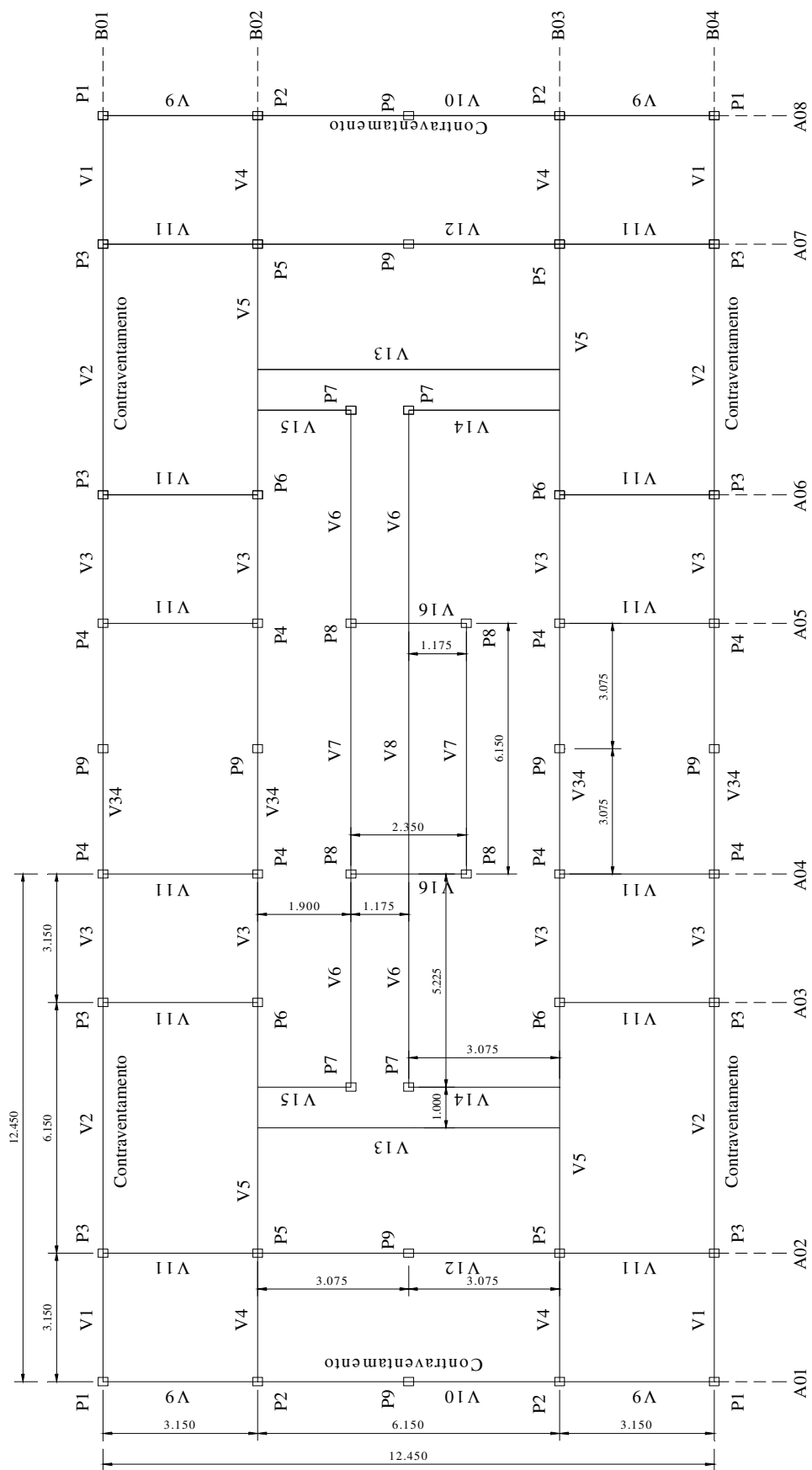


Planta Baixa do 3º pavimento (Projeto USIHAB, 2001).



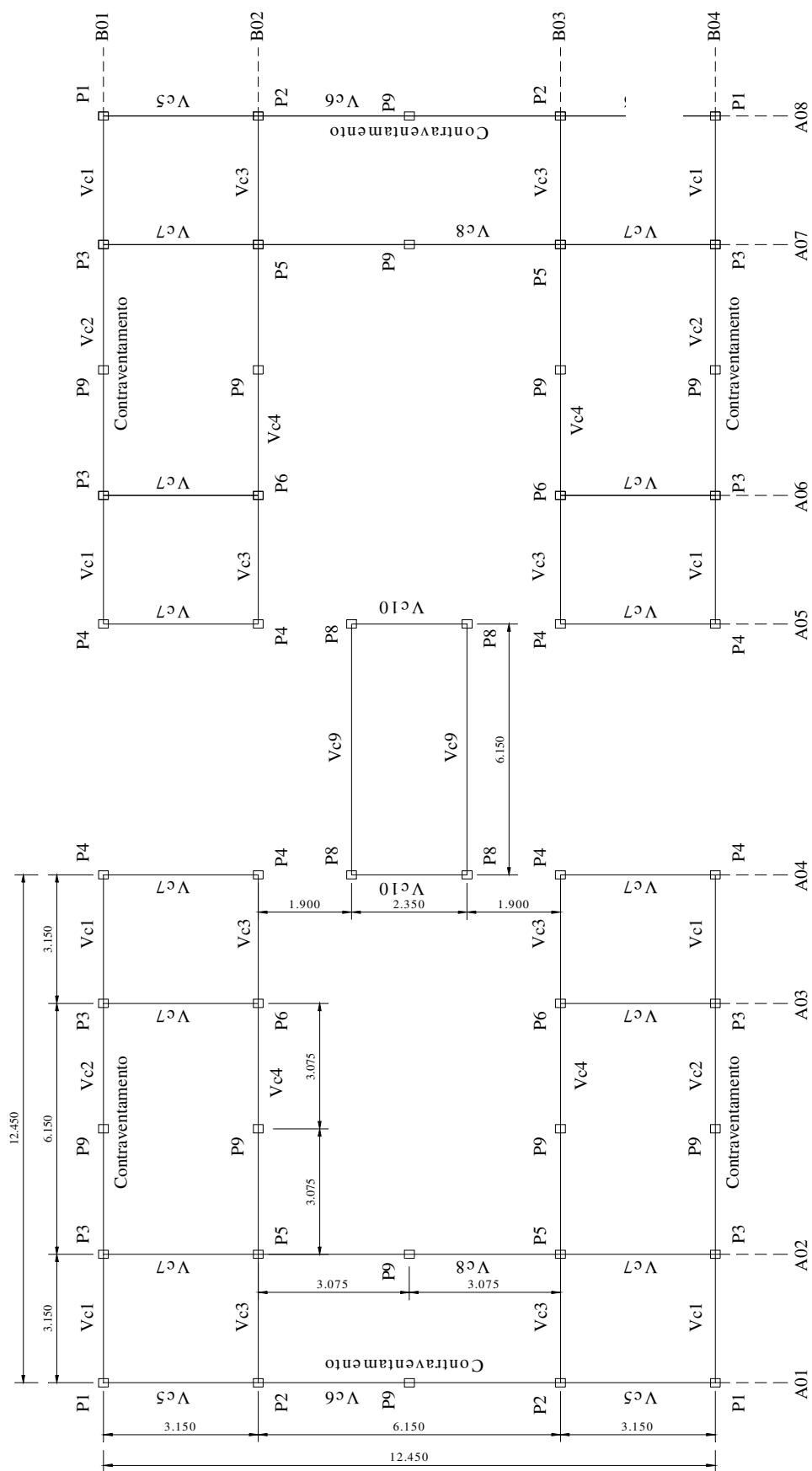
Esquema Estrutural em Planta

2o Pavimento



Esquema Estrutural em Planta

4o Pavimento



Esquema Estrutural em Planta

Cobertura

ANEXO II

Memória de Cálculo das Ligações Ensaaiadas

II.1. Dimensionamento da Ligação do Protótipo B

Dimensionamento da Ligação do Protótipo B

1) Considerações Iniciais

Viga: Caixa 150x120x20x2,00

Coluna I 170x190x25x2,25

Cantoneira: 2L 60x40x3,00

U Suporte: 129,5x184,75x4,75

Parafusos: A325 $f_y = 634 \text{ MPa}$
 $f_u = 825 \text{ MPa}$

Solda de Filete: E60XX $f_w = 415 \text{ MPa}$

Aço: USI-SAC 250 $f_y = 386 \text{ MPa}$ (ensaio de caracterização)
 $f_u = 515 \text{ MPa}$ (ensaio de caracterização)

2) Hipóteses de Configurações da Ligação

2.1) - **Solda:** para cantoneira $w_f = 2,00 \text{ mm}$;
 para o U suporte $w_b = 2,25 \text{ mm}$.

