

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TEÓRICO E EXPERIMENTAL EM  
ESPÉCIMES DE TELHAS METÁLICAS AUTOPORTANTES  
SUBMETIDAS À FLEXÃO**

**NEWTON DRASSY ROMEIRO DA FONSECA**

Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA.

Porto Alegre, 28 de setembro de 2000

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação.

---

Prof. Dr. Hélio Adão Greven  
Orientador

---

Prof. Ph. D. Francisco de P. S. L. Gastal  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

Banca Examinadora:

- Prof. Alberto Tamagna  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Brasil
  
- Prof. Ronaldo Bastos Duarte  
Ph. D. pela University of Edinburgh - Escócia
  
- Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes  
Dr. pela Universität Innsbruck - Áustria

Denise

Amor, incentivo e carinho em todos os momentos, presença significativa e estimulante de um projeto a dois.

Lísia, Ricardo e Luana

Obrigado pela intensidade de cada momento.

Drassy Medeiros da Fonseca, pai (in memorian)

Lacy Romeiro da Fonseca, mãe (in memorian)

Reconhecimento e saudade.

Nirton e Niura, irmãos

Valeu a força e o carinho.

Zilah Romeiro Fraga, tia (in memorian)

Em muitos momentos também minha mãe.

## **AGRADECIMENTOS**

Inicialmente gostaria de apresentar meus agradecimentos aos professores Hélio Adão Greven e José Carlos Ferraz Hennemann pela dedicação profissional dada a este trabalho durante todas as etapas de seu desenvolvimento e pela postura humana transmitida como educadores.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e de forma especial a todos os professores, colegas e funcionários do NORIE/UFRGS.

Aproveito para apresentar meus agradecimentos a todos os colegas da Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC que me incentivaram na realização deste trabalho, particularmente ao Eng<sup>o</sup> Civil Dr. Ronaldo Bastos Duarte do Departamento de Edificações. De forma especial aos assistentes de pesquisa, do Laboratório de Edificações, João Carlos Machado e João Paulo de Lima Vieira que participaram da preparação, montagem e desenvolvimento dos ensaios dos espécimes. À Liane Barcellos Thedy na preparação e execução de desenhos. Ao ex-funcionário Eleocir Roque Meotti pelo esmero na preparação e montagem do sistema plano-altimétrico utilizado na coleta de dados do programa experimental e ao Arq. Cleber Fernando Melo da Silva pelos desenhos realizados enquanto estagiário na CIENTEC. Ao Eng<sup>o</sup> Mecânico Antônio Luiz de Souza Melo, do Departamento de Tecnologia Metal-Mecânica, pelo apoio quando da realização dos ensaios de tração.

À Eng<sup>a</sup> Lenira Klein Guimarães, da PCE Projetos e Consultoria em Engenharia Ltda., fornecedor credenciado do software Algor, pelas orientações dadas para a utilização do programa de elementos finitos.

À Construção Construções Metálicas e ao Sr. Nilvo Wenningkamp pelo fornecimento do material empregado na formação dos espécimes utilizados na investigação experimental e pelo apoio e interesse demonstrado durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Sra. June Magda Scharnberg, da biblioteca da Escola de Engenharia, pela revisão das referências bibliográficas.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	2
1.2 ASPECTOS A SEREM INVESTIGADOS.....	5
1.3 O ESTADO DA ARTE.....	5
<b>2 ANÁLISE DO MATERIAL</b> .....	17
2.1 RECEBIMENTO DO MATERIAL.....	17
2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO.....	19
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	26
3.1 PROGRAMAÇÃO DOS ENSAIOS.....	26
3.2 MONTAGEM DO ESPÉCIME DE TELHAS.....	27
3.3 INSTRUMENTAÇÃO DO ESPÉCIME DE TELHAS.....	35
3.4 FORMA DE CARREGAMENTO DO ESPÉCIME DE TELHAS.....	39
3.5 DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO.....	44
3.6 EQUIPAMENTOS.....	45
<b>4 RESULTADOS DOS ENSAIOS</b> .....	47
4.1 ENSAIOS DO ESPÉCIME 1.....	48
4.1.1 Ensaio E1-1, E1-2, E1-3 e E1-4.....	48
4.1.2 Ensaio de ruptura do espécime 1.....	48
4.1.3 Apresentação gráfica dos resultados do espécime 1.....	50
4.1.4 Documentação fotográfica do espécime 1.....	57
4.2 ENSAIOS DO ESPÉCIME 2.....	61
4.2.1 Ensaio E2-1, E2-2, E2-3 e E2-4.....	61
4.2.2 Ensaio de ruptura do espécime 2.....	61
4.2.3 Apresentação gráfica dos resultados do espécime 2.....	63
4.2.4 Documentação fotográfica do espécime 2.....	70

4.3 ENSAIOS DO ESPÉCIME 3.....	71
4.3.1 Ensaio E3-1, E3-2, E3-3 e E3-4.....	71
4.3.2 Ensaio de ruptura do espécime 3.....	71
4.3.3 Apresentação gráfica dos resultados do espécime 3.....	73
4.3.4 Documentação fotográfica do espécime 3.....	80
4.4 ENSAIOS DO ESPÉCIME 4.....	81
4.4.1 Ensaio E4-1, E4-2, E4-3, E4-4.....	81
4.4.2 Ensaio de ruptura do espécime 4.....	81
4.4.3 Apresentação gráfica dos resultados do espécime 4.....	83
4.4.4 Documentação fotográfica do espécime 4.....	90
<b>5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>91</b>
5.1 AVALIAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	91
5.2 AVALIAÇÃO SEGUNDO AS ESPECIFICAÇÕES DA LRFD – AISI.....	99
5.3 AVALIAÇÃO COM BASE NO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	105
5.3.1 Modelo computacional.....	105
5.3.2 Avaliação das tensões atuantes no modelo.....	109
5.3.3 Avaliação dos deslocamentos verticais.....	116
5.4 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA.....	120
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>124</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>128</b>
<b>ANEXO A - RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>136</b>
<b>ANEXO B - TENSÕES ATUANTES NO MODELO.....</b>	<b>152</b>
<b>ANEXO C - DESLOCAMENTOS VERTICAIS ATUANTES NO MODELO .....</b>	<b>152</b>

## LISTA DE FIGURAS

1.1 - Mostra diversos modelos de perfis.....	1
1.2 - Registra alguns tipos de perfis.....	3
1.3 - Mostra, parcialmente, a perfiladora.....	4
2.1 - Seção transversal da telha.....	17
2.2 - Seção transversal da capa metálica.....	18
2.3 - Registra o parafuso com porca e arruelas.....	18
2.4 - Modelo do corpo-de-prova.....	19
2.5 - Exibe, na telha central do espécime 3.....	21
2.6 - Mostra o tipo de selo fornecido pela CSN.....	22
2.7 - Registra os quatro corpos-de-prova.....	23
2.8 - Registra os valores experimentais das propriedades.....	24
2.9 - Mostra os resultados experimentais das propriedades.....	25
3.1 - Mostra a formação dos quatro espécimes de telhas.....	28
3.2 - Mostra as 12 capas utilizadas no espécime 1.....	30
3.3 - Registra as 12 capas utilizadas no espécime 2.....	31
3.4 - Identifica as 12 capas utilizadas no espécime 3.....	31
3.5 - Mostra as 12 capas utilizadas no espécime 4.....	32
3.6 - Registra o dispositivo.....	33
3.7 - Detalhe do esmagamento final.....	33
3.8 - Mostra o resultado do esmagamento.....	34
3.9 - Mostra, na vista superior do espécime de telhas.....	36
3.10 - Indica a posição dos pontos de medições.....	36
3.11 - Mostra a posição dos pontos de medições.....	37
3.12 - Registra a posição dos pontos de medições.....	37
3.13 - Registra, a partir do espécime de telhas.....	38
3.14 - Mostra a identificação dos quinze pontos de leituras.....	39
3.15 - Mostra o cavalete de apoio.....	40
3.16 - Registra a projeção horizontal da montagem do espécime.....	42
3.17 - Mostra a forma de carregamento das três telhas internas.....	43
3.18 - Observa-se, a partir do apoio norte.....	43
3.19 - Mostra o Nível de Precisão Wild N3.....	45
4.1 - Indica a localização dos pontos de medição.....	47
4.2 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P5.....	51
4.3 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P2.....	51
4.4 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P8.....	52
4.5 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P4.....	52
4.6 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P1.....	53

4.7 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P7.....	53
4.8 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P6.....	54
4.9 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P3.....	54
4.10 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P9.....	55
4.11 - Média dos deslocamentos verticais.....	55
4.12 - Média dos deslocamentos verticais.....	56
4.13 - Média dos deslocamentos verticais.....	56
4.14 - Detalhe, na metade da telha central.....	57
4.15 - Mostra, parcialmente, a telha direita.....	57
4.16 - Mostra, na condição de ligação denominada 4.....	58
4.17 - Registra a linha de parafusos.....	58
4.18 - Mostra o ensaio E1-4.....	59
4.19 - Identifica a ruptura por flambagem local.....	60
4.20 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P5.....	64
4.21 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P2.....	64
4.22 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P8.....	65
4.23 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P4.....	65
4.24 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P1.....	66
4.25 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P7.....	66
4.26 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P6.....	67
4.27 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P3.....	67
4.28 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P9.....	68
4.29 - Média dos deslocamentos verticais.....	68
4.30 - Média dos deslocamentos verticais.....	69
4.31 - Média dos deslocamentos verticais.....	69
4.32 - Detalhe, na metade da telha direita.....	70
4.33 - Mostra, longitudinalmente na telha central.....	70
4.34 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P5.....	74
4.35 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P2.....	74
4.36 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P8.....	75
4.37 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P4.....	75
4.38 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P1.....	76
4.39 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P7.....	76
4.40 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P6.....	77
4.41 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P3.....	77
4.42 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P9.....	78
4.43 - Média dos deslocamentos verticais.....	78
4.44 - Média dos deslocamentos verticais.....	79

4.45 - Média dos deslocamentos verticais.....	79
4.46 - Detalhe, na telha direita.....	80
4.47 - Mostra, longitudinalmente na telha direita.....	80
4.48 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P5.....	84
4.49 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P2.....	84
4.50 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P8.....	85
4.51 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P4.....	85
4.52 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P1.....	86
4.53 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P7.....	86
4.54 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P6.....	87
4.55 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P3.....	87
4.56 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P9.....	88
4.57 - Média dos deslocamentos verticais.....	88
4.58 - Média dos deslocamentos verticais.....	89
4.59 - Média dos deslocamentos verticais.....	89
4.60 - Detalhe, na telha direita.....	90
4.61 - Identifica a ruptura por flambagem local.....	90
5.1 - Registra o comportamento dos deslocamentos.....	93
5.2 - Registra o comportamento dos deslocamentos.....	96
5.3 - Mostra o comportamento da variável reutilização.....	98
5.4 - Registra o modelo adotado a partir do carregamento.....	100
5.5 - Registra a posição da linha neutra.....	101
5.6 - Mostra o comportamento do momento resistente último.....	103
5.7 - Mostra o comportamento do esforço cortante resistente último.....	105
5.8 - Identifica o número dos nós que formam os elementos de placa.....	107
5.9 - Mostra a distribuição da malha e o carregamento do modelo.....	108
5.10 - Apresenta o diagrama de tensões.....	109
5.11 - Registra o comportamento das tensões.....	111
5.12 - Mostra o comportamento das tensões.....	111
5.13 - Mostra o comportamento das tensões.....	112
5.14 - Registra o comportamento das tensões.....	112
5.15 - Mostra o comportamento das tensões.....	113
5.16 - Mostra o comportamento das tensões.....	113
5.17 - Registra o comportamento das tensões.....	114
5.18 - Mostra o comportamento das tensões.....	114
5.19 - Mostra o comportamento das tensões.....	115
5.20 - Mostra o comportamento dos resultados experimentais.....	117
5.21 - Registra o comportamento dos deslocamentos verticais.....	119

## LISTA DE QUADROS

2.1 - Ensaio de tração em amostras.....	20
2.2 - Ensaio de tração em amostras.....	20
2.3 - Ensaio de tração em amostras.....	22
3.1 - Identificação dos ensaios de flexão.....	27
4.1 - Deslocamentos verticais no ponto central do vão.....	49
4.2 - Média dos deslocamentos verticais.....	50
4.3 - Deslocamentos verticais no ponto central do vão.....	62
4.4 - Média dos deslocamentos verticais.....	63
4.5 - Deslocamentos verticais no ponto central do vão.....	72
4.6 - Média dos deslocamentos verticais.....	73
4.7 - Deslocamentos verticais no ponto central do vão.....	82
4.8 - Média dos deslocamentos verticais.....	83
5.1 - Deslocamentos verticais médios do ponto P5.....	94
5.2 - Deslocamento verticais do ponto P5 nos ensaios de ruptura.....	96
5.3 - Análise da variável reutilização das telhas.....	99
5.4 - Resultados do momento resistente último.....	102
5.5 - Resultados do esforço cortante resistente último.....	104
5.6 - Deslocamentos verticais médios do ponto P5.....	117
5.7 - Deslocamentos verticais do ponto P5.....	119
5.8 - Média aritmética dos deslocamentos verticais médios.....	120

## LISTA DE TABELAS

5.1 - Deslocamentos verticais (mm) do ponto central (P5).....	121
5.2 - Análise de variância ANOVA - Projeto Quadrado Latino.....	122
5.3 - Média dos deslocamentos verticais ( mm ) dos pontos P10 e P11.....	122
5.4 - Análise de variância ANOVA - Projeto Quadrado Latino.....	123

## RESUMO

Este trabalho contém uma investigação teórico experimental do comportamento à flexão de telhas metálicas autoportantes formadas à frio. São apresentados de forma sucinta o processo de fabricação, o estado da arte, bem como as propriedades mecânicas do aço.

A parte experimental do trabalho utilizou 4 espécimes ensaiados, onde cada espécime era constituído por 5 telhas autoportantes, sendo realizado um total de 16 ensaios de flexão, onde as variáveis foram o elemento de ligação das telhas denominado capa, seu sistema de fixação e o número de parafusos utilizados na referida ligação.

As conclusões contidas nesta investigação estão fundamentadas na comparação entre os valores experimentais dos deslocamentos verticais e da resistência última dos espécimes ensaiados e as recomendações da “Load and Resistance Factor Design Specification for Cold-Formed Steel Structural Members”, complementadas por uma análise linear elástica com base no método de elementos finitos.

## **ABSTRACT**

An experimental and theoretical investigation of the flexural behaviour of cold-formed steel roofs is presented in this thesis. In a brief way, the manufacturing process, the state-of-the-art and the steel mechanical properties are presented.

The experimental work was carried out on 4 test specimen, having each test specimen 5 corrugated steel sheets. A total amount of 16 flexural tests was performed and the variables considered were: the influence of the top roof, the number of connecting using bolts between each neighbour panel sheet and the process of roof fixing.

The flexural behaviour was analysed using the vertical displacements and the ultimate flexural strength. Conclusions are based on the comparison between the experimental work and theoretical analysis into the light of the code "Load and Resistance Factor Design Specification for Cold-Formed Steel Structural Members", and also elastic linear analysis using the finite element method.

## 1 INTRODUÇÃO

As telhas metálicas autoportantes de aço zincado (galvanizado) são utilizadas tanto no fechamento lateral assim como nas coberturas planas e curvas de edificações industriais e comerciais. São recomendadas para vencer vãos relativamente grandes entre apoios e dispensam o uso de estruturas intermediárias de apoio ou elementos do tipo terças necessitando apenas de apoios nas extremidades da cobertura da edificação.

Conforme Yu (1991), a utilização de perfis formados a frio em construções, nos Estados Unidos e na Grã-Bretanha, começou em 1850. Todavia, a utilização efetiva desses elementos nas construções ocorreram a partir de 1940, considerando que somente em 1939 foram iniciadas pesquisas que contaram com o apoio do American Iron and Steel Institute – AISI e foram conduzidas pelo Prof. George Winter, da Cornell University. O desenvolvimento dessas pesquisas gerou, em 1946, a primeira especificação publicada pela AISI voltada para o projeto de elementos estruturais formados a frio.

A Figura 1.1 registra os diversos modelos, apresentados por Yu (1991), de perfis de chapa fina de aço utilizados tanto no fechamento lateral quanto em coberturas planas e curvas de edificações.

