

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

RONIVON SOARES PEREIRA

**LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE AÇO UTILIZANDO EMENDAS COM
PARAFUSOS DE ALTA RESISTÊNCIA SOLICITADAS NA FLEXÃO SIMPLES**

Área de concentração: Estruturas e Materiais de Construção.
Orientador: Orlando Ferreira Gomes, Dr.

Goiânia
2014



Termo de Ciência e de Autorização para Disponibilizar as Teses e Dissertações Eletrônicas (TEDE) na Biblioteca Digital da UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás – UFG a disponibilizar gratuitamente através da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações – BDTD/UFG, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: ☒ **Dissertação** ☐ **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor:	Ronivon Soares Pereira				
CPF:	990609651-91	E-mail:	ronivon.sp@gmail.com		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? ☒ Sim ☐ Não					
Agência de fomento:	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior			Sigla:	CAPES
País:	Brasil	UF:	Goiás	CNPJ:	
Título:	Ligações em Estruturas de Aço Utilizando Emendas com Parafusos de Alta Resistência Solicitadas na Flexão Simples				
Palavras-chave:	Aço; Parafusos; Estruturas de aço; Flexão simples.				
Título inglês	Connections in Steel Structures Using Emendations With High Strength Screws Requested in Simple Bending				
Palavras-chave em outra língua:	Steel; Bolts; Steel structures; Simple bending.				
Área de concentração:	Estruturas e materiais de construção				
Data defesa: (24/06/2014)					
Programa de Pós-Graduação:	Curso de Mestrado em Engenharia Civil CMEC-UFG				
Orientador:	Orlando Ferreira Gomes				
CPF:		E-mail:	orlandoferreirag0@gmail.com		

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para disponibilização? ☒ total ☐ parcial

Data: 24/06/2014

Assinatura do autor

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

GPT/BC/UFG

P4361	Pereira, Ronivon Soares. Ligações em estruturas de aço utilizando emendas com parafusos de alta resistência solicitadas na flexão simples [manuscrito] / Ronivon Soares Pereira. - 2014. xx, 135 f.: figs, tabs. Orientador: Prof. Dr. Orlando Ferreira Gomes. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2014. Bibliografia. Inclui lista de figuras, tabelas e símbolos. Apêndices. 1. Estruturas de aço – Emendas 2. Engenharia civil – Estruturas. I. Título. CDU: 693.814
-------	---

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

RONIVON SOARES PEREIRA

**LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE AÇO UTILIZANDO EMENDAS COM
PARAFUSOS DE ALTA RESISTÊNCIA SOLICITADAS NA FLEXÃO SIMPLES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

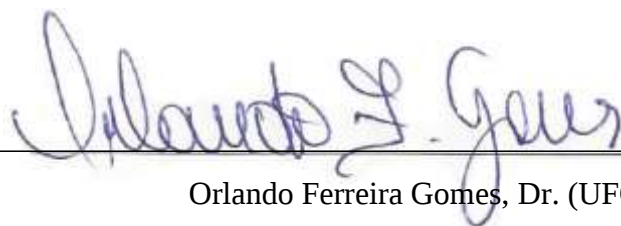
Orientador: Orlando Ferreira Gomes, Dr.

Goiânia
2014

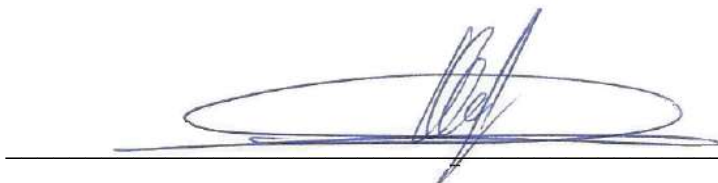
**LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE AÇO UTILIZANDO EMENDAS COM
PARAFUSOS DE ALTA RESISTÊNCIA SOLICITADAS NA FLEXÃO SIMPLES**

RONIVON SOARES PEREIRA

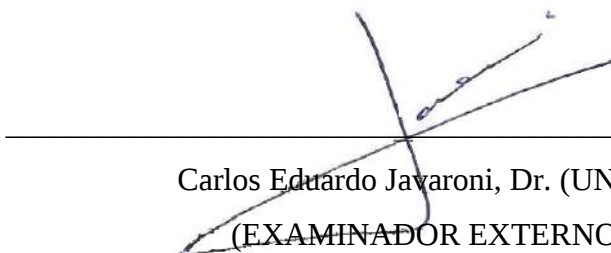
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 24 de junho de 2014, pela banca examinadora constituída pelos professores:



Orlando Ferreira Gomes, Dr. (UFG)
(ORIENTADOR)



Wellington Andrade da Silva, Dr. (UFG)
(EXAMINADOR INTERNO)



Carlos Eduardo Javaroni, Dr. (UNESP)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DEDICATÓRIA

*A minha amada esposa Lidianne
e aos meus filhos Miguel, Israel e o
que está por vir, que sempre estiveram
presente comigo, aos meus tão amados
e maravilhosos pais, que não só
batalharam para eu chegar até
aqui como também me ensinaram
e instigaram a batalhar, e as minhas
irmãs que na simplicidade de
suas vidas me incentivaram a
seguir este caminho.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me deu vida, saúde e estrutura para que eu chegasse até aqui.

Ao meu orientador, Orlando Ferreira Gomes, pela sua paciência e dedicação, durante todas as etapas deste trabalho, auxiliando-me não somente com conhecimento, mas também me aconselhando na tomada de decisões. Muito Obrigado.

Aos professores do Curso de Mestrado em Engenharia Civil (CMEC-UFG), por compartilharem seus conhecimentos.

Às empresas Metal Eng, Engmec. Donizete , e Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC), pelo apoio com materiais e realização de ensaios.

Aos alunos do curso de Mestrado que se tornaram meus amigos e fizeram parte dessa caminhada, em particular ao Diego, Marília, Maria, Jeovan e Humberto pelos momentos de companheirismo, humor, tensão que passamos nesse tempo, sem a colaboração de vocês não seria possível concluir este estudo.

Ao CNPq e Capes, pelo auxílio financeiro.

A minha esposa Lidiane e filhos Miguel, Israel e o que está por vir, pela compreensão nos momentos de ausência e apoio nas dificuldades, a minha família pelo estímulo.

RESUMO

Uma estrutura é concebida para ter desempenho satisfatório atendendo aos padrões de qualidade na construção e requisitos dos quais os projetistas necessitam. Cada vez mais as estruturas metálicas de grande porte vêm se desenvolvendo nesse mercado competitivo, onde o desempenho e a qualidade do projeto dependem dos processos de fabricação dos materiais utilizados, da montagem, da inspeção e manutenção. As estruturas metálicas, principalmente as de perfis tipo I laminados de abas paralelas dependem do controle de qualidade em suas emendas parafusadas. Este estudo teve por objetivo analisar a capacidade resistente de vigas bi apoiadas em aço constituídas de perfis tipo I laminados de abas paralelas com dois eixos de simetria, sendo dotadas de emendas com parafusos de alta resistência do tipo ASTM A325 de diâmetro 19 mm. Foram ensaiados oito vigas com comprimento de 3000 mm, sendo duas vigas de referência. Nas seis vigas restantes foram confeccionadas emendas em diferentes posições variando a quantidade de emendas. Todos os modelos estiveram solicitados por esforços de flexão simples até à ruptura, analisando os deslocamentos verticais, deslocamentos relativos à torção e as deformações específicas do aço. As ligações das vigas resistiram ao ensaio à flexão, não sendo constatada nenhuma ruptura nos parafusos e nem na chapa de ligação, apresentando cargas de ruptura entre 74% e 85% para as vigas da série com ligações. Consideravelmente as vigas com ligações não apresentaram cargas de ruptura muito inferiores às vigas de referência, com cargas de ruptura entre 78% e 100%. Os resultados indicam que as vigas com ligações parafusadas com parafusos de alta resistência são resistentes e por isso podem ser utilizadas por projetistas da área de estrutura metálica como mais uma opção.

Palavras - chave: Aço; Parafusos; Estruturas de aço; Flexão simples.

ABSTRACT

Structure is designed to have satisfactory performance given the quality standards and requirements in the construction of which designers need. Increasingly, large metal structures are developing in this competitive market, where performance and quality of the project depend on manufacturing processes of materials, assembly, inspection and maintenance. The metal structures, especially those of type I profiles of parallel laminated tabs depend on the quality control in your bolted splices. This study aimed to analyze the bearing capacity of steel beams supported by profiles consist of type I rolled parallel flanges with two axes of symmetry, being endowed with seams with high strength bolts type ASTM A325, diameter 19 mm. Eight beams with a length of 3000 mm, two reference beams were tested. In the remaining six beams splices were made at different positions varying the amount of seams. All models have been efforts required by simple bending to failure, by analyzing the vertical displacement, torsional displacement relative and specific deformations of steel. The connections of the beams withstood the test flexural not being observed and no break on the bolts or the connecting plate, featuring breaking loads between 74% and 85% for beams of series with connections. Considerably beams with connections showed no breaking loads far below the reference beams with breaking loads between 78% and 100%. The results indicate that the beams with bolted with high strength bolts connections are sturdy and therefore can be used by designers in the field of steel structure as another option.

Keywords: Steel; Bolts; Steel structures; Simple bending.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Laminador de Chapas Grossas.....	27
Figura 2.2 - Processo de resfriamento de um perfil I laminado a quente	29
Figura 2.3 - Modo de ruptura de flambagem local da mesa comprimida (FLM).....	32
Figura 2.4 - Flambagem local da alma devido ao momento fletor.....	32
Figura 2.5 - Flambagem lateral com torção da viga biapoiada	33
Figura 2.6 - Seção transversal em forma de I.....	34
Figura 2.7 - Diagrama de deformações para incrementos de carga (b). Adaptada de SILVA (2007)	35
Figura 2.8 - Diagrama esbeltez x momento fletor. Adaptada de SILVA (2007).	37
Figura 2.9 - Comportamento de vigas com seções compacta, semicompacta e esbelta.....	38
Figura 2.10 - Características geométricas de parafusos de alta resistência segundo a norma ASTM A-325/A-490. Adaptada do AISC/ASD (1989). Fonte: VALENCIANI (1997).....	44
Figura 2.11 - Dimensões máximas de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas	45
Figura 2.12 - Exemplos de soldas de filete. Adaptada de COOPER (1985)	47
Figura 2.13 - Formas para o filete de solda. Adaptada de SIDERBRÁS (1988)	47
Figura 2.14 - Exemplo de soldas em chanfro. Adaptada de COOPER (1985).....	48
Figura 2.15 - Exemplos de soldas em tampão. Adaptada de SALMON e JONHSON (1986)	48
Figura 2.16 - Identificação dos parafusos A325 e A490. Fonte: VALENCIANI (1997).....	50
Figura 2.17 - Transmissão de esforços por atrito. Fonte: VALENCIANI (1997).....	51
Figura 2.18 - Transmissão de esforços por contato. Fonte: VALENCIANI (1997).	51
Figura 2.19 - (a), (b), (c): Representação esquemática de três estágios de carregamento numa conexão parafusada; (d1) a (d6) força cortante nos parafusos em função do estágio de carregamento. Fonte: VALENCIANI (1997).....	52
Figura 2.20 - Acessórios utilizados para fixação das colunas.	53
Figura 2.21 - Detalhe de montagem dos enrijecedores.	54

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Máquina DL100000 EMIC	57
Figura 3.2 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração	58
Figura 3.3 - Corpos de prova de aço e corpos de prova dos parafusos	58

Figura 3.4 - Viga de referência sem emenda (VREF1, VREF2).....	59
Figura 3.5 - Viga com uma ligação à direita	60
Figura 3.6 - Viga com uma ligação à esquerda	60
Figura 3.7 - Viga com uma ligação central	60
Figura 3.8 - Viga com uma ligação central e uso de enrijecedores	60
Figura 3.9 - Viga com duas ligações	60
Figura 3.10 - Viga com três ligações	60
Figura 3.11 - Uso do torquímetro para fixar os parafusos.....	61
Figura 3.12 - Posicionamento dos extensômetros na mesa comprimida e alma	61
Figura 3.13 -Posicionamento dos extensômetros chapa de ligação da mesa comprimida e alma	61
Figura 3.14 -Posicionamento dos extensômetros chapa de ligação da mesa comprimida e alma	62
Figura 3.15 - Esquema de aplicação das forças.....	62
Figura 3.16 - Apoios de primeiro e segundo gênero	63
Figura 3.17 - Viga de transmissão das forças apoiada sobre a viga ensaiada	63
Figura 3.18 - Sistema de aquisição de dados dos extensômetros (Agilent)	64
Figura 3.19 - Posicionamento dos relógios	64
Figura 3.20 - Posicionamento dos LVDT's.....	65
Figura 3.21 - Ilustração do esquema montado para o ensaio dos modelos das vigas.....	66

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração do aço da chapa da mesa.....	68
Figura 4.2 - Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração do aço da chapa da alma	68
Figura 4.3 - Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração do aço da chapa de ligação	69
Figura 4.4 - Fotografias do corpo de prova de aço no momento do ensaio.....	69
Figura 4.5 - Modo de ruptura do corpo de prova do aço no ensaio à tração	70
Figura 4.6 - Fotografias do corpo de prova do parafuso no momento do ensaio	70
Figura 4.7 - Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração do aço dos parafusos	71
Figura 4.8 - Modo de ruptura do corpo de prova do parafuso no ensaio à tração	72
Figura 4.9 - Seção dos perfis ensaiados.....	72
Figura 4.10 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga VREF1	74
Figura 4.11 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga VREF2	74

Figura 4.12 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga V1LD	75
Figura 4.13 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga V1LE.....	75
Figura 4.14 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga V1LM.....	75
Figura 4.15 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga V1LME	76
Figura 4.16 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga V2L	76
Figura 4.17 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga V3L	76
Figura 4.18 - Deslocamentos verticais VREF1	77
Figura 4.19 - Deslocamentos verticais VREF2	78
Figura 4.20 - Deslocamentos verticais V1LD	78
Figura 4.21 - Deslocamentos verticais V1LE.....	79
Figura 4.22 - Deslocamentos verticais V1LM	79
Figura 4.23 - Deslocamentos verticais V1LME	80
Figura 4.24 - Deslocamentos verticais V2L	80
Figura 4.25 - Deslocamentos verticais V3L	81
Figura 4.26 - Posicionamento dos extensômetros	81
Figura 4.27 - Deformações específicas VREF1	82
Figura 4.28 - Deformações específicas VREF2	82
Figura 4.29 - Deformações específicas V1LD	83
Figura 4.30 - Deformações específicas V1LE.....	83
Figura 4.31 - Deformações específicas V1LM.....	84
Figura 4.32 - Deformações específicas V1LME	85
Figura 4.33 - Deformações específicas V2L	85
Figura 4.34 - Deformações específicas V3L	86
Figura 4.35 - Posicionamento dos LVDT's nas vigas	87
Figura 4.36 - Deslocamento relativo VREF1	87
Figura 4.37 - Deslocamento relativo VREF2	88
Figura 4.38 - Deslocamento relativo V1LD	88
Figura 4.39 - Deslocamento relativo V1LE	88
Figura 4.40 - Deslocamento relativo V1LM	89
Figura 4.41 - Deslocamento relativo V1LME	89
Figura 4.42 - Deslocamento relativo V2L	89
Figura 4.43 - Deslocamento relativo V3L	90

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga VREF1.....	92
Figura 5.2 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga VREF2.....	92
Figura 5.3 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga V1LD.....	92
Figura 5.4 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga V1LE	93
Figura 5.5 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga V1LM.....	93
Figura 5.6 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga V1LME.....	93
Figura 5.7 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga V2L.....	94
Figura 5.8 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga V3L.....	94
Figura 5.9 - Deslocamentos máximos nas vigas.....	95
Figura 5.10 - Comportamento dos relógios	96
Figura 5.11 - Deformação máxima na mesa comprimida	97
Figura 5.12 - Deformação máxima na mesa tracionada	98

CAPÍTULO 6

Figura 6.1– Corpo de prova do parafuso confeccionado com solda após o ensaio	101
--	-----

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 - Nomenclatura dos corpos de prova para ensaio à tração do aço	58
---	----

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas nominais do aço ASTM-A36 e ASTM-A572.....	67
Tabela 4.2 - Resultados obtidos na realização dos ensaios de caracterização do aço	69
Tabela 4.3 - Resultados obtidos na realização dos ensaios de caracterização dos parafusos....	71
Tabela 4.4 - Propriedades geométricas da seção transversal das vigas estudadas	73
Tabela 4.5 - Resultados e modos de ruptura das vigas ensaiadas.....	73
Tabela 4.6 - Resultados dos LVDT's das vigas ensaiadas	90

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 - Comparação das deslocamentos teóricas x deslocamentos de ensaios	94
Tabela 5.2 - Deformações máximas de compressão e deformações máximas de tração	98
Tabela 5.3 - Comparação dos Momentos resistentes de ensaio x Momentos resistentes de cálculos segundo a NBR 8800:2008 para os ensaios das vigas.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	American Institute of Steel Construction
CV	Coeficiente de Variação
CMEC	Curso de Mestrado em Engenharia Civil
EEC	Escola de Engenharia Civil
FLA	Flambagem local da alma
FLM	Flambagem local da mesa comprimida
FLT	Flambagem lateral com torção
NBR	Norma Brasileira
UFG	Universidade Federal de Goiás

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas Minúsculas

a	Distância entre enrijecedores transversais de alma
b	Largura da seção transversal, é a dimensão plana do elemento sem incluir dobras
b_f	Largura nominal das mesas ou abas
b_w	Largura nominal da alma
d	Altura total da seção transversal
d'	Altura livre da alma
f_u	Resistência à ruptura do aço na tração
f_y	Resistência ao escoamento do aço;
h	Altura interna da alma (altura da parte plana da alma)
k_c	Rigidez do lado comprimido da seção
k_v	Coeficiente de flambagem local por cisalhamento
r	Raio de giração da seção bruta
r_x	Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal x
r_y	Raio de giração da seção bruta em relação ao eixo principal y
t	Espessura da chapa ou do elemento
t_f	Espessura da mesa ou abas
t_w	Espessura da alma
y_c	Distância entre o eixo neutro da seção bruta e o centroide da barra comprimida equivalente
y_t	Distância entre o eixo neutro e a extremidade da fibra tracionada

Letras Romanas Maiúsculas

A	Área.
A_c	Área bruta da seção comprimida
A_t	Área bruta da seção tracionada
C_b	Fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme
C_w	Constante de empenamento da seção transversal
E	Módulo de elasticidade do aço

I	Momento de inércia da seção transversal com relação ao eixo neutro
I_t	Momento de inércia à torção uniforme
I_x	Momento de inércia da seção transversal com relação ao eixo x
I_y	Momento de inércia da seção transversal com relação ao eixo y
J	Constante de torção da seção transversal
L	Comprimento, vão, distância
L_b	Distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção
M_{cr}	Momento fletor de flambagem elástica.
M_r	Momento fletor correspondente ao início do escoamento;
M_{Rd}	Momento fletor resistente de cálculo
M_{pl}	Momento de plastificação
P	Carga
P_u	Carga de ruptura da viga
P_u^{lei}	Carga de última leitura da viga
Q	Momento estático com relação ao eixo neutro
R	Raio
V	Força cortante na seção analisada
V_{pl}	Força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento
V_{Rd}	Força cortante resistente de cálculo
Z_x	Módulo de resistência plástico, relativo ao eixo x
Z_y	Módulo de resistência plástico, relativo ao eixo y
W_x	Módulo de resistência elástico da seção, relativo ao eixo x
W_y	Módulo de resistência elástico da seção, relativo ao eixo y

Letras Gregas

β_I	Parâmetro empregado no cálculo do fator de redução associado à flambagem ρ
γ	Coeficiente de ponderação das ações ou das resistências, em geral
λ	Parâmetro de esbeltez
λ_p	Parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação
λ_r	Parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento
σ_r	Tensão residual de compressão nas mesas, deve ser tomada igual a 30% da resistência ao escoamento do aço utilizado segundo a NBR 8800:2008

ϕ	Fenômeno de torção
ε	Deformação
ε_y	Deformação específica de correspondente ao limite de escoamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1.	JUSTIFICATIVA.....	21
1.2.	OBJETIVO	22
1.3.	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1.	INTRODUÇÃO	23
2.2.	ASPECTOS GERAIS SOBRE O AÇO	23
2.2.1.	Perfis laminados a quente	25
2.2.2.	Imperfeições mecânicas ou físicas	28
2.2.3.	Seções laminadas a quente	28
2.2.4.	Perfis laminados de abas paralelas	30
2.3.	MODOS DE FALHA EM VIGAS SUBMETIDAS À FLEXÃO	32
2.4.	DIMENSIONAMENTO DE PERFIS FLETIDOS SEGUNDO A NBR 8800:2008	34
2.4.1.	Propriedades geométricas das vigas.....	34
2.4.2.	Momento fletor resistente de cálculo	36
2.4.3.	Barras submetidas à flexão simples	37
2.4.4.	Flambagem local	38
2.4.5.	Flambagem lateral com torção	40
2.4.6.	Força cortante	41
2.5.	LIGAÇÕES DE PEÇAS METÁLICAS.....	43
2.5.1.	Parafusos de alta resistência	44
2.5.2.	Tipos de solda.....	46
2.6.	ALGUMAS REFERÊNCIAS SOBRE ESTRUTURAS DE AÇO.....	49
2.6.1.	VALENCIANI (1997).....	49
2.6.2.	SILVA (2006)	52
2.6.3.	ALMEIDA (2009)	54
3.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	56

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	56
3.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	56
3.2.1. Caracterização do aço	56
3.3. CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS ENSAIADOS	59
3.3.1. Dimensão das peças	59
3.4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	61
3.4.1. Instrumentação	61
3.4.2. Esquema de ensaio	62
3.5. SISTEMA DE ENSAIO	65
4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	67
4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	67
4.1.1. Ensaio de tração dos corpos de prova de aço	67
4.1.2. Ensaio de tração dos corpos de prova dos parafusos	70
4.2. ENSAIO DAS VIGAS À FLEXÃO SIMPLES	72
4.2.1. Modos e cargas últimas	73
4.2.2. Deslocamentos verticais	77
4.2.3. Deformações específicas	81
4.2.4. Deslocamentos relativos	86
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	91
5.1. DESLOCAMENTOS VERTICAIS	91
5.2. MÁXIMAS DEFORMAÇÕES	97
5.3. CARGAS E MODO DE FALHA	99
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	101
6.1. CONCLUSÕES	101
6.1.1. Ensaio de tração nos parafusos	101
6.1.2. Comportamento carga x deslocamento vertical	102
6.1.3. Comportamento carga x deformação específica	102
6.1.4. Carga e modo de falha	103
6.1.5. Considerações finais	103

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
APÊNDICE A	110
APÊNDICE B.....	115
APÊNDICE C	123
APÊNDICE D	129

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Quando se depara com estruturas metálicas de grande porte como torres de transmissão de energia, pontes metálicas, edifícios de múltiplos andares em aço, hangares e outras construções em que se utiliza a estrutura metálica, todas estas obras não poderiam ter um bom desempenho se não fossem a qualidade do projeto, dos materiais envolvidos, dos processos de fabricação e montagem, inspeção e manutenção.

O bom funcionamento das estruturas através do elevado grau de tecnologia, foi desenvolvido e aplicado para um fim comum, levando em consideração os estados limites normativos, que é assegurar e proteger a vida daqueles que dependem de alguma forma, do bom desempenho e funcionamento das estruturas.

As estruturas metálicas, principalmente as de perfis tipo I laminados de abas paralelas dependem do controle de qualidade em suas emendas parafusadas. Por isso a importância de se estudar este tema, pois tal estudo tem o intuito de fornecer uma contribuição fundamental para os projetistas, fabricantes e montadores de estruturas metálicas que precisam fazer com que seu produto possa competir com este mercado cada vez mais globalizado e exigente, de forma segura e econômica.

A tecnologia das estruturas metálicas vem cada vez mais crescendo no mercado da construção civil, e as ligações parafusadas mostram a facilidade de execução durante a montagem destas estruturas metálicas onde não poderiam ficar fora deste processo tecnológico das estruturas metálicas.

1.1. JUSTIFICATIVA

Muitas vezes devido a dificuldade do acesso aos locais onde são dispostos vigas apoiadas para suportarem pavimentos nos edifícios de múltiplos pavimentos, torna-se necessário a concepção deste tipo de ligação para que se de continuidade dos vãos destas vigas para suportarem carregamentos oriundos destes pavimentos, grande limitação é que por não poder executar emendas soldadas nestes locais, a montagem destas vigas com ligações parafusadas torna-se um fator mais acessível.

Igualmente com a revisão da NBR 8800:1986 para NBR 8800:2008, abrem novas perspectivas de pesquisa e este assunto vem a contribuir para consolidação de aplicação dos princípios básicos de dimensionamento em relação a este assunto.

1.2. OBJETIVO

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram confeccionadas vigas metálicas sem ligações e com ligações parafusadas constituídas de perfis tipo I laminados de abas paralelas, variando o número destas ligações, onde se utiliza as ligações em determinadas regiões para que a viga possa ter certa continuidade e ter condições de ser utilizado como elemento estrutural solicitado por esforços principalmente na flexão simples.

Este trabalho teve por objetivo analisar a capacidade resistente de vigas bi apoiadas em aço constituídas de perfis tipo I laminados de abas paralelas com dois eixos de simetria, sendo dotadas de emendas com parafusos de alta resistência, estando estes modelos solicitados por esforços de flexão simples.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 1 introduz o assunto a ser abordado neste trabalho, apresenta a introdução, a justificativa e o objetivo do mesmo. Já o Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica.

No Capítulo 3, é apresentado o detalhamento de todo procedimento experimental com suas fases de execução, o material utilizados e todos os equipamentos empregados para realização desde a confecção, passando pela instrumentação até a ruptura das peças.

O Capítulo 4 expõe todos os resultados obtidos durante a execução do procedimento experimental. No Capítulo 5 é feito a análise dos resultados obtidos e no Capítulo 6 são feitas as conclusões finais e sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é apresentada uma revisão de conceitos e prescrições estabelecidos pela literatura para estudos e dimensionamento de vigas de aço submetidas à flexão simples, abrangendo desde as recomendações normativas nacionais e internacionais, com base na NBR 8800: 2008 e EUROCODE 3: 2010.

2.2. ASPECTOS GERAIS SOBRE O AÇO

Certamente a origem do ferro não pode ser determinada. Acidentalmente os homens do período neolítico fundiram um metal de algum tipo de minério de ferro. “*O vestígio mais remoto deste metal é um conjunto de quatro esferas de ferro, datadas de 4000 a.C., encontradas em El-Gezivat, no Egito*”.(BRAGA, 1998).

O aço foi descoberto posteriormente, por meio de uma mistura utilizando-se o ferro maleável e o carvão vegetal. O aço era um material muito difícil para ser produzido, pois levava dias para a obtenção do material sendo dispensada a produção, e dessa forma o uso do aço era escasso.

Historicamente em um certo tempo o ferro e o aço passaram a fazer parte da humanidade, onde passou a ser utilizado nas construções. Passaram a ser utilizados nos séculos XVIII e XIX, nesta época surgia o desenvolvimento tecnológico. Com isso foi inevitável o uso do ferro e o aço na Revolução Industrial.

O ferro fundido foi o primeiro material siderúrgico a ser empregado na construção de estruturas. Entre 1780 e 1820 pontes em arco ou treliçadas foram construídas, com elementos de ferro fundido submetidos à compressão.

Segundo JÚNIOR (2007) a produção de ferro no Brasil, em 1888, foi fundada a Usina Esperança por Amaro da Silveira, Carlos Wigg e Joseph Gerspacher, perto de Itabira do Campo, sendo instalado um alto-forno para 6 toneladas em 24 horas.

Somente entre 1917 e 1930 é que se iniciou um novo surto industrial. Foi criada a Companhia Siderúrgica Brasileira, em Sabará, com um alto forno moderno e que mais tarde (1922), transformou-se na Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, instalando um forno Siemens-Martin e laminadores para pequenos perfilados e arame. (JÚNIOR, 2007).

De acordo com a NEVES e CAMISASCA (2013) no dia 9 de abril de 1941, foi fundada a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Sua criação havia sido elaborada pelo governo para atender as necessidades da economia e da soberania brasileira ainda no final da década de 1930, Para o presidente do Brasil na época (Getúlio Vargas), a prioridade era o processo de industrialização do país, isto só poderia acontecer com o desenvolvimento da produção siderúrgica em grande escala.

Segundo a NEVES e CAMISASCA (2013) a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) foi criada em 1940, com o intuito de reduzir a dependência de manufaturados vindos do exterior. Já em 1942 o presidente Getúlio Vargas sancionou um decreto e que, foi instituída a empresa de capital misto, que objetivava explorar as jazidas de minério de ferro da região de Itabira, conhecida como Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Sua criação fez parte de um projeto de desenvolvimento econômico que visava à industrialização do país e estava relacionada à criação da (CSN). Ambas se fortaleceram ao longo dos anos 1940 e, na década de 1950, consolidaram suas posições no mercado mundial.

A Companhia Vale do Rio Doce tornou-se, em 1975, a maior exportadora de minério de ferro do mundo, responsável por 16% do mercado transoceânico do produto. Sua área de atuação concentrava-se na região de Minas Gerais. Com o tempo, a companhia passou a atuar também em Carajás, na região amazônica situada no sul do estado do Pará. Em 1997 a Companhia Vale do Rio Doce deixou de ser uma empresa estatal e passou a ser uma empresa de capital privado. Com a privatização, os lucros aumentaram consideravelmente e, em 2008, a Companhia Vale do Rio Doce parou de usar a sigla (CVRD) e adotou a palavra Vale, nova referência da empresa. (NEVES e CAMISASCA, 2013).

Segundo ALMEIDA (2009) as vantagens na utilização de sistemas construtivos em aço vão muito além da linguagem estética de expressão marcante; redução do tempo de construção, aumento da produtividade e racionalização no uso de materiais e mão de obra, passaram a ser fatores chave para o sucesso de qualquer empreendimento. Essas características que transformaram a construção civil no maior mercado para os produtores de aço no exterior, começam agora a serem percebidas no Brasil.

Os aços produzidos pela Gerdau Aço Minas que são utilizados na construção civil e que atendem o mercado são o ASTM A-36 (aço-carbono) , o ASTM A-572 / 50 (aço

carbono microligado de alta resistência mecânica) e o ASTM A-588 Grau K (um aço-carbono microligado de alta resistência mecânica com elevada resistência à corrosão atmosférica).

Os aços carbono estruturais ASTM A-36, aço das chapas de ligação utilizada nesta pesquisa são os mais utilizados dentre todos os aços estruturais. Estes aços dependem do teor de carbono para desenvolver sua resistência, e tem limite de escoamento de 250 MPa e resistência a tração de 400 MPa a 550 MPa segundo a norma NBR 7007:2011 e a norma americana ASTM-A36.

2.2.1. Perfis laminados a quente

De acordo com PFEIL (2009) laminação é o processo pela qual o aço é transformado nos principais produtos siderúrgicos utilizados nas estruturas da construção civil, com possibilidades de produção de chapas e perfis laminados.

Placas de aço são aquecidas ao rubro e introduzidas nos laminadores desbastadores, são utilizados dois rolos giratórios para comprimir a placa de aço, e dessa forma a placa reduz a seção e aumenta o seu comprimento. Este processo é feito varias vezes no laminador, nos quais a distância entre os rolos é reduzida progressivamente.

Em sequência, o aço que passa no laminador desbastador, é enviado para o laminador que dá a característica dos produtos siderúrgicos utilizados na indústria da construção civil.

Para melhorar as propriedades do aço é necessário o recurso auxiliar do tratamento térmico. São divididos em dois grupos: tratamento destinados principalmente a reduzir tensões internas provocadas por laminação (normalização, recozimento) e tratamentos destinados a modificar a estrutura cristalina do material, com alteração da resistência e outras propriedades (têmpera e revenido) (PFEIL, 2009).

Segundo CETLIN e HELMAN (2005) a laminação é o processo metalúrgico ou mecânica de conformação plástica dos metais e ligas em que ocorre a redução da área da seção transversal reta de corpos metálicos forma de barra, lingote, placa, fio, ou tira, etc., pela passagem entre dois cilindros ou mais cilindros com geratriz retilínea . Os processos de laminação são classificados como laminação a quente e laminação a frio devido a mudança de temperatura do material a ser laminado, já a geometria dos produtos planos é mostrada na (laminação de produtos planos) ou contendo canais entalhados de forma mais ou menos complexa e na (laminação de produtos não planos), sendo que a distância entre os dois

cilindros deve ser menor que a espessura inicial da peça metálica (MEYERS e CHAWLA, 1982).

Quando está sendo executada a laminação em seu processo de produção não se passa o material somente uma vez entre os cilindros de laminação, visto que através de uma só passagem do material normalmente não se consegue a redução da área almejada. Desta forma deve-se submeter o material a uma sequência de passes no equipamento de laminação. Essa sequência pode ser realizada de duas formas considerando um conjunto único de cilindros: conservando a abertura fixa durante a operação e modificando o diâmetro do cilindro ao longo do seu comprimento ou ajustando a abertura entre os cilindros durante a operação. Ou maneira de se executar a laminação é a colocação de laminadores que trabalhem o material sucessiva e simultaneamente chamado de laminador contínuo (SOARES, 2010).

Devido a padronizações no produto acabado por laminação o processo de transformação mecânica de metais é um dos mais utilizados, pois, apresenta alta produtividade e um controle dimensional do produto acabado que pode ser bastante preciso.

Na laminação o material é submetido a tensões compressivas elevadas devido aos esforços envolvidos, isto explica o atrito entre os rolos e o material, resultantes da ação de prensagem dos rolos no processo de laminação e a tensões cisalhantes superficiais. Também pode se explicar que a ação de puxar o metal para dentro dos cilindros é de responsabilidade das forças de atrito.

De acordo com SOARES (2010) a matéria-prima a ser laminada são tarugos que são obtidos por solidificação em máquinas de lingotamento contínuo ou através de laminação de seções maiores, blocos ou lingotes, numa operação que se dá em um laminador desbastador (*blooming mill*). A laminação pode ser dividida em etapas como: desbaste; intermediária e acabadora na qual os tarugos são deformados até atingir a dimensão final objetivada. É importante projetar e ajustar os equipamentos para não ter grandes perdas durante o processo de laminação.

A laminação a quente normalmente trás a redução ou desbaste inicial dos lingotes em blocos, tarugos ou placas. Desta forma uma nova etapa de laminação a quente acontece para transformar o produto em chapas grossas, tiras a quente, vergalhões, barras, tubos, trilhos ou perfis estruturais.

Após a laminação de tiras a quente ocorre a laminação a frio que produz tiras a frio de excelente acabamento superficial, estas tiras mostram boas propriedades mecânicas, controle dimensional do produto e padronizações rigorosas do produto acabado.

Segundo OLIVEIRA (2010) a produção de chapas grossas em um laminador mostra que as placas saem do forno de reaquecimento com temperatura aproximada de 1250 °C e são transportadas até o laminador através das mesas de rolos. O laminador promove a redução das placas de aço de acordo com o ajuste do equipamento, o processo é repetido com o retorno das placas até atingir a espessura desejada. A Figura 2.1 apresenta a produção de chapa grossa de aço através de um laminador.

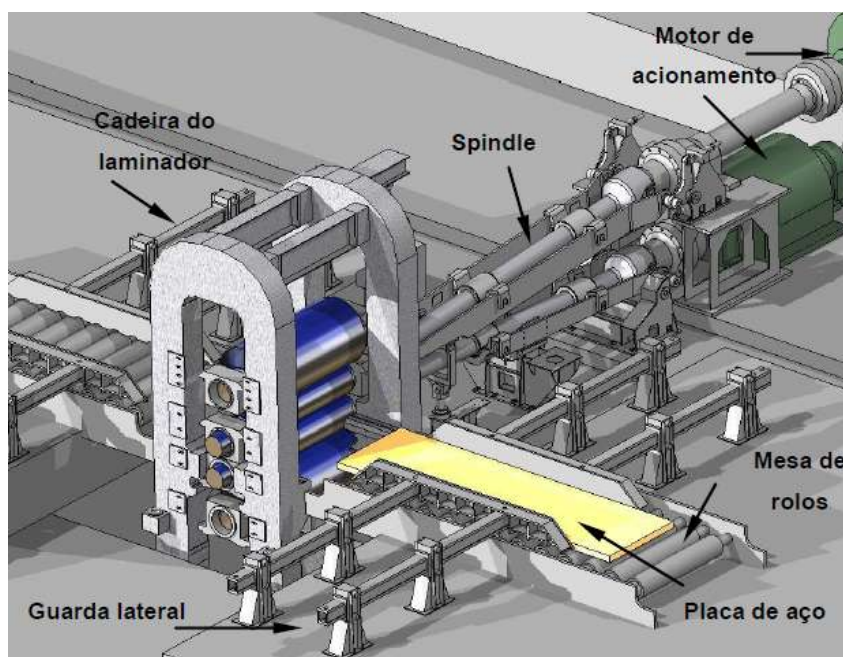


Figura 2.1 - Laminador de Chapas Grossas

Fonte: OLIVEIRA (2010)

De acordo com a norma brasileira NBR 6362:1982 – Perfis de aço laminados a quente, soldados e formados a frio; perfil é o produto laminado cuja seção transversal é uma figura geométrica simples, ou composta de figuras geométricas simples. Os perfis estruturais laminados foram por muito tempo produzidos pela siderúrgica CSN (Cia. Siderúrgica Nacional) nos formatos dos perfis H, I e U, cantoneira de abas iguais, cantoneira de abas desiguais, guia de elevador, segundo padrões norte-americanos nos comprimentos de 6000, 9000 e 12000 mm. Estes perfis eram produzidos em carbono, aço de baixa liga e alta resistência mecânica e aço de baixa liga e alta resistência mecânica e resistente à corrosão atmosférica. A tendência atual sempre foram empregar nas estruturas metálicas perfis estruturais padronizados e de boa qualidade. Os fabricantes de perfis estruturais fornecem tabelas com as dimensões nominais e também todas as propriedades geométricas para o cálculo de estruturas quando as mesmas forem submetidas a esforços solicitantes.

2.2.2. Imperfeições mecânicas ou físicas

Segundo GOMES (2006), as imperfeições mecânicas ou físicas contidas nos perfis de aço procedem substancialmente devido à: presença das tensões residuais; distribuição não homogênea das características mecânicas através da seção transversal.

Através dos processos de produção industrial dos perfis de aço consequentemente as tensões residuais representam um estado de tensões internas auto-equilibrado nos perfis de aço. As tensões residuais que existem em perfis laminados a quente são decorrentes do processo de resfriamento, não uniforme das peças após a laminação e ocorrem em corpos que sofrem deformações plásticas não uniformes. Quando nenhuma força externa se opuser, as tensões residuais serão sempre elásticas. O que cria as tensões residuais nas seções de aço é a condição de deformação não homogênea, e é devida aos processos industriais térmicos (laminação, soldagem e corte a maçarico) e mecânicos (laminação a frio, desempenho) (GOMES, 2006).

A técnica de produção através das seções transversais nos perfis de aço leva a uma distribuição não homogênea das características mecânicas. O comportamento estrutural de uma viga deduz várias características mecânicas, profundamente influenciada pela variação da tensão de escoamento.

As tensões longitudinais são as tensões residuais que devem ser consideradas, através do carregamento externo elas agem no mesmo sentido que as tensões. Tais superposições quase sempre reduzem a carga última de barras sujeitas ao fenômeno de flambagem.

2.2.3. Seções laminadas a quente

Segundo GOMES (2006) nas seções laminadas a quente, devido a natureza térmica durante o processo de produção dos perfis onde existem tensões residuais, e se devem ao processo de resfriamento, no entanto, a sua distribuição pode ser mais tarde modificada pelo processo mecânico de desempenho. A Figura 2.2 mostra o processo de resfriamento de um perfil I laminado a quente.