- **Parafuso:** $d = 12,7 \text{ mm}$ (3 parafusos c/ cantoneira)

- **Determinação dos esforços de Cálculo:**

a) **Devido à resistência da seção da vigas 01 e 02, tem-se:**

$M_d = 17.84 \text{ kNm}$ e $V_d = 89.98 \text{ kN}$

- **Verificação do esmagamento da alma na vigas 01 e 02, região da ligação em estudo, de acordo com a AISI 2001. Esta verificação foi realizada com a utilização do software CFS Versão 4.14:**

CFS Version 4.14 - Box 150x60x20x2

Web Crippling Check - 2001 AISI Specification - US (LRFD)

--

Load: 27.010 kN on bottom flange

Moment: 0.000 kN-m

Bearing: 167.00 mm

Flange fastened to bearing surface: No

Distance from edge of bearing to end of member: 140 mm

Distance from edge of bearing to edge of opposite load: 613 mm

Part	Elem	Calculation Type	ϕP_n (kN)	ϕP_{ny} (kN)	Notes
1	3	Cee, US-EOF	13.508	13.508	
2	3	Cee, US-EOF	13.508	13.508	
		Total		27.016	

Web Crippling Check: 27.010 kN <= 27.016 kN
 Moment Check: 0.000 kN-m <= 17.844 kN-m
 Interaction Equations
 AISI Eq. C3.5.2-1 (P, M) 1.070 + 0.000 = 1.070 <= 1.42

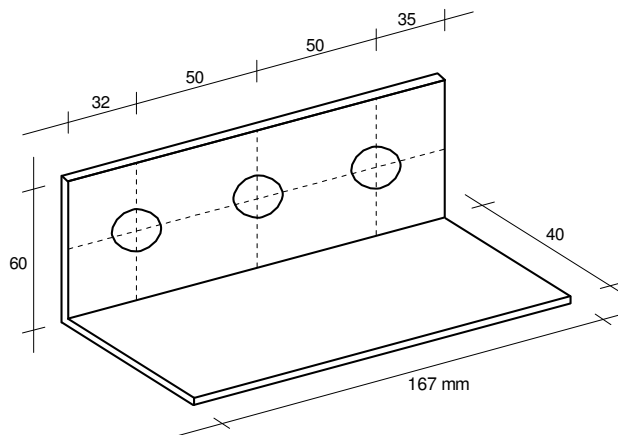
Portanto, como a resistência ao Web Crippling é menor, tem-se:

$$F_{rd} = 27.01 \text{ kN} = V_d$$

$$V_d := 27.01 \quad V_n := \frac{V_d}{0.95} \quad V_n = 28.432 \text{ kN}$$

$$M_d := 17.844 \quad M_n := \frac{M_d}{0.95} \quad M_n = 18.783 \text{ kNm}$$

3) Determinação da Resistência da Solda da Cantoneira



a) Metal Base: solicitação paralela ao eixo da solda

$$f_u := 515 \text{ MPa}$$

$$L := 167 \text{ mm}$$

$$t := 2.00 \text{ mm} \quad \frac{L}{t} = 83.5 \quad \frac{L}{t} > 25$$

$$F_{rd} := 0.75 \cdot t \cdot L \cdot \frac{f_u}{1.8 \cdot 1000} \quad F_{rd} = 71.671 \text{ kN}$$

b) Metal Base: solicitação normal ao eixo da solda

$$f_u := 515 \text{ MPa}$$

$$L := 2 \cdot (40 - 2 \cdot t) \quad L = 72 \text{ mm}$$

$$t := 2.00 \text{ mm}$$

$$F_{rd} := t \cdot L \cdot \frac{f_u}{1.65 \cdot 1000} \quad F_{rd} = 44.945 \text{ kN}$$

Portanto, tem-se:

$$F_{rd} = 71.67 + 44.95 = 116.62 \text{ kN}$$

4) Determinação da Resistência dos Parafusos

a) Rasgamento entre Furos

$$f_u := 515 \text{ MPa}$$

$$e := 50 - \frac{14.2}{2} \quad e = 42.9 \text{ mm}$$

$$t := 3.00 \text{ mm}$$

$$F_{rd} := t \cdot e \cdot \frac{f_u}{1.35 \cdot 1000} \quad F_{rd} = 49.097 \text{ kN}$$

b) Rasgamento entre Furo e Borda

$$f_u := 515 \text{ MPa} \quad t := 3.00 \text{ mm}$$

$$e := 32 \text{ mm}$$

$$F_{rd} := t \cdot e \cdot \frac{f_u}{1.35 \cdot 1000} \quad F_{rd} = 36.622 \text{ kN}$$

c) Pressão de Contato (Esmagamento)

$$f_u := 515 \text{ MPa} \quad t := 3.00 \text{ mm}$$

$$d := 12.7 \text{ mm}$$

$$F_{rd} := 2.5t \cdot d \cdot \frac{f_u}{1.35 \cdot 1000} \quad F_{rd} = 36.336 \text{ kN}$$

d) Força Cortante nos Parafusos (plano de corte passa pela rosca)

$$f_{up} := 825 \text{ MPa}$$

$$A_p := 126 \text{ mm}^2$$

$$V_{rd} := 0.45 A_p \cdot \frac{f_{up}}{1.55 \cdot 1000} \quad V_{rd} = 30.179 \text{ kN}$$

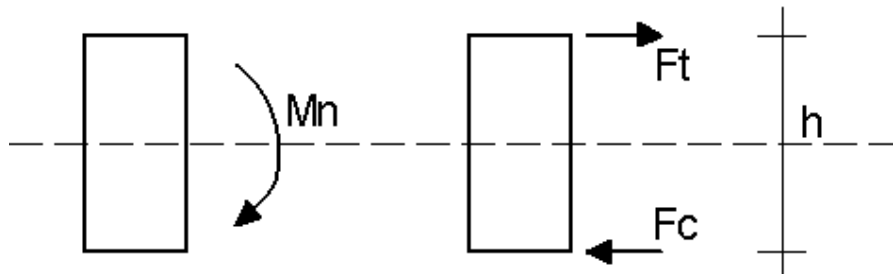
$$V_{rdt} := 3 \cdot V_{rd} \quad V_{rdt} = 90.537 \text{ kN}$$

Portanto, tem-se:

$$F_{rd} = 36.34 \text{ kN} \quad e$$

$$V_{rd} = 30.18 \text{ kN}$$

5) Determinação dos Esforços Solicitantes na Solda da Cantoneira



$$M_n := 18.783 \text{ kNm}$$

$$h := 150 \text{ mm}$$

$$F_t = F_c$$

$$M_n = h/2 (F_t + F_c)$$

$$M_n = h/2 (2F_t)$$

$$M_n = h \cdot F_t$$

$$F_t := \frac{1000 M_n}{h}$$

$$F_t = 125.22 \text{ kN}$$

$$F_l := \left[\left(\frac{F_t}{2} \right)^2 + \left(\frac{V_n}{4} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad F_l = 63.012 \text{ kN}$$

Sendo F_l = Esforço em cada cantoneira

6) Verificação da Cantoneira

a) Solda:

Como a resistência da solda é de 116.62 kN, tem-se:

$$F_l < F_{rd} \quad \text{ok!}$$

b) Parafusos:

Determinação dos esforços no conjunto de parafusos, sendo:

F_p = força cortante no parafuso mais solicitado

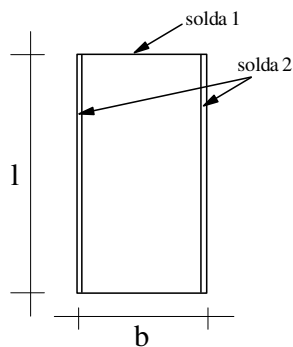
$$F_p := \left[\left(\frac{M_n}{0.21 \cdot 2 \cdot 3} \right)^2 + \left(\frac{V_n}{12} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad M_n = 18.783 \quad V_n = 28.432$$

$$F_p = 15.094 \quad \text{kN}$$

Portanto, tem-se:

$$\begin{aligned} F_p &< V_{rd} && \text{ok!} \\ F_p &< F_{rd} && \text{ok!} \end{aligned}$$

7) U Suporte



$$l := 270 \quad \text{mm}$$

$$b := 129.5 \quad \text{mm}$$

$$t := 4.75 \quad \text{mm}$$

7.1) Determinação da Resistência da Solda do U Suporte

Consideraremos que as soldas 1 e 2 resistirão aos esforços.

a) Resistência da Solda 1

- Metal Base: solicitação normal ao eixo da solda

$$L := b \quad L = 129.5 \quad \text{mm}$$

$$f_u := 515 \quad \text{MPa} \quad t := 2.25 \quad \text{mm}$$

$$F_{rd} := t \cdot L \cdot \frac{f_u}{1.65 \cdot 1000} \quad F_{rd} = 90.944 \quad \text{kN}$$

Portanto, tem-se

$$F_{rd1} = 90.94 \quad \text{kN}$$

b) Resistência da Solda 2

- Metal Base: solicitação normal ao eixo da solda

$$L := 90 \quad L = 90 \quad \text{mm}$$

$$f_u := 515 \quad \text{MPa} \quad t := 2.25 \quad \text{mm}$$

$$F_{rd} := t \cdot L \cdot \frac{f_u}{1,65 \cdot 1000} \quad F_{rd} = 63.205 \quad \text{kN}$$

