

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TRELIÇAS MISTAS
COM PERFIS TUBULARES**

SINEVAL ESTEVES PEREIRA JUNIOR

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

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

**Ouro Preto-MG
Dezembro, 2011**

P436a Pereira Junior, Sineval Esteves.
Análise experimental de treliças mistas com perfis tubulares
[manuscrito] / Sineval Esteves Pereira Junior - 2011.

xvii, 76f.: il. color.; graf.; tab.

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

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

Área de concentração: Construção Metálica.

1. Estruturas metálicas - Teses. 2. Treliças (Construção civil) - Teses.
3. Perfis tubulares - Teses. 4. Ligações metálicas - Teses. 5. Vigas - Teses.
I. Freitas, Arlene Maria Sarmanho. II. Universidade Federal de Ouro Preto.
III. Título.

CDU: 624.014.2:624.072.22

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

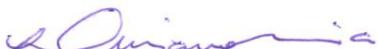
**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TRELIÇAS MISTAS COM PERFIS
TUBULARES**

AUTOR: SINEVAL ESTEVES PEREIRA JUNIOR

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 09 de dezembro de 2011, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:


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


Prof. Dr. João Batista Marques de Sousa Jr. (UFOP)


Prof. Dr. Luciano Rodrigues Ornelas de Lima (UERJ)

*Aos meus pais, Sineval
e Martha, e à minha
noiva, Aline, pelo amor
e cumplicidade.*

Agradecimentos

A JESUS, por ser meu caminho, minha verdade e minha vida.

Aos meus pais pelo amor, afeto e paciência.

Ao meu irmão Rodrigo pelo carinho.

Aline pelo amor, companheirismo e incentivo em todos os momentos.

Aos funcionários do laboratório, João, Sr. Osvaldo e Dequinha pelo trabalho competente durante o ensaio experimental.

A todos os funcionários e colegas do PROPEC pelo auxílio e atenção.

Ao professor Joel Donizete pela ajuda fundamental no desenvolvimento da pesquisa.

À professora Arlene pela orientação de todo trabalho realizado.

À Capes e à V&M do Brasil pelo apoio e financiamento desta pesquisa.

Resumo

Este trabalho consiste na apresentação e na descrição de estudos do comportamento de vigas mistas treliçadas fabricadas em perfis tubulares circulares nas diagonais e nos montantes e retangulares nos banzos superior e inferior. O desenvolvimento deste estudo baseia-se em uma análise teórica, fundamentada em prescrições normativas, pesquisas na área e em ensaio experimental com protótipo de uma viga mista treliçada em escala real. O ensaio experimental foi realizado no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto. O programa experimental objetivou avaliar a influência das ligações entre os elementos da treliça no comportamento global do sistema misto, a eficiência dos perfis tubulares de seção circular/retangular, além de monitorar o comportamento dos conectores de cisalhamento que garantem a ação conjunta entre o perfil de aço e o concreto. O modelo foi desenvolvido para avaliar o desempenho do sistema misto e determinar a resistência última de cada estado limite comparando resultados encontrados na análise teórica com resultados experimentais. Os resultados experimentais indicaram falha no conector de cisalhamento, seguido de escoamento no nó da ligação e posterior colapso do banzo tracionado. Assim, os conectores de cisalhamento, apresentando o primeiro modo de colapso, provocaram a perda de conexão entre a laje de concreto e o banzo superior, gerando elevados deslocamentos, caracterizando ruptura completa do sistema.

Abstract

This work presents and describes studies of department beams composite of concrete slab and steel trusses made of circular hollow sections for the braces members, and rectangular hollow section at the chords. The development of this study is based on a comprehensive and detailed theoretical analysis, reasoned on standards codes prescriptive and studies by various researchers, and experimental study prototype of a beam truss at real scale. The research was conducted at the Laboratory of Structures "Prof. Altamiro Tibiriçá Dias" of the Department of Civil Engineering at the Federal University of Ouro Preto. The experimental program aimed at evaluating the influence of joints between elements of the truss in the global behavior of the composite system, the efficiency of the circular/rectangular hollow section, and monitor the behavior of shear connectors to ensure joint action between the steel beam and concrete slab. The model was developed to evaluate the performance of the composite system and determine the ultimate strength of each limit state analysis comparing the theoretical results with experimental results. Experimental results indicated failure in the shear connector, followed local yielding in the nodal joint and subsequent collapse of the tension bottom chord. Thus, the shear connectors, presenting the first failure mode, caused loss of connection between the concrete slab and the top chord, generating high displacements, featuring complete rupture of the system.

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Vigas Mistas Treliçadas.....	2
1.3. Estudos bibliográficos	3
1.4. Objetivo	8
1.5. Justificativa.....	8
1.6. Descrição do trabalho	9
2. ANÁLISE TEÓRICA (PRESCRIÇÕES PARA DIMENSIONAMENTO DE TRELIÇAS MISTAS E DOS SEUS ELEMENTOS).....	10
2.1. Ligações.....	10
2.1.1. Excentricidade e afastamento	12
2.1.2. Modos de Falha	15
2.1.3. Dimensionamento das ligações	17
2.1.3.1. Parâmetros de dimensionamento	17
2.1.3.2. Limitações de dimensionamento	19
2.1.3.3. Resistência Última.....	20
2.2. Elementos de barra	21
2.2.1. Dimensionamento das barras.....	22
2.2.1.1. Barras submetidas à força axial de tração	22
2.2.1.2. Barras submetidas à força axial de compressão	22
2.3. Laje de concreto.....	23
2.3.1. Espessura da laje.....	23
2.3.2. Resistência do concreto	24
2.3.3. Controle de fissuras – Armadura mínima de tração	25
2.3.4. Resistência última da laje de concreto.....	26
2.4. Conectores de cisalhamento	26
2.4.1. Dimensionamento dos conectores	27
2.5. Seção mista.....	27
2.5.1. Largura efetiva.....	28
2.5.2. Resistência última da seção mista	29

2.5.2.1.	Interação completa.....	29
2.5.2.2.	Deslocamentos verticais – Análise elástica.....	30
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	32
3.1.	Introdução.....	32
3.2.	Protótipo ensaiado	32
3.2.1.	Propriedades físicas e geométricas da treliça de aço.....	32
3.2.2.	Propriedades físicas e geométricas da laje de concreto.....	37
3.3.	Montagem Experimental	39
3.3.1.	Sistema de apoio e contenção lateral do protótipo	39
3.3.2.	Sistema de aplicação do carregamento.....	41
3.4.	Estudo qualitativo da distribuição de tensões.....	42
3.5.	Instrumentação.....	42
3.5.1.	Sistema de Aquisição de Dados	45
3.6.	Metodologia do ensaio	45
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS 47	
4.1.	Considerações iniciais	47
4.2.	Apresentação e análise dos resultados das diagonais mais solicitadas.....	48
4.3.	Apresentação e análise dos resultados na região central do banzo superior ..	49
4.4.	Apresentação e análise dos resultados na região central do banzo inferior.....	51
4.5.	Monitoramento na interface aço-concreto.....	52
4.6.	Apresentação e análise dos resultados nas armaduras.....	53
4.7.	Apresentação e análise dos resultados na laje de concreto.....	54
4.8.	Apresentação e análise de tensões na placa de ligação do apoio.....	55
4.9.	Apresentação e análise dos resultados nas ligações	55
4.10.	Apresentação e análise dos resultados no conector de cisalhamento	57
4.11.	Monitoramento dos deslocamentos	58
4.12.	Análise qualitativa dos resultados experimentais.....	63
5.	ANÁLISE DA ESTRUTURA MISTA.....	64
5.1.	Introdução.....	64
5.2.	Análise de desempenho do sistema misto através dos conectores de cisalhamento	64
5.3.	Análise de desempenho da treliça metálica através da resistência do banzo inferior.....	66

5.4. Análise da influência das ligações na resistência da viga treliçada	67
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1: Ponte Rodoferroviária, Rio Paraná.....	1
FIGURA 1.2: Tipos de vigamentos utilizados em estrutura mista: (a) Viga em alma cheia; (b) Viga treliçada	2
FIGURA 1.3: Vigas mistas treliçadas com perfil tubular para piso.....	3
FIGURA 2.1: Treliça compostas de perfis tubulares: (a) ligações do tipo “K”, “T” e “KT”; (b) Propriedades geométricas da seção transversal (MENDES, 2008)	11
FIGURA 2.2: Ligação tipo "K":(a) Ligação tipo "K" com <i>gap</i> ; (b) Ligação tipo "K" com <i>overlap</i> ; (c) Ligação tipo "K" com excentricidade nula	12
FIGURA 2.3: Modos de falha – PN (2011).....	16
FIGURA 2.4: Parâmetros e convenções – PN (2011).....	18
FIGURA 2.5: Vigas metálicas com conectores de cisalhamento: (a) Conector com perfil U laminado; (b) Conector tipo stud bolt.....	27
FIGURA 2.6.: Largura efetiva.....	28
FIGURA 2.7: Distribuição de tensões em treliça mista com interação completa – NBR 8800(2008)	30
FIGURA 3.1: Dimensões e características físicas da treliça de aço: (a) Dimensões da placa de apoio; (b) Dimensões da base de apoio; (c) Dimensões dos conectores de cisalhamento	35
FIGURA 3.2: Posicionamento das chapas de reforços nodais: (a) Chapas de reforço 2; (b) Chapas de reforço 1 (extremidades) e chapas de reforço 3 (central).....	36
FIGURA 3.3: Viga treliçada sobre apoios no laboratório de estruturas Prof. Altamiro Tibiriçá Dias	37
FIGURA 3.4: Armação da laje de concreto	38
FIGURA 3.5: Estrutura de escoramento da laje de concreto	38
FIGURA 3.6: Concretagem da laje no laboratório de estruturas Prof. Altamiro Tibiriçá Dias:	39
FIGURA 3.7: Sistema de apoio e contenções laterais da viga mista: (a) Aparelho de apoio; (b) Contensões laterais da viga metálica; (c) Contensões laterais da laje.....	40
FIGURA 3.8: Sistema de aplicação dos carregamento: (a) Atuadores hidráulicos sobre a laje; (b) Posicionamento dos atuadores hidráulicos	41

FIGURA 3.9: Fração do modelo da treliça mista em elementos finitos (MARTINS, 2011).....	42
FIGURA 3.10: Módulos de aquisição de dados <i>Spider 8</i>	45
FIGURA 3.11: Esquema de aplicação de carga simultânea: (a) Atuadores manuais; (b) Aplicação simultânea de carregamento; (c) Equipamento de projeção de imagem; (d) Projeção dos dados	46
FIGURA 4.1.: Esquema de orientação para localização dos pontos de instrumentação (a) Vista frontal de montagem experimental; (b) Esquema de orientação para localização dos pontos de instrumentação	48
FIGURA 4.2: Gráfico carga x deformação específica das diagonais A e L.....	49
FIGURA 4.3: Gráfico carga x deformação específica do banzo superior - Nó 6.....	50
FIGURA 4.4: Gráfico carga x deformação específica do banzo inferior – Nó 7	51
FIGURA 4.5: Gráfico carga x deformação específica no banzo superior - interface aço-concreto	52
FIGURA 4.6: Gráfico carga x deformação específica das armaduras	53
FIGURA 4.7: Gráfico carga x deformação específica da laje de concreto	54
Figura 4.8: Gráfico carga x tensão de von Mises da placa de ligação do apoio.....	55
FIGURA 4.9: Gráfico carga x tensão de von Mises na ligação 6	56
FIGURA 4.10: Gráfico carga x deformação de von Mises na ligação 8.....	57
FIGURA 4.11: Gráfico carga x deformação de von Mises do conector de cisalhamento	58
FIGURA 4.12: Gráfico carga x deslocamento vertical	59
FIGURA 4.13: Gráfico carga x deslocamento vertical da laje de concreto	60
FIGURA 4.14: Gráfico carga x deslocamento horizontal da laje de concreto	60
FIGURA 4.15: Gráfico carga x deslocamento da laje de concreto	61
FIGURA 4.16: Efeitos do deslizamento da laje monitorado pelo DEF1: (a) Posicionamento do defletômetro DEF1; (b) Primeiros sinais do deslizamento da laje ...	62
FIGURA 4.17: Gráfico carga x deslocamento dos apoios	62
FIGURA 5.1: Descolamento entre a laje de concreto e a treliça metálica	65
FIGURA 5.2: Flexão da viga treliçada mista	67
FIGURA 5.3: Representação em elementos finitos das tensões na ligação instrumentada da treliça de aço: (a) Vista geral; (b) vista da parede superior do banzo inferior (NUNES, 2011).	68

FIGURA 5.4: Representação dos resultados da ligação "K" em elementos finitos da carga de compressão da diagonal versus a deformação na parede do banzo (NUNES, 2011).....	69
FIGURA 5.5: Chapas de reforço da ligação 9.....	69

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto – NBR 6118 (2004)	24
TABELA 2.2: Correspondência entre classe de agressividade ambiental e recobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm – NBR 6118 (2004)	24
TABELA 3.1: Propriedades físicas e geométricas da treliça de aço	33
TABELA 3.2: Instrumentação utilizada.....	43
TABELA 3.2: Instrumentação utilizada (continuação).....	44
TABELA 4.1: Resultados das deformações específicas máximas no banzo superior. ..	49
TABELA 5.1: Limite teórico e experimental das cargas aplicadas	66

LISTA DE SÍMBOLOS

a) Letras romanas maiúsculas

A_0 - área da seção transversal do banzo

A_{ct} - área efetiva da laje de concreto

A_g - área bruta da seção transversal

A_s - área de armadura

A_v - área efetiva de cisalhamento no banzo

C_{cd} - força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje de concreto

E, E_a - módulo de elasticidade do aço

E_c - módulo de elasticidade secante do concreto

E_t - Módulo tangente

F - Força aplicada

I - momento de inércia da seção transversal

K - coeficiente de flambagem de barras comprimidas

K_n - fator de redução da resistência devido à carga no banzo

L - comprimento do elemento

M_{Rd} - momento fletor resistente de cálculo

M_{Sd} - momento fletor solicitante de cálculo

$M_{0,sd}$ - Momento fletor solicitante de cálculo da ligação

$N_{0,Rd}$ - resistência da força axial devido ao cisalhamento na seção transversal do banzo na região do afastamento

$N_{0,Sd}$ - força axial solicitante de cálculo no banzo

$N_{c,Rd}$ - força axial de compressão resistente de cálculo

$N_{c,Sd}$ - força axial de compressão solicitante de cálculo

N_e - força axial de flambagem elástica

$N_{i,Rd}$ - resistência de escoamento levando em conta a plastificação do banzo a partir da diagonal/montante “i”

$N_{t,Rd}$ - força axial de tração resistente de cálculo

$N_{t,Sd}$ - força axial de tração solicitante de cálculo

Q - fator de redução total associado à flambagem local

R - Resistência da ligação

R_d - Resistência de cálculo

S_d - Esforço solicitante

T_{ad} – força resistente de cálculo da região tracionada da laje de concreto

$V_{pl,Rd}$ - resistência ao cisalhamento de uma seção

V_{Sd} - maior valor absoluto da força transversal atuante no banzo

W_0 – Módulo de resistência elástica da seção transversal do banzo

b) Letras romanas minúsculas

a - espessura da região comprimida da laje

b – largura efetiva da laje

b_0 - largura do tubo retangular do banzo

b_{eff} - largura efetiva para o cálculo da resistência da barra

$b_{e,p}$ - largura efetiva para o cálculo da resistência do banzo ao cisalhamento

b_i - largura do tubo quadrado e retangular da barra “i”

c - cobrimento da armadura em relação à face do elemento

d – altura útil; distância; dimensão máxima do agregado graúdo

d_i - diâmetro externo da seção transversal do tubo “i”

e - excentricidade das ligações

f_{ck} – resistência característica do concreto à compressão

f_{cd} – resistência de cálculo do concreto à compressão

$f_{ct,ef}$ – resistência média à tração efetiva do concreto

f_u - tensão de ruptura à tração do aço

f_y - tensão de escoamento do aço

f_{y0} – tensão de escoamento do aço que constitui o banzo

f_{yd} – resistência de cálculo ao escoamento do aço

f_{yi} – tensão de escoamento do aço que constitui as diagonais/montante

f_{ys} – resistência ao escoamento do aço da armadura

g - afastamento entre as barras secundárias na face do banzo para ligações “K” e “KT” afastada

g_a - afastamento entre as barras secundárias na face do banzo menos duas vezes a espessura do pé da solda, para ligações “K” e “KT” afastada

h_0 - altura do tubo retangular do banzo

i - índice que indica o número da barra:

$i = 0$ → representa o banzo
 $i = 1$ → representa a diagonal comprimida das ligações
 $i = 2$ → representa a diagonal tracionada das ligações
 $i = 3$ → representa o montante
 k - coeficiente
 l – comprimento do vão
 n – número (quantidade); parâmetro
 t_0 – espessura parede do banzo
 t_c – espessura da laje de concreto
 t_f – espessura da mesa
 t_i - espessura da parede do tubo “i”
 t_s – espessura da solda
 t_w – espessura da alma
 w_k – abertura característica de fissuras
 y – distância

c) Letras gregas maiúsculas

Σ - somatório

d) Letras gregas minúsculas

α - coeficiente utilizado para determinar a área efetiva de cisalhamento da barra principal;

α_E – relação entre o módulo de elasticidade do aço e o módulo de elasticidade do concreto

β - razão entre os diâmetros dos membros e a largura do banzo

ε - deformação

γ - relação entre o diâmetro ou largura da seção transversal da barra principal de uma ligação “K” e o dobro de sua espessura; coeficiente de ponderação da resistência ou das ações

γ_M - coeficiente de minoração da resistência

γ_s - coeficiente de majoração da força aplicada

η - relação entre a altura da diagonal ou montante no plano da estrutura e a largura do banzo

θ_i - ângulo entre diagonal e banzo

ϕ - diâmetro

λ_0 - índice de esbeltez reduzido

$\sigma_{0,sd}$ - máxima tensão de compressão no banzo

$\sigma_{p,sd}$ - tensão de compressão no banzo descontando a contribuição dos membros

χ - fator de redução associado à compressão

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Os sistemas mistos aço-concreto têm ampla utilização na construção metálica porque apresentam soluções eficientes e econômicas em projetos estruturais. A associação de um perfil metálico com elementos de concreto amplia consideravelmente a resistência do sistema estrutural, permitindo vencer grandes vãos com economia de material.

A viga mista treliçada é uma alternativa muito aplicada em obras de edifícios e pontes (FIGURA 1.1) por apresentar redução do peso próprio da estrutura, acréscimo de resistência e de rigidez e diminuição do consumo de material, propiciados pela combinação dos elementos de aço e de concreto. O trabalho em conjunto de um perfil metálico com a laje de concreto é feito por meio de conectores de cisalhamento que irão absorver os esforços cisalhantes horizontais que se desenvolvem na interface da laje com o banzo superior da treliça.

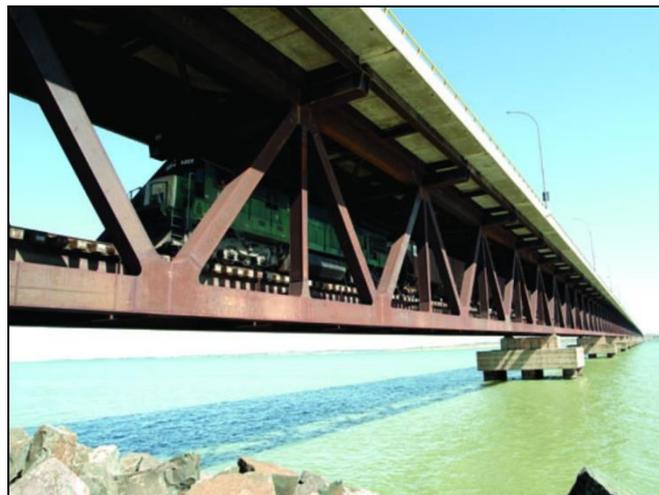
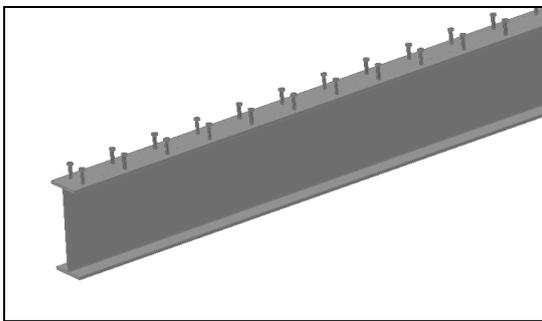


FIGURA 1.1: Ponte Rodoferroviária, Rio Paraná
Disponível em: <<http://www1.santafedosul.sp.gov.br/turismo/ponte.php>>
Acesso em: 27 dez. 2010

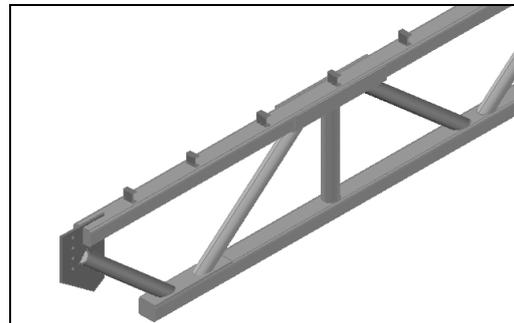
1.2. Vigas Mistas Treliçadas

Viga mista é a associação de um perfil metálico com a laje de concreto. Essa combinação busca utilizar as melhores características de cada material, como elevada resistência à compressão do concreto e alta resistência à tração do aço. A utilização desse sistema, no Brasil, vem crescendo de forma considerável em virtude de suas variadas soluções, ótima viabilidade econômica e eficientes resultados de segurança estrutural.

As vigas mistas treliçadas compostas por perfis de seção transversal tubular (FIGURA 1.2b) apresentam algumas vantagens em relação ao perfil em alma cheia (FIGURA 1.2a), como maior rigidez com menor peso próprio, possibilidade de vencer vãos maiores, alternativa para acomodar a passagem de dutos de várias instalações e grande resistência dos perfis tubulares ao esforço normal. Destaca-se que a treliça mista representada na Figura 1.2b tem a configuração da que será avaliada neste trabalho.



(a) Viga em alma cheia



(b) Viga treliçada

FIGURA 1.2: Tipos de vigamentos utilizados em estrutura mista

O viga em treliça mista possibilita vencer vãos elevados entre 10m e 15m sem a necessidade de pilares intermediários. É mais econômico do que o sistema que utiliza perfis laminados ou soldados (QUEIROZ, 2001) por apresentar maior momento de inércia, diminuindo os valores de flecha. O perfil tubular, em função da geometria da seção transversal, possui grande resistência aos esforços axiais, sendo eficiente na sua utilização em sistemas treliçados. A eficiência deve-se ao fato de que as treliças são predominantemente submetidas a esforços normais. Tais perfis são ideais para serem utilizados nesses elementos.

Na viga mista treliçada, o momento fletor provoca tensões de compressão na laje de concreto e de tração no banzo inferior da treliça. Os conectores de cisalhamento são importantes dispositivos mecânicos responsáveis por garantir o trabalho em conjunto dos elementos de aço e concreto. Soldado no banzo superior da treliça, o conector deve absorver os esforços cisalhantes longitudinais que se originam na interface aço-concreto. Vários tipos de conectores vêm sendo desenvolvidos segundo critérios de segurança e economia para atender a diversas necessidades construtivas. No Brasil, os mais utilizados são o *Stud bolt* (conector tipo pino com cabeça) e o conector em perfil de seção transversal U laminado.