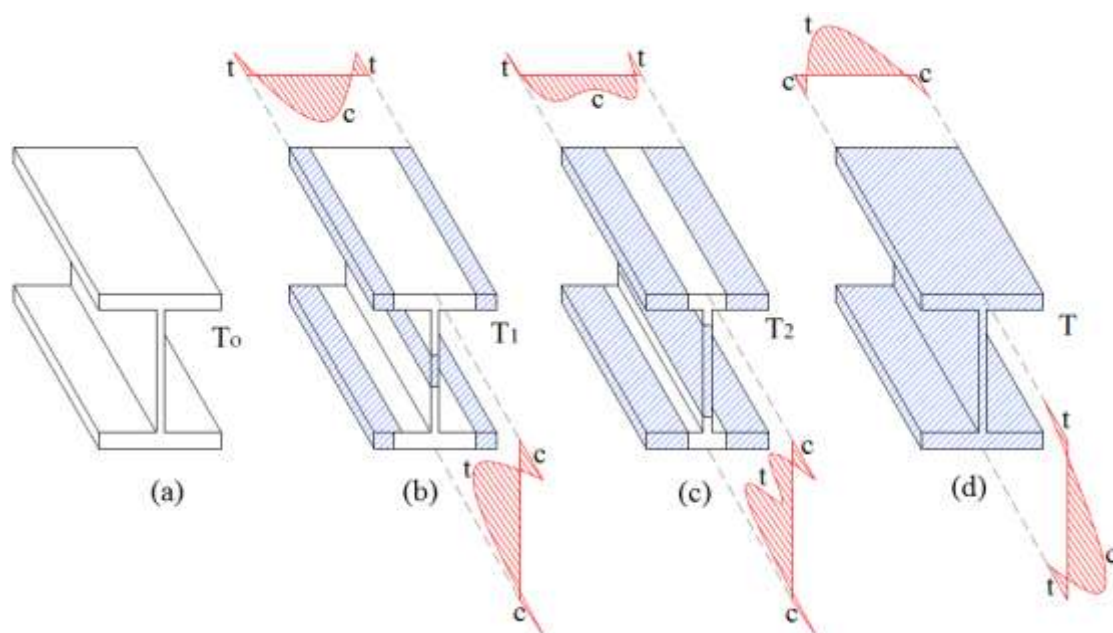


Figura 2.2 - Processo de resfriamento de um perfil I laminado a quente

Fonte: GOMES (2006)

O detalhamento do processo de resfriamento de perfil I laminado a quente (Figura 2.1 - a), a temperatura ao final da laminação (T_0) é de aproximadamente 600°C , diferenças na temperatura nas várias partes da seção transversal começam a aparecer. As partes mais expostas (extremidades dos flanges e meio da alma) resfriam mais rapidamente do que as outras partes (encontro dos flanges com a alma), que estão mais protegidas termicamente. Numa fase intermediária do resfriamento (T_1), como a tendência das áreas mais frias de encurtar é impedida pelas áreas mais mornas, uma distribuição tensão residual longitudinal surge como mostra a (Figura 2.1 - b).

Neste ponto, as áreas mornas sofrem deformação plástica devido à tensão de compressão imposta a elas pela contração das áreas que resfriaram mais rapidamente. Isso reduz a tensão residual induzida, como mostra a (Figura 2.1 - c) para a temperatura intermediária (T_2).

O completo resfriamento das áreas mais expostas previne a contração das fibras ainda mornas, que, portanto, sofrem deformação plástica. Consequentemente, uma vez o resfriamento esteja completo, as áreas, que primeiro se resfriaram estarão comprimidas, enquanto que as áreas que se resfriaram por últimos estarão tracionadas, como mostra a (Figura 2.1 - d).

De acordo com PAULA (2002) quando se observa os perfis laminados a quente em processo de produção na laminação, as mesas resfriam-se mais lentamente que a alma por

apresentarem maior espessura. Contudo, o que se resfria mais rápido são as partes mais expostas ao ar, como as extremidades das mesas e a parte central da alma. As tensões residuais de tração são nas regiões de resfriamento mais lento, enquanto que, nas regiões de resfriamento mais rápido são de compressão.

Cada seção transversal, influência na radiação térmica das superfícies, e em sequencia no gradiente de temperatura através da seção durante o resfriamento e na distribuição final de tensão residual (GOMES, 2006).

2.2.4. Perfis laminados de abas paralelas

A produção dos perfis de abas paralelas da série WF (*Wide Flange*) foi iniciada no Brasil no ano de 2002 pela Gerdau Aço Minas, com isso mais de 80 bitolas com diferentes alturas, entre 150 e 610 mm podem ser encontrados no mercado de estruturas metálicas. Os perfis de abas paralelas produzidos pela Gerdau Aço Minas tem uma extraordinária flexibilidade comparando os antigos perfis americanos que, quando encontrados, são ofertados em aço ASTM A 36, apenas nas alturas de 6, 8 e 10 polegadas e no máximo duas bitolas popularizadas como 1ª e 2ª almas.

Segundo as especificações das normas NBR 15980:2011 e ASTM A6/A6M perfis laminados de abas paralelas nas formas I e H consistem de mesas paralelas que permitem melhores soluções de ligações, encaixes e acabamentos estruturais. O material certificado com garantia de qualidade, padronização na composição química e nas propriedades mecânicas.

Os perfis laminados de abas paralelas ASTM A-572 / 50 se encontram no mercado para compra com comprimento padrão de 12 metros para todas as bitolas, ou de 6 metros, para as bitolas até 310 mm. São perfis com ampla variedade de bitolas, de 150 a 610 mm (6 a 24 polegadas) e permitem um alto destaque aos fabricantes de estruturas.

Os produtos como chapas e perfis, possuem dimensões relacionadas com a medidas padronizadas e facilita o transporte urbano e rodoviário das peças. Geralmente os projetos são desenvolvidos sobre malhas orientadoras de 3000x3000 mm. (SILVA e SANTOS, 2004).

Os aços microligados, pelo qual consistem os perfis laminados de abas paralelas ASTM A-572 (aços de alta resistência mecânica e baixa liga) utilizam vários elementos de liga em adição ao carbono para que possam atingir resistências mecânicas superiores; o limite de escoamento para estes aços está situado entre 290 e 450 MPa e resistência a tração de 450

MPa de acordo com a NBR 7007:2011 e a norma americana ASTM A-572 / 50. Outro aço que tem esta característica é o ASTM A-588 Grau K, produzidos pela Gerdau Aço Minas que possui elevada resistência à corrosão atmosférica (é um aço “patinável”).

Para obedecer os requisitos fundamentais dos aços microligados estruturais é preciso ter: ductilidade e homogeneidade, soldabilidade, valor elevado da relação entre limite de resistência e limite de escoamento, resistência razoável à corrosão e susceptibilidade de corte por chama, sem endurecimento.

Segundo PFEIL (2009), os perfis laminados são produzidos em grupos, sendo os elementos de cada grupo de altura h constante e largura das abas b variável. A variação da largura se obtém aumentando o espaçamento entre os rolos laminadores de maneira que a espessura da alma tem variação igual à da largura das abas.

Um perfil laminado com faces paralelas pode ser designado pelas suas dimensões externas nominais (altura, ou altura x largura), seguidas da massa do perfil em Kg/m. Exemplo, com dimensões em mm, tem-se W 250 x 22,3 (perfil com altura igual de 250 mm e massa de 22,3 Kg/m).

O trabalho a quente proporcionado pela laminação dos perfis estruturais de abas paralelas e o teor de carbono relativamente baixo garantem a ductilidade necessária, além de produzir uma homogeneidade muito boa em toda a extensão das peças, com pequenas variações de resistência à tração e à compressão, precisamente são essas variações que não prejudicam as propriedades desses aços. Estes aços apresentam uma boa ductilidade que por outro lado, garante excelente trabalhabilidade em operações como corte, furação, dobramento, etc., sem que se originem fissuras ou outros defeitos.

Os projetos executados com perfis estruturais laminados de abas paralelas estão proporcionando a crescente demanda das construções em que o tempo é um fator decisivo para a realização e a execução do projeto. Os perfis estruturais laminados de abas paralelas são uma inovação no mercado brasileiro e colaboram para o crescimento dos negócios das empresas fabricantes de estruturas, deixando-as livres para montar e/ou comercializar seu produto, sem perder tempo na produção de perfis.

Os perfis laminados de abas paralelas são aplicados na estrutura de pontes, viadutos e passarelas, fundações e contenções, edifícios de andares múltiplos, residências e galpões comerciais e industriais.

Segundo a Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (2014) o uso dos perfis laminados de abas paralelas em estruturas na construção civil vem se expandindo gradativamente. Apesar dessa expansão, a utilização do aço na construção civil

brasileira ainda é muito pequena em relação a outros países. Comparando com percentuais superiores a 50% nos Estados Unidos e de mais de 70% em alguns países da Europa como na Inglaterra e o aço participa em apenas 3% das obras de construção civil no Brasil.

2.3. MODOS DE FALHA EM VIGAS SUBMETIDAS À FLEXÃO

Um dos modos de ruptura de uma viga pode ser a flambagem local da mesa comprimida, segundo PFEIL (2009) este tipo de ruptura em vigas I fletidas no plano da alma, indica que as tensões normais de compressão da mesa (σ_{bc}) variam entre um valor máximo sobre a alma e um valor mínimo na borda. A Figura 2.3 apresenta um modelo de flambagem local da mesa comprimida (FLM).

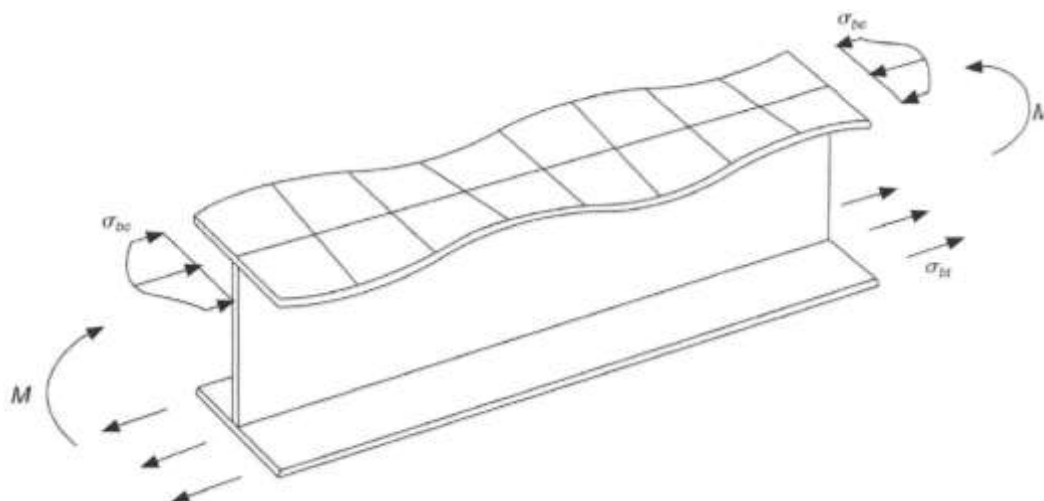


Figura 2.3 - Modo de ruptura de flambagem local da mesa comprimida (FLM)

Fonte: PFEIL (2009)

PFEIL (2009) descreve que a flambagem local da alma (FLA) pode transferir tensões para a mesa comprimida, reduzindo o momento resistente. Com isso a Figura 2.4 descreve o que pode acontecer com este modo de ruptura.

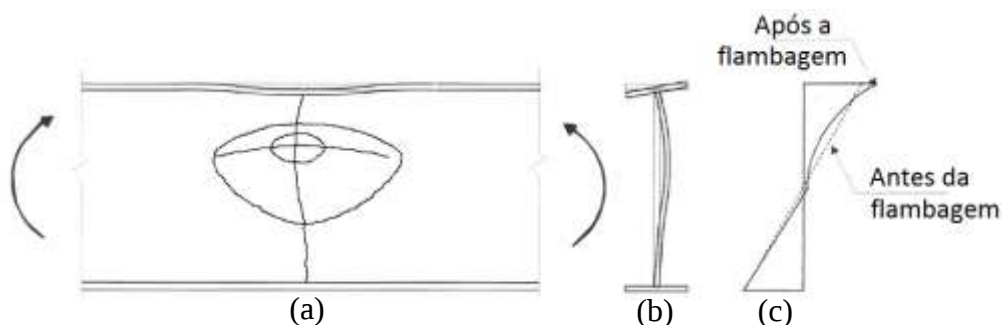


Figura 2.4 - Flambagem local da alma devido ao momento fletor.

Fonte: PFEIL (2009)

Detalhadamente a Figura 2.4 (a) representa o esquema da viga com um momento solicitante M ; (b) seção transversal mostrando a alma após a flambagem; (c) diagrama de tensões elásticas antes e depois da flambagem, mostrando a transferência de tensões da alma para a mesa comprimida.

Segundo a teoria da NBR 8800:2008 no que se refere aos estados limites últimos, a resistência à flexão em vigas sem contenção lateral contínua mostram outro modo de ruptura que é a flambagem lateral com torção (FLT).

O fenômeno da flambagem lateral com torção pode ser entendido a partir da flambagem por flexão de uma coluna. Na viga da Figura 2.5 a seção composta da mesa superior e de um pequeno trecho da alma funciona como uma coluna entre pontos de apoio lateral, podendo flambar em torno do eixo y . Como a mesa tracionada é estabilizada pelas tensões de tração, ela dificulta o deslocamento lateral (u) da mesa comprimida, de modo que o fenômeno se processa como torção (ϕ) da viga. Sob efeito de torção as seções sofrem rotações acompanhadas de deformações longitudinais, causando o empenamento. Uma seção originalmente plana se deforma deixando de ser plana (PFEIL, 2009).

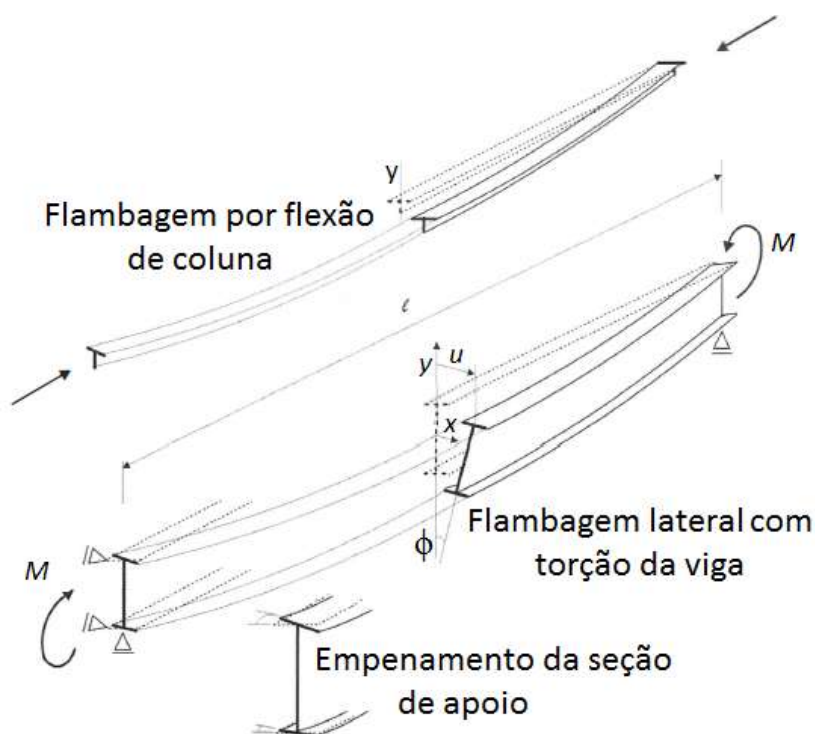


Figura 2.5 - Flambagem lateral com torção da viga biapoiada

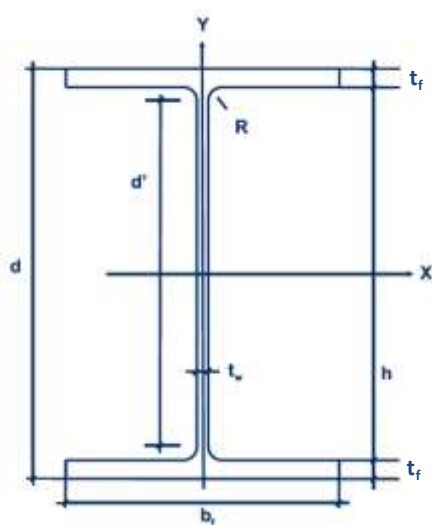
Fonte: PFEIL (2009)

De acordo com PFEIL (2009), nos pontos de apoio vertical da viga, admite-se sempre a existência de contenção lateral, que impede a rotação de torção do perfil.

2.4. DIMENSIONAMENTO DE PERFIS FLETIDOS SEGUNDO A NBR 8800:2008

2.4.1. Propriedades geométricas das vigas

Vigas constituídas de perfis laminados de abas paralelas possuem a seção transversal em forma de I como mostrada na Figura 2.6.



d = altura total da seção transversal

h = altura interna da alma

d' = altura livre da alma

t_f = espessura da mesa ou abas

t_w = espessura da alma

b_f = largura das mesas ou abas

R = raio

Figura 2.6 - Seção transversal em forma de I

As seções transversais em forma de I exigem alguns cálculos para as propriedades geométricas das vigas com dois eixos de simetria, estes cálculos podem ser executados através de programas computacionais ou manualmente, fazendo uso das formulas que seguem a seguir.

No dimensionamento de elementos fletidos utilizam-se principalmente os procedimentos da normativos da NBR 8800:2008.

Do ponto de vista de SILVA (2007) vigas com seção transversal I são as mais indicadas para trabalharem a flexão, pois possuem maior inércia no plano de flexão ($I_x > I_y$). Isto é, as massas estão mais afastadas do eixo neutro, porém por serem peças esbeltas, seu dimensionamento deve obedecer as limitações de flambagens.

A esbeltez de um a chapa (λ) é dada pela relação 2.1:

$$\lambda = \frac{b}{t} \quad 2.1$$

A Figura 2.7 mostra detalhes do diagrama de deformações para incrementos de carga.

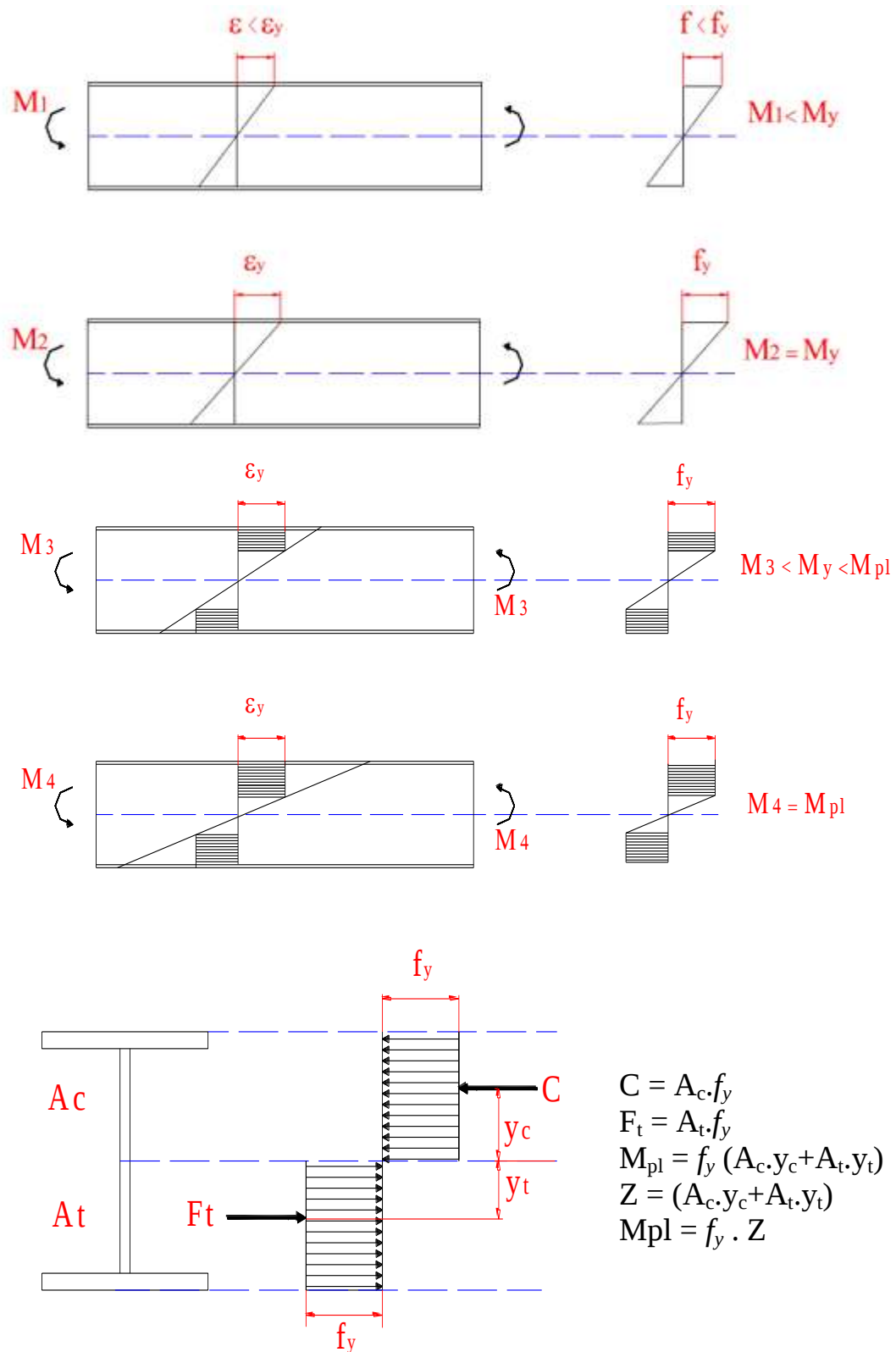


Figura 2.7 - Diagrama de deformações para incrementos de carga (b). Adaptada de SILVA (2007)

Vigas de seção tipo I não esbeltas são aquelas cujas almas, quando perpendiculares ao eixo de flexão, têm parâmetro de esbeltez (λ) inferior ou igual a (λ_r), conforme é apresentada na equação (2.2). O dimensionamento deve ser feito de acordo com o anexo G da NBR 8800:2008. Por outro lado as vigas esbeltas são aquelas que têm o parâmetro de esbeltez (λ) superior (λ_r), conforme a equação (2.3) e o dimensionamento deve ser feito como apresentado no anexo H da NBR 8800:2008.

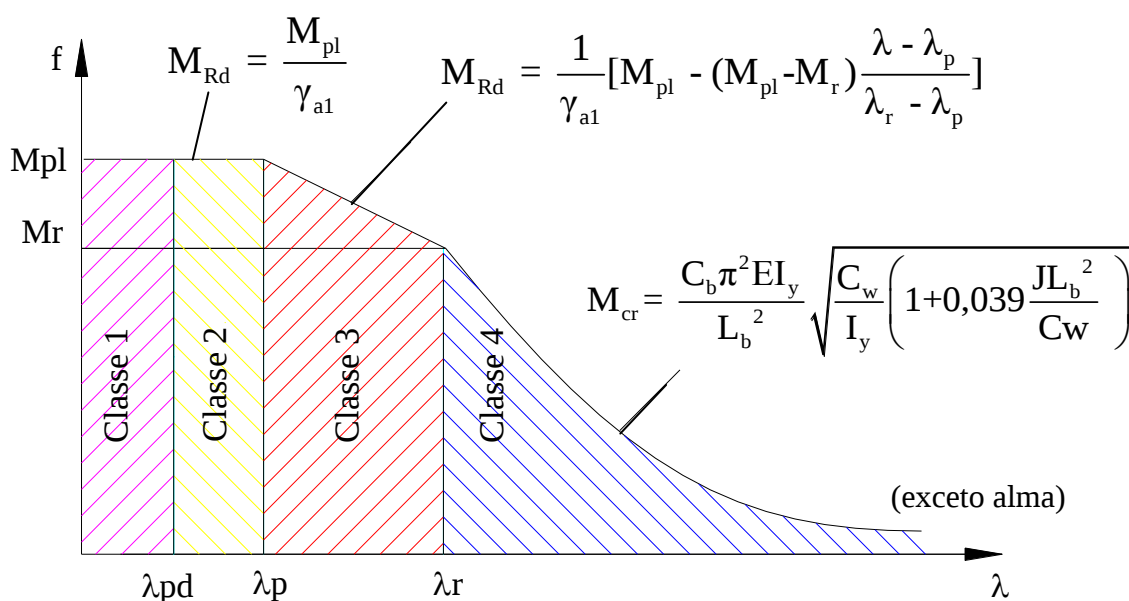
$$\lambda = \frac{h}{t_w} < \lambda_r = 5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 2.2$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} > \lambda_r = 5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 2.3$$

2.4.2. Momento fletor resistente de cálculo

Da mesma forma que é considerado os parâmetros de esbeltez das vigas o dimensionamento de momento fletor resistente de cálculo, M_{Rd} , deve ser feito como apresentado no anexo G ou H da NBR 8800:2008. Para estes cálculos devem ser considerados, conforme o caso, os estados limites últimos de flambagem lateral com torção (FLT), flambagem local da mesa comprimida (FLM), flambagem local da alma (FLA).

No dimensionamento, para que não ocorram estados limites últimos relacionados ao momento fletor e à força cortante, devem ser atendidas as seguintes condições de dimensionamento: $M_{Sd} \leq M_{Rd}$ e $V_{Sd} \leq V_{Rd}$. A Figura 2.8 apresenta um diagrama de esbeltez em relação ao momento fletor.



$$\lambda \leq \lambda_p \rightarrow \mathbf{M}_{\text{Rd}} = \frac{\mathbf{M}_{\text{pl}}}{\gamma_{\text{a1}}} = \frac{\mathbf{Z}_{\text{x}} \cdot \mathbf{f}_{\text{y}}}{\gamma_{\text{a1}}} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{M}_{\text{r}} = (\mathbf{f}_{\text{y}} - \sigma_{\text{r}}) \mathbf{W}_{\text{x}} \\ \mathbf{M}_{\text{r}} = \mathbf{f}_{\text{y}} \cdot \mathbf{W}_{\text{x}} \end{array} \right. \quad 2.4$$

$$\lambda p < \lambda \leq \lambda r \rightarrow M_n = \frac{1}{\gamma_{a1}} [M_{pl} - (M_{pl} - Mr) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}] \quad (\text{para alma}) \quad 2.5$$

$$\lambda > \lambda_r \rightarrow M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad (\text{exceto para alma}) \quad 2.6$$

2.4.3. Barras submetidas à flexão simples

Em relação as flambagens estas podem ser: flambagem local é a perda de estabilidade das chapas comprimidas componentes do perfil, a qual reduz o momento resistente da seção; flambagem global a viga perda da estabilidade no plano principal da

flexão (em geral vertical), passando a apresentar deslocamentos laterais e rotações de torção. Para evitar a flambagem de uma viga I, cuja a rigidez à torção é muito pequena, é preciso prover contenção lateral à viga (PFEIL, 2009).

2.4.4. Flambagem local

Do ponto de vista das normas norte-americana AISC (2005) e brasileira NBR 8800:2008, as seções das vigas podem ser divididas em três classes conforme a influencia da flambagem local sobre os respectivos momentos fletores resistentes (M_{res}):

- Seção compacta, atinge o momento de plastificação total ($M_{res} = M_p$) e exibe suficiente capacidade de rotação inelástica para configurar uma rótula plástica.
- Seção semicompacta, a flambagem local ocorre após ter desenvolvido plastificação parcial ($M_{res} > M_p$) mas sem apresentar significativa rotação.
- Seção esbelta, seção na qual a ocorrência da flambagem local impede que seja atingido o momento de início de plastificação ($M_{res} < M_p$).

A Figura 2.9 descreve as curva (momento x rotação) de vigas metálicas, com seções compacta, semicompacta e esbelta, sujeitas a carregamento crescente, mostrando a influencia da flambagem local sobre o momento resistente das vigas e sobre suas deformações.

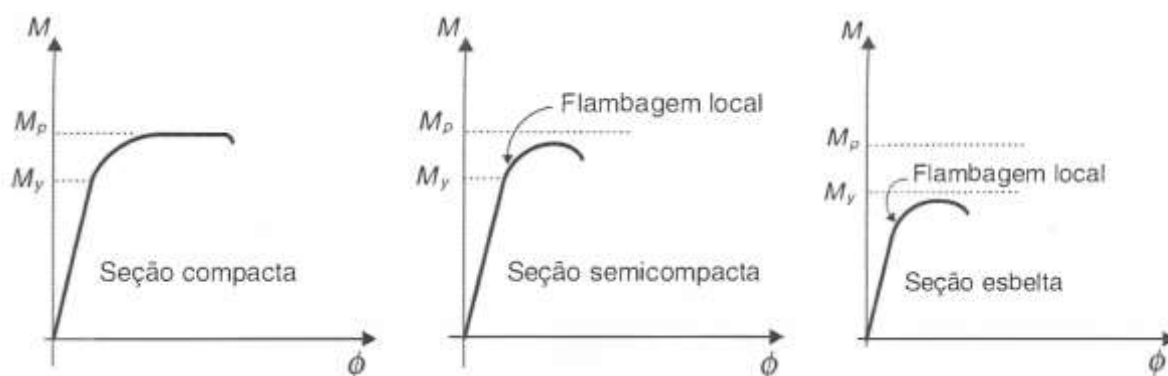


Figura 2.9 - Comportamento de vigas com seções compacta, semicompacta e esbelta.

Fonte: PFEIL (2009)

De acordo com a NBR 8800:2008 seção compacta cujos elementos comprimidos possuem (λ) não superior a (λ_p) e cujas mesas são ligadas continuamente às almas; seção semicompacta que possuem um ou mais elementos comprimidos com (λ) excedendo (λ_p) , mas não (λ_r) ; seção esbelta que possuem um ou mais elementos comprimidos com (λ) excedendo (λ_r) .

Através da flexão surge compressão, as instabilidades locais são apresentadas nas chapas das vigas. Para levar em conta estes efeitos analisa-se a alma comprimida (FLA) e a mesa comprimida (FLM).

O procedimento de cálculo para flambagem local da alma (FLA) deve ser calculado exemplificado pela NBR 8800:2008.

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad 2.7$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 2.8$$

$$\lambda_r = 5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 2.9$$

$$M_r = W_x \cdot f_y \quad 2.10$$

M_{cr} = ver anexo H na NBR 8800:2008

Caso onde $\lambda = h / t_w > \lambda_r$, aplicar o anexo H da NBR 8800/2008.

De acordo com a NBR 8800:2008 o procedimento de cálculo para flambagem local da mesa (FLM) deve ser calculado como segue:

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \quad 2.11$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 2.12$$

Para perfis laminados:

$$\lambda_r = 0,86 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)}} \quad 2.13$$

$$M_{cr} = \frac{0,69E}{\lambda^2} W_c \quad 2.14$$

Para perfis soldados:

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)/k_c}} \quad 2.15$$

$$M_{cr} = \frac{0,90E.k_c}{\lambda^2} W_c \quad 2.16$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r)W \quad 2.17$$

2.4.5. Flambagem lateral com torção

Para determinar os cálculos da flambagem lateral com torção estabelece as relações segundo a NBR 8800:2008.

- Seções com dois eixos de simetria

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad 2.18$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 2.19$$

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27C_w \cdot \beta_1^2}{I_y}}} \quad 2.20$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W}{EJ} \quad 2.21$$

$$C_w = \frac{I_y (d - t_f)^2}{4} \quad 2.22$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r)W \quad 2.23$$

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y}} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right) \quad 2.24$$

2.4.6. Força cortante

De acordo com SILVA (2007) a tensão de cisalhamento que ocorre em uma seção transversal de uma viga é dado pela expressão (2.25), já conhecida da resistência dos materiais.

$$f_v = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b} \quad 2.25$$

Segundo SILVA (2007), para as seções dos perfis I duplamente simétricos e perfis C, o diagrama de forças cortante apresenta duas particularidades:

- Variação brusca da tensão de cisalhamento na transição da mesa para alma motivado pela variação, também brusca das larguras das seções transversais da mesa e da alma;
- Pequenos valores de tensão de cisalhamento na mesa.

Através dessas análises particularidades a norma NBR 8800:2008 substitui o diagrama da resistência dos materiais por um diagrama constante, que corresponde à tensão

média de cisalhamento na alma e, por consequência, também a fórmula da tensão de cisalhamento por, $f_v = V / A_w$, onde A_w é a área da alma do perfil.

A resistência de cálculo ao cisalhamento, para perfis I duplamente simétricos, é dada por:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad 2.26$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad 2.27$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad 2.28$$

$k_v = 5,0$ para almas sem enrijecedores transversais, para $\frac{a}{h} > 3$ ou para

$$\frac{a}{h} > \left[\frac{260}{(h/t_w)} \right]^2 \quad 2.29$$

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2}, \text{ para todos os outros casos.} \quad 2.30$$

$$\text{Para } \lambda \leq \lambda_p: V_{Rd} = \frac{V}{\gamma_{al}} \quad 2.31$$

$$\text{Para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r: V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V}{\gamma_{al}} \quad 2.32$$

$$\text{Para } \lambda > \lambda_r: V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V}{\gamma_{al}} \quad 2.33$$

Quando forem necessários enrijecedores transversais, devem ser obedecidos os seguintes requisitos de acordo com a NBR 8800:2008.

- Os enrijecedores transversais devem ser soldados à alma a às mesas do perfil, podendo, entretanto, do lado da mesa tracionada, ser interrompido de forma que a distância entre os pontos mais próximos das soldas entre mesa e alma e entre enrijecedor e alma fique entre $4t_w$ e $6t_w$;
- A relação entre largura e espessura dos elementos que formam os enrijecedores não pode ultrapassar $0,56\sqrt{\frac{E}{f_y}}$;
- O momento de inércia da seção de um enrijecedor singelo ou de um par de enrijecedores (um de cada lado) em relação ao eixo no plano médio da alma não pode ser inferior a $a.t_w^3.j$, onde:

$$j = \left[\frac{2,5}{(a/h)^2} \right] - 2 \geq 0,5 \quad 2.35$$

Com esses valores calcula-se novamente a resistência à força cortante e verifica a resistência ao esmagamento nos apoios e a resistência à compressão.

2.5. LIGAÇÕES DE PEÇAS METÁLICAS

Segundo PRELORENTZOU (1991) as ligações podem ser classificados como engastadas ou rígidas: onde é garantida a continuidade da estrutura e as rotações relativas entre os elementos são restringidas ao máximo; articuladas: onde as rotações relativas não são restringidas e semi rígidas: onde as rotações relativas são restringidas entre 20% e 90% do giro que ocorria se não houvesse restrição e o momento transmitido através das ligações é maior que zero e menor que o momento de uma estrutura calculada como contínua.

De acordo com RIBEIRO (1998) as ligações são a origem de descontinuidades geométricas e mecânicas que devem ser observadas e tratadas com cuidado, analisando-se o seu comportamento da forma mais precisa possível.

As estruturas confeccionadas de peças metálicas são fabricadas com dimensionamento transversais limitadas através da capacidade dos laminadores e com comprimento estabelecido pela capacidade dos veículos rodoviários.

As estruturas metálicas de aço podem ser formadas por associação de peças ligadas entre si. Assim existe uma importância fundamental para os meios das ligações metálicas ou união entre peças metálicas. Basicamente existem dois tipos de ligações: por meio de conectores ou por meio de solda.

Os conectores podem ser rebites ou parafusos e são colocados em furos que atravessam as peças a serem ligadas. Já a ligação feita por solda consiste em fundir as partes em contato de modo a promover a união das peças.

De acordo com PFEIL (2009) no século XIX e ainda na primeira metade do século XX o meio de ligação mais utilizada na época era os rebites. Nos últimos anos a solda se transformou no elemento preponderante de ligação, isto se deu graças ao progresso nos equipamentos e a difusão de aço-carbono e aços-liga soldáveis. Com o aumento dessa tecnologia a tendência moderna é utilizar solda na fabricação em oficinas, empregando parafusos nas ligações no campo.

2.5.1. Parafusos de alta resistência

Os parafusos que são utilizados em estruturas metálicas na indústria da construção podem ser divididos de acordo com suas características em parafusos comuns e parafusos de alta resistência.

Os de uso atual possuem cabeça hexagonal, usados com porca hexagonal. Esses parafusos hexagonais têm menor comprimento de rosca que outro tipo de parafuso, isto reduz a probabilidade de haver roscas inclusas no plano de corte (Parafusos sextavados, em polegadas). A Figura 2.10 apresenta as principais características geométricas dos parafusos de alta resistência.

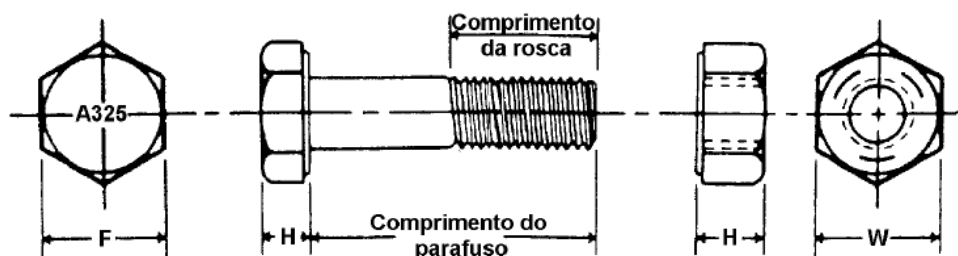


Figura 2.10 - Características geométricas de parafusos de alta resistência segundo a norma ASTM A-325/A-490. Adaptada do AISC/ASD (1989). Fonte: VALENCIANI (1997).

O perfil das roscas e suas tolerâncias de fabricação, tanto para parafusos comuns quanto para parafusos de alta resistência é um fator importante que deve ser levado em consideração. Os parafusos de alta resistência que são usado em estruturas devem estar dentro das especificações de modo a se obter uma facilidade de fabricação e garantir a eficiência estrutural do parafuso.

Os parafusos de alta resistência são produzidos com aço tratados termicamente. Os tipos mais utilizados são ASTM A-325 e ASTM A-490 de aço carbono temperado.

Segundo o AISC (2005) o uso de parafusos de alta resistência devem ser conformes com as disposições da especificação das ligações, eles podem ser instalados com esforço de tração mínimo. Nos casos em que deseja impedir qualquer movimento entre as chapas da ligação, dimensionam-se os parafusos com um coeficiente de segurança contra o deslizamento, obtendo-se uma ligação do tipo atrito.

Segundo a NBR 8800:2008 as ligações em parafusos de alta resistência devem ser atendidos os requisitos de projeto, montagem e inspeção da ligação.

As dimensões máximas de furos devem obedecer ao indicador da Figura 2.11 .No entanto, furos de maiores diâmetros podem ser usados nas placas de apoio de pilares, para levar em conta as tolerâncias de locação de chumbadores em bases de concreto, usando-se arruelas especialmente dimensionadas para tal situação, soldadas à placa de base. NBR 8800:2008.

	Diâmetro do parafuso ou barra redonda rosqueada d_b	Diâmetro do furo-padrão	Diâmetro do furo alargado	Dimensões do furo pouco alongado	Dimensões do furo muito alongado
Dimensões em milímetros	≤ 24	$d_b + 1,5$	$d_b + 5$	$(d_b + 1,5) \times (d_b + 6)$	$(d_b + 1,5) \times 2,5 d_b$
	27	28,5	33	28,5 $\times$ 35	28,5 $\times$ 67,5
	≥ 30	$d_b + 1,5$	$d_b + 8$	$(d_b + 1,5) \times (d_b + 9,5)$	$(d_b + 1,5) \times 2,5 d_b$
Dimensões em polegadas	$\leq 7/8$	$d_b + 1/16$	$d_b + 3/16$	$(d_b + 1/16) \times (d_b + 1/4)$	$(d_b + 1/16) \times 2,5 d_b$
	1	1 1/16	1 1/4	1 1/16 $\times$ 1 5/16	1 1/16 $\times$ 2 1/2
	$\geq 1 1/8$	$d_b + 1/16$	$d_b + 5/16$	$(d_b + 1/16) \times (d_b + 3/8)$	$(d_b + 1/16) \times 2,5 d_b$

Figura 2.11 - Dimensões máximas de furos para parafusos e barras redondas rosqueadas

Fonte: NBR 8800:2008

Os parafusos de alta resistência ASTM A-325 e ASTM A-490 podem ser utilizados em ligações do tipo apoio quando são tolerados pequenos deslizamentos. Neste caso os parafusos são instalados com aperto normal sem o controle da protensão inicial.