Portanto, tem-se

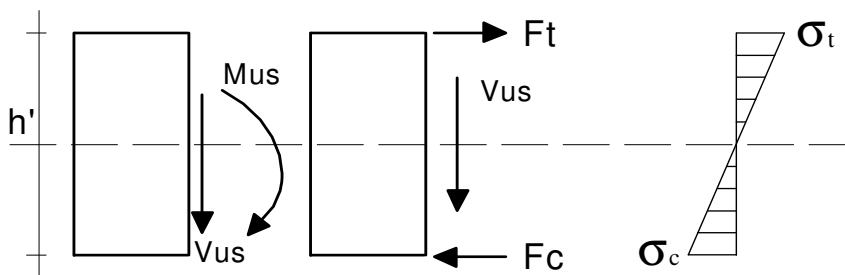
$$F_{rd2} = 63.20 \text{ kN}$$

c) Resistência Admitida da Solda do U Suporte para a Ligação P1 com V1

Assim, tem-se:

$$F_{rd} = F_{rd1} + 2 \cdot F_{rd2} = 217.35 \text{ kN}$$

8) Determinação dos Esforços Solicitantes no U Suporte



$$V_n = 28.432 \text{ kN}$$

$$V_{us} := V_n$$

$$V_{us} = 28.432 \text{ kN}$$

$$h' := 210 \text{ mm}$$

$$M_n = 18.783 \text{ kNm}$$

$$M_{us} := M_n$$

$$M_{us} = 18.783 \text{ kNm}$$

$$F_c := \frac{-M_{us} \cdot 1000}{h'}$$

$$F_c = -89.443 \text{ kN}$$

$$F_t := -F_c$$

$$F_t = 89.443 \text{ kN}$$

- Esforço solicitante na solda:

$$F_{tw} := \left[F_t^2 + \left(\frac{V_{us}}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad F_{tw} = 90.566 \quad \text{kN}$$

$$F_{tw} < F_{rd}$$

ok!

9) Verificação da Mesa e Alma da Coluna Junto à Ligação em Estudo

Devido a concentração de esforços localizados na mesa e na alma da coluna, foi introduzida na configuração da ligação dois "U simples" de espessura 4,75 mm soldados às mesas e alma, internamente ao mesmo.

A seguir são determinados os esforços de cálculo na mesa e na alma da coluna e suas verificações, de acordo com a NBR 8800 item 7.1.3.1.

- **Determinação dos esforços solicitantes em cada mesa da coluna junto à ligação:**

$$M_n = 18.783 \text{ kNm} \quad L := 150 \text{ mm}$$

$$P_{dt} := \frac{M_n \cdot 1000}{L} \quad P_{dt} = 125.22 \text{ kN}$$

$$P_{dc} := -P_{dt} \quad P_{dc} = -125.22 \text{ kN}$$

- **Verificação da necessidade de utilização de enrijecedores transversais na alma da coluna:**

$$t_c := 2 \cdot 2.250 \quad t_w := t_c + 2 \cdot 4.75 \quad t_w = 14 \text{ mm}$$

$$t_b := 4.75 \text{ mm} \quad k := 4.75 + \frac{t_c}{2} \quad k = 7 \text{ mm}$$

$$f_y := 386 \text{ MPa} \quad f_i := 0.90 \quad h := 155 \text{ mm} \quad E := 205000 \text{ MPa}$$

$$Br1 := f_i \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{1000} \cdot (t_b + 5 \cdot k) \quad Br1 = 193.328 \text{ kN}$$

$$Br2 := 22 \cdot f_i \cdot t_w^3 \cdot \frac{(E \cdot f_y)^{\frac{1}{2}}}{1000 \cdot h} \quad Br2 = 3.118 \times 10^3 \text{ kN}$$

Logo:

$$Br := Br1 \quad Br = 193.328 \text{ kN}$$

$$Tr1 := Br1 \quad Tr1 = 193.328 \text{ kN}$$

$$Tr2 := 6 \cdot f_i \cdot k^2 \cdot \frac{f_y}{1000} \quad Tr2 = 102.136 \text{ kN}$$

Logo:

$$Tr := Tr2 \quad Tr = 102.136 \text{ kN}$$

Portanto, tem-se:

$$\begin{array}{ll} Br > P_{dc} & \text{ok!} \\ Tr < P_{dt} & \text{necessidade de enrijecedores transversais} \end{array}$$

10) Verificação da alma da coluna quanto ao cisalhamento

a) Determinação do esforço cisalhante solicitante na alma da coluna

$$\begin{aligned} P_{dt} &= 125.22 \text{ kN} \\ V_n &= 28.432 \text{ kN} \quad F_w := \left(P_{dt}^2 + V_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad F_w = 128.407 \text{ kN} \end{aligned}$$

b) Resistência de cálculo da coluna quanto ao cisalhamento

$$h := 170 - 2 \cdot (2.25 + 4.75) \quad t := 2 \cdot (4.75 + 2.25)$$

$$s := \frac{h}{t} \quad s = 11.143 \quad k_v := 5.34$$

$$x := 1.08 \left(\frac{E \cdot k_v}{f_y} \right)^{\frac{1}{2}} \quad x = 57.515$$

$$y := 1.4 \left(\frac{E \cdot k_v}{f_y} \right)^{\frac{1}{2}} \quad y = 74.556$$

$$s < x \quad V_{rd} := 0.6 \cdot f_y \cdot h \cdot \frac{t}{1.1 \cdot 1000} \quad V_{rd} = 459.831 \text{ kN}$$

Portanto, tem-se:

$$V_{rd} > F_w \quad \text{ok!}$$

II.2. Dimensionamento da Ligação do Protótipo C

Dimensionamento da Ligação do Protótipo C

1) Considerações Iniciais

Viga: Caixa 150x120x20x2,25

Coluna I 170x190x25x2,25

Cantoneira: 2L 60x40x3,00

U Suporte: 129,5x184,75x4,75

Parafusos: A325 $f_y = 634$ MPa
 $f_u = 825$ MPa

Solda de Filete: E60XX $f_w = 415$ MPa

Aço: USI-SAC 250 $f_y = 386$ MPa (ensaio de caracterização)
 $f_u = 515$ MPa (ensaio de caracterização)

2) Hipóteses de Configurações da Ligação

2.1) - **Solda:** para cantoneira $w_f = 2,25$ mm;
 para o U suporte $w_b = 2,25$ mm.

- **Parafuso:** $d = 12,7$ mm (3 parafusos c/ cantoneira)

- **Determinação dos esforços de Cálculo:**

a) **Devido à resistência da seção da vigas 01 e 02, tem-se:**

$M_d = 20.145$ kNm e $V_d = 113.88$ kN

- **Verificação do esmagamento da alma na vigas 01 e 02, região da ligação em estudo, de acordo com a AISI 2001. Esta verificação foi realizada com a utilização do software CFS Versão 4.14:**

CFS Version 4.14 - Box 150x60x20x2.25

Web Crippling Check - 2001 AISI Specification - US (LRFD)

Load: 33.100 kN on bottom flange
Moment: 0.0000 kN-m
Bearing: 167.00 mm
Flange fastened to bearing surface: No
Distance from edge of bearing to end of member: 140 mm
Distance from edge of bearing to edge of opposite load: 613 mm

Part	Elem	Calculation Type	ϕP_n (kN)	ϕP_{ny} (kN)	Notes
1	3	Cee, US-EOF	16.552	16.552	
2	3	Cee, US-EOF	16.552	16.552	
		Total		33.104	

Web Crippling Check: 33.100 kN <= 33.104 kN
 Moment Check: 0.000 kN-m <= 20.145 kN-m
 Interaction Equations
 AISI Eq. C3.5.2-1 (P, M) 1.070 + 0.000 = 1.070 <= 1.42

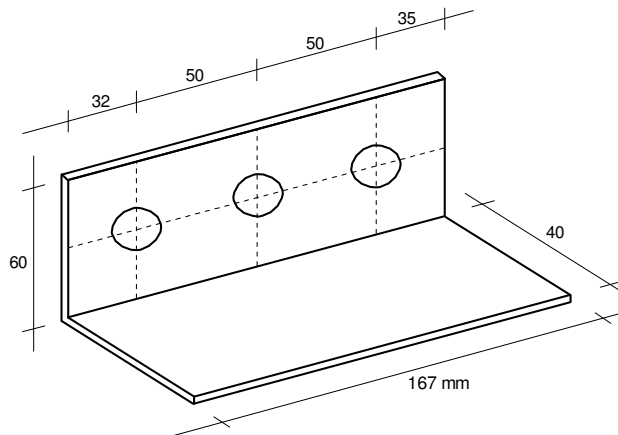
Portanto, como a resistência ao Web Crippling é menor, tem-se:

$$F_{rd} = 33.10 \text{ kN} = V_d$$

$$V_d := 33.10 \quad V_n := \frac{V_d}{0.95} \quad V_n = 34.842 \text{ kN}$$

$$M_d := 20.145 \quad M_n := \frac{M_d}{0.95} \quad M_n = 21.205 \text{ kNm}$$

3) Determinação da Resistência da Solda da Cantoneira



a) Metal Base: solicitação paralela ao eixo da solda

$$f_u := 515 \text{ MPa}$$

$$L := 167 \text{ mm}$$

$$t := 2.25 \text{ mm} \quad \frac{L}{t} = 74.222 \quad \frac{L}{t} > 25$$

$$F_{rd} := 0.75 \cdot t \cdot L \cdot \frac{f_u}{1.8 \cdot 1000} \quad F_{rd} = 80.63 \text{ kN}$$

b) Metal Base: solicitação normal ao eixo da solda

$$f_u := 515 \text{ MPa}$$

$$L := 2 \cdot (40 - 2 \cdot t) \quad L = 71 \text{ mm}$$

$$t := 2.25 \text{ mm}$$

$$F_{rd} := t \cdot L \cdot \frac{f_u}{1.65 \cdot 1000} \quad F_{rd} = 49.861 \text{ kN}$$