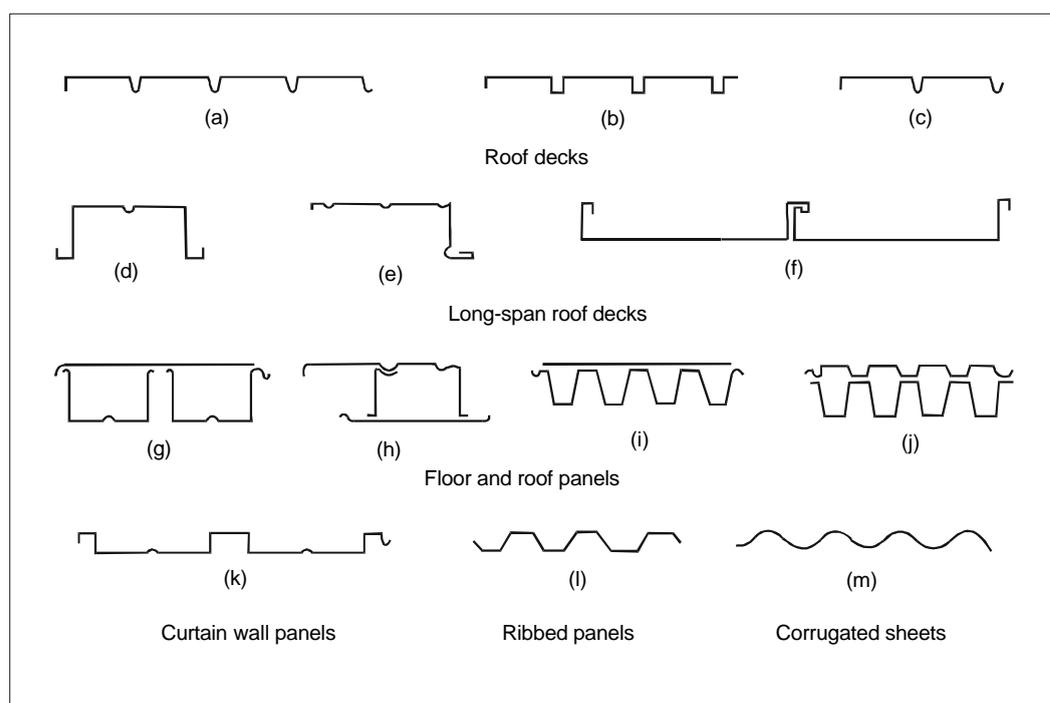


Figura 1.1 - Mostra diversos modelos de perfis em chapa de aço para uso em edificações.

Fonte: Yu, Wei-Wen. Cold-Formed Steel Design. 1991. p.9.

No Brasil, segundo Malite et al (1998), a utilização de elementos formados a frio começou no final dos anos 60 considerando que algumas empresas passaram a dispor de equipamentos do tipo dobradeiras ou mesas de roletes destinadas a realização de operações de formação a frio.

## 1.1 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Os processos de fabricação de telhas de aço zincado são denominados de estampagem, calandragem e perfilação.

O processo chamado estampagem utiliza uma prensa viradeira que realiza a formação do perfil da telha dobra a dobra. A capacidade de produção de telhas, neste processo, é reduzida e o comprimento das telhas está limitada ao comprimento da referida prensa. Este processo pode produzir, além das telhas, peças especiais de arremate para as coberturas das edificações.

A calandragem utiliza um equipamento constituído de dois cilindros móveis e corrugadores. Neste processo de fabricação a chapa de aço, aplainada e cortada no comprimento limitado pela corrugadeira, é transformada em telha através de uma única passagem pelos cilindros do equipamento. As telhas geradas neste processo de fabricação são as com dobras mais suaves identificadas como telhas de perfil ondulado (senoidal). A produção de telhas onduladas com diversas larguras decorre do fato de que a formação do seu respectivo perfil se dá a partir de uma das bordas da chapa de aço zincado.

No processo denominado de perfilação são utilizadas máquinas perfiladoras. Essas máquinas são constituídas de uma série de pares de cilindros superiores e inferiores que permite a produção contínua de telhas de acordo com o perfil projetado. A produção da telha se dá a partir de uma bobina de aço zincado que é colocada antes dos pares de cilindros da perfiladora. A desbobinagem é a etapa onde a bobina de aço zincado é desenrolada dando lugar a chapa lisa e aplainada. Na perfilação, a chapa de aço passa entre os pares de cilindros que vão formando, por deformação a frio, o perfil desejado para a telha. O perfil da telha é formado do centro para as bordas da chapa de aço zincado. Com a telha pronta no comprimento programado para o vão da cobertura da edificação se executa o corte através de uma tesoura do tipo guilhotina acoplada a perfiladora.

Convém acrescentar que atualmente alguns fabricantes já dispõem de máquinas perfiladoras, montadas sobre caminhões (eixos rodoviários), as quais produzem telhas no comprimento desejado, no próprio canteiro da obra, possibilitando sua imediata utilização. Tal procedimento evita a realização de emendas e dispensa o transporte das referidas telhas. O processo de fabricação das telhas quanto a velocidade de produção varia entre 7 e 22 metros por minuto e está diretamente associada a espessura da chapa e a tecnologia utilizada pela perfiladora. Além disso, uma mesma máquina perfiladora pode produzir mais de um tipo de perfil de telha desde que disponha de diversos jogos completos de pares de cilindros e de ferramentas que possibilitem a troca rápida do equipamento.

A Figura 1.2 mostra alguns tipos de perfis utilizados pelos fabricantes de telhas de aço zincado no Brasil. Cada fabricante tem a sua própria linha de telhas de aço zincado e as variações dimensionais dos referidos perfis muitas vezes são utilizadas na identificação desses produtos. As telhas de aço zincado normalmente são classificadas pelos fabricantes como telhas onduladas (senoidal), telhas trapezoidais e telhas autoportantes.

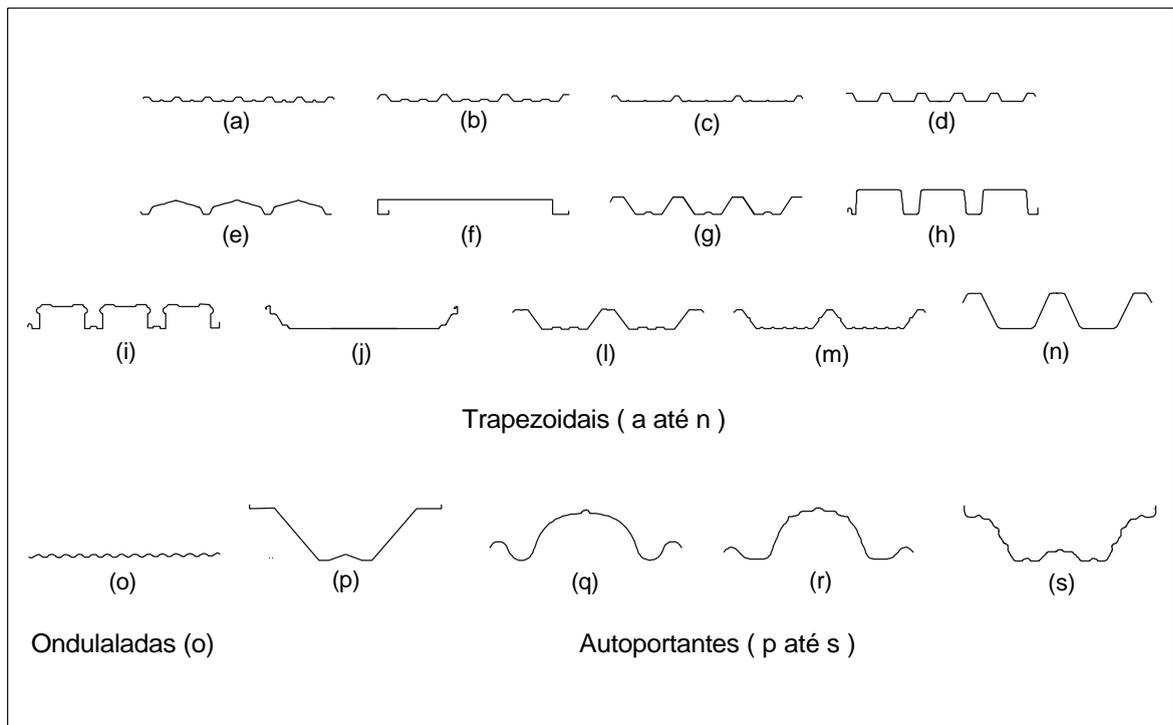


Figura 1.2 - Registra alguns tipos de perfis utilizados pelos fabricantes de telhas de aço zincado no Brasil.

As telhas autoportantes e as capas autoportantes, em aço zincado, utilizadas na montagem dos espécimes investigados experimentalmente neste trabalho, foram produzidas através de uma perfiladora. O referido equipamento desbobina e aplaina a chapa de aço zincado e executa a perfilação das telhas e das capas no comprimento desejado de acordo com o procedimento já descrito anteriormente. A Figura 1.3 mostra a perfiladora utilizada no processo de fabricação das telhas metálicas autoportantes empregadas na constituição dos espécimes ensaiados no presente trabalho.



Figura 1.3 - Mostra, parcialmente, a perfiladora sobre eixos rodoviários e o processo de produção de telhas autoportantes em aço zincado. A telha, observada nesta imagem, tem a mesma seção transversal das que foram utilizadas na formação dos espécimes ensaiados.

## 1.2 ASPECTOS A SEREM INVESTIGADOS

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo investigar três aspectos:

- Avaliar comparativamente, com base nos resultados experimentais obtidos nos ensaios de flexão, a contribuição do elemento capa na ligação dos espécimes de telhas metálicas autoportantes;
- Comparar os resultados experimentais dos espécimes, registrados nos ensaios de flexão, com os valores teóricos gerados analiticamente a partir dos critérios de cálculo e das especificações recomendadas pela “Load and Resistance Factor Design Specification for Cold-Formed Steel Structural Members” - LRFD - AISI, edição de 1991;
- Comparar os resultados experimentais dos espécimes, registrados nos ensaios de flexão, com os valores teóricos obtidos através de uma análise linear elástica com base no método de elementos finitos.

## 1.3 O ESTADO DA ARTE

No levantamento bibliográfico realizado, quanto ao estado da arte referente a utilização de telhas metálicas no Brasil, não foram localizados trabalhos que indiquem investigações nesse campo do conhecimento. Cabe registrar, de forma ilustrativa, com base no resumo de 26 (vinte e seis) dissertações de Mestrado do Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Estruturas, com especialização em Estruturas Metálicas, período de 1994 a 2000, desenvolvidas na Universidade Federal de Ouro Preto - MG, que nenhum dos referidos trabalhos avaliam o comportamento de estruturas do tipo telhas metálicas autoportantes.

Desta forma, este levantamento se atém a publicações que apresentam estudos com painéis metálicos realizados em outros países e que foram localizadas na literatura técnica internacional.

Winter e Uribe (1969) investigaram experimental e analiticamente o comportamento estrutural de elementos de aço formados a frio e os efeitos que as operações de formação a frio geram nas propriedades dos materiais. Os autores ressaltam que um esticamento a frio, simples e uniforme, em uma lâmina reta gera acréscimos na resistência, redução da ductilidade e mudança na forma da curva tensão-deformação, os quais são causados pela combinação dos seguintes fatores: deformações de endurecimento, deformações de envelhecimento, efeito de Bauschinger e efeito inverso de Bauschinger. Ainda, acrescentam que a resistência de escoamento de cantos formados a frio podem ser calculados a partir de uma equação baseada na teoria da plasticidade e de dados empíricos. Winter e Uribe colocam que o efeito do trabalho a frio na resistência a flambagem de elementos comprimidos no campo inelástico são mostrados através da teoria e de ensaios. Os autores ressaltam que para elementos na flexão o acréscimo na resistência última, resultante do trabalho a frio, foi documentado através de resultados de cálculo porém não verificado por ensaios. Para Winter e Uribe isso mostra que os cálculos baseados na capacidade resistente em projetos, em função dos valores de resistência alcançados para os elementos formados a frio, podem conduzir a uma economia muito expressiva.

Kinloch (1969) realizou uma investigação teórica e experimental aplicada a estruturas do tipo placa ortotrópica. O estudo teórico, aplicado para pequenas deformações, considera uma placa ortotrópica retangular, simplesmente apoiada em duas bordas opostas, submetida a carregamento transversal uniforme. A investigação experimental primeiramente determinou as constantes elásticas dos materiais utilizados na fabricação dos painéis. Na segunda etapa da investigação experimental foram realizados ensaios em espécimes de três painéis corrugados com seção transversal formada por elementos trapezoidais, do tipo deck. A pressão (simulação da carga lateral uniforme) aplicada nos painéis foi feita através de três recipientes de ar com paredes flexíveis e ligados entre si. Os painéis foram formados a frio a partir de chapas de aço zincado (galvanizado) e de liga de alumínio, com espessura nominais de 0,91 mm e 1,21 mm. Os resultados teóricos e experimentais foram comparados e suas implicações discutidas. Kinloch finaliza o referido artigo mostrando alguns detalhes adicionais do trabalho numérico e, de forma resumida, apresenta um possível critério na consideração integral da placa ortotrópica como uma série representativa de vigas.

O estudo apresentado por Rockey e Evans (1969) examinou o comportamento de espécime de piso formado por lâminas de aço finas corrugadas, seção transversal de elementos trapezoidais, usadas anteriormente no fechamento lateral e em coberturas de edificações. O estudo teórico analisou o comportamento elástico de um, dois, quatro e oito elementos trapezoidais, com espessura de 3,25 mm, utilizados na formação do piso corrugado, considerando a estrutura como do tipo placa com dobras submetida a flexão e como elemento do tipo viga. Os resultados dos deslocamentos obtidos pelo critério da viga mostra que somente os elementos trapezoidais da borda livre apresentam comportamento diferenciado em relação ao critério da placa. A investigação experimental avaliou a solução do tipo viga para a estrutura de um espécime de piso corrugado, formado por três elementos trapezoidais de espessura de 2,51 mm e relação comprimento/largura de 0,5, 1, 1,5 e 2. A carga foi aplicada no espécime através de uma bolsa de ar com capacidade de distribuir a carga sobre o espécime. O estudo sugere que cada elemento trapezoidal do piso corrugado deve ser dimensionado como uma viga simples. A partir dessa condição foi determinado o formato corrugado ótimo de projeto para o perfil da estrutura do piso. A influência das condições de contorno também foi avaliada. O comportamento de colapso do espécime do piso corrugado foi discutido e um procedimento aproximado foi esboçado. Rockey e Evans concluem que o estudo realizado indica que o comportamento do piso de aço corrugado pode ser prognosticado com razoável precisão com respeito ao comportamento elástico e carga de colapso, quando este é assumido como simplesmente apoiado em cada extremidade. Os autores ainda ressaltam que, se o piso for rigidamente fixado na estrutura de apoio, haverá necessidade de considerar o efeito do enrijecimento. Nesse caso, o piso deverá ser considerado como uma placa ortotrópica e a análise deve ser realizada através do método de elementos finitos. Rockey e Evans acrescentam que, apesar de serem estudos iniciais, o emprego do método de elementos finitos tem se mostrado bastante estimulante.

Bryan e Jackson (1969) apontam inicialmente que as membranas empregadas no fechamento lateral e na cobertura das edificações fornecem para a estrutura considerável rigidez e resistência e oferecem significativa economia de aço na estrutura. Os autores acrescentam que o efeito desse enrijecimento poderá ser

considerado no projeto elástico e plástico, desde de que seja calculado, respectivamente, o cisalhamento decorrente da flexibilidade do painel e a carga última de cisalhamento do painel. Um tratamento teórico da deformação por cisalhamento é apresentado. Os testes realizados para determinar o comportamento ao cisalhamento de painéis corrugados (chapa de alumínio, elementos de apoio e fixações), seção transversal retangular, foram descritos e a influência dos diversos fatores avaliados foram considerados. A importância desses fatores foi caracterizada e o cisalhamento decorrente da flexibilidade do painel e a resistência do painel foram calculados a partir da utilização de dados básicos dos elementos componentes do painel.

O artigo apresentado por Harvey (1969) contém resultados preliminares de testes realizados em coberturas constituídas de treliças, terças de perfil do tipo Z, formado a frio, e de telhas onduladas de aço. As terças foram consideradas como um caso de flexão desviada. Também foi construído o diagrama experimental da linha de influência do momento, na seção mais solicitada, quando as terças do tipo Z foram submetidas a esforços de flexão, considerando a peça simplesmente apoiada (vão único) e a peça contínua sobre três apoios (dois vãos). Os diagramas da linha de influência teórica e experimental, obtidos para a cobertura com a telha e sem a telha, foram utilizados para avaliar o efeito das restrições decorrentes das ligações nas extremidades das terças e o efeito de enrijecimento ocasionado pela presença da telha. A cobertura foi carregada com carga uniformemente distribuída e o momento foi calculado para as seções onde foram realizadas as medições das deformações. A distribuição da carga, aplicada sobre a telha, na terça foi obtida através do diagrama experimental da linha de influência da cobertura, considerando a presença da telha. Harvey conclui fazendo uma comparação dos resultados experimentais com os obtidos através de métodos de projeto normalmente utilizados.