De acordo com o AISC (2005) e a NBR 8800:2008 o que deve ser considerado no projeto de uma ligação é que parafusos de alta resistência sujeito a tração ou tração e cisalhamento, isto quando o afrouxamento ou a fadiga devido à vibração ou flutuação de solicitação.

As ligações destinadas a transferir forças paralelas à superfície de contato das partes ligadas podem ser por atrito ou por contato. As ligações que devem ser por atrito segundo a NBR 8800:2008 são as ligações nas quais o deslizamento seja altamente prejudicial e aquelas que estiverem sujeitas as forças repetitivas.

Ainda que os parafusos de alta resistência trabalhem através do esforço de protensão que aplicam nas chapas, o dimensionamento dos mesmos é feito de forma que utiliza o estado limite último, utilizando tensões nominais de corte ou de apoio.

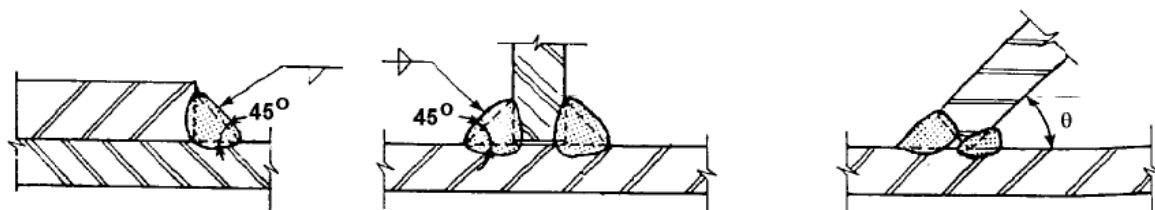
Dependendo do tipo de furo adotado nas ligações deve-se verificar a resistência ao deslizamento para cargas em serviço, ou para combinação em estado limite último isto quando um possível deslizamento é prejudicial, como por exemplo, nos casos de cargas reversíveis com ou sem fadiga (PFEIL, 2009).

2.5.2. Tipos de solda

Para os procedimentos de dimensionamento de ligações soldadas segundo a NBR 14762:2010 que especifica para peças em que a espessura da parte mais fina não ultrapasse 4,75 mm. Alguns casos que não se enquadram nessa norma, a norma estabelece que sejam adotados os parâmetros da norma NBR 8800:2008 e, se houver alguma situação específica que esta norma não preveja, a NBR 14762:2010 estabelece que sejam atendidas as exigências da norma AWS D1.1:2000 ou a AWS D1.3:1998.

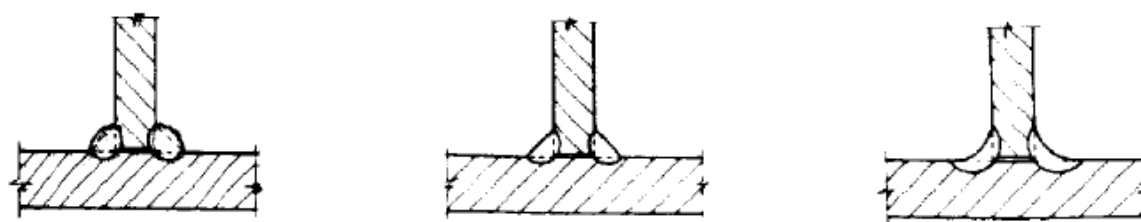
São utilizados quatro tipos usuais de solda que são: filete, chanfro, tampão em furo e tampão em rasgo ou ranhura. Os quatro tipos representam as seguintes porcentagens de utilização nas construções soldadas: soldas de filete 80%, soldas em chanfro 15%, e os remanescentes 5% correspondem a tampão em furo, em rasgo e outras soldas especiais (SALMON e JOHNSON, 1996).

Para representação das soldas de filete onde apresentam seção transversal aproximadamente triangular, e ligam superfícies não coplanares. São as soldas mais utilizadas devido a facilidade de execução e versatilidade. Os filetes são convexos, mas as soldas que possuem filetes em forma côncava, são de melhor qualidade, consomem menos eletrodos, possuem uma melhor penetração e apresentam um melhor fluxo de tensões, porém sua execução é mais trabalhosa (VALENCIANNI, 1997). As Figuras 2.12 e 2.13 representam alguns exemplos de solda de filete.



a) Filetes em chapas sobrepostas b) Filetes em chapas ortogonais c) Filetes em chapas não ortogonais

Figura 2.12 - Exemplos de soldas de filete. Adaptada de COOPER (1985)



a) Solda convexa b) Solda plana c) Solda côncava

Figura 2.13 - Formas para o filete de solda. Adaptada de SIDERBRÁS (1988)

Segundo SALMON e JOHNSON (1996) as soldas de filete são mais vantajosa para a soldagem em campo e geralmente requerem menor precisão na fabricação, devido à sobreposição das partes. Além do mais, as extremidades das partes raramente necessitam preparações e especiais, tal como chanfros, desde que as condições da extremidade resultantes do corte por chama ou corte por cisalhamento sejam adequadas.

A solda em chanfro tem como principal atuação em conectar perfis estruturais que são alinhados no mesmo plano. De acordo com GAYLORD et al. (1992), a solda em chanfro é feita na abertura (chanfro), entre duas partes presentes na ligação. Estes tipos de ligações soldadas em chanfro, podem ser de penetração parcial ou total. O que pode acontecer é que a penetração é intencionalmente parcial, de tal maneira que a solda é menos profunda que a espessura da parte ligada, enquanto em outros casos ela é parcial devido ao procedimento de soldagem não produzir efetiva penetração, caso contrário será uma solda de penetração total.

Para se escolher se o chanfro é simples ou duplo usualmente é uma questão do custo de preparação versus o consumo de metal de solda. Os autores QUITES e DUTRA (1979) mostram de uma maneira geral que, a finalidade da preparação das extremidades a serem soldadas é obter uma junta adequada para a soldagem. A Figura 2.14 apresenta alguns modelos de soldas em chanfro.

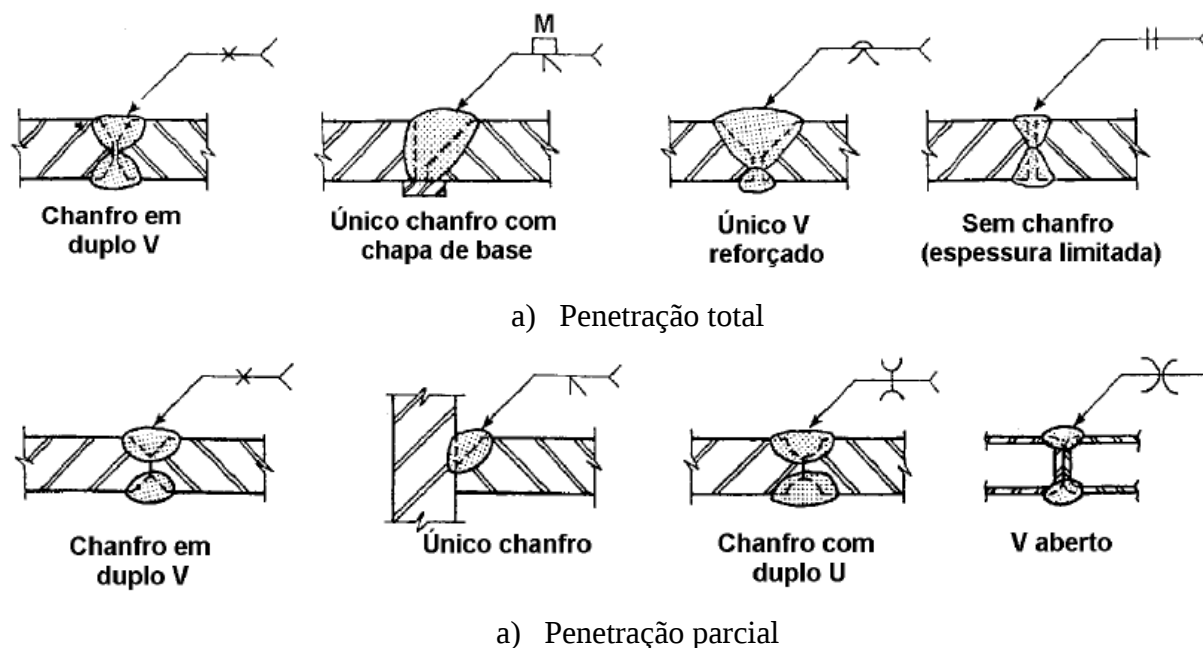
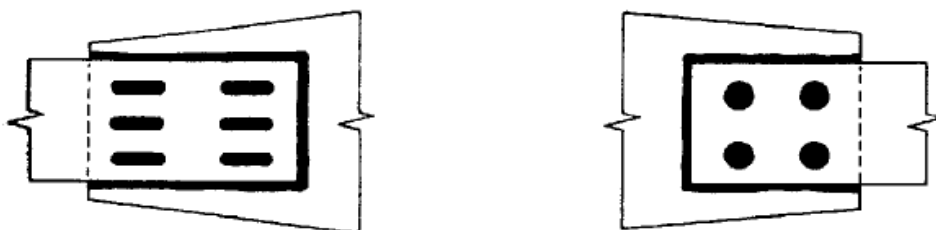


Figura 2.14 - Exemplo de soldas em chanfro. Adaptada de COOPER (1985)

Na solda de tampão, é necessário um furo para execução da solda é feita pela deposição de metal de solda em um furo circular, em uma ou duas partes sobrepostas. Deve-se preencher completamente este furo como é mostrado na Figura 2.15. Essas soldas podem ser usadas exclusivamente em uma conexão, ou elas podem ser usadas em combinação com soldas de filete. Segundo SALMON e JOHNSON (1996), a principal finalidade destas soldas é transmitir cisalhamento em uma ligação de sobreposição, quando o tamanho da conexão limita o comprimento disponível para o filete. Outro uso de indicação destas soldas é para impedir o empenamento das partes sobrepostas.



a) Solda de ranhura combinada com solda de filete b) Soda de tampão em furos combinada com solda de filete

Figura 2.15 - Exemplos de soldas em tampão. Adaptada de SALMON e JONHSON (1986)

A pesquisa de VIEIRA (2010) faz uma análise experimental do comportamento de vigas metálicas bi-apoiadas de seção transversal do tipo “I” em uma região de flexão pura. Tais vigas são resultado da união de perfis formados a frio do tipo “U” através da soldagem das almas desses perfis. Vieira (2010) ainda analisa o acréscimo de enrijecedores de borda nas mesas superiores e inferiores.

VIEIRA (2010) conclui que a presença da soldagem não interferiu de forma significativa nos resultados demonstrando que a solda, desde que feita com qualidade, pode ser utilizada sem receios pelos fabricantes de estruturas metálicas. O ganho de resistência obtido pelo acréscimo de enrijecedor de borda é significativo e apresenta uma relação custo/benefício favorável já que se ganha mais capacidade portante do que peso por metro linear de viga.

2.6. ALGUMAS REFERÊNCIAS SOBRE ESTRUTURAS DE AÇO

2.6.1. VALENCIANI (1997)

Ao analisar diferentes trabalhos científicos na área de estruturas, percebem-se estudos abrangentes dos elementos de estruturas de aço, buscando entender os fundamentos teóricos e as correspondentes adaptações que deram origem às prescrições contidas nas normas técnicas utilizadas para dimensionamento de estruturas metálicas.

A pesquisa de VALENCIANI (1997) sobre ligações em estruturas de aço descreve os alguns dispositivos de ligação, apresentando o comportamento estrutural de parafusos e a avaliação da resistência, enfatizando os tipos e as características estruturais dos conectores.

VALENCIANI (1997) diz que as ligações em estruturas metálicas são constituídas por dois tipos de componentes, a saber: a) os elementos de ligação, que são componentes que facilitam ou que permitem a transmissão dos esforços gerados na estrutura, como enrijecedores, as chapas de nó, entre outros e b) os dispositivos de ligação, que são os componentes que proporcionam a união entre os elementos de ligação e as partes da estrutura que se deseja conectar, sendo que dentre estes componentes têm-se as soldas e os conectores.

Um fator importante para uma conexão perfeita da ligação estrutural é o perfil das roscas e suas tolerâncias de fabricação, tanto para parafusos de alta resistência quanto para

parafusos comuns. Segundo VALENCIANI (1997) os parafusos estruturais se dividem em parafusos comuns e parafusos de alta resistência.

O parafuso comum, de qualidade estrutural, mais utilizado é o ASTM A307. Esses parafusos são feitos de aço de baixo carbono com uma mínima resistência à tração de 415 MPa.

Os parafusos ASTM A325 são parafusos de aço de médio carbono com tratamento térmico com alta resistência para ligações com aço estrutural, tendo um limite de escoamento de aproximadamente 560 a 630 MPa. Já os parafusos ASTM A490 são de aço-liga tratado termicamente, com um limite de escoamento de aproximadamente 790 a 900 MPa, dependendo do diâmetro.

Componentes complementares como as porcas de aços compatíveis ASTM A563 e arruelas ASTM F436 são normalmente especificadas incluindo a resistência ao desgaste por intempéries.

A (Figura 2.16) mostra a identificação dos parafusos A325 e A490.

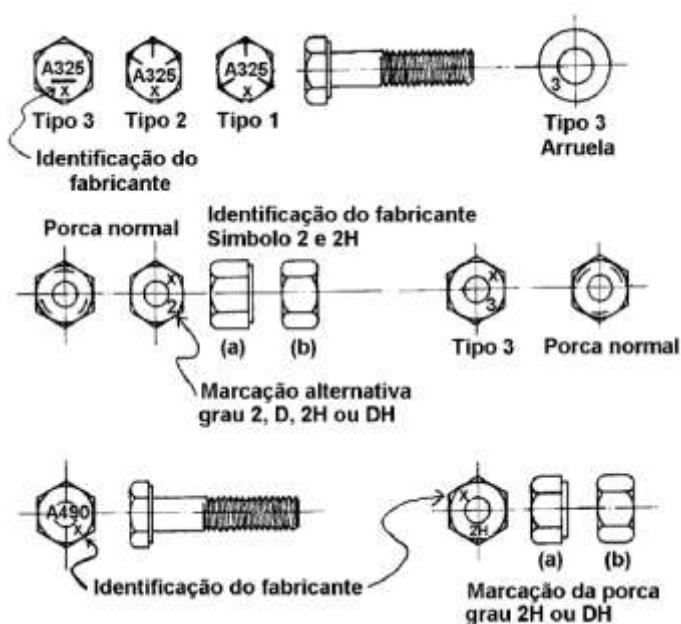


Figura 2.16 - Identificação dos parafusos A325 e A490. Fonte: VALENCIANI (1997).

Parafusos ASTM A449 são parafusos de aço carbono temperados e podem ser galvanizados a quente. Eles são ocasionalmente usados quando são necessários diâmetros acima de 38 até 76 mm (1 1/2 até 3").

De acordo com VALENCIANI (1997), esses parafusos mencionados são indicados onde a força é transmitida pelo atrito mobilizado entre as chapas (Figura 2.17) ou

onde a força é transmitida pelo contato do corpo do parafuso com a parede do furo (Figura 2.18).

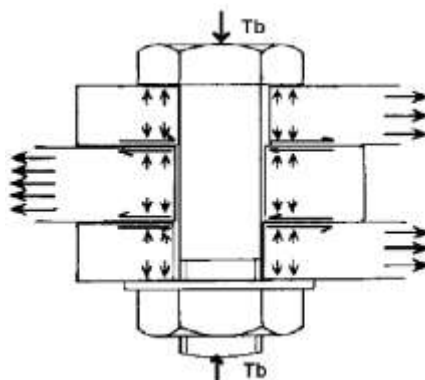
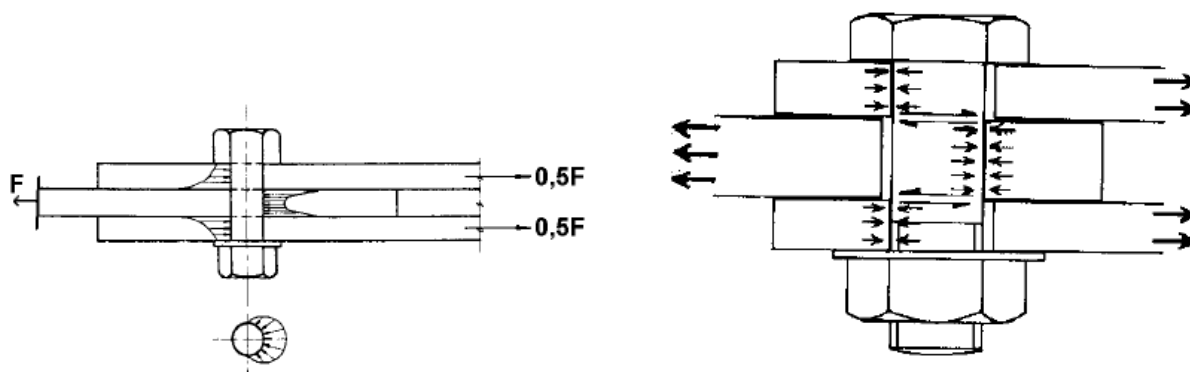


Figura 2.17 - Transmissão de esforços por atrito. Fonte: VALENCIANI (1997).



(a) Distribuição real das tensões

(b) Distribuição admitida para cálculo

Figura 2.18 - Transmissão de esforços por contato. Fonte: VALENCIANI (1997).

De acordo com RCSC (2009) quando ambas as forças atuar nas chapas de ligação sobre um parafuso, surgirá tensão de cisalhamento, e a interação pode ser convenientemente expressa como uma solução elíptica, que inclui os elementos do parafuso sobre tensão de cisalhamento com atuação de tensão no parafuso.

Ainda segundo VALENCIANI (1997) nas ligações parafusadas, cuja força resultante é perpendicular ao eixo dos parafusos, a transmissão desta força ocorre por meio de dois mecanismos: o atrito mobilizado entre as partes e o contato do corpo dos parafusos nos respectivos furos.

Analisando o comportamento resistente de uma conexão com vários parafusos alinhados (Figura 2.19), submetida a um carregamento crescente, observa-se os seguintes estágios de comportamento: a) inicialmente a força é transmitida pelo atrito mobilizado nas extremidades, não havendo deslizamentos (Figura 2.19 a); b) quando o atrito nas extremidades é vencido, ocorre o contato destes parafusos extremos na parede dos furos

(Figura 2.19 b); c) aumentando-se a força, a zona de deslizamento caminha para a porção central da conexão, até que a resistência global ao atrito seja vencida (Figura 2.19 c); d) na sequência, os parafusos e o metal base das extremidades vão sofrendo elevadas deformações e consequentemente atingindo a plastificação (Figura 2.19 d).

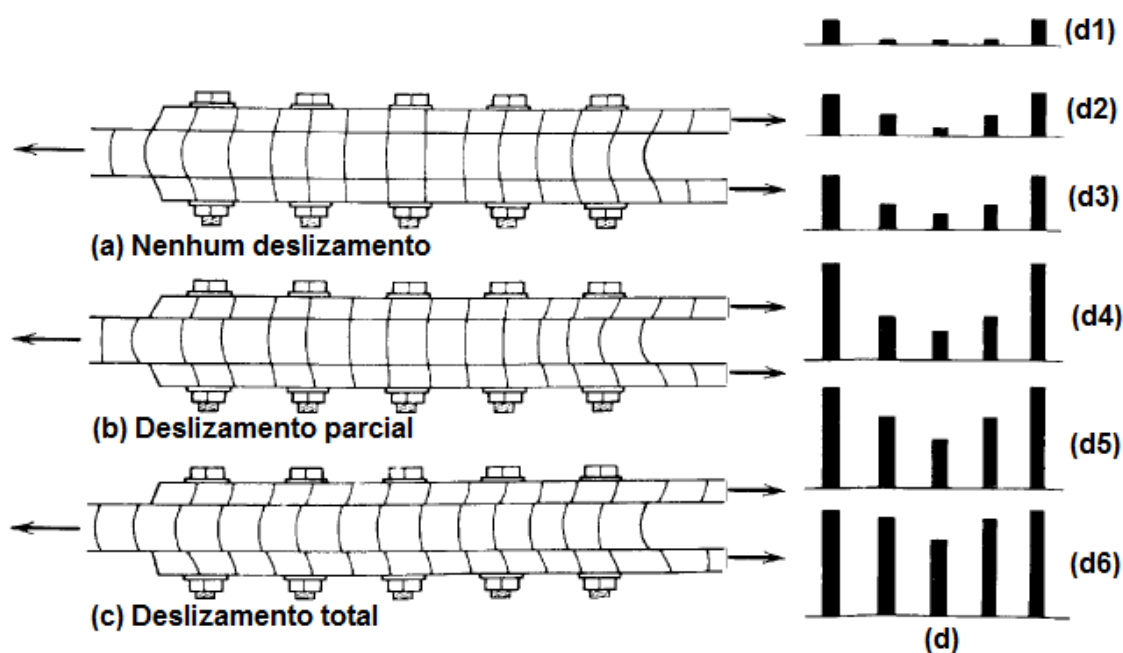


Figura 2.19 - (a), (b), (c): Representação esquemática de três estágios de carregamento numa conexão parafusada; (d1) a (d6) força cortante nos parafusos em função do estágio de carregamento. Fonte: VALENCIANI (1997).

VALENCIANI (1997) concluiu que de nada adianta projetar adequadamente as barras de uma estrutura se suas ligações são projetadas de maneira inadequada. Além de ressaltar que um projeto adequado de uma ligação consiste não somente na análise estrutural, mas também na análise de viabilidade técnico-econômica da utilização de um determinado dispositivo de ligação e do respectivo detalhe construtivo.

2.6.2. SILVA (2006)

O estudo de SILVA (2006) constituiu na realização de quatro ensaios em quatro diferentes configurações de ligações viga-coluna, agrupadas em dois grupos: sem enrijecedores e com enrijecedores de alma soldados nos flanges da coluna, estabelecendo assim parâmetros de comparação; além de diferir também as espessuras das vigas.

O esquema de montagem estabeleceu-se com a instalação de três pórticos de reação paralelamente entre si sendo equidistantes de 1,0 m entre seus planos centrais. Foram instalados dois acessórios de montagem, sendo um a placa de base e o outro a placa de topo. O primeiro foi parafusado junto à laje de reação, ao passo que o segundo foi parafusado no pórtico de reação conforme (Figura 2.20).



a) Placa de base

b) Placa de topo

Figura 2.20 - Acessórios utilizados para fixação das colunas.

Fonte SILVA (2006).

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. Destaca-se a existência de solda no reforço junto à alma da coluna da viga 03. Em seguida, em cada um dos pórticos de reação, foram instalados sistemas de aplicação de carga, assim o carregamento foi aplicado somente na viga 01 e viga 02.

Para medição de deslocamentos, foram utilizados os LVDT's (*Load Variational Displacement Transducers*) e os deflectômetros mecânicos, os LVDT's foram instalados nas vigas e no pórtico, os deflectômetros foram posicionados nas ligações e nas mesmas regiões dos LVDT's. Para medição de deformações específicas, foram utilizados extensômetros de resistência elétrica.

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.

SILVA (2006) concluiu 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 sem enrijecedor mostrou claramente a baixa resistência, caracterizada pela maior concentração de tensões nos enrijecedores da coluna.

Com a utilização de enrijecedores de alma na ligação 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.

2.6.3. ALMEIDA (2009)

A pesquisa de ALMEIDA (2009) apresentou considerações sobre perfis formados a frio, aços patináveis, processos de soldagem e o resultado de ensaios experimentais de vigas bi-apoiadas constituídas de perfis formados a frio compostas pela junção de dois perfis U enrijecidos. Também se constituiu em realizar oito ensaios de vigas à flexão simples, sendo quatro vigas fabricadas com perfis produzidos com aço USI-SAC 300 e quatro vigas fabricadas com perfis produzidos com aço CSN COR 420.

O esquema de montagem do ensaio compôs-se de vigas bi-apoiadas com o comprimento total de três metros e a distância entre os dois apoios foi de 2850 mm. As vigas estiveram sujeitas à aplicação de duas forças concentradas de mesmo valor equidistantes dos apoios, posicionadas a 950 mm de cada apoio.

As vigas ensaiadas foram compostas de dois perfis tipo U enrijecido com união de filetes de solda nas mesas superiores e inferiores, formando uma seção dupla com alma de 200 mm, mesa de 150 mm, enrijecimento de 25 mm e enrijecedores transversais com chapa de 6,3 mm de espessura, localizados nas regiões de aplicação das forças e nos apoios, conforme mostra a (Figura 2.21).

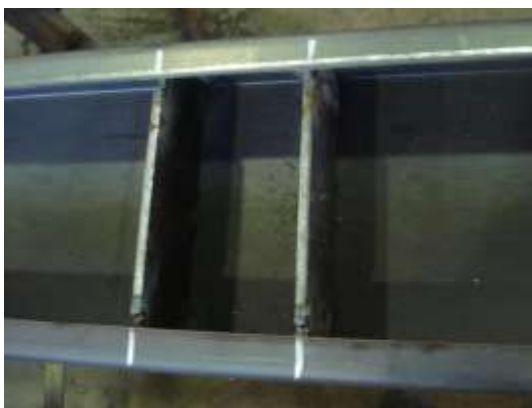


Figura 2.21 - Detalhe de montagem dos enrijecedores.

Fonte ALMEIDA (2009).

A viga foi posicionada sobre aparelhos de apoio formados por chapas metálicas e cilindros de aço simulando os apoios de 1º e 2º gênero.

Os deslocamentos verticais foram determinados através de defletores posicionados ao longo da viga em posições pré-determinadas e as deformações obtidas através de extensômetros elétricos de resistência para aço, e ficaram devidamente posicionados na mesa inferior e na mesa superior da viga.

Com a ajuda de atuador hidráulico foi aplicado o carregamento e sua intensidade verificada por uma célula de carga posicionada entre o atuador hidráulico e a viga de reação.

ALMEIDA (2009) concluiu que todas as vigas com emendas soldadas, fabricadas com aço CSN COR 420 tiveram resistência menor que a viga sem emenda soldada, fabricada com o mesmo tipo de aço. A viga com uma emenda soldada, fabricada com aço USI SAC 300, apresentou resistência maior que a viga sem emenda soldada.

Em média as vigas fabricadas com o aço CSN COR 420, apresentaram valores de força última de ruptura menor que os valores das vigas fabricadas com o aço USI-SAC 300.

Mesmo as vigas tendo uma pequena diferença nas propriedades geométricas em relação aos valores nominais, estas propriedades ficaram dentro do limite de tolerância, e seus resultados de resistência final na tensão de escoamento e na tensão de ruptura, tanto para as vigas de um tipo de aço USI-SAC 300 ou CSN COR 420.

CAPÍTULO 3

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este capítulo descreve a metodologia dos ensaios de caracterização do aço, caracterização dos parafusos e ensaios das vigas metálicas submetidas à flexão simples.

Os perfis laminados utilizados na confecção das vigas ensaiadas foram obtidos mediante o corte em peças de 3000 mm de comprimento.

Os ensaios de caracterização do aço e caracterização dos parafusos foram realizados no Laboratório de Estruturas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-Go). Os ensaios das vigas submetidas à flexão simples foram realizados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC/UFG).

3.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

3.2.1. Caracterização do aço

Os aços empregados na fabricação das vigas estudadas neste trabalho são: perfil Gerdau Aço Minas laminado com abas paralelas do tipo W 250x22,3 ASTM-A572 com especificações de acordo com a norma NBR 7007:2011, chapa Gerdau Aço Minas laminada do tipo ASTM-A36 com especificações de acordo com a norma NBR 6650:1986 e parafuso de alta resistência ASTM-A325 3/4x2". Estes aços tem o seu uso diversificado, tanto no que diz respeito à fabricação de máquinas e equipamentos quanto à estruturas. Tal fato se aplica, pois são de alta resistência mecânica e cumprem determinados parâmetros.

Para determinação das propriedades mecânicas dos materiais utilizados, foram retirados 3(três) corpos de prova da mesa do perfil, 3(três) corpos de prova da alma do perfil, 3(três) corpos de prova da chapa de ligação de e também foram confeccionados 5(cinco) corpos de provas dos parafusos. Todos os corpos de prova foram submetidos ao ensaio à

tração. Nesses ensaios foram obtidos os valores da resistência ao escoamento do aço (f_y), da resistência à ruptura do aço à tração (f_u) e o alongamento dos corpos de prova após os ensaios (Δl).

Os procedimentos utilizados nos ensaios à tração estão prescritos na norma NBR 6152:2002 - Materiais metálicos: Ensaio de tração à temperatura ambiente e os resultados são apresentados no capítulo 4. O alongamento foi medido sobre a base de medida de 50 mm.

Os ensaios à tração foram realizados em máquina universal de ensaio (DL 100000; EMIC), com capacidade máxima de 1000 kN, no Laboratório de Estruturas da Universidade Católica de Goiás como mostra a (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Máquina DL100000 EMIC

Os corpos de prova de aço foram retirados da mesa e da alma do perfil e também da chapa de ligação. Os corpos de prova dos parafusos foram confeccionados utilizando a cabeça do parafuso que foi retirada e abrindo rosca no local da cabeça do parafuso mantendo o seu comprimento original, e esta rosca foi fixada em duas buchas, uma na parte superior e outra na parte inferior.

A nomenclatura adotada para estes corpos de prova está indicada na Tabela 3.1

Tabela 3.1 - Nomenclatura dos corpos de prova para ensaio à tração do aço

Corpo de prova	Nº de corpo de prova	Tipo de aço
CPCA	03	ASTM-A572
CPCM	03	ASTM- A572
CPCL	03	ASTM- A36
CPPA	05	ASTM- A325

CPCA: corpo de prova da chapa da alma; CPCM: corpo de prova da chapa da mesa; CPCL: corpo de prova da chapa da ligação; CPPA: corpo de prova do parafuso.

Os corpos de prova foram retirados de três chapas de aço antes da operação de montagem (aço virgem) sendo estas chapas com espessuras de 6,30 mm (chapa da ligação) 5,80 mm (chapa da alma) e 6,90 mm (chapa da mesa); respectivamente. Para cada chapa três corpos-de-prova foram retirados, num total de 9 corpos de prova. As dimensões nominais para esses corpos de prova estão indicadas na Figura 3.2.

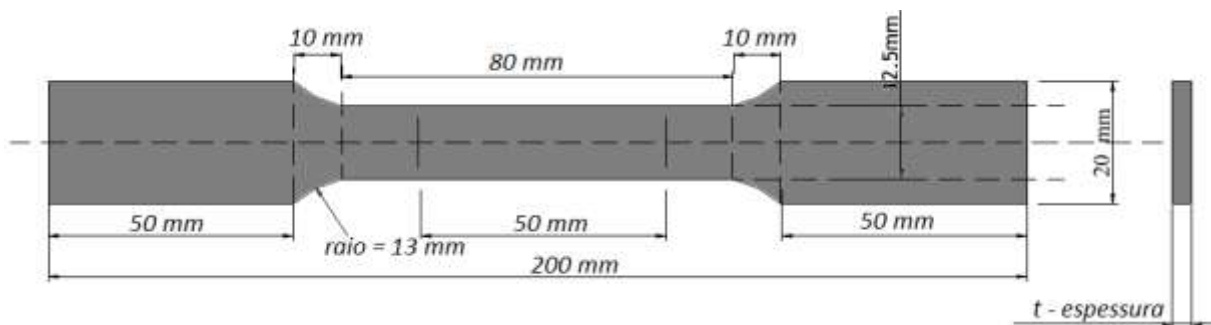


Figura 3.2 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração

A Figura 3.3 apresenta as imagens dos corpos de prova prontos para ensaio à tração, inclusive um corpo de prova de cada chapa já ensaiado e os corpos de prova dos parafusos antes de serem ensaiados.



Figura 3.3 - Corpos de prova de aço e corpos de prova dos parafusos

3.3. CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS ENSAIADOS

3.3.1. Dimensão das peças

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram confeccionadas oito vigas com 3000 mm de comprimento sendo dois perfil Gerdau Aço Minas laminado com abas paralelas do tipo W 250 x 22,3 ASTM-A572 com altura de 250 mm, espessura da chapa da alma de 5,8 mm e de espessura da chapa da mesa de 6,9 mm.

Em todas as vigas que continham ligações, foram utilizados parafusos de alta resistência ASTM-A325 19 x 50,8 mm, porca sextavada 19 mm com 10 fios de rosca e arruela lisa 19 x 44 x 2,0 mm. A chapa de ligação utilizada possuía 6,3 mm de espessura onde se executou furos com medidas padronizadas para fazer a inserção dos parafusos segundo com a NBR 8800:2008.

A nomenclatura dos modelos analisados foi definida como: viga de referência (VREF1, VREF2); viga com uma ligação à direita ou à esquerda (V1LD, V1LE); viga com uma ligação central (V1LM); viga com ligação central e uso de enrijecedores (V1LME); viga com duas ligações (V2L); e viga com três ligações (V3L), tais vigas foram produzidas pela empresa Metal Eng.

As vigas VREF1 e VREF2 não contém nenhuma ligação e são de referência para os ensaios, a viga V1LD contém uma emenda a um terço do apoio da direita, a viga V1LE contém uma emenda a um terço do apoio da esquerda, a viga V1LM contém uma emenda no meio do vão e não tem enrijecedor e a viga V1LME contém uma emenda no meio do vão e tem enrijecedor nas extremidades e a 750 mm da extremidade da direita e a 750 mm da extremidade da esquerda, a viga V2L contém uma emenda a 1000 mm da extremidade da direita e uma emenda a 1000 mm da extremidade da esquerda e a viga V3L contém uma emenda no meio do vão, uma emenda a 750 mm da extremidade da esquerda e uma emenda a 750 mm da extremidade da direita.

As Figuras de 3.4 a 3.10 ilustram o detalhamento das vigas com as posições das ligações e enrijecedores.

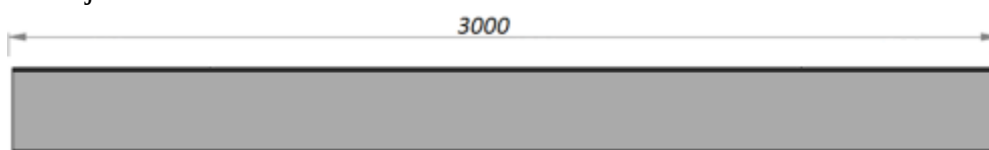


Figura 3.4 - Viga de referência sem emenda (VREF1, VREF2)

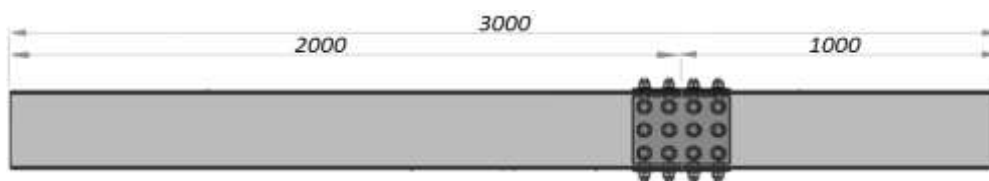


Figura 3.5 - Viga com uma ligação à direita

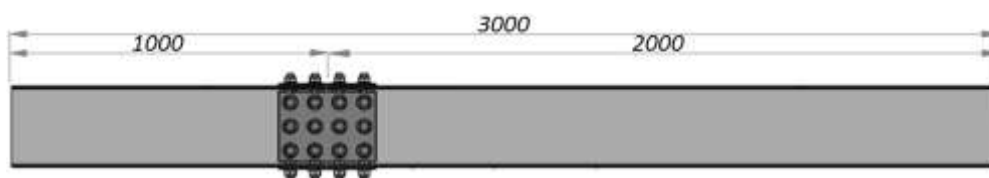


Figura 3.6 - Viga com uma ligação à esquerda

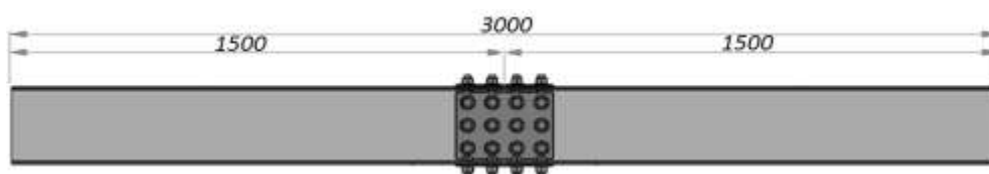


Figura 3.7 - Viga com uma ligação central

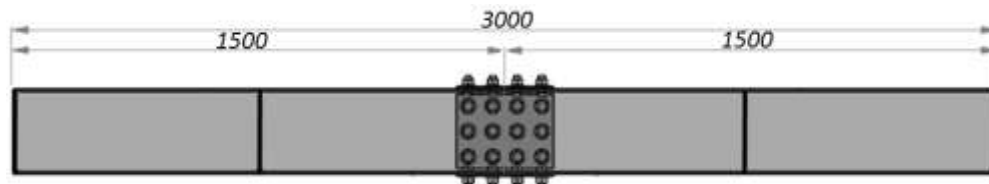


Figura 3.8 - Viga com uma ligação central e uso de enrijecedores

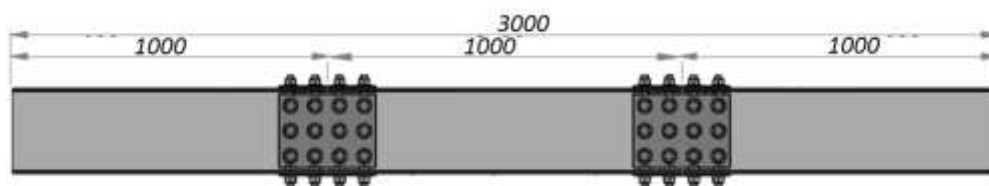


Figura 3.9 - Viga com duas ligações

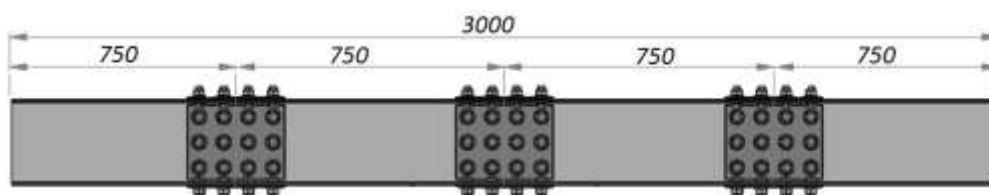


Figura 3.10 - Viga com três ligações

3.4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para execução dos ensaios de flexão simples nas vigas deste estudo primeiramente foi realizado a montagem das vigas que continham ligações, para tanto foi utilizado um torquímetro da marca Gedore com 620 mm de comprimento e aplicado um torque de 157 N m em cada parafuso. A Figura 3.11 mostra a aplicação do torque em um parafuso.