A aplicação de treliças mistas planas em vigamentos para piso (FIGURA 1.3) tem se tornado mais usual na construção civil. O desenvolvimento de novos estudos propicia uma evolução tecnológica cada vez mais específica na utilização de sistemas treliçados para piso. Neste trabalho, foi analisado o comportamento global de vigas planas treliçadas mistas confeccionadas em perfis tubulares circulares nas diagonais e nos montantes e retangulares nos banzos, observando a influência dos efeitos localizados causados pelos carregamentos.

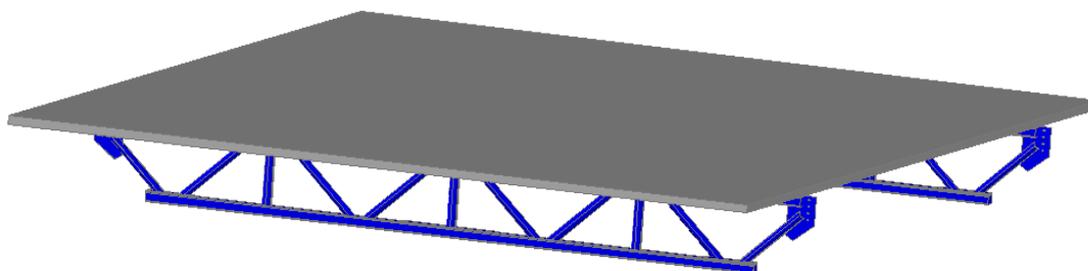


FIGURA 1.3: Vigas mistas treliçadas com perfil tubular para piso

1.3. Estudos bibliográficos

A crescente utilização de sistemas mistos na construção civil tem motivado o surgimento de várias pesquisas. Estudos complexos foram desenvolvidos para análise e dimensionamento de elementos estruturais metálicos ou de concreto, trabalhando de forma isolada ou conjunta em um sistema misto para determinar o comportamento da ação conjunta do perfil de aço e o concreto. Entre os diversos estudos realizados até o

momento, pode-se destacar a seguir alguns trabalhos e prescrições normativas que foram utilizadas nesta pesquisa:

AISC – *American Institute of Steel Construction: Hollow structural section connections* (2010) - Guia normativo que determina condições de projeto para ligações de elementos das estruturas de seção transversal tubular.

ASCE – *American Society of Civil Engineers: Task Committee on design criteria for composite structures in steel and concrete* (2004) - Apresenta especificações para o dimensionamento de treliças mistas, tanto para os estados limites últimos como para os estados limites de utilização, incluindo exemplos práticos de dimensionamento.

CAN/CSA S16-01 – *Canadian Standard Association: Limit States Design of Steel Structures* (2003) - Estabelece critérios e requisitos para concepção, fabricação e montagem de estruturas de aço. A norma é baseada no método dos estados limites e determina critérios de dimensionamento de componentes de aço estrutural e apresenta critérios de dimensionamento da seção mista.

CIDECT 3 – *Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading* (2009) - Publicação baseada no resultado de vários programas de pesquisas teóricas e experimentais, prescreve orientações de projetos de estruturas metálicas tubulares, observando a influência da variação de vários parâmetros.

EUROCODE 3 – *Design of steel structures* (2005) - Dimensionamento de estruturas metálicas apresentando métodos de análises estruturais, que são considerados os efeitos das deformações geométricas e materiais de comportamento não linear.

EUROCODE 4 – *Design of composite steel and concrete structures* (2004) – Determina prescrições e critérios para projetos de estruturas mistas em aço e concreto.

NBR 6118 – *Projetos de estruturas de concreto* (2004) - Estabelece os requisitos e procedimentos gerais a serem atendidos para projeto de estruturas de concreto.

NBR 8800 – *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios* (2008) - Apresenta prescrição normativa para elaboração de projetos de estruturas de aço e estruturas mistas. Com base no método dos estados limites, fornece

um conjunto de orientações para dimensionamento, desenhos, especificações de fabricação e de montagem de estruturas de aço e mistas.

PN Tubos (2011) – Projeto de norma elaborado pela comissão de estruturas de aço do Comitê Brasileiro de Construção Civil, o qual define os princípios que regem o projeto de estruturas de aço e mistas de aço e concreto utilizando perfis tubulares.

Chien e Ritchie (1984) desenvolvem estudos de sistemas treliçados mistos observando a contribuição da laje de concreto na resistência aos esforços cisalhantes. Durante o estudo, foi proposto um modelo simplificado para análise estrutural de treliças mistas com nós rotulados, desconsiderando as excentricidades das ligações. Considerou-se a transformação da área efetiva da laje de concreto numa área equivalente de aço, configurando uma análise de pórtico plano para a viga mista.

Uma proposta de dimensionamento de uma treliça mista com uma laje de concreto com uma forma metálica incorporada baseada em critérios estabelecidos pela British Standard – BS 5950 – é apresentada em Merrill(1992), dando sugestões de análises da transformação da área efetiva da laje de concreto numa área equivalente de aço.

Maurer e Kennedy (1994) possuem estudos experimentais para determinação da capacidade resistente ao momento fletor de vigas mistas treliçadas, analisando e comparando os resultados com métodos teóricos e prescrições da norma canadense CSA Standard S16-94. A pesquisa tem relevantes detalhes do programa experimental, assim como os resultados obtidos e as recomendações para dimensionamento e desenvolvimento de novos estudos.

Queiroz (2001) apresenta informações e conceitos básicos para projetos de estruturas mistas e descreve características de vários sistemas estruturais aplicáveis aos projetos de estruturas mistas aço-concreto. Os autores detalham princípios de dimensionamento e utilização prática construtiva de todos os elementos utilizados nas estruturas mistas.

Wardenier (2001) expõe aplicações e características gerais das estruturas de seção transversal tubular, mostrando as principais propriedades físicas e geométricas. Apresenta também, estudos teóricos realizados por meio do *Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire* – CIDECT, que demonstra exemplos de dimensionamento de ligações entre elementos de treliças tubulares.

Em Samuelson (2002), tem-se um estudo avaliando as vantagens do sistema misto, com casos históricos de projetos que utilizaram estruturas mistas e tiveram eficientes resultados de segurança e grande viabilidade econômica.

Packer e Henderson (2007) apresentam vários métodos de dimensionamento de treliças com uso de perfis tubulares, os modos de falha existentes nas ligações e expõe medidas para aumentar a resistência e combater o colapso. Packer e Henderson afirmam que, para análise estrutural, os nós das treliças devem ser rotulados sem transmissão de momento fletor para as diagonais, quando forem atendidos certos limites de excentricidade entre os elementos que compõem os nós da treliça.

Machacek e Cudejko (2008) têm um trabalho experimental sobre a distribuição longitudinal de esforços entre conectores ao longo de uma treliça plana em perfis tubulares retangulares de aço associado à laje de concreto. Nesse estudo, verifica-se uma solicitação não uniforme entre os conectores de cisalhamento, sendo observada uma concentração de tensões elevada na região dos nós da treliça. Durante as análises dos modelos numéricos, utilizando o software ANSYS 11.0 (2009), calibrados com o modelo experimental, foram verificadas numericamente mais de 30 variedades de conectores, obtendo picos distintos de fluxos cisalhantes na interface aço-concreto acima dos nós. Ao final do estudo, os autores concluíram que os resultados experimentais deram boa relação com os critérios prescritos pelo Eurocode 4 (2004) na fase elástica, sendo considerado mais conservador no regime plástico. Observaram uma concentração de tensões cisalhantes transmitidas pelas diagonais aos nós superiores da treliça.

Mendes (2008) desenvolve pesquisa teórico-experimental de ligações planas formadas por perfis tubulares de aço, que incluíram ensaios em laboratório para determinação da distribuição de tensões residuais no tubo retangular formado a frio componente do banzo, além da geração de modelos numéricos calibrados com resultados dos modelos experimentais. Mendes concluiu que os valores das tensões residuais foram inferiores a 30% da tensão de escoamento do aço do perfil retangular, sugerindo que o aço do perfil ensaiado havia sido submetido a tratamento térmico. Considerando os modos de falha, o autor observou que, para ligações que possuem o montante “KT” e “T”, em que aplicando uma carga de 75% da carga aplicada nas diagonais; a plastificação do aço ocorreu devido à punção do montante no banzo, concluindo que a resistência da ligação

está condicionada à carga no montante. Para a ligação “K”, os resultados obtidos por Mendes não foram satisfatórios, e os resultados para ligação do tipo “KT” não foram conclusivos.

Mayor (2010) apresenta um estudo de ligações soldadas do tipo “K” e “KT” formadas por perfis tubulares sem costura, com banzos retangulares e diagonais e montantes circulares. Com o objetivo de variar alguns parâmetros geométricos das ligações “K” e “KT”, em relação a estudos anteriores realizados por Mendes (2008), houve mudanças na configuração geométrica das peças a fim de obter uma nova sequência de ensaios dentro das prescrições normativas do Eurocode 3 (2005). Mayor verificou uma boa aproximação entre os modelos numéricos e experimentais para as ligações estudadas. As ligações tiveram como modo de ruptura a plastificação da face superior do banzo, próximo às diagonais e às montantes, utilizando uma carga de 15% da carga aplicada nas diagonais, no montante; o que demonstra que quanto maior a carga no montante, menor a resistência da ligação.

Martins e Freitas (2010) expõem estudos numéricos com treliças mistas compostas por perfis metálicos tubulares, associadas a uma laje de concreto maciça. O trabalho consiste na análise em elementos finitos de dois modelos numéricos utilizando dois métodos de análise estrutural. No primeiro modelo, Martins e Freitas usam elementos de barra para discretização dos elementos dos elementos estruturais. No segundo, é empregado um elemento finito tridimensional para modelagem da laje, que melhor representava a não-linearidade do concreto, considerando efeitos como a fissuração e o esmagamento na região comprimida. Os autores concluíram que os modelos apresentaram bons resultados, principalmente a segunda modelagem que forneceu resultados definidos e confiáveis simulando de forma mais eficiente a perda de estabilidade da estrutura por plastificação da parede do banzo inferior.

Lima, Freitas e Vellasco (2011) utilizam os resultados de modelos experimentais realizados por Mayor (2010) com protótipos do tipo “KT” para desenvolver trabalhos de calibração de modelos numéricos, empregando o programa de elementos finitos ANSYS (2010). Com base na calibração desses modelos, foi possível realizar uma análise paramétrica de perfis tubulares disponíveis no mercado e verificar o estado limite último das ligações em função das prescrições fornecidas pelo Eurocode 3 (2003).

1.4. Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento experimental de vigas mistas treliçadas planas confeccionadas em perfis laminados tubulares circulares nas diagonais e montantes e retangulares no banzo superior e inferior com laje de concreto armado convencional e conectores de cisalhamento laminados tipo “U”. A pesquisa envolve uma análise experimental cujos resultados são analisados considerando os estados limites previstos em normas de projeto. Os estudos avaliaram a influência das ligações entre os elementos da treliça no comportamento global do sistema misto, a eficiência dos perfis tubulares de seção circular e retangular e monitoramento do comportamento dos conectores de cisalhamento que garantem a ação conjunta entre o perfil de aço e o concreto. Com os resultados obtidos, pode-se analisar o comportamento do sistema contribuindo para o seu entendimento, visando a dar subsídios a novas metodologias de projeto.

1.5. Justificativa

As vigas mistas treliçadas foram objeto de estudo de várias pesquisas anteriores que analisaram o comportamento da estrutura segundo a variação de parâmetros geométricos e mecânicos, a fim de obter resultados satisfatórios de resistência e economia. Estudos realizados anteriormente no Laboratório de Estruturas Prof. Altamiro Tibiriçá Dias (DECIV/UFOP) avaliaram os tipos de ligações com perfis tubulares, a resistência das mesmas e a influência dos processos de fabricação do aço sobre sua resistência. Os experimentos utilizaram protótipos de ligações do tipo “K”, “T” e “KT” presentes em viga treliçada e visaram à análise detalhada dos modos de falha das ligações (MENDANHA, 2006; MENDES, 2008; MAYOR, 2010; NUNES, 2011). Tornou-se necessário uma análise teórico-experimental da viga mista treliçada em escala real, com todos os seus elementos atuando em conjunto para obter uma resposta mais realista do sistema estrutural completo. Para desenvolvimento do modelo experimental foram utilizados resultados de estudos experimentais e numéricos já realizados.

1.6. Descrição do trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O capítulo 2 apresenta um estudo das prescrições para dimensionamento de treliças mistas e seus elementos, expondo as características, parâmetros e limitações de resistência estabelecidas por estudos teóricos realizados por diferentes autores e normas de projeto.

O capítulo 3 cumpre a descrição completa do programa experimental, mostrando as características físicas e geométricas do protótipo ensaiado, metodologia e procedimento para realização do ensaio de laboratório. Relata os detalhes mais relevantes da montagem experimental e componentes aplicados, como instrumentação, sistema de aquisição de dados, equipamentos para aplicação de carga e aparelhos de apoio, a fim de descrever toda sequência executada durante o trabalho prático. Relata o processo utilizado para definição dos pontos de instrumentação, assim como a localização de cada elemento, possibilitando a compreensão dos resultados exposto no capítulo seguinte.

No quarto capítulo, tem-se a apresentação dos resultados experimentais obtidos e análise qualitativa dos gráficos com base na avaliação do monitoramento contínuo dos elementos. É proposto um sistema de orientação para localização de cada ponto de instrumentação capaz de identificar os sinais de assimetria do comportamento estrutural do modelo.

O quinto capítulo descreve a análise global da estrutura mista a partir do desempenho dos elementos estruturais e avaliando a influência da perda de estabilidade localizada na resistência da estrutura.

No capítulo 6, são feitas as considerações finais do trabalho experimental, promovendo sugestões para projetos de estruturas mistas e propondo a realização de estudos complementares.

2. ANÁLISE TEÓRICA (PRESCRIÇÕES PARA DIMENSIONAMENTO DE TRELIÇAS MISTAS E DOS SEUS ELEMENTOS)

2.1. Ligações

As treliças planas confeccionadas em perfis tubulares apresentam concepção estrutural de cargas aplicadas nos nós e esforços axiais nos elementos. Este modelo estrutural produz efeitos localizados sobre os nós (conexões entre elementos) que exigem uma análise detalhada do processo de dimensionamento das ligações. Há diferentes tipos de configurações de ligações entre os componentes da treliça que atendem várias exigências estruturais.

Este trabalho aborda uma treliça com ligações do tipo “K”, “T” e “KT” conforme a Figura 2.1 que tem a nomenclatura da geometria utilizada.

As análises realizadas adotam as prescrições do Eurocode 3 (2005), Cidect 3 (2009) e do projeto de norma de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares (PN, 2011), similar ao Eurocode 3 (2005).

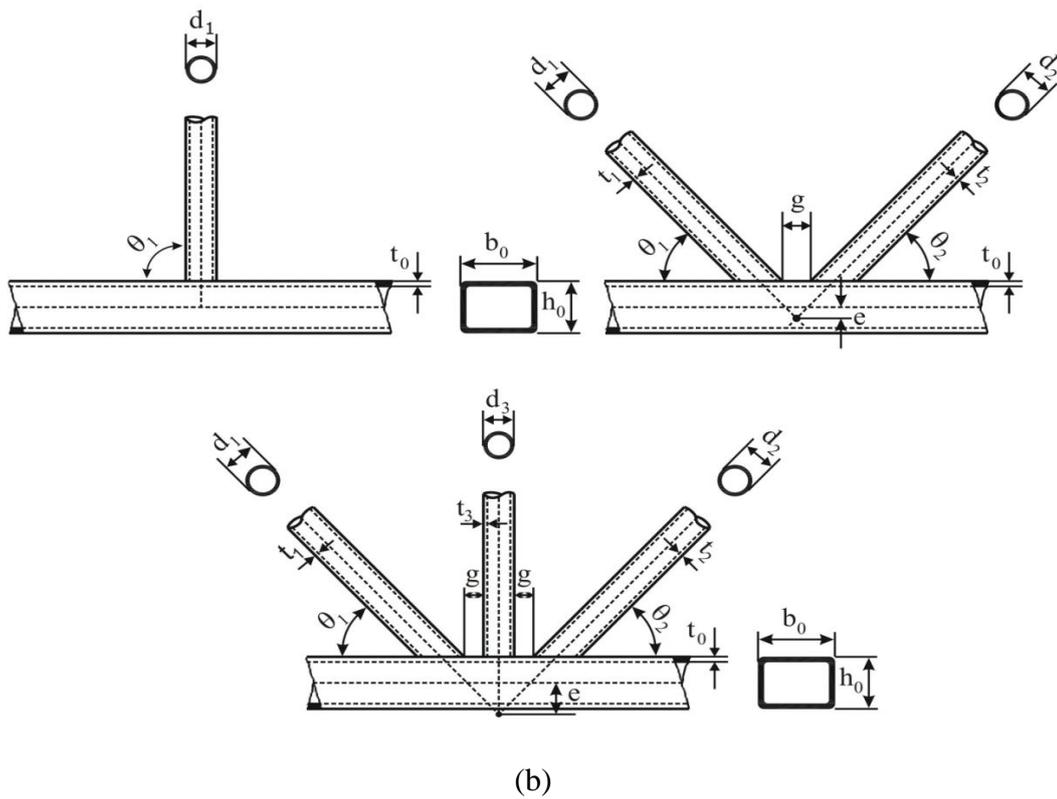
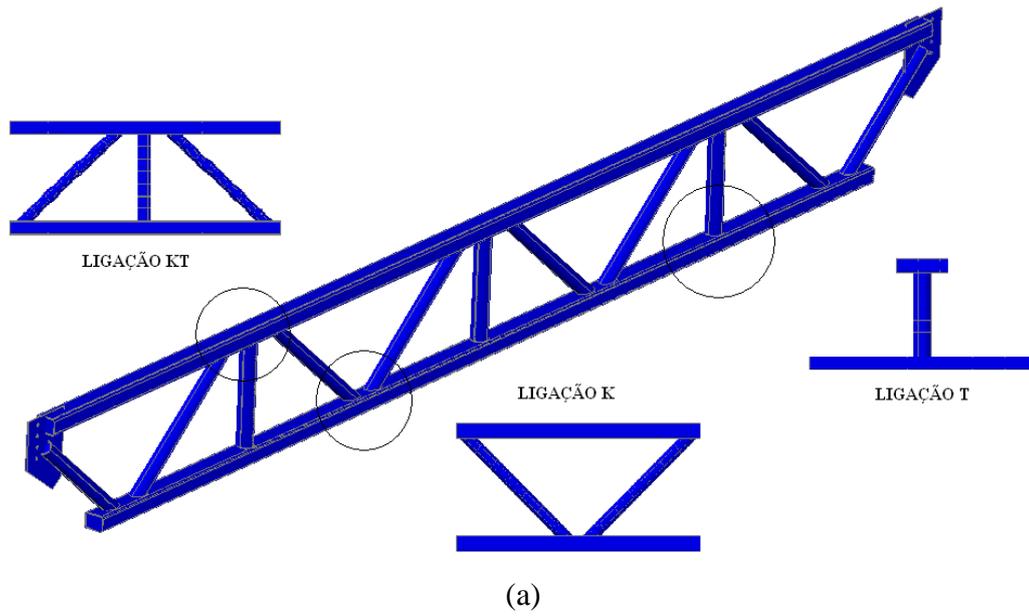


FIGURA 2.1: Treliça composta de perfis tubulares: (a) ligações do tipo “K”, “T” e “KT”;
 (b) Propriedades geométricas da seção transversal (MENDES, 2008)

Onde:

b_0 = largura do banzo

h_0 = altura do banzo

t_0 = espessura da chapa que constitui o banzo

d_i = diâmetro das diagonais/montante

t_i = espessura da chapa que constitui as diagonais/montante

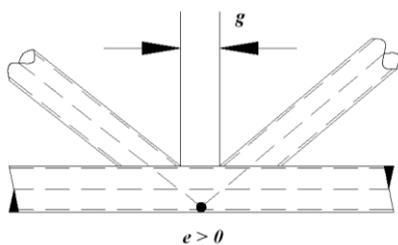
θ_i = ângulo entre o banzo e as diagonais/montante

g = “*gap*” – afastamento entre as diagonais/montante

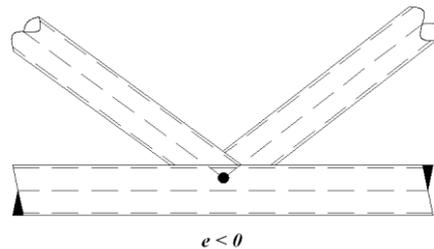
e = excentricidade entre as linhas de centro do banzo e o prolongamento da linha central das diagonais/montante.

2.1.1. Excentricidade e afastamento

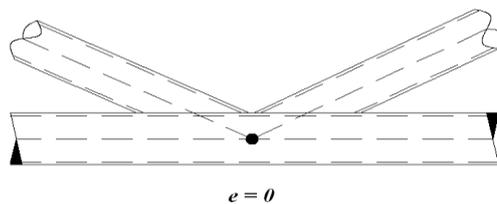
As ligações do tipo “K” e “KT” podem ser qualificadas quanto ao posicionamento das diagonais. Tais diagonais podem ser soldadas ao banzo com certo afastamento, denominado *gap* (g); ou estarem sobrepostas, configurando uma ligação com *overlap* como mostra a Figura 2.2. As duas disposições dos elementos podem gerar excentricidades (e) responsáveis por criar momento fletor que se distribui entre as barras que compõem o nó, ocasionando perda de resistência das ligações.



(a) Ligação tipo “K” com *gap*.



(b) Ligação tipo “K” com *overlap*



(c) Ligação tipo “K” com excentricidade nula

FIGURA 2.2: Ligação do tipo “K”

A excentricidade ocorre quando a interseção entre o eixo central das diagonais ou montantes não coincide com o eixo central do banzo. A posição do ponto de interseção define a excentricidade como sendo positiva, quando localizada abaixo do eixo central do banzo; negativa, acima do eixo central do banzo; ou nula, quando a interseção dos elementos concorre com o eixo central do banzo (FIGURA 2.2). A ligação do tipo “T” não apresenta excentricidade.

Com base em prescrições contidas no Eurocode 3 (2005) e Cidect (2009), a excentricidade da ligação pode ser obtida pela equação 2.1, na qual a nomenclatura é apresentada na Figura 2.1.

$$e = \left(\frac{d_1}{2 \sin \theta_1} + \frac{d_2}{2 \sin \theta_2} \right) \frac{\sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{h_0}{2} \quad (2.1)$$

O momento fletor originado pela excentricidade pode ser desprezado caso esteja dentro dos limites indicados nas equações 2.2 e 2.3 para seções circulares e retangulares, respectivamente, estabelecidas pelo Eurocode 3 (2005) e pelo Cidect (2009).

$$-0,55d_0 \leq e \leq 0,25d_0 \quad (2.2)$$

$$-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0 \quad (2.3)$$

Se os valores obtidos não estiverem dentro dos limites recomendados anteriormente é necessário fazer a distribuição de momento fletor gerado pela excentricidade entre os elementos que compõem a ligação de acordo com a razão entre a inércia do perfil considerado “T” e o comprimento do elemento ”L” (MAYOR, 2010) ou por meio da análise estrutural (PACKER, 2007).

Os valores de afastamento entre as diagonais para as ligações do tipo “K” podem ser calculados utilizando a equação 2.4, sendo que valores de afastamento negativos correspondem a ligações com sobreposição, e valores positivos são ligações com afastamento.

$$g = \left(e + \frac{h_0}{2} \right) \left(\frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin \theta_1 \sin \theta_2} \right) - \frac{d_1}{2 \sin \theta_1} - \frac{d_2}{2 \sin \theta_2} \quad (2.4)$$

Para cálculo da resistência última, Eurocode 3 (2005), PN (2011) e Cidect (2009) estabelecem limites para o afastamento das diagonais apresentados nas seguintes equações:

$$0,5(1 - \beta) \leq \frac{g}{b_0} \leq 1,5(1 - \beta) \quad (2.5)$$

$$g \geq t_1 + t_2 \quad (2.6)$$

Onde:

$$\beta = \frac{d_1 + d_2}{2b_0} \quad (2.7)$$

Rautaruki (1998) também aponta um limite para o afastamento em função do g_a , definido como afastamento g menos duas vezes a espessura da solda, como indicado na equação 2.8.

$$g_a = g - 2 \cdot t_s \quad (2.8)$$

$$\frac{g_a}{t_0} \geq 1,5 \quad (2.9)$$

Onde t_s corresponde à espessura da solda.