Ellifritt e Lutrell (1973) realizaram testes em três tipos de seções transversais trapezoidais de painéis corrugados de aço com espessuras variáveis entre 6,8 mm e 14,9 mm. Os painéis foram avaliados quanto ao enrijecimento no cisalhamento e quanto a sua resistência última. O programa de testes foi projetado para levar em consideração os efeitos decorrentes do formato do painel, espaçamento entre apoios, espessura da chapa, tensão de escoamento do material e o ajuste das fixações.

O artigo apresentado por Jorgenson e Chern (1973) se ateve ao estudo de painéis retos e curvos, com seção transversal de formato corrugado, fabricados em aço zincado (galvanizado). Esses painéis metálicos além do fechamento da cobertura também respondem como uma estrutura. O programa experimental teve como objetivo determinar a resistência última dos painéis corrugados quando submetidos aos ensaios de flexão. Os espécimes utilizados nos ensaios foram constituídos de três painéis. A largura de cada painel era de 2.057,4 mm e foram avaliados painéis com espessuras de 0,60, 0,75, 0,91 e 1,21 mm. O comprimento do vão livre dos espécimes, entre apoios, nos ensaios foi 3.566 mm, 3.758,2 mm e 4.041,6 mm. As características mecânicas do aço foram determinadas a partir de corpos-de-prova extraídos dos referidos painéis e o modelo atendeu as especificações da norma ASTM. O aço utilizado nos painéis foi fornecido de acordo com a norma ASTM A 525, porém os autores ressaltaram que o referido material não satisfaz o requisito de resistência mínima. Sugerem que o aço a ser utilizado atenda as especificações da norma ASTM A 446, similar ao A525, mas que satisfaz o requisito de resistência mínima. O carregamento foi aplicado através de duas linhas transversais de carga, sendo cada uma dessas linhas localizada a um terço do vão livre entre os apoios dos espécimes. Os deslocamentos verticais foram medidos com deflectômetros mecânicos no centro e nos terços do vão dos painéis corrugados. Jorgenson e Chern registraram o comportamento geral dos espécimes e apontaram as peculiaridades observadas em cada um dos ensaios. Os resultados dos ensaios de flexão dos espécimes foram analisados quanto aos seguintes aspectos: momento resistente (comparativamente painéis retos e curvos), o efeito da espessura do painel no momento resistente, o efeito da espessura do painel nas tensões de flexão e o efeito da linha de carga. Os autores encerram o artigo apresentando um resumo das conclusões obtidas a partir da investigação experimental realizada com painéis de aço zincado, formados a frio, submetidos a flexão, das quais extraímos as seguintes: a) a ruptura dos espécimes, na flexão, iniciaram por flambagem local na junção da aba comprimida com a alma adjacente; b) o critério recomendado para a tensão de flexão admissível na alma é extremamente conservador quando aplicado para valores  $h/t$  superiores ao valor limite 200 (especificações da AISI – Edição 1968); c) os espécimes do painel curvo

romperam quando o momento resistente alcançou entre 60 e 77% dos valores do momento resistente para espécimes idênticos do painel reto; d) o acréscimo do momento resistente se comporta quase que linearmente com o acréscimo na espessura do painel.

Libove (1973) primeiramente faz uma análise de alguns resultados numéricos já publicados relativos a análise teórica do cisalhamento considerando o enrijecimento e tensões de flexão em almas corrugadas. A seguir mostra resultados numéricos adicionais do comportamento de almas trapezoidais corrugadas enrijecidas quanto ao cisalhamento para elementos de diferentes larguras. Libove conclui seu artigo com uma análise da flambagem no cisalhamento de almas corrugadas com fixação contínua e apresenta o desenvolvimento de uma expressão para a energia-potencial-total que considera adequada para esse tipo de análise.

El-Atrouzy e Abdel-Sayed (1973) examinaram especificamente a forma de corrugação mais apropriada para coberturas cilíndricas do tipo casca e a construção de silos com chapa de aço corrugadas.

Em 1973, Nilson apresenta um método para a análise elástica do cisalhamento em espécimes compostos de painéis padronizados de aço leve. O autor adota um elemento finito aproximado no qual as propriedades mecânicas dos componentes do espécime são incorporadas na montagem do modelo analítico. Os resultados teóricos obtidos através desse método são comparados com os valores experimentais.

Luttrell (1973) realizou ensaios para investigar o comportamento de espécimes de painéis conectados com parafusos. Os resultados da resistência ao cisalhamento obtidos para os espécimes durante a realização do programa experimental foram comparados com os resultados de ensaios anteriormente realizados que avaliaram espécimes de painéis similares conectados com solda.

Ainda em 1973, Chern e Jorgenson realizaram uma série de ensaios para determinar a resistência ao cisalhamento de espécimes de painéis de um mesmo modelo de perfil, porém com espessuras diferentes. O estudo teve como objetivo obter informações quanto a resistência última ao cisalhamento do painel, a variação dos deslocamentos no plano de cisalhamento decorrente da aplicação da carga, deslocamentos residuais, resistência dos parafusos e fixações e o escorregamento entre os painéis.

Hausssler e Pabers (1973) realizaram ensaios para avaliar a resistência das conexões executadas nas extremidades dos painéis com os elementos de apoio utilizados em coberturas.

Bergfelt, Edlund e Larsson (1975) realizaram uma investigação experimental sobre o comportamento de chapas de aço de parede fina, seção trapezoidal, solicitadas a flexão. O artigo apresenta os resultados e a experiência obtida com os ensaios realizados, muitos dos quais serviram como base para a nova norma sueca, com perfis formados a frio, seção trapezoidal, de chapa de aço de parede fina, que foram submetidos ao carregamento transversal. Os autores concluem o artigo apresentando os diferentes estágios do comportamento da viga, observados por ocasião da realização dos ensaios.

Em 1975, Baehre apresentou um artigo que relata trabalho de pesquisa sueco com elementos estruturais formados a frio, de chapa metálica de parede fina, realizados no Royal Institute of Technology. A referida pesquisa contém estudo teórico e experimental da capacidade de carga de vários tipos de painéis de chapa metálica para uso na construção de edifícios com o objetivo de prover informações necessárias para se estabelecer regras de padronização.

Ammar, Tseng e Healey (1975) apresentaram em seu artigo uma abordagem prática de projeto para a determinação da resistência de correntes de ar, como as originadas por explosões, em painéis de aço, seção trapezoidal, formados a frio, normalmente empregados em coberturas e no fechamento lateral de edifícios pré-fabricados. O artigo mostra o procedimento quanto a natureza dinâmica do carregamento e analisa o comportamento inelástico do painel.

Rhodes et al (1978) apresentaram detalhes dos ensaios realizados para simular os efeitos da ação da carga acidental (sobrecarga) e da ação da carga de vento (sucção) sobre terças contínuas, de perfis formados a frio do tipo Z, em sistemas de coberturas. O artigo contém os resultados dos ensaios e os mesmos são amplamente discutidos.

O artigo apresentado por Davies (1978) descreve quatro sistemas estruturais, originados a partir do desejo de encontrar novos caminhos para o emprego de elementos formados a frio, a partir da chapa fina de aço, na fabricação de construções de aço de baixo custo. Um dos sistemas estruturais avaliados

experimentalmente utiliza, na cobertura e no fechamento lateral da edificação painéis de seção transversal trapezoidal para vãos da ordem de 6 m entre apoios.

Abdel-Sayed, Fung e Monasa (1980) apresentaram um artigo que examina o estado da arte com respeito ao carregamento e análise de estruturas rurais cilíndricas e faz um resumo do pequeno número de projetos ligados a pesquisa que se encontram em desenvolvimento.

Em 1982, Sokol Jr. apresentou um trabalho de pesquisa, combinando o desenvolvimento teórico e de ensaios, com o objetivo de determinar a capacidade de flambagem de painéis curvos pré-fabricados de aço, formados a frio, que são utilizados como parte integrante de uma casca cilíndrica.

Jorgenson e Chowdhury (1982) descrevem uma pesquisa que explorou experimentalmente o comportamento estrutural de painéis curvos de aço, formados a frio, com seção transversal corrugada de grande profundidade. Esses painéis metálicos atuam simultaneamente como estrutura e como cobertura de fechamento da edificação. Os resultados dos painéis curvos foram comparados com os obtidos pelos painéis retos de idêntica seção transversal. O fenômeno da flambagem elástica e inelástica dos painéis curvos foi explicada com base nos resultados experimentais.

Baehre (1983) apresenta artigo que discute o desenvolvimento de elementos estruturais leves de aço, formados a frio, na construção de edifícios. O autor ressalta que o aumento do conhecimento sobre o comportamento de estruturas de parede fina, o amplo trabalho de pesquisa, o aumento na resistência do material e o desenvolvimento das técnicas de formar a frio são a base do avanço da técnica de construir com peças de peso leve em diferentes setores da construção.

Em 1990, Dannemann apresentou, baseado em ensaios realizados em painéis de seção trapezoidal de chapa fina de aço, um critério complementar para a largura efetiva quando ocorre flambagem elástica do flange. Esse método considera o comportamento observado e a resistência última dos espécimes ensaiados. O autor sugere que para o caso de flambagem inelástica sejam considerados válidos os critérios da AISI e de outras normas correlatas de projeto, porém quando a chapa de aço for muito esbelta e apresentar flambagem elástica o critério modificado da largura efetiva seja aplicado. Dannemann acrescenta que o método proposto não somente mostra excelente correlação com os ensaios mas também facilita uma

racional concordância no comportamento da aba enrijecida e não-enrijecida, preenchendo requisitos físicos não considerados pelo método clássico da largura efetiva quando as placas são muito finas. Dannemann concluiu que o método proposto poderá ser aplicado para vigas e colunas que tenham almas e abas não-enrijecidas e enrijecidas e em combinação com outros códigos de construção, para o caso de flambagem local no campo elástico.

Studnicka (1990) apresentou os resultados de uma extensa investigação experimental do enrugamento da alma decorrente da ação de cargas em seção transversal de perfil do tipo deck de múltiplas almas, realizado na Tcheco-Eslováquia. O autor realizou ensaios com aplicação de cargas concentradas em placas apoiadas diretamente sobre uma aba ou duas abas da seção transversal do perfil. Os ensaios de flexão testaram a condição do apoio de extremidade do vão e de posições internas do vão entre os apoios com o objetivo de avaliar através da reação decorrente da ação das referidas cargas concentradas o comportamento da alma do perfil. Studnicka acrescenta, com base nos resultados obtidos nos ensaios, que estes apresentam uma satisfatória conformidade com os valores originados através da norma canadense “Canadian Cold-Formed Steel Standard” para a condição das posições internas do vão entre apoios. Para a condição do apoio de extremidade do vão uma pequena modificação é recomendada na fórmula da referida norma canadense, CAN3 – S136 – M84.

Ainda em 1990, Brooks e Murray apresentaram um artigo que propõe, com base nos resultados de ensaios, um método para determinar a resistência de terças do tipo Z empregadas como apoio de painéis de sistemas de cobertura do tipo bainha.

Serrette e Peköz (1994) apresentaram um método aproximado para avaliar a capacidade de um sistema interconectado de vãos contínuos de painéis do tipo bainha. Resultados experimentais dos ensaios de três vãos contínuos e de um vão simples mostram que o método aproximado dá relativamente uma exata avaliação da máxima capacidade para um sistema submetido a cargas gravitacionais.

Em 1994, Landolfo e Mazzolani desenvolveram, do ponto de vista teórico e experimental, uma completa investigação na avaliação do comportamento último de chapas de aço trapezoidais solicitadas a flexão. Landolfo e Mazzolani na fase experimental realizaram 32 (trinta e dois) ensaios de flexão em 16 (dezesesseis)

espécimes de seções transversais de diferentes formatos e com espessuras variáveis entre 0,79 mm e 1,26 mm. Os autores, em seu artigo, fazem uma descrição das técnicas experimentais e dos resultados obtidos através da simulação teórica e também exploram os dados para conferir a sistematização adotada pelas normas de projeto. Landolfo e Mazzolani concluíram que a simulação numérica dá excelentes resultados em concordância com os dados experimentais apesar da grande variação na forma dos perfis e da dispersão observada nas propriedades do material. Ainda acrescentam que, a análise da congruência das cláusulas fornecidas pelas normas examinadas, para seções formadas a frio, evidenciaram uma grande subestimação do comportamento da verdadeira capacidade dos perfis das tipologias avaliadas. Segundo os autores o valor médio do momento de projeto, na realidade, é habitualmente 35 a 50% menor do que os resultados experimentais. Landolfo e Mazzolani encerram dizendo que os procedimentos numéricos propostos podem ser usados como uma ferramenta efetiva para sustentar uma ampla análise paramétrica a fim de se desenvolverem normas de projeto mais adequadas.

Wu, Yu e LaBoube (1996) realizaram 72 (setenta e dois) ensaios para avaliar a resistência a flexão de painéis de aço do tipo deck, seção transversal trapezoidal, formado a frio, feitos com aço estrutural do grau 80 de acordo com a norma ASTM A 653 (antigamente ASTM A 446 - aço do grau E), correntemente projetados nos Estados Unidos conforme especificação da AISI, usando o menor dos dois valores, 75% da resistência mínima de escoamento especificada ou 413,7 MPa, por causa da baixa ductilidade do aço. Os 72 (setenta e dois) espécimes de painéis correspondem a 24 (vinte e quatro) diferentes seções transversais, com o mesmo formato, sendo que para cada uma dessas seções foram ensaiados três painéis. O artigo apresenta um resumo dos resultados dos ensaios dos painéis, submetidos a dois pontos de carga, para a condição de simplesmente apoiado. Os autores ressaltam que os resultados dos ensaios indicam, para os espécimes de painéis com pequenos valores para a relação  $w/t$ , 17,93 até 61,07, que o momento alcançado nos ensaios para o escoamento são bem razoáveis quando comparados com o momento calculado para o escoamento efetivo, usando dimensões reais, resistência real de escoamento do aço e a especificação da AISI - 1986. Para espécimes de painéis com grandes valores para a relação  $w/t$ , 102,86 até 189,95, o momento último decorrente dos ensaios são menores que o momento calculado para o escoamento efetivo, porém muito maiores que o momento calculado usando

o valor especificado de 413,7 MPa. Wu, Yu e LaBoube ressaltam que nos painéis ensaiados não foi observado fratura de tração. e acrescentam que os painéis projetados para que o escoamento ocorresse primeiramente na aba tracionada desenvolveram valores altos para a relação entre o momento resultante dos ensaios no escoamento e o momento calculado para o escoamento efetivo.

Hofmeyer et al (1996) ressaltam que existem normas de projeto que descrevem que a ruptura da seção do perfil é benéfica no interior do apoio e, portanto, não está baseada no comportamento físico da ruptura da seção. Além disso, acrescentam que, na última década, vários modelos analíticos foram desenvolvidos para prognosticar a carga concentrada última da seção e que inclui diretamente a influência do momento de flexão, não havendo assim necessidade da utilização de um método empírico de interação. Os autores acreditam que esses modelos são corretos somente para cargas concentradas e para pequenos momentos de flexão. Ressalvam que na prática ocorrem grandes momentos de flexão. Hofmeyer et al, em seu artigo, apresentam uma parte da pesquisa experimental que estão realizando como parte do projeto que tem como objetivo desenvolver um modelo analítico para seções trapezoidais submetidas a cargas concentradas e a momento de flexão, como ocorre na prática. O desenvolvimento desse modelo será baseado nas pesquisas experimentais e numéricas realizadas para avaliar o comportamento combinado do enrugamento da alma associado a flexão.

Sokol (1998) coloca que o cálculo de perfis e elementos usando o estágio pós-crítico, no qual se origina uma rótula plástica no apoio interno, é possível desde que a relação entre o momento do apoio, reação e rotação da rótula sejam conhecidas. O autor acrescenta que existem duas alternativas de procedimentos de ensaios para a obtenção desses dados. No segundo caso, em vez do comportamento global, apenas uma relação local entre as três características acima são determinadas. Ressalva que quando o cálculo é feito com o modelo proposto no Eurocode 3, Parte 1.3, os dois diferentes procedimentos de ensaios não conduzem a resultados suficientemente próximos. Sokol explana as razões dessas diferenças e conseqüentemente sugere um aperfeiçoamento na abordagem do comportamento do apoio interno.