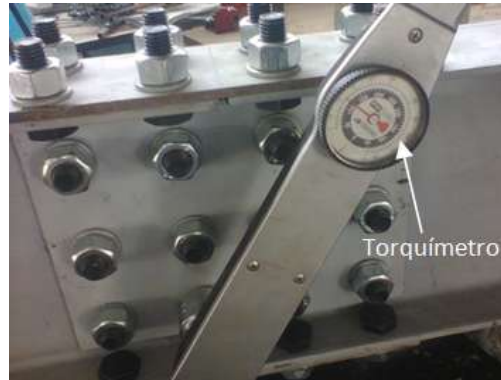


Figura 3.11 - Uso do torquímetro para fixar os parafusos

3.4.1. Instrumentação

A instrumentação antecede a execução dos ensaios e foram utilizados extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*) para aço da marca EXCEL que medem deformações. Os extensômetros ficaram devidamente posicionados nas chapas de ligação, na mesa comprimida, na mesa tracionada e na alma da viga conforme indica as Figuras 3.12 a 3.14.

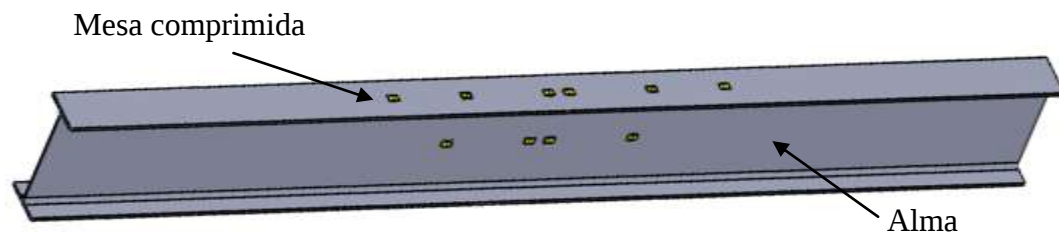


Figura 3.12 - Posicionamento dos extensômetros na mesa comprimida e alma

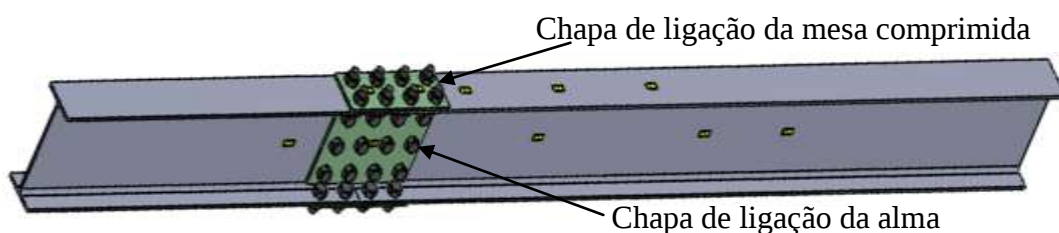


Figura 3.13 - Posicionamento dos extensômetros chapa de ligação da mesa comprimida e alma

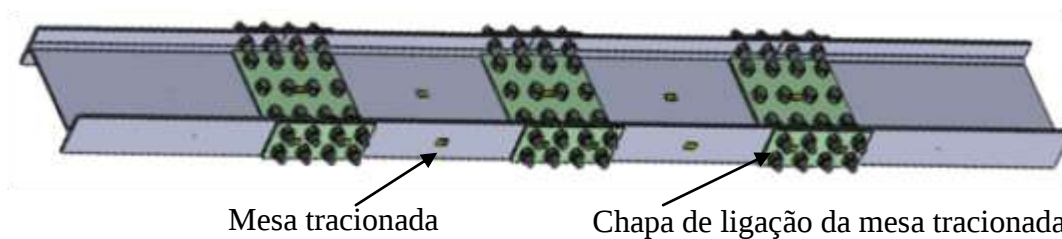


Figura 3.14 -Posicionamento dos extensômetros chapa de ligação da mesa comprimida e alma

A operação de instalação dos extensômetros seguiu as seguintes etapas: soldagem dos fios do tipo cabo eletrônico CCI nos terminais dos extensômetros; preparação da superfície da viga utilizando lixa; limpeza da superfície com álcool isopropílico, condicionador e neutralizador; colagem do extensômetro utilizando cola cianoacrilato; isolamento com fita para evitar contato dos terminais com as barras e aplicação da proteção mecânica com fita isolante.

3.4.2. Esquema de ensaio

O esquema estático das vigas simula uma viga bi-apoiada, onde cada viga ensaiada tinha um comprimento total de 3000 mm, foi deixada uma folga de 75 mm entre o eixo do apoio e a extremidade da viga, sendo assim, o vão livre entre os apoios foi de 2850 mm.

As vigas foram sujeitas à aplicação de duas forças concentradas de mesma intensidade equidistantes dos apoios, posicionadas a 1220 mm de cada apoio. Justifica-se o fato da distância de 1220 mm de cada apoio ser definida, tendo em vista a padronização e evitar que as forças concentradas fossem aplicadas diretamente sobre as emendas das vigas posicionadas a um terço dos apoios. A Figura 3.15 mostra um sistema esquematizado de ensaio das vigas.

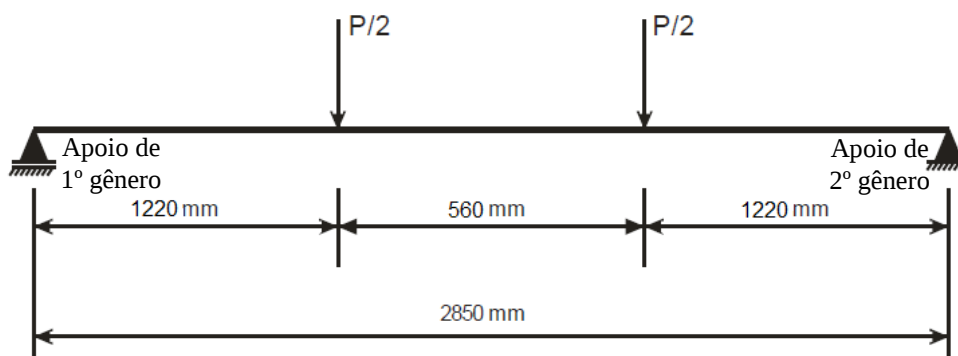


Figura 3.15 - Esquema de aplicação das forças

Foram utilizados aparelhos de apoio formados por chapas metálicas e cilindros de aço simulando os apoios de 1º e 2º gênero. A Figura 3.16 mostra os aparelhos de apoio. O apoio tipo (a) simula um apoio do 1º gênero, o qual permite deslocamento horizontal e rotação em torno do eixo longitudinal do cilindro de apoio, enquanto o apoio tipo (b) simula um apoio do 2º gênero, restringindo os deslocamentos e permitindo a rotação em torno do eixo longitudinal do cilindro de apoio. Estes aparelhos de apoio foram posicionados sobre blocos rígidos.



a) Apoio de 1º gênero



b) Apoio de 2º gênero

Figura 3.16 - Apoios de primeiro e segundo gênero

Para aplicação da carga concentrada foi utilizada uma viga de transição apoiada sobre a viga ensaiada, isto para obter uma divisão da intensidade da força P aplicada em duas forças iguais a $P/2$ como mostra na Figura 3.17.



Figura 3.17 - Viga de transmissão das forças apoiada sobre a viga ensaiada

O carregamento foi aplicado com a ajuda de atuador hidráulico da marca (*Yellow Power*) com capacidade de 500 kN, e sua intensidade foi verificada por uma célula de carga posicionada entre o atuador hidráulico e a viga de reação. O registro dos dados se deu por meio de sistema de aquisição de dados, apresentado por meio da Figura 3.18.



Figura 3.18 - Sistema de aquisição de dados dos extensômetros (Agilent)

Após o posicionamento final da viga foram instalados relógios comparadores para medir os deslocamentos verticais. Foram utilizados relógios com precisão de 0,01 mm e leitura máxima de 50 mm, como mostrados na Figura 3.19.

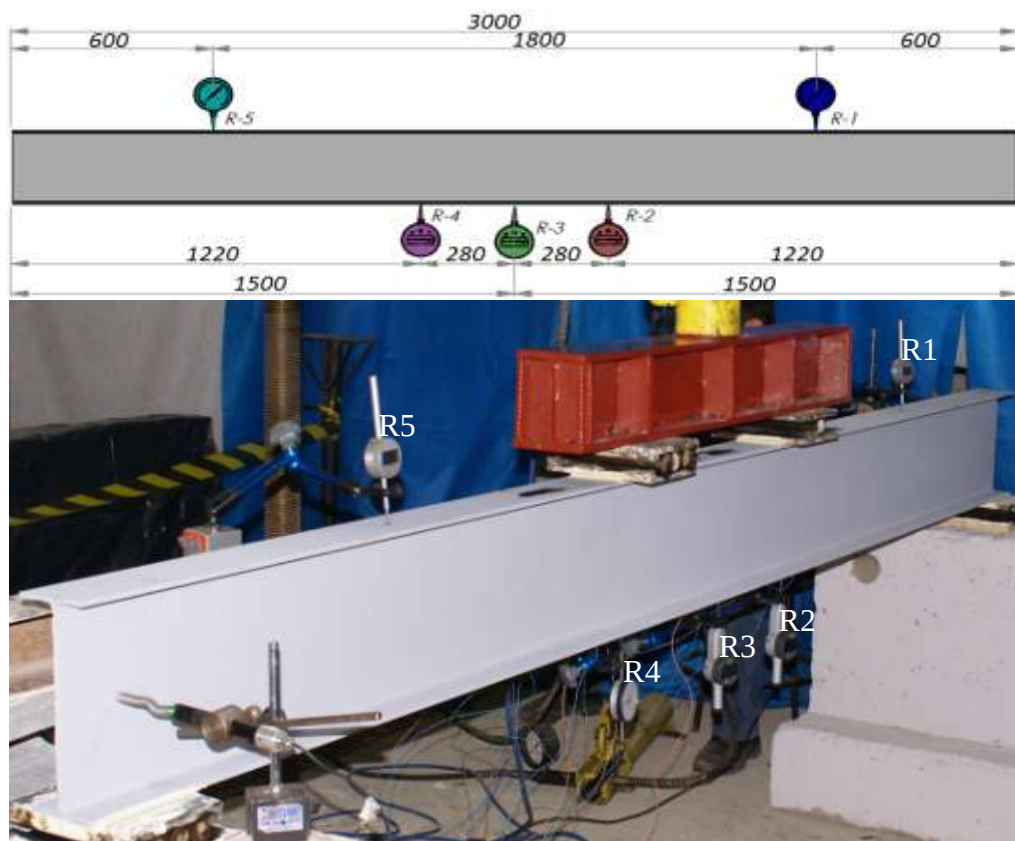


Figura 3.19 - Posicionamento dos relógios

Com o objetivo de verificar o deslocamento lateral da mesa superior e a rotação da seção transversal na viga foram instalados LVDT's (*linear variable differential transformer*) na alma da viga a 75 mm da extremidade da viga, em cima do apoio de 1º gênero e 2º gênero, posicionados de acordo com a Figura 3.20.

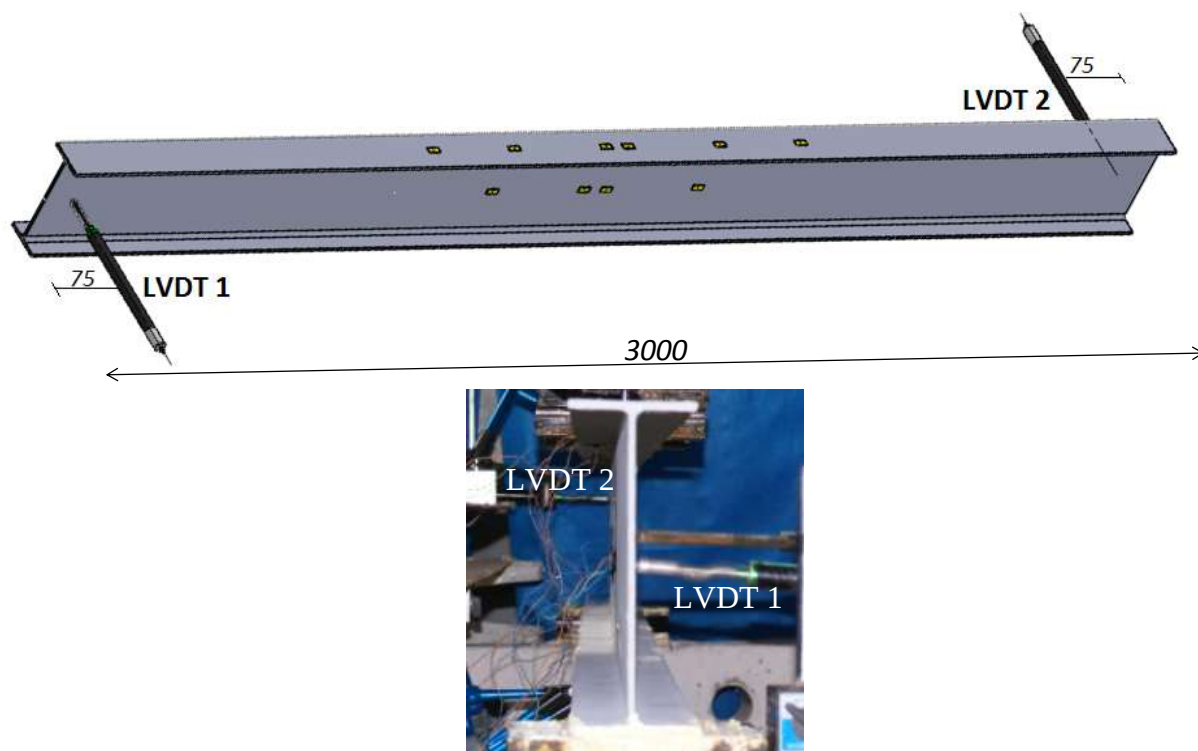


Figura 3.20 - Posicionamento dos LVDT's

3.5. SISTEMA DE ENSAIO

O método de montagem do ensaio foi desenvolvido para que todos os ensaios fossem padronizados sendo dividido na seguinte sequência de etapas: instalação dos aparelhos de apoio, posicionamento da viga, instalação dos aparelhos de apoio da viga de transmissão, posicionamento da viga de transmissão, posicionamento do atuador hidráulico, posicionamento da célula de carga, verificação do prumo; marcação e posicionamento dos aparelhos medidores.

Foram fixadas as chapas metálicas e os aparelhos de apoios com gesso tipo alfa de alta resistência mecânica a fim de garantir que as chapas metálicas ficassem niveladas para o posicionamento das vigas. Após a cura do gesso pedra, a viga foi transportada manualmente até o local de execução dos ensaios, sendo posicionada previamente sobre os apoios. Em seguida posicionaram-se as chapas metálicas que apoiam a viga de transmissão das forças e sobre a viga de transmissão posicionou-se o atuador hidráulico no centro da viga.

Para um melhor posicionamento da célula de carga foi colocado uma chapa metálica sobre o atuador hidráulico e sobre a célula de carga. Com isso o esquema de ensaio foi travado para a montagem dos aparelhos de medição.

As vigas foram fixadas com nível e prumo, foi feita a marcação e instalação dos relógios, LVDT's (*linear variable differential transformer*). Os extensômetros foram conectados ao aparelho transdutor e ao computador, sendo realizada uma leitura teste de todos os equipamentos de medição.

O início do ensaio foi executado observando um passo de carga previamente estabelecido de 10 kN. A cada execução do devido passo de carga foi anotada a carga atuante, a leitura dos extensômetros através do computador e as leituras dos deflectômetros foram registradas em uma planilha eletrônica até o término do ensaio. A Figura 3.21 ilustra todo o aparato experimental.

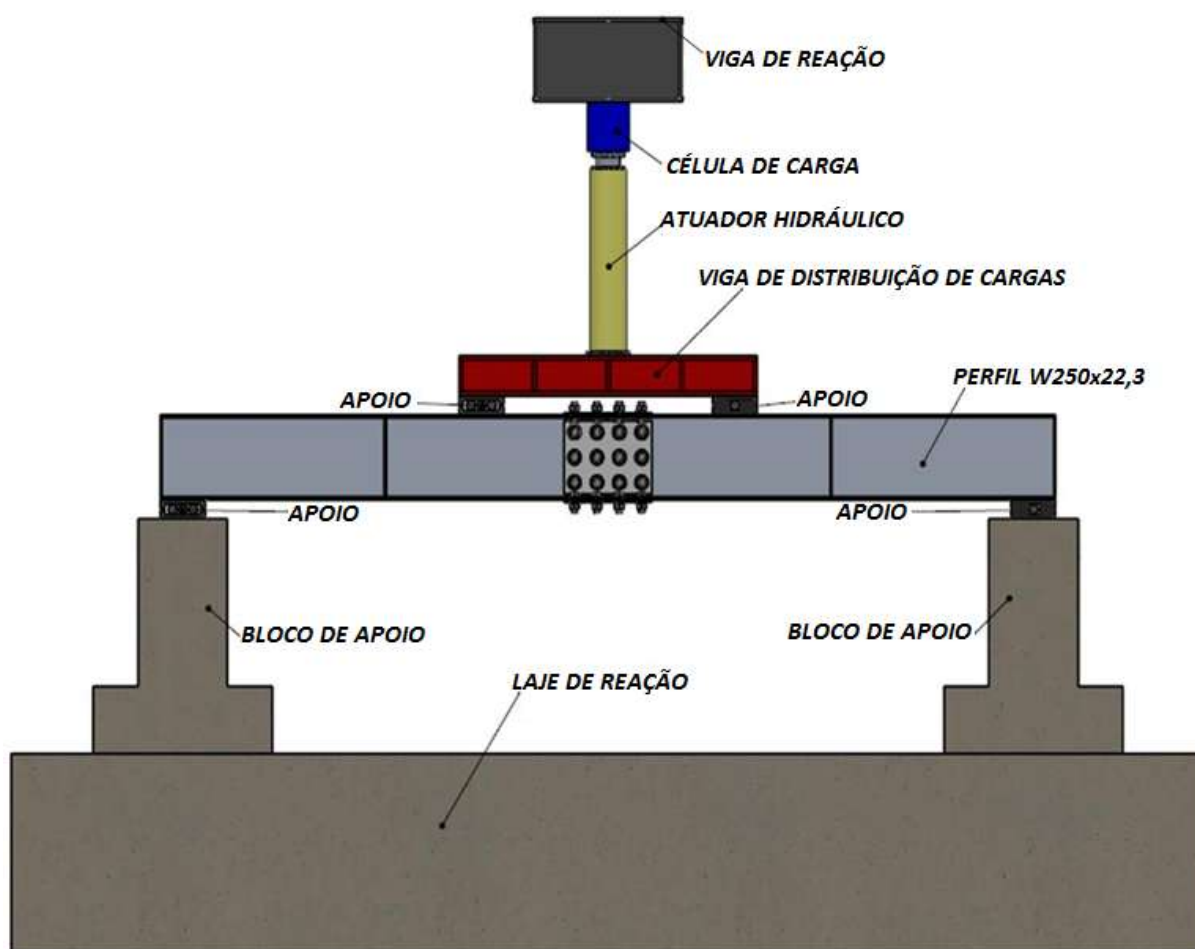


Figura 3.21 - Ilustração do esquema montado para o ensaio dos modelos das vigas

CAPÍTULO 4

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos corpos de prova de aço, corpo de prova dos parafusos e ensaios de viga à flexão simples, bem como todos os resultados das peças submetidas aos ensaios descritos no capítulo 3. Também são apresentados os modos de ruptura, cargas de ruptura deslocamentos verticais e deformações da viga submetida à flexão simples.

4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

4.1.1. Ensaio de tração dos corpos de prova de aço

Foram realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade Católica de Goiás, os ensaios para caracterização do aço, dessa forma todos os corpos de prova submetidos à tração. A Tabela 4.1 apresenta as propriedades mecânicas dos aços da chapa de ligação ASTM-A36 e do perfil que foi confeccionado as vigas que foram ensaiadas neste trabalho.

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas nominais do aço ASTM-A36 e ASTM-A572

Aço	Limite de Escoamento (MPa) mín	Limite de Resistência à tração (MPa) mín	Alongamento mín após a Ruptura
ASTM-A36	250	400 - 560	23
ASTM-A572	345	450 mín	21

Os resultados obtidos na realização dos ensaios de caracterização do aço da chapa de ligação e do aço dos perfis laminados de abas paralelas estão apresentados nas Figuras 4.1 a 4.3 e na Tabela 4.2. Nesses ensaios foram obtidas a resistência ao escoamento do aço (f_y) e resistência à ruptura do aço à tração (f_u).

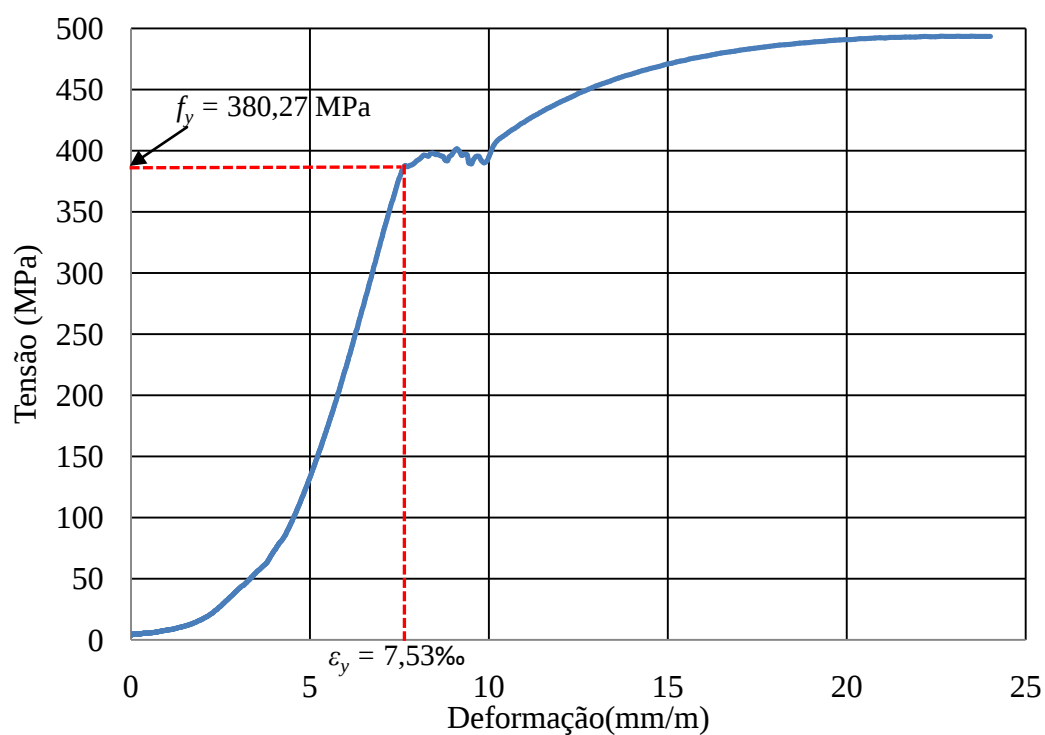


Figura 4.1 - Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração do aço da chapa da mesa

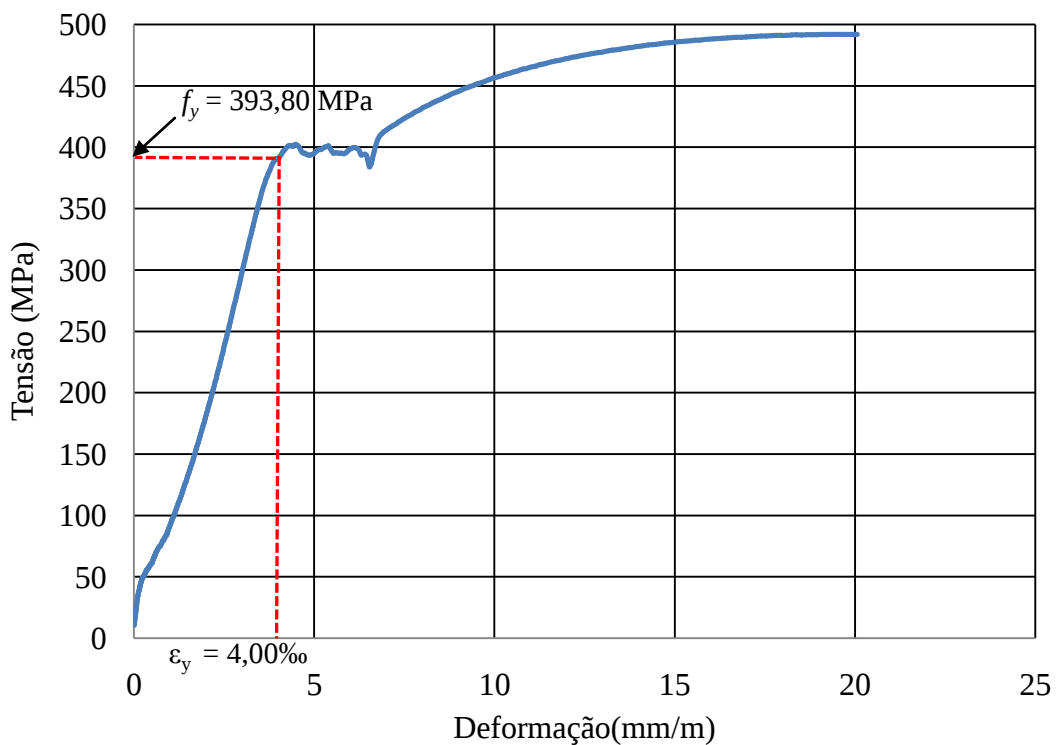


Figura 4.2 - Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração do aço da chapa da alma

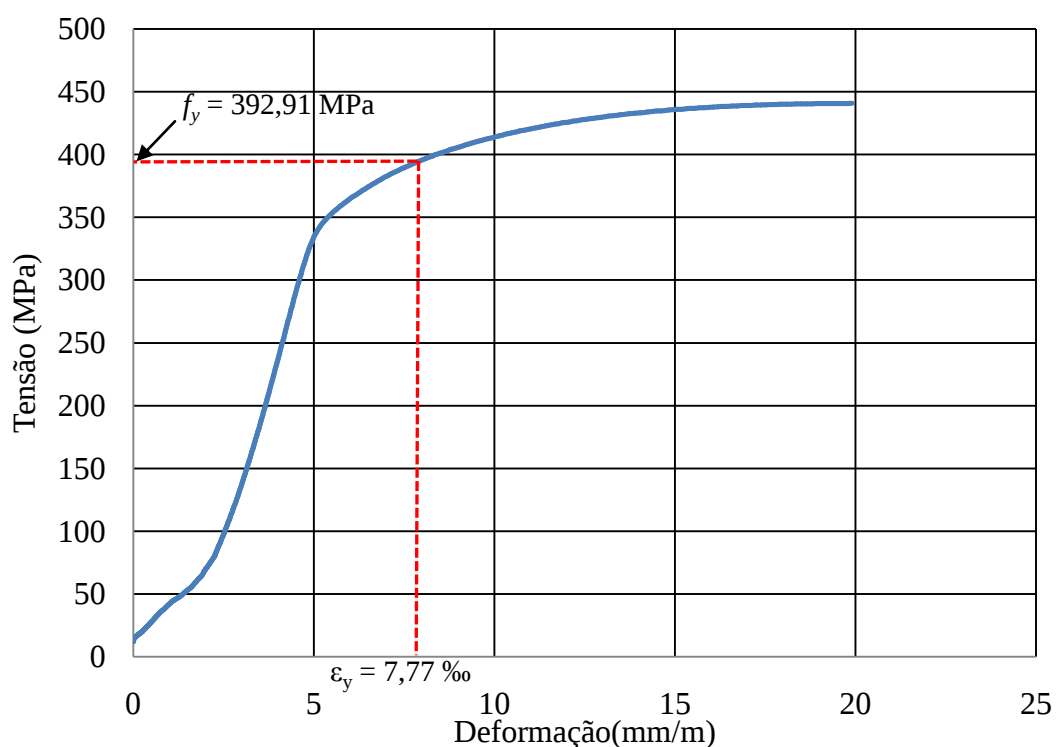


Figura 4.3 - Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração do aço da chapa de ligação

Tabela 4.2 - Resultados obtidos na realização dos ensaios de caracterização do aço

Corpo de prova	Tipo de aço	f_y (MPa)	ϵ_y (mm/m)	f_u (MPa)	ϵ_u (mm/m)
CPCM	ASTM-A572	380,27	4,00	493,49	24,02
CPCA	ASTM-A572	393,80	7,53	491,87	20,06
CPCL	ASTM-A36	392,91	7,77	440,69	19,90
f_y : Resistência ao escoamento ; f_u : Resistência à ruptura; ϵ_y : Deformação de início de escoamento; ϵ_u : Deformação final.					

A (Figura 4.4) apresenta o corpo de prova de aço no momento do ensaio.



Figura 4.4 - Fotografias do corpo de prova de aço no momento do ensaio

Os valores experimentais dos limites de escoamento e ruptura são resultados da média aritmética entre os resultados apresentados na Tabela 4.2. Os valores referentes à deformação específica correspondente à resistência ao escoamento do aço (f_y) foram obtidos considerando o módulo de elasticidade do aço igual a $E = 200000$ MPa. A Figura 4.5 mostra um corpo de prova do aço após o ensaio, mostrando o seu modo de ruptura.



Figura 4.5 - Modo de ruptura do corpo de prova do aço no ensaio à tração

Nos ensaios à tração dos corpos de prova de aço da mesa do perfil, à resistência à ruptura do aço à tração (f_u) consistiu de 493,49 MPa, sendo uma maior tensão obtida em relação aos outros corpos de prova que foram de 491,87 MPa para os corpos de prova de aço da alma e 440,69 MPa para os corpos de prova de aço da ligação.

4.1.2. Ensaio de tração dos corpos de prova dos parafusos

A Figura 4.6 apresenta corpo de prova dos parafusos no momento do ensaio.



Figura 4.6 - Fotografias do corpo de prova do parafuso no momento do ensaio

Os resultados obtidos pelo ensaio à tração dos corpos de prova dos parafusos estão apresentados na Figura 4.7 e na Tabela 4.3. Nesses ensaios foram obtidas a resistência ao escoamento do aço (f_y) e resistência à ruptura do aço à tração (f_u).

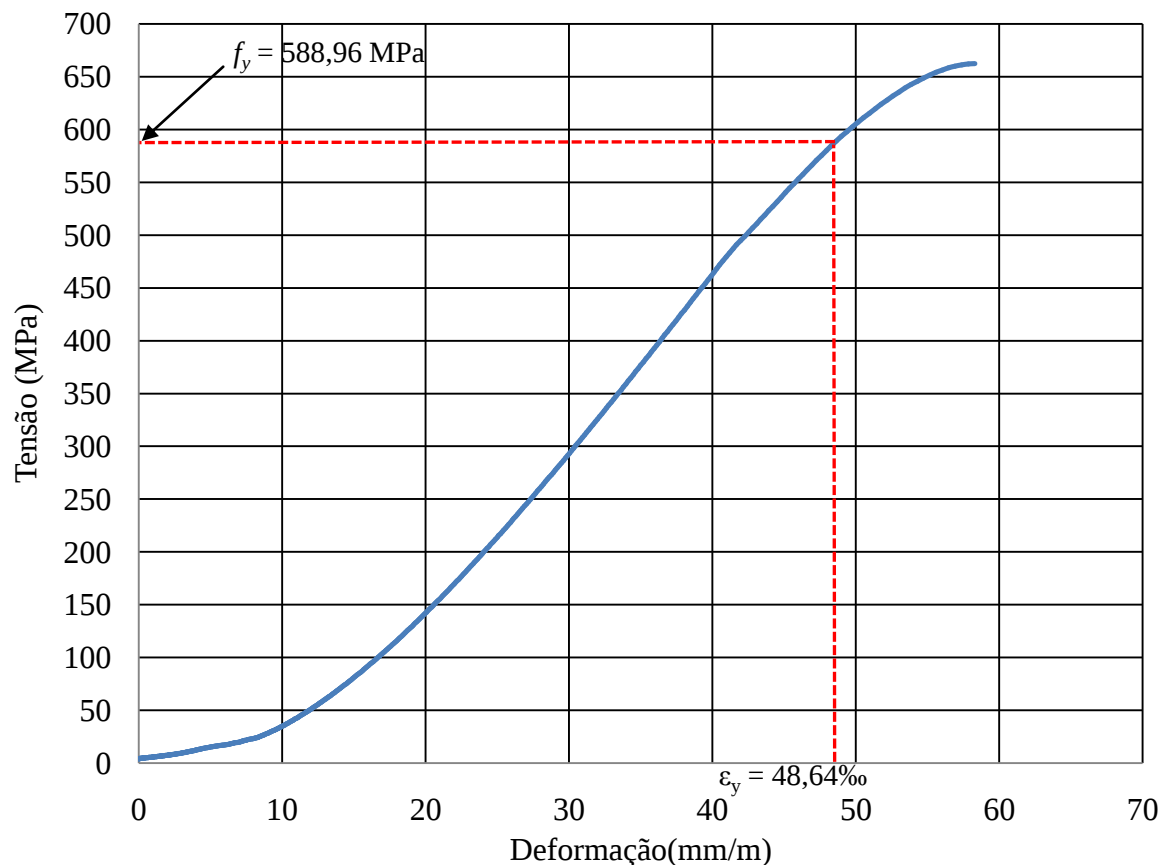


Figura 4.7 - Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração do aço dos parafusos

Tabela 4.3 - Resultados obtidos na realização dos ensaios de caracterização dos parafusos

Corpo de prova	Tipo de aço	f_y (MPa)	ϵ_y (mm/m)	f_u (MPa)	ϵ_u (mm/m)
CPPA	ASTM-A325	588,96	48,64	645,98	58,30
f_y : Resistência ao escoamento; f_u : Resistência à ruptura; ϵ_y : Deformação de início de escoamento; ϵ_u : Deformação final.					

Os corpos de prova dos parafusos tiveram uma resistência à ruptura do aço à tração (f_u) de 645,98 MPa como foi mostrado na Tabela 4.3. A Figura 4.8 apresenta um corpo de prova do parafuso após o ensaio, apresentando o seu modo de ruptura.



Figura 4.8 - Modo de ruptura do corpo de prova do parafuso no ensaio à tração

4.2. ENSAIO DAS VIGAS À FLEXÃO SIMPLES

As propriedades geométricas das vigas constituídas de perfis tipo I laminados com abas paralelas e seção W 250x22,3 ASTM-A572 são especificados na Tabela 4.4 e os dados fornecidos pela Gerdau Aço Minas, com especificações de acordo com a norma NBR 7007:2011 estão apresentados nesse item, e se referem aos ensaios experimentais realizados com seção das vigas, onde d é a altura total da seção transversal, h é a altura interna da alma, d' é a altura livre da alma, t_f é a espessura da mesa ou abas, t_w é a espessura da alma, b_f é a largura das mesas ou abas e R é o raio. Esta medidas em milímetro estão representadas na Figura 4.9.

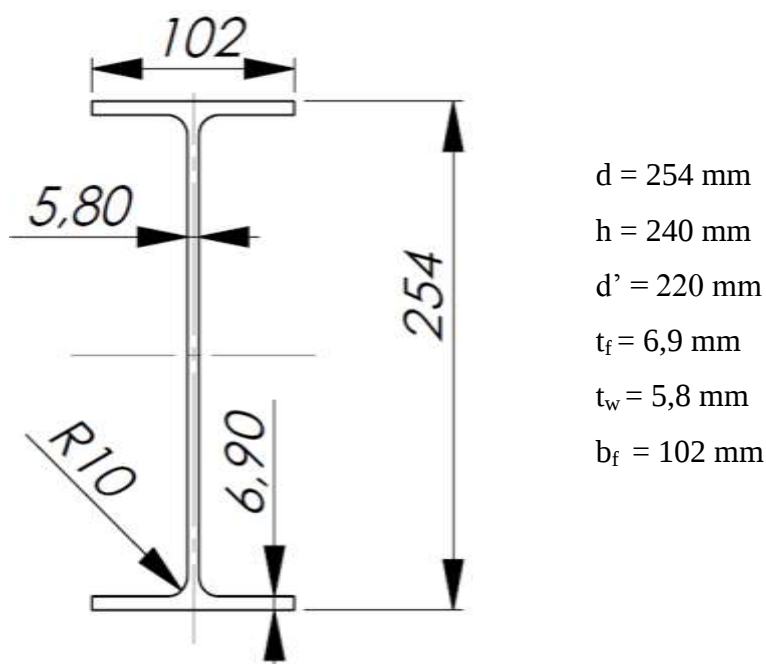


Figura 4.9 - Seção dos perfis ensaiados

Tabela 4.4 - Propriedades geométricas da seção transversal das vigas estudadas

Vigas ensaiadas – Ensaio Experimental									
		Eixo X			Eixo Y				
Vigas	A	I_x	W_x	r_x	I_y	W_y	r_y	I_t	C_w
Dimensões (mm)	(cm ²)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)	(cm ⁴)	(cm ⁶)
	28,9	2.939	231,4	10,09	123	24,1	2,06	4,77	18.629

Nos ensaios realizados foram determinados os valores correspondentes à carga última obtida, os deslocamentos, as deformações ocorridas e o comportamento geral das vigas ensaiadas, portanto, neste item estes resultados são apresentados na seguinte ordem: modos e cargas de ruptura, deslocamentos verticais, deformações específicas e deslocamentos relativos.

4.2.1. Modos e cargas últimas

Explica-se a força última ($P_{\text{último}}$), onde é aquela força na qual se verifica a ruína total ou parcial da viga. Nessa fase ocorre o estado limite de resistência do aço, uma vez que a viga não resiste mais aos esforços a ela transmitidos pelo sistema de aplicação de cargas.

Nos ensaios das vigas submetidas a flexão simples adotou-se como força última aquela para a qual se verificou a instabilidade da viga, plastificação das mesas, deslocamento verticais das vigas e torção lateral das vigas provocando a ruína total ou parcial do conjunto ensaiado. A Tabela 4.5 mostra resultados da carga última e modos de falhas das vigas ensaiadas.

Tabela 4.5 - Resultados e modos de falhas das vigas ensaiadas

Vigas	Número de emendas	P_u (kN)	Modo de falha
VREF1	-	135,00	FLM / FLT
VREF2	-	171,25	FLM / FLT
V1LD	1	138,00	FLM / FLT
V1LE	1	140,00	FLM / FLT
V1LM	1	135,00	FLM / FLT
V1LME	1	133,50	FLM / FLT
V2L	2	145,20	FLM / FLT
V3L	3	126,40	FLM / FLT

As vigas com ligações parafusadas apresentaram um bom comportamento em suas emendas, pois não mostraram nenhum modo de ruptura em parafusos de forma que comprometesse as ligações.

O modo de falha previsto para todas as vigas ensaiadas consistiu em flambagem lateral com torção (FLT), mas todas as vigas também apresentaram flambagem local da mesa comprimida (FLM).

A flambagem local da mesa é um modo de falha onde a viga perde sua posição original e não mais pode ser aplicada carga pelo sistema de ensaio, caracterizando a sua ruína como consequência. No caso de estado limite último de FLT, o deslocamento lateral e o giro excessivos são tomados como limites para o fim do carregamento, chegando ao valor da carga de ruptura (P_u). Os modos de falhas e carga de ruptura de todas as vigas ensaiadas são mostrados nas Figuras 4.10 a 4.17.