2.1.2. Modos de Falha

As ligações entre elementos com perfis tubulares podem apresentar diferentes modos de falha influenciados por critérios como geometria da ligação, dimensionamento dos elementos componentes da ligação e condições de sollicitação. Os tipos de modos de falha são descritos a seguir e ilustrados na Figura 2.3.

Modo A – Plastificação da face ou de toda a seção transversal do banzo junto a diagonais ou montantes;

Modo B – Plastificação, amassamento ou instabilidade da face lateral da seção transversal do banzo junto a diagonais ou montantes sob compressão;

Modo C – Plastificação ou instabilidade por cisalhamento do banzo junto a diagonais ou montantes;

Modo D – Ruptura por punção da parede do banzo na área de contato com diagonais ou montantes;

Modo E – Ruptura ou plastificação na região da solda ou flambagem localizada de diagonais ou montantes devido à distribuição não uniforme de tensão;

Modo F – Flambagem localizada de diagonais ou montantes comprimidos ou do banzo, na região da ligação.

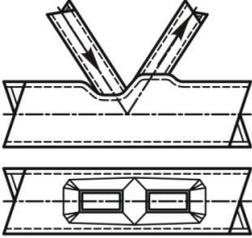
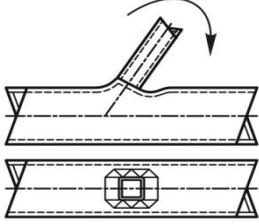
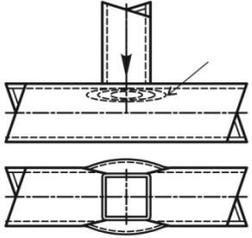
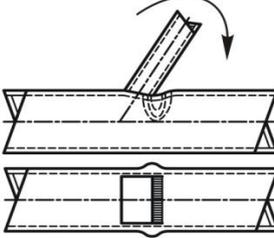
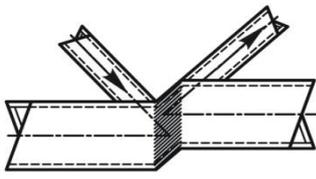
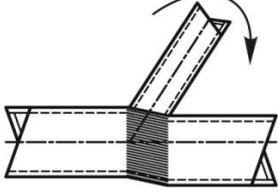
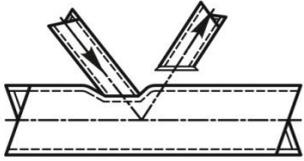
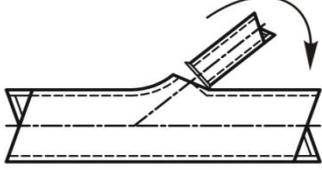
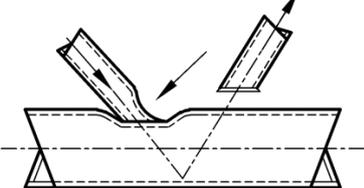
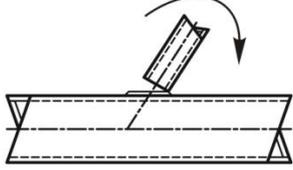
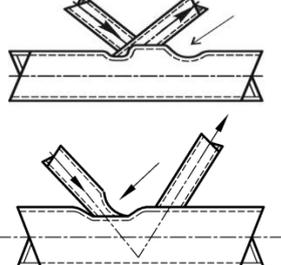
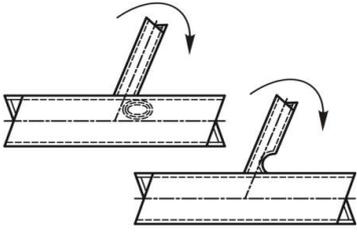
Modo	Força Axial	Momento Fletor
A		
B		
C		
D		
E		
F		

FIGURA 2.3: Modos de falha – PN (2011)

2.1.3. Dimensionamento das ligações

O dimensionamento das ligações com perfis tubulares está fundamentado no Método dos Estados Limites Últimos, em que a força aplicada deve ser inferior à resistência de projeto da ligação, considerando o coeficiente de majoração da força aplicada (γ_s) e o coeficiente de minoração da resistência (γ_M) como descrito a seguir:

$$S_d \leq R_d \quad (2.9)$$

$$\sum \gamma_s \cdot F \leq \frac{R}{\gamma_M} \quad (2.10)$$

Onde:

$$S_d = F \cdot \gamma_s \quad (2.11)$$

$$R_d = \frac{R}{\gamma_M} \quad (2.12)$$

R_d = Resistência de projeto da ligação;

S_d = Esforço solicitante;

F = Força aplicada;

R = Resistência da ligação;

γ_s, γ_M = Coeficientes de segurança.

2.1.3.1. Parâmetros de dimensionamento

Neste item, são descritos os parâmetros de dimensionamento das ligações do tipo “K” e “KT” com afastamento, perfis tubulares retangulares no banzo, tubular circulares nas diagonais e carregamento no plano das ligações. As ligações do tipo “T” não serão dimensionadas por apresentar solicitações desprezíveis devido à concepção estrutural da treliça analisada neste trabalho. Os parâmetros utilizados no procedimento de dimensionamento são:

$$n = \frac{\sigma_{0,Sd}}{f_y \cdot \gamma_M} \quad (2.13)$$

$$\sigma_{0,Sd} = \frac{N_{0,Sd}}{A_0} + \frac{M_{0,Sd}}{W_0} \quad (2.14)$$

$$\gamma = \frac{b_0}{2 \cdot t_0} \quad (2.15)$$

$$\eta = \frac{d_i}{b_0} \quad (2.16)$$

Onde:

$\sigma_{0,Sd}$ = Máxima tensão de compressão solicitante de cálculo no banzo em um determinado nó, causada pela força $N_{0,Sd}$ e pelo momento $M_{0,Sd}$;

f_y = tensão de escoamento do aço;

γ_M = coeficiente de segurança igual a 1,0;

$N_{0,Sd}$ = Força axial solicitante de cálculo no banzo que provoca a tensão $\sigma_{0,Sd}$;

$M_{0,Sd}$ = Momento fletor solicitante de cálculo da ligação;

A_0 = Área da seção transversal do banzo;

W_0 = Módulo de resistência elástica da seção transversal do banzo.

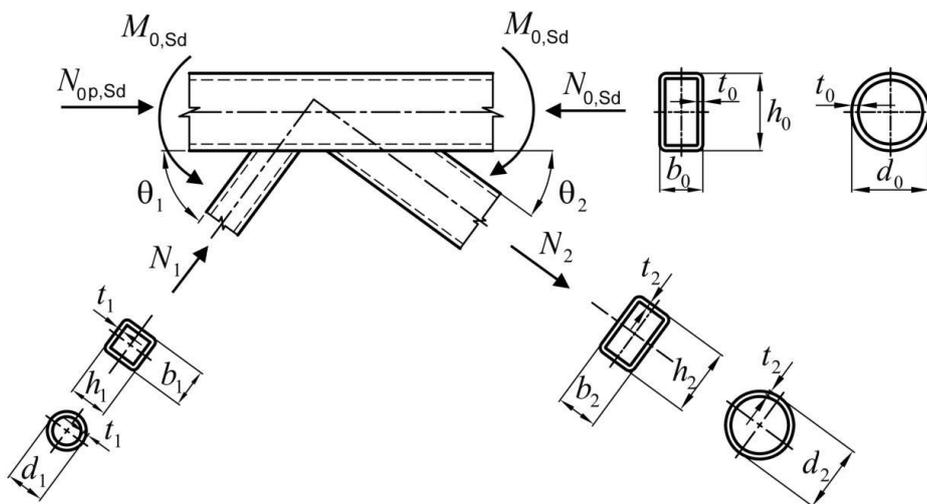


FIGURA 2.4: Parâmetros e convenções – PN (2011)

2.1.3.2. Limitações de dimensionamento

Para determinação da capacidade resistente da ligação, as formulações estabelecidas são válidas desde que sejam atendidas as condições limites de afastamento e excentricidade, citadas anteriormente, e as exigências restritivas de características físicas e geométricas relacionadas a seguir:

- A tensão de escoamento do aço usado na composição da peça não pode exceder 460MPa;
- A espessura da chapa não pode ser inferior a 2,5mm ou superior a 25mm;
- As peças que compõem a ligação não podem ter inércia variável;
- O ângulo entre o banzo e as diagonais não pode ser inferior a 30°.

Os limites de dimensionamento, segundo critérios geométricos e de esbeltez dos elementos que compõem as ligações do tipo “K” com afastamento, são:

$$0,5 \leq \frac{h_0}{b_0} \leq 2,0 \quad (2.17)$$

$$\frac{b_0}{t_0} \leq 35 \quad (2.18)$$

$$\frac{h_0}{t_0} \leq 35 \quad (2.19)$$

$$\frac{d_i}{t_i} \leq 50 \quad (i=1,2) \quad (2.20)$$

$$0,4 \leq \frac{d_i}{b_0} \leq 0,8 \quad (i=1,2) \quad (2.21)$$

$$\frac{b_0}{t_0} \leq 1,27 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.22)$$

$$\frac{h_0}{t_0} \leq 1,27 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.23)$$

$$\frac{d_i}{t_i} \leq 0,06 \cdot \frac{E}{f_y} \quad (i=1,2) \quad (2.24)$$

2.1.3.3. Resistência Última

A seguir, tem-se a avaliação, segundo o Eurocode 3 (2005) e o PN (2011), para as ligações “K” e “KT” para diversos modos de falha.

A análise do sistema treliçado descrito no item 2.6 mostra que, para esse método de carregamento, os esforços atuantes nos montantes são desprezíveis. Em virtude do sistema de carregamento e do modelo estrutural aplicado neste estudo, não serão verificadas as ligações do tipo “T” e “KT” considerando as prescrições estabelecidas pelo Cidect (2009), que define para situações em que os montantes não são solicitados, a ligação do tipo “KT” deverá ser dimensionada como se fosse uma ligação do tipo “K”.

a) Verificação de ruptura quanto à plastificação da parede do banzo por compressão e/ou tração – Modo de falha A

$$N_{i,Rd} = \frac{8,9 \cdot \pi \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \gamma^{0,5}}{4 \sin \theta_i} \cdot \left(\frac{d_1 + d_2}{2b_0} \right) \cdot K_n \quad (i=1,2) \quad (2.25)$$

Onde:

$$K_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta} \quad (\text{Para } n > 0; \text{ compressão}) \quad (2.26)$$

$$K_n = 1,0 \quad (\text{Para } n \leq 0; \text{ tração}) \quad (2.27)$$

b) Verificação de colapso da diagonal por tração – Modo de falha C

$$N_{i,Rd} = \frac{\pi \cdot f_{yi} \cdot t_i}{4} \cdot (2d_i - 4t_i + d_i + b_{eff}) \quad (i = 1,2) \quad (2.28)$$

Onde:

$$b_{eff} = \frac{10f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot d_i}{b_0 \cdot f_{yi} \cdot t_i} \leq d_i \quad (i = 1,2) \quad (2.29)$$

c) Verificação de ruptura por punção da parede do banzo na área de contato com as diagonais e/ou montantes – Modo de falha D

$$N_{i,Rd} = \frac{\pi \cdot f_y \cdot t_0}{4\sqrt{3} \sin \theta_i} \cdot \left(\frac{2d_i}{\sin \theta_i} + d_i + b_{e,p} \right) \quad (i=1,2) \quad (2.30)$$

$$b_{e,p} = \frac{10t_0 \cdot d_i}{b_0} \leq b_i \quad (i=1,2) \quad (2.31)$$

As formulações 2.30 e 2.31 são válidas quando atendido o seguinte critério:

$$\beta \leq 1 - \frac{1}{\gamma} \quad (2.32)$$

d) Verificação de ruptura quanto à plastificação por cisalhamento do banzo – Modo E

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} \cdot A_v}{\sqrt{3} \cdot \sin \theta_i} \quad (i=1,2) \quad (2.33)$$

$$N_{0,Rd} = \frac{\pi}{4} \cdot \left((A_0 - A_v) f_{y0} + A_v \cdot f_y \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V_{sd}}{V_{pl,Rd}} \right)^2} \right) \quad (2.34)$$

2.2. Elementos de barra

Os perfis em seção tubulares apresentam elevada resistência ao esforço axial. As diagonais componentes do sistema treliçado, referente a este estudo, são elementos de seção transversal circular, submetidos à sollicitação de compressão e à tração com processo de dimensionamento fundamentado nas prescrições da NBR 8800 (2008).

2.2.1. Dimensionamento das barras

2.2.1.1. Barras submetidas à força axial de tração

Para o dimensionamento de barras de seções tubulares, deve ser atendida a seguinte condição:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (2.35)$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.36)$$

Onde:

$N_{t,Sd}$ = Força axial de tração solicitada de cálculo;

$N_{t,Rd}$ = Força axial de tração resistente de cálculo;

A_g = Área bruta da seção transversal da barra;

f_y = Tensão de escoamento da barra;

γ_{a1} = Coeficiente de ponderação da resistência igual a 1,00.

2.2.1.2. Barras submetidas à força axial de compressão

Para o dimensionamento de barras de seções tubulares, devem ser seguidas as condições:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (2.37)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (2.38)$$

$$\chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (\lambda_0 \leq 1,5) \quad (2.39)$$

$$\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2} \quad (\lambda_0 > 1,5) \quad (2.40)$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} \quad (2.41)$$

$$N_e = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2} \quad (2.42)$$

Onde:

$N_{c,Sd}$ = Força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$ = Força axial de compressão resistente de cálculo;

χ = Fator de redução associado à compressão;

Q = Fator de redução total associado à flambagem local igual a 1,0;

λ_0 = Índice de esbeltez reduzido;

N_e = Força axial de flambagem elástica;

I = Momento de inércia da seção transversal;

K = Coeficiente de flambagem por flexão, de elementos isolados, igual a 1,0;

L = Comprimento do elemento.

2.3. Laje de concreto

O dimensionamento da laje de concreto foi baseado em prescrições normativas da NBR 6118 (2004), obedecendo aos requisitos gerais de qualidade da estrutura quanto à segurança à ruptura, à durabilidade e ao desempenho.

2.3.1. Espessura da laje

A NBR 6118 (2004) recomenda que as lajes maciças tenham os seguintes limites mínimos para espessura:

- 5cm para lajes de cobertura não em balanço;
- 7cm para lajes de piso ou de cobertura em balanço;
- 10cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30kN;
- 12cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30kN;
- 15cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, $l/42$ para lajes de piso biapoadas e $l/50$ para lajes de piso contínuas;
- 16cm para lajes lisas e 14cm para lajes-cogumelo.

2.3.2. Resistência do concreto

Considerando uma classe de agressividade ambiental urbana moderada com risco de deterioração pequena (classe II), a durabilidade da estrutura segue as indicações da NBR 6118 (2004) que estabelece as seguintes correspondências entre classe de agressividade e qualidade do concreto de cobrimento da Tabela 2.1. Para o cobrimento da armadura na laje de concreto, a norma prescreve as dimensões mínimas da Tabela 2.2.

TABELA 2.1
Correspondência entre classe de agressividade e
qualidade do concreto – NBR 6118 (2004)

Concreto	Classe de agressividade			
	I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
Classe de concreto	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$

TABELA 2.2
Correspondência entre classe de agressividade ambiental e
recobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$ – NBR 6118 (2004)

Tipo de estrutura	Classe de agressividade			
	I	II	III	IV
	Cobrimento nominal (mm)			
Laje de concreto armado	20	25	35	45

Para o agregado graúdo, a norma determina que a dimensão máxima característica utilizada no concreto não pode superar em 20% a espessura nominal do cobrimento conforme a equação 2.43:

$$d_{m\acute{a}x} \leq 1,2 \cdot c_{nom} \quad (2.43)$$

2.3.3. Controle de fissuras – Armadura mínima de tração

O controle da abertura das fissuras na laje de concreto é determinado pela NBR 8800 (2008), que prescreve a equação 2.44 para o cálculo da armadura mínima de tração sob deformação imposta:

$$A_s = \frac{k \cdot k_c \cdot k_s \cdot f_{ct,ef} \cdot A_{ct}}{\sigma_{st}} \quad (2.44)$$

$$k_c = \frac{1}{1 + \frac{t_c}{2y_0}} + 0,3 \leq 1,0 \quad (2.45)$$

$$\sigma_{st} = 810 \cdot w_k^{0,5} \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}^{2/3}}{\phi}} \leq f_{ys} \quad (2.46)$$

Onde:

A_s = área de armadura;

A_{ct} = área efetiva da laje de concreto;

k = coeficiente de correção que leva em conta os mecanismos de geração de tensões de tração, igual a 0,8;

k_s = coeficiente que leva em consideração o efeito de redução da força normal na laje de concreto devido à fissuração inicial e ao deslizamento local da ligação entre e o perfil de aço, igual a 0,9;

t_c = espessura da laje de concreto;

y_0 = distância entre os centros geométricos da laje de concreto e da seção mista homogeneizada;

σ_{st} = máxima tensão de tração permitida na armadura, imediatamente após a ocorrência da fissuração;

w_k = abertura máxima característica das fissuras, dada a função da agressividade ambiental, igual a 0,3mm;

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

$f_{ct,ef}$ = resistência média à tração efetiva do concreto no instante em que forma as primeiras fissuras (MPa);

ϕ = diâmetro das barras da armadura não superior a 20mm;

f_{ys} = resistência ao escoamento do aço da armadura (MPa).

2.3.4. Resistência última da laje de concreto

A resistência de cálculo do concreto com 28 dias é dada pela equação 2.47:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.47)$$

Onde:

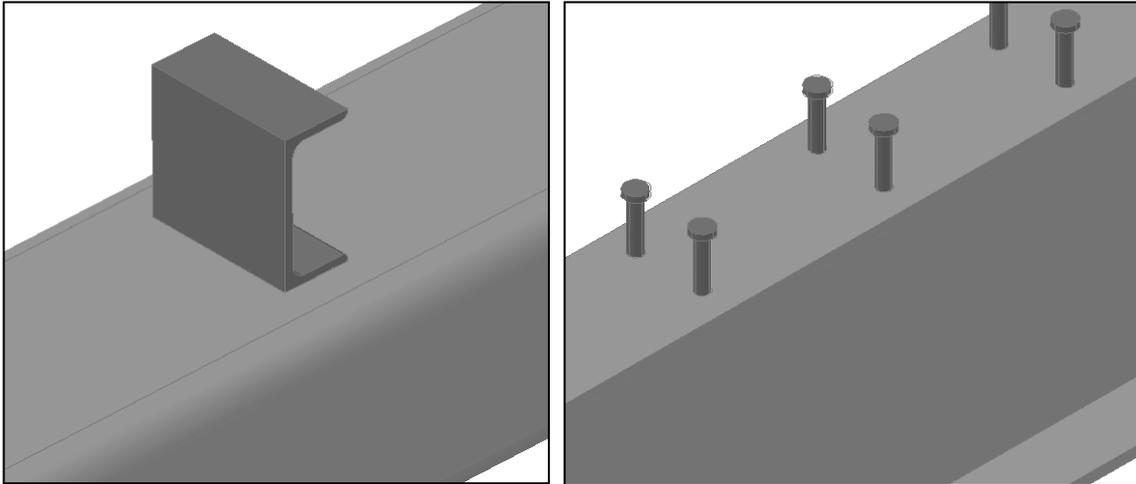
γ_c = Coeficiente de ponderação da resistência no estado limite último igual a 1,0.

Para determinação da resistência última à compressão da laje de concreto, deve ser respeitada a seguinte condição:

$$R_d \geq S_d \quad (2.48)$$

2.4. Conectores de cisalhamento

Os conectores de cisalhamento, responsáveis pela ação conjunta do perfil metálico e da laje de concreto, transmitem os esforços longitudinais entre os dois elementos que se originam na interface entre a viga metálica e a laje de concreto (VERÍSSIMO, 2007). Alguns tipos usuais de conectores que foram avaliados por meio de estudos teóricos e ensaios experimentais, realizados por diversos pesquisadores, apresentaram resultados eficientes em relação à resistência a força de cisalhamento transmitida e ao deslizamento relativo entre os elementos. Apresentam-se os conectores tipo pino com cabeça ou *stud bolts* e conectores em perfil U laminado como ilustra a Figura 2.5.



(a) Conector em perfil U laminado

(b) Conector tipo stud bolt

FIGURA 2.5: Vigas metálicas com conectores de cisalhamento.

2.4.1. Dimensionamento dos conectores

O conector de cisalhamento utilizado na viga mista treliçada referência deste estudo é o conector tipo perfil “U” laminado, dimensionado com base em prescrições da NBR8800 (2008). A força resistente desse conector, com altura de seção transversal igual ou superior a 75mm totalmente embutido em laje maciça, é dada pela equação 2.49:

$$Q_{Rd} = \frac{0,3(t_{fcs} + 0,5t_{wcs}) \cdot L_{cs} \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (2.49)$$

Onde:

t_{fcs} = espessura da mesa do conector, tomada a meia distância entre a borda livre e a face adjacente da alma;

t_{wcs} = espessura da alma do conector;

L_{cs} = comprimento do perfil “U”,

γ_{cs} = coeficiente de ponderação da resistência do conector igual a 1,0.

2.5. Seção mista

O sistema misto consiste no trabalho em conjunto da laje de concreto com o perfil metálico, no qual a laje de concreto contribui com a resistência à compressão. A NBR 8800 estabelece que, para o dimensionamento da viga treliçada mista, sejam

consideradas apenas as contribuições da laje de concreto ao esforço de compressão e do banzo inferior ao esforço de tração.

2.5.1. Largura efetiva

As tensões normais atuantes na laje sofrem variações ao longo da sua largura onde a tensão maior está localizada no eixo central e diminui à medida que se afasta do centro. Como a contribuição à resistência da laje não é completa, a NBR 8800 fornece expressões simplificadas que estabelecem valores máximos para a colaboração da laje de concreto na resistência do sistema misto.

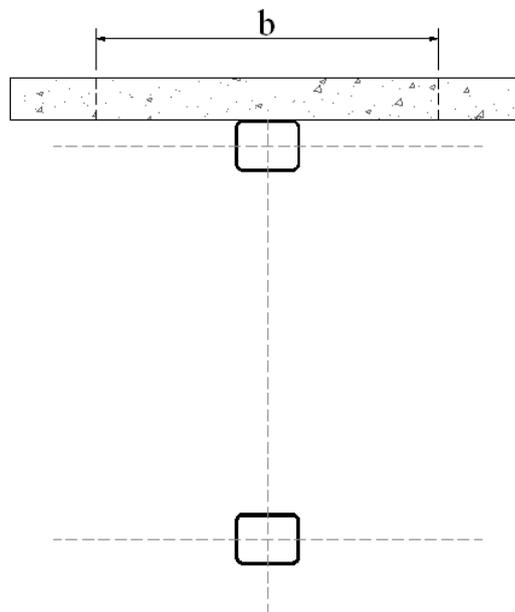


FIGURA 2.6.: Largura efetiva

A largura efetiva “b” (FIGURA 2.6), de cada lado da linha de centro da viga, deve ser igual ou menor aos seguintes valores:

- 1/8 do vão da viga mista;
- metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente;
- distância da linha de centro da viga à borda em balanço.