Schafer e Peköz (1998) colocam que o projeto de rotina de elementos de aço formados a frio é excessivamente complicado. Parte destas complicações se originam da necessidade de executar manualmente o cálculo da flambagem elástica. Igualmente, complicações ocorrem na determinação da largura efetiva assim como nos resultados das propriedades efetivas dos elementos. Além disso, como as seções transversais se tornaram mais otimizadas, por exemplo, através da introdução de enrijecedores longitudinais, o cálculo da largura efetiva e da flambagem elástica ficou marcadamente muito mais complexo. Os autores, com o objetivo de investigar alternativas para projetos de rotina, reuniram uma grande quantidade de dados experimentais de elementos na flexão, com geometria variáveis. O uso de soluções numéricas para a flambagem elástica de um elemento completo é investigada como uma alternativa para a rotina prática. Utilizando as curvas de resistência do elemento completo, similar as curvas de resistência decorrente da largura efetiva de um elemento, é encontrada a “resistência direta” abordada que é uma alternativa segura para projetos rotineiros. Schafer e Peköz acrescentam que tal abordagem pode conduzir ao aperfeiçoamento da flexibilidade na geometria da seção transversal aumentando assim grandemente a otimização da capacidade dos elementos formados a frio. Limitações conservadoras da resistência direta abordada também são tratadas no referido artigo.

## 2 ANÁLISE DO MATERIAL

### 2.1 RECEBIMENTO DO MATERIAL

O material empregado na montagem dos espécimes de telhas retas investigados neste estudo foi fornecido, em duas etapas, pela empresa Construção Construções Metálicas, com sede na cidade de Jaraguá do Sul - SC, constando de:

- 20 (vinte) telhas retas metálicas autoportantes de aço zincado (galvanizado), perfil aberto ondulado, com comprimento de 3,20 m e espessura nominal de 0,80 mm, recebidas em 26 de maio de 1995. As dimensões da seção transversal da telha metálica são apresentados na Figura 2.1.
- 48 (quarenta e oito) capas retas metálicas de aço zincado (galvanizado), com comprimento de 3,20 m, espessura nominal de 1,55 mm e 100 (cem) conjuntos de parafusos com diâmetro médio externo de 9,4 mm, comprimento total médio de 44,3 mm, cabeça sextavada com porca e duas arruelas, recebidos em 28 de setembro de 1995. Estes parafusos foram classificados como rosca Whitworth 3/8", conforme norma DIN 11/63. Esta mesma norma apresenta uma correspondência entre rosca Whitworth e rosca métrica: 3/8" = M10.

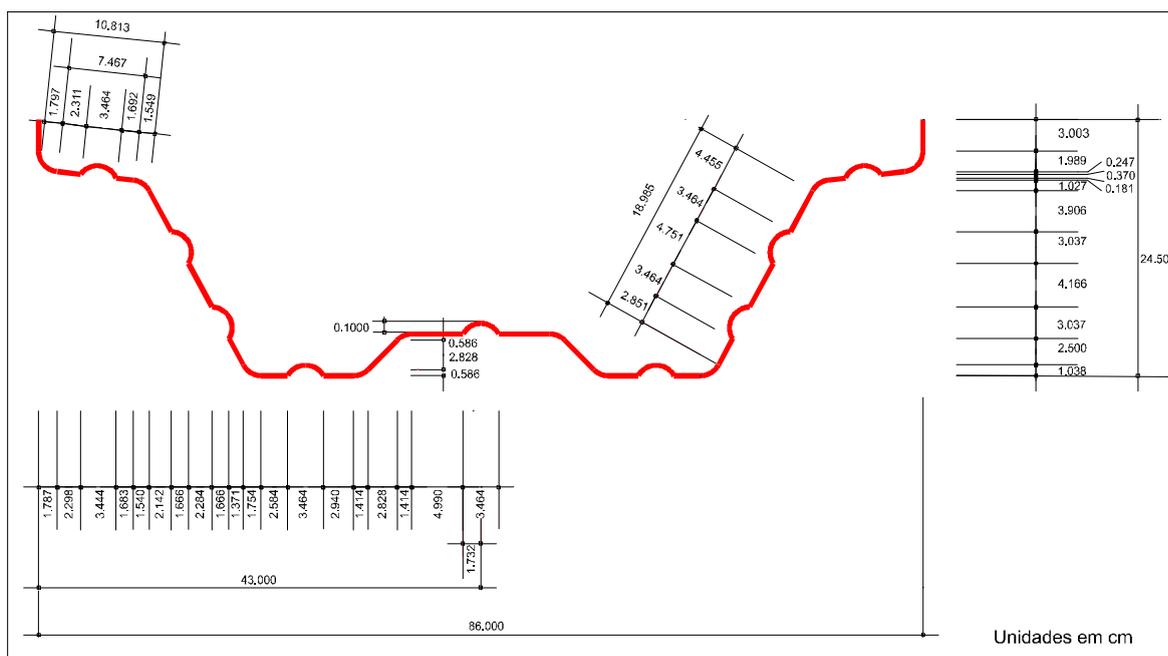


Figura 2.1 – Seção transversal da telha metálica autoportante de aço zincado (galvanizado).

A Figura 2.2 mostra a seção transversal da capa metálica utilizada como elemento de ligação entre as telhas.

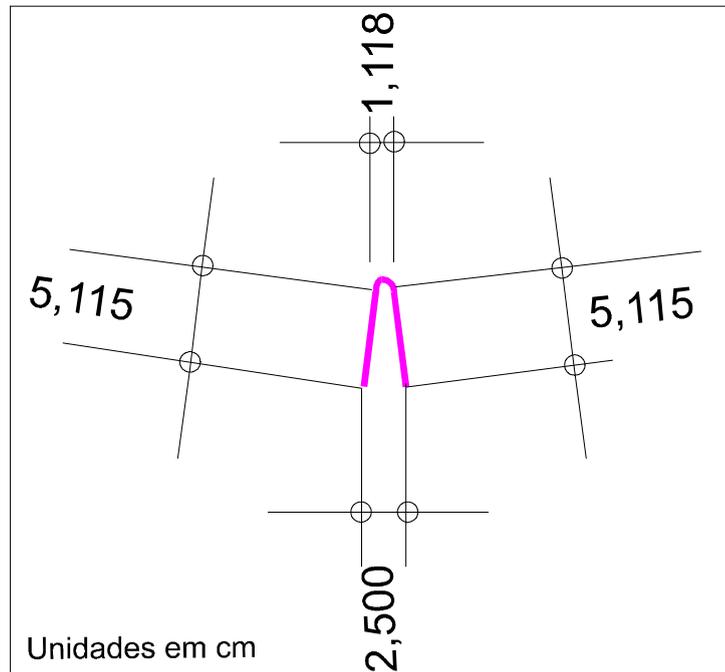


Figura 2.2 – Seção transversal da capa metálica de aço zincado (galvanizado).

A Figura 2.3 mostra parafuso com porca e arruelas utilizados na ligação entre a capa e as telhas do espécime.

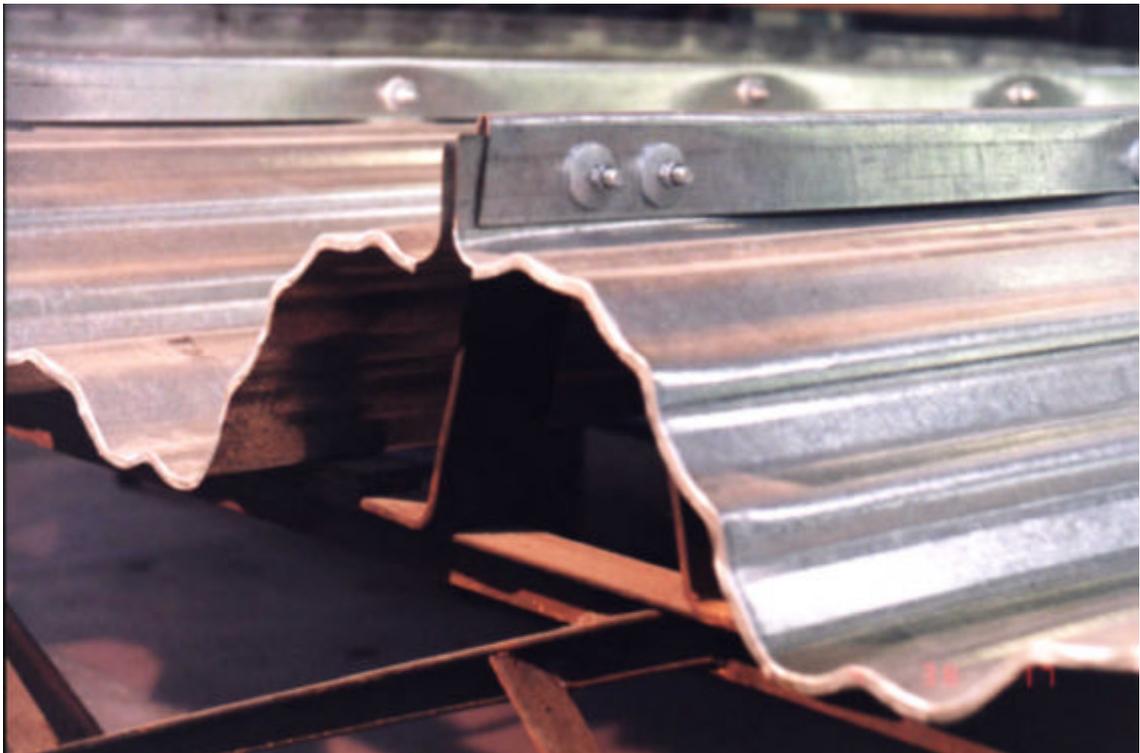


Figura 2.3 – Registra o parafuso com porca e arruelas na ligação entre a capa e as telhas do espécime, sobre o cavalete do apoio denominado sul.

## 2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO

Em duas oportunidades foi fornecido pelo fabricante das telhas e das capas, corpos-de-prova extraídos de bobinas de aço zincado (galvanizado), com espessuras variadas, para a determinação das propriedades mecânicas do material que estava sendo usado na produção das mesmas. Entretanto, cabe ressaltar que os corpos-de-prova não receberam indicativo de que a referida extração tenha sido realizada paralela ou perpendicular à direção de enrolamento da bobina de aço zincado.

Nesta investigação foram determinados o limite de escoamento, o limite de resistência à tração e o alongamento percentual do aço.

Os procedimentos adotados para os ensaios dos corpos-de-prova atenderam o que prescreve a norma NBR 6673/81 da ABNT e a norma A 370/95 da ASTM. A Figura 2.4 exibe o modelo do corpo-de-prova utilizado nos ensaios de tração. Os ensaios dos corpos-de-prova foram realizados no Laboratório de Metalurgia da Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC.

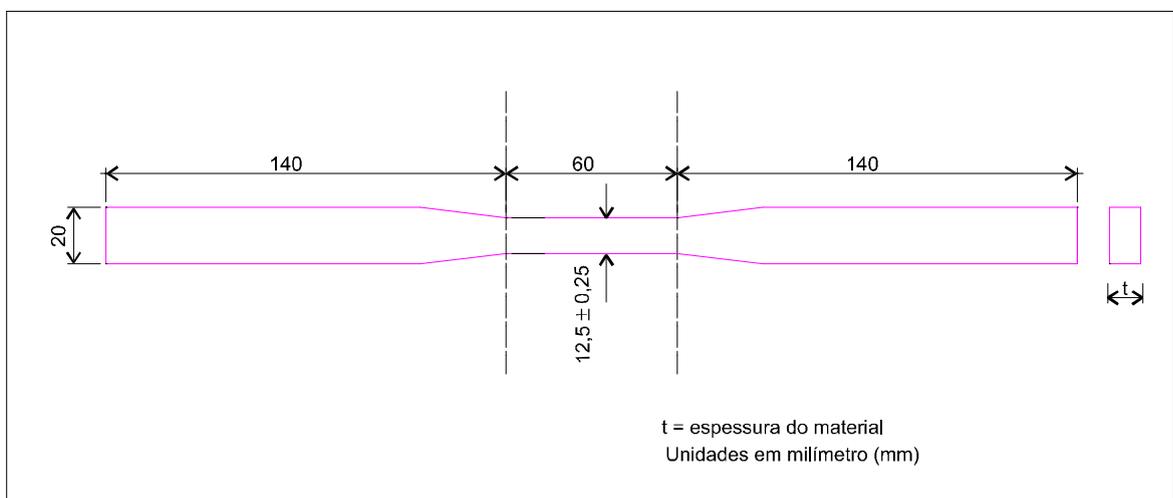


Figura 2.4- Modelo do corpo-de-prova utilizado na determinação das características mecânicas do aço.

Fonte: Norma A 370 - 95 da ASTM, 1996. p. 254.

Os Quadros 2.1 e 2.2 apresentam os resultados de treze corpos-de-prova de diversas espessuras ensaiados, respectivamente, em 13 de junho de 1996 e em 06 de maio de 1997.

Quadro 2.1 - Ensaio de tração em amostras preparadas pelo fabricante das telhas e das capas

Identificação corpo-de-prova	Dimensões ( mm )	Seção média ( mm <sup>2</sup> )	Limite de escoamento ( MPa )	Limite de resistência ( MPa )	Alongamento l <sub>0</sub> = 50 mm ( % )
1	13,7 x 1,8	24,66	-	342,1	16,0
2	12,4 x 1,8	22,32	-	364,8	15,6
3	11,5 x 1,9	21,85	-	341,2	12,4
4	11,1 x 1,2	13,32	-	235,6	9,2
5	11,2 x 0,8	8,96	-	328,4	3,0
6	12,0 x 1,0	12,00	-	294,3	-

Observações: 1) Não foi possível medir o alongamento, no corpo-de-prova 6, pois a ruptura ocorreu fora das marcas pré-determinadas.

2) O material ensaiado não apresentou escoamento definido, caracterizado por patamar.

3) Ensaio realizado conforme norma NBR 6673/81 da ABNT.

Quadro 2.2 - Ensaio de tração em amostras preparadas pelo fabricante das telhas e das capas

Identificação corpo-de-prova	Dimensões ( mm )	Seção média ( mm <sup>2</sup> )	Limite de escoamento ( 0,2% ) ( MPa )	Limite de resistência ( MPa )	Alongamento l <sub>0</sub> = 50 mm ( % )
7	13,3 x 1,22	16,23	293,1	362,6	22,2
8	13,9 x 1,26	17,51	296,8	350,1	21,4
9	13,9 x 1,25	17,38	293,5	349,9	27,0
10	14,4 x 1,25	18,00	288,8	354,2	24,0
11	14,5 x 0,84	12,18	298,0	342,3	18,6
12	14,2 x 0,84	11,93	308,4	333,0	25,4
13	12,6 x 0,84	10,94	296,6	336,2	25,0

Observação: Ensaio realizado conforme norma A 370/95 da ASTM.

Após a conclusão dos ensaios realizados com os espécimes de telhas metálicas autoportantes, com espessura nominal de 0,80 mm, foi extraído de cada um desses espécimes um corpo-de-prova com o objetivo de se determinar as propriedades mecânicas do aço. Os corpos-de-prova foram extraídos de amostras retiradas das telhas, na região correspondente ao apoio norte de cada espécime. A extração de cada um dos quatro corpos-de-prova foi paralela à direção longitudinal

da respectiva telha que corresponde à direção de enrolamento da bobina de aço zincada, conforme registra a Figura 2.5.



Figura 2.5 - Exibe, na telha central do espécime 3, região junto ao apoio norte, a amostra de onde foi extraído o corpo-de-prova de número 3.

No Quadro 2.3, que contém os resultados dos ensaios, os corpos-de-prova foram identificados da seguinte forma: E\*T\*-\* , onde "E\*", indica o número do espécime. Por exemplo, espécime 1, 2, 3 e 4, "T\*" indica a posição da telha no espécime, tal como TE, TC,TD, respectivamente, telha esquerda, telha central e telha direita, "-\*" corresponde ao número dado ao corpo-de-prova, tal como 1, 2, 3 e 4. Os ensaios dos quatro corpos-de-prova, com espessura nominal de 0,80 mm, atendeu o que prescreve a norma A 370/95 da ASTM e foram realizados no Laboratório de Metalurgia, na data de 27 de maio de 1998.