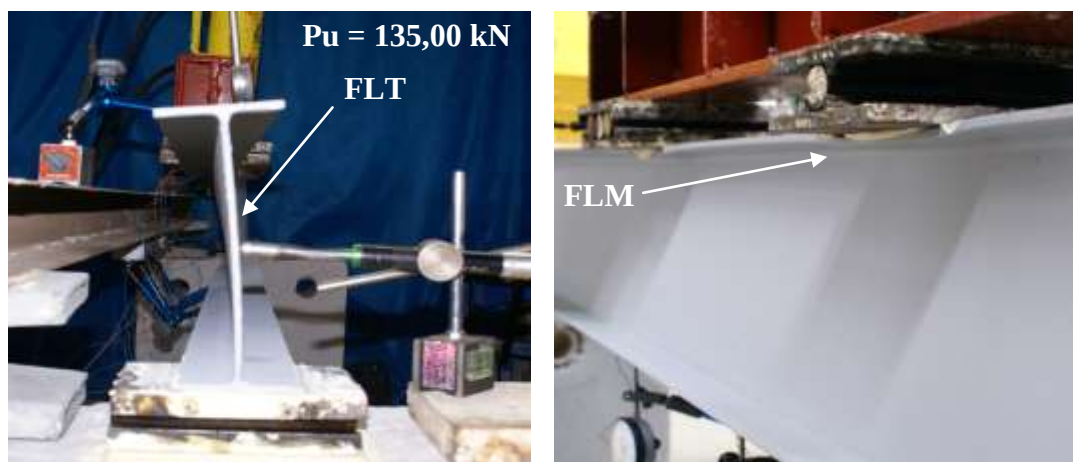


Figura 4.10 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga VREF1

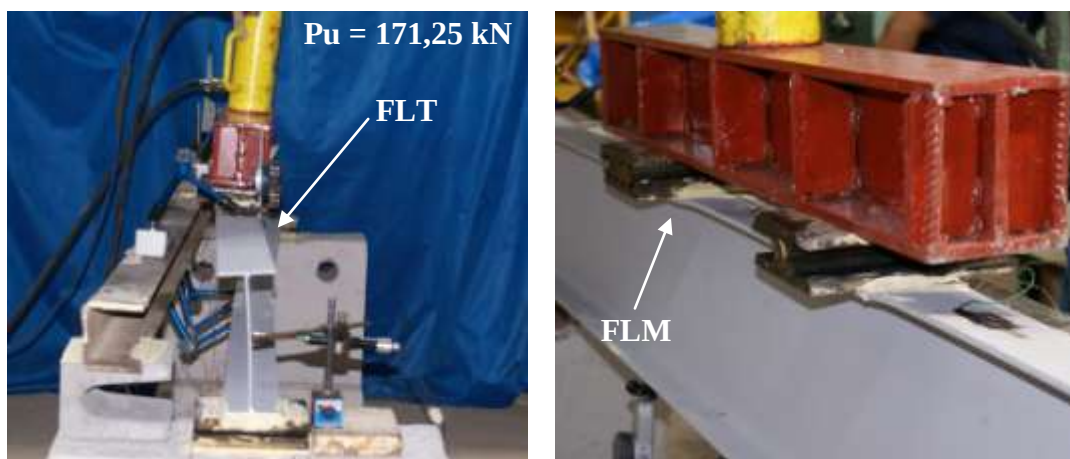


Figura 4.11 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga VREF2

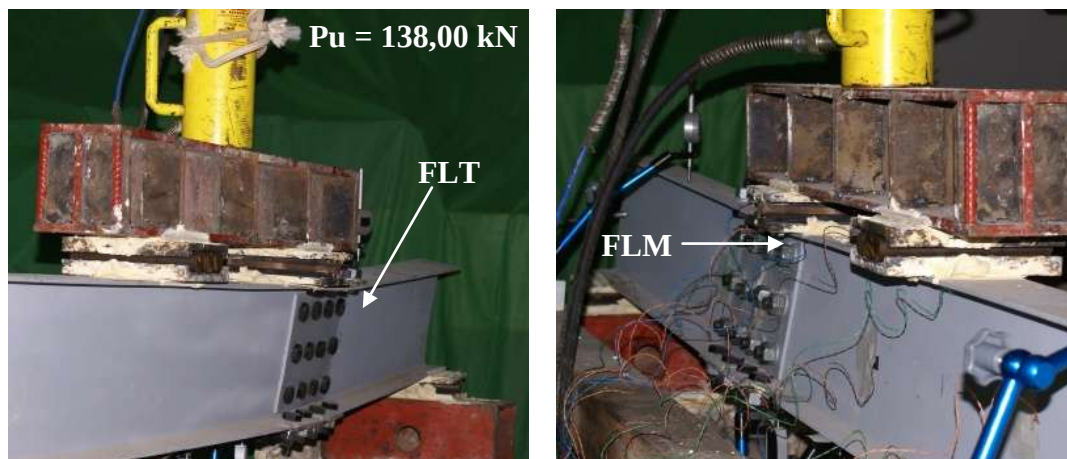


Figura 4.12 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga V1LD

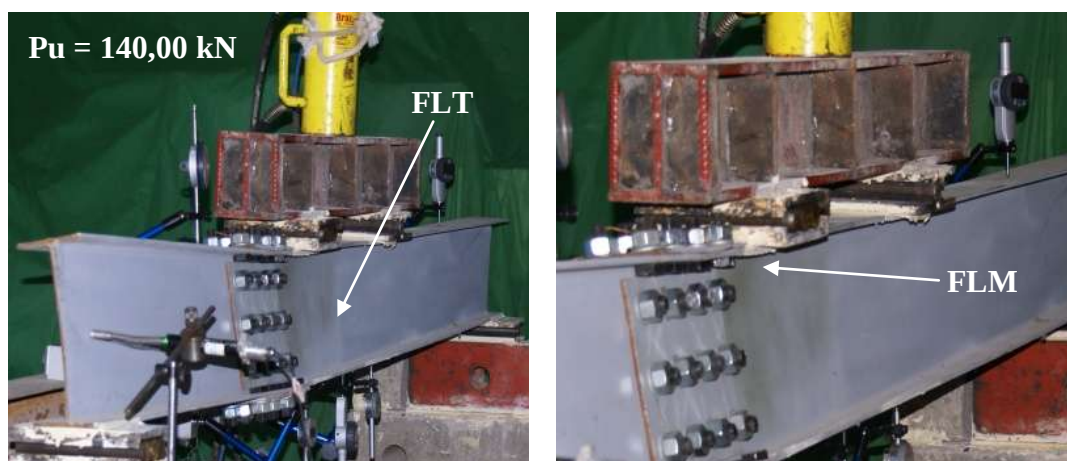


Figura 4.13 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga V1LE

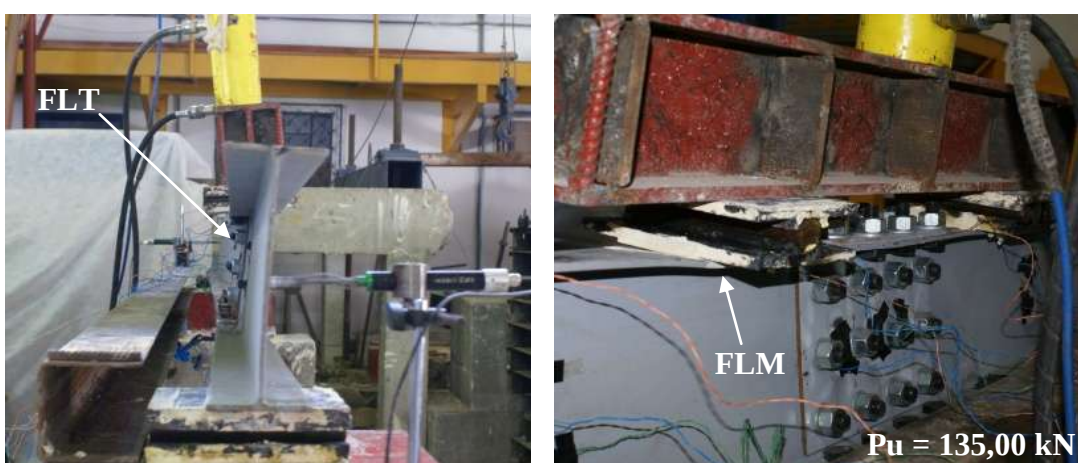


Figura 4.14 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga V1LM

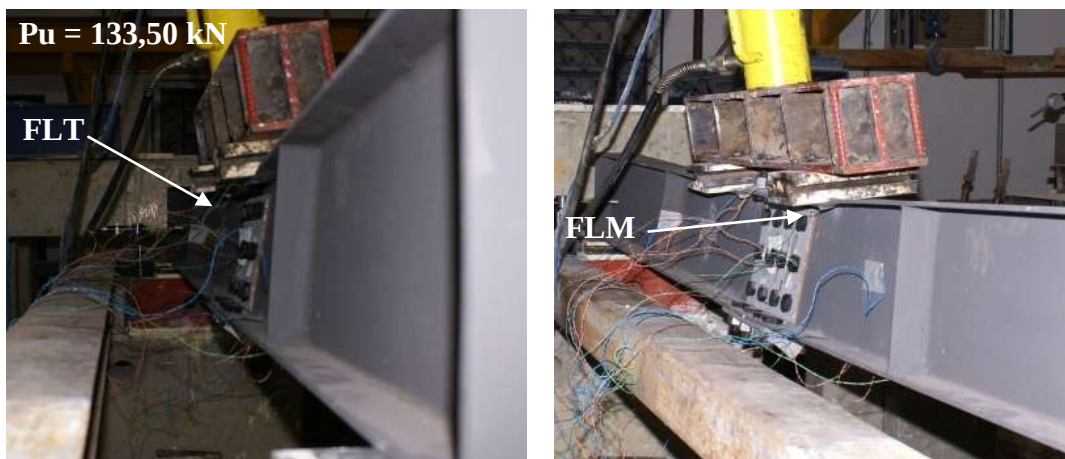


Figura 4.15 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga V1LME

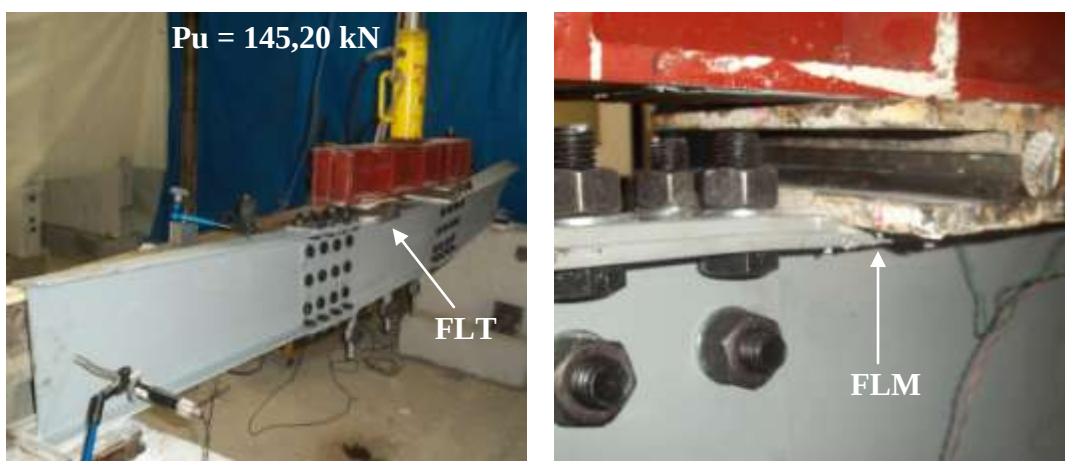


Figura 4.16 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga V2L

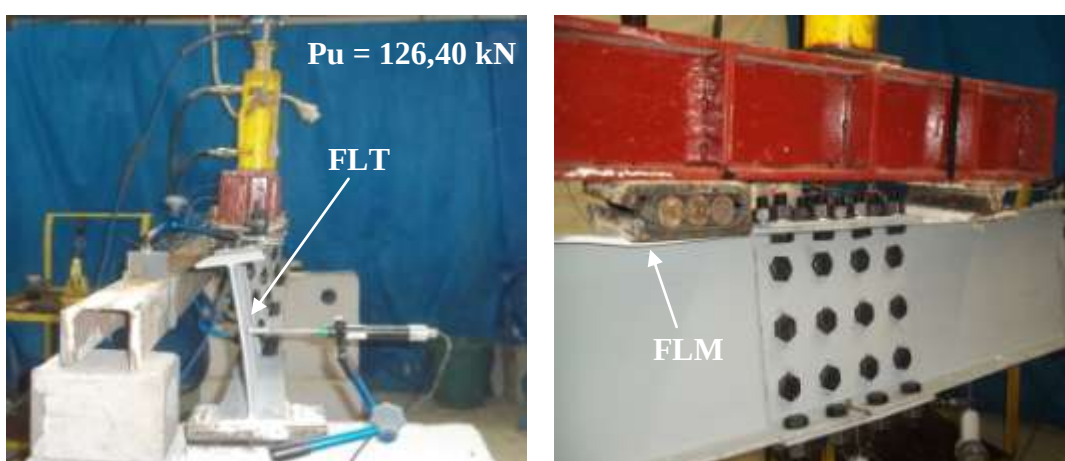


Figura 4.17 - Modos de falhas e carga de ruptura da viga V3L

4.2.2. Deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais, conforme descritos anteriormente foram medidos por deflectômetros posicionados na mesa inferior da viga (R2/R4) sob os pontos de aplicação das forças, no meio do vão (R3) e a 600 mm do apoio da direita na mesa superior da viga (R1) e 600 mm do apoio da esquerda na mesa superior da viga (R5) a carga de retirada dos relógios foi indicada por P_u^{lei} enquanto a carga de ruptura foi dada por P_u .

Os deslocamentos verticais das vigas são exibidos nas Figuras 4.18 a 4.25, com um quadro com algumas características das peças.

Para mostrar que existe eficiência no posicionamento das vigas e uma excentricidade requerida, os relógios R1 e R5 posicionados simetricamente na mesa comprimida e os relógios R2 e R4 também posicionados simetricamente na mesa tracionada, apresentaram em todos os casos comportamento simétrico ou bem próximo da simetria, principalmente nas vigas sem emendas, nas vigas com emendas no meio do vão e na viga com duas emendas.

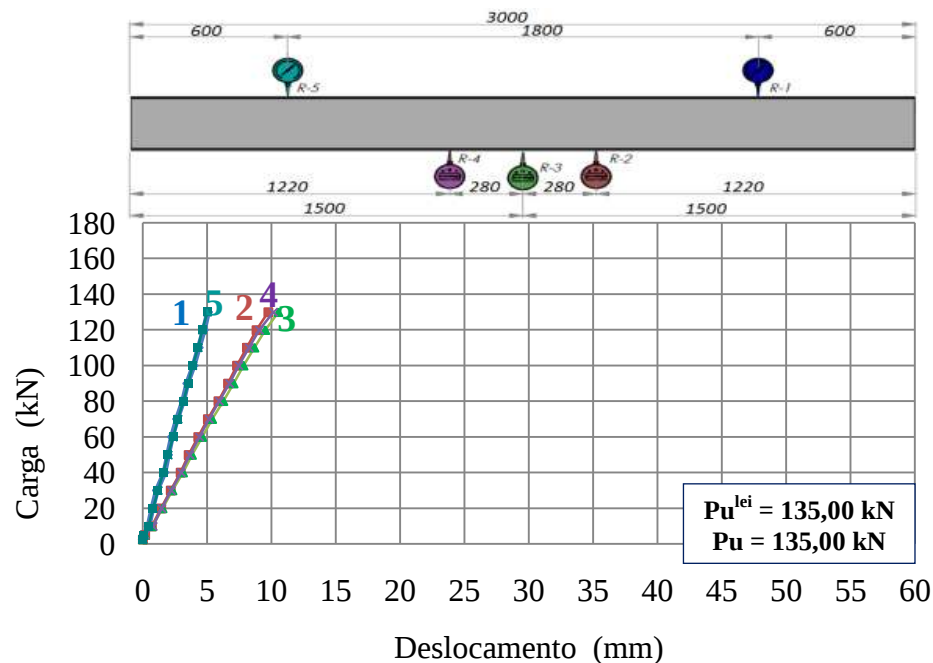


Figura 4.18 - Deslocamentos verticais VREF1

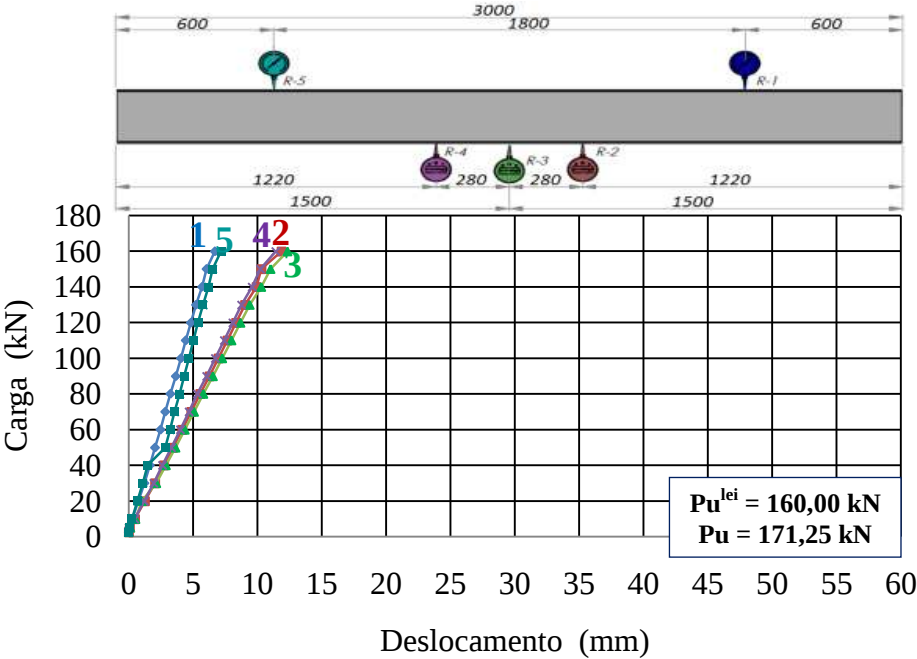


Figura 4.19 - Deslocamentos verticais VREF2

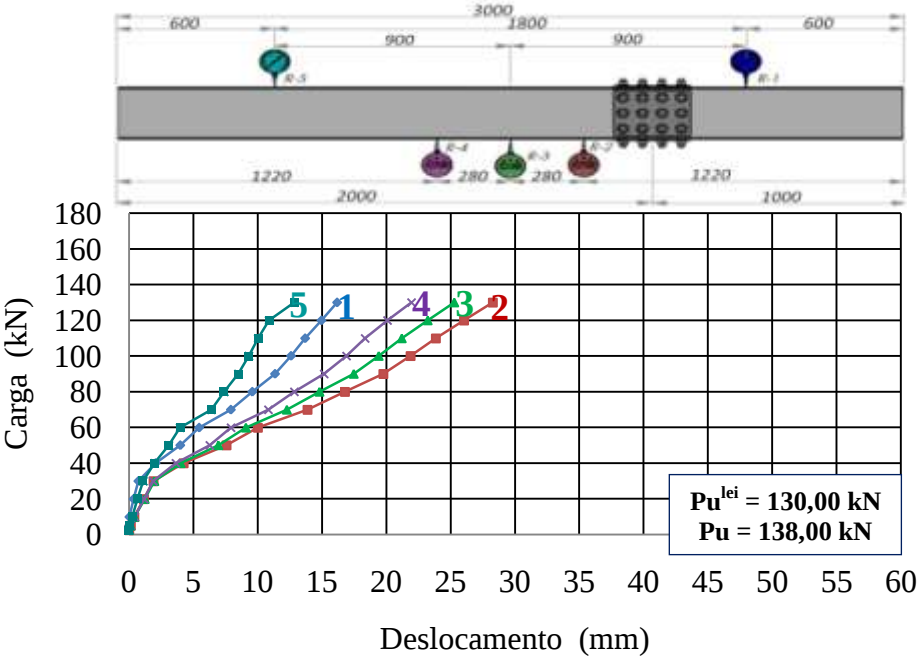


Figura 4.20 - Deslocamentos verticais V1LD

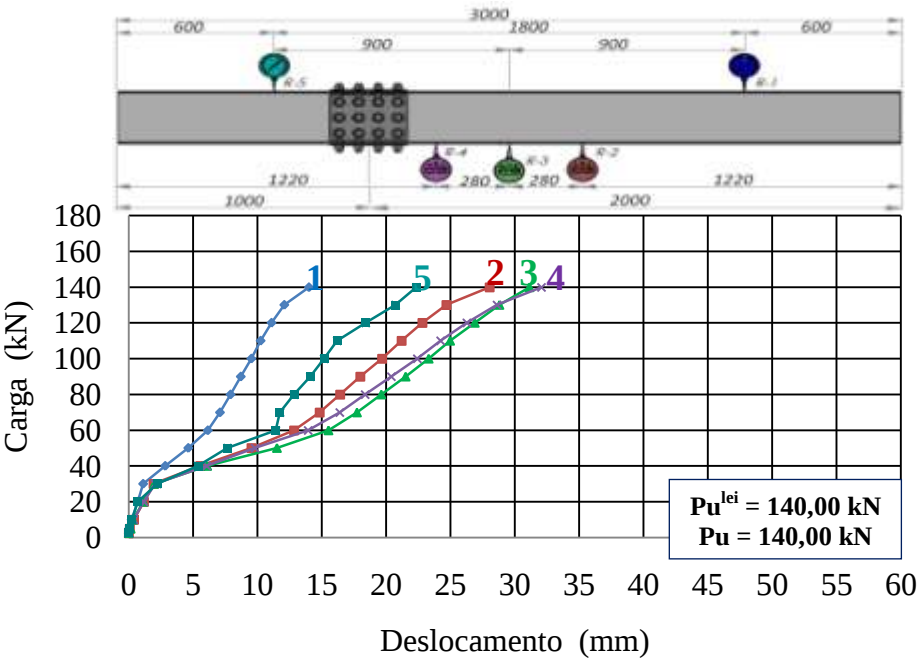


Figura 4.21 - Deslocamentos verticais V1LE

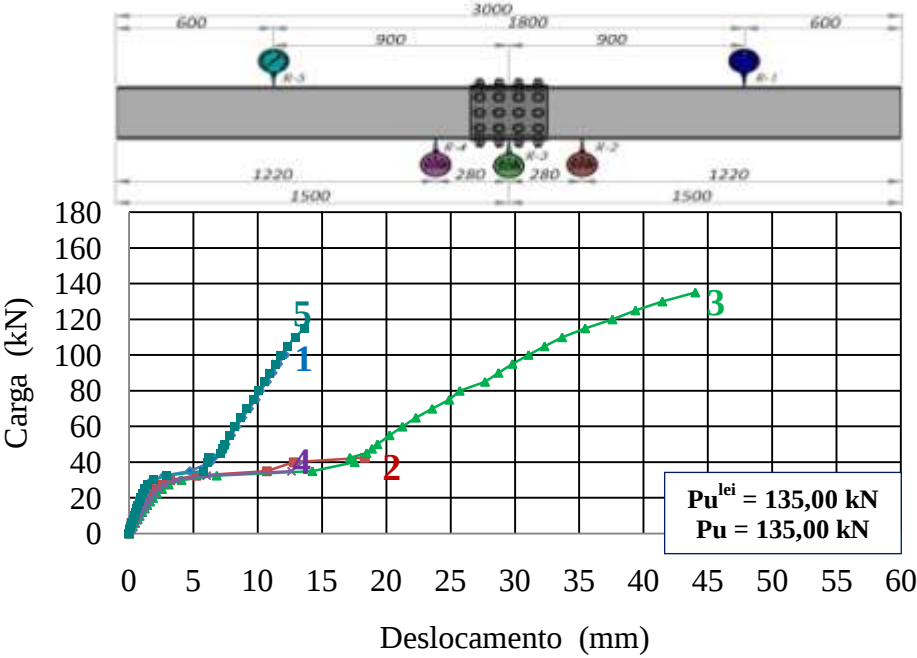


Figura 4.22 - Deslocamentos verticais V1LM

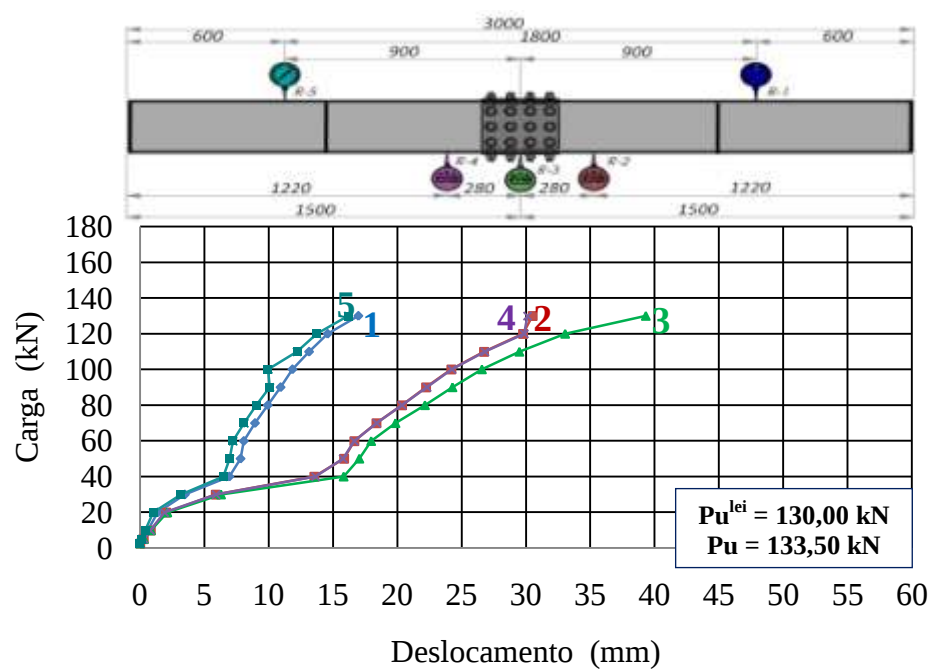


Figura 4.23 - Deslocamentos verticais V1LME

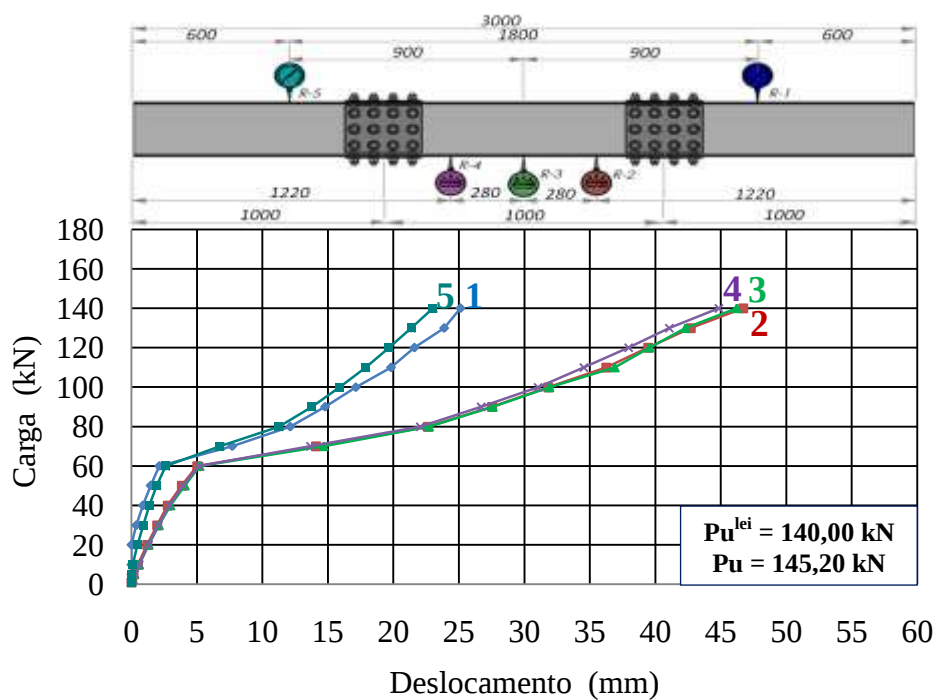


Figura 4.24 - Deslocamentos verticais V2L

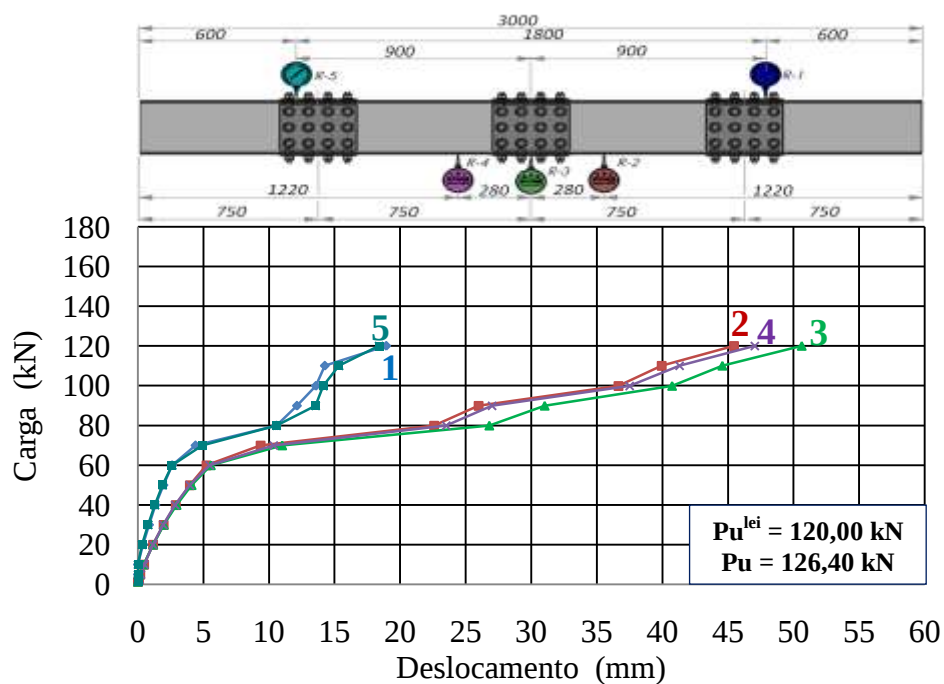


Figura 4.25 - Deslocamentos verticais V3L

4.2.3. Deformações específicas

A Figura 4.26 apresenta o posicionamento dos extensômetros na alma, na mesa comprimida, na mesa tracionada, na chapa de ligação da alma, na chapa de ligação da mesa comprimida e na chapa de ligação da mesa tracionada das vigas. Alguns extensômetros que foram instalados em determinadas vigas registrou perdas de leitura.

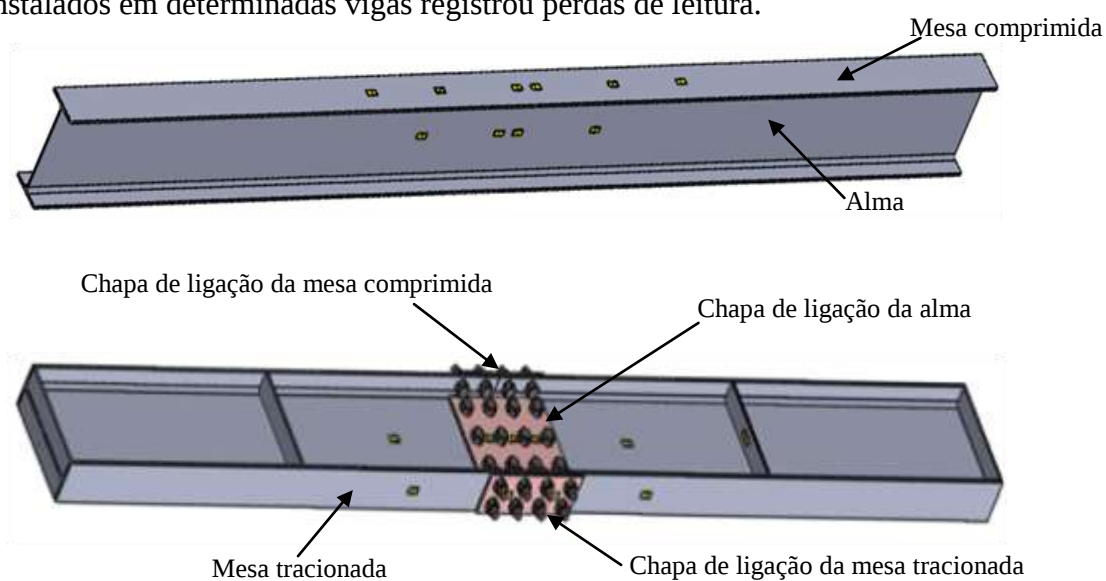


Figura 4.26 - Posicionamento dos extensômetros

Para medir as deformações específicas das vigas VREF1 e VREF2 foram instalados 16 extensômetros posicionados da seguinte maneira: na mesa comprimida extensômetros de 1 a 6; na alma extensômetros de 7 a 10; e na mesa tracionada extensômetros de 11 a 16. As Figuras 4.27 e 4.34 descrevem as posições dos extensômetros instalados nas vigas VREF1 e VREF2.

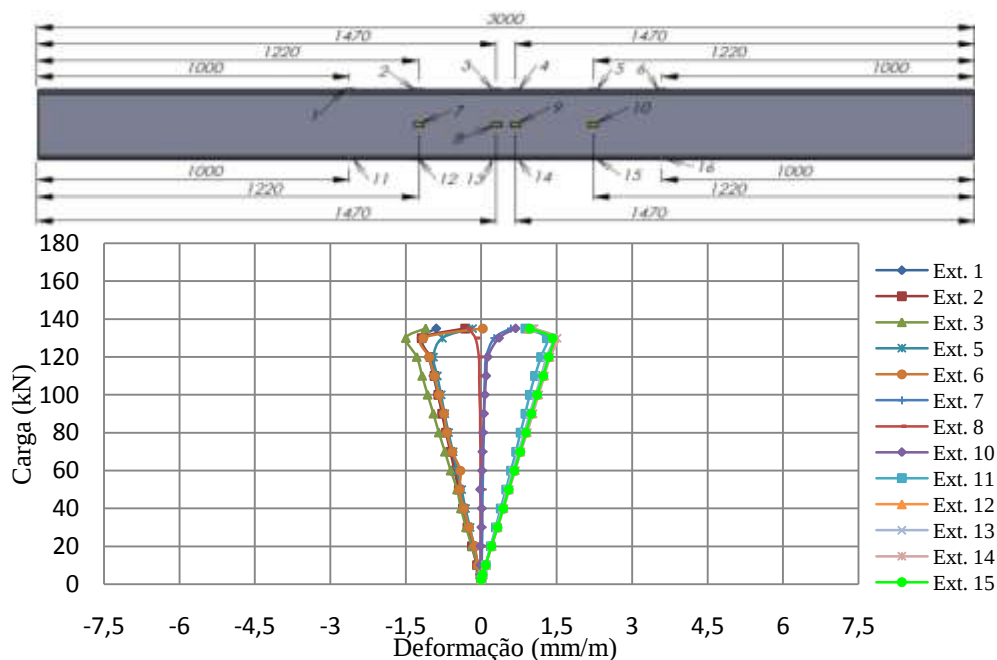


Figura 4.27 - Deformações específicas VREF1

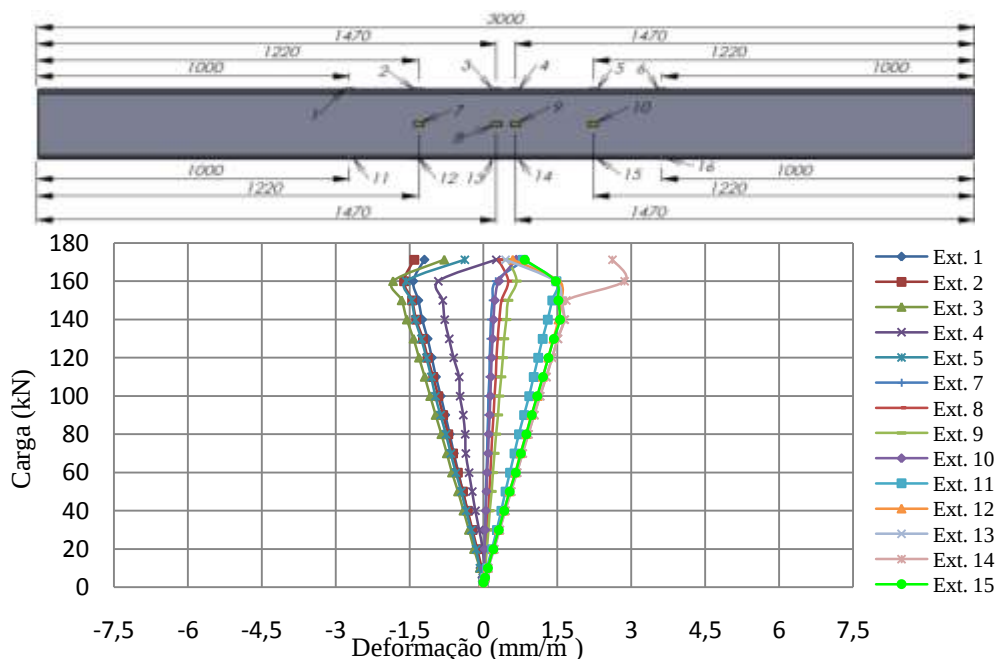


Figura 4.28 - Deformações específicas VREF2

Nas vigas V1LD e V1LE foram instalados 16 extensômetros posicionados da seguinte maneira: na mesa comprimida extensômetros de 1 a 3; na alma extensômetros de 4 a

7; na mesa tracionada extensômetros de 8 a 10; extensômetros foram divididos na chapas de ligação da mesa comprimida de 11 e 12; na chapa de ligação da alma foi instalado o extensômetro 13; e na chapa de ligação da mesa tracionada extensômetros 14, 15 e 16. As Figuras 4.29 e 4.30 mostram os posicionamentos dos extensômetros nas vigas V1LD e V1LE.

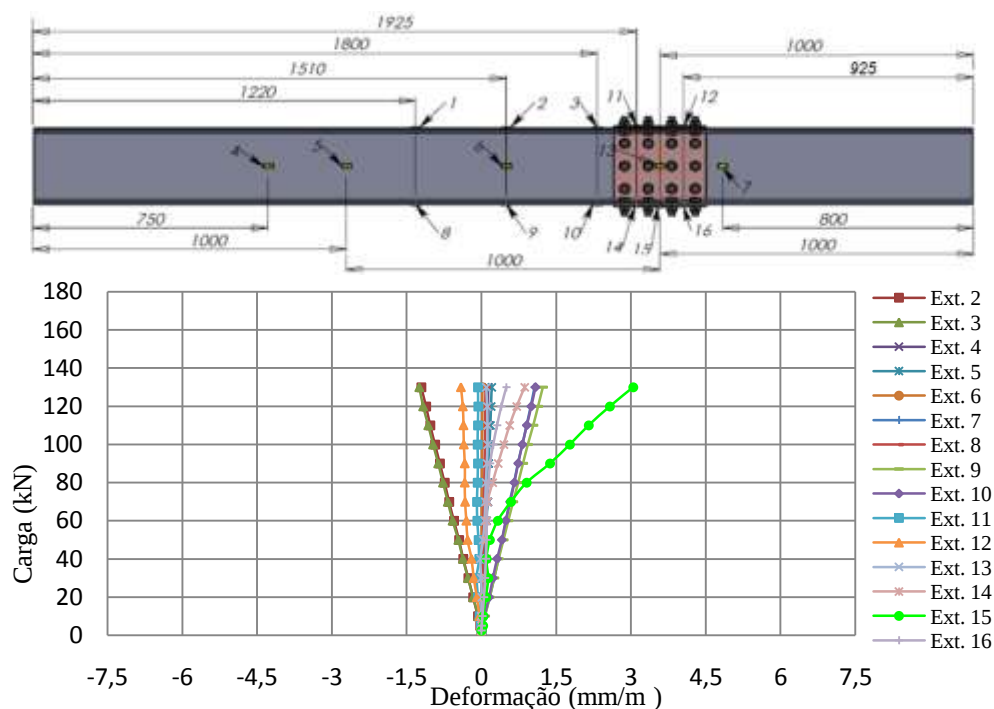


Figura 4.29 - Deformações específicas V1LD

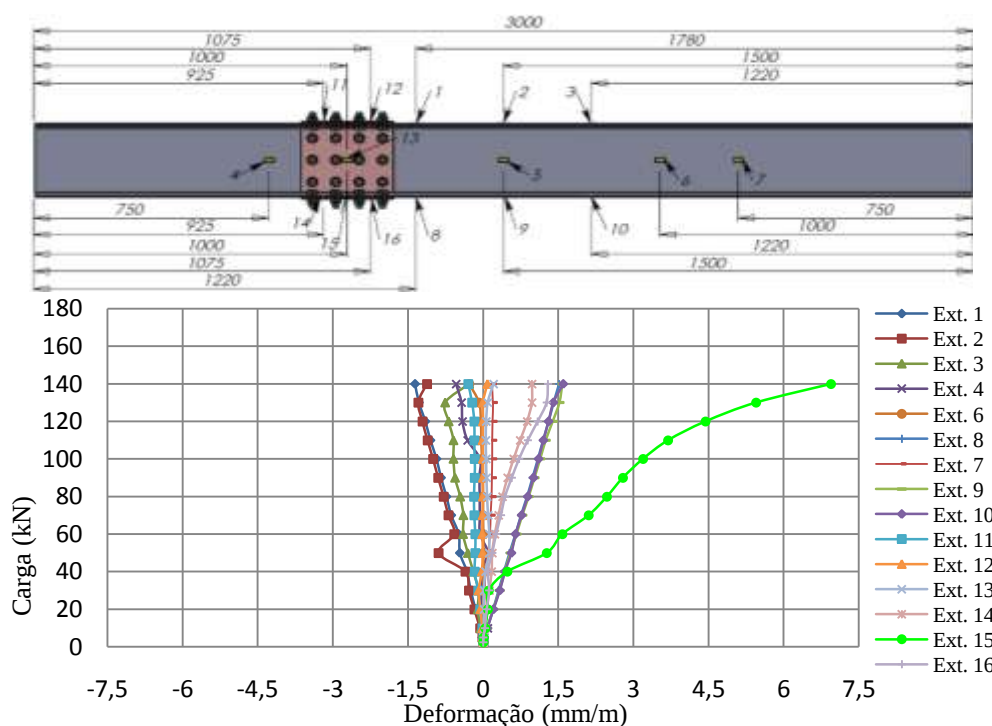


Figura 4.30 - Deformações específicas V1LE

Na viga V1LM foram instalados 18 extensômetros posicionados da seguinte maneira: na mesa comprimida extensômetros 1, 2, 5 e 6; na alma extensômetros 8 e 12; na mesa tracionada foi instalado o extensômetro 13,14,17 e 18; na chapa de ligação da mesa comprimida foram divididos os extensômetros 3 e 4; na chapa de ligação da alma foi instalado os extensômetros 9, 10 e 11; e na chapa de ligação da mesa tracionada extensômetro 15 e 16. A Figura 4.31 mostra os posicionamentos dos extensômetros na viga V1LM.