Portanto, tem-se:

$$F_{rd} = 80.63 + 49.86 = 130.49 \text{ kN}$$

4) Determinação da Resistência dos Parafusos

a) Rasgamento entre Furos

$$f_u := 515 \text{ MPa}$$

$$e := 50 - \frac{14.2}{2} \quad e = 42.9 \text{ mm}$$

$$t := 3.00 \text{ mm}$$

$$F_{rd} := t \cdot e \cdot \frac{f_u}{1.35 \cdot 1000} \quad F_{rd} = 49.097 \text{ kN}$$

b) Rasgamento entre Furo e Borda

$$f_u := 515 \text{ MPa} \quad t := 3.00 \text{ mm}$$

$$e := 32 \text{ mm}$$

$$F_{rd} := t \cdot e \cdot \frac{f_u}{1.35 \cdot 1000} \quad F_{rd} = 36.622 \text{ kN}$$

c) Pressão de Contato (Esmagamento)

$$f_u := 515 \text{ MPa} \quad t := 3.00 \text{ mm}$$

$$d := 12.7 \text{ mm}$$

$$F_{rd} := 2.5t \cdot d \cdot \frac{f_u}{1.35 \cdot 1000} \quad F_{rd} = 36.336 \text{ kN}$$

d) Força Cortante nos Parafusos (plano de corte passa pela rosca)

$$f_{up} := 825 \text{ MPa}$$

$$A_p := 126 \text{ mm}^2$$

$$V_{rd} := 0.45 A_p \cdot \frac{f_{up}}{1.55 \cdot 1000} \quad V_{rd} = 30.179 \text{ kN}$$

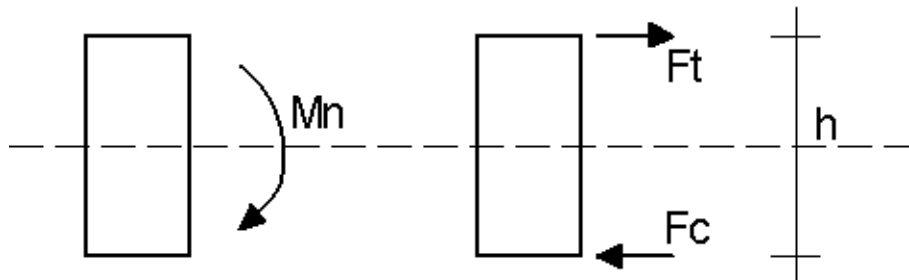
$$V_{rdt} := 3 \cdot V_{rd} \quad V_{rdt} = 90.537 \text{ kN}$$

Portanto, tem-se:

$$F_{rd} = 36.34 \text{ kN} \quad e$$

$$V_{rd} = 30.18 \text{ kN}$$

5) Determinação dos Esforços Solicitantes na Solda da Cantoneira



$$M_n := 21.205 \text{ kNm}$$

$$h := 150 \text{ mm}$$

$$F_t = F_c$$

$$M_n = h/2 (F_t + F_c)$$

$$M_n = h/2 (2F_t)$$

$$M_n = h \cdot F_t$$

$$F_t := \frac{1000 M_n}{h} \quad F_t = 141.367 \text{ kN}$$

$$F_l := \left[\left(\frac{F_t}{2} \right)^2 + \left(\frac{V_n}{4} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad F_l = 71.218 \text{ kN}$$

Sendo F_l = Esforço em cada cantoneira

6) Verificação da Cantoneira

a) Solda:

Como a resistência da solda é de 130.49 kN, tem-se:

$$F_l < F_{rd} \quad \text{ok!}$$

b) Parafusos:

Determinação dos esforços no conjunto de parafusos, sendo:

F_p = força cortante no parafuso mais solicitado

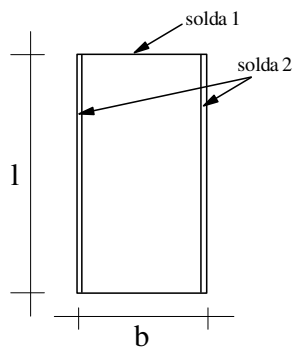
$$F_p := \left[\left(\frac{M_n}{0.21 \cdot 2 \cdot 3} \right)^2 + \left(\frac{V_n}{12} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad M_n = 21.205 \quad V_n = 34.842$$

$$F_p = 17.078 \quad \text{kN}$$

Portanto, tem-se:

$$\begin{aligned} F_p &< V_{rd} && \text{ok!} \\ F_p &< F_{rd} && \text{ok!} \end{aligned}$$

7) U Suporte



$$l := 270 \quad \text{mm}$$

$$b := 129.5 \quad \text{mm}$$

$$t := 4.75 \quad \text{mm}$$

7.1) Determinação da Resistência da Solda do U Suporte

Consideraremos que as soldas 1 e 2 resistirão aos esforços.

a) Resistência da Solda 1

- Metal Base: solicitação normal ao eixo da solda

$$L := b \quad L = 129.5 \quad \text{mm}$$

$$f_u := 515 \quad \text{MPa} \quad t := 2.25 \quad \text{mm}$$

$$F_{rd} := t \cdot L \cdot \frac{f_u}{1.65 \cdot 1000} \quad F_{rd} = 90.944 \quad \text{kN}$$

Portanto, tem-se

$$F_{rd1} = 90.94 \quad \text{kN}$$

b) Resistência da Solda 2

- Metal Base: solicitação normal ao eixo da solda

$$L := 90 \quad L = 90 \quad \text{mm}$$

$$f_u := 515 \quad \text{MPa} \quad t := 2.25 \quad \text{mm}$$

$$F_{rd} := t \cdot L \cdot \frac{f_u}{1,65 \cdot 1000} \quad F_{rd} = 63.205 \quad \text{kN}$$

Portanto, tem-se

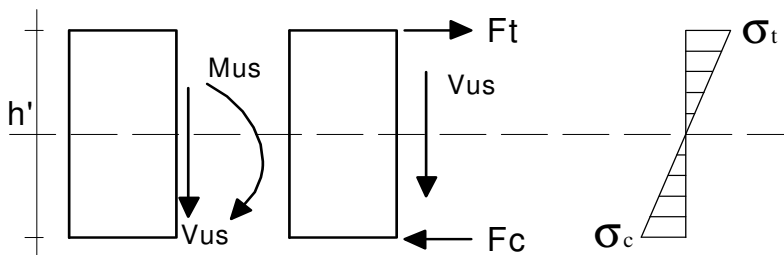
$$F_{rd2} = 63.21 \text{ kN}$$

c) Resistência Admitida da Solda do U Suporte para a Ligação P1 com V1

Assim, tem-se:

$$F_{rd} = F_{rd1} + 2 \cdot F_{rd2} = 217.36 \text{ kN}$$

8) Determinação dos Esforços Solicitantes no U Suporte



$$V_n = 34.842 \text{ kN} \quad V_{us} := V_n \quad V_{us} = 34.842 \text{ kN}$$

$$h' := 210 \text{ mm}$$

$$M_n = 21.205 \text{ kNm} \quad M_{us} := M_n \quad M_{us} = 21.205 \text{ kNm}$$

$$F_c := \frac{-M_{us} \cdot 1000}{h'} \quad F_c = -100.976 \text{ kN}$$

$$F_t := -F_c \quad F_t = 100.976 \text{ kN}$$

- Esforço solicitante na solda:

$$F_{tw} := \left[F_t^2 + \left(\frac{V_{us}}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad F_{tw} = 102.468 \text{ kN}$$

$$F_{tw} < F_{rd} \quad \text{ok!}$$

9) Verificação da Mesa e Alma da Coluna Junto à Ligação em Estudo

Devido a concentração de esforços localizados na mesa e na alma da coluna, foi introduzida na configuração da ligação dois "U simples" de espessura 4,75 mm soldados às mesas e alma, internamente ao mesmo.

A seguir são determinados os esforços de cálculo na mesa e na alma da coluna e suas verificações, de acordo com a NBR 8800 item 7.1.3.1.