2.5.2. Resistência última da seção mista

Considerando as prescrições da NBR 8800 (2008), a capacidade resistiva ao momento fletor da viga mista é determinada, a partir das propriedades da seção mista plastificada. Adotando a distribuição plástica das tensões, conclui-se que a viga mista não sofrerá flambagem local pela presença da laje de concreto, adquirindo um comportamento de uma viga compacta.

2.5.2.1. Interação completa

O cálculo da resistência última ao momento fletor nas vigas mistas com interação total não admite deslizamento na interface aço-concreto. O momento fletor resistente é determinado pela plastificação do concreto ou da seção de aço.

A NBR 8800 (2008) prescreve que, para o dimensionamento de vigas mistas treliçadas, a interação entre a laje de concreto e o perfil metálico deve ser completa e a linha neutra da seção plastificada deve estar na laje de concreto (FIGURA 2.7), representado pelas equações 2.50 e 2.51:

$$0,85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot a \geq A_{bi} \cdot f_{yd} \quad (2.50)$$

$$\sum Q_{Rd} \geq A_{bi} \cdot f_{yd} \quad (2.51)$$

Obedecendo aos seguintes critérios:

$$C_{cd} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot a \quad (2.52)$$

$$T_{ad} = A_{bi} \cdot f_{yd} \quad (2.53)$$

$$a = \frac{T_{ad}}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b} \quad (2.54)$$

$$M_{Rd} = T_{ad} \cdot d_2 \quad (2.55)$$

Onde:

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

a = espessura da região comprimida da laje;

b = largura efetiva da laje de concreto;

A_{bi} = área do banzo inferior;

f_{yd} = resistência de cálculo ao escoamento do aço;

$\sum Q_{Rd}$ = somatório das forças resistentes de cálculo dos conectores de cisalhamento;

C_{cd} = força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje de concreto;

T_{ad} = força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço;

M_{Rd} = Momento fletor resistente de cálculo;

d_2 = distância entre as forças de tração e compressão na treliça mista.

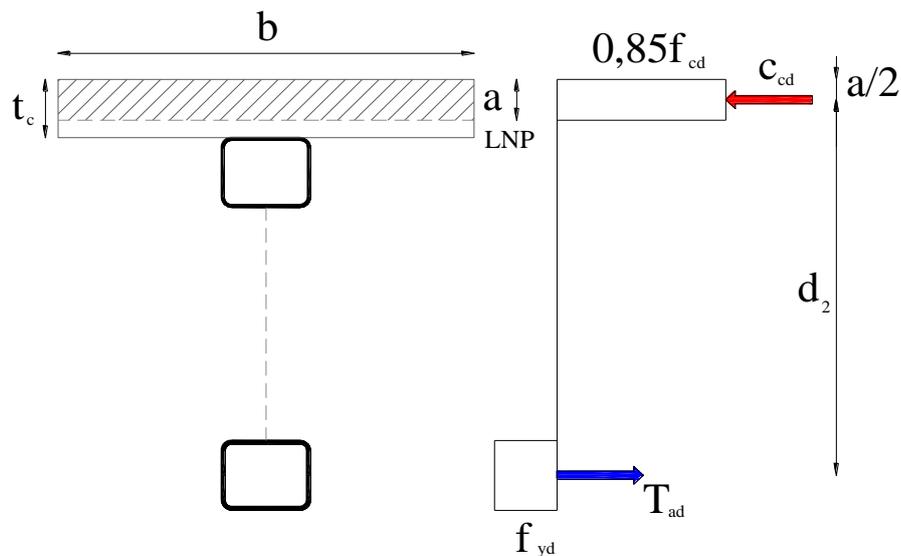


FIGURA 2.7: Distribuição de tensões em treliça mista com interação completa – NBR 8800(2008)

2.5.2.2. Deslocamentos verticais – Análise elástica

Para a determinação da deflexão vertical, a NBR 8800 (2008) indica que os cálculos devem ser feitos no regime elástico, no qual as propriedades geométricas da seção mista precisam ser obtidas homogeneizando-se a seção composta pelo perfil de aço, e a laje de concreto dividindo a largura efetiva pela seguinte razão modular:

$$\alpha_E = \frac{E}{E_c} \quad (2.63)$$

Onde:

E = Módulo de elasticidade do aço;

E_c = Módulo de elasticidade secante do concreto.

Na treliça mista, o momento de inércia da seção mista homogeneizada é calculado reduzindo a inércia da seção mista, composta pelo banzo inferior e a largura efetiva da laje de concreto, em 15% da inércia da treliça de aço composta pelos banzos superior e inferior, como mostra a equação 2.64:

$$I_{ef} = I_m - 0,15I_{trcl} \quad (2.64)$$

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

O programa experimental foi realizado no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” do Departamento de Engenharia Civil, da Escola de Minas, da Universidade Federal de Ouro Preto, em parceria com a empresa V&M do Brasil, responsável pelo dimensionamento e fornecimento do protótipo ensaiado. Os objetivos do ensaio foram determinar a resistência global, avaliar o comportamento do sistema e sua deformabilidade, monitorar a distribuição de tensões nos nós da treliça de aço, conectores de cisalhamento, laje de concreto e armaduras. Com a finalidade de simular as situações reais da prática construtiva, a V&M do Brasil forneceu um protótipo em escala real, contendo todos os elementos necessários para utilização do sistema misto em condições práticas normais.

O dimensionamento da estrutura feito com base nas prescrições normativas apresentadas no capítulo anterior e teve como objetivo, determinar a resistência de cálculo para preparação do projeto de instrumentação e monitoramento do conjunto experimental, assim como as análises numéricas para determinação das cargas de projeto.

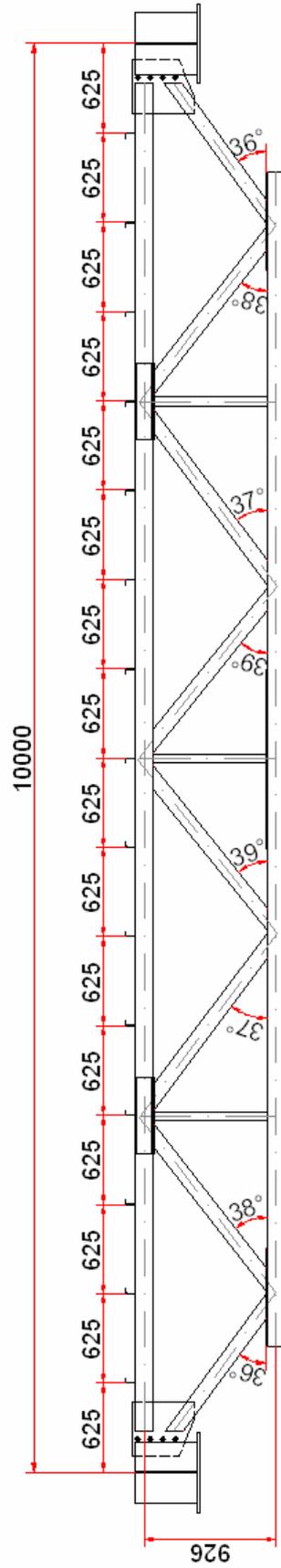
3.2. Protótipo ensaiado

3.2.1. Propriedades físicas e geométricas da treliça de aço

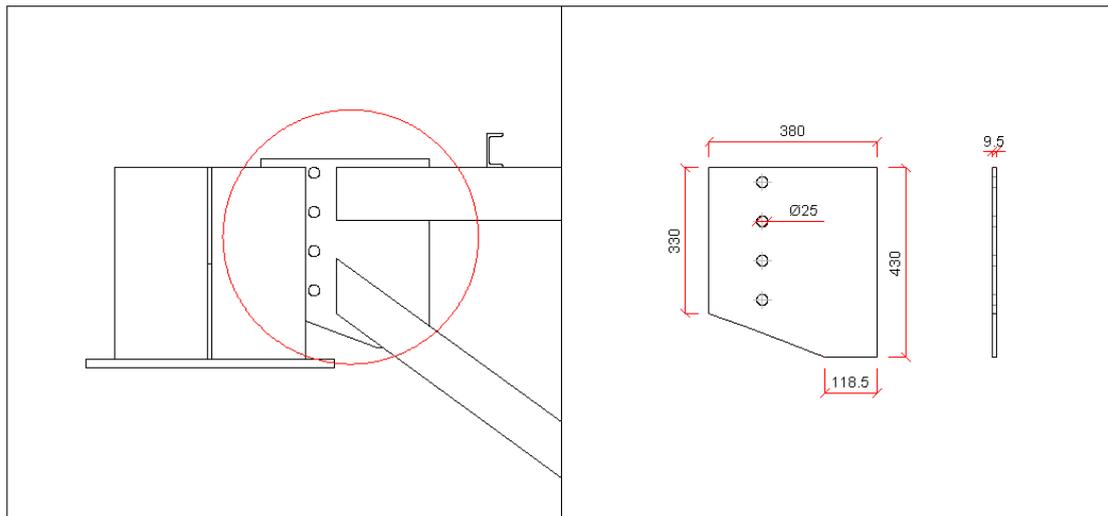
O protótipo ensaiado consiste numa treliça metálica associada à laje de concreto. A treliça apresenta as propriedades e dimensões indicadas na Tabela 3.1 e na Figura 3.1. As características físicas do aço estrutural da viga treliçada foram determinadas por meio de ensaios de caracterização dos materiais realizados pela V&M do Brasil.

TABELA 3.1
Propriedades físicas e geométricas da treliça de aço

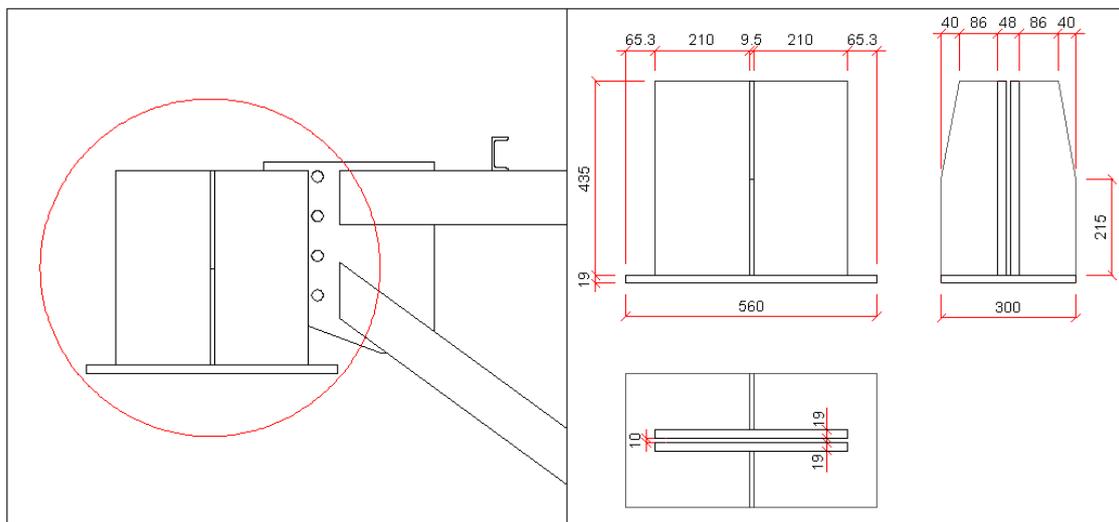
Treliça	Altura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão última (MPa)	Seção transversal
Banzo superior	120	150	4,8	-	456	720	
Banzo inferior	120	150	6,4	-	456	720	
Diagonais	-	-	6,4	101,6	442	930	
Montantes	-	-	6,4	60,3	442	930	
Chapas de reforço 1	110	683	12,5	-	350	450	
Chapas de reforço 2	110	533	12,5	-	350	450	
Chapas de reforço 3	110	1250	12,5	-	350	450	



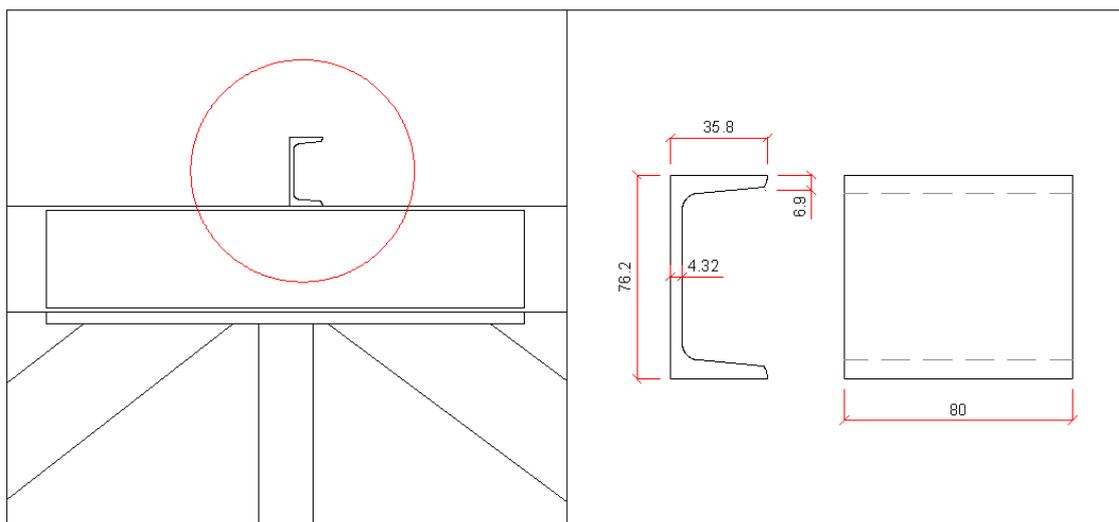
(a) Dimensões geométricas reais da treliça metálica [mm]



(b) Dimensões da placa de apoio [mm]



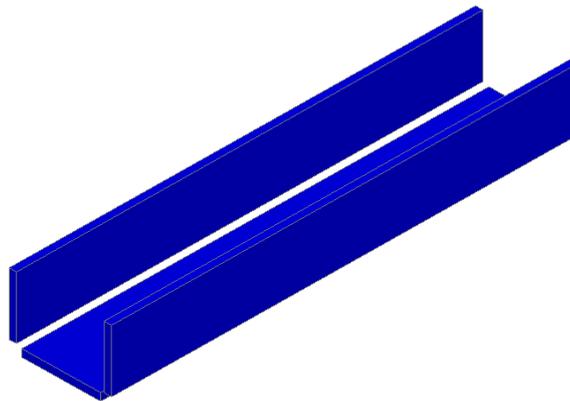
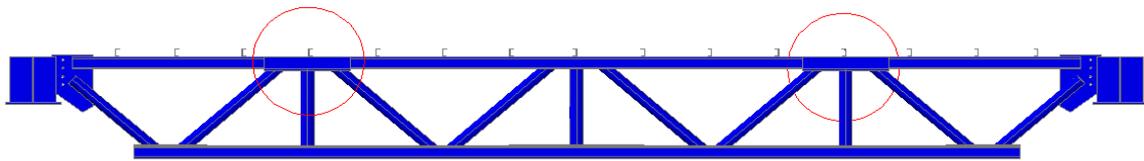
(c) Dimensões da base de apoio [mm]



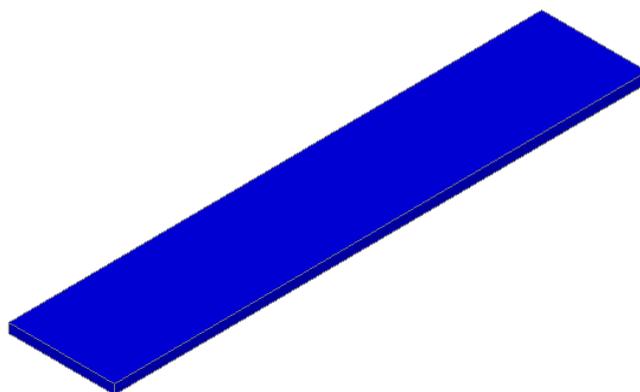
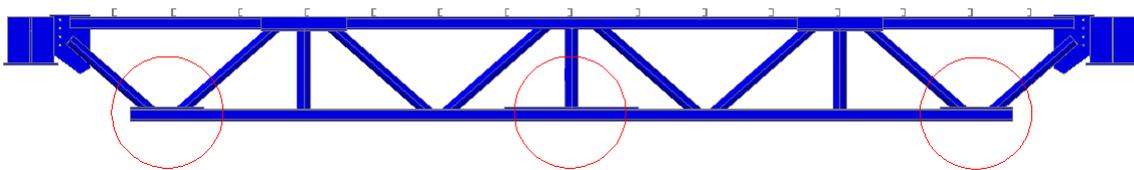
(d) Dimensões dos conectores de cisalhamento [mm]

FIGURA 3.1: Dimensões e características físicas da treliça de aço

A treliça possui cinco pontos de reforços nodais exercidos por chapas planas em aço estrutural soldadas nas paredes laterais, inferiores e superiores dos banzos, cujas dimensões e propriedades estão descritas na Tabela 3.1. A localização das chapas e as características físicas são ilustradas na Figura 3.2. As chapas são reforços nos nós projetadas em função de uma condição de carregamento diferente do ensaiado para resistir ao mecanismo de falha estabelecido a partir do dimensionamento da treliça mista nas condições do projeto original.



(a) Chapas de reforço 2



(b) Chapas de reforço 1 (extremidades) e chapa de reforço 3 (central)

FIGURA 3.2.: Posicionamento das chapas de reforços nodais

Na Figura 3.3, tem-se uma vista geral da treliça ensaiada.



FIGURA 3.3: Viga treliçada sobre apoios no laboratório de estruturas Prof. Altamiro Tibiriçá Dias

3.2.2. Propriedades físicas e geométricas da laje de concreto

A laje componente do sistema misto foi concretada no laboratório com as seguintes características geométricas:

- ✓ Comprimento: 10m
- ✓ Largura: 2m
- ✓ Espessura: 0,10m

Com objetivo de combater os efeitos da fissuração e aumentar a resistência à tração da placa, a laje foi armada nas duas direções, conforme indicado na Figura 3.4.

A estrutura de escoramento da forma da laje foi desenvolvida para não permitir deslocamentos durante a concretagem e no período de cura do concreto, conforme ilustra a Figura 3.5.

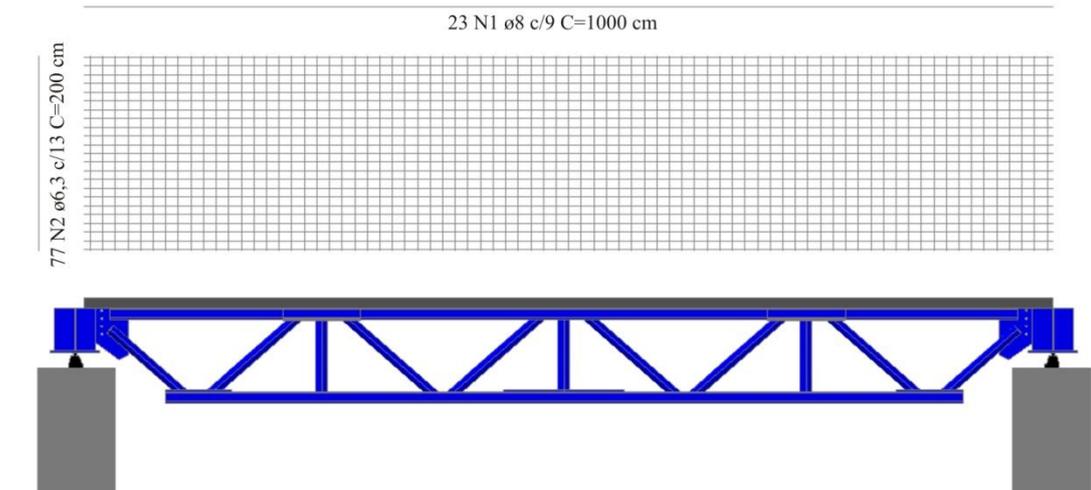


FIGURA 3.4: Armadura da laje de concreto



FIGURA 3.5: Estrutura de escoramento da laje de concreto

O processo de concretagem (FIGURA 3.6) ocorreu por meio de mistura mecânica com adensamento por imersão. O período de cura do concreto foi acompanhado por controle de temperatura e hidratação do concreto. Ensaios de caracterização do concreto comprovaram a resistência característica do concreto de 25,88MPa, muito próxima de 25MPa prevista por dosagem experimental.



FIGURA 3.6: Concretagem da laje no laboratório de estruturas Prof. Altamiro Tibiriçá Dias

3.3. Montagem Experimental

A montagem do ensaio foi desenvolvida para reproduzir situações práticas de carregamentos verticais aplicados às vigas metálicas. Para isso, o protótipo foi posicionado na laje de reação do laboratório, que possui furos a cada 50cm e capacidade máxima de 500kN por furo, de forma a permitir a fixação dos pórticos de reação e contenções laterais.

3.3.1. Sistema de apoio e contenção lateral do protótipo

A treliça foi apoiada em blocos de concreto na altura necessária para viabilizar a instrumentação futura e sobre os blocos foram posicionados aparelhos de apoio (FIGURA 3.7a). Para impedir o movimento lateral da viga, foram projetadas contenções laterais posicionadas no banzo inferior da treliça de aço e na laje de concreto (FIGURAS 3.7b e 3.7c). As contenções foram responsáveis por apoiar lateralmente a viga mista, mas permitindo o deslocamento transversal vertical na direção do carregamento, servindo apenas como controle de eventual tombamento da estrutura.



(a) Aparelho de apoio



(b) Contenções laterais da viga metálica



(c) Contenções laterais da laje

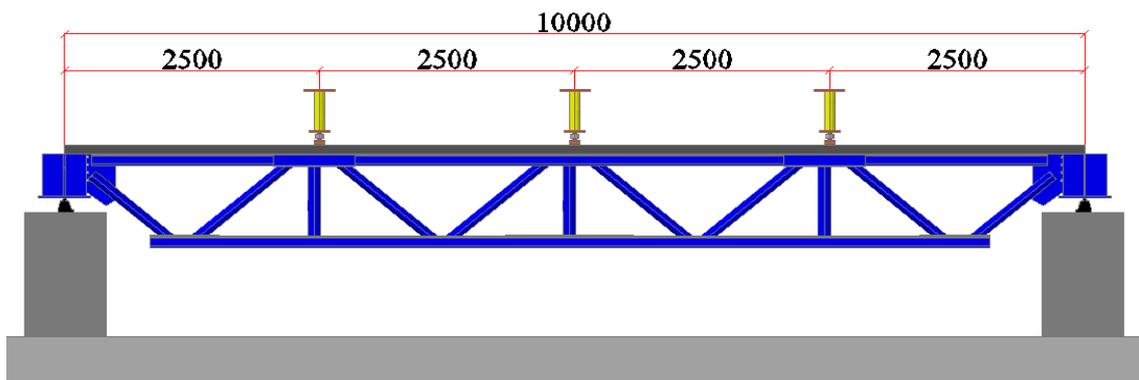
FIGURA 3.7: Sistema de apoio e contenções laterais da viga mista

3.3.2. Sistema de aplicação do carregamento

A aplicação dos carregamentos foi simultânea e feita por meio de três atuadores hidráulicos, fixos aos pórticos de reação. A Figura 3.8 mostra o sistema de aplicação de carga dos atuadores hidráulicos na laje de concreto e o posicionamento dos mesmos na treliça mista. Cada atuador hidráulico tem capacidade de 500kN e possui uma célula de carga cuja extremidade possui rótula para manter a verticalidade do carregamento. Foram adicionadas placas metálicas sob as rótulas para melhor distribuição do carregamento e evitar um eventual esmagamento do concreto por concentração de tensões na região de aplicação da carga.