Quadro 2.3 - Ensaio de tração em amostras extraídas das telhas

Identificação corpo-de-prova	Dimensões ( mm )	Seção média ( mm <sup>2</sup> )	Limite de escoamento ( MPa )	Limite de resistência ( MPa )	Alongamento l <sub>0</sub> = 50 mm ( % )
E1TC-1	12,83 x 0,73	9,36	366,5	393,0	31,6
E2TD-2	12,53 x 0,74	9,27	345,9	396,8	20,2
E3TC-3	12,65 x 0,73	9,23	364,3	397,5	29,6
E4TE-4	12,40 x 0,73	9,05	368,5	393,4	32,8
Média	-	-	361,3	395,1	28,5

Observação: Ensaio realizado conforme norma A 370/95 da ASTM.

O material ensaiado segundo as informações contida no selo, que acompanha a embalagem da bobina, fornecido pela Companhia Siderúrgica Nacional - CSN, é classificado como do grau ZC - comum, conforme item 4.2, letra a, da Norma NBR 7008 da ABNT (1994). Ressalva ainda no mesmo item da referida norma, notas: letra a (p.2), que o material do grau ZC é indicado para uso gerais, principalmente uso plano, dobramentos e leves conformações. Para o material do grau ZC a NBR 7008/94 não fixa requisitos de propriedades mecânicas do aço-base, porém fixa requisitos de composição química. A Figura 2.6 ilustra o tipo de selo fornecido pela Companhia Siderúrgica Nacional que contempla os principais dados técnicos do material classificado como do grau ZC. A Figura 2.7 mostra os corpos-de-prova, adequadamente identificados, após o encerramento dos ensaios de tração cujos dados e resultados estão registrados no Quadro 2.3.

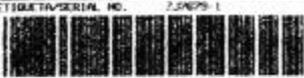
 <b>COMPANHIA SIDERURGICA NACIONAL</b>		<h1>ZJ7679-1</h1>		12-ESP./THICK (mm) <b>00.95</b>	LARG./WIDTH (mm) <b>1200</b>	COMP./LENGTH (m) <b>00000</b>
1-NO. ETIQUETA/SERIAL NO. (CSN) 		10-DADOS ESPECIAIS PRODUCT: <b>BZ NORMAL</b> BAZ. TONEL.: <b>QP</b> ESTAB. USG.: <b>B4</b>		13-SPECIAL DATA PRODUCT: <b>HDG SPANGLED</b> QUALITY: <b>PRIME</b> FINISHING/COATING: <b>CHTR UNROLLED COAT. B</b> SPECIFICATION: <b>NBR 7008 ZC</b>		
2-COD. PRODUTO/PRODUCT IDENT. <b>7320218007304</b>	7-P. BRG (kg) / GROSS WT (lb) <b>07330 / 16160</b>	3-IND. ENG. / FEM/CSN (IND.) NO. <b>020975/01</b>	8-P. LÍQ (kg) / NET WT (lb) <b>07260 / 16005</b>	11-PORTA/PORT *****		
4-NO. CORREDA/HEAT PROCESS NO. <b>8A0508</b>	5-PEÇAS/PIECES 	6-CL. CLIENTE/CUSTOMER <b>FEMEPE PESCADOS</b>		12-ESP./THICK (mm) <b>0.037</b>		
9-OUTRAS INFORMAÇÕES / OTHER INFORMATION *****				<b>C</b>		

Figura 2.6 – Mostra o tipo de selo fornecido pela CSN com as especificações técnicas do material.

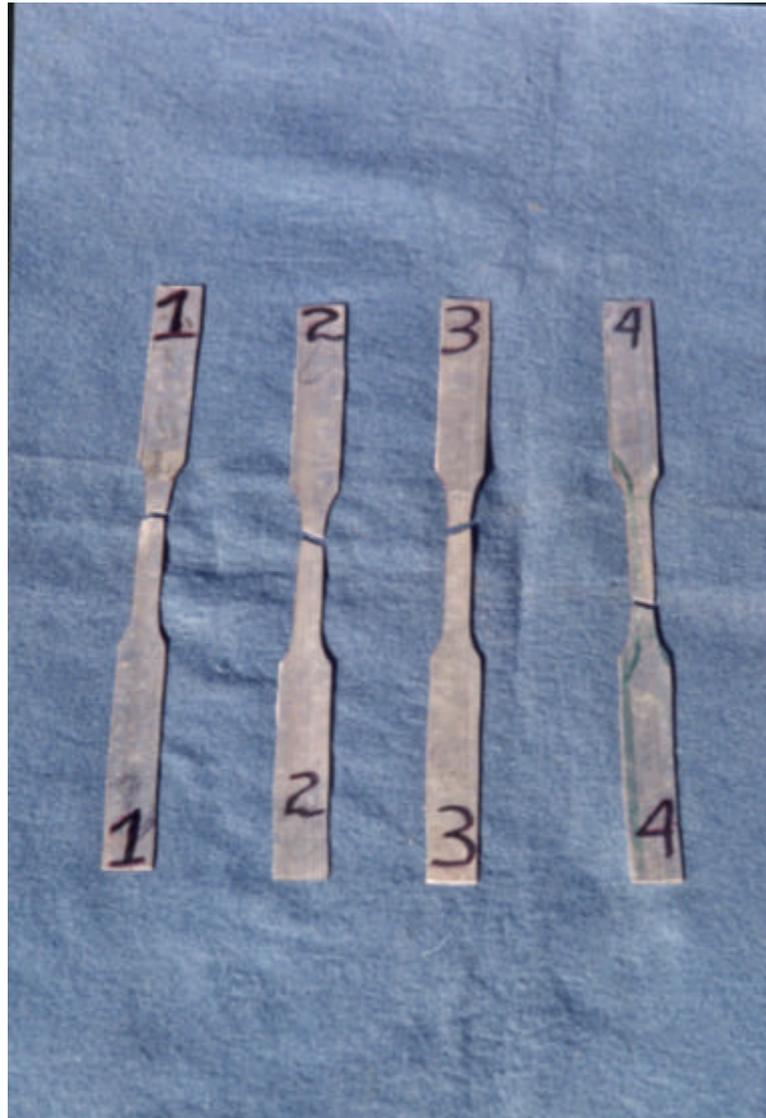


Figura 2.7 - Registra os quatro corpos-de-prova, extraídos das telhas metálicas autoportantes, após a realização dos ensaios de tração.

Considerando os resultados das propriedades mecânicas do aço, obtidas nos ensaios de tração dos corpos-de-prova fornecidos pelo fabricante, verificamos que estes apresentam uma grande variabilidade. Entretanto, tomando como referência o menor valor do limite de escoamento, 288,8 MPa (corpo-de-prova 10 - Quadro 2.2) e como menor valor do limite de resistência o valor do corpo-de-prova 5, 328,4 MPa (Quadro 2.1), desprezados os resultados dos corpos-de-prova 4 e 6 (Quadro 2.1), que apresentaram valores bem inferiores a média, cabe acrescentar que o material virgem utilizado na fabricação das telhas metálicas autoportantes, apesar de ser classificado como do grau ZC, qualidade comercial, pela Companhia Siderúrgica Nacional - CSN, apresenta um comportamento que pode ser considerado semelhante ao do aço ZAR 230, qualidade estrutural, com

exigências mínimas, segundo a NBR 10735, limite de escoamento de 230 MPa e limite de resistência de 310 MPa. Cabe ressaltar que todos os corpos-de-prova do Quadro 2.1 apresentaram alongamento inferior ao valor mínimo recomendado para o ZAR 230. Esta observação pode ser estendida aos corpos-de-prova 8 e 11 do Quadro 2.2 ressaltando porém que neste caso os valores obtidos estão bem mais próximo do valor mínimo do ZAR 230 (22%). A Figura 2.8 permite a visualização dos resultados transcritos nos Quadros 2.1 e 2.2 quanto ao limite de escoamento e de resistência.

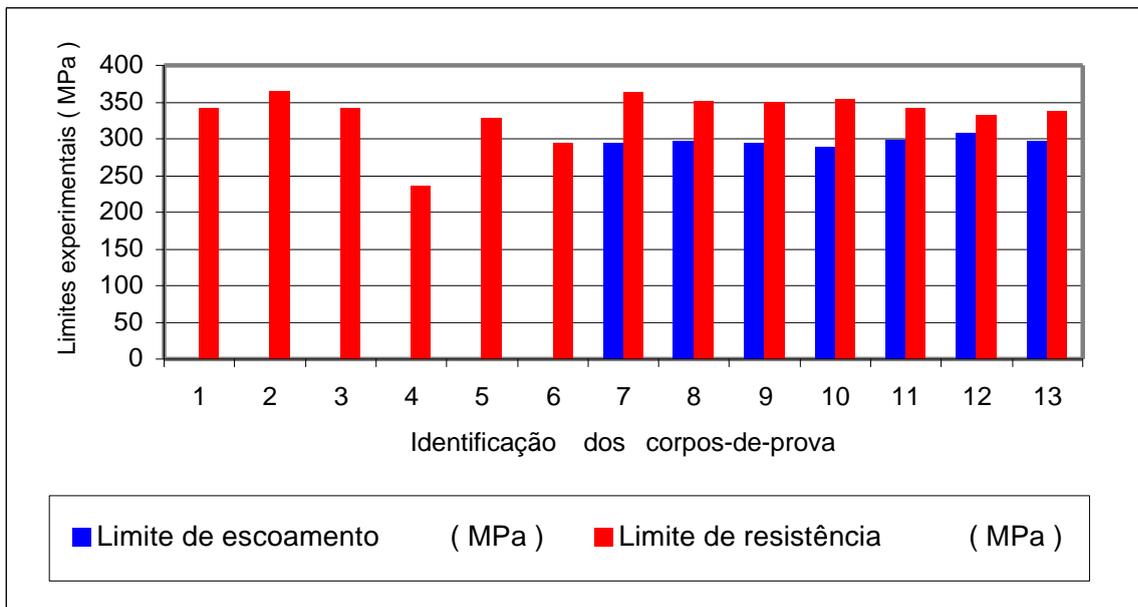


Figura 2.8 – Registra os valores experimentais das propriedades mecânicas de 13 (treze) corpos-de-prova, fornecidas pelo fabricante das telhas metálicas autoportantes.

Os resultados dos ensaios de tração dos corpos-de-prova extraídos das telhas metálicas autoportantes, que formaram os espécimes submetidos aos ensaios de flexão, mostram que o menor valor do limite de escoamento, 345,9 MPa (corpo-de-prova E2TD-2 - Quadro 2.3) e o menor valor do limite de resistência, 393 MPa (corpo-de-prova E1TC1) são bem superiores aos valores mínimos recomendados pela NBR 10735 para o aço ZAR 230. Os valores do alongamento, exceto para o corpo-de-prova E2TD-2, atendem o valor mínimo do ZAR 230. A Figura 2.9 mostra o comportamento dos resultados dos corpos-de-prova extraídos das telhas metálicas autoportantes quanto ao limite de escoamento e de resistência.

A observação dos resultados relativos às propriedades mecânicas do aço (limite de escoamento, limite de resistência e alongamento), mostra que os

corpos-de-prova extraídos das telhas (Quadro 2.3) registraram valores maiores do que os os corpos-de-prova que foram extraídos diretamente da bobina de aço (Quadros 2.1 e 2.2). O acréscimo observado entre o maior valor do limite de escoamento do aço virgem, 308,4 MPa (corpo-de-prova 12 - Quadro 2.2) e o menor valor do limite de escoamento das amostras extraídas das telhas, 345,9 MPa (corpo-de-prova E2TD-2 - Quadro 2.3) é da ordem de 12 %. A contribuição da formação a frio nas propriedades mecânicas do aço é apontada por Winter e Uribe (1969) e também por Yu (1991, p.47) que se baseia nos resultados das investigações conduzidas por Winter, Karren, Chajes, Britvec e Uribe.

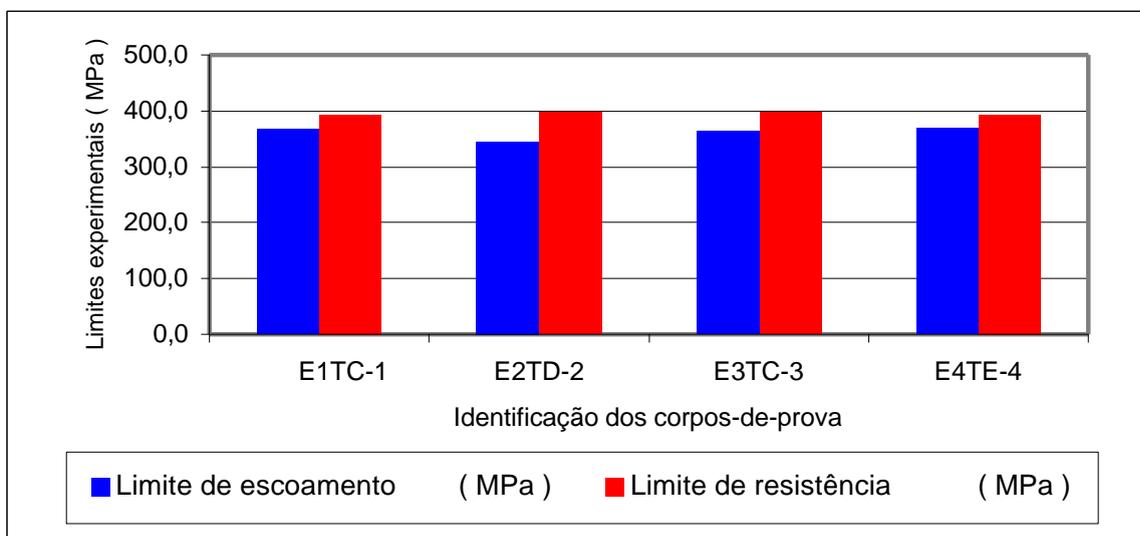


Figura 2.9 – Mostra os resultados experimentais das propriedade mecânicas de 4 (quatro) corpos-de-prova extraídos das telhas utilizadas nos espécimes ensaiados.

Complementando a análise do material utilizado na produção das telhas metálicas autoportantes e das capas metálicas foram realizadas medições relativas a espessura da camada de revestimento de zinco (galvanização). Na face externa das telhas foi registrado uma espessura média da camada de revestimento de zinco de 37,1 microns e para as capas uma espessura média da camada de revestimento de zinco de 26,9 microns. Para esses valores, considerando as especificações recomendadas pela Norma NBR 7008 e a correlação existente no catálogo construção civil, parte referente ao aço zincado por imersão a quente, da Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, as telhas e as capas podem ser denominadas, quanto a espessura da camada de revestimento de zinco, respectivamente, como do tipo B e A.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 PROGRAMAÇÃO DOS ENSAIOS

Na elaboração da programação ficou definida a realização de 16 (dezesseis) ensaios de flexão com o objetivo de avaliar, nos 4 (quatro) espécimes de telhas, a contribuição do elemento capa utilizado na ligação das referidas telhas e a resistência última dos espécimes.

Desta forma cada espécime foi submetido a quatro condições de ligação entre as telhas, designadas pelos números 1, 2, 3 e 4, as quais passamos a descrever:

- 1- espécime de telhas sem a capa - linha de parafusos da ligação com espaçamento de 100 cm.
- 2- espécime de telhas com a capa - linha de parafusos da ligação com espaçamento de 100 cm.
- 3- espécime de telhas com a capa e esmagamento da ligação capa-telha na posição de cada parafuso – linha de parafusos da ligação com espaçamento de 100 cm.
- 4- espécime de telhas com a capa – linha de parafusos da ligação com espaçamento de 50 cm.

No Quadro 3.1 estão registrados a data e a ordem de realização dos ensaios de flexão bem como a identificação do espécime e da respectiva condição de ligação das telhas. Para caracterizar a identificação do espécime e a condição de ligação das telhas foi adotado o seguinte procedimento: E\*-\* , sendo que “E\*” indica o número do espécime, por exemplo, espécime 1, 2, 3 e 4, enquanto que “-\*” designa uma das quatro condições de ligação utilizadas na união das telhas, ou seja, 1, 2, 3 e 4.