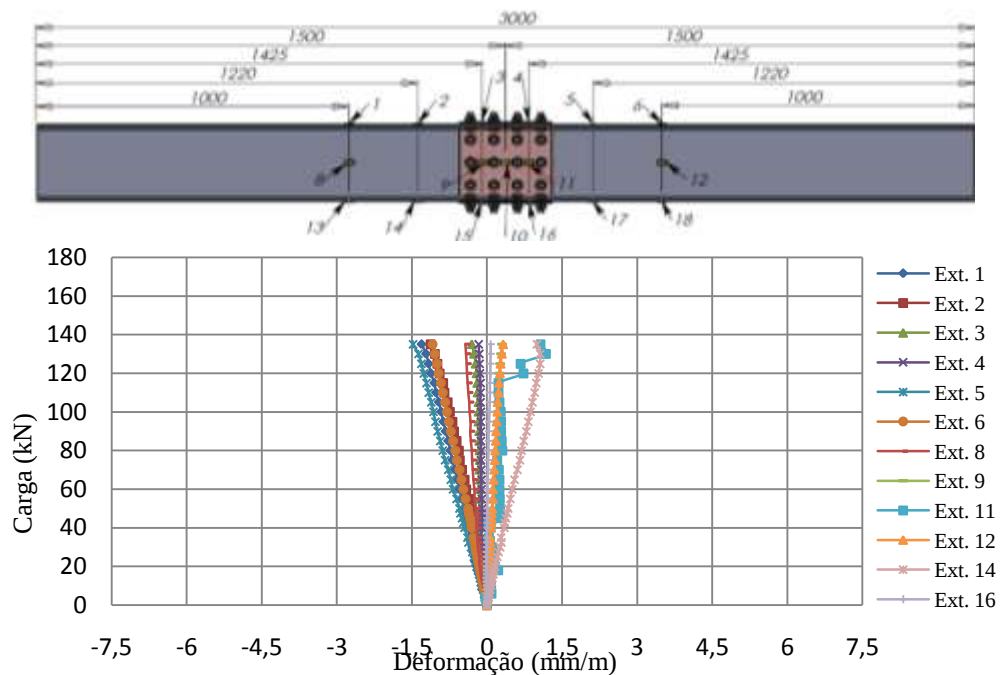


Figura 4.31 - Deformações específicas V1LM

Na viga V1LME foram instalados 17 extensômetros posicionados da seguinte maneira: na mesa comprimida extensômetros 1 e 4, na alma extensômetros 6 e 10, na mesa tracionada extensômetros 12, 13, 16 e 17, na chapa de ligação da mesa comprimida foram instalados os extensômetros 2 e 3; na chapa de ligação da alma extensômetros 7, 8 e 9; na chapa de ligação da mesa tracionada extensômetros 14 e 15; e nos enrijecedores extensômetros 5 e 11. A Figura 4.32 apresenta o posicionamento dos extensômetros na viga V1LME.

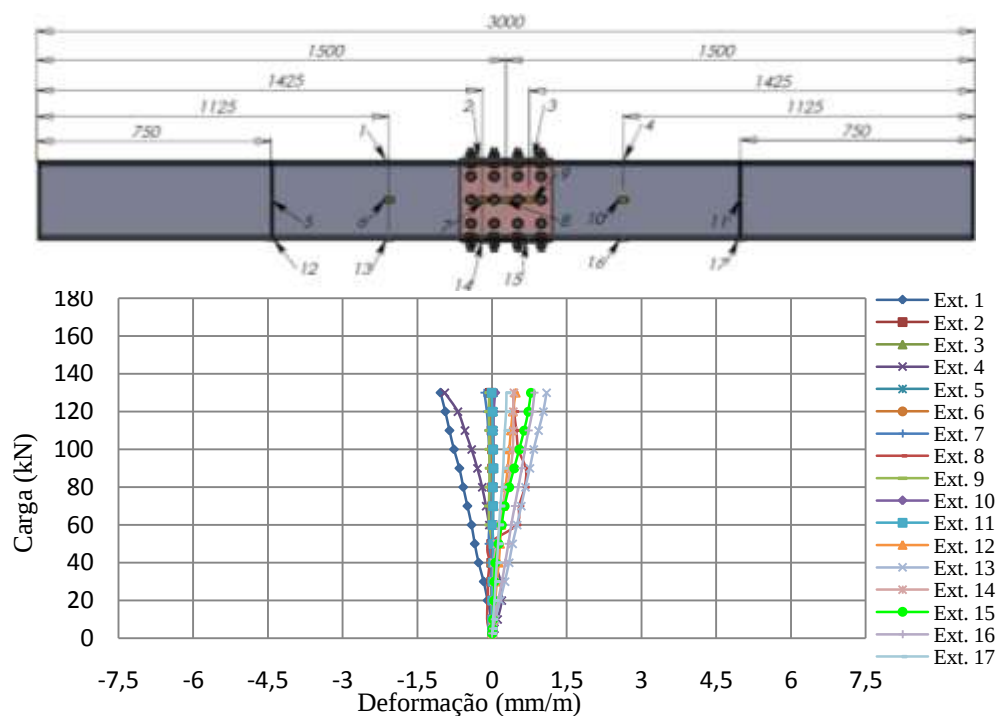


Figura 4.32 - Deformações específicas V1LME

Na viga V2L foram instalados 17 extensômetros posicionados da seguinte maneira (Figura 4.33): na mesa comprimida extensômetros 1, 2 e 3; na alma extensômetro 4; na mesa tracionada extensômetros 5, 6, e 7; divididos nas duas chapas de ligação da mesa comprimida extensômetros 8, 9, 13 e 14; nas duas chapas de ligação da alma extensômetros 10 e 15; e nas duas chapas de ligação da mesa tracionada extensômetros 11, 12, 16 e 17.

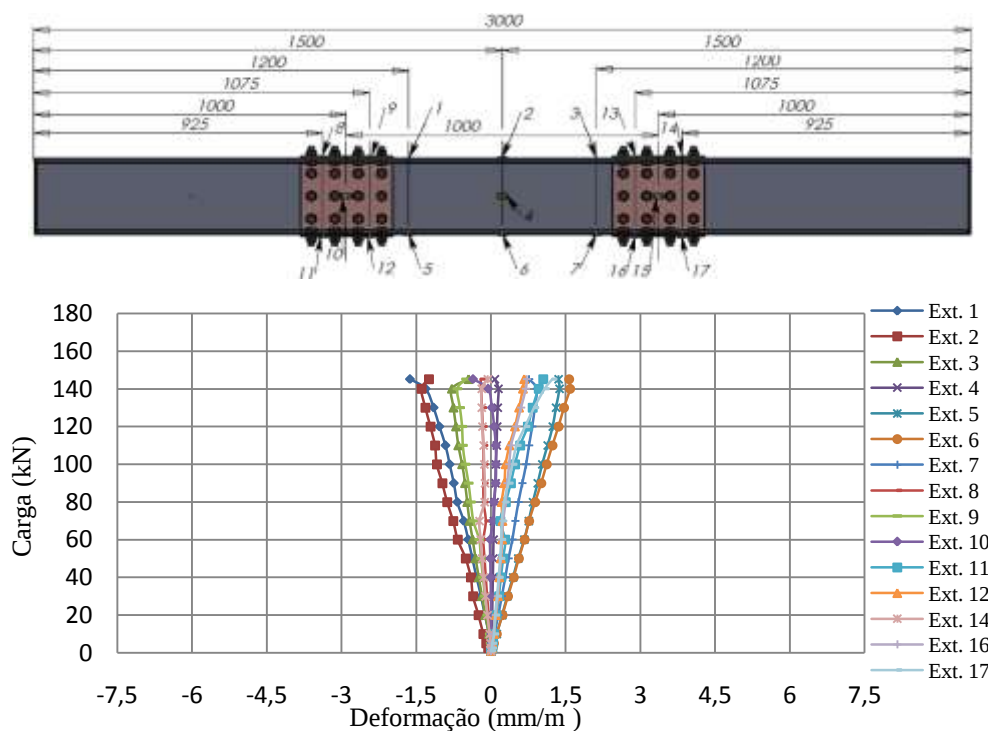


Figura 4.33 - Deformações específicas V2L

Na viga V3L foram instalados 21 extensômetros posicionados da seguinte maneira: na mesa comprimida extensômetros 1 e 2; na alma extensômetro 3 e 4; na mesa tracionada extensômetros 5 e 6; divididos nas três chapas de ligação da mesa comprimida extensômetros 7, 8, 12, 13, 17 e 18; nas três chapas de ligação da alma extensômetros 9, 14 e 19; e nas três chapas de ligação da mesa tracionada extensômetros 10, 11, 15, 16, 20 e 21. Como mostra a Figura 4.34.

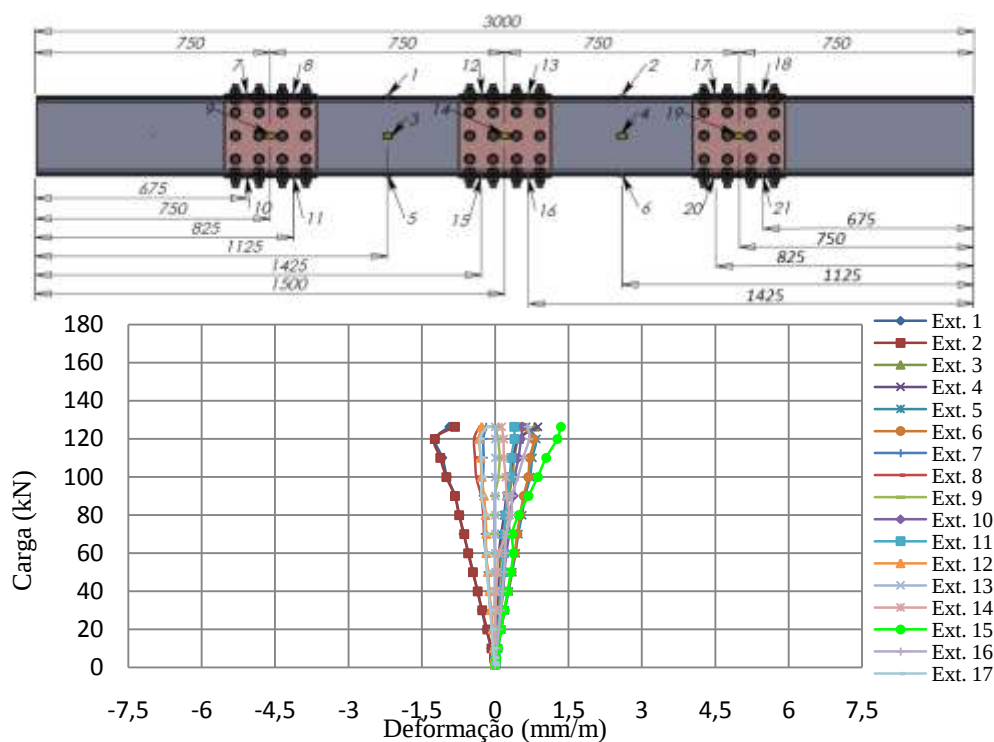


Figura 4.34 - Deformações específicas V3L

4.2.4. Deslocamentos relativos

Os LVDT's (*linear variable differential transformer*) foram instalados na alma da viga a 75 mm da extremidade da viga, em cima do apoio de 1º gênero e 2º gênero, e perpendicular ao eixo de flexão da viga, com o objetivo de verificar a torção. A Figura 4.35 mostra o posicionamento dos LVDT's nas vigas.

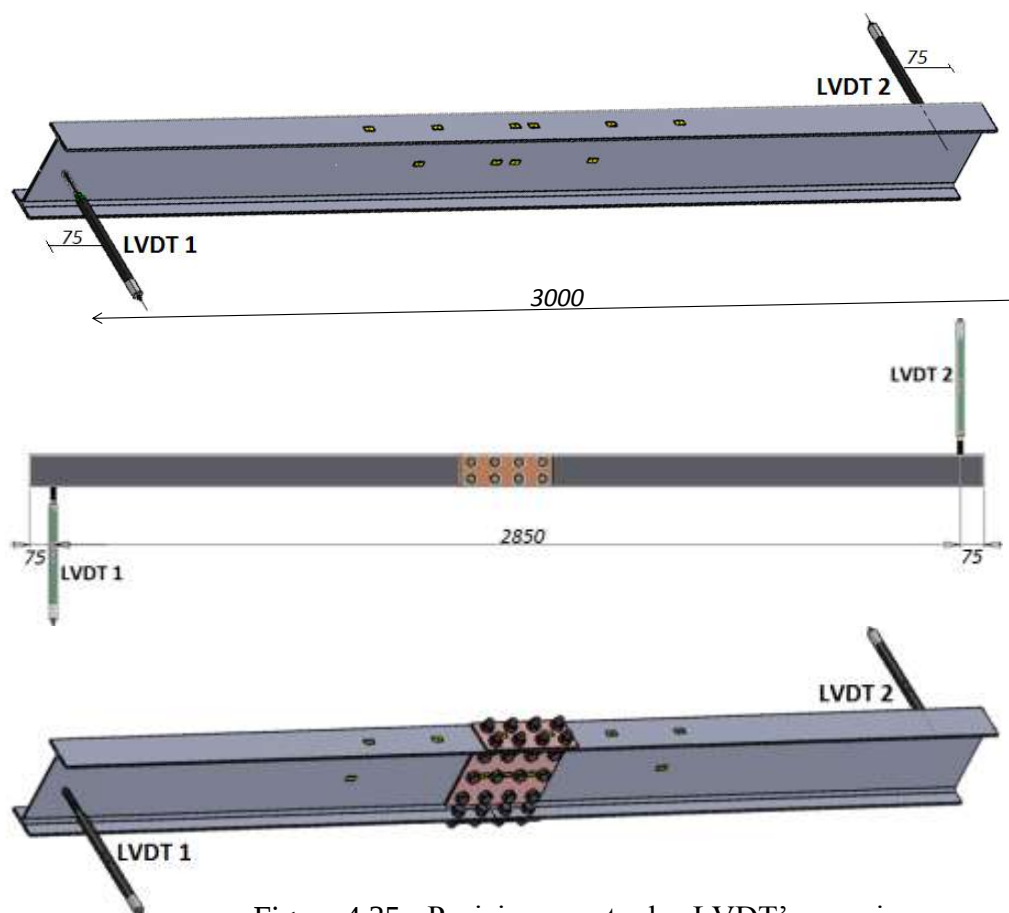


Figura 4.35 - Posicionamento dos LVDT's nas vigas

É possível observar através do comportamento das curvas nas Figuras 4.36 a 4.43 que ocorreu a torção em todas as vigas. As vigas de referência VREF1 e VREF2 torceram no sentido anti-horário, igualmente as vigas com uma emenda a esquerda V1LE e com três emendas V3L. Já as vigas com uma emenda a direita V1LD, com uma emenda no meio V1LM e V1LME e com duas emendas V2L torceram no sentido horário.

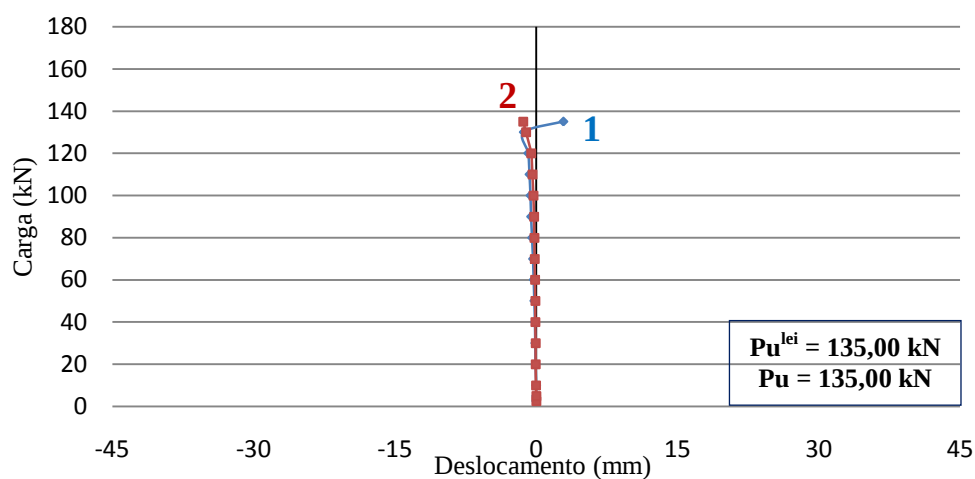


Figura 4.36 - Deslocamento relativo VREF1

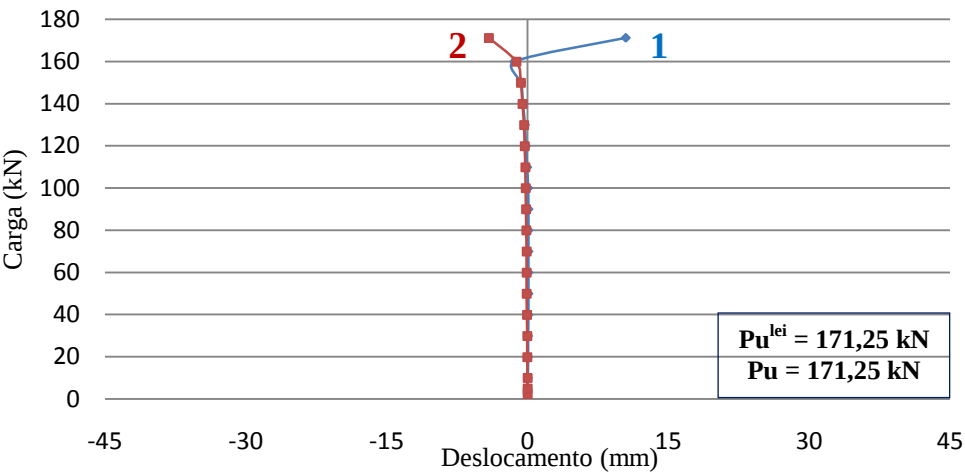


Figura 4.37 - Deslocamento relativo VREF2

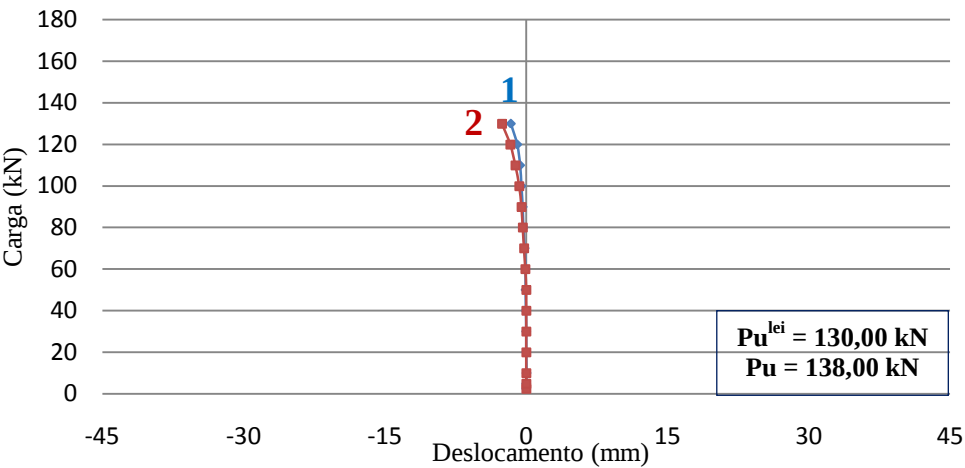


Figura 4.38 - Deslocamento relativo V1LD

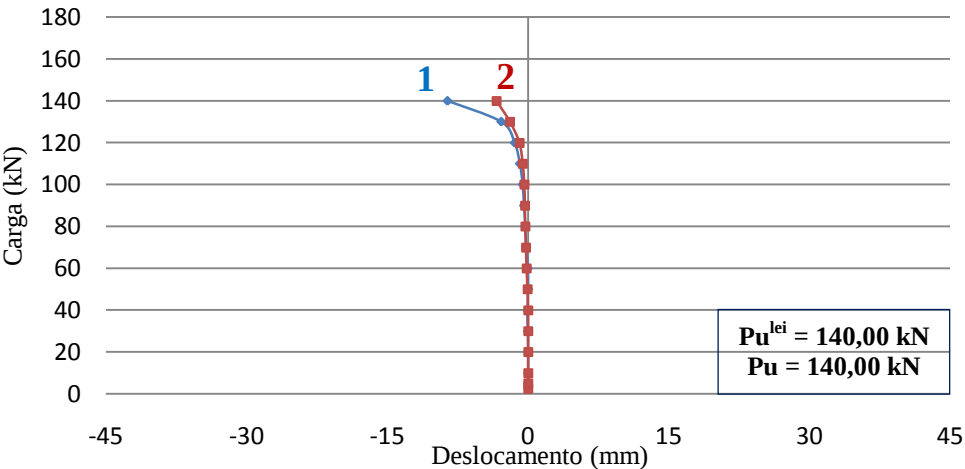


Figura 4.39 - Deslocamento relativo V1LE

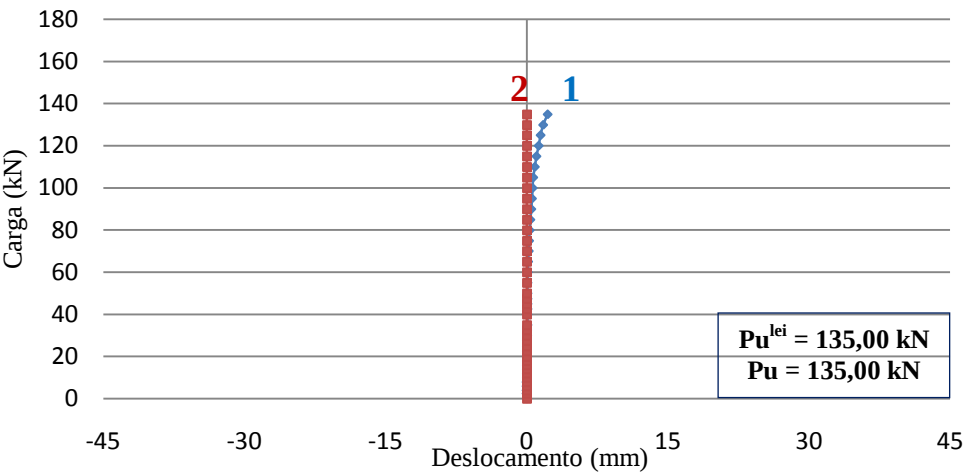


Figura 4.40 - Deslocamento relativo V1LM

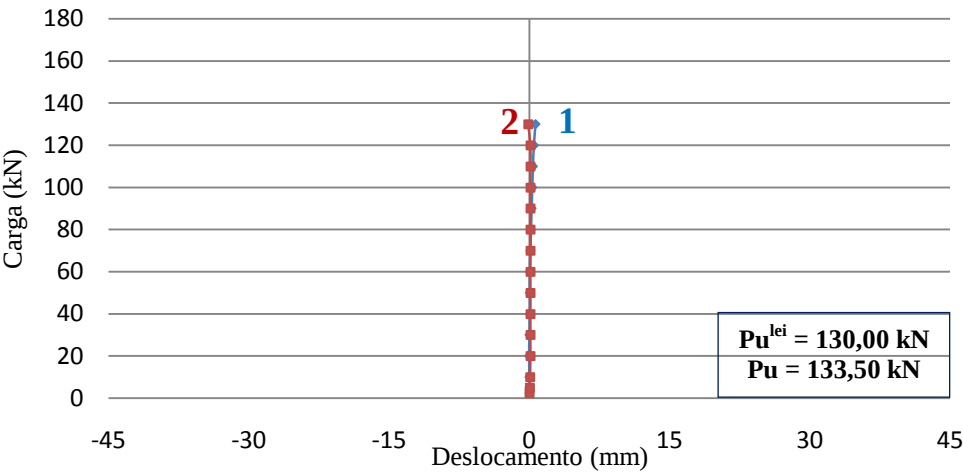


Figura 4.41 - Deslocamento relativo V1LME

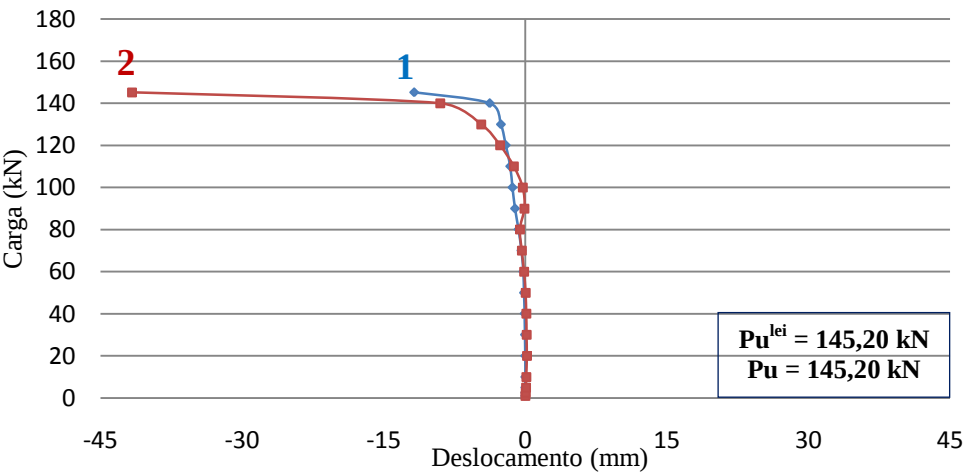


Figura 4.42 - Deslocamento relativo V2L

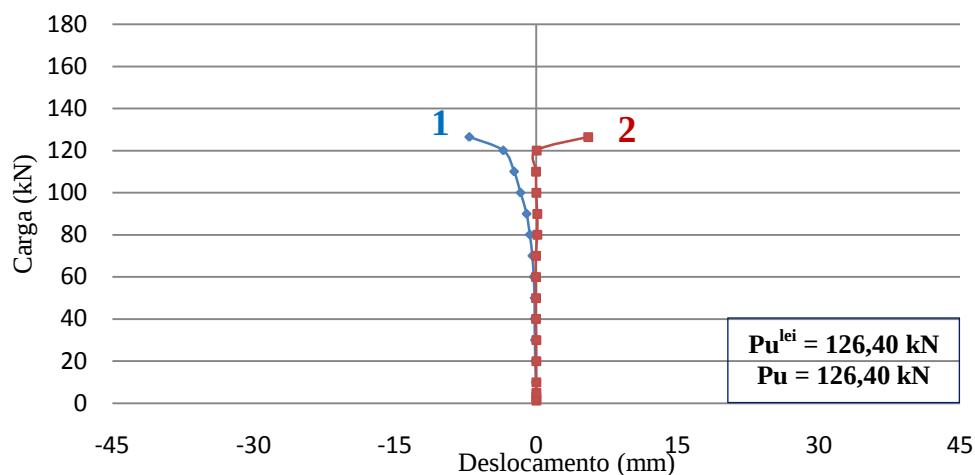


Figura 4.43 - Deslocamento relativo V3L

Com relação a torção, as vigas apresentaram comportamentos semelhantes destacando a viga com enrijecedor V1LME que registrou menor deslocamento devido a torção, o que pode ser observado na Tabela 4.6 que apresenta os deslocamentos máximos para os LVDT's instalados nas vigas e o sentido de torção.

Tabela 4.6 - Resultados dos LVDT's das vigas ensaiadas

Viga	P_u (kN)	LVDT-1 (mm)	LVDT-2 (mm)	Sentido da máxima torção
VREF1	135,00	2,88	-1,38	Anti-horário
VREF2	171,25	10,46	-4,11	Anti-horário
V1LD	138,00	-1,63	-2,58	Horário
V1LE	140,00	-8,58	-3,36	Anti-horário
V1LM	135,00	2,22	0,00	Horário
V1LME	133,50	0,65	-0,11	Horário
V2L	145,20	-11,78	-41,70	Horário
V3L	126,40	-7,09	5,50	Anti-horário

LVDT-1 = Deslocamento máximo do LVDT-1
LVDT-2 = Deslocamento máximo do LVDT-2

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. DESLOCAMENTOS VERTICAIS

As Figura 5.1 a 5.8 apresenta a relação dos deslocamentos verticais de ensaio com deslocamento máximo estabelecido pela NBR 8800:2008 no qual considera para vigas de piso a relação $L/350$ considerando o estado limite de serviço, identificado nas Figuras como a linha pontilhada. A Tabela 5.1 mostra comparação dos deslocamentos teóricos x deslocamentos de ensaios das vigas. O cálculo da deflexão (deslocamento) máxima teórica é desenvolvido abaixo:

$$\frac{dv_1}{dx_1} = \frac{P}{2EI} (x_1^2 + a^2 - aL) \quad 5.1$$

$$\left. \frac{dv_1}{dx_1} \right|_{x=0} = \frac{Pa(a-L)}{2EI} \quad 5.2$$

$$v_1 = \frac{Px_1}{6EI} (x_1^2 + 3a(a-L)) \quad 5.3$$

$$v_2 = \frac{Pa}{6EI} (3x(x-L) + a^2) \quad 5.4$$

$$v_{\max} = v_2 \Big|_{x=\frac{L}{2}} = \frac{Pa}{24EI} (4a^2 - 3L^2) \quad 5.5$$

Para especificar os resultados de cálculo teórico pelo fato das maiores deslocamentos não ocorrerem no meio do vão ($L/2$), usou-se a equação (EQ. 5.4). Já os maiores deslocamentos que ocorreram no meio do vão ($L/2$) foi utilizada a equação (EQ. 5.5),

a carga P é calculada sendo $P/2$ como é mostrado no esquema de distribuição de cargas na Figura 3.15 do capítulo 3.

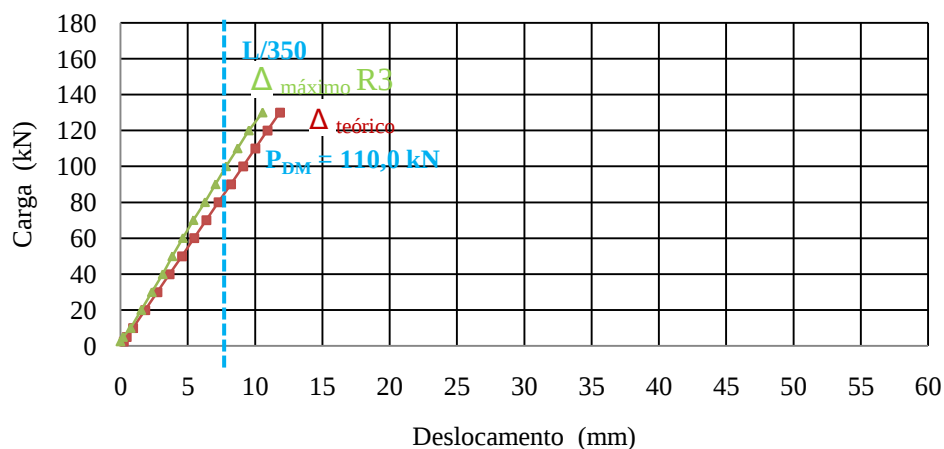


Figura 5.1 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga VREF1

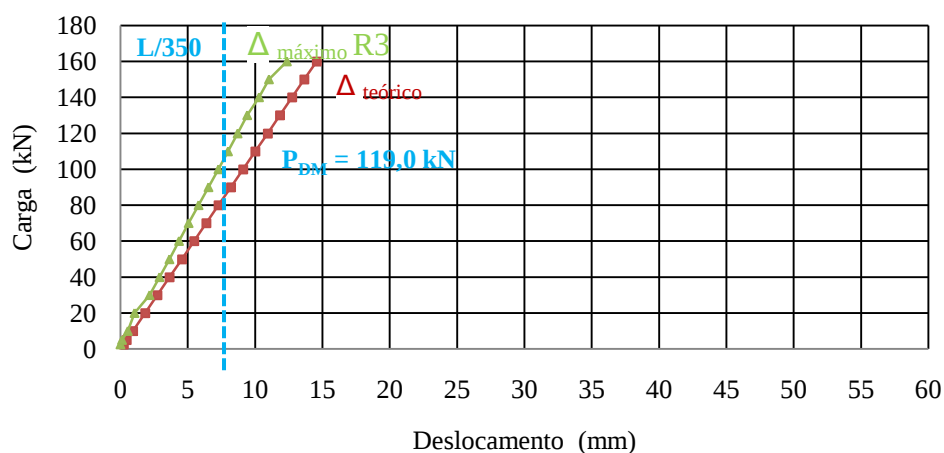


Figura 5.2 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga VREF2

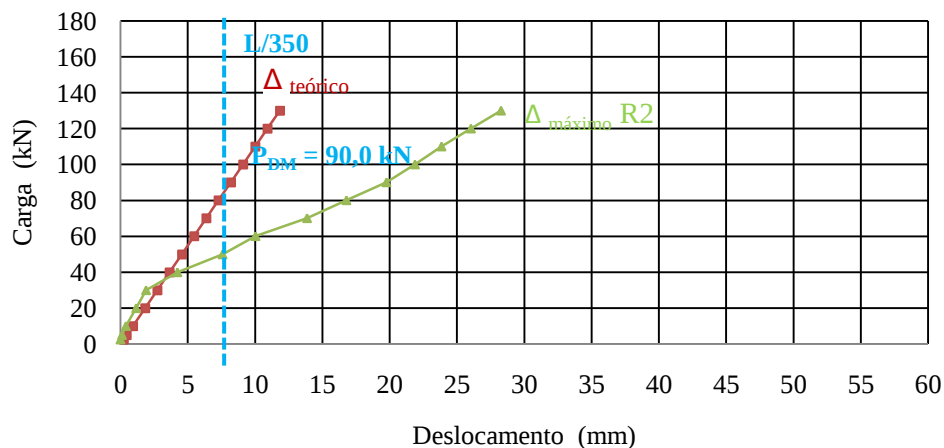


Figura 5.3 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga V1LD

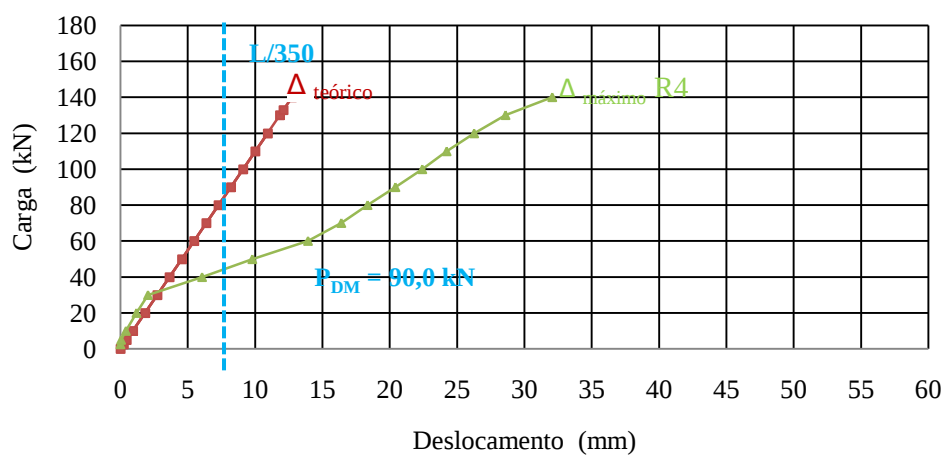


Figura 5.4 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga V1LE

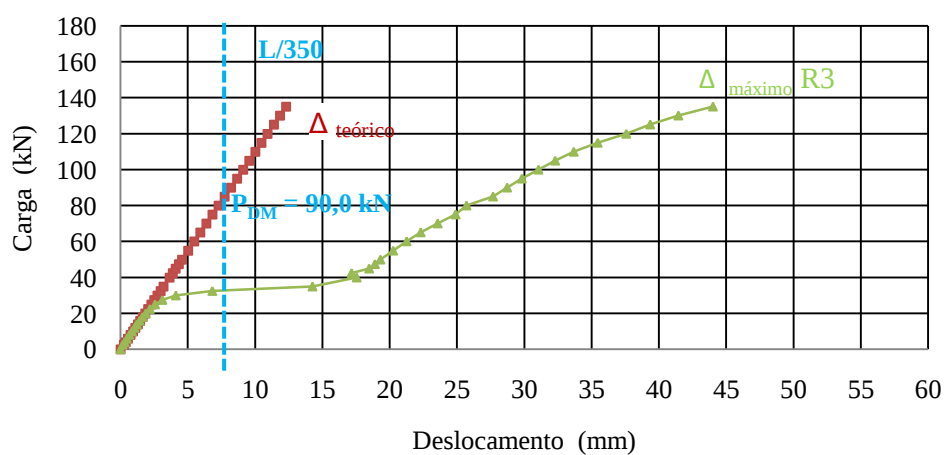


Figura 5.5 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga V1LM

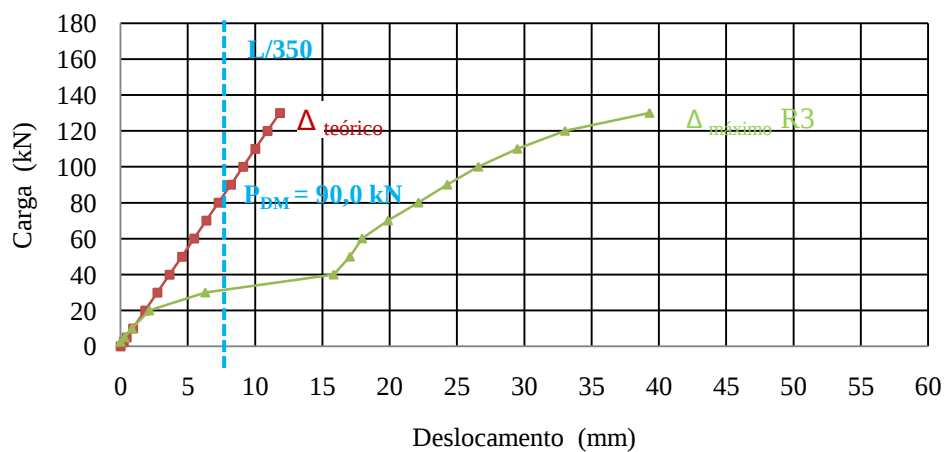


Figura 5.6 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga V1LME

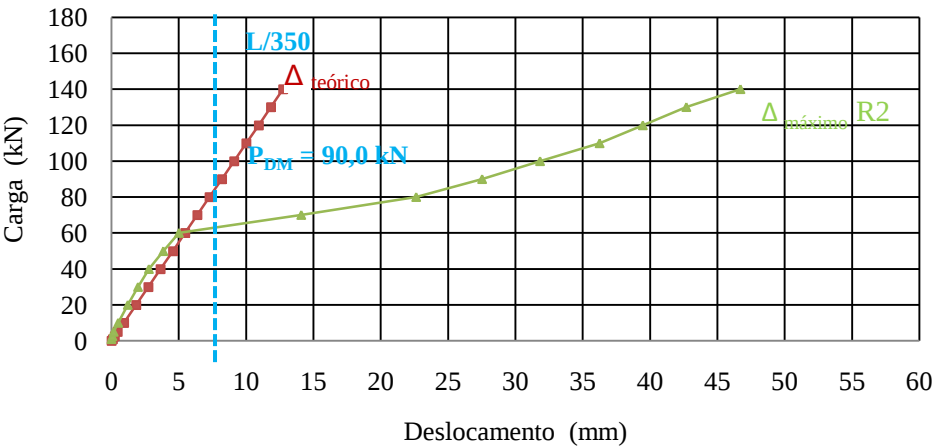


Figura 5.7 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga V2L

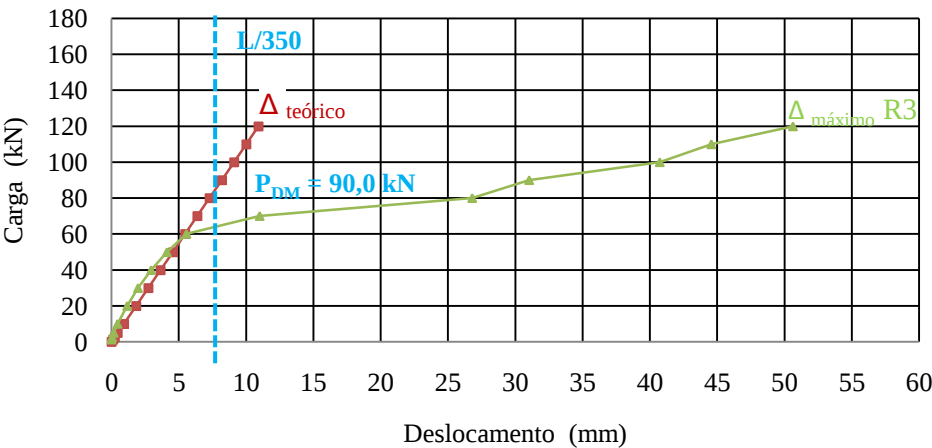


Figura 5.8 - Deslocamento teórico x Deslocamento de ensaio da viga V3L

Tabela 5.1 - Comparação das deslocamentos teóricas x deslocamentos de ensaios

Viga	P _u (kN)	P _{DM} (kN)	P _{DM} / P _u (%)	Δ _{máximo} (mm)	Δ _{teórico} (mm)	Δ _{ensaio} (mm)
VREF1	135,00	110,00	81%	8,57	11,83	10,55
VREF2	171,25	119,00	69%	8,57	14,56	12,35
V1LD	138,00	90,00	65%	8,57	11,83	*28,28
V1LE	140,00	90,00	65%	8,57	12,74	*32,54
V1LM	135,00	90,00	65%	8,57	12,29	44,03
V1LME	133,50	90,00	65%	8,57	11,83	39,31
V2L	145,20	90,00	65%	8,57	12,74	*46,23
V3L	126,40	90,00	65%	8,57	10,92	50,63

Δ_{máximo} - Deslocamento máximo pela NBR 8800:2008 L/350
P_{DM} - Carga em que atingiu deslocamento máximo em relação à L/350
Δ_{teórico} - Deslocamento teórico de cálculo
Δ_{ensaio} - Deslocamento obtido através do ensaio
* Δ_{ensaio} fora do relógio R3

Considerando os valores de deslocamentos máximos verticais para o estado limite de serviço, determinado pela relação $L/350$ (viga de piso), que são especificados de acordo com o anexo C da NBR 8800:2008. Esta relação é utilizada como parâmetro de comparação dos deslocamentos teóricos x deslocamentos de ensaio.