- **Determinação dos esforços solicitantes em cada mesa da coluna junto à ligação:**

$$M_n = 21.205 \text{ kNm} \quad L := 150 \text{ mm}$$

$$P_{dt} := \frac{M_n \cdot 1000}{L} \quad P_{dt} = 141.367 \text{ kN}$$

$$P_{dc} := -P_{dt} \quad P_{dc} = -141.367 \text{ kN}$$

- **Verificação da necessidade de utilização de enrijecedores transversais na alma da coluna:**

$$t_c := 2 \cdot 2.250 \quad t_w := t_c + 2 \cdot 4.75 \quad t_w = 14 \text{ mm}$$

$$t_b := 4.75 \text{ mm} \quad k := 4.75 + \frac{t_c}{2} \quad k = 7 \text{ mm}$$

$$f_y := 386 \text{ MPa} \quad f_i := 0.90 \quad h := 155 \text{ mm} \quad E := 205000 \text{ MPa}$$

$$Br1 := f_i \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{1000} \cdot (t_b + 5 \cdot k) \quad Br1 = 193.328 \text{ kN}$$

$$Br2 := 22 \cdot f_i \cdot t_w^3 \cdot \frac{(E \cdot f_y)^{\frac{1}{2}}}{1000 \cdot h} \quad Br2 = 3.118 \times 10^3 \text{ kN}$$

Logo:

$$Br := Br1 \quad Br = 193.328 \text{ kN}$$

$$Tr1 := Br1 \quad Tr1 = 193.328 \text{ kN}$$

$$Tr2 := 6 \cdot f_i \cdot k^2 \cdot \frac{f_y}{1000} \quad Tr2 = 102.136 \text{ kN}$$

Logo:

$$Tr := Tr2 \quad Tr = 102.136 \text{ kN}$$

Portanto, tem-se:

$$\begin{aligned} Br &> P_{dc} \\ Tr &< P_{dt} \end{aligned}$$

ok!
necessidade de enrijecedores transversais

10) Verificação da alma da coluna quanto ao cisalhamento

a) Determinação do esforço cisalhante solicitante na alma da coluna

$$\begin{aligned} P_{dt} &= 141.367 \text{ kN} \\ V_n &= 34.842 \text{ kN} \end{aligned} \quad F_w := \left(P_{dt}^2 + V_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad F_w = 145.59 \text{ kN}$$

b) Resistência de cálculo da coluna quanto ao cisalhamento

$$h := 170 - 2 \cdot (2.25 + 4.75) \quad t := 2 \cdot (4.75 + 2.25)$$

$$s := \frac{h}{t} \quad s = 11.143 \quad k_v := 5.34$$

$$x := 1.08 \left(\frac{E \cdot k_v}{f_y} \right)^{\frac{1}{2}} \quad x = 57.515$$

$$y := 1.4 \left(\frac{E \cdot k_v}{f_y} \right)^{\frac{1}{2}} \quad y = 74.556$$

$$s < x \quad V_{rd} := 0.6 \cdot f_y \cdot h \cdot \frac{t}{1.1 \cdot 1000} \quad V_{rd} = 459.831 \text{ kN}$$

Portanto, tem-se:

$$\mathbf{V_{rd} > F_w \quad ok!}$$

ANEXO III

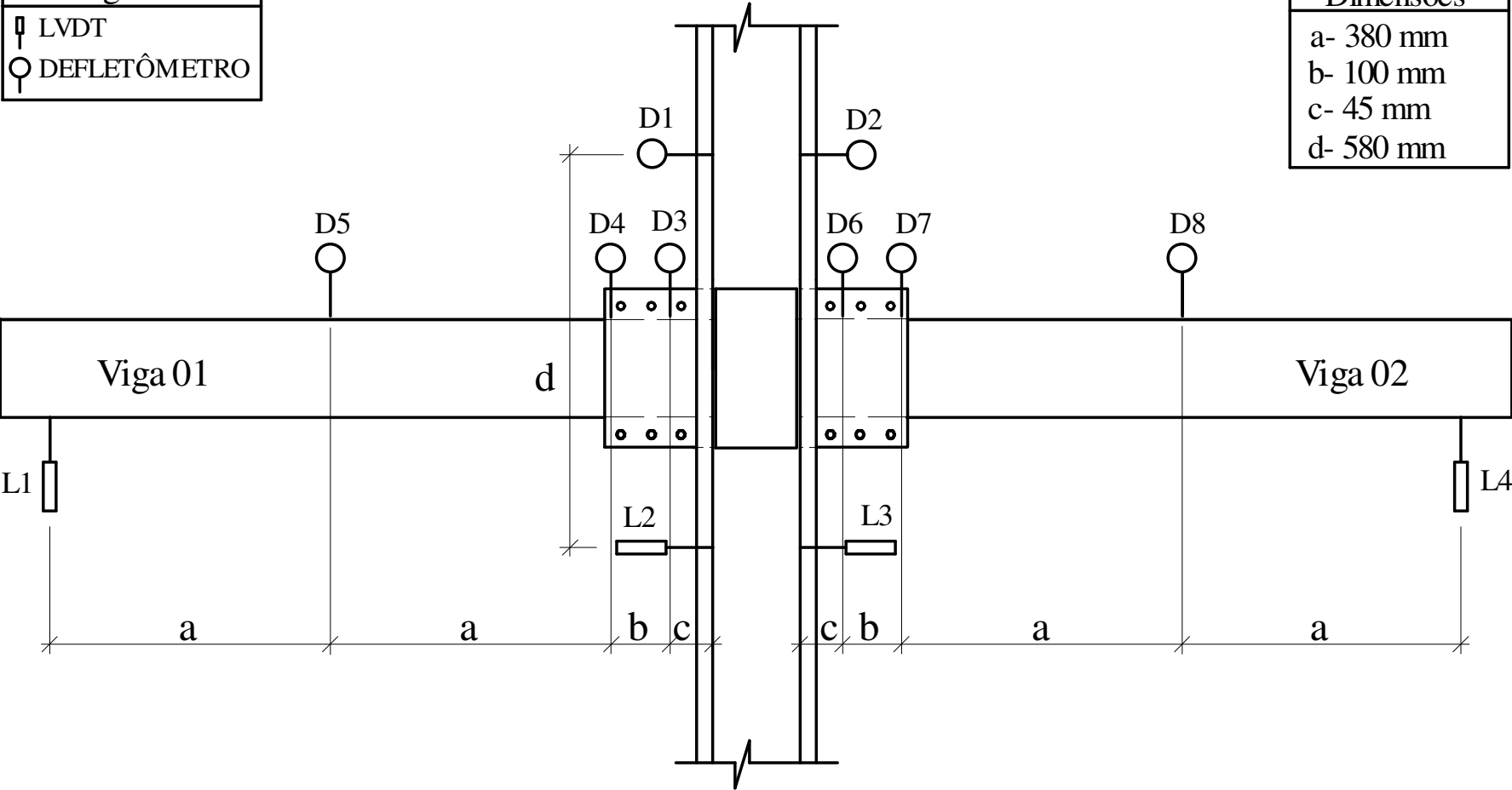
Planilhas dos Ensaios Experimentais

III.1. Planilhas de LVDT'S e DEFLETÔMETROS

POSICIONAMENTO DOS LVDT'S E DEFLETÔMETROS

Legenda	
	LVDT
	DEFLETÔMETRO

Dimensões	
a-	380 mm
b-	100 mm
c-	45 mm
d-	580 mm



Planilha LVDT'S e DEFLETÔMETROS – Protótipo B-SE (vigas 2,00mm SEM enrijecedores de alma)														
Carga	Carga	Momento	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	L1	L2	L3	L4
Kg	KN	KNm	mm											
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
110.08	1.10	1.00	0.00	0.00	0.06	0.14	0.54	0.08	0.15	0.57	1.09	0.00	0.00	1.10
213.72	2.14	1.93	0.00	0.00	0.08	0.27	1.04	0.18	0.29	1.10	2.14	0.00	0.00	2.13
303.20	3.03	2.74	0.01	0.00	0.13	0.39	1.48	0.27	0.43	1.57	3.02	0.00	0.00	3.04
405.55	4.06	3.67	0.01	0.00	0.19	0.54	2.05	0.38	0.58	2.18	4.18	0.00	0.00	4.16
504.05	5.04	4.56	0.02	0.00	0.29	0.71	2.66	0.50	0.77	2.86	5.42	0.02	0.00	5.46
599.32	5.99	5.42	0.00	0.04	0.36	0.89	3.33	0.63	0.97	3.64	6.75	0.01	0.00	6.89
701.03	7.01	6.34	-0.01	0.08	0.46	1.10	4.13	0.75	1.20	4.48	8.31	0.02	0.00	8.45
800.16	8.00	7.24	-0.02	0.15	0.49	1.31	4.94	0.88	1.44	5.36	9.94	0.01	0.00	10.15
901.87	9.02	8.16	-0.05	0.20	0.58	1.54	5.85	1.00	1.67	6.40	11.78	0.02	0.00	11.97
999.72	10.00	9.05	-0.06	0.25	0.65	1.77	6.79	1.16	1.95	7.47	13.55	0.02	0.00	13.89
1105.30	11.05	10.00	-0.10	0.30	0.81	2.02	7.79	1.31	2.28	8.73	15.85	0.02	0.00	16.36
1205.72	12.06	10.91	-0.11	0.40	1.28	2.50	8.91	1.64	2.79	10.14	16.92	0.05	0.00	17.40
1296.48	12.96	11.73	-0.18	0.46	1.35	2.75	9.93	1.76	3.09	11.43	18.99	0.04	0.00	19.68
1400.13	14.00	12.67	-0.54	0.56	1.50	3.13	11.38	1.96	3.54	13.24	21.85	0.07	0.00	22.83
1497.97	14.98	13.56	-0.66	0.65	1.61	3.53	12.84	2.16	4.03	15.14	24.70	0.09	0.00	26.18
1595.82	15.96	14.44	-0.79	0.79	1.82	4.01	14.61	2.49	4.62	16.37	28.01	0.13	0.00	30.25
1705.90	17.06	15.44	-0.93	0.92	2.39	4.70	16.08	2.88	5.35	18.06	31.94	0.16	0.00	34.33