Quadro 3.1 – Identificação dos ensaios de flexão

Data do ensaio	Número do ensaio	Identificação do espécime e da condição de ligação das telhas
24/06/97	1	E1-1
14/08/97	2	E2-2
16/12/97	3	E3-3
19/12/97	4	E4-4
22/12/97	5	E4-1
06/01/98	6	E1-2
07/01/98	7	E2-3
08/01/98	8	E3-4
09/01/98	9	E3-1
13/01/98	10	E4-2
14/01/98	11	E1-3
19/01/98	12	E2-4
16/02/98	13	E2-1
17/02/98	14	E3-2
18/02/98	15	E4-3
19/02/98	16	E1-4

### 3.2 MONTAGEM DO ESPÉCIME DE TELHAS

Considerando o espaço físico e os recursos disponíveis no Laboratório de Edificações da Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC, foram definidos os procedimentos para a realização da montagem do espécime de telhas metálicas autoportantes. Cabe inicialmente registrar que a estrutura metálica que constitui o pórtico de reação do laboratório dispõe de altura de 3,63 m, largura de 4,56 m e tem capacidade para realização de ensaios de compressão para carga de até 1200 kN (120 toneladas). Diante das limitações impostas pela largura do pórtico de reação ficou definido que os espécimes a serem montados para a realização dos ensaios teriam no máximo cinco telhas.

A idéia inicial, em função do número de telhas disponíveis, era de formar quatro espécimes constituídos de cinco telhas cada um. Porém, a necessidade de realizar pelo menos um ensaio preliminar com o objetivo de avaliar a forma de carregamento, a resposta da instrumentação e o comportamento do espécime de telhas quanto a carga de ruptura, determinaram modificações na formação dos referidos espécimes. Assim ficou estabelecido que todos os espécimes seriam formados com cinco telhas, entretanto as telhas de extremidade (telhas identificadas como 1 e 5), utilizadas nos dois ensaios do espécime preliminar, seriam permanentes para os quatro espécimes previstos no programa de ensaios,

ocorrendo, portanto, somente a substituição das três telhas internas. O procedimento adotado para a formação dos espécimes de telhas atendia plenamente o tipo de carregamento proposto para os ensaios, duas linhas de carga uniforme nos terços do vão, aplicadas transversalmente sobre as três telhas internas (telhas denominadas como esquerda, central e direita) de cada espécime.

Desta forma foi possível constituir um espécime preliminar com cinco telhas e mais quatro espécimes de três telhas cada um, sendo que nestes foram adicionadas, por ocasião dos ensaios, as telhas de extremidade (telhas 1 e 5). A Figura 3.1 ilustra a formação dos quatro espécimes utilizados neste estudo.



Figura 3.1 - Mostra a formação dos quatro espécimes de telhas metálicas autoportantes. Observa-se, no primeiro plano da figura, as três telhas internas do espécime 3, no plano central, a esquerda, as telhas do espécime 2 e, a direita, as telhas do espécime 4; no último plano, sob o pórtico, o espécime 1 constituído de três telhas internas e das duas telhas de extremidade utilizadas na formação de todos os espécimes .

Ainda restaram três telhas reservas que poderiam vir a ser utilizadas durante o desenvolvimento do programa de ensaios. Cabe ressaltar que apenas uma dessas telhas, identificada como telha 2S, foi usada em substituição a telha 2, no espécime preliminar, que rompeu quando da realização do primeiro ensaio de avaliação do sistema (forma de carregamento, pontos da instrumentação, carga de ruptura e tipo de ruptura).

A presença das telhas de extremidade (espécime com 5 telhas) teve como objetivo minimizar movimentos laterais (transversais) das telhas do espécime quando submetidas ao carregamento. A necessidade de se proceder um travamento do espécime de telhas assim como estabelecer o apoio para a telha de extremidade foi apontado por Jorgenson e Chern (1973) quando realizaram ensaios em espécimes de 3 e 2 telhas metálicas autoportantes (painéis retos e curvos), com o objetivo de minimizar esses movimentos laterais visto que, tanto na cobertura como no fechamento lateral de uma edificação, esse travamento ocorre naturalmente pela colocação lado a lado das referidas telhas.

A opção de colocar telhas de extremidade, formando espécimes de 5 telhas e limitando a aplicação da linha de carga uniforme somente às 3 telhas internas, também considera os estudos realizados por Jorgenson e Chowdhury (1982), ensaios com número de telhas (painéis retos e curvos) variando de um a três, quanto a necessidade de se ter de considerar o efeito da telha adjacente existente na edificação e que não faz parte do modelo adotado para o ensaio.

Jorgenson e Chowdhury realizaram diversos ensaios para analisar a influência da telha adjacente. Na maioria desses ensaios, nas telhas de extremidade, para determinadas condições de carregamento, eles introduziram enrijecedores na borda externa, com dimensões pré-definidas, na linha de parafusos. O objetivo desses enrijecedores era estabelecer as mesmas condições de apoio proporcionada pelo painel adjacente, ao longo do comprimento da telha, porém, sem adicionar a força de compressão decorrente da presença do painel existente na edificação. Além disso, Jorgenson e Chowdhury também utilizaram, junto as duas linhas de cargas uniformes (terços do vão do espécime), chapas retas de aço ou cantoneiras metálicas de abas iguais, com o objetivo de evitar o alargamento da seção transversal da telha, na linha de parafusos, durante a realização dos ensaios. Constataram ainda que essas cargas, no trecho onde eram

aplicadas , além de proporcionarem um aumento na largura das telhas, em suas bordas laterais, acarretavam uma redução na altura de cada telha.

Neste trabalho, na execução da montagem e da desmontagem de cada espécime de telhas foi adotado o seguinte procedimento operacional: a montagem dos espécimes se dava a partir da telha 1 (telha de extremidade). Prosseguia com a colocação da telha direita (TD), telha central (TC), telha esquerda (TE) e o fechamento da montagem de cada espécime era realizado com a telha 5 (telha de extremidade). Imediatamente, após a colocação de cada uma das telhas internas do espécime, era realizada a instrumentação dos 5 pontos de controle de cada telha, sendo 3 pontos ao longo do eixo longitudinal da telha (metade do vão e nos terços do vão do espécime) e 2 pontos nas abas retas da telha (metade do vão). A próxima etapa correspondia a forma de ligação das telhas. Nesta etapa, em cada espécime, era executada uma das quatro condições de ligação das telhas apresentadas no item 3.1, conforme seqüência registrada no Quadro 3.1.

As Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 mostram os elementos capa utilizados em cada espécime para as condições de ligação das telhas, designadas como 2, 3 e 4.

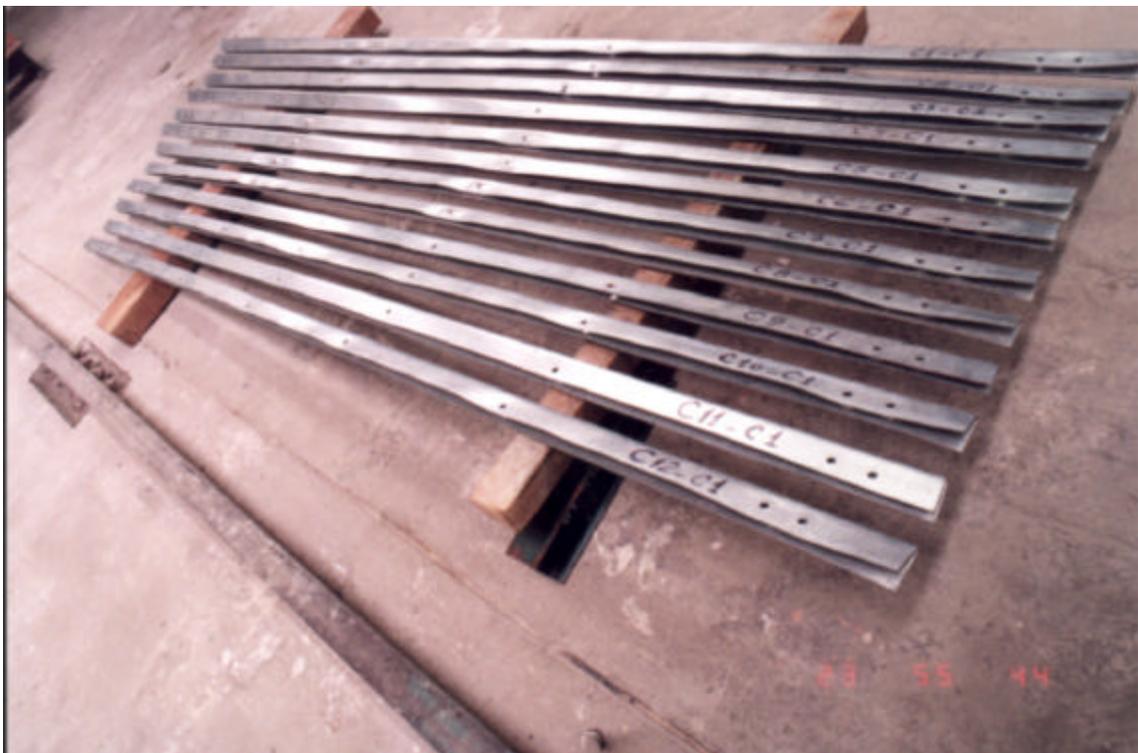


Figura 3.2 – Mostra as 12 capas utilizadas no espécime 1, para as condições de ligação das telhas, designadas como 2, 3 e 4.



Figura 3.3 - Registra as 12 capas utilizadas no espécime 2, para as condições de ligação das telhas, designadas como 2, 3 e 4.



Figura 3.4 - Identifica as 12 capas utilizadas no espécime 3, para as condições de ligação das telhas, designadas como 2, 3 e 4.



Figura 3.5 - Mostra as 12 capas utilizadas no espécime 4, para as condições de ligação das telhas, designadas como 2, 3 e 4.

O Quadro 3.1 mostra que, além da alternância na forma de ligação das telhas, também ocorria a alternância do espécime de telhas. Quanto a alternância do espécime de telhas, existe uma exceção, observada em três oportunidades no Quadro 3.1, quando da passagem da forma de ligação das telhas designada como 4 para a designada como 1, neste caso, o espécime de telhas permanecia na posição de ensaio.

A ligação das telhas sem o elemento capa ou das telhas e o elemento capa, em cada espécime, era feita com parafuso, arruelas e porca. O espaçamento longitudinal entre os parafusos era de 100 cm para a condição de ligação das telhas designadas como 1, 2 e 3. Para a condição de ligação das telhas designada como 4 o espaçamento entre os parafusos foi fixado em 50 cm. O esmagamento da ligação capa-telha, previsto na condição de ligação das telhas designada como 3, era executado através de dispositivo, ilustrado na Figura 3.6, sendo sempre aplicada uma tensão de  $100 \text{ kgf/cm}^2$  através do conjunto bomba hidráulica manual com manômetro e cilindro hidráulico (macaco). As Figuras 3.7 e 3.8 mostram aspectos do esmagamento realizado na condição de ligação das telhas designada como 3.



Figura 3.6 - Registra o dispositivo utilizado para executar o esmagamento da ligação capa-telha, previsto na condição de ligação das telhas designadas pelo número 3.



Figura 3.7 - Detalhe do esmagamento final, observado na posição do furo do parafuso, da ligação capa-telha.

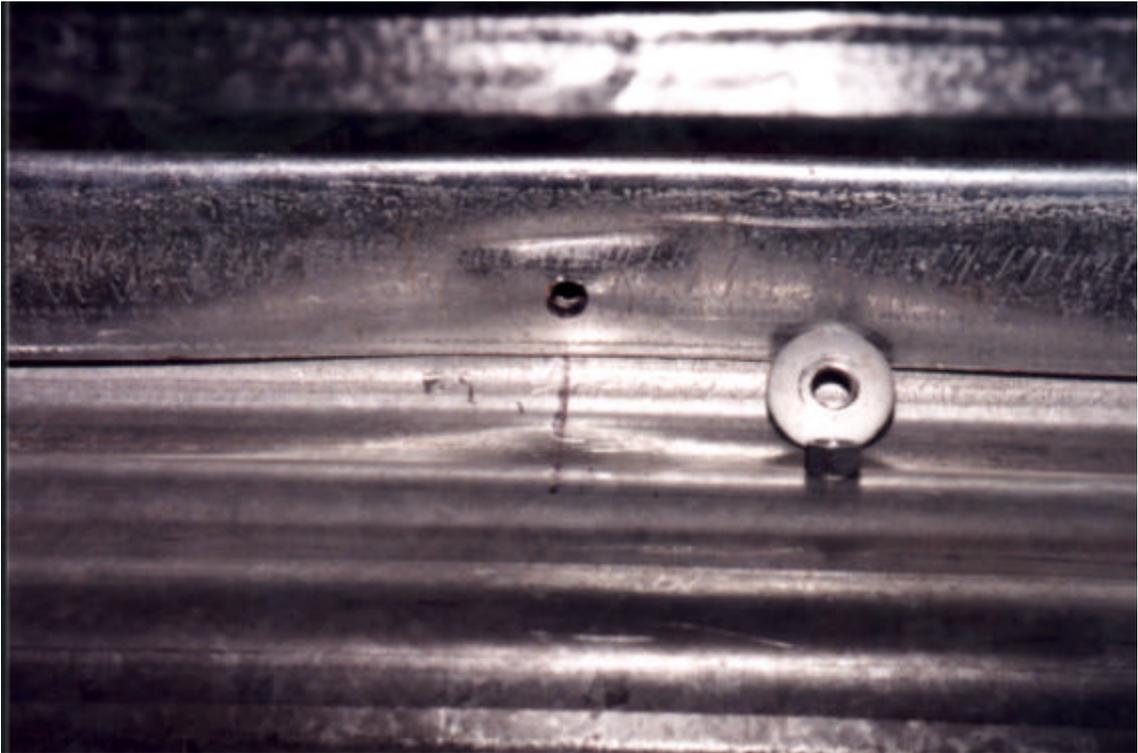


Figura 3.8 - Mostra o resultado do esmagamento na face oposta, na posição do furo, da ligação capatelha.

Finalmente a última etapa correspondia ao aperto dos parafusos, sendo estes feitos com ferramentas manuais. Cabe acrescentar que nos apoios (denominados norte e sul) de cada espécime, mais precisamente no cavalete de apoio, a ligação entre as telhas era feita com dois parafusos colocados paralelamente e espaçados de 5 cm. Desta forma o espécime estava preparado para receber o carregamento.

Após o encerramento de cada ensaio começava a etapa de desmontagem do espécime. Inicialmente se procedia o desaperto e a retirada dos parafusos. Imediatamente eram retiradas as capas. Cabe ressaltar que, na condição de ligação das telhas, designada como 1 (ensaios E1-1, E2-1, E3-1 e E4-1), não foi realizado este procedimento pois os espécimes não continham a presença do elemento capa. A desmontagem dos espécimes ocorria a partir da telha 5 (telha de extremidade). A telha 5 era retirada para permitir o acesso a telha esquerda e, de forma sucessiva, a telha central e telha direita. Antes de se proceder a retirada de cada uma das telhas era necessário desativar individualmente cada um dos pontos da instrumentação. Concluída esta etapa, estava encerrada a desmontagem do espécime de telhas.

### 3.3 INSTRUMENTAÇÃO DO ESPÉCIME DE TELHAS

Neste estudo foram inicialmente definidas nove posições para a instalação dos pontos de controle dos deslocamentos verticais nas três telhas internas (denominadas como esquerda, central e direita) de cada espécime.

Cabe acrescentar que a adoção da denominação telha direita e telha esquerda considerou o espécime observado a partir do apoio identificado como norte. Estes 9 (nove) pontos foram todos localizados na região tracionada do perfil da telha, considerando o espécime submetido a esforços de flexão, durante a aplicação da carga, por ocasião da realização dos ensaios.

Assim sendo cada uma das três telhas internas, de cada um dos espécimes, foi instrumentada em três pontos ao longo de seu eixo longitudinal, mais precisamente, no centro do vão e nos terços do vão. Desta forma, em cada espécime de telhas, as medições foram realizadas na seção transversal correspondente à metade do vão e nas seções transversais referentes aos terços do vão.

O procedimento utilizado por Jorgenson e Chern (1973), para o registro de deslocamentos verticais, se restringe a três defletômetros mecânicos (relógios comparadores) colocados na metade e nos terços do comprimento do vão do espécime. Jorgenson e Chowdhury (1982) utilizaram, para o registro de deslocamentos verticais, dois defletômetros mecânicos (relógios comparadores) na metade do vão do espécime.

Após a realização do primeiro ensaio preliminar, na data de 30 de novembro de 1995, com o objetivo de aferir o comportamento da instrumentação bem como a forma de carregamento e a resposta do espécime de telhas quanto à carga de ruptura e tipo de ruptura, se observou a necessidade de acrescentar mais seis posições para o controle dos deslocamentos verticais, dois pontos em cada uma das três telhas internas (esquerda, central e direita) de cada espécime, na seção transversal correspondente à metade do vão. Estes 6 (seis) novos pontos foram todos localizados na região comprimida do perfil da telha, identificada como abas retas, considerando o espécime submetido a esforços de flexão, durante a aplicação da carga, por ocasião da realização dos ensaios.