As curvas das vigas VREF1 e VREF2 demonstram um comportamento de deslocamento de ensaio menor que a deslocamento teórico, apresentando maior rigidez. Como mostrado os valores na Tabela 5.1.

As vigas com emendas V1LD, V1LE, V1LM, V1LME, V2L e V3L, apresentam os deslocamentos de ensaio superiores aos deslocamentos teóricos, diferentemente das vigas sem emendas VREF1 e VREF2, como mostrado os valores na Tabela 5.1, isto mostra que vigas com emendas são menos rígidas e existe uma relação entre rigidez e quantidade de emendas de maneira que quanto mais emendas menos rígida a viga se comporta.

As vigas com emendas apresentaram deslocamento máximo pela NBR 8800:2008 com cargas entre 65% de suas respectivas cargas de ruptura, enquanto as vigas VREF1 e VREF2 apresentam o deslocamento máximo com 69% e 81% confirmando a maior rigidez dessas vigas sem ligações.

Através dos ensaios foram obtidos deslocamentos máximos no relógio R3 situado no meio do vão nas vigas VREF1, VREF2, V1LM, V1LME, e V3L. Constituiu-se o deslocamento máximo no relógio R2 nas vigas V1LD e V2L, a viga V1LE obteve seu deslocamento máximo no relógio R4 (Figura 5.9).

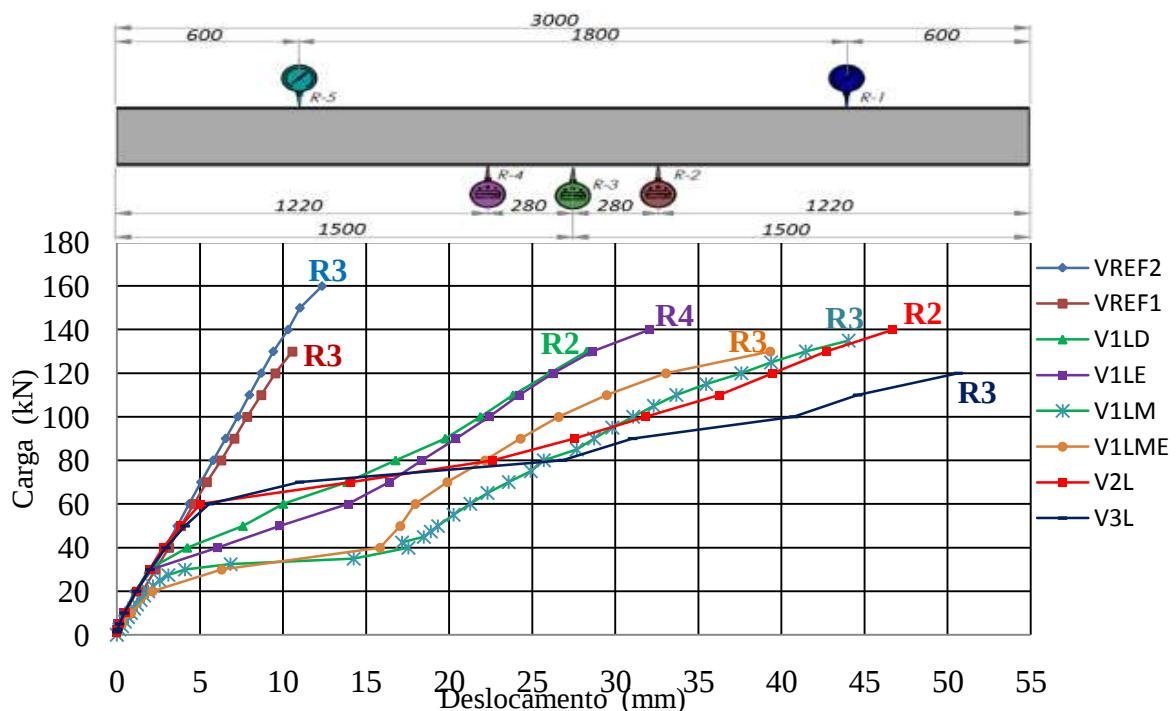


Figura 5.9 - Deslocamentos máximos nas vigas

Analisando o deslocamento vertical das vigas no relógio R3, observou-se que a viga V3L teve o maior deslocamento em relação as outras vigas, apresentou um valor de deslocamento máximo no relógio R3 de 50,63 mm, pois se trata de uma viga que contém três emendas e uma das emendas é no meio do vão.

As vigas V1LD e V1LE não obtiveram deslocamento máximo no relógio R3, justifica-se o fato de não ter ligação no meio do vão e sim a um terço dos apoios. A viga V1LD proporcionou um valor máximo de deslocamento no relógio R2 de 28,28 mm e a viga V1LE apresentou um valor de deslocamento máximo no relógio R4 de 32,06 mm.

A viga com duas emendas V2L apresentou seu deslocamento máximo no relógio R2 com um valor de 46,23 mm. Justifica-se o deslocamento máximo apresentado da viga V2L, pois uma das emendas da viga está posicionada próximo à uma das cargas de reação.

A Figura 5.10 mostra o comportamento dos relógios de todas as vigas na carga de 120 kN com exceção da viga V1LM em que os relógio foram retirados com carga anterior a esta.

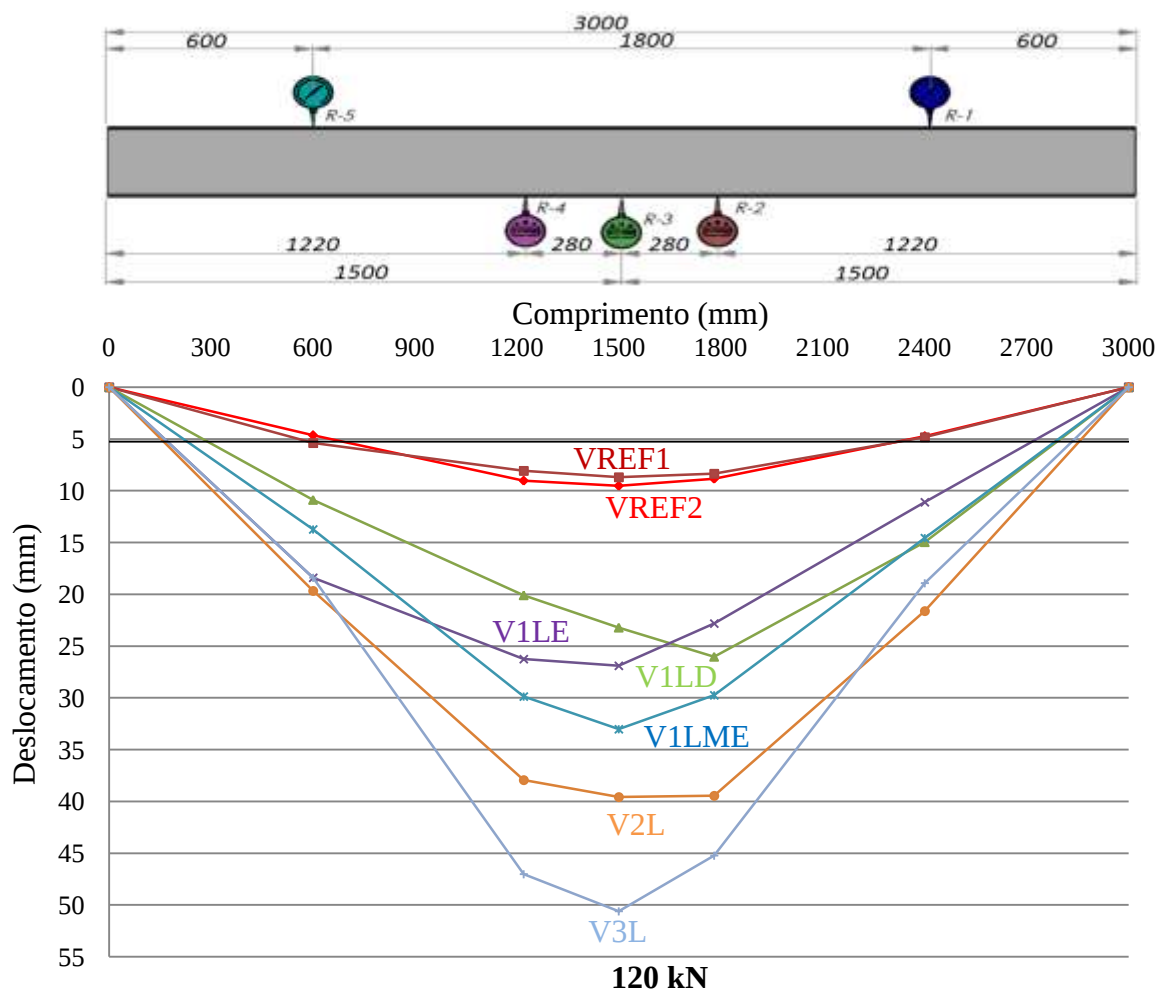


Figura 5.10 - Comportamento dos relógios

É possível observar a simetria do comportamento de todas as vigas que apresentam configurações simétricas e no caso das vigas com apenas uma ligação à esquerda ou à direita o maior deslocamento coincidiu com a posição da ligação.

5.2. MÁXIMAS DEFORMAÇÕES

Com exceção dos extensômetros instalados na alma das vigas, os extensômetros instalados na mesa comprimida e mesa tracionada, apresentaram em todos os casos tração na parte tracionada e compressão na parte comprimida desde o início do carregamento.

As deformações da alma foram bem menores comparando com as deformações da mesa comprimida e da mesa tracionada, isto para todas as vigas ensaiadas. Comprovando o posicionamento dos extensômetros na linha neutra.

Para análise das deformações, considerou-se dentre os extensômetros instalados o que apresentou maior deformação em cada região da viga (mesa comprimida, mesa tracionada), o diagrama carga x deformação dessas regiões estão expostos nas Figuras 5.11 e 5.12.

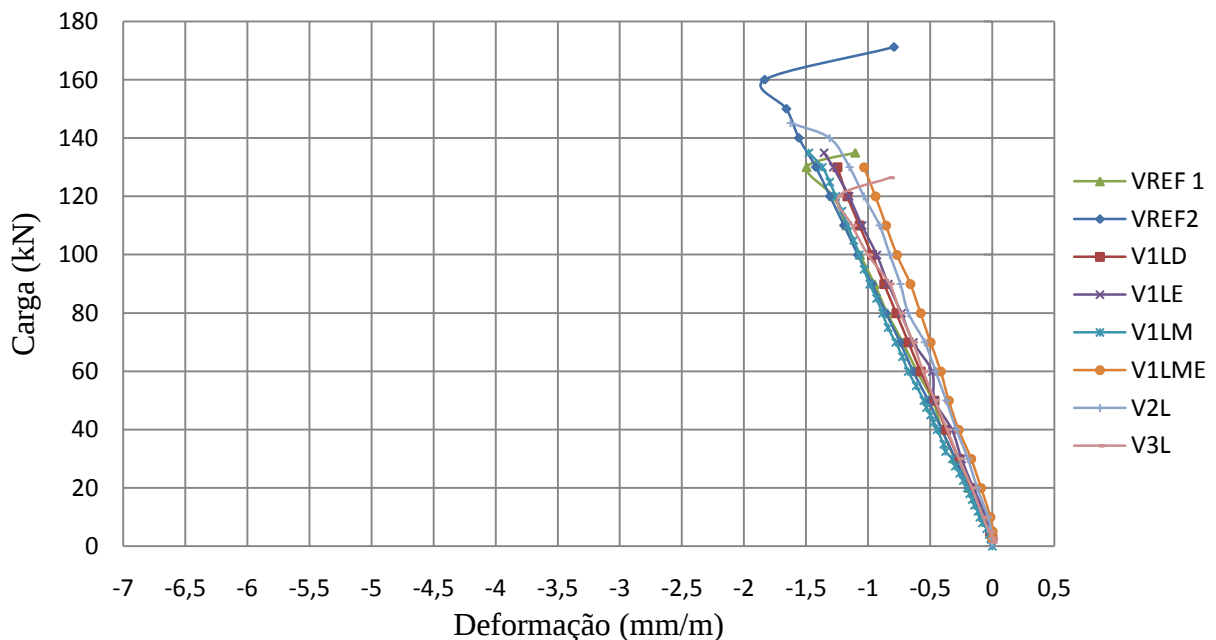


Figura 5.11 - Deformação máxima na mesa comprimida

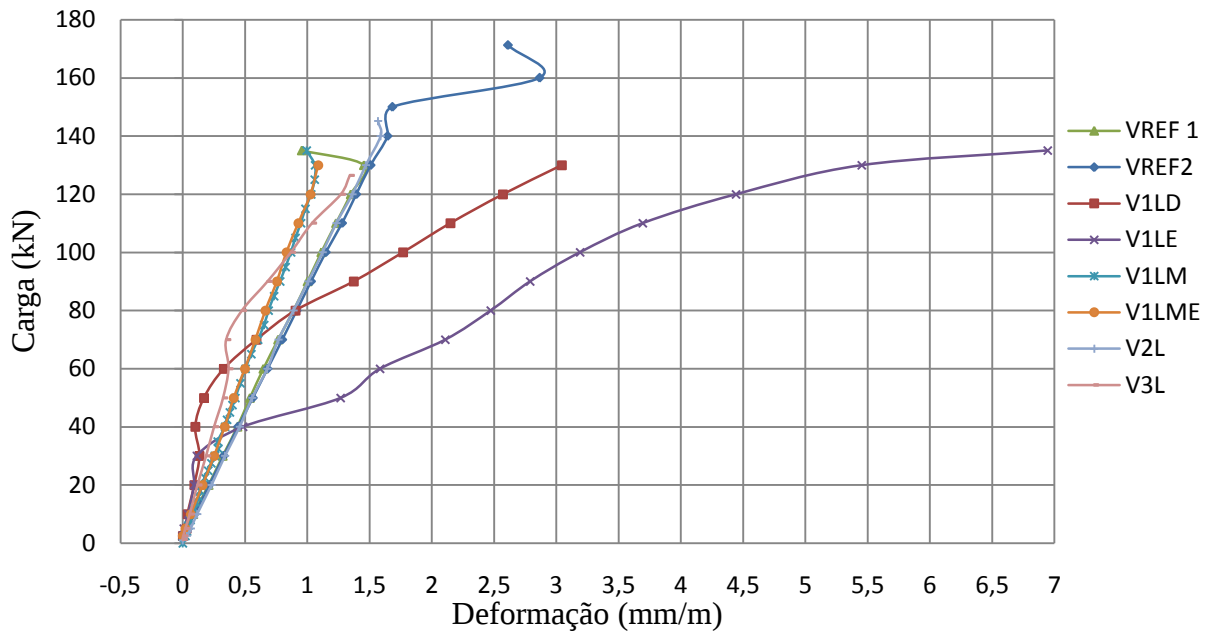


Figura 5.12 - Deformação máxima na mesa tracionada

O comportamento das curvas ilustrados nas Figuras acima demonstram que nenhuma região da viga rompeu por escoamento do aço uma vez que nenhum extensômetro atingiu a deformação limite de escoamento de suas respectivas chapas, estabelecida através dos ensaios de caracterização do aço.

As máximas deformações de compressão e tração são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Deformações máximas de compressão e deformações máximas de tração

Viga	P_u (kN)	ϵ máx. compressão	ϵ máx. tração	ϵ máx. compressão ϵ_y	ϵ máx. tração ϵ_y
VREF1	135,00	-1,49	1,45	-0,20	0,19
VREF2	171,25	-1,83	2,86	-0,24	0,37
V1LD	138,00	-1,24	3,04	-0,16	0,39
V1LE	140,00	-1,35	6,94	-0,17	0,89
V1LM	135,00	-1,47	1,06	-0,19	0,14
V1LME	133,50	-1,03	1,08	-0,13	0,14
V2L	145,20	-1,62	1,58	-0,21	0,21
V3L	126,40	-1,23	1,34	-0,16	0,17

ϵ máx. compressão – Deformação máxima da mesa comprimida

ϵ máx. tração – Deformação máxima da mesa tracionada

ϵ_y do aço da mesa = 7,53‰

ϵ_y do aço da alma = 4,00‰

ϵ_y do aço da chapa de ligação = 7,77‰

Todas as vigas registraram máximas deformações na mesa tracionada coincidindo com os pontos de maiores deslocamentos registrados pelos relógios durante o carregamento do procedimento experimental.

Para a análise das maiores deformações na compressão foram registradas para cada viga da seguinte forma: nas vigas VREF1 e VREF2 o extensômetro (Ext. 3) no meio do vão; na viga V1LD o extensômetro (Ext. 3) próximo da emenda; na viga V1LE o extensômetro (Ext. 1) próximo da emenda; nas vigas V1LM e V1LME o extensômetro de compressão (Ext. 5, Ext. 1) em baixo de uma das reações; a viga V2L o extensômetro (Ext. 1) em baixo de uma das reações; a viga V3L o extensômetro (Ext. 2) em baixo de uma das reações.

As maiores deformações na tração foram registradas para cada viga da seguinte maneira: nas vigas VREF1 e VREF2 o extensômetro (Ext. 14) no meio do vão; na viga V1LD o extensômetro (Ext. 15) na chapa de ligação; na viga V1LE o extensômetro (Ext. 15) na chapa de ligação; nas vigas V1LM e V1LME o extensômetro de tração (Ext. 14, Ext. 13) em baixo de uma das reações; a viga V2L o extensômetro (Ext. 6) no meio do vão; a viga V3L o extensômetro (Ext. 15) na chapa de ligação do meio do vão.

5.3. CARGAS E MODO DE FALHA

Conforme os resultados apresentados na Tabela 4.5, para a carga última (P_u) no instante do colapso de cada viga, os valores da carga última sofreu pouca variação entre as vigas com ligações e sem ligações.

Fazendo a comparação da carga última atingida pela viga de referência (VREF2) sem emenda, com a carga última atingido pelas vigas com uma (V1LD, V1LE), duas (V2L) e três (V3L) ligações, verifica-se que as vigas com uma, duas e três ligações tiveram uma carga última de ruptura aproximadamente 18%, 15% e 26% menor que a viga de referência .

Conforme a NBR 8800:2008 foram calculados os momentos resistentes de cálculos para os estados limites últimos, levando em consideração os modos de falha que as vigas poderiam atingir. A Tabela 5.3 mostra a comparação dos momentos de ensaio x momentos nominais e momentos resistentes de cálculos segundo a NBR 8800:2008.

Tabela 5.3 - Comparação dos Momentos resistentes de ensaio x Momentos resistentes nominal e Momento de cálculos segundo a NBR 8800:2008 para os ensaios das vigas

Viga	P_u (kN)	M_{ensaio} (kN.m)	M_n (kN.m)	M_{Rd} FLA (kN.m)	M_{Rd} FLM (kN.m)	M_{Rd} FLT (kN.m)
VREF1	135,00	82,35	92,35	83,96	83,96	25,96
VREF2	171,25	104,46	92,35	83,96	83,96	25,96
V1LD	138,00	54,18	92,35	83,96	83,96	25,96
V1LE	140,00	85,40	92,35	83,96	83,96	25,96
V1LM	135,00	82,35	92,35	83,96	83,96	25,96
V1LME	133,50	81,43	92,35	83,96	83,96	25,96
V2L	145,20	88,57	92,35	83,96	83,96	25,96
V3L	126,40	77,10	92,35	83,96	83,96	25,96
M_{ensaio} – Momento fletor resistente em relação aos ensaios						
M_n – Momento resistente nominal						
M_{Rd} FLA – Momento fletor resistente de cálculo segundo o anexo G da NBR 8800:2008 para a FLA						
M_{Rd} FLM – Momento fletor resistente de cálculo segundo o anexo G da NBR 8800:2008 para a FLM						
M_{Rd} FLT – Momento fletor resistente de cálculo segundo o anexo G da NBR 8800:2008 para a FLT						

Em relação a quantidade de ligações, o momento resistente de ensaio esta comprovando que a viga não teve muita alteração a seu momento final de resistência à flexão. O que a presença de ligações não altera significativamente a resistência à flexão simples da viga.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1.CONCLUSÕES

Neste estudo analisou-se a capacidade resistente de vigas bi apoiadas em aço constituídas de perfis tipo I laminados de abas paralelas com dois eixos de simetria, sendo dotadas de emendas com parafusos de alta resistência do tipo ASTM A325 de diâmetro 19 mm, estando os modelos solicitados por esforços de flexão simples. Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões baseadas nas análises dos resultados obtidos.

6.1.1. Ensaio de tração nos parafusos

O ensaio à tração dos parafusos apresentaram resultados satisfatórios e precisos como podemos observar no capítulo 4, entretanto, cabe resaltar que varias tentativas foram realizadas para o ensaio a tração dos parafusos.

A princípio retirou-se a cabeça dos parafusos ensaiados e confeccionou vários tipos de soldas em uma barra de aço para aumentar o comprimento dos parafuso, facilitando o travamento do modelo na máquina de tração e assim romper no parafuso, mas quando começava a tracionar o parafuso rompia sempre na solda. A Figura 6.1 apresenta o esquema do parafuso após o ensaio à tração confeccionado com solda.



Figura 6.1– Corpo de prova do parafuso confeccionado com solda após o ensaio

O esquema montado para obter resultados satisfatórios de tração no parafuso foi: utilizando a cabeça do parafuso que foi retirada e abrindo rosca no local da cabeça do parafuso mantendo o seu comprimento original, e esta rosca foi fixada em duas buchas, uma

na parte superior e outra na parte inferior. Desta forma o modelo pode ser fixado na máquina de tração e romper no parafuso como era esperado.

Em fim, os resultados alcançados apontam na direção de que trabalhos futuros possam utilizar de tal estratégia para realização dos ensaios de tração nos parafusos.

6.1.2. Comportamento carga x deslocamento vertical

Todas as vigas com ligações, seja com uma, duas ou três ligações apresentaram máximos deslocamentos verticais, no mínimo 3 vezes mais comparando com as vigas de referência.

Comparando os deslocamentos teóricos com os deslocamentos de ensaios, as vigas de referência registraram os deslocamentos teóricos bem próximos aos de ensaio. Diferentemente as vigas com emendas, principalmente a viga V3L que apresentaram um escorregamento das chapas de ligação durante o carregamento e um deslocamento máximo de até 5 vezes mais que as vigas de referência.

Em relação aos deslocamentos verticais, a viga com três emendas V3L contém uma das emendas no centro da viga, e apresentou um deslocamento maior que as outras vigas da série para um mesmo carregamento.

Considerando os valores de deslocamentos máximos verticais para o estado limite de serviço, determinado pela relação $L/350$ (viga de piso), que são especificados de acordo com o anexo C da NBR 8800:2008. As vigas com emendas apresentaram deslocamento máximo com cargas de 65% de suas respectivas cargas de ruptura, enquanto as vigas VREF1 e VREF2 apresentam o deslocamento máximo com 69% e 81% confirmando a maior rigidez dessas vigas sem ligações.

Em relação à flexão das vigas com e sem emendas não há alteração significativa a capacidade de carga de ruptura, e sim a deslocamentos verticais.

6.1.3. Comportamento carga x deformação específica

O comportamento das curvas elástico linear demonstram que nenhuma região da viga rompeu por escoamento do aço uma vez que nenhum extensômetro atingiu a deformação limite de escoamento (ϵ_y) de suas respectivas chapas, estabelecida através dos ensaios de caracterização do aço.

Apenas a viga V1LE registrou a deformação máxima no meio da chapa de ligação da parte tracionada, apresentando deformação máxima de 90%, bem próxima da deformação limite de escoamento (ϵ_y). Já o restante das vigas apresentaram apenas 20% da deformação máxima em relação a deformação limite de escoamento (ϵ_y).

A viga V1LME registrou a menor deformação máxima comparando com as outras vigas da série para um mesmo carregamento, isto comprova que a instalação de enrijecedores em vigas pode simular vínculo de garfo e diminui a deformação última (ϵ_u) em relação às vigas que não contém enrijecedores.

6.1.4. Carga e modo de falha

Todas as ligações das vigas resistiram ao ensaio à flexão, não sendo constatada nenhuma ruptura nos parafusos e nem na chapa de ligação, apresentando cargas de ruptura entre 74% e 85% para as vigas da série com ligações. Consideravelmente as vigas com ligações não apresentaram cargas de ruptura muito inferiores às vigas de referência, com cargas de ruptura entre 78% e 100%.

A viga V1LME registrou uma menor flambagem lateral com torção (FLT) de 1,55% comparado as outra vigas, confirmando um ótimo comportamento dos enrijecedores instalados em posições pré determinadas da viga.

O modo de falha previsto para todas as vigas ensaiadas consistiu em flambagem lateral com torção (FLT), mas todas as vigas também apresentaram flambagem local da mesa comprimida (FLM).

Comprovando que a quantidade de ligações não é um fator de colapso das vigas, o momento resistente de ensaio esta confirmando que a viga não teve muita alteração a seu momento final de resistência à flexão. O que a presença de ligações não altera significativamente a resistência à flexão simples da viga, considerando os requisitos de um projeto adequado.

6.1.5. Considerações finais

Os resultados deste estudo mostra que em relação aos deslocamentos nas vigas com ligações, são superiores aos da NBR 8800:00 (L/350 viga de piso), mas não mostram que as vigas com ligações parafusadas com parafusos de alta resistência, não são resistentes, o que

comprova a comparação dos cálculos de momentos resistentes dos ensaios e momentos nominais e momentos resistentes pela NBR 8800:2008 levando em consideração os modos de falha. Com isso, é comprovado que se os projetistas desejarem projetar uma estruturas metálicas de grande porte, em que se utiliza vigas constituídas de perfis tipo I laminados de abas paralelas com dois eixos de simetria, sendo dotadas de emendas com parafusos de alta resistência do tipo ASTM A325 de diâmetro 19 mm, estando os modelos solicitados por esforços de flexão simples, ele poderá projetar sem ter problemas de resistência em sua estrutura.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa foi realizada na área de estruturas metálicas na Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. É o primeiro estudo específico com vigas constituídas de perfis tipo I laminados de abas paralelas com dois eixos de simetria, sendo dotadas de emendas com parafusos de alta resistência do tipo ASTM A325 de diâmetro 19 mm, sendo assim, seguem algumas sugestões para futuros trabalhos a serem realizados na mesma linha de pesquisa:

- Realizar ensaios em vigas constituídas de perfis tipo I laminados de abas paralelas com dois eixos de simetria com ligações soldadas.
- Realizar ensaios variando ligações parafusadas em vigas constituídas de perfis tipo I laminados de abas paralelas com dois eixos de simetria e com inércia maior, exemplo W 310 x 38,7.
- Realizar ensaios com vigas de 3 m de comprimento, constituídas de perfis tipo I laminados de abas paralelas fazendo contenção lateral (confeccionando vínculo de garfo ou travando as extremidades da viga), para evitar a flambagem lateral com torção.
- Realizar ensaios de vigas com ligações parafusadas submetidas à flexão simples, possuindo uma boa quantidade de enrijecedores soldadas na região compreendida entre os pontos de aplicação das cargas e o apoio. Verificando o comportamento desta viga em relação ao esforço cortante.

- Realizar simulações numéricas para comparar com os resultados experimentais obtidos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABM: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração - Siderúrgicas lançam produtos para construção civil e soluções de moradia popular. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/news/materias/112-siderurgicas-lancam-produtos-para-construcao-civil-e-solucoes-de-moradia-popular/>>. Acesso em: junho de 2014.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7007:2011** – Aço carbono e microligados para uso estrutural e geral – Procedimento. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14762:2010** - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio: Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6152:2002** – Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente – Procedimento. Rio de Janeiro, 2002.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6362:1982** – Perfis de aço laminado a quente soldados e formados a frio – Procedimento. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15980:2011** – Perfis laminados de aço para uso estrutural — Dimensões e tolerâncias – Procedimento. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8800:2008** - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios – Procedimento. Rio de Janeiro, 2008.

ALMEIDA, A. F. **Análise Experimental de Vigas Constituídas de Perfis Formado a Frio com Emendas Soldadas Submetida à Flexão Simples**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia, UFG, Goiânia, Goiás, 2009.

AISC: AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (1989). Allowable stress design (ASD). Chicago, 1989.

AISC: AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. Specification for Structural Steel Buildings, Chicago, 2005.

AWS: AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.3:1998: Structural Welding Code: Steel.** 1998.

AWS: AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1:2000: Structural Welding Code: Steel.** 2000.

ASTM: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel. ASTM A 572 / A 572M,** West Conshohocken, 2006.

BRAGA, Thomaz dos Mares Guia. **Cronologia do Uso dos Metais.** Belo Horizonte, Usiminas, 1998.

CETLIN, P. R.; HELMAN, H. **Fundamentos da Conformação. Mecânica dos Metais.** 2ª ed., 263 p. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

COOPER, S.E. **Designing steel structures: methods and cases.** Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1985.

EUROCODE 3. **Projecto de Estrutura de Aço, Parte 1-2 Regras Gerais, Verificação da Resistência ao Fogo.** Caparica, Portugal, 2010.

GAYLORD, H. E.; GAYLORD, C. N.; STALLMEYER, J. E. **Design of steel structures.** 3ª Edição. ed. New York: McGraw-Hill, 1992

GOMES, C. A. B. **Resistência à compressão de perfis H laminados de abas paralelas.** Dissertação (Mestrado), UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, 2006.

JÚNIOR, D. S. S. **Estudo do Comportamento de Escórias de Alto-Forno a Carvão Vegetal Produzidas a Partir de Ativação à Quente.** Dissertação (Mestrado), UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2007.

MEYERS, M.A.; CHAWLA, K. 1982. **Princípios de metalurgia mecânica.** São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda., 505 p.

NEVES, O. R.; CAMISASCA, M. M. **Aço Brasil: Uma Viagem Pela Indústria do Aço.** Escritório de Histórias. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2013.

PAULA, G. D. **Estudo Teórico-Experimental de Elementos Comprimidos de aço: Ênfase em Perfis Soldados.** Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Carlos, São Paulo, 2002.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático.** 8.ed. Rio de Janeiro, LTC, 2009.

PRELORENTZOU, P. A. **Um Estudo Sobre Ligações Viga-coluna em Estruturas de Aço.** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Carlos, São Paulo, 1991.

QUITES, A. M.; DUTRA, J. C. **Tecnologia da soldagem a arco voltaico.** Florianópolis: EDEME, 1979.

RCSC: Research Council on Structural Connections. **Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts,** Chicago, 2009.

RIBEIRO, L. F. L. **Estudo do Comportamento Estrutural de Ligações Parafusadas Viga-coluna com Chapa de Topo: Análise Teórico-Experimental,** Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Carlos, São Paulo, 1998.

SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E. **Steel Structures: Design and Behavior: emphasizing load and resistance factor design.** 4. ed. New York: Harper & Row, 1996.

SIDERBRÁS. **Ligações em estruturas metálicas:** publicações técnicas para o desenvolvimento da construção metálica. Brasília: [s.n.], 1988.

SILVA, Ascânio M. F. SANTOS, Perdosvaldo C. **Arquitetura de edifícios em aço.** Apostila do curso de especialização em estruturas metálicas da FUMEC. Belo Horizonte:FUMEC, 2004.

SILVA, A. C. **Estudo de Ligações Parafusadas em Perfis Formados a Frio**. Dissertação (Mestrado), UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, 2006.

SILVA, T. D. A. **Estudo do Comportamento de Vigas Metálicas em Perfis Soldados Tipo “I” com Emendas Soldadas, Submetida à Flexão Simples**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia, UFG, Goiânia, Goiás, 2007.

SOARES, I. R. **Simulação por Elementos Finitos da Etapa de Desbaste na Laminação de Longos**. Dissertação (Mestrado), UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2010.

OLIVEIRA, J. S. **Avaliação Experimental e Teórica do Torque no Laminador de Chapas Grossas da Usiminas**. Dissertação (Mestrado), UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2010.

VALENCIANI, V. C. **Ligações em Estruturas de Aço**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Carlos, São Paulo, 1997.

VIEIRA, G. S. **Análise Experimental de Vigas de seção “I” Compostas de Perfis Formados a Frio com Emendas Soldadas, Submetidas à Flexão Simples**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia, UFG, Goiânia, Goiás, 2010.