Planilha LVDT'S e DEFLETÔMETROS – Protótipo C-SE (vigas 2,25mm SEM enrijecedores de alma)														
Carga	Carga	Momento	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	L1	L2	L3	L4
Kg	KN	KNm	mm											
0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
106.22	1.06	0.96	-	0.05	0.00	0.11	0.53	0.01	0.10	0.08	1.07	0.00	0.00	1.09
211.15	2.11	1.91	-	0.08	0.00	0.23	1.06	0.07	0.26	1.76	2.12	0.01	0.00	2.25
323.16	3.23	2.92	-	0.13	0.02	0.36	1.63	0.11	0.40	2.13	3.23	0.00	0.01	3.50
401.69	4.02	3.64	-	0.19	0.03	0.45	2.03	0.13	0.52	2.81	4.05	0.01	0.03	4.38
502.11	5.02	4.54	-	0.24	0.03	0.60	2.71	0.15	0.53	2.86	5.37	0.01	0.03	5.63
598.67	5.99	5.42	-	0.32	0.06	0.76	3.43	0.19	0.83	3.66	6.74	0.00	0.07	7.01
700.38	7.00	6.34	-	0.36	0.14	0.95	4.26	0.23	1.03	5.43	8.37	0.01	0.07	8.56
799.52	8.00	7.24	-	0.41	0.19	1.15	5.13	0.26	1.20	6.28	10.03	0.00	0.08	10.11
899.30	8.99	8.14	-	0.54	0.25	1.35	6.05	0.29	1.42	7.16	11.83	0.00	0.09	11.80
1000.37	10.00	9.05	-	0.66	0.31	1.58	7.08	0.31	1.64	8.11	13.80	-0.01	0.09	13.62
1098.21	10.98	9.94	-	0.80	0.38	1.85	8.25	0.35	1.88	9.13	15.77	-0.02	0.09	15.66
1200.57	12.01	10.87	-	0.89	0.89	2.20	9.37	1.08	2.25	9.21	17.82	-0.03	0.09	17.64
1299.70	13.00	11.76	-	1.01	0.94	2.57	10.76	1.17	2.60	10.58	20.30	-0.03	0.09	20.26
1391.11	13.91	12.59	-	1.16	0.97	2.92	12.17	1.27	3.00	13.15	22.91	-0.04	0.09	23.14
1494.76	14.95	13.55	-	1.26	1.21	3.40	13.04	1.39	3.45	13.98	25.98	-0.05	0.09	26.25

Planilha LVDT'S e DEFLETÔMETROS – Protótipo B-CE (vigas 2,00mm COM enrijecedores de alma)														
Carga	Carga	Momento	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	L1	L2	L3	L4
Kg	KN	KNm	mm											
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
117.80	1.18	1.07	-0.01	0.01	0.00	0.01	0.16	0.00	0.00	0.21	0.59	0.00	0.00	0.61
204.06	2.04	1.85	-0.03	0.02	0.00	0.02	0.27	0.00	0.00	0.37	1.05	0.00	0.00	1.10
307.71	3.08	2.78	-0.03	0.03	0.00	0.02	0.44	0.00	0.00	0.56	1.55	0.00	0.00	1.61
404.27	4.04	3.66	-0.05	0.05	0.00	0.03	0.55	0.00	0.00	0.75	2.07	0.00	0.00	2.10
498.90	4.99	4.52	-0.06	0.05	0.00	0.04	0.71	0.00	0.00	0.91	2.56	0.00	0.00	2.56
599.96	6.00	5.43	-0.07	0.06	0.00	0.06	0.92	0.00	0.00	1.14	3.17	0.00	0.00	3.15
699.10	6.99	6.33	-0.08	0.06	0.00	0.06	1.20	0.00	0.00	1.40	3.76	0.00	0.00	3.78
798.88	7.99	7.23	-0.09	0.06	0.00	0.06	1.46	0.00	0.01	1.70	4.52	0.00	0.00	4.49
899.94	9.00	8.14	-0.09	0.07	0.00	0.08	1.74	0.00	0.03	2.02	5.21	0.00	0.00	5.18
999.72	10.00	9.05	-0.10	0.07	0.00	0.08	2.05	0.00	0.06	2.35	5.99	0.00	0.00	5.95
1097.57	10.98	9.93	-0.10	0.08	0.00	0.08	2.37	0.00	0.08	2.72	6.86	0.00	0.00	6.78
1199.92	12.00	10.86	-0.12	0.08	0.00	0.09	2.72	0.00	0.09	3.09	7.73	0.00	0.00	7.69
1300.99	13.01	11.77	-0.12	0.08	0.00	0.13	3.13	0.00	0.12	3.52	8.69	0.00	0.00	8.61
1398.20	13.98	12.65	-0.13	0.08	0.00	0.14	3.55	0.00	0.14	4.00	9.69	0.00	0.00	9.70
1496.69	14.97	13.55	-0.14	0.09	0.00	0.17	4.10	0.00	0.17	4.56	10.82	0.00	0.00	10.92
1596.47	15.96	14.46	-0.15	0.11	0.00	0.22	4.55	0.00	0.21	5.07	11.96	0.00	0.00	12.17
1698.82	16.99	15.37	-0.18	0.12	0.00	0.26	5.19	0.00	0.25	5.80	13.48	0.00	0.00	13.57
1802.46	18.02	16.31	-0.19	0.13	0.00	0.30	5.90	0.00	0.30	6.52	15.11	0.00	0.00	15.27
1892.58	18.93	17.13	-0.22	0.15	0.00	0.36	6.65	0.00	0.34	7.40	16.57	0.00	0.00	16.82
1992.96	19.93	18.04	-0.25	0.17	0.00	0.44	7.70	0.00	0.44	8.62	19.17	0.00	0.00	19.35
2102.16	21.02	19.02	-0.31	0.23	0.01	0.64	8.50	0.00	0.68	9.39	23.01	0.00	0.00	23.44
2192.53	21.96	19.87	-0.35	0.26	0.01	0.78	9.90	0.00	0.85	10.99	26.37	0.00	0.00	26.35

Planilha LVDT'S e DEFLETÔMETROS – Protótipo C-CE (vigas 2,25mm COM enrijecedores de alma)														
Carga	Carga	Momento	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	L1	L2	L3	L4
Kg	KN	KNm	mm											
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
152.57	1.53	1.38	-0.03	0.01	0.00	0.03	0.20	0.04	0.04	0.27	0.62	0.00	0.00	0.68
208.57	2.09	1.89	-0.03	0.01	0.00	0.05	0.30	0.05	0.05	0.43	0.85	0.00	0.00	0.93
308.99	3.09	2.80	-0.02	0.02	0.00	0.05	0.44	0.07	0.08	0.64	1.26	0.01	0.01	1.42
402.34	4.02	3.64	-0.02	0.03	0.00	0.06	0.59	0.08	0.11	0.84	1.65	0.01	0.02	1.85
504.05	5.04	4.56	-0.02	0.04	0.00	0.08	0.79	0.09	0.14	1.09	2.15	0.01	0.02	2.38
603.18	6.03	5.46	-0.03	0.05	0.00	0.12	1.04	0.12	0.20	1.38	2.68	-0.01	0.02	2.99
702.96	7.03	6.36	-0.03	0.06	0.00	0.15	1.29	0.14	0.26	1.69	3.27	-0.01	0.03	3.65
805.31	8.05	7.29	-0.03	0.06	0.00	0.21	1.55	0.18	0.33	2.02	3.87	0.00	0.04	4.33
902.52	9.03	8.17	-0.02	0.06	0.01	0.26	1.86	0.21	0.39	2.39	4.55	-0.01	0.03	5.08
1002.94	10.03	9.08	-0.03	0.07	0.01	0.31	2.16	0.25	0.47	2.81	5.21	0.01	0.05	5.90
1101.43	11.01	9.97	-0.03	0.07	0.05	0.38	2.51	0.30	0.57	3.29	5.96	0.01	0.05	6.81
1200.57	12.01	10.87	-0.02	0.07	0.08	0.45	2.89	0.34	0.68	3.74	6.70	0.01	0.05	7.66
1299.06	12.99	11.76	-0.03	0.07	0.16	0.53	3.24	0.40	0.79	4.24	7.51	0.01	0.06	8.67
1403.99	14.04	12.71	-0.03	0.07	0.24	0.63	3.71	0.45	0.90	4.84	8.50	0.02	0.06	9.77
1500.55	15.01	13.58	-0.03	0.07	0.34	0.73	4.18	0.50	1.06	5.44	9.46	0.03	0.05	10.93
1599.68	16.00	14.48	-0.02	0.07	0.46	0.86	4.76	0.56	1.18	6.19	10.49	0.02	0.05	12.32
1701.39	17.01	15.40	-0.02	0.08	0.61	0.98	5.51	0.62	1.41	7.04	11.74	0.02	0.06	13.94
1804.39	18.04	16.33	-0.03	0.08	0.68	1.07	5.88	0.68	1.60	7.94	12.93	0.03	0.07	15.79
1904.82	19.05	17.24	-0.04	0.08	0.74	1.20	6.64	0.75	1.80	8.99	14.16	0.04	0.07	17.64
2004.06	20.04	18.14	-0.04	0.09	0.77	1.35	7.31	0.84	2.05	10.29	15.73	0.04	0.07	19.96
2096.94	20.97	19.00	-0.06	0.10	1.01	1.66	7.93	1.08	2.50	11.45	17.04	0.03	0.09	21.90