Após a instalação desses novos pontos, os espécimes de telhas passaram a dispor de quinze pontos instrumentados para registro das medições, os

quais foram convenientemente testados quando da realização do segundo ensaio preliminar, na data de 03 de julho de 1996. Na Figura 3.9 estão indicados todos os pontos da instrumentação adotada para o controle dos deslocamentos verticais em cada espécime de telhas.

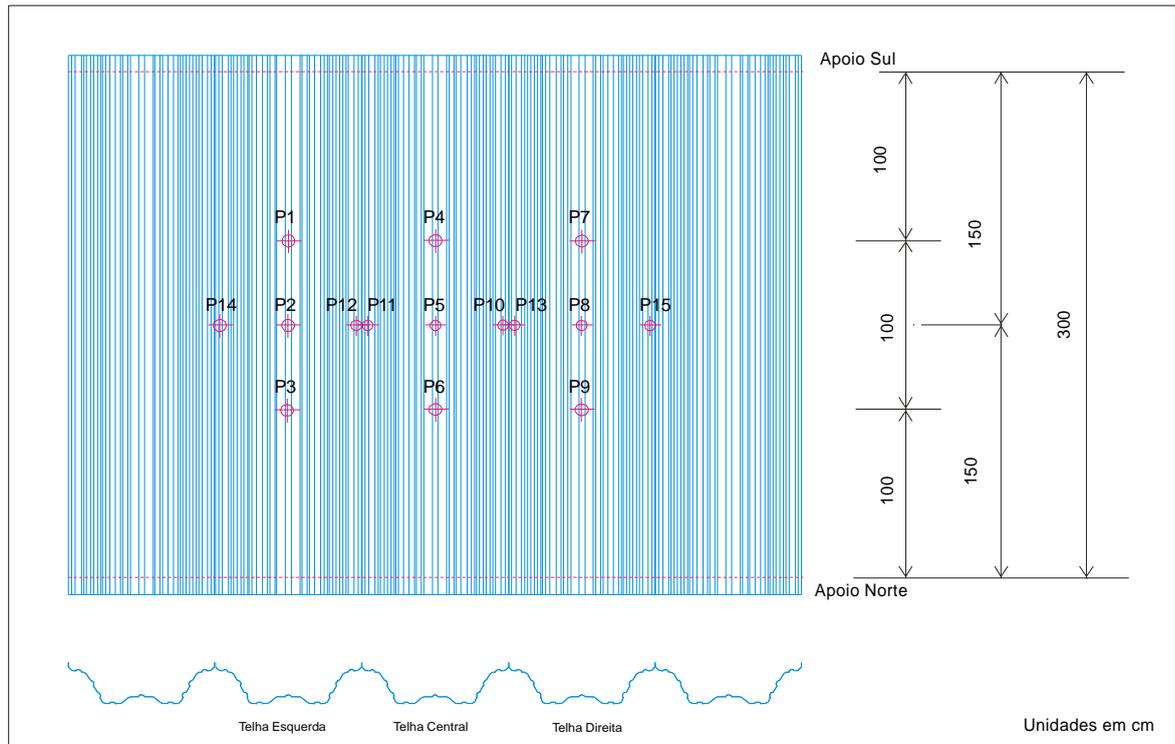


Figura 3.9 - Mostra, na vista superior do espécime de telhas, a posição dos quinze pontos de controle utilizados nas medições dos deslocamentos verticais.

As Figuras 3.10, 3.11 e 3.12 ilustram a localização dos pontos de controle, para as medições dos deslocamentos verticais, nas seções transversais correspondentes à metade do vão e aos terços do comprimento do vão de cada espécime de telhas.

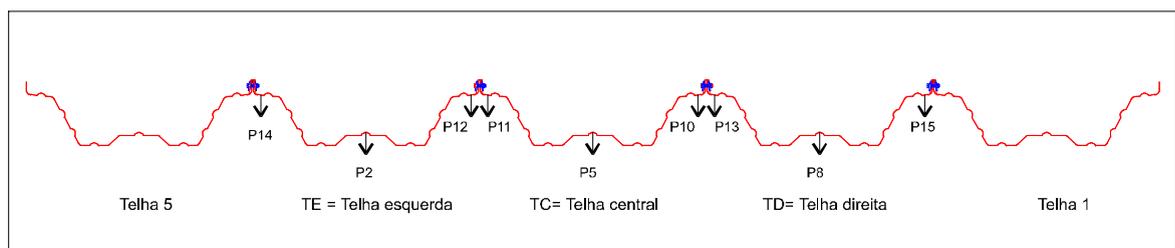


Figura 3.10 - Indica a posição dos pontos de medições dos deslocamentos verticais, na seção transversal correspondente à metade do vão do espécime de telhas.

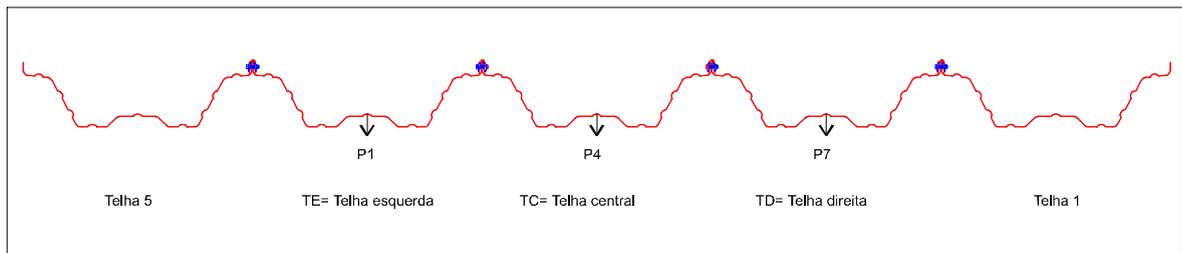


Figura 3.11 - Mostra a posição dos pontos de medições dos deslocamentos verticais, na seção transversal correspondente ao terço do vão referido ao apoio sul do espécime de telhas.

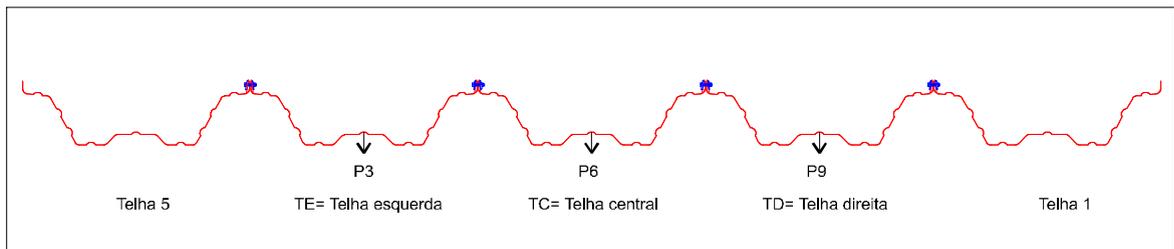


Figura 3.12 - Registra a posição dos pontos de medições dos deslocamentos verticais, na seção transversal correspondente ao terço do vão referido ao apoio norte do espécime de telhas.

As leituras de registro das medições dos deslocamentos verticais, nos quinze pontos de cada espécime de telhas, foram obtidas através de um Nível de Precisão Wild N3. A distância da posição do Nível de Precisão Wild N3 em relação aos quinze pontos de leitura de cada espécime variava entre 3,5 m e 5 m.

Cabe ressaltar que não havia disponibilidade de relógios comparadores (defletômetros) em número suficiente para instalação nos quinze pontos de observação, considerando deslocamentos verticais da ordem de 30 mm.

Considerando a altura dos apoios de cada espécime (68 cm) e uma forma segura de registrar os dados provenientes das leituras desses pontos, foi montado um dispositivo (modelos semelhantes empregados em ensaios realizados no laboratório de edificações da CIENTEC) para permitir a transferência das leituras, a partir da face inferior das telhas, para uma posição contígua ao espécime de telhas, de forma a garantir uma condição favorável para a utilização do nível de precisão. Convém acrescentar que através da face superior das telhas a realização de medições, na linha dos terços do vão, estavam impedidas, visto que a carga seria aplicada exatamente sobre as referidas linhas em cada um dos espécimes. Em função do exposto, foram feitos furos, com o emprego de furadeira elétrica manual,

em cada ponto de medida, nas telhas. A seguir, nos parafusos, antes de introduzi-los em cada um desses furos, se colocaram duas porcas. A primeira porca foi utilizada como enchimento do corpo do parafuso. A segunda porca foi empregada para fixar a extremidade do arame de aço galvanizado,  $\varnothing$  0,45 mm, que após passar pelo eixo do parafuso saía lateralmente na metade do seu corpo, devido a um furo que possuía o formato da letra “L”. Prosseguindo, em cada um desses furos era introduzido, pela face inferior da telha, a parte que sobrava do corpo do parafuso, sendo sua fixação realizada, pela face superior da telha, através do emprego de uma terceira porca e aperto com ferramenta manual. Na face inferior da telha, a partir do parafuso, o arame galvanizado era conduzido através de um sistema constituído de três roldanas metálicas até ser fixado, na outra extremidade, ao eixo de uma pequena placa metálica (dimensões 50 mm x 250 mm - espessura 5 mm e massa variável entre 475 e 520 g). A massa da placa em apreço determinava o tensionamento do arame, necessário para estabelecer o funcionamento adequado do referido dispositivo. Em cada uma das placas foi fixada com cola e parafuso uma fina régua metálica, com campo de medida de 150 mm, utilizada nas leituras das medições, realizadas com o nível de precisão, em cada um dos pontos do espécime. Cabe registrar que foram utilizados arames de aço galvanizado com comprimento da ordem de 5,7 m, 6,2 m e 6,7 m, respectivamente, terço do vão referido ao apoio norte (pontos P3, P6 e P9), metade do vão (pontos P2, P5, P8, P14, P12, P11, P10, P13, P15) e terço do vão referido ao apoio sul (pontos P1, P4, P7). As Figuras 3.13 e 3.14 ilustram o dispositivo (sistema plano-altimétrico) utilizado na obtenção das medições.

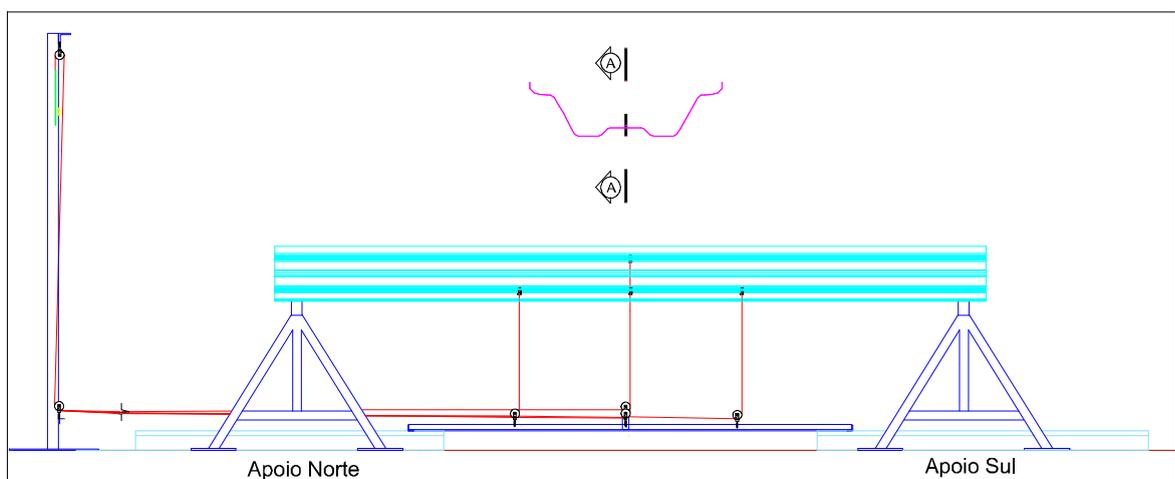


Figura 3.13 - Registra, a partir do espécime de telhas, o dispositivo (sistema plano-altimétrico) utilizado para a realização das medições.

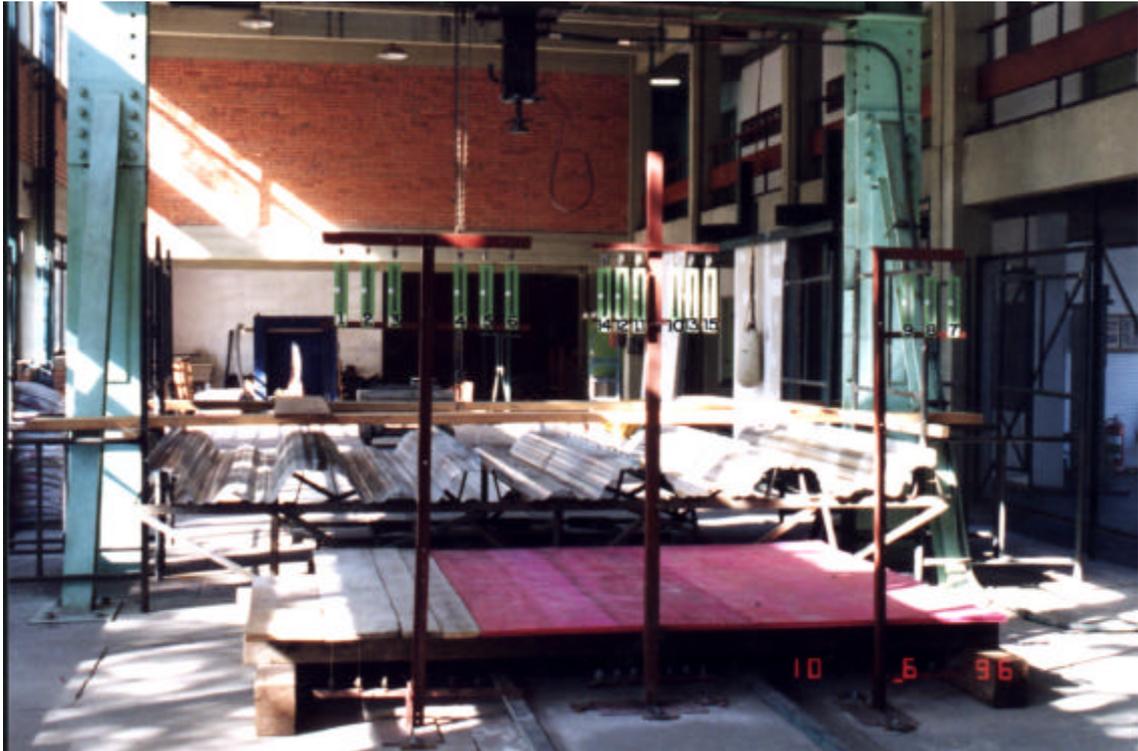


Figura 3.14 - Mostra a identificação dos quinze pontos de leituras das medições, posicionados antes do apoio norte do espécime de telhas.

### 3.4 FORMA DE CARREGAMENTO DO ESPÉCIME DE TELHAS

Neste estudo adotamos o mesmo modelo utilizado por Jorgenson e Chern (1973), Jorgenson e Chowdhury (1982), Dannemann (1990), Landolfo e Mazzolani (1994) e Wu, Yu e LaBoube (1996) quanto a forma de carregamento do espécime de telhas, ou seja duas linhas de cargas aplicadas transversalmente nos terços do vão. Cabe acrescentar que Jorgenson e Chowdhury realizaram testes para cargas uniformes, linha de cargas e cargas concentradas. Apesar de terem considerado ideal o teste com cargas uniformes (usaram uma bolsa de ar entre o conjunto de telhas e o dispositivo de reação) porque apresentam melhor semelhança com as cargas de vento e neve aplicadas sobre a edificação, ressaltam que a pressão de ar, necessária para provocar a ruptura em vãos curtos (366 cm), é em torno de 10 vezes aquelas para as quais a edificação realmente seria submetida pela ação do vento ou da neve. Também constataram que essas altas pressões de ar alteram significativamente a seção da telha (painel), ocasionando uma redução em sua resistência a flexão.

Os espécimes de telhas foram montados sobre dois apoios simples, não deslizantes, para um vão de 300 cm. Os mesmos dispositivos metálicos que são empregados pelo fabricante no apoio das telhas na cobertura de uma edificação foram fixados com solda sobre cavaletes metálicos treliçados constituídos por perfis laminados do tipo cantoneira de abas iguais. Os apoios de cada uma das extremidade do cavalete eram constituídos por duas bases metálicas quadradas de chapa grossa, com quatro furos. O montante central do cavalete também estava diretamente apoiado sobre o piso do laboratório. As duas bases de cada extremidade do cavalete foram fixadas no piso do laboratório com quatro parafusos do tipo “parabolt”. A Figura 3.15 identifica o cavalete utilizado como apoio em ambas as extremidades do espécime de telhas.