(a) Atuador hidráulico sobre a laje



(b) Posicionamento dos atuadores hidráulicos [mm]

FIGURA 3.8: Sistema de aplicação dos carregamento

3.4. Estudo qualitativo da distribuição de tensões

Com objetivo de instrumentar as principais regiões do protótipo, foi realizada uma análise numérica em uma tese de doutorado em andamento (MARTINS, 2011a, 2010, 2011b), que desenvolveu um modelo tridimensional em elementos finitos utilizando o programa computacional Ansys 11.0. O modelo apresentou as distribuições de tensões do sistema estrutural que auxiliaram no posicionamento ideal da extensometria como mostra a Figura 3.9.

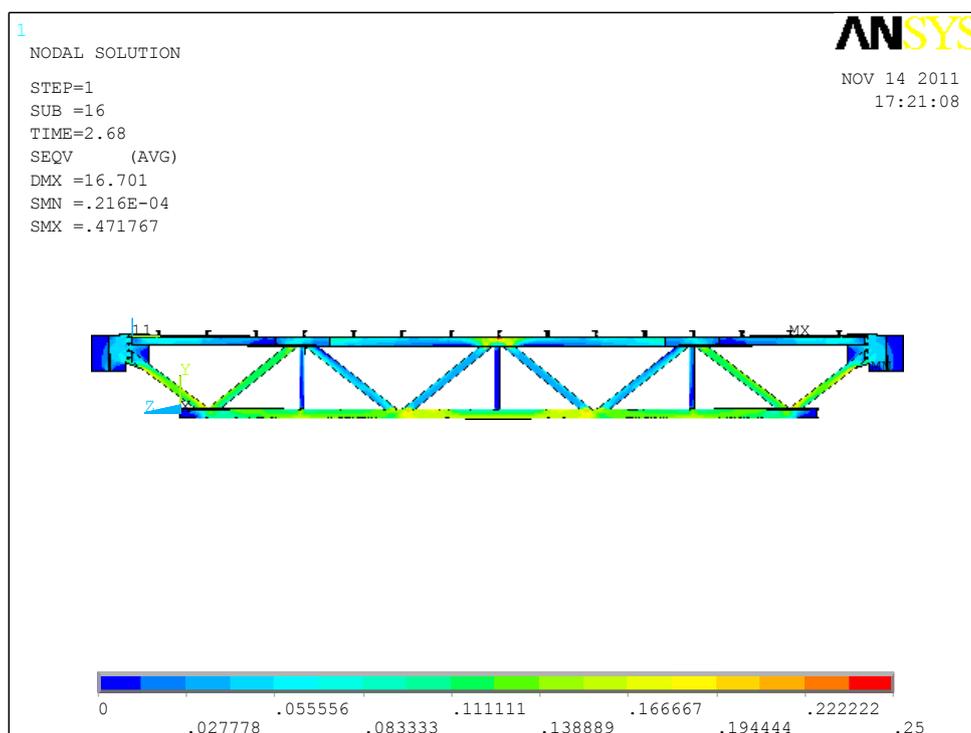


FIGURA 3.9: Fração do modelo da treliça mista em elementos finitos (MARTINS, 2011)

3.5. Instrumentação

A instrumentação representou uma etapa fundamental na realização do ensaio experimental por ser responsável pela realização do monitoramento do comportamento da estrutura.

O monitoramento das deformações foi executado por extensômetros elétricos de resistência unidirecionais e rosetas a 45° para os elementos em aço e extensômetros unidirecionais para elementos de concreto, posicionados em várias regiões do protótipo.

Deslocamentos lineares foram mensurados por deflectômetros e LVDT's (Linear Variable Displacement Transducers). Os LVDT's foram responsáveis por medir os deslocamentos verticais da viga mista, e os deflectômetros monitoraram os deslocamentos dos apoios e da interação entre viga metálica e laje de concreto.

A instrumentação do protótipo foi composta por 32 extensômetros lineares, quatro extensômetros tipo roseta, quatro LVDT's e sete deflectômetros. A Tabela 3.2 ilustra a instrumentação utilizada.

TABELA 3.2
Instrumentação utilizada

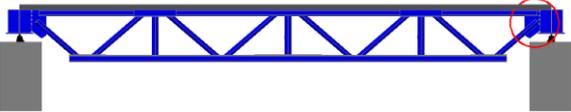
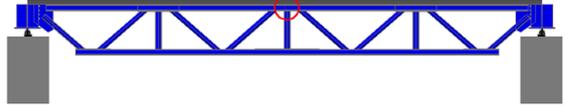
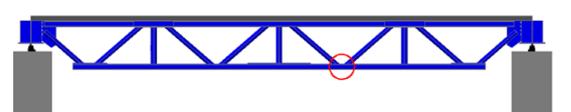
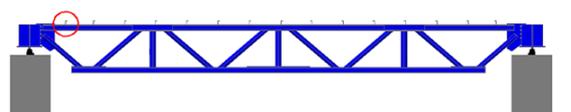
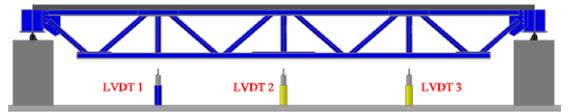
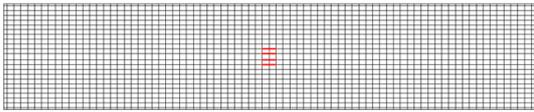
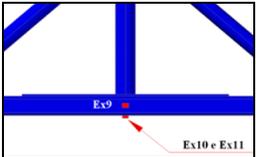
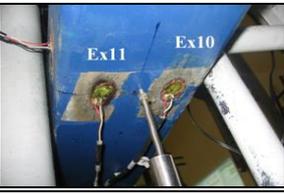
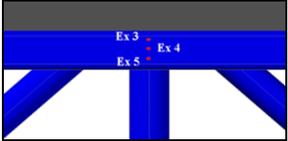
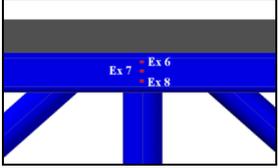
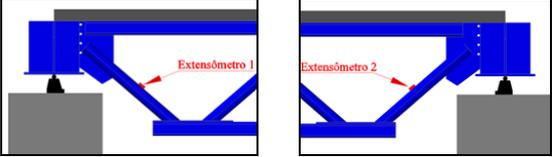
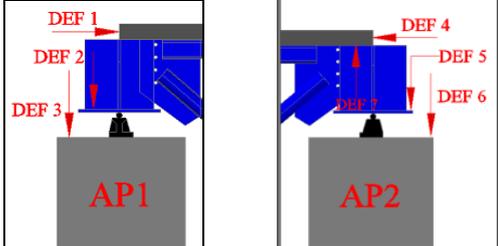
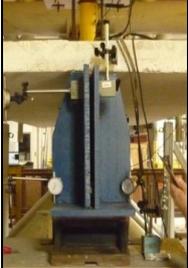
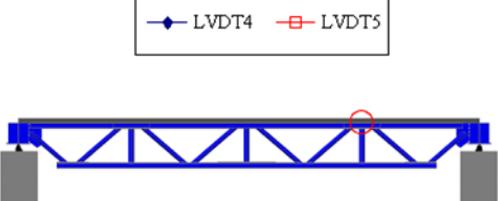
	
	
	
	
	
	

Tabela 3.2: Instrumentação utilizada (continuação)

3.5.1. Sistema de Aquisição de Dados

Para medição dos dados fornecidos pelos extensômetros, rosetas e LVDT's, foi utilizado um sistema automático de aquisição e monitoramento de dados controlado por um computador e softwares de controle e aquisição de dados. O sistema é composto por seis módulos de oito canais *Spider8*, como mostra a Figura 3.10, fabricados pela HBM (*Hottinger Baldwin Messtechnik*), controlados pelo software *Catman 4.5*

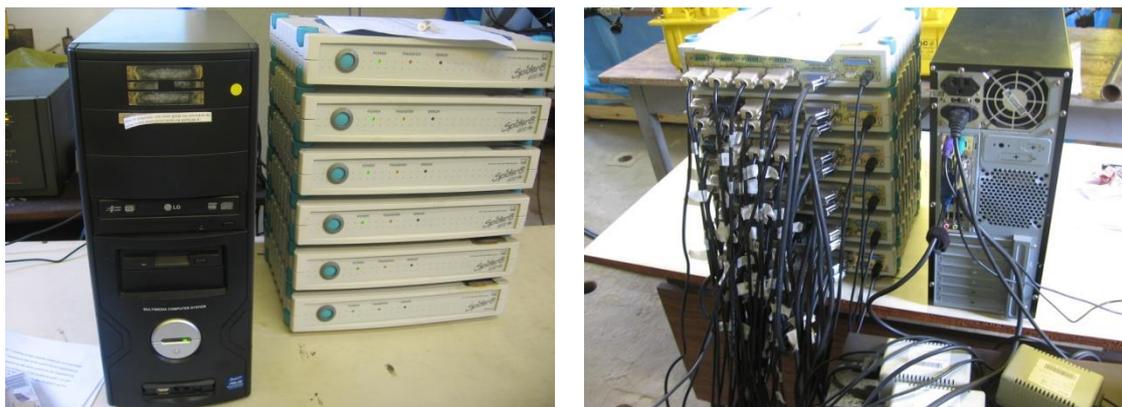


FIGURA 3.10: Módulos de aquisição de dados *Spider 8*

3.6. Metodologia do ensaio

Com objetivo de verificar o funcionamento dos atuadores hidráulicos e testar o sistema de aquisição de dados, foi realizado um pré-ensaio que consistiu na aplicação gradual de pequenos passos de carga até atingir o valor de 3kN.

As cargas nos atuadores hidráulicos foram aplicadas manualmente de forma simultânea com valores aproximadamente iguais, pelos três atuadores, como mostra as Figuras 3.11a e 3.11b. Um esquema de projeção de imagem (FIGURA 3.11c e 3.11d) foi elaborado para permitir o melhor acompanhamento durante o ensaio dos valores de passos de carga de cada atuador para que cada operador responsável por aplicar o carregamento não empregasse valores distintos de carregamento em relação aos demais operadores. Além das informações de carregamento, foram projetados gráficos de deformações e deslocamento em função do carregamento, nas regiões críticas do protótipo, propiciando o monitoramento em tempo real, para orientar a determinação dos valores regulares de passos de carga que, conseqüentemente, tiveram seus valores diminuídos à medida que se detectava plastificação nos elementos.



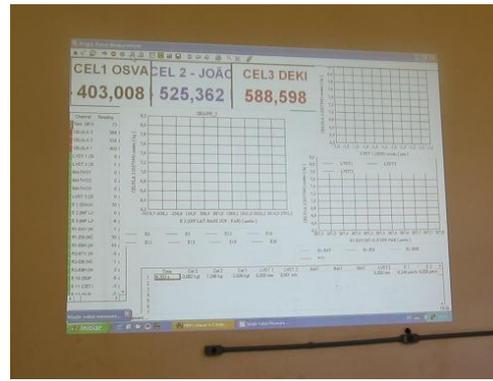
(a) Atuadores manuais



(b) Aplicação simultânea de carregamento



(c) Equipamento de projeção de imagem



(d) Projeção dos dados

FIGURA 3.11: Esquema de aplicação de carga simultânea

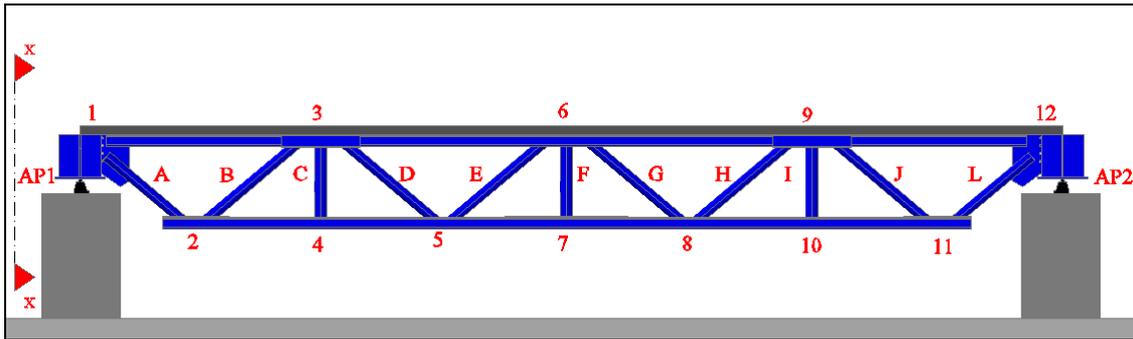
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. Considerações iniciais

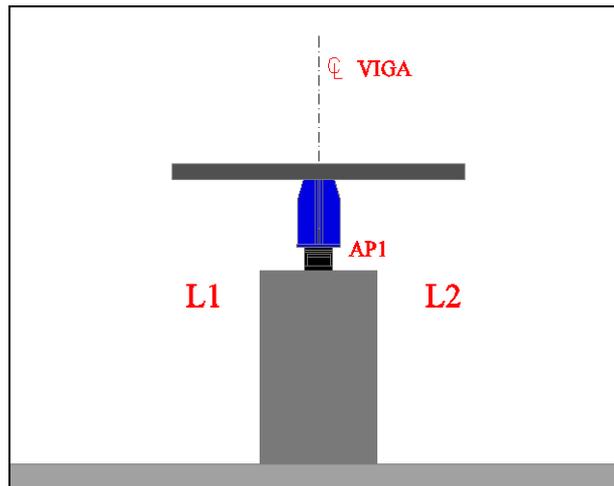
Durante o ensaio, o sistema de aquisição de dados forneceu resultados relativos aos carregamentos, deslocamentos e deformações específicas para todos os passos de carga, demonstrando o bom funcionamento do sistema. Os resultados são expostos em função da carga concentrada aplicada pelo atuador hidráulico central, que compõe o sistema estrutural descrito na Figura 3.8, considerando cargas aplicadas simultaneamente. As deformações obtidas pelos extensômetros tipo roseta são analisadas em função do carregamento, e os dados foram processados de forma a se obter a tensão e a deformação de von Mises em função também do carregamento. Resultados de deformação específica obtidos pelos extensômetros lineares são apresentados em função da carga aplicada. Os LVDT's e deflectômetros forneceram gráficos dos deslocamentos em função do carregamento.

A seguir são apresentados os resultados do programa experimental, nos quais os valores de deformações específicas com sinal positivo indicam tração, e as deformações com sinal negativo indicam compressão.

Para localização dos instrumentos e compreensão dos resultados apresentados, será adotada a orientação descrita na Figura 4.1, onde os números indicados na Figura 4.1a representam as ligações (nós) da treliça metálica, e as letras marcam as diagonais e montantes. O primeiro apoio é denominado de AP1; e o segundo, AP2. A posição lateral da instrumentação é determinada pela divisão do eixo de simetria da viga compondo os lados L1 e L2, conforme Figura 4.1b.



(a) Vista frontal da montagem experimental



(b) Vista x-x

FIGURA 4.1.: Esquema de orientação para localização dos pontos de instrumentação

4.2. Apresentação e análise dos resultados das diagonais mais solicitadas

As diagonais “A” e “L” foram instrumentadas com extensômetros lineares elétricos, posicionados como indicado na Figura 4.2. Os resultados indicaram esforços de tração nas duas diagonais. A diagonal “A” apresentou valor máximo de deformação de $1662,24\mu\epsilon$, e a diagonal “L” indicou deformação específica máxima de $1638,72\mu\epsilon$. Ensaios de caracterização apresentados na Tabela 3.1 mostram tensão de escoamento de $f_y = 442\text{MPa}$ ($2156\mu\epsilon$), comprovando que as diagonais não atingiram deformação específica de escoamento para uma carga máxima de $268,77\text{kN}$ do ensaio.

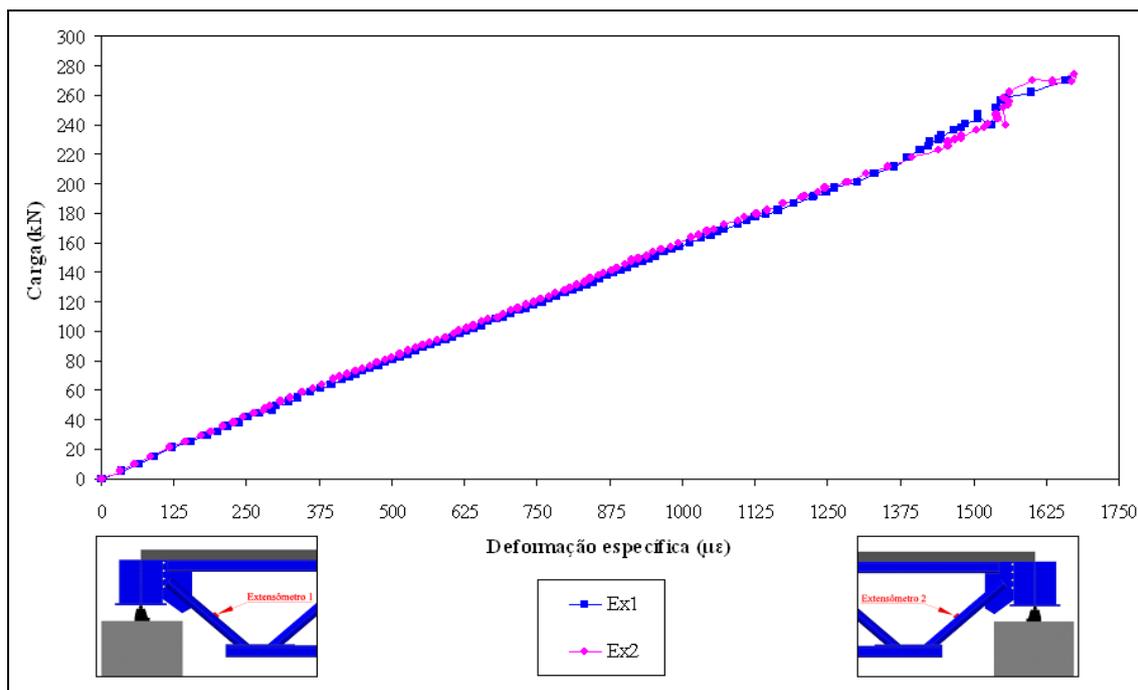


FIGURA 4.2: Gráfico carga x deformação específica das diagonais A e L

4.3. Apresentação e análise dos resultados na região central do banzo superior

O banzo superior foi instrumentado com extensômetros lineares posicionados no nó 6, onde ocorrem os maiores esforços de compressão para o banzo superior. A Figura 4.3 apresenta o posicionamento da instrumentação e as deformações específicas em função do carregamento aplicado.

Os extensômetros Ex3, Ex4 e Ex5 foram posicionados no lado L2, e os extensômetros Ex6, Ex7 e Ex8 localizados no lado L1, de forma simétrica aos do lado oposto. A instrumentação forneceu os seguintes valores máximos de deformação específica:

TABELA 4.1
Resultados das deformações específicas máximas no banzo superior

Posição lateral	L2			L1		
Extensômetros	Ex3	Ex4	Ex5	Ex6	Ex7	Ex8
Carregamento aplicado (kN)	268,39	268,39	268,39	268,39	268,39	268,39
Deformação específica máxima (με)	-1463,76	-1529,52	-1488	-1019,04	-1079,28	-1040,64

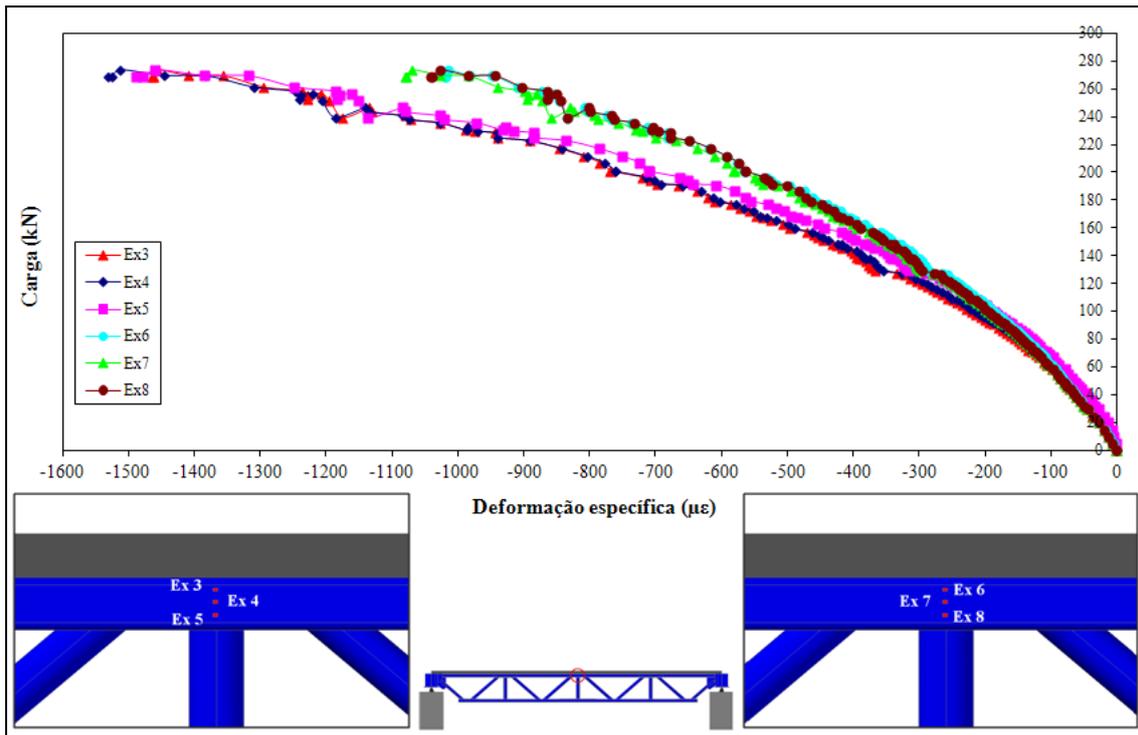


FIGURA 4.3: Gráfico carga x deformação específica do banzo superior - Nó 6

Observando-se os resultados de deformação apresentados, pode-se concluir que não ocorreu escoamento do material na região do nó 6. O gráfico mostra que, inicialmente, os valores de deformações dos extensômetros apresentaram pouca dispersão e pequenas deformações, o que revela a contribuição da laje na resistência ao esforço de compressão.

4.4. Apresentação e análise dos resultados na região central do banzo inferior

A Figura 4.4 mostra o posicionamento dos extensômetros e os resultados obtidos nas regiões mais solicitadas do banzo inferior.