APÊNDICE A

A.1 DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Tabela A.1- Deslocamentos verticais da VREF1

Carga (kN)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)	R5 (mm)
2,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,0	0,12	0,17	0,19	0,18	0,09
10,0	0,46	0,71	0,76	0,80	0,46
20,0	0,75	1,43	1,54	1,47	0,79
30,0	1,10	2,17	2,33	2,21	1,20
40,0	1,69	2,93	3,14	2,98	1,59
50,0	1,97	3,57	3,84	3,65	1,96
60,0	2,26	4,31	4,64	4,42	2,36
70,0	2,67	5,06	5,41	5,15	2,74
80,0	3,13	5,87	6,27	5,95	3,16
90,0	3,46	6,62	7,07	6,75	3,53
100,0	3,96	7,33	7,84	7,47	3,89
110,0	4,36	8,09	8,69	8,26	4,30
120,0	4,75	8,84	9,53	9,05	4,64
130,0	5,09	9,75	10,55	10,15	5,02
P_u = 135 kN					

Tabela A.2- Deslocamentos verticais da VREF2

Carga (kN)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)	R5 (mm)
2,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,0	0,02	0,08	0,12	0,08	0,04
10,0	0,28	0,48	0,53	0,46	0,25
20,0	0,75	1,25	1,03	1,20	0,67
30,0	1,23	2,04	2,15	1,95	1,09
40,0	1,65	2,75	2,89	2,63	1,47
50,0	2,05	3,43	3,64	3,32	2,84
60,0	2,46	4,15	4,35	4,00	3,22
70,0	2,85	4,86	5,07	4,68	3,57
80,0	3,25	5,55	5,79	5,34	3,95
90,0	3,65	6,27	6,54	6,04	4,31
100,0	4,05	6,97	7,27	6,72	4,67
110,0	4,44	7,67	7,98	7,41	5,04
120,0	4,82	8,35	8,69	8,08	5,38
130,0	5,23	9,04	9,41	8,76	5,77
140,0	5,70	9,92	10,30	9,59	6,20
150,0	6,05	10,30	11,02	10,24	6,52
160,0	6,70	11,88	12,35	11,43	7,17
P_u = 171,25 kN					

Tabela A.3- Deslocamentos verticais da V1LD

Carga (kN)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)	R5 (mm)
2,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,0	0,00	0,12	0,13	0,14	0,08
10,0	0,03	0,41	0,44	0,43	0,25
20,0	0,36	1,16	1,22	1,18	0,65
30,0	0,74	1,90	1,96	1,88	1,10
40,0	2,06	4,23	4,00	3,63	1,96
50,0	3,98	7,58	6,94	6,28	3,10
60,0	5,45	10,02	9,09	7,93	3,97
70,0	7,91	13,87	12,26	10,82	6,39
80,0	9,59	16,78	14,81	12,84	7,39
90,0	11,36	19,77	17,48	15,17	8,49
100,0	12,59	21,88	19,41	16,90	9,31
110,0	13,68	23,84	21,20	18,34	10,04
120,0	14,96	26,04	23,23	20,09	10,89
130,0	16,17	28,28	25,28	21,94	12,84
P_u = 138 kN					

Tabela A.4- Deslocamentos verticais da V1LE

Carga (kN)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)	R5 (mm)
2,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,0	0,03	0,07	0,15	0,05	0,05
10,0	0,23	0,40	0,34	0,39	0,25
20,0	0,71	1,17	1,15	1,18	0,70
30,0	1,12	1,91	1,99	2,05	2,22
40,0	2,85	5,55	6,09	6,05	5,38
50,0	4,62	9,53	11,53	9,80	7,67
60,0	6,16	12,85	15,52	13,93	11,42
70,0	7,09	14,84	17,75	16,39	11,75
80,0	7,91	16,42	19,63	18,35	12,85
90,0	8,72	17,99	21,52	20,41	14,10
100,0	9,52	19,68	23,30	22,41	15,18
110,0	10,25	21,19	24,97	24,22	16,20
120,0	11,10	22,81	26,90	26,26	18,40
130,0	12,10	24,67	28,81	28,61	20,73
140,0	14,01	28,03	31,15	32,06	22,33
P_u = 140 kN					

Tabela A.5- Deslocamentos verticais da V1LM

Carga (kN)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)	R5 (mm)
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,5	0,09	0,05	0,16	0,18	0,05
4,0	0,15	0,13	0,31	0,31	0,13
6,0	0,24	0,17	0,47	0,46	0,21
8,0	0,34	0,35	0,67	0,63	0,32
10,0	0,42	0,50	0,84	0,77	0,41
12,0	0,52	0,67	1,03	0,93	0,50
14,0	0,61	0,85	1,22	1,21	0,61
16,0	0,72	1,02	1,42	1,29	0,69
18,0	0,83	1,22	1,64	1,48	0,79
20,0	0,94	1,43	1,88	1,70	0,89
22,5	1,07	1,70	2,18	1,98	1,05
25,0	1,25	2,02	2,57	2,35	1,21
27,5	1,46	2,44	3,10	2,78	1,43
30,0	1,79	3,18	4,10	3,68	1,89
32,5	2,71	5,24	6,83	6,03	2,92
35,0	4,73	10,70	14,26	12,62	5,76
40,0	6,36	12,79	17,55	13,44	6,07
42,5	6,58	18,31	17,17		6,19
45,0	7,17		18,47		7,10
47,5	7,37		18,90		7,27
50,0	7,53		19,31		7,44
55,0	7,95		20,27		7,83
60,0	8,37		21,26		8,22
65,0	8,81		22,31		8,67
70,0	9,33		23,57		9,16
75,0	9,87		24,90		9,69
80,0	10,21		25,70		10,05
85,0	10,73		27,68		10,54
90,0	11,17		28,72		10,91
95,0	11,61		29,82		11,41
100,0	12,15		31,07		11,80
105,0			32,30		12,31
110,0			33,67		12,90
115,0			35,47		13,61
120,0			37,58		
125,0			39,37		
130,0			41,45		
135,0			44,03		
P_u = 135,00 kN					

Tabela A.6- Deslocamentos verticais da V1LME

Carga (kN)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)	R5 (mm)
2,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,0	0,20	0,28	0,31	0,29	0,13
10,0	0,61	0,82	0,84	0,79	0,41
20,0	1,38	2,01	2,13	1,90	1,03
30,0	3,49	5,87	6,29	5,90	3,18
40,0	6,96	13,54	15,84	13,65	6,48
50,0	7,83	15,85	17,04	15,79	6,98
60,0	8,06	16,66	17,96	16,65	7,21
70,0	8,93	18,38	19,87	18,39	8,08
80,0	9,93	20,35	22,15	20,35	9,04
90,0	10,93	22,22	24,28	22,29	10,08
100,0	11,85	24,19	26,59	24,23	9,95
110,0	13,15	26,74	29,48	26,81	12,21
120,0	14,58	29,76	33,04	29,86	13,73
130,0	16,97	30,52	39,31	30,11	16,18
P_u = 133,50 kN					

Tabela A.7- Deslocamentos verticais da V2L

Carga (kN)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)	R5 (mm)
2,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,0	0,00	0,06	0,10	0,11	0,00
10,0	0,00	0,16	0,24	0,26	0,00
20,0	0,00	0,50	0,59	0,59	0,11
30,0	0,00	1,20	1,33	1,31	0,47
40,0	0,39	1,96	2,12	2,07	0,92
50,0	0,90	2,78	2,99	2,91	1,37
60,0	1,47	3,84	4,09	3,95	1,95
70,0	2,14	5,02	5,21	5,16	2,63
80,0	7,70	14,09	14,70	13,67	6,77
90,0	12,12	22,63	22,73	22,05	11,27
100,0	14,79	27,53	27,59	26,70	13,79
110,0	17,14	31,83	31,93	31,04	15,89
120,0	19,82	36,25	36,90	34,55	17,90
130,0	21,62	39,46	39,58	37,95	19,67
140,0	23,89	42,69	42,31	41,07	21,37
P_u = 145,20 kN					

Tabela A.8- Deslocamentos verticais da V3L

Carga (kN)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)	R5 (mm)
2,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,0	0,00	0,07	0,05	0,11	0,00
10,0	0,00	0,18	0,16	0,21	0,00
20,0	0,00	0,46	0,44	0,48	0,00
30,0	0,39	1,15	1,17	1,15	0,32
40,0	0,86	1,96	1,98	1,92	0,77
50,0	1,35	2,87	2,94	2,84	1,29
60,0	1,96	3,95	4,10	3,96	1,87
70,0	2,60	5,23	5,57	5,47	2,60
80,0	4,40	9,35	11,00	10,36	4,90
90,0	10,56	22,59	26,81	23,50	10,57
100,0	12,14	25,98	31,03	27,00	13,54
110,0	13,58	36,63	40,73	37,50	14,14
120,0	14,25	39,94	44,57	41,29	15,32
P_u = 126,40 kN					

APÊNDICE B

B.1 DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS

Tabela B.1- Deformações específicas VREF1

Deformações Viga VREF1													
Carga (kN)	Ext 1	Ext 2	Ext 3	Ext 5	Ext 6	Ext 7	Ext 8	Ext 10	Ext 11	Ext 12	Ext 13	Ext 14	Ext 15
2,5	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
5,0	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,00	-0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02
10,0	-0,06	-0,08	-0,07	-0,06	-0,06	0,01	0,00	-0,02	0,09	0,09	0,08	0,09	0,09
20,0	-0,15	-0,19	-0,19	-0,14	-0,13	0,02	-0,01	-0,01	0,19	0,21	0,20	0,21	0,20
30,0	-0,25	-0,27	-0,30	-0,22	-0,25	0,02	-0,01	0,00	0,29	0,32	0,30	0,33	0,32
40,0	-0,34	-0,37	-0,40	-0,31	-0,34	0,02	-0,01	0,01	0,39	0,44	0,42	0,45	0,44
50,0	-0,42	-0,45	-0,48	-0,39	-0,43	0,03	-0,01	-0,02	0,49	0,54	0,52	0,56	0,54
60,0	-0,50	-0,53	-0,61	-0,48	-0,41	0,04	-0,01	0,02	0,59	0,65	0,63	0,68	0,66
70,0	-0,59	-0,61	-0,72	-0,56	-0,57	0,04	-0,02	0,03	0,69	0,77	0,74	0,79	0,77
80,0	-0,69	-0,70	-0,85	-0,65	-0,69	0,05	-0,02	0,04	0,78	0,89	0,86	0,92	0,89
90,0	-0,77	-0,78	-0,95	-0,73	-0,74	0,05	-0,02	0,06	0,88	1,00	0,97	1,03	1,00
100,0	-0,86	-0,85	-1,07	-0,80	-0,85	0,06	-0,03	0,07	0,97	1,11	1,08	1,14	1,11
110,0	-0,95	-0,93	-1,18	-0,87	-0,93	0,07	-0,04	0,10	1,07	1,23	1,19	1,26	1,23
120,0	-1,04	-1,01	-1,28	-0,95	-1,04	0,10	-0,05	0,13	1,19	1,35	1,30	1,37	1,34
130,0	-1,19	-1,18	-1,50	-0,77	-1,16	0,26	-0,12	0,35	1,30	1,45	1,42	1,51	1,42

Tabela B.2- Deformações específicas VREF2

Deformações Viga VREF2														
Carga (kN)	Ext 1	Ext 2	Ext 3	Ext 4	Ext 5	Ext 7	Ext 8	Ext 9	Ext 10	Ext 11	Ext 12	Ext 13	Ext 14	Ext15
2,5	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
5,0	-0,02	0,01	-0,02	0,03	-0,02	0,01	0,02	0,02	0,00	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03
10,0	-0,06	-0,03	-0,08	0,02	-0,07	0,01	0,03	0,03	0,01	0,07	0,09	0,09	0,09	0,09
20,0	-0,15	-0,13	-0,19	-0,02	-0,15	0,04	0,05	0,07	0,03	0,17	0,20	0,22	0,21	0,20
30,0	-0,24	-0,22	-0,30	-0,09	-0,25	0,03	0,07	0,10	0,04	0,27	0,31	0,33	0,33	0,31
40,0	-0,33	-0,32	-0,41	-0,16	-0,35	0,04	0,10	0,13	0,05	0,36	0,42	0,44	0,44	0,42
50,0	-0,42	-0,42	-0,52	-0,23	-0,45	0,05	0,12	0,17	0,06	0,44	0,53	0,56	0,56	0,53
60,0	-0,51	-0,52	-0,64	-0,29	-0,56	0,06	0,14	0,19	0,08	0,54	0,65	0,68	0,68	0,65
70,0	-0,60	-0,62	-0,74	-0,36	-0,67	0,07	0,16	0,22	0,09	0,63	0,75	0,79	0,80	0,76
80,0	-0,69	-0,72	-0,86	-0,37	-0,76	0,08	0,18	0,26	0,11	0,72	0,87	0,91	0,91	0,86
90,0	-0,78	-0,82	-0,97	-0,41	-0,87	0,09	0,20	0,29	0,12	0,82	0,97	1,03	1,03	0,98
100,0	-0,87	-0,92	-1,08	-0,48	-0,98	0,10	0,22	0,33	0,14	0,92	1,10	1,15	1,15	1,09
110,0	-0,96	-1,02	-1,19	-0,50	-1,06	0,12	0,25	0,36	0,15	1,02	1,21	1,27	1,28	1,21
120,0	-1,05	-1,13	-1,31	-0,60	-1,16	0,13	0,27	0,39	0,17	1,11	1,31	1,39	1,39	1,31
130,0	-1,13	-1,23	-1,42	-0,70	-1,26	0,14	0,29	0,42	0,18	1,20	1,42	1,50	1,51	1,43
140,0	-1,24	-1,37	-1,56	-0,79	-1,39	0,15	0,32	0,46	0,20	1,30	1,52	1,63	1,65	1,55
150,0	-1,32	-1,45	-1,66	-0,83	-1,46	0,19	0,37	0,50	0,23	1,39	1,58	1,58	1,68	1,52
160,0	-1,42	-1,61	-1,83	-0,92	-1,57	0,25	0,50	0,67	0,32	1,48	1,52	1,46	2,87	1,47
170,0	-1,20	-1,40	-0,79	0,25	-0,38	0,85	0,31	0,50	0,67	0,80	0,60	0,45	2,61	0,84

Tabela B.3- Deformações específicas V1LD

Deformações Viga V1LD															
Carga (kN)	Ext 2	Ext 3	Ext 4	Ext 5	Ext 6	Ext 7	Ext 8	Ext 9	Ext 10	Ext 11	Ext 12	Ext 13	Ext 14	Ext15	Ext16
2,5	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
5,0	-0,02	-0,02	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,02	0,01	-0,02	-0,01	0,00	0,01	0,03	0,00
10,0	-0,07	-0,07	0,00	0,02	0,00	0,07	0,00	0,07	0,05	-0,04	-0,04	-0,01	0,02	0,04	0,02
20,0	-0,17	-0,17	0,00	0,03	0,01	0,16	0,04	0,17	0,15	-0,07	-0,09	0,00	0,06	0,09	0,05
30,0	-0,27	-0,27	0,00	0,05	0,00	0,25	0,02	0,25	0,23	-0,10	-0,15	-0,01	0,09	0,13	0,07
40,0	-0,37	-0,37	0,00	0,06	0,00	0,34	0,03	0,35	0,32	-0,05	-0,20	-0,02	0,10	0,10	0,09
50,0	-0,45	-0,47	0,04	0,08	0,01	0,41	0,04	0,44	0,41	-0,06	-0,28	0,03	0,09	0,17	0,10
60,0	-0,55	-0,58	0,08	0,10	0,01	0,49	0,04	0,54	0,49	-0,08	-0,30	0,06	0,10	0,33	0,11
70,0	-0,65	-0,67	0,12	0,12	0,01	0,57	0,05	0,64	0,58	-0,09	-0,33	0,07	0,12	0,59	0,10
80,0	-0,74	-0,77	0,13	0,13	0,01	0,65	0,06	0,74	0,66	-0,08	-0,33	0,09	0,22	0,90	0,14
90,0	-0,84	-0,87	0,14	0,14	0,01	0,73	0,06	0,83	0,74	-0,07	-0,33	0,11	0,33	1,37	0,17
100,0	-0,93	-0,97	0,14	0,16	0,01	0,82	0,07	0,93	0,82	-0,08	-0,35	0,12	0,45	1,77	0,23
110,0	-1,03	-1,07	0,15	0,18	0,02	0,91	0,08	1,04	0,91	-0,07	-0,36	0,12	0,56	2,15	0,32
120,0	-1,11	-1,17	0,14	0,19	0,02	0,99	0,08	1,13	1,00	-0,07	-0,38	0,11	0,70	2,57	0,40
130,0	-1,21	-1,25	0,13	0,20	0,02	1,06	0,08	1,23	1,08	-0,07	-0,41	0,10	0,86	3,04	0,50

Tabela B.4- Deformações específicas V1LE

Deformações Viga V1LE															
Carga (kN)	Ext 1	Ext 2	Ext 3	Ext 4	Ext 6	Ext 7	Ext 8	Ext 9	Ext 10	Ext 11	Ext 12	Ext 13	Ext 14	Ext15	Ext16
2,5	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
5,0	-0,01	-0,02	-0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
10,0	-0,05	-0,06	-0,05	0,09	0,01	0,08	0,02	0,08	0,09	-0,02	-0,02	0,01	0,03	0,04	0,03
20,0	-0,15	-0,17	-0,11	-0,04	0,01	0,20	0,02	0,20	0,20	-0,06	-0,05	0,02	0,08	0,09	0,07
30,0	-0,25	-0,28	-0,09	-0,02	0,01	0,31	0,03	0,33	0,33	-0,10	-0,09	0,02	0,12	0,11	0,12
40,0	-0,32	-0,35	-0,20	-0,03	0,01	0,42	0,05	0,43	0,44	-0,17	-0,03	0,05	0,17	0,48	0,09
50,0	-0,46	-0,89	-0,30	0,09	0,00	0,53	0,10	0,55	0,57	-0,16	-0,01	0,12	0,18	1,27	0,18
60,0	-0,49	-0,58	-0,40	-0,06	0,01	0,65	0,14	0,67	0,65	-0,16	-0,02	0,12	0,23	1,58	0,26
70,0	-0,64	-0,69	-0,39	-0,06	0,00	0,76	0,15	0,78	0,77	-0,18	-0,01	0,10	0,31	2,11	0,35
80,0	-0,73	-0,79	-0,46	-0,07	0,00	0,88	0,17	0,91	0,89	-0,18	0,00	0,08	0,39	2,47	0,44
90,0	-0,84	-0,90	-0,56	-0,07	-0,01	0,99	0,18	1,02	1,01	-0,17	0,00	0,07	0,49	2,79	0,57
100,0	-0,93	-1,00	-0,59	-0,06	-0,02	1,09	0,18	1,14	1,11	-0,17	0,00	0,06	0,61	3,19	0,72
110,0	-1,05	-1,11	-0,59	-0,31	-0,03	1,20	0,18	1,25	1,20	-0,17	-0,01	0,06	0,74	3,69	0,89
120,0	-1,15	-1,21	-0,69	-0,41	-0,04	1,31	0,19	1,39	1,31	-0,18	0,00	0,06	0,88	4,44	1,09
130,0	-1,28	-1,30	-0,76	-0,43	-0,08	1,41	0,20	1,52	1,41	-0,22	0,00	0,09	0,97	5,45	1,27
140,0	-1,36	-1,13	-0,28	-0,54	-0,28	1,52	0,17	1,58	1,60	-0,30	0,08	0,21	0,98	6,94	1,29

Tabela B.5- Deformações específicas V1LM

Deformações Viga V1LM												
Carga (kN)	Ext 1	Ext 2	Ext 3	Ext 4	Ext 5	Ext 6	Ext 8	Ext 9	Ext 11	Ext 12	Ext 14	Ext 16
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,5	-0,03	0	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,01	0,00	-0,01	0,01	0,02	0,01
4,0	-0,05	0,00	-0,02	-0,01	-0,03	-0,03	-0,02	0,01	-0,03	0,02	0,03	0,00
6,0	-0,05	0,00	-0,03	-0,01	-0,05	-0,04	-0,05	0,01	0,09	0,02	0,04	-0,01
8,0	-0,10	-0,01	-0,04	-0,03	-0,08	-0,06	-0,07	0,01	0,08	0,02	0,06	-0,01
10,0	-0,11	-0,02	-0,05	-0,03	-0,10	-0,08	-0,08	0,01	0,07	0,02	0,08	0,00
12,0	-0,11	-0,03	-0,06	-0,03	-0,12	-0,09	-0,10	0,01	0,06	0,03	0,09	-0,01
14,0	-0,13	-0,04	-0,07	-0,04	-0,14	-0,11	-0,11	0,01	0,05	0,03	0,11	-0,01
16,0	-0,16	-0,06	-0,08	-0,04	-0,16	-0,13	-0,13	0,02	0,02	0,04	0,13	-0,01
18,0	-0,19	-0,07	-0,08	-0,04	-0,18	-0,14	-0,13	0,02	0,22	0,04	0,14	-0,01
20,0	-0,20	-0,09	-0,09	-0,05	-0,20	-0,16	-0,14	0,02	0,15	0,04	0,16	-0,01
22,5	-0,24	-0,10	-0,10	-0,06	-0,24	-0,18	-0,15	0,03	0,13	0,05	0,18	-0,01
25,0	-0,24	-0,13	-0,12	-0,06	-0,26	-0,19	-0,16	0,03	0,12	0,05	0,20	-0,01
27,5	-0,28	-0,15	-0,13	-0,07	-0,30	-0,22	-0,17	0,03	0,12	0,05	0,23	-0,01
30,0	-0,29	-0,17	-0,14	-0,08	-0,32	-0,24	-0,18	0,04	0,10	0,06	0,26	-0,01
32,5	-0,32	-0,19	-0,15	-0,10	-0,38	-0,25	-0,19	0,05	0,05	0,07	0,28	0,00
35,0	-0,33	-0,21	-0,15	-0,11	-0,39	-0,27	-0,19	0,06	0,04	0,07	0,28	0,00
40,0	-0,39	-0,22	-0,15	-0,10	-0,45	-0,31	-0,21	0,08	0,07	0,08	0,34	0,00
42,5	-0,40	-0,26	-0,13	-0,10	-0,48	-0,32	-0,21	0,09	0,03	0,08	0,36	0,00
45,0	-0,42	-0,27	-0,13	-0,09	-0,50	-0,34	-0,22	0,10	0,26	0,09	0,38	0,00
47,5	-0,44	-0,27	-0,13	-0,10	-0,53	-0,37	-0,23	0,10	0,26	0,10	0,40	0,01
50,0	-0,47	-0,29	-0,13	-0,10	-0,55	-0,38	-0,23	0,11	0,26	0,11	0,42	0,01
55,0	-0,50	-0,31	-0,13	-0,10	-0,61	-0,43	-0,24	0,13	0,25	0,12	0,46	0,01
60,0	-0,55	-0,36	-0,14	-0,11	-0,68	-0,47	-0,25	0,16	0,25	0,12	0,50	0,01
65,0	-0,59	-0,42	-0,15	-0,11	-0,72	-0,51	-0,27	0,18	0,25	0,13	0,55	0,01
70,0	-0,64	-0,45	-0,15	-0,12	-0,78	-0,55	-0,28	0,19	0,24	0,14	0,60	0,02
75,0	-0,69	-0,50	-0,15	-0,12	-0,84	-0,60	-0,30	0,20	0,20	0,16	0,65	0,02
80,0	-0,73	-0,55	-0,15	-0,12	-0,88	-0,64	-0,31	0,20	0,30	0,16	0,69	0,03
85,0	-0,78	-0,56	-0,15	-0,12	-0,93	-0,68	-0,32	0,20	0,29	0,18	0,73	0,03
90,0	-0,83	-0,61	-0,16	-0,13	-0,99	-0,73	-0,33	0,21	0,28	0,19	0,78	0,04
95,0	-0,87	-0,66	-0,17	-0,13	-1,04	-0,77	-0,33	0,21	0,28	0,19	0,83	0,04
100,0	-0,92	-0,70	-0,17	-0,12	-1,07	-0,80	-0,35	0,21	0,27	0,21	0,87	0,05
105,0	-0,96	-0,74	-0,17	-0,13	-1,12	-0,84	-0,36	0,21	0,24	0,22	0,90	0,05
110,0	-1,02	-0,79	-0,19	-0,13	-1,17	-0,89	-0,37	0,21	0,23	0,23	0,95	0,06
115,0	-1,05	-0,85	-0,20	-0,13	-1,21	-0,93	-0,38	0,22	0,23	0,24	0,99	0,06
120,0	-1,12	-0,88	-0,21	-0,14	-1,26	-0,97	-0,40	0,25	0,72	0,26	1,03	0,07
125,0	-1,17	-0,95	-0,23	-0,15	-1,31	-1,00	-0,41	0,26	0,67	0,27	1,06	0,07
130,0	-1,22	-1,00	-0,26	-0,16	-1,37	-1,04	-0,42	0,28	1,17	0,30	1,06	0,07
135,0	-1,31	-1,05	-0,30	-0,17	-1,48	-1,09	-0,43	0,30	1,06	0,32	1,00	0,08

Tabela B.6- Deformações específicas V1LME

Deformações Viga V1LME																	
Carga (kN)	Ext 1	Ext 2	Ext 3	Ext 4	Ext 5	Ext 6	Ext 7	Ext 8	Ext 9	Ext 10	Ext 11	Ext 12	Ext 13	Ext 14	Ext15	Ext16	Ext17
2,5	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
5,0	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	-0,07	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01
10,0	-0,02	-0,01	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	-0,10	0,00	0,00	0,00	0,03	0,07	0,02	0,02	0,05	0,02
20,0	-0,09	-0,02	-0,01	0,19	0,00	0,00	0,01	-0,09	-0,01	0,00	0,00	0,06	0,16	0,04	0,04	0,12	0,05
30,0	-0,17	-0,02	-0,01	0,16	0,00	-0,01	-0,02	-0,09	0,00	0,00	0,00	0,09	0,25	0,03	0,05	0,20	0,07
40,0	-0,27	-0,02	-0,01	0,06	-0,01	-0,02	-0,04	-0,05	0,00	0,00	0,02	0,13	0,34	0,04	0,06	0,26	0,10
50,0	-0,35	-0,02	-0,01	0,00	0,00	-0,02	-0,07	-0,06	0,01	0,00	0,02	0,16	0,41	0,10	0,12	0,33	0,12
60,0	-0,41	0,01	0,01	-0,06	0,02	-0,01	-0,06	0,49	-0,06	0,01	0,00	0,19	0,50	0,16	0,19	0,39	0,14
70,0	-0,50	0,00	0,00	-0,13	0,02	0,00	-0,05	0,54	-0,07	0,01	0,02	0,22	0,58	0,21	0,25	0,45	0,17
80,0	-0,58	0,00	0,00	-0,20	0,02	-0,01	-0,05	0,66	-0,06	0,02	0,01	0,27	0,66	0,30	0,34	0,52	0,20
90,0	-0,66	0,00	0,01	-0,30	0,02	-0,01	-0,05	0,68	-0,05	0,02	0,03	0,31	0,76	0,37	0,44	0,59	0,22
100,0	-0,77	0,00	0,00	-0,42	0,02	-0,01	-0,06	0,53	-0,06	0,02	0,01	0,34	0,83	0,41	0,54	0,66	0,24
110,0	-0,86	-0,01	0,00	-0,55	0,02	-0,01	-0,08	0,48	-0,06	0,02	0,01	0,38	0,93	0,42	0,64	0,73	0,26
120,0	-0,94	-0,02	-0,01	-0,69	0,02	-0,01	-0,11	0,44	-0,06	0,03	0,01	0,42	1,03	0,42	0,73	0,81	0,28
130,0	-1,03	-0,05	-0,02	-0,95	0,03	0,01	-0,15	0,43	-0,06	0,06	-0,01	0,47	1,09	0,44	0,77	0,85	0,29

Tabela B.7- Deformações específicas V2L

Deformações Viga V2L															
Carga (kN)	Ext 1	Ext 2	Ext 3	Ext 4	Ext 5	Ext 6	Ext 7	Ext 8	Ext 9	Ext 10	Ext 11	Ext 12	Ext 14	Ext16	Ext17
0,95	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
2,50	0,00	-0,05	0,02	0,01	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,01	0,03	0,02	0,00	0,02	0,02
5,00	-0,01	-0,09	-0,01	0,01	0,06	0,06	0,04	0,00	-0,01	0,02	0,04	0,04	-0,01	0,04	0,03
10,00	-0,03	-0,15	-0,04	0,03	0,12	0,12	0,08	-0,01	-0,02	0,01	0,06	0,06	-0,03	0,05	0,07
20,00	-0,12	-0,25	-0,11	0,03	0,23	0,23	0,15	-0,04	-0,07	0,01	0,11	0,10	-0,07	0,10	0,09
30,00	-0,20	-0,36	-0,18	0,03	0,33	0,34	0,22	-0,07	-0,12	0,00	0,16	0,14	-0,11	0,14	0,13
40,00	-0,29	-0,40	-0,24	0,04	0,45	0,46	0,29	-0,10	-0,16	0,00	0,20	0,17	-0,14	0,17	0,16
50,00	-0,37	-0,51	-0,31	0,05	0,55	0,56	0,36	-0,13	-0,20	-0,01	0,25	0,20	-0,18	0,20	0,19
60,00	-0,46	-0,66	-0,37	0,05	0,67	0,68	0,44	-0,15	-0,23	-0,01	0,29	0,22	-0,20	0,22	0,21
70,00	-0,54	-0,76	-0,43	0,06	0,76	0,77	0,49	-0,10	-0,35	0,05	0,19	0,24	-0,23	0,24	0,22
80,00	-0,67	-0,88	-0,48	0,07	0,84	0,89	0,56	-0,14	-0,40	0,06	0,30	0,22	-0,13	0,30	0,26
90,00	-0,74	-0,98	-0,52	0,09	0,94	1,01	0,63	-0,15	-0,45	0,10	0,40	0,28	-0,12	0,33	0,35
100,00	-0,83	-1,09	-0,57	0,10	1,03	1,12	0,71	-0,15	-0,51	0,11	0,48	0,30	-0,13	0,37	0,43
110,00	-0,91	-1,12	-0,65	0,12	1,14	1,23	0,76	-0,15	-0,56	0,10	0,59	0,37	-0,15	0,41	0,52
120,00	-1,03	-1,21	-0,70	0,13	1,24	1,36	0,83	-0,16	-0,58	0,06	0,74	0,49	-0,17	0,51	0,69
130,00	-1,15	-1,32	-0,75	0,14	1,31	1,47	0,89	-0,18	-0,62	0,02	0,84	0,57	-0,18	0,61	0,87
140,00	-1,31	-1,39	-0,78	0,15	1,38	1,59	0,92	-0,20	-0,67	-0,05	0,96	0,65	-0,18	0,70	1,08
145,20	-1,63	-1,24	-0,44	0,08	1,36	1,57	0,77	-0,21	-0,50	-0,36	1,05	0,67	-0,06	0,72	1,24

Tabela B.8- Deformações específicas V3L

Deformações Viga V3L																
Carga (kN)	Ext 1	Ext 2	Ext 3	Ext 4	Ext 5	Ext 6	Ext 7	Ext 8	Ext 9	Ext 10	Ext 11	Ext 12	Ext 14	Ext15	Ext16	Ext17
1,35	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
2,50	-0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,01	0,00	-0,01	-0,01	0,01	0,00	-0,01
5,00	-0,03	-0,03	0,01	0,00	0,02	0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,01	0,01	-0,02	0,00	0,02	0,01	-0,02
10,00	-0,08	-0,08	0,02	0,00	0,06	0,05	-0,02	-0,03	0,00	0,04	0,03	-0,03	0,00	0,06	0,03	-0,04
20,00	-0,19	-0,17	0,03	0,02	0,13	0,12	-0,06	-0,06	0,00	0,07	0,06	-0,05	0,00	0,12	0,07	-0,07
30,00	-0,27	-0,27	0,06	0,03	0,19	0,19	-0,10	-0,10	-0,01	0,12	0,09	-0,10	0,01	0,19	0,12	-0,10
40,00	-0,36	-0,36	0,08	0,05	0,28	0,26	-0,13	-0,13	-0,01	0,16	0,12	-0,12	0,02	0,25	0,15	-0,14
50,00	-0,45	-0,46	0,10	0,07	0,35	0,33	-0,16	-0,16	-0,01	0,19	0,15	-0,15	0,04	0,32	0,18	-0,16
60,00	-0,54	-0,56	0,12	0,08	0,42	0,40	-0,19	-0,20	-0,01	0,23	0,18	-0,18	0,08	0,37	0,21	-0,20
70,00	-0,65	-0,64	0,18	0,12	0,47	0,45	-0,22	-0,23	-0,02	0,28	0,19	-0,19	0,23	0,35	0,23	-0,21
80,00	-0,73	-0,74	0,23	0,18	0,55	0,51	-0,23	-0,24	-0,01	0,28	0,21	-0,20	0,29	0,48	0,33	-0,21
90,00	-0,82	-0,83	0,28	0,23	0,62	0,58	-0,26	-0,29	-0,01	0,38	0,25	-0,23	0,24	0,68	0,35	-0,28
100,00	-0,98	-1,00	0,35	0,29	0,71	0,68	-0,25	-0,39	0,06	0,40	0,31	-0,28	0,21	0,87	0,47	-0,27
110,00	-1,08	-1,13	0,39	0,37	0,76	0,71	-0,24	-0,41	0,09	0,47	0,33	-0,30	0,18	1,04	0,57	-0,29
120,00	-1,23	-1,24	0,49	0,48	0,84	0,78	-0,24	-0,43	0,05	0,53	0,39	-0,33	0,17	1,27	0,70	-0,32
126,40	-0,94	-0,83	0,81	0,87	0,63	0,53	-0,19	-0,32	0,00	0,56	0,39	-0,28	0,13	1,34	0,66	-0,17

APÊNDICE C

Os deslocamentos verticais instalados nas vigas para medir a torção da viga registrados pelos LVDT's são apresentados nas Tabelas C.1 a C.8.

Tabela C.1- Deslocamentos verticais da VREF1

Carga (kN)	LVDT-1 (mm)	LVDT-2 (mm)
2,5	0	0
5,0	0,000293	-0,013051
10,0	-0,002099	-0,035604
20,0	-0,058886	-0,05288
30,0	-0,100411	-0,070644
40,0	-0,146493	-0,093957
50,0	-0,191257	-0,106807
60,0	-0,264872	-0,127939
70,0	-0,349236	-0,154742
80,0	-0,450026	-0,192299
90,0	-0,534713	-0,234953
100,0	-0,602039	-0,300994
110,0	-0,70731	-0,393738
120,0	-0,849347	-0,533736
130,0	-1,33224	-1,083888
135,0	2,882665	-1,395311
P_u = 135 kN		

Tabela C.2- Deslocamentos verticais da VREF2

Carga (kN)	LVDT-1 (mm)	LVDT-2 (mm)
2,50	0	0
5,00	0,003867	-0,003517
10,00	0,045309	-0,018024
20,00	0,058899	-0,034317
30,00	0,066903	-0,040265
40,00	0,093798	-0,062389
50,00	0,109844	-0,092374
60,00	0,107491	-0,103003
70,00	0,100935	-0,115882
80,00	0,100225	-0,143552
90,00	0,09716	-0,184102
100,00	0,051968	-0,204054
110,00	-0,056169	-0,24441
120,00	-0,173784	-0,306114
130,00	-0,285308	-0,394339
140,00	-0,478048	-0,539081
150,00	-0,685246	-0,708896
160,00	-1,416111	-1,189726
171,25	10,462791	-4,117107
P_u = 171,25 kN		

Tabela C.3- Deslocamentos verticais da V1LD

Carga (kN)	LVDT-1 (mm)	LVDT-2 (mm)
2,5	0	0
5,0	0,0005993	0,0005993
10,0	0,0019779	0,0019779
20,0	0,0022433	0,0022433
30,0	0,0010083	0,0010083
40,0	-0,0044959	-0,0044959
50,0	-0,0122086	-0,0122086
60,0	-0,0929471	-0,0929471
70,0	-0,2523735	-0,2523735
80,0	-0,3671407	-0,3671407
90,0	-0,5132944	-0,5132944
100,0	-0,7404795	-0,7404795
110,0	-1,1547633	-1,1547633
120,0	-1,683029	-1,683029
130,0	-2,5842958	-2,5842958
P_u = 138,0 kN		

Tabela C.4- Deslocamentos verticais da V1LE

Carga (kN)	LVDT-1 (mm)	LVDT-2 (mm)
2,5	0	0
5,0	-0,000906	-3,9E-05
10,0	-0,002652	-0,001578
20,0	-0,003337	-0,002405
30,0	-0,009324	-0,002974
40,0	-0,073743	-0,000879
50,0	0,002365	-0,05882
60,0	-0,016151	-0,164203
70,0	-0,197137	-0,229863
80,0	-0,30018	-0,282025
90,0	-0,440527	-0,325057
100,0	-0,581391	-0,397791
110,0	-0,873049	-0,557353
120,0	-1,421208	-0,923076
130,0	-2,856316	-1,917475
140,0	-8,588106	-3,369856
P_u = 140,0 kN		

Tabela C.5- Deslocamentos verticais da V1LM

Carga (kN)	LVDT-1 (mm)	LVDT-2 (mm)
0,0	0	0
2,5	-0,002858	4,4E-05
4,0	-0,004099	7,77E-05
6,0	-0,00119	0,0001294
8,0	-0,003557	0,0001605
10,0	0,000348	0,0002045
12,0	0,009736	0,0003016
14,0	0,013926	0,0003016
16,0	0,01712	0,0003508
18,0	0,025925	0,0003883
20,0	0,02118	0,0004389
22,5	0,02846	0,0004945
25,0	0,029378	0,0005566
27,5	0,028136	0,0006188
30,0	0,034085	0,0006913
32,5	0,039386	0,0007987
35,0	0,069345	0,0008103
40,0	0,07607	0,0009385
42,5	0,076186	0,0009722
45,0	0,07497	0,0010291
47,5	0,07422	0,0010861
50,0	0,068415	0,0011456
55,0	0,092956	0,0012504
60,0	0,113309	0,0013579
65,0	0,166001	0,0014874
70,0	0,215939	0,0015883
75,0	0,250669	0,0017463
80,0	0,318438	0,0018201
85,0	0,406546	0,001956
90,0	0,479744	0,0020777
95,0	0,562215	0,0021825
100,0	0,617777	0,0022964
105,0	0,685065	0,0023806
110,0	0,863738	0,0024919
115,0	1,043251	0,0026162
120,0	1,25928	0,0027042
125,0	1,469593	0,0027612
130,0	1,750557	0,0028207
135,0	2,223034	0,0025877
$P_u = 135,0 \text{ kN}$		

Tabela C.6- Deslocamentos verticais da V1LME

Carga (kN)	LVDT-1 (mm)	LVDT-2 (mm)
2,5	0	0
5,0	-0,002922	0,035133
10,0	-0,006349	0,062093
20,0	-0,013435	0,101982
30,0	0,005715	0,111694
40,0	0,051735	0,110439
50,0	0,053208	0,108086
60,0	0,047067	0,104414
70,0	0,115339	0,108396
80,0	0,179397	0,109961
90,0	0,25712	0,107051
100,0	0,330087	0,106198
110,0	0,393886	0,106418
120,0	0,479097	0,105422
130,0	0,651808	-0,118338
$P_u = 133,50 \text{ kN}$		

Tabela C.7- Deslocamentos verticais da V2L

Carga (kN)	LVDT-1 (mm)	LVDT-2 (mm)
0,95	0	0
2,50	-0,000511	0,031518
5,00	-0,000162	0,061562
10,00	-0,000802	0,092556
20,00	-0,003847	0,144873
30,00	-0,057101	0,117344
40,00	-0,084157	0,101944
50,00	-0,137566	0,015006
60,00	-0,218065	-0,136228
70,00	-0,424065	-0,369169
80,00	-0,736509	-0,573818
90,00	-1,09525	-0,098807
100,00	-1,352397	-0,288677
110,00	-1,609583	-1,236683
120,00	-2,064366	-2,680073
130,00	-2,60558	-4,691138
140,00	-3,789107	-9,041618
145,20	-11,785214	-41,703492
$P_u = 145,20 \text{ kN}$		

Tabela C.8- Deslocamentos verticais da V3L

Carga (kN)	LVDT-1 (mm)	LVDT-2 (mm)
1,35	0	0
2,50	-0,001862	0,00556
5,00	-0,006983	-0,008366
10,00	-0,030761	0,003439
20,00	-0,087267	0,007137
30,00	-0,15188	0,004241
40,00	-0,168121	-0,031615
50,00	-0,181516	-0,044209
60,00	-0,264014	-0,039412
70,00	-0,390835	-0,029534
80,00	-0,66827	0,095866
90,00	-1,019834	0,115352
100,00	-1,663667	-0,01571
110,00	-2,333074	-0,021154
120,00	-3,487021	0,032287
126,40	-7,095885	5,500307
$P_u = 126,40 \text{ kN}$		

APÊNDICE D

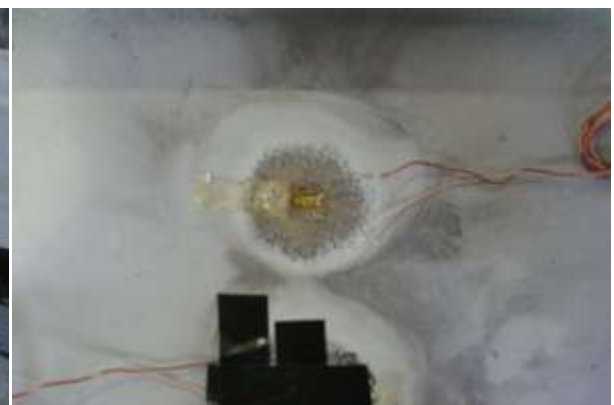
Fotografias da Confecção das vigas

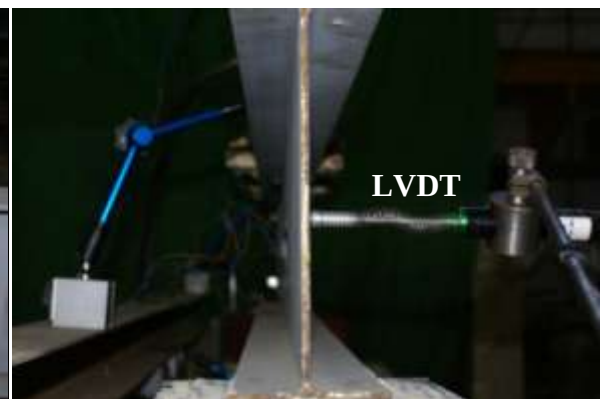


Preparação das Vigas



Instrumentação





Apoios



a) Apoio de 1º gênero



b) Apoio de 2º gênero

Relógios









Corpos de Prova de aço e parafuso