III.2. Planilhas EXTENSOMETRIA

Planilha EXTENSÔMETRICA - Protótipo B-SE (vigas 2.00mm SEM enrijecedores de alma)																			
E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	CEL.1	CEL.2
µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	kN	kN
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
71.04	65.04	-19.68	-18.72	-21.36	-21.84	-71.52	-65.52	17.04	21.36	24.48	18.48	5.52	13.92	-0.48	-15.60	-0.96	14.16	1.10	1.11
138.72	126.48	-38.64	-36.48	-41.04	-42.24	-139.44	-126.48	32.88	41.76	47.28	35.52	10.80	26.88	-0.96	-30.24	-0.96	28.56	2.14	2.14
197.52	182.16	-54.96	-51.36	-59.04	-60.72	-197.52	-181.92	46.80	58.80	68.16	51.60	14.88	38.16	-1.44	-42.24	-0.48	42.48	3.03	3.06
265.44	242.16	-76.56	-71.04	-81.60	-83.76	-266.64	-242.16	65.04	86.88	98.64	74.88	16.08	48.48	0.24	-62.16	-0.96	58.08	4.06	4.05
340.08	302.64	-101.52	-93.36	-108.72	-112.56	-337.92	-302.88	89.04	128.40	155.28	115.68	12.96	52.08	6.00	-90.96	-0.96	77.28	5.04	5.02
441.60	371.28	-128.16	-117.60	-138.48	-144.00	-410.64	-365.52	119.04	176.64	215.04	166.08	8.16	53.28	14.16	-123.36	-1.68	98.40	5.99	5.99
563.76	442.32	-159.12	-145.44	-170.88	-177.84	-490.08	-432.24	150.72	234.24	282.00	218.64	0.96	53.76	26.88	-156.24	-2.40	120.24	7.01	7.01
693.84	516.48	-191.28	-174.24	-206.16	-214.08	-570.00	-500.16	183.36	293.52	361.92	277.68	-6.24	49.68	42.48	-190.32	-3.36	143.52	8.00	8.02
835.44	602.64	-226.80	-205.68	-243.12	-252.24	-654.72	-568.80	217.44	356.16	443.52	335.04	-15.36	41.28	62.40	-221.76	-3.36	167.52	9.02	9.01
968.16	702.00	-261.12	-235.92	-281.52	-291.12	-736.56	-637.44	249.36	413.04	523.92	390.72	-21.84	28.56	83.52	-251.52	-2.40	191.28	10.00	9.99
1151.76	820.08	-307.68	-275.28	-329.52	-338.88	-834.72	-716.88	287.28	488.64	618.48	451.68	-32.88	6.72	118.32	-288.24	0.24	219.84	11.05	11.04
1343.76	905.28	-359.04	-318.00	-383.28	-392.40	-935.76	-803.04	320.16	557.76	716.40	499.44	-41.04	-28.80	156.48	-332.40	5.28	251.04	12.06	12.02
1458.00	961.20	-404.64	-356.16	-426.24	-436.56	-1013.76	-869.52	343.68	601.92	775.44	523.68	-45.36	-53.52	188.64	-359.04	5.76	272.88	12.96	12.96
1622.64	1063.92	-471.36	-410.16	-484.56	-499.68	-1114.32	-952.32	369.60	653.76	828.24	537.60	-46.56	-104.16	234.48	-411.84	8.64	303.60	14.00	14.00
1780.56	1119.12	-541.44	-467.28	-546.72	-575.04	-1210.32	-1032.72	390.96	695.76	849.36	536.88	-40.56	-167.52	280.56	-474.24	11.76	333.12	14.98	14.98
1987.44	1156.56	-624.48	-537.84	-624.00	-684.48	-1317.12	-1125.36	414.72	740.88	847.92	521.28	-26.64	-250.32	331.44	-553.92	13.68	361.92	15.96	16.00
2202.24	1221.12	-721.68	-624.48	-708.48	-811.44	-1431.84	-1210.32	438.00	783.84	837.12	502.08	-5.76	-324.24	382.08	-629.52	13.68	389.28	17.06	17.00

Planilha EXTENSÔMETRIA – Protótipo C-SE (vigas 2,25mm SEM enrijecedores de alma)																	
E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	CELULA1	CELULA2
µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	kN	kN
0.00	-0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.24	0.00	0.24	0.00	-0.24	-0.24	0.00	0.00
54.96	56.16	-22.32	-21.60	-19.92	-24.48	-56.16	-57.84	21.60	21.60	23.76	20.64	-94.08	-91.44	105.12	100.56	1.06	1.02
110.64	115.44	-44.88	-42.96	-41.04	-50.64	-111.36	-119.04	42.48	43.20	49.20	42.00	-186.24	-187.92	211.68	208.80	2.11	2.10
170.16	179.52	-68.88	-65.52	-63.60	-78.72	-169.92	-185.76	63.84	65.52	76.56	64.80	-283.68	-289.92	325.92	326.16	3.23	3.26
211.44	221.52	-86.64	-82.56	-80.16	-99.36	-210.96	-231.60	79.44	83.28	100.08	80.64	-363.84	-364.08	410.88	414.72	4.02	4.03
265.20	271.44	-115.20	-110.64	-105.36	-130.80	-266.16	-291.36	104.88	123.60	150.96	105.84	-576.48	-498.72	555.60	559.20	5.02	5.01
319.92	329.04	-144.48	-139.20	-133.20	-165.12	-321.36	-354.72	132.00	173.04	212.40	134.64	-833.52	-687.60	707.76	720.72	5.99	5.99
382.08	396.96	-178.56	-173.04	-164.16	-203.76	-382.80	-422.64	165.60	243.12	286.08	168.72	-1192.08	-925.20	891.36	907.44	7.00	7.01
445.44	467.28	-213.36	-207.36	-194.88	-242.16	-443.76	-489.12	200.88	312.96	356.88	205.20	-1570.80	-1166.40	1081.68	1098.48	8.00	8.00
511.44	545.28	-251.76	-244.08	-227.52	-282.72	-507.12	-558.00	236.40	382.08	432.48	245.52	-2023.68	-1447.44	1296.96	1307.76	8.99	9.01
581.76	630.00	-294.00	-283.68	-262.56	-327.84	-573.12	-627.60	271.68	448.56	514.08	289.20	-2574.48	-1788.00	1543.68	1548.72	10.00	10.01
652.08	723.84	-337.68	-322.80	-300.00	-378.48	-637.92	-699.36	302.88	502.08	595.20	335.04	-3150.72	-2213.28	1807.44	1829.76	10.98	10.98
733.68	829.44	-396.24	-372.24	-341.76	-437.04	-712.32	-776.16	332.16	548.16	671.28	381.60	-4072.80	-2739.12	2182.32	2166.72	12.01	12.00
808.08	930.72	-457.20	-420.00	-387.36	-506.40	-779.52	-849.60	353.28	569.04	728.64	420.48	-5015.28	-3509.52	2590.56	2598.96	13.00	13.01
884.16	1035.84	-525.60	-469.68	-439.20	-585.84	-846.24	-924.72	371.04	581.76	774.48	453.12	-6012.96	-4425.12	3078.48	3157.92	13.91	13.98
971.76	1134.96	-606.96	-526.56	-497.52	-669.36	-922.56	-1000.80	389.52	597.60	809.28	482.16	-7707.36	-5279.04	3693.60	3850.80	14.95	14.97