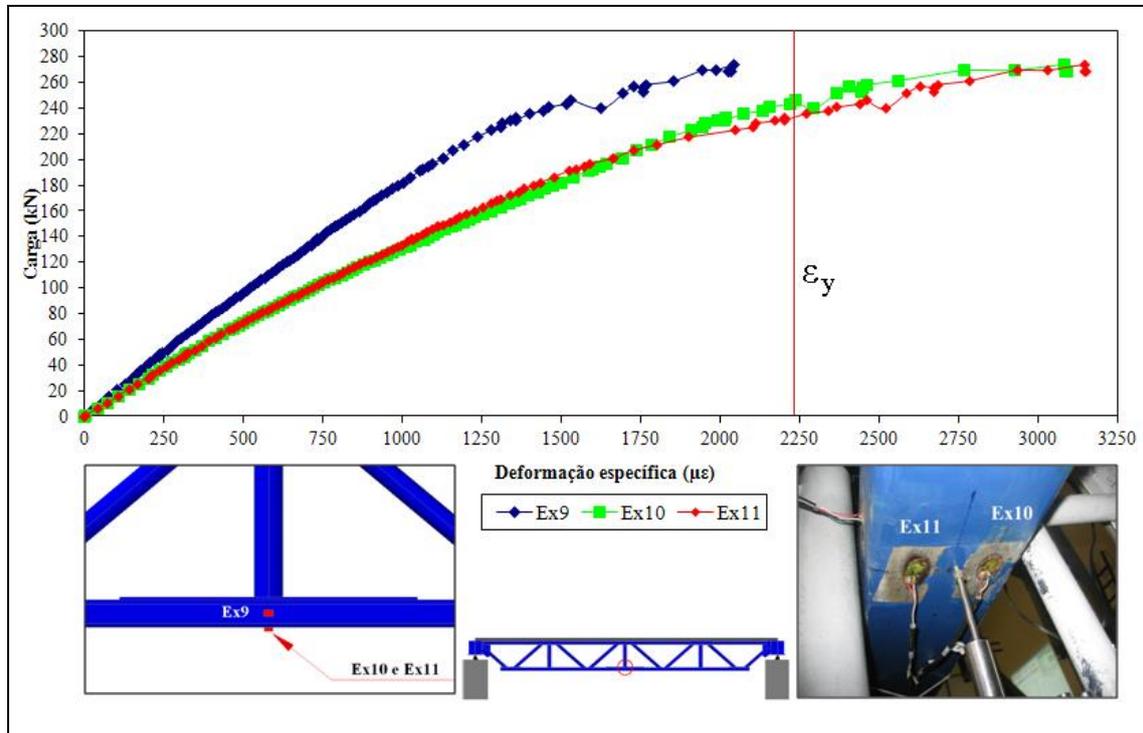


FIGURA 4.4: Gráfico carga x deformação específica do banzo inferior – Nó 7

O extensômetro Ex9 posicionado do lado L1, responsável por monitorar a região da parede lateral do banzo inferior apresentado no item 2.1.2, indicou deformação específica máxima $2032,32\mu\epsilon$, inferior à deformação específica de escoamento fornecido pelos ensaios de caracterização de $2224,4\mu\epsilon$.

Dois extensômetros foram posicionados na região mais crítica do banzo inferior em relação aos esforços de tração. Os extensômetros Ex10 e Ex11 posicionados nos lado L2 e L1, respectivamente, indicaram deformação específica máxima de $3085,92\mu\epsilon$ (Ex10) e $3146,40\mu\epsilon$ (Ex11) caracterizando plastificação na face inferior do banzo inferior, atingindo a deformação de escoamento para o carregamento de 235kN.

Observa-se uma pequena não linearidade das deformações no banzo em relação ao carregamento indicando a possibilidade de outros mecanismos terem influenciado o comportamento da treliça em ensaio e não somente a flexão do conjunto.

4.5. Monitoramento na interface aço-concreto

O extensômetros Ex12 e Ex13 foram posicionados no nó 6 na parede superior do banzo, próximo ao conector central de cisalhamento na interface aço-concreto, como mostra a Figura 4.5. A instrumentação teve os objetivos de monitorar as deformações ocorridas na interface aço-concreto e avaliar a capacidade resistente aos esforços resultantes da flexão global da estrutura. Os resultados mostram que este elemento ficou totalmente comprimido.

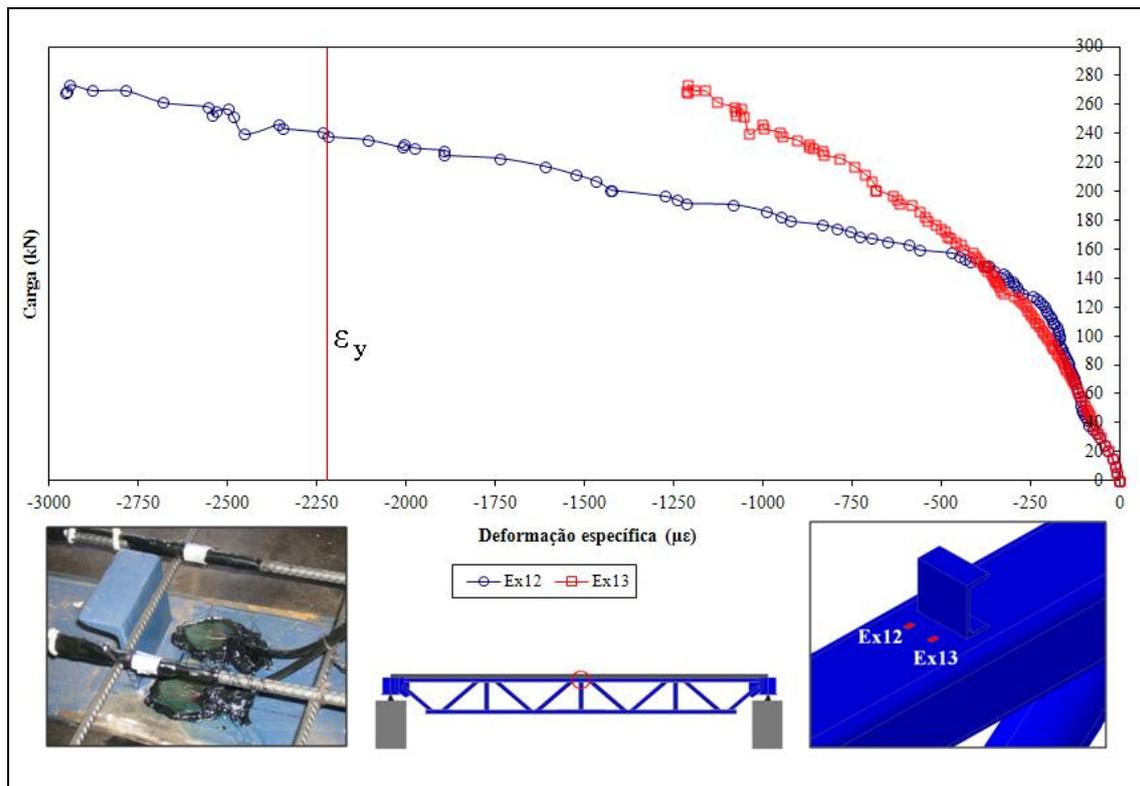


FIGURA 4.5: Gráfico carga x deformação específica no banzo superior - interface aço-concreto

Os resultados mostraram que o extensômetro Ex12 atingiu a deformação específica de escoamento, alcançando valores de 2946,24με para o último incremento de carga de 268,77kN, o que caracteriza comportamento plástico do material. O Extensômetro Ex13 apresentou valor de deformação máxima de 1210,80με, inferior à deformação específica de escoamento. Observa-se também a perda da linearidade das deformações no extensômetro Ex12 caracterizando a perda de conexão entre o aço e o concreto.

4.6. Apresentação e análise dos resultados nas armaduras

O objetivo dos extensômetros foi medir as deformações desenvolvidas na laje ao longo de sua altura. Essa instrumentação permite uma leitura completa das deformações desenvolvidas ao longo de toda a seção transversal média da estrutura mista. Os resultados mostram uma pequena diferença nos valores das deformações dos extensômetros mais acima do banzo (Ex15 e Ex16) em relação aos mais afastados (Ex14 e Ex17) o que mostra o efeito *Shear lag*.

A Figura 4.6 expõe a localização e os resultados das deformações em função do carregamento aplicado.

Não foi observada a presença de fissuração na laje de concreto durante o ensaio. Os valores indicam que as armaduras sofreram tensões de compressão, revelando que a laje de concreto manteve-se comprimida na região das armaduras longitudinais.

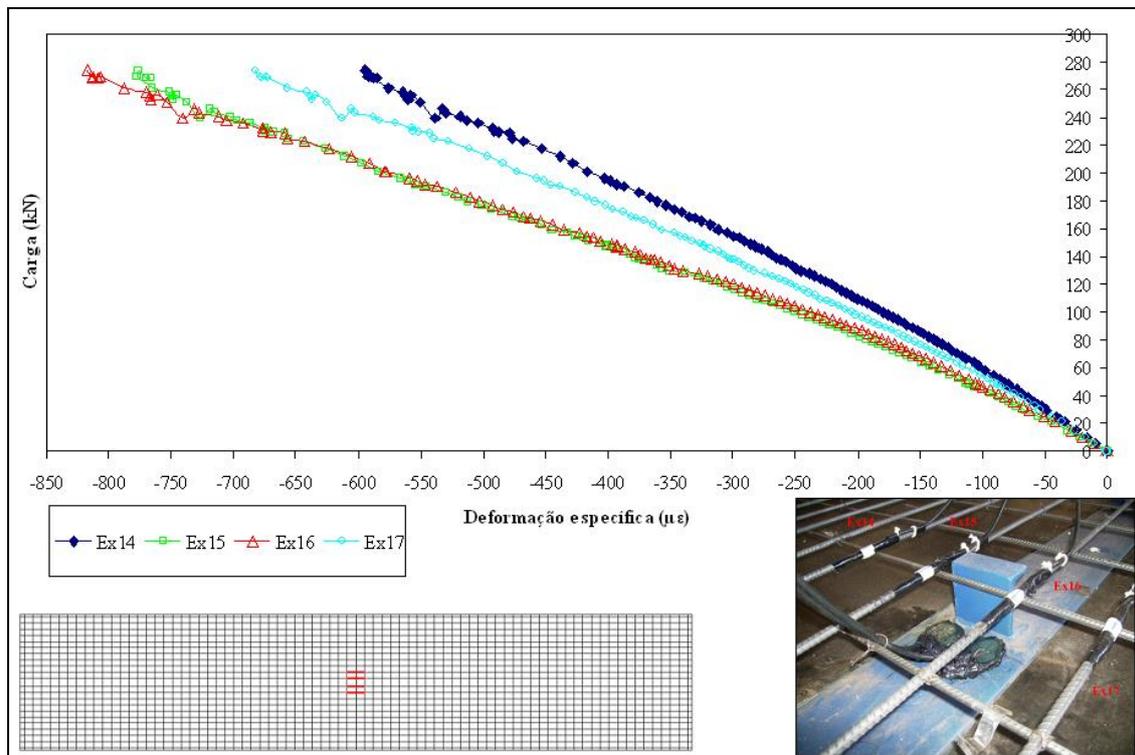


FIGURA 4.6: Gráfico carga x deformação específica das armaduras

4.7. Apresentação e análise dos resultados na laje de concreto

A Figura 4.7 ilustra o posicionamento dos extensômetros e apresenta os resultados obtidos através da instrumentação na laje de concreto.

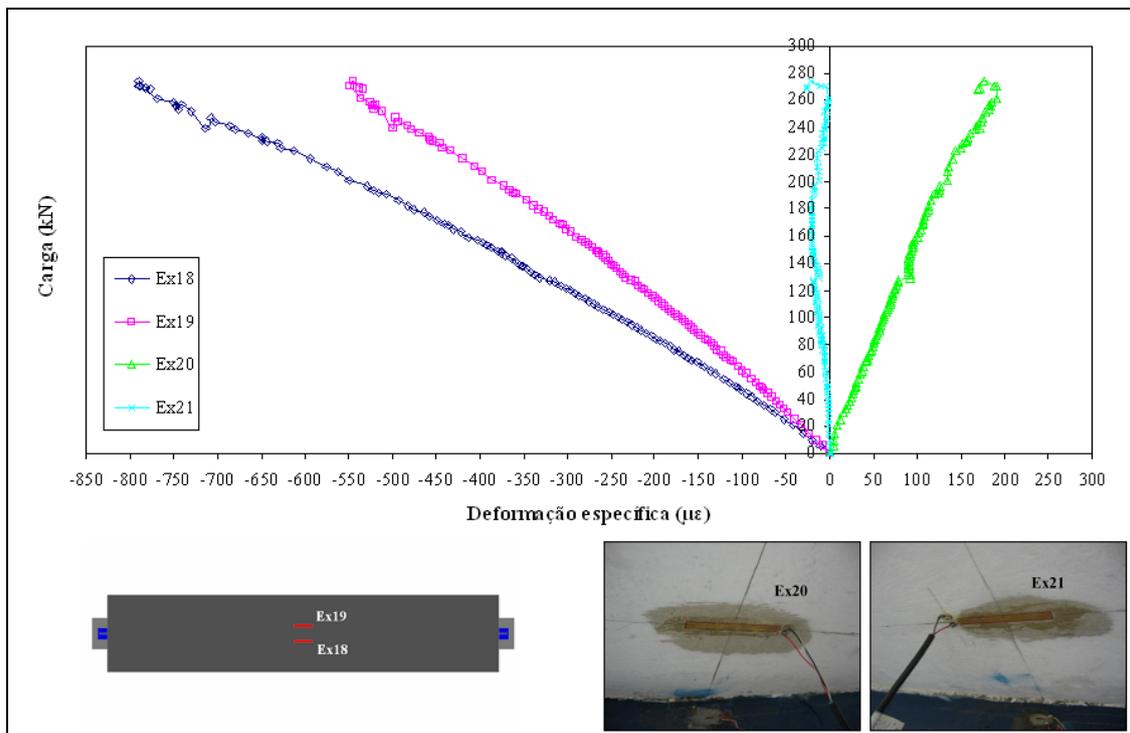


FIGURA 4.7: Gráfico carga x deformação específica da laje de concreto

As deformações medidas pelos extensômetros Ex18 e Ex19, localizados na face superior da laje de concreto, apresentaram valores elevados. O extensômetro Ex19 apresentou valores menores de deformação, caracterizando a presença imperfeições da laje naquela região.

Extensômetros posicionados na face inferior da laje de concreto (Ex20 e Ex21) forneceram valores insignificantes de deformação, que denotam esforços desprezíveis de tração no concreto.

4.8. Apresentação e análise de tensões na placa de ligação do apoio

A placa de apoio foi instrumentada com extensômetros tipo roseta 45°, que forneceram deformações em três direções, possibilitando calcular as tensões principais e obter a tensão de von Mises como critério de avaliação de colapso baseado na energia de distorção máxima no elemento submetido às tensões principais.

A Figura 4.8 indica o posicionamento da roseta e os resultados obtidos de carregamento em função da tensão de von Mises. A placa de ligação do apoio é uma região crítica por apresentar uma concentração de esforços. Com objetivo de monitorar o comportamento da placa de ligação do apoio quanto a resistência última durante o ensaio, a placa não atingiu o escoamento do material de 450MPa (valor nominal do aço utilizado).

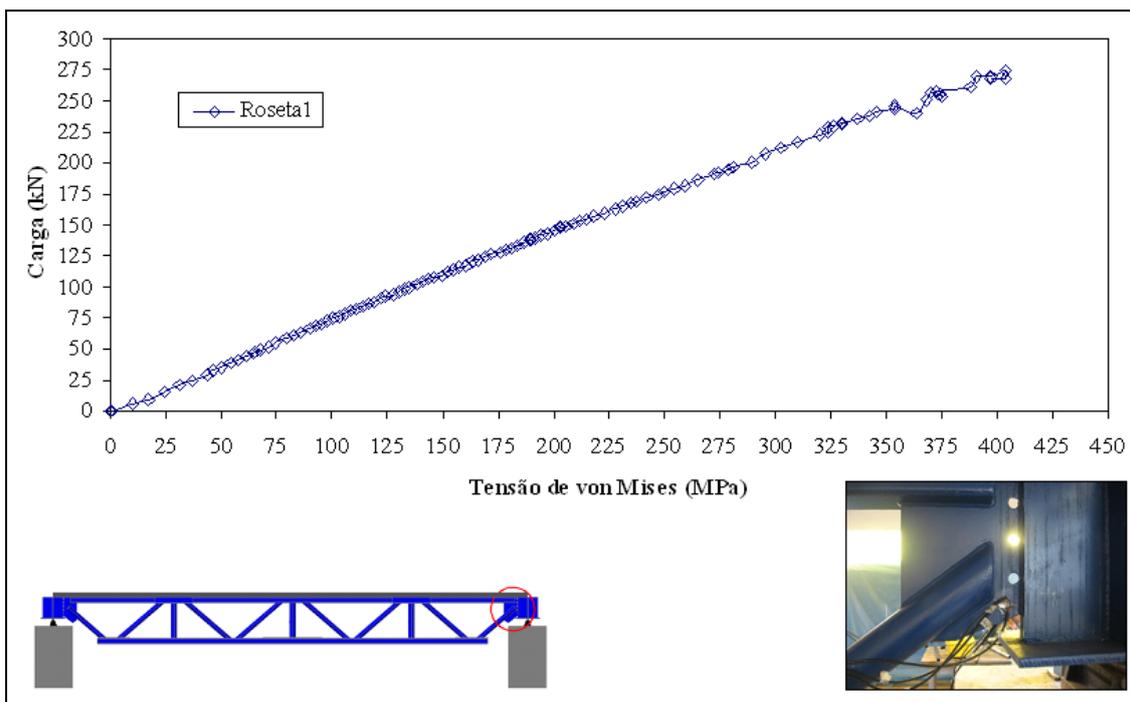


Figura 4.8: Gráfico carga x tensão de von Mises da placa de ligação do apoio

4.9. Apresentação e análise dos resultados nas ligações

O objetivo de analisar as tensões nas ligações é avaliar possíveis instabilidades locais que podem comprometer a estrutura e influenciar a resistência global. Para o monitoramento das ligações, foram utilizados dois extensômetros tipo roseta 45°.

A Figura 4.9 mostra o posicionamento e os resultados das tensões em função dos carregamentos aplicados na roseta 2. Os resultados mostram que as concentrações de esforços de compressão originários das diagonais “E” e “G” não implicaram no escoamento do material, indicando que não houve instabilidade localizada da ligação.

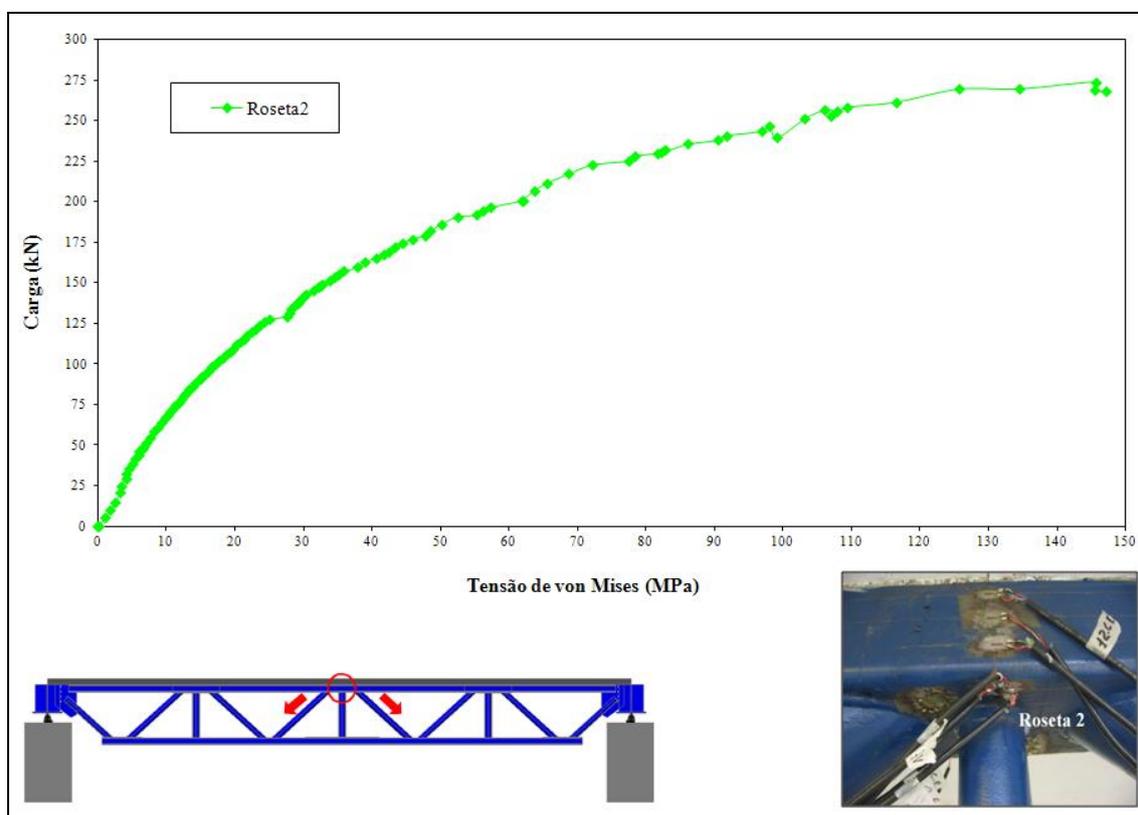


FIGURA 4.9: Gráfico carga x tensão de von Mises na ligação 6

A Figura 4.10 mostra o posicionamento da roseta 3 no banzo inferior e os resultados de tensões em função dos carregamentos aplicados. A ligação 8 está submetida ao esforço axial de compressão aplicado pela diagonal “G” e à força de tração da diagonal “H”. O material atingiu o escoamento com a carga de 235kN e tensão de escoamento de 456 MPa. Observando-se os resultados apresentados, pode-se concluir que ocorreu plastificação localizada nessa região, causando perda do sistema misto. Portanto, a treliça de aço passou a resistir aos esforços independentemente da laje de concreto. Observa-se, ainda, um aumento da rigidez após o escoamento, o que caracteriza uma redistribuição dos esforços que passam a ser absorvidos por outra região da treliça, no caso, o banzo.

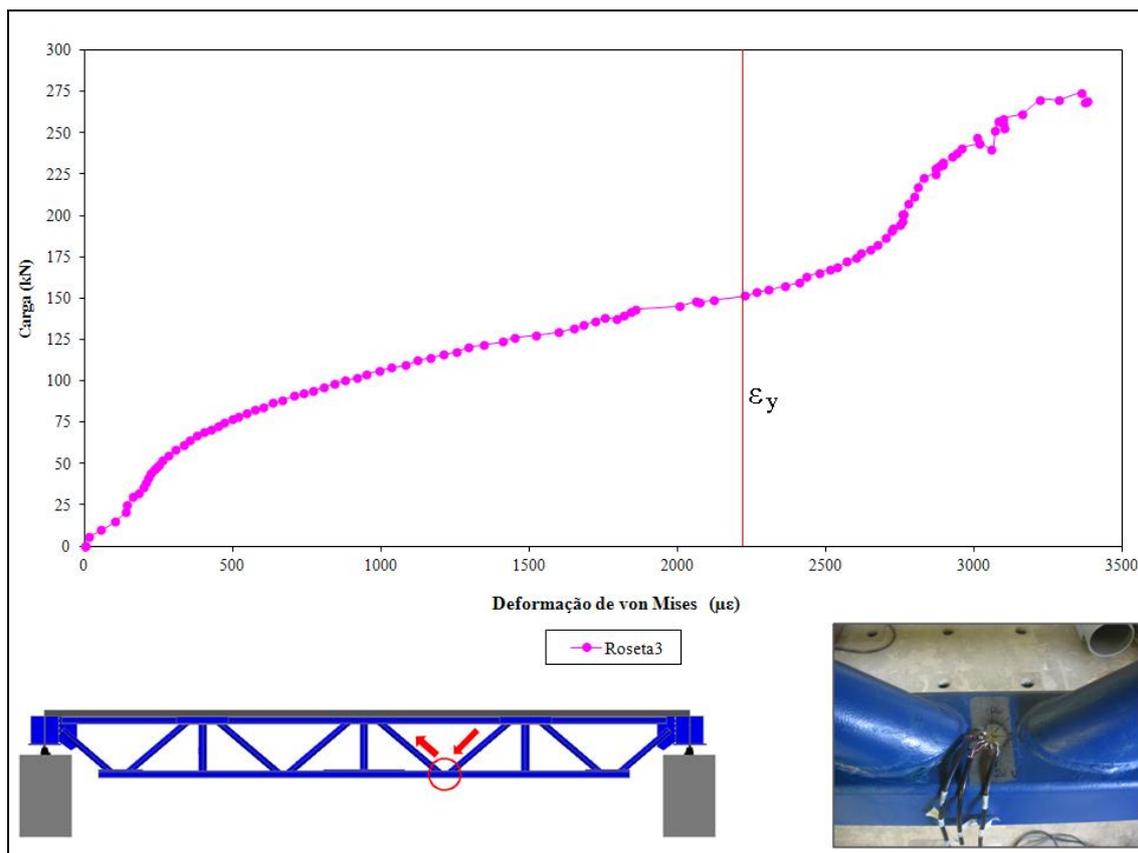


FIGURA 4.10: Gráfico carga x deformação de von Mises na ligação 8

4.10. Apresentação e análise dos resultados no conector de cisalhamento

Para o monitoramento dos conectores de cisalhamento, foi utilizado um extensômetro tipo roseta 45°, posicionado na alma do conector mais solicitado, conforme a Figura 4.11.