Figura 3.15 - Mostra o cavalete de apoio utilizado em ambas as extremidades do espécime de telhas.

O carregamento do espécime de telhas foi feito através de duas linha de carga aplicadas nos terços do vão, portanto a 100 cm de cada um dos apoios (denominados como norte e sul), sobre as três telhas internas, designadas como telha direita (TD), telha central (TC) e telha esquerda (TE).

Em função do perfil da telha e com o objetivo de evitar dano localizado nas telhas no trecho onde seria colocada a carga, julgamos conveniente que, a primeira etapa do carregamento de cada espécime, deveria ser feita com um

material que pudesse contribuir para minimizar eventuais riscos de deformações (esmagamentos) localizadas. Para tanto se decidiu pela utilização de pequenos sacos de areia, de 0,1 kN, largura de 25 cm, os quais formariam uma superfície uniforme entre a telha e o restante do carregamento. Cada uma das três telhas internas do espécime recebeu uma carga de 0,8 kN provenientes dos sacos de areia, totalizando 2,4 kN em cada uma das linhas de carga. Sobre cada uma dessas superfícies, formadas pelos sacos de areia, foi colocado um perfil metálico do tipo viga I, altura de 203,2 mm (8" x 27,3 kg/m). Na metade de cada uma dessas vigas I, no eixo longitudinal, sobre a mesa superior, foram fixadas com solda duas barras cilíndricas, com aproximadamente 20 cm de comprimento, empregadas como apoio de um perfil metálico do tipo viga H, altura de 152,4 mm (6" x 37,1 kg/m). Na metade do vão da viga H, sobre a mesa superior foi colocada uma célula de carga, com capacidade para 10 toneladas, conectada a uma leitora digital. O elemento final, entre a célula de carga e o macaco hidráulico, era um tubo de seção circular, fechado nas duas extremidades, com reforços longitudinais a partir do topo de sua base até a metade de seu comprimento.

O dispositivo de transferência de carga, entre o macaco hidráulico e cada uma das superfícies formadas pelos sacos de areia, adicionava em cada linha, nos terços do comprimento do vão do espécime de telhas, uma carga de 1,32 kN. Assim, somando-se as duas parcelas de carga aplicadas (2,4 kN e 1,32 kN), resulta, para a primeira etapa do carregamento, em cada linha nos terços do vão do espécime de telhas uma carga de 3,72 kN. Fica caracterizado que a aplicação da carga, na primeira etapa de cada ensaio, foi sempre realizada manualmente. Para evitar, durante o carregamento desta etapa, cargas não previstas foram montados andaimes metálicos contíguos ao espécime de telhas, onde foram apoiados pranchões de madeira que ficaram cerca de 20 cm acima do espécime de telhas. A passagem entre os pranchões era feita através de duas tábuas. Esta medida facilitou as movimentações da carga e sua aplicação sobre o espécime de telhas. Além disso cabe acrescentar que o macaco hidráulico estava convenientemente fixado no pórtico, não fazendo parte da carga adicionada pelo dispositivo de transferência.

As etapas posteriores de aplicação gradual da carga foram efetivadas através do conjunto prensa e macaco hidráulico, sendo o registro das cargas realizado através de leitora digital conectada à célula de carga.

Os acréscimos decorrentes da adição de carga nas etapas posteriores, em cada linha, nos terços do vão do espécime de telhas, nos primeiros doze ensaios, resultaram os valores 4,92 kN, 5,92 kN, 6,92 kN, 7,92 kN e 8,89 kN.

Nos quatro ensaios finais (ensaios 13 a 16), além dos valores acima mencionados, os novos acréscimos decorrentes da adição de carga em cada linha, registra os valores 9,88 kN, 10,87 kN, 11,84 kN, 12,83 kN e 13,80 kN (ver Quadros 4.1 até 4.8, no capítulo 4). Durante os ensaios, em cada uma das etapas correspondente aos valores acima, se procedia a interrupção do carregamento e com a carga estabilizada era realizada uma série de leituras, nos pontos instrumentados em cada espécime de telhas, para o registro das medições dos deslocamentos verticais.

A forma de carregamento adotada para os espécimes apesar de contemplar a conjugação de duas modalidades de carregamento, a primeira com a aplicação manual de uma carga de 3,72 kN (aproximadamente 42% da carga de 8,89 kN) e o restante da carga através de um conjunto prensa e cilindro hidráulico, foi considerada satisfatória durante o desenvolvimento de todos os ensaios da presente investigação. A célula de carga garantiu um controle adequado de todas as etapas de carregamento de cada um dos espécimes durante a realização dos ensaios. As Figuras 3.16, 3.17 e 3.18 ilustram aspectos do espécime de telhas e da forma do carregamento empregado.

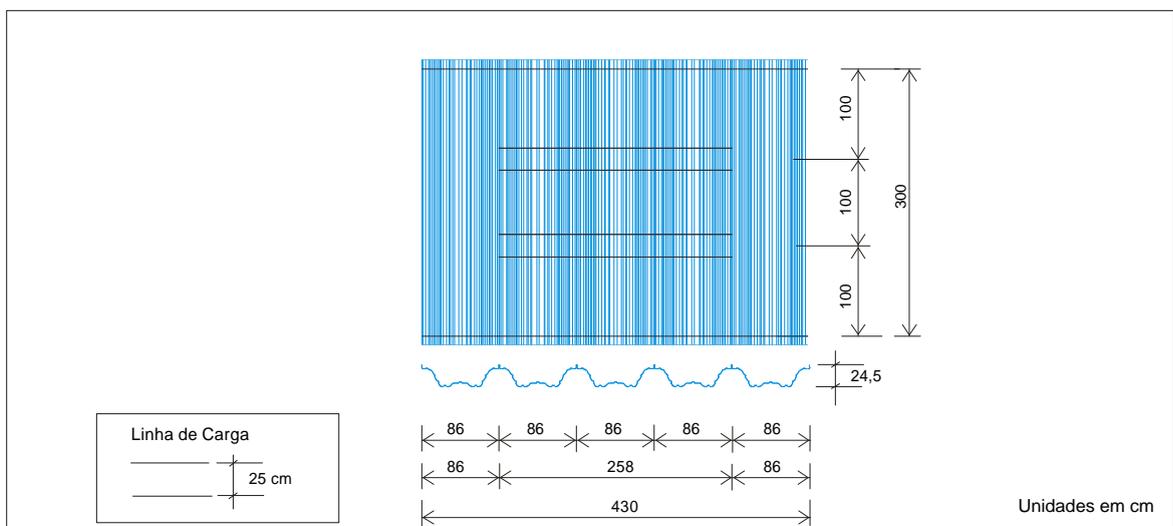


Figura 3.16 - Registra a projeção horizontal da montagem do espécime de telhas e sua respectiva seção transversal. As duas linhas paralelas, nos terços do vão do espécime, indicam a posição da carga, correspondentes aos sacos de areia, aplicadas sobre as três telhas internas.

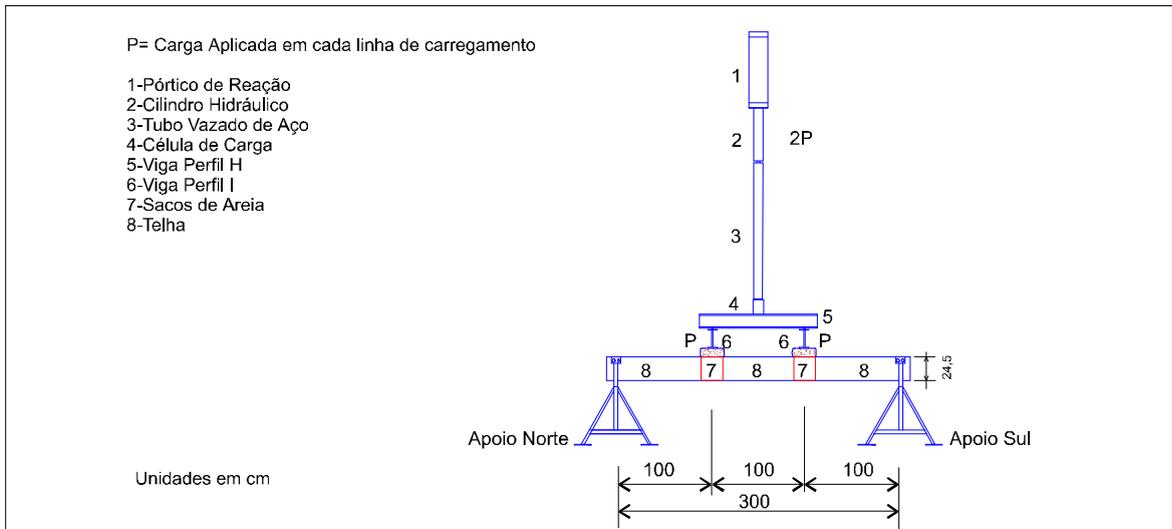


Figura 3.17 - Mostra a forma de carregamento das três telhas internas dos espécimes ensaiados. Observa-se a carga aplicada na primeira etapa e sua utilização como dispositivo de transferência nas demais etapas, quando o acréscimo de carga foi realizado pelo conjunto prensa e cilindro hidráulico.



Figura 3.18 - Observa-se, a partir do apoio norte, a forma de carregamento transversal das três telhas internas, duas linhas de cargas paralelas, aplicadas sobre os terços do comprimento do vão dos espécimes ensaiados.

### 3.5 DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO

Antes do início do ensaio, estando o espécime de telhas pronto, sem carga (somente atuando o peso próprio das telhas), era realizado o registro de uma série de leituras inicial em todos os pontos da instrumentação e na referência de nível (RN). Como referência de nível (RN) foi adotado um pilar da estrutura de concreto armado do Laboratório de Edificações, onde foi fixada, com cola, uma régua metálica com campo de medida de 300 mm. A seguir se procedia o carregamento manual das três telhas internas do espécime, primeira etapa, com os sacos de areia, perfis metálicos do tipo vigas I e H, tubo metálico e célula de carga, que resultava numa carga de 3,72 kN aplicada em cada linha dos terços do vão, a 100 cm de cada um dos apoios do espécime. Com a carga estabilizada era realizado o registro das leituras em todos os pontos instrumentados e na referência de nível (RN).

Esse mesmo procedimento foi repetido após cada etapa de adição dos incrementos de carga. A partir da segunda etapa, o carregamento das três telhas internas era realizado através do conjunto prensa e cilindro (macaco) hidráulico. Os incrementos de carga foram adicionados de forma gradual e seus valores, em cada linha de carga nos terços do vão do espécime, variaram entre 0,97 e 1,0 kN. Nos primeiros doze ensaios todos os espécimes foram carregados até a sexta etapa, sendo aplicado em cada linha de carga 8,89 kN, carga esta correspondente a 69,45 % da carga de 12,8 kN que, no ensaio preliminar, ocasionou a ruptura (flambagem local) do ponto central da telha direita do espécime.

Alcançada a carga de 8,89 kN, o espécime passava a ser descarregado de forma gradual até atingir novamente a carga de 3,72 kN. Nesta etapa se procedia novamente o registro das leituras em todos os pontos instrumentados. A seguir era realizada a retirada manual da carga relativa a primeira etapa. Estando o espécime de telhas liberado da ação da referida carga, imediatamente era realizada uma série de leituras para registro de eventuais deslocamentos verticais residuais oriundos do carregamento aplicado no ensaio. O espécime de telhas permanecia em repouso, sem carga (somente atuando o peso próprio), pelo menos 15 (quinze) horas, quando novamente era realizada uma série de leituras para o registro final de deslocamentos verticais residuais. Nos quatro últimos ensaios (13 a 16) os espécimes de telhas atingiram no mínimo oito etapas

completas de carga (ruptura na etapa 9) e no máximo onze etapas completas de carga (ruptura na etapa 12). Isto pode bem ser observado nos Quadros 4.1 até 4.8 (capítulo 4).

### 3.6 EQUIPAMENTOS

Em todos os ensaios dos espécimes de telhas as séries de leituras de medições dos deslocamentos verticais foram realizadas com o Nível de Precisão Wild N3, com micrômetro de placa plano paralela, que permite leituras com precisão direta de 0,1 mm e precisão estimada de 0,01 mm. A Figura 3.19 ilustra a posição do Nível de Precisão Wild N3, em relação aos pontos de medida do espécime de telhas, utilizado durante a realização dos ensaios desenvolvidos neste estudo.



Figura 3.19 - Mostra o Nível de Precisão Wild N3 utilizado no registro das leituras de medições dos deslocamentos verticais.

Cabe relacionar a seguir todos os demais equipamentos utilizados na preparação e na realização dos ensaios dos espécimes de telhas bem como dos demais ensaios que geraram resultados apresentados no presente estudo:

- célula de carga Kratos, nº 6AG6597, modelo CCI, escala nominal de 98 kN (10 tf), resolução 0,0981 kN (0,01 tf) e leitora digital Sodmex, nº 193, modelo IDT –201, verificada através de uma caixa de taragem marca Amsler nº 31/3078, calibrada em 26 de abril de 1995, pela Rede Brasileira de Calibração e em 28 de outubro de 1998, conforme Certificado de Calibração 1998/04056/001, emitido pelo Laboratório de Força e Pressão da CIENTEC;
- prensa MFL Systeme , Prüf und Mass, máquina de ensaio número 8453;
- cilindro hidráulico ( macaco ) 10/5 Mp, máquina número 8453, modelo DZ10/5, MFL Prüf Und Mebsysteme GmbH D-6800, Mannheim, Germany;
- 15 (quinze) réguas finas de aço (Stainless Steel), marca Arch, campo de medida de 150 mm e 1 (uma) régua fina de aço, marca Kawasa, campo de medida de 300 mm;
- arame de aço galvanizado,  $\varnothing$  0,45 mm;
- 15 (quinze) placas de aço, dimensões 250 mm x 50 mm, espessura 5 mm;
- roldanas de aço Biehl, total de quarenta e cinco, diâmetro externo 40,2 mm.
- máquina universal para ensaios mecânicos, número 9326, marca AMSLER, 49 kN (5.000 kgf); resolução 10 kgf, verificada em 14/12/95, conforme relatório emitido pelo Departamento Metal Mecânico da CIENTEC, de acordo com a NBR 6156/83, através de dinamômetro de mercúrio de tração – compressão, marca AMSLER, número 3078, capacidade de 400 kN, certificado de calibração número 822.07/241759, emitido em 20/03/91, pelo National Institute of Standards and Technology – NIST - U.S.A.;
- medidor de espessura Elcometer 345 F Stats, campo de medida 0 a 1250  $\mu$ m;
- paquímetro digital Tesa, Type 300.05.355, resolução 0,01 mm, campo de medida 300 mm.
- balança URANO UD – 5000/20, digital, capacidade 0,98 kN (100 kg), resolução 0,00196 kN (20 g);
- bomba hidráulica manual, número 2343, com manômetro IMC, número G02-79, graduado de 0 a 20 MPa (200 kgf/cm<sup>2</sup> ), de 0,5 em 0,5 MPa e cilindro hidráulico (macaco), número 2343, capacidade de 245 kN (25 tf), verificado conforme norma NBR 6156/83, em 05/03/96, conforme relatório requisição 6852/DCC, em 12/03/96, através da máquina de ensaios mecânicos, marca Amsler, capacidade 490,5 kN (50 tf), aferida em 26/09/94.

## 4 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Neste estudo foram realizados um total de dezesseis ensaios de flexão.

Cada espécime, de um total de quatro, foi submetido ao carregamento para cada uma das quatro condições de ligação lateral de suas telhas ao longo do comprimento. Todos os espécimes foram montados em quatro ocasiões distintas e de forma alternada, sendo que cada uma dessas montagens atendeu uma das condições de ligação lateral das telhas já descritas no capítulo 3.

Os pontos apresentados nos quadros com resultados e nos gráficos que ilustram o comportamento de cada espécime de telhas estão identificados como DV P\*-T\*-E\*-\* ou DVM (P\* e P\*)-T\*-E\*-\* , sendo "DV" deslocamento vertical e "DVM" deslocamento vertical médio, "P\*" indica o número do ponto de medição, "-T\*", indica a posição da telha no espécime. Por exemplo, telha esquerda, central e direita, "-E\*", corresponde ao número do espécime, 1, 2, 3 e 4, "-\*", se refere a condição de ligação lateral das telhas ao longo do seu comprimento, ou seja 1, 2, 3 e 4.

A Figura 4.1 mostra em relação ao vão do espécime de telhas a localização dos pontos