Planilha EXTENSÔMETRIA – Protótipo B-CE (vigas 2,00mm COM enrijecedores de alma)																			
E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	CEL.1	CEL.2
µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	kN	kN
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-	72.72	78.00	-7.20	-3.36	-9.12	-66.72	-72.24	6.96	6.96	-55.44	7.68	-27.60	-29.04	27.36	28.80	69.12	-67.20	1.18	1.15
-	129.36	136.56	-12.48	-6.24	-16.56	-116.64	-128.40	12.00	12.24	-98.64	13.44	-46.56	-51.36	48.24	52.32	122.16	-117.84	2.04	2.05
-	194.16	205.44	-18.48	-9.36	-24.96	-175.68	-192.48	18.24	18.48	-149.04	19.92	-69.60	-76.08	73.44	78.96	184.32	-177.12	3.08	3.09
-	256.32	270.00	-24.24	-12.24	-33.12	-230.40	-253.92	23.76	24.48	-196.08	25.68	-90.72	-100.08	96.72	105.36	242.40	-233.52	4.04	4.06
-	315.84	331.20	-30.48	-15.12	-41.04	-285.12	-312.24	30.00	30.48	-241.68	30.96	-113.76	-124.08	121.92	128.88	299.52	-287.04	4.99	4.99
-	385.92	396.48	-38.88	-19.68	-51.12	-347.52	-379.92	39.36	39.36	-287.76	40.80	-146.88	-163.68	161.28	161.52	361.20	-344.16	6.00	6.00
-	462.00	461.52	-48.48	-24.96	-62.64	-409.68	-451.20	48.96	48.00	-333.60	51.84	-182.64	-211.92	204.48	198.00	422.88	-402.48	6.99	7.04
-	546.24	523.20	-59.76	-30.96	-75.60	-475.20	-522.96	59.28	57.60	-376.80	62.64	-225.12	-279.60	256.56	238.08	483.36	-463.68	7.99	8.00
-	640.80	585.60	-70.32	-36.96	-89.28	-538.56	-596.16	69.36	66.72	-421.44	73.92	-263.28	-342.96	304.56	279.84	544.08	-528.24	9.00	9.02
-	750.72	645.60	-82.32	-44.16	-106.08	-604.32	-671.04	80.16	76.80	-464.40	86.16	-306.96	-414.72	358.32	327.12	604.08	-597.36	10.00	10.01
-	900.48	705.60	-92.16	-52.32	-124.08	-671.28	-749.52	90.00	86.16	-508.32	96.72	-354.00	-502.56	410.88	377.04	663.84	-671.52	10.98	11.01
-	1116.72	764.64	-105.12	-61.44	-144.96	-739.20	-830.64	102.00	96.00	-551.28	111.36	-401.28	-581.76	466.80	433.20	723.60	-748.56	12.00	12.02
-	1330.56	821.04	-119.76	-70.80	-166.08	-807.60	-912.00	115.44	103.68	-593.28	126.00	-451.44	-656.64	525.12	488.64	783.60	-829.68	13.01	13.03
-	1570.32	871.68	-131.52	-80.64	-191.28	-872.16	-1000.56	128.64	109.68	-632.88	141.60	-501.36	-749.52	579.84	551.28	843.36	-915.36	13.98	14.00
-	1773.60	920.64	-145.44	-91.20	-217.68	-935.76	-1095.60	143.28	114.48	-672.96	157.20	-552.96	-852.96	634.56	618.48	905.76	-1008.00	14.97	15.01
-	1953.84	970.08	-155.52	-101.28	-244.08	-996.96	-1192.56	156.24	118.56	-712.80	166.32	-604.56	-953.76	684.24	682.32	967.92	-1108.56	15.96	15.98
-	2120.16	1018.56	-179.52	-112.56	-276.24	-1063.92	-1298.16	174.72	122.88	-752.16	174.48	-662.64	-1057.44	744.48	753.60	1028.16	-1222.32	16.99	17.00
-	2308.80	1070.64	-198.00	-125.04	-309.60	-1136.16	-1409.04	193.20	126.24	-793.44	178.32	-727.92	-1183.20	807.36	825.84	1083.60	-1346.40	18.02	17.98
-	2485.20	1122.48	-218.16	-137.52	-339.12	-1199.76	-1509.36	210.24	128.64	-835.44	183.12	-785.28	-1284.00	862.08	890.40	1131.36	-1461.84	18.93	18.96
-	2779.20	1182.72	-246.72	-152.40	-377.04	-1291.68	-1654.32	235.68	130.56	-870.00	184.80	-887.52	-1417.92	955.68	970.08	1172.64	-1645.44	19.93	19.95
-	3227.52	1253.04	-271.92	-171.60	-416.40	-1373.52	-1862.40	247.92	131.76	-887.28	183.36	-1016.88	-1586.88	1040.88	1059.60	1223.28	-1959.12	21.02	21.00
-	3600.24	1309.44	-297.60	-195.84	-448.32	-1454.40	-2034.72	265.44	133.20	-922.80	186.00	-1148.40	-1729.92	1119.36	1124.16	1261.44	-2174.40	21.93	21.96

Planilha EXTENSOMETRIA – Protótipo C-CE (vigas 2,25mm COM enrijecedores de alma)																			
E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	CEL.1	CEL.2
µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	µm/m	kN	kN
0.00	-0.24	0.00	-0.48	0.00	0.00	-0.24	-0.24	0.00	0.24	0.00	-0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00
81.12	87.84	108.72	-6.00	-8.40	-11.76	-77.28	-86.88	17.52	8.88	-102.48	10.80	-40.08	-37.20	38.64	36.72	105.12	-83.28	1.53	1.51
110.88	120.48	148.32	-8.16	-11.76	-16.80	-105.12	-119.04	23.52	12.00	-140.64	14.64	-54.72	-51.36	52.80	50.64	144.00	-113.52	2.09	2.07
165.60	180.96	221.28	-12.00	-17.28	-24.96	-155.28	-178.80	34.56	18.00	-208.56	21.84	-80.16	-76.80	77.28	76.32	214.32	-169.68	3.09	3.09
216.48	235.68	288.48	-15.60	-22.56	-32.64	-202.32	-233.28	44.64	23.76	-271.44	28.32	-103.68	-98.88	100.56	100.32	279.36	-221.04	4.02	4.02
275.04	294.48	362.64	-19.68	-29.52	-42.24	-258.00	-295.20	56.40	34.32	-341.76	39.12	-133.44	-131.28	131.04	128.64	351.60	-267.36	5.04	5.04
337.92	355.68	434.40	-24.24	-37.68	-52.56	-314.88	-359.52	69.60	46.80	-408.96	52.32	-165.60	-171.84	163.44	158.88	421.92	-309.36	6.03	6.01
409.68	427.20	507.84	-28.80	-46.56	-65.52	-373.68	-428.64	89.28	61.20	-477.60	67.20	-206.88	-220.32	198.00	192.96	495.12	-350.64	7.03	7.05
485.04	502.08	578.88	-33.60	-55.68	-79.44	-431.76	-496.80	110.64	75.12	-546.00	82.32	-250.80	-274.08	233.52	227.52	565.92	-391.68	8.05	8.03
572.16	584.16	649.20	-39.12	-66.48	-98.40	-493.44	-569.04	134.88	91.20	-618.72	98.64	-301.20	-334.80	271.92	267.60	636.72	-428.16	9.03	9.05
657.60	664.32	720.72	-44.40	-77.04	-118.32	-554.40	-636.48	157.92	106.32	-698.16	113.76	-350.88	-402.24	312.00	297.36	698.88	-462.24	10.03	10.01
750.96	753.84	789.12	-50.16	-90.00	-146.64	-618.48	-713.52	182.64	123.84	-780.72	127.44	-401.76	-471.84	354.00	345.60	767.52	-498.72	11.01	11.01
838.08	838.08	855.84	-56.16	-102.48	-175.44	-681.12	-789.12	206.64	142.08	-863.52	133.92	-448.32	-522.48	395.52	391.44	836.16	-540.24	12.01	11.99
928.56	929.28	921.12	-63.36	-117.12	-211.68	-745.68	-871.44	232.32	162.72	-948.96	137.76	-493.44	-577.20	439.68	441.36	908.40	-579.84	12.99	12.98
1030.08	1024.08	990.00	-73.20	-131.52	-250.56	-818.88	-957.12	263.76	189.60	-1041.84	140.16	-544.32	-634.08	491.76	493.44	986.64	-617.04	14.04	14.02
1125.36	1119.60	1053.60	-83.04	-145.20	-291.60	-888.48	-1041.12	292.32	216.24	-1130.64	141.84	-592.08	-693.84	540.00	544.56	1062.72	-652.08	15.01	15.00
1219.20	1224.00	1114.32	-94.56	-161.52	-343.44	-959.76	-1131.60	321.60	246.48	-1223.52	142.08	-639.60	-765.84	589.68	602.64	1142.16	-684.72	16.00	15.97
1328.88	1342.80	1178.16	-108.48	-179.04	-402.96	-1044.72	-1228.56	351.36	283.44	-1332.72	141.60	-691.20	-848.40	646.08	664.08	1229.28	-714.48	17.01	17.01
1448.64	1469.52	1246.08	-119.04	-197.52	-464.40	-1134.24	-1320.24	355.20	315.60	-1468.56	139.68	-725.04	-946.56	699.84	717.36	1316.16	-742.80	18.04	18.02
1563.60	1589.04	1309.20	-133.20	-218.40	-529.68	-1224.00	-1405.44	356.64	352.08	-1610.40	138.72	-756.00	-1048.08	756.48	775.68	1396.08	-767.04	19.05	18.97
1694.64	1722.72	1373.04	-150.48	-242.88	-601.20	-1322.40	-1496.88	354.72	393.12	-1768.80	136.56	-789.12	-1170.00	819.12	840.96	1487.04	-793.44	20.04	19.99
1832.16	1866.72	1437.36	-172.56	-272.16	-674.40	-1420.08	-1592.64	352.08	407.76	-1940.16	132.24	-836.88	-1339.20	881.28	885.12	1587.84	-845.76	20.97	21.00