Os resultados indicaram altas deformações no conector para baixos valores de carregamentos. A perda de resistência do conector é observada a partir do início de escoamento do material atingido pela carga de 32,28kN indicando a flexão da alma e o comprometimento da interação aço-concreto. Após o escoamento, os resultados mostram grandes deformações para pequenos incrementos de carga, o que sinaliza a reduzida capacidade do conector em resistir aos esforços atuantes.

Os valores de deformações para os dois extensômetros indicam uma possível deformação do conector com flexão a partir da carga de 35,40 kN, indicando a possibilidade de ter gerado esforços diferentes na parede superior do banzo. Essa consideração pode ser observada no modelo numérico desenvolvido por Martins (2011). Assim, ocorreu o comprometimento do conector de cisalhamento, gerando o

deslizamento da laje com o início de falha da interação entre a laje de concreto e a viga metálica. Destaca-se também que a não fissuração na parte superior da laje expõe que a flexão pode ter ocorrido em função do efeito localizado.

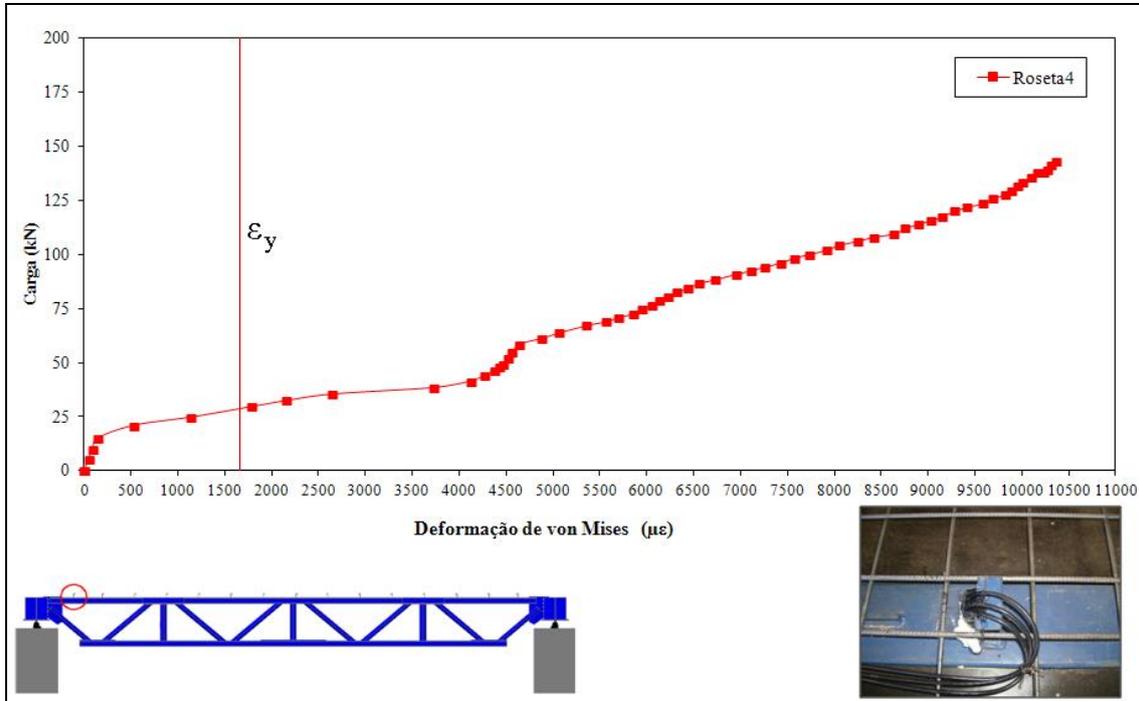


FIGURA 4.11: Gráfico carga x deformação de von Mises do conector de cisalhamento

4.11. Monitoramento dos deslocamentos

Os deslocamentos foram determinados utilizando LVDT's e defletômetros. A Figura 4.12 mostra os resultados e o posicionamento dos LVDT's para monitoramento dos deslocamentos verticais nas posições indicadas. O deslocamento máximo encontrado no meio do vão foi de 69,39mm para a carga limite de ensaio de 268,77kN.

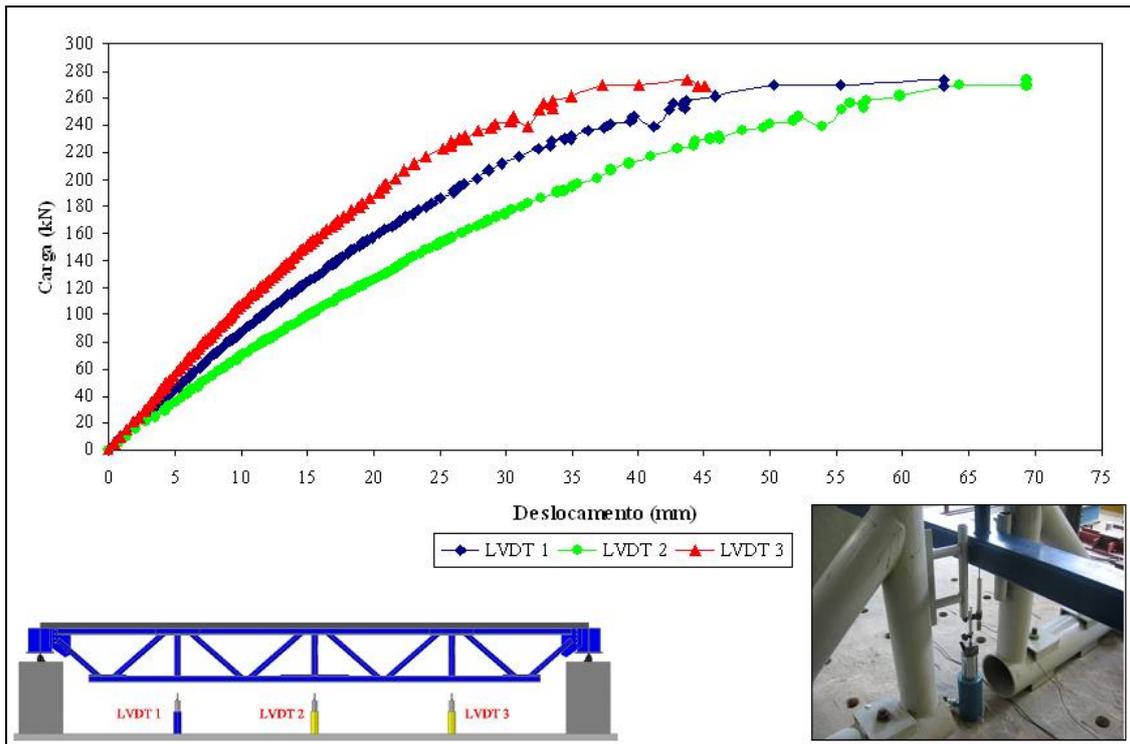


FIGURA 4.12: Gráfico carga x deslocamento vertical

Foram posicionados LVDT's para medir os deslocamentos verticais e horizontais da laje de concreto em relação à viga metálica com objetivo de avaliar a interação do conjunto misto. As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam os resultados obtidos e orientam a localização dos instrumentos de medição.

O LVDT4 monitorou o movimento horizontal no sentido longitudinal da viga, apresentando um deslocamento máximo de 2,14mm para uma carga de 258,32kN, que teve problemas de funcionamento, ocorrendo perda da leitura de dados para os incrementos seguintes. Deslocamentos verticais foram acompanhados pelo LVDT5, que forneceu valores discretos de deslocamento ,atingindo um valor máximo de 0,27mm para um carregamento máximo de 268,77kN, que corresponde à carga máxima de ensaio.

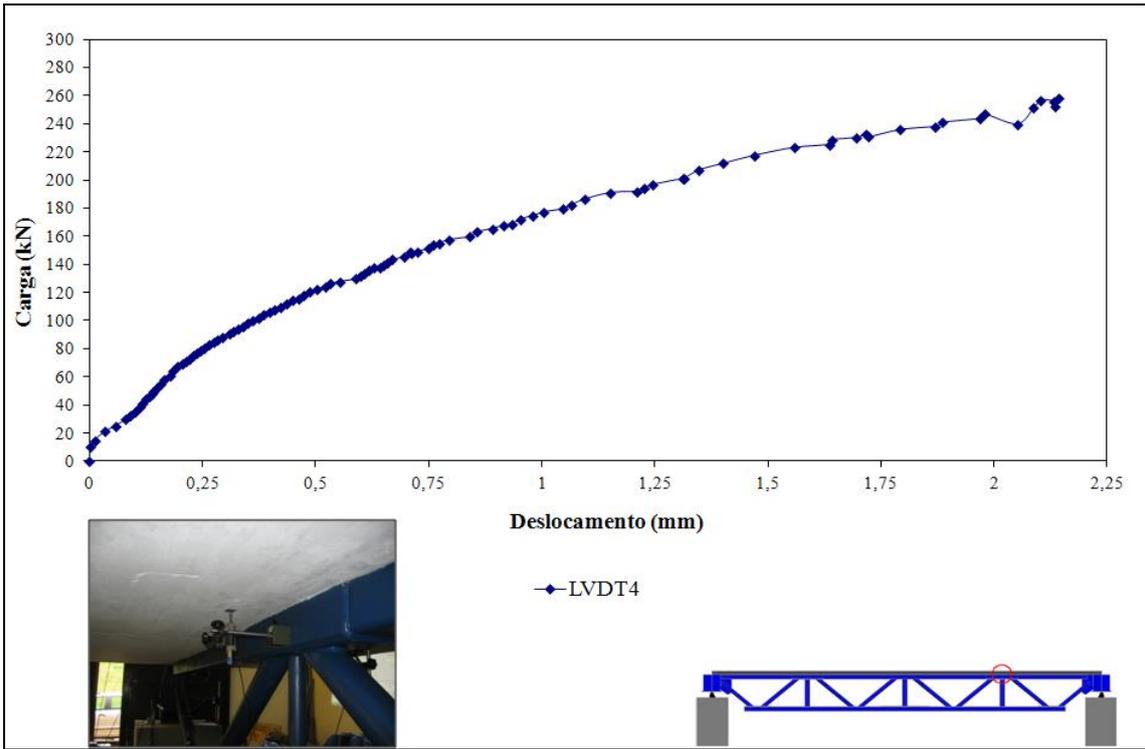


FIGURA 4.13: Gráfico carga x deslocamento vertical da laje de concreto

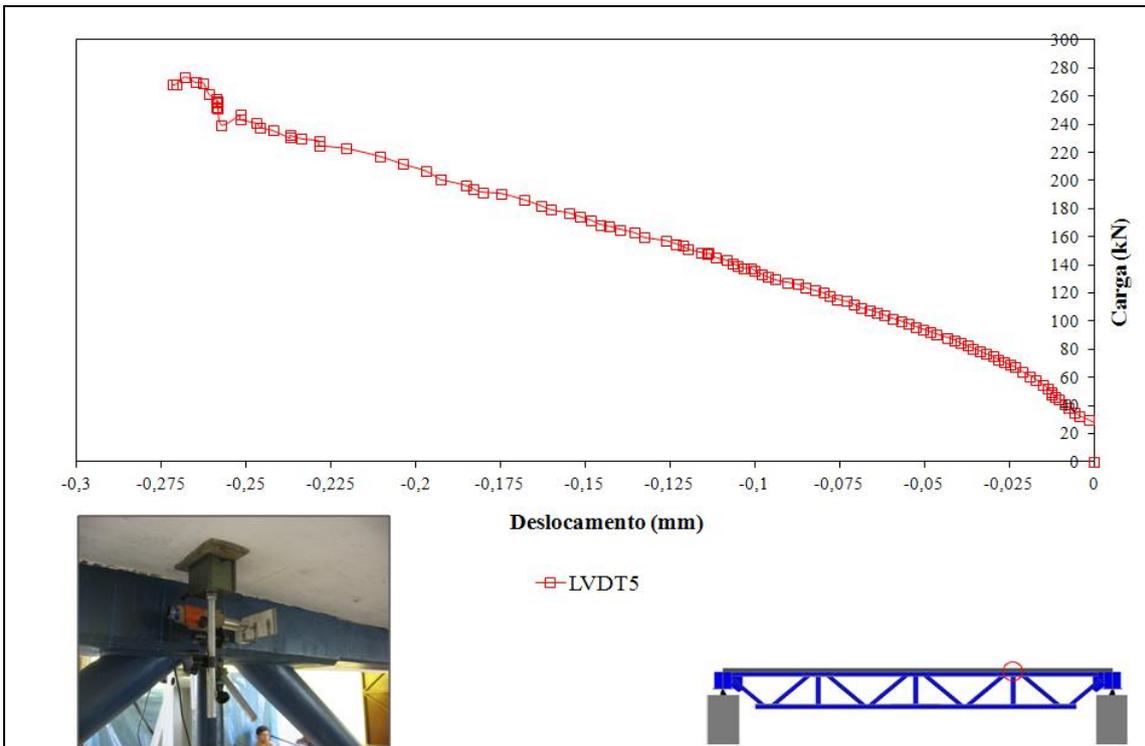


FIGURA 4.14: Gráfico carga x deslocamento horizontal da laje de concreto

Os defletômetros foram utilizados para medir os deslocamentos ocorridos nos apoios e avaliar o deslizamento da laje de concreto. A Figura 4.15 mostra os resultados e o sentido monitorado por defletômetros DEF1 e DEF4, responsáveis por medir o campo de deslocamento da laje de concreto em relação aos pontos de apoio da viga metálica no sentido horizontal. Tais dados caracterizam o deslizamento da laje e, portanto, a eficiência como sistema misto. A Figura 4.16 mostra o posicionamento do defletômetro e os primeiros sinais de deslizamento da laje.

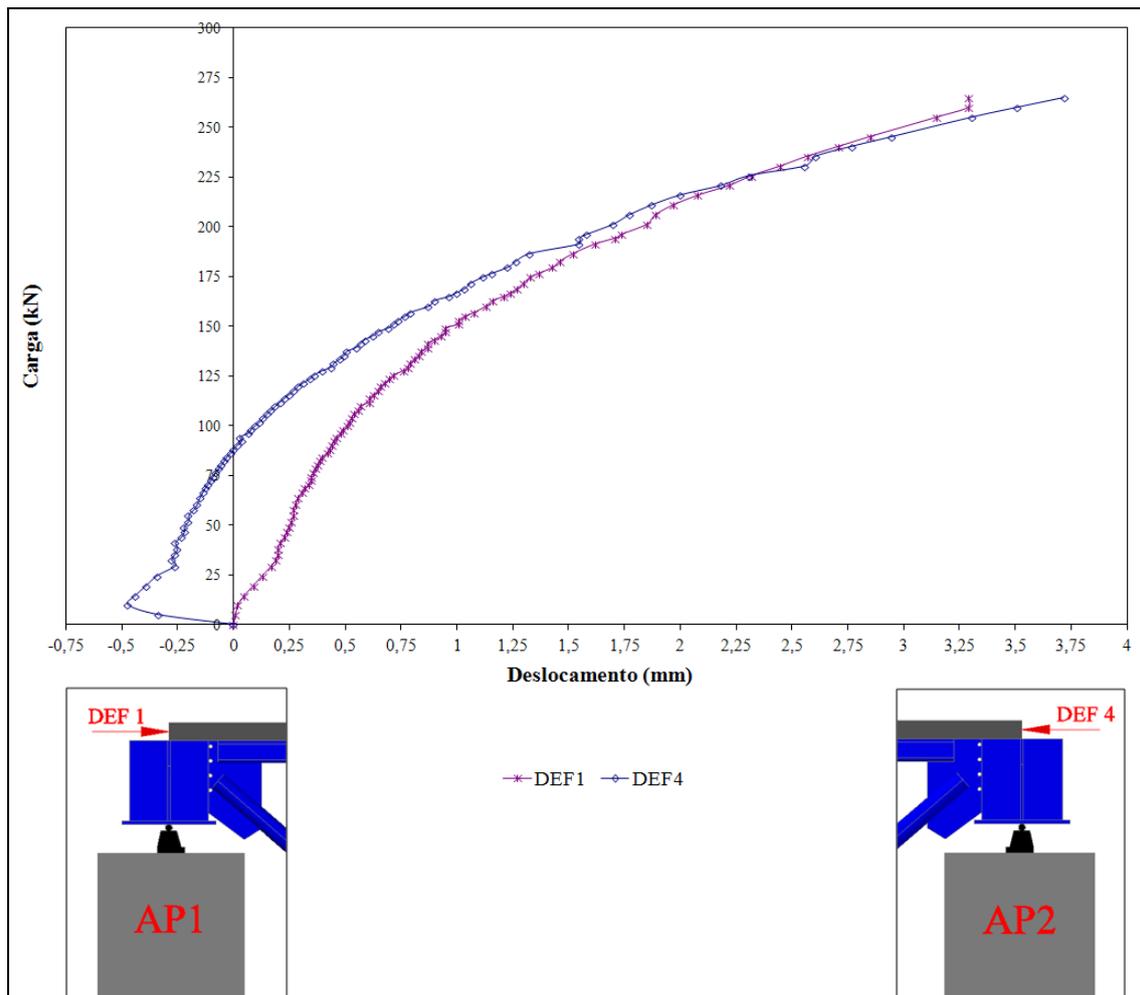


FIGURA 4.15: Gráfico carga x deslocamento da laje de concreto



(a) Posicionamento do defletômetro DEF1



(b) Primeiros sinais do deslizamento da laje

FIGURA 4.16: Efeitos do deslizamento da laje monitorado pelo DEF1

Os defletômetros DEF2, DEF3, DEF5 e DEF6, posicionados para monitorar possíveis recalques nos apoios, indicaram valores desprezíveis de deslocamento. Isso revelou comportamento satisfatório das estruturas e aparelhos de apoio (FIGURA 4.17).

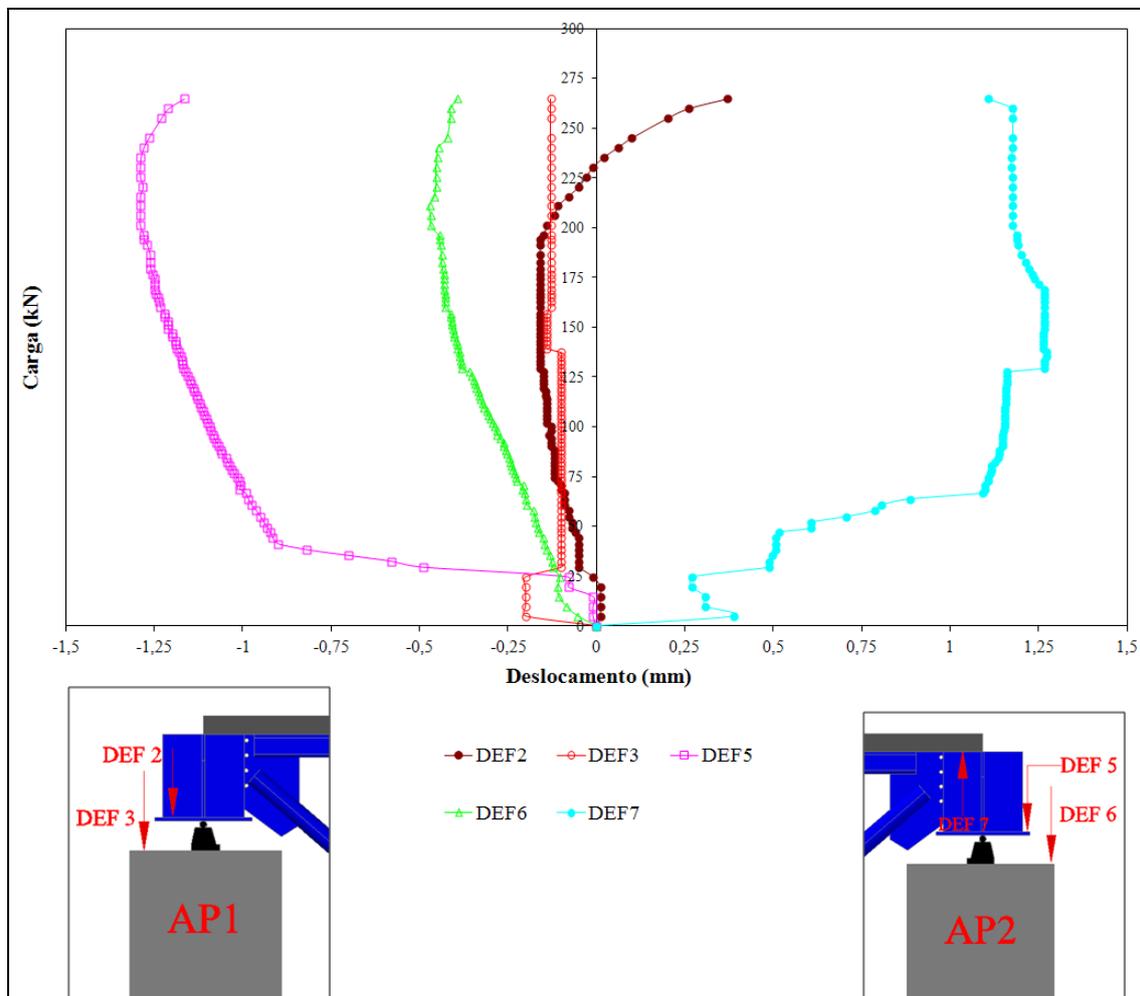


FIGURA 4.17: Gráfico carga x deslocamento dos apoios

4.12. Análise qualitativa dos resultados experimentais

Os resultados apresentados possibilitaram a avaliação do comportamento da treliça mista deste trabalho. Os efeitos resultantes da extensometria proporcionaram análise de gráficos suficientes e necessários para avaliar pontos – como a contribuição da laje de concreto na resistência da viga metálica treliçada, especificamente no banzo superior –, além de proporcionarem novas observações sobre o mecanismo de conexão do conjunto misto. A continuidade dos dados descritos nos gráficos até a aplicação máxima de carga nos três atuadores demonstra que não houve problemas de funcionamento dos extensômetros lineares elétricos durante o período de incrementos de cargas. O processo de aplicação simultânea de carregamento com dados fornecidos pelas células de carga teve andamento satisfatório, com bom funcionamento dos mecanismos de aplicação das cargas.

5. ANÁLISE DA ESTRUTURA MISTA

5.1. Introdução

Neste capítulo, são apresentadas análises da estrutura considerando os resultados obtidos pelo programa experimental. Ressalta-se as características qualitativas do sistema misto e a avaliação dos pontos críticos encontrados com base nos resultados obtidos.

A partir da análise global da estrutura, foi possível determinar os modos de falha preponderantes do sistema misto e as causas que originaram os efeitos localizados e suas influências na resistência do protótipo.

5.2. Análise de desempenho do sistema misto através dos conectores de cisalhamento

Os resultados apresentados no capítulo 4 demonstraram a não eficiência dos conectores de cisalhamento, responsáveis por garantir o funcionamento misto da estrutura. A carga experimental de escoamento, a flexão (considerando o posicionamento dos extensômetros) para o conector mais extremo o qual estava instrumentado, foi de 38,46kN. A carga de projeto considerando o estado limite da estrutura associado à resistência dos conectores, descrita no item 2.5.2.1, foi de 285,57kN. Observa-se, no entanto, que na avaliação da norma é considerada a resistência de todos os conectores. Portanto, a ruptura desse conector não significa que se rompeu toda a conexão, mas o início de uma plastificação no conector.

Observa-se que as forças longitudinais de cisalhamento desenvolvem-se na interface aço-concreto em fluxo crescente do meio do vão para as extremidades, colocando a resistência do conector instrumentado como ponto crítico da interação dos elementos, o que é esperado no comportamento da treliça mista. A falha dos conectores de cisalhamento representa um comprometimento do sistema misto, produzindo um comportamento independente da laje e da treliça de aço. Normalmente, a perda de

resistência do conector de cisalhamento causa um efeito de transferência de esforços para os conectores seguintes ou para regiões capazes de resistir às forças cisalhantes. Sem a possibilidade de resistir ao cisalhamento aplicado, houve um descolamento da laje de concreto em relação à viga metálica provocando grandes esforços de compressão no banzo superior, fazendo com que a treliça metálica resistisse isoladamente ao momento fletor. A Figura 5.1 mostra o descolamento da laje durante o ensaio em função da falha dos conectores.

A falha do conector está associada à falta de capacidade de transmissão dos esforços pela parede superior do perfil retangular do banzo superior. O efeito localizado do conector de cisalhamento no banzo superior não é considerado um estado limite no dimensionamento. Sendo assim, a sua parede de 4,8mm de espessura não foi suficiente para resistir a um efeito localizado imposto pelo esforço no conector.



FIGURA 5.1: Descolamento entre a laje de concreto e a treliça metálica

5.3. Análise de desempenho da treliça metálica através da resistência do banzo inferior

O banzo inferior da treliça mista está submetido à força normal de tração. Os resultados experimentais indicaram resistência suficiente e boa correlação com os estudos teóricos realizados por vários pesquisadores e prescrições normativas relacionadas, incluindo a NBR 8800 (2008), descritos no capítulo 2. Essa prescrição indica o banzo inferior como elemento determinante para resistência da viga treliçada mista. A Tabela 5.1 mostra a carga de projeto e a carga experimental, adotando como estado limite último o escoamento do banzo inferior.

TABELA 5.1
Limite teórico e experimental das cargas aplicadas

Elemento estrutural	Carga de projeto (kN)	Carga Experimental (kN)
Banzo Inferior	305,69	235

A ocorrência de falha na interação entre laje e viga metálica foi fundamental no aumento da sollicitação do banzo inferior durante o ensaio experimental. Com redução significativa da contribuição do concreto na resistência de compressão do banzo superior, a treliça metálica passou a resistir praticamente isoladamente ao momento fletor, ocasionando esforços adicionais à estrutura. A Figura 5.2 mostra a flexão ocorrida no protótipo durante a realização do ensaio.

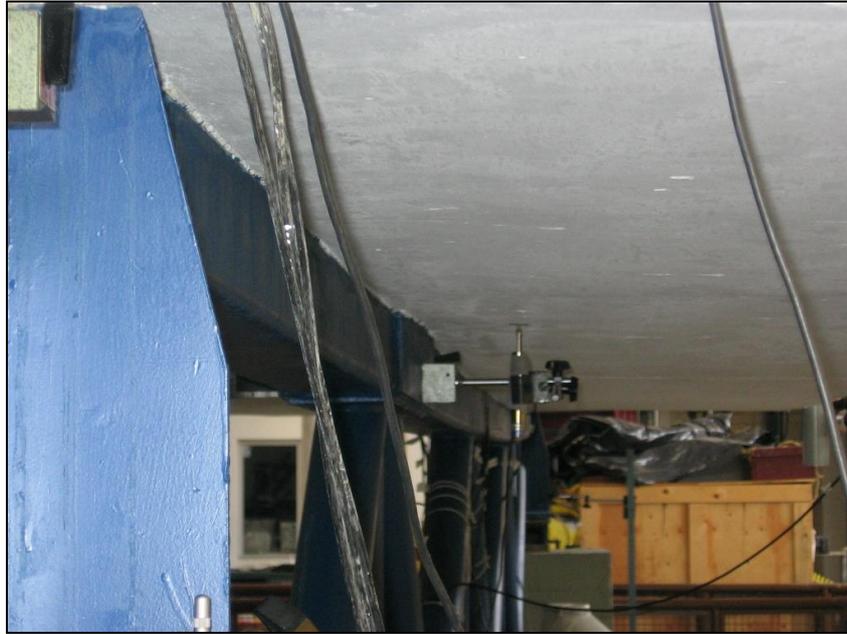


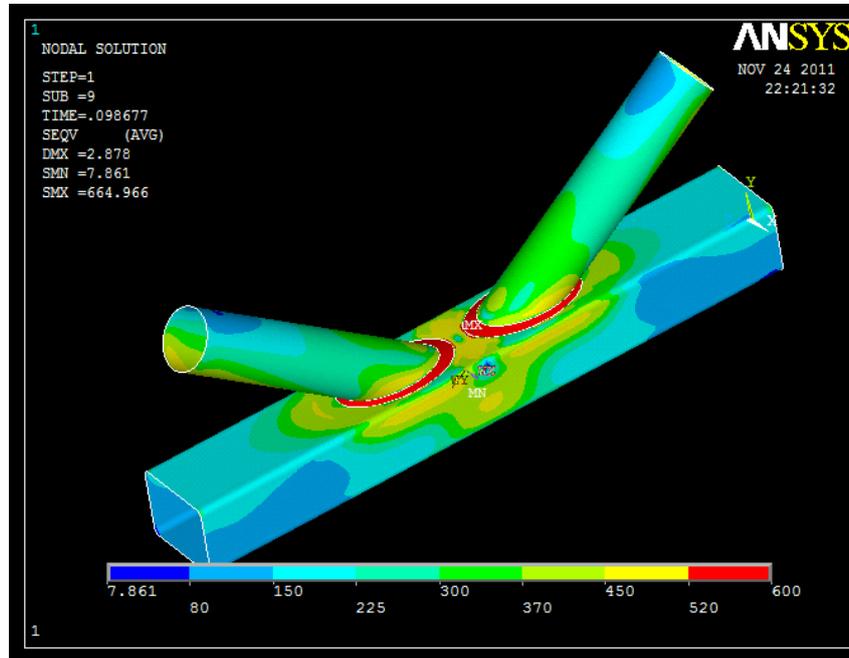
FIGURA 5.2: Flexão da viga treliçada mista

5.4. Análise da influência das ligações na resistência da viga treliçada

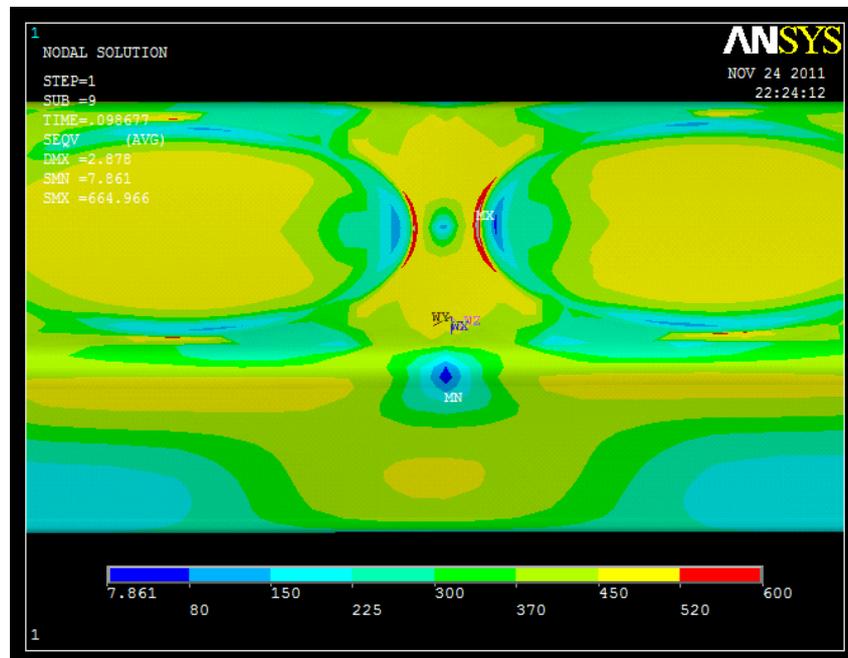
Após a perda da interação entre a laje e a treliça de aço, em decorrência da perda de resistência dos conectores de cisalhamento, a viga treliçada de aço apresentou problema de instabilidade localizada na ligação 8, como exposto no item 4.9. O aumento das solicitações nas diagonais foram fatores determinantes para o escoamento do material e o colapso da ligação. A ligação 8 do tipo “K”, com afastamento de 60mm e excentricidade de 27,7mm, tem resistência de 340kN, considerando o Eurocode 3 (2005) e 90% da eficiência do banzo. Conclui-se que a falha localizada ocorreu em virtude do aumento das solicitações nas diagonais e no banzo inferior após a perda da interação entre aço e concreto.

No entanto, ressalta-se que a plastificação do banzo identificada nos resultados experimentais da ligação não caracteriza o colapso da ligação (MODO A). A caracterização do colapso de uma ligação tubular está associada à deformabilidade do banzo, sendo caracterizado pela carga relativa a 1% ou 3% da largura do banzo e depende da relação entre os valores de carga. Análises numéricas (utilizando elementos finitos), realizadas por Nunes (2011) e representadas na Figura 5.3, são relativas ao banzo da ligação da treliça de aço analisada neste trabalho. As análises indicam a plastificação da face para valores de carga na diagonal que não atingem a carga referente à deformação de 1% da largura do banzo (FIGURA 5.4). Isso caracteriza que a

plastificação ocorre, mas não o colapso da ligação. Isso é identificado experimentalmente com o aumento da rigidez da ligação, como apresentado na Figura 4.10.



(a)



(b)

FIGURA 5.3: Representação em elementos finitos das tensões na ligação instrumentada da treliça de aço: (a) Vista geral; (b) vista da parede superior do banzo inferior. (NUNES, 2011).

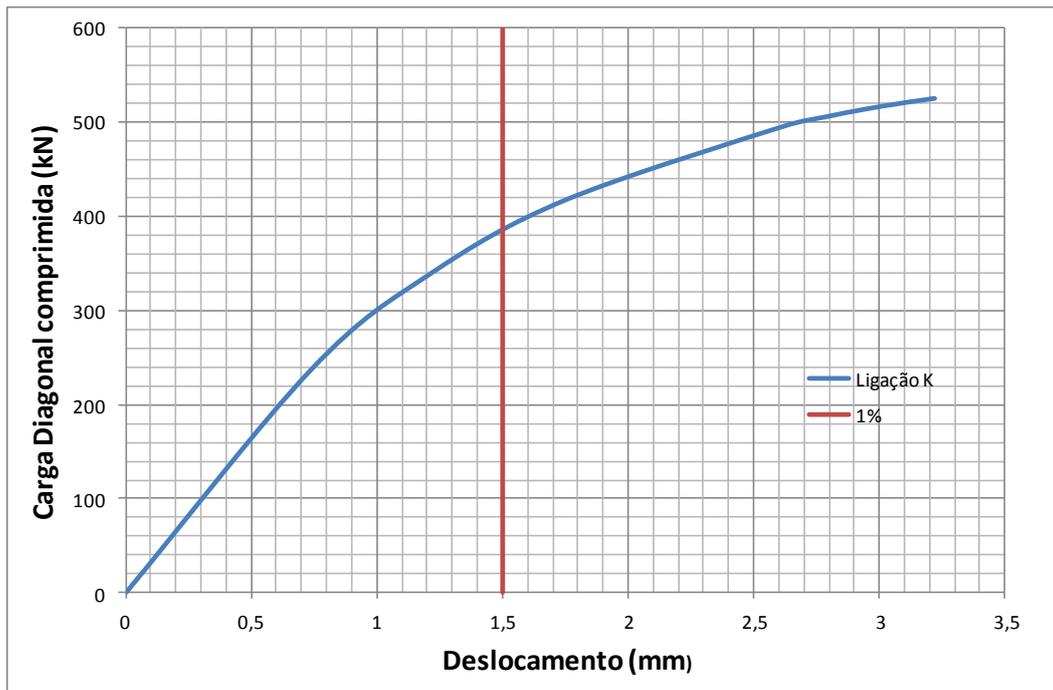


FIGURA 5.4: Representação dos resultados da ligação "K" em elementos finitos da carga de compressão da diagonal versus a deformação na parede do banzo (NUNES, 2011).

As ligações 2, 3, 9, e 11 apresentam reforços (FIGURA 5.5) que aumentam a resistência das ligações nesses pontos, impedindo o escoamento, como o ocorrido na ligação 8.



FIGURA 5.5: Chapas de reforço da ligação 9

O principal objetivo de empregar vigas mistas treliçadas em sistemas estruturais é utilizar a melhor característica resistente de cada material. É de fundamental importância a adoção de mecanismo de conexão dos materiais que garantam o funcionamento em conjunto da viga metálica e da laje de concreto. O dimensionamento dos conectores de cisalhamento deve ser feito de forma a não permitir a perda de interação entre aço-concreto. Sendo assim, o método de cálculo, considerando interação completa, apresenta-se como o método mais seguro em vigas mistas treliçadas em perfis de seção transversal tubular. Pois referencia a resistência do sistema estrutural na tensão de escoamento do banzo inferior, sem admitir nenhuma falha dos conectores e garantindo que os conectores serão dimensionados para esse fim.

Para impedir o surgimento de falhas localizadas nas ligações mais solicitadas, foram empregadas placas de aço com propriedades físicas e geométricas que reforçaram as regiões com maior concentração de tensões. A solução apresentou resultados satisfatórios quanto à eficiência da ligação reforçada, mas demonstrou que as ligações menos solicitadas desprovidas de reforço podem sofrer quanto a possíveis redistribuições de tensões sem, no entanto, caracterizar o colapso da ligação ou do sistema misto.

Os atuais métodos de análise estrutural consideram o banzo inferior como sendo o elemento determinante para a resistência do conjunto misto. Atribuem também baixas solicitações ao banzo superior em função da contribuição da laje de concreto na resistência aos esforços de compressão resultantes da flexão. Os resultados obtidos nesse programa experimental demonstram que as características físicas e geométricas do banzo inferior apresentaram resistência, admitindo cargas elevadas para o modelo estrutural aplicado. Isso se deve à interação parcial entre os materiais.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo analisar o comportamento estrutural de vigas mistas treliçadas em perfis tubulares a partir de um programa experimental, inserido em linha de pesquisas do Laboratório de Estruturas (DECIV/EM/UFOP). A crescente utilização desse sistema estrutural, no Brasil, passa a exigir o aprimoramento de técnicas construtivas que venham tornar a estrutura mais segura e mais econômica. O programa experimental faz parte do desenvolvimento de várias pesquisas realizadas para análise de sistemas de vigamentos treliçados mistos com treliças em perfis de seções transversais tubulares circulares nas diagonais e montantes e retangulares nos banzos, para sustentação de pisos de concreto. O foco das pesquisas até agora era a avaliação das ligações dos elementos metálicos das treliças.

Esta pesquisa buscou estudar o comportamento de uma viga mista treliçada em escala real. O dimensionamento do protótipo foi realizado pela V&M do Brasil, que o forneceu para realização do ensaio experimental, sendo que o dimensionamento foi baseado nas prescrições do Eurocode 3 (2005) e do Cidect (2009). Inicialmente, foi feita uma análise teórica para verificação de todas as dimensões reais da treliça, considerando as imperfeições geométricas ocorridas na fase de fabricação. Um estudo numérico foi realizado por Martins (2011) para avaliar a distribuição de tensões e região de falha da estrutura.

O conector utilizado foi o perfil de seção transversal “U” laminado. A verificação dos conectores revelou, ainda, o dimensionamento que haveria interação parcial entre a viga metálica e a laje de concreto.

A laje de concreto maciça foi dimensionada com base na NBR6118 (2004), possuindo armaduras nas direções transversal e longitudinal com objetivo de combater a fissuração do concreto, que poderia ocorrer em função dos esforços de cisalhamento. Para a concretagem da laje, foi desenvolvido um projeto de escoramento que admitiu apenas valores desprezíveis de deslocamento. O traço do concreto foi determinado para atingir uma resistência características de 25,88MPa. A concretagem foi realizada *in loco* no

laboratório de estruturas Altamiro Tibiriçá Dias do Departamento de Engenharia Civil, da UFOP, com preciso controle de qualidade. Os resultados experimentais indicaram que a laje teve a resistência e o desempenho esperados, não apresentando fissuras ao longo do ensaio.

A instrumentação foi determinada a partir de estudos teóricos e experimentais realizados anteriormente com elementos específicos da treliça mista que contribuíram para aperfeiçoar a escolha do campo de instrumentação. A análise numérica realizada por Martins (2011) foi instrumento determinante para escolha final dos locais para utilização de extensômetros. Martins (2011) desenvolveu um modelo numérico tridimensional representativo, realizado no *Ansys 11.0*, com a finalidade de estudar a distribuição de tensões no modelo para determinar os pontos principais para instrumentação. O sistema de instrumentação foi composto por extensômetros lineares; extensômetros tipo roseta 45°, para determinar as deformações principais; e LVDT's e defletômetros, para determinar os deslocamentos. Os resultados demonstraram que a escolha da instrumentação foi adequada com poucos problemas de funcionamento ao longo do ensaio. Os defletômetros indicaram que não houve recalque nos aparelhos de apoio utilizados. Para o monitoramento dos carregamentos, foram utilizadas células de carga que forneceram os valores de carregamento para cada incremento sem perda de funcionamento durante o ensaio.

A aplicação dos carregamentos foi feita utilizando três atuadores hidráulicos com cargas simultâneas. Durante o ensaio, não houve problemas de funcionamento com os atuadores. A carga máxima atingida no ensaio foi de 268,77kN aplicado no atuador central.

A carga máxima atingida no ensaio foi de 268,77kN. Os resultados experimentais mostraram que houve um princípio de falha na interação aço-concreto a partir de um carregamento de 32,28kN comprometendo o sistema estrutural misto. A partir da falha dos conectores de cisalhamento, houve um acréscimo de solicitações no banzo superior e diagonal, que fizeram com que a treliça metálica trabalhasse quase que individualmente para resistir aos carregamentos aplicados. Os resultados obtidos expõem a importância dos conectores de cisalhamento em garantir o funcionamento do conjunto, sem a possibilidade de falha que possa ocasionar uma redistribuição de tensões gerando instabilidade na estrutura global.

A falha do conector está associada à falta de capacidade de transmissão dos esforços pela parede superior do perfil retangular do banzo superior. O efeito localizado do conector de cisalhamento no banzo superior não é considerado como um estado limite no dimensionamento. Sendo assim, a sua parede de 4,8mm de espessura não foi suficiente para resistir a um efeito localizado imposto pelo esforço no conector.

Finalizando a descrição do comportamento final da treliça mista, tem-se, inicialmente, a perda da conexão dada pelos conectores, indicada pela deformação da parede superior do banzo superior. Em seguida, ocorreu o escoamento da ligação, mas não caracterizando um colapso, conforme pode ser verificado com o aumento da rigidez identificado experimentalmente. No caso da ligação, o mesmo foi observado nas análises realizadas por Nunes (2011), em que o colapso da ligação para o modo A ocorre para a carga de 390kN. Em seguida deu-se, então, o colapso da treliça mista pela plastificação do banzo inferior por tração.

Como trabalhos futuros, pode-se inicialmente destacar: a necessidade de um novo programa experimental, considerando diferentes conectores de cisalhamento e análise numérica do sistema misto; avaliação da treliça mista com diferentes tipologias de lajes; avaliar o sistema misto com tipologias diferentes de nós e geometria diferenciada e sem a consideração de reforços; estudo da influência de carregamento dinâmico na treliça mista. Algumas pesquisas estão em andamento no Laboratório de Estruturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800: Projetos e Execução de Estruturas de Aço e de Estruturas Aço-Concreto de Edifícios*. Belo Horizonte, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR6118: Projeto de Estruturas de Concreto*. Rio de Janeiro, 2004.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION IC. *Load and resistance factor design specification for steel hollow structural sections*. 2005.

CHIEN, E. Y. L.; RITCHIE, J. K. *Design and Construction of Composite Floor Systems*. Chapter 5 – Composite Open Web Steel Joists and Trusses. Ontário: Canadian Institute of Steel Construction, 1984.

CIDECT. *Design Guide for Circular Hollow Section (CHS) Joints Under Predominantly Static Loading*. Köln:Verl. TÜV Rheinland, 1996.

CANADIAN STANDARD ASSOCIATION. *CAN/CSA-S16-01: Limit States Design of Steel Structures*, 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. Eurocode 3. *Design of steel structures: ENV 1993 – 1-1: General rules and rules for buildings*, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. Eurocode 3. *Design of steel structures – part 1.8: Design of joints*, CEN, European Committee for Standardisation, Brussels. prEN 1993-1.8, 2005.

FREITAS, A. M. S.; MENDES, F. C.; FREITAS, M. S. R. *Finite Elements Analyses of welded T joints*. Eurosteel, 2008.

MARTINS, J. D. *Análise experimental-teórico-numérica de sistemas treliçados mistos*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2011. (Em andamento).

MACHACEK, J.; CUDEJKO, M. *Longitudinal shear in composite steel and concrete trusses*. Journal Engineering Structures, 2008.

MENDANHA, F. O. *Análise de ligações de perfis tubulares em aço do tipo K e KT*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2006.

MENDES, F. C. *Análise teórica-experimental de ligações tipo “T”, “K” e “KT” com perfis metálicos tubulares*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2008.

MERRIL, S. O. *Design of Composite Trusses*. The Steel Construction Institute. SCI-083. Ascot, 1992.

MEYER, K. F. *Estruturas Metálicas: estruturas com tubos: projeto e introdução ao cálculo*. KM Engenharia. Belo Horizonte-MG, 2002.

NUNES, G. V. *Análise Teórico-numérica de Ligações planares compostas por perfis tubulares de seção retangular e circular*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2011. (Em andamento).

PACKER, J. A.; HENDERSON, J. E. *Hollow Structural Section Connections and Trusses: A Design Guide*. 2nd edition. Canadian Institute of Steel Construction, 2007.

PACKER, J. A.. Design Examples for HSS Trusses. *Canadian Journal of Civil Engineering*. v. 13, n.4, p. 460-473, 1986.

PACKER, J. A. *Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading*. Köln:Verl, TÜV Rheinland, 1997.

PN 02:125.03-004 *Projetos de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares*, 2011.

QUEIROZ, G. *Elementos das Estruturas Mistas Aço-Concreto*. 2001.

REQUENA, J. A. V.; SANTOS, A. L. E. F. *Dimensionamento de ligações em barras tubulares de estruturas metálicas planas*. Coleção técnico-científica V&M do Brasil, 2007.

SAMUELSON, D. Composite Steel Joists. *Engineering Journal – American Institute of Steel Construction*, v. 39, p. 111-120, 2002.

SANTOS, A. L. E. F.; REQUENA, J. A.; FREITAS, A. M. S. *Ligações de Estruturas Metálicas Tubulares Planas: Abordagem Teórica*. II Congresso Internacional da Construção Metálica – II CICOM. São Paulo, 2002. CD-ROM.

WANDENIER, J. *Hollow Sections in Structural Applications*. Delft University Technology of Netherlands, 2000.

WINGERDE, A. M. V.; PACKER, J. A.; WANDENIER, J.. Simplified SCF Formulae and Graphs for CHS and RHS K and KK Connections. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 53, 2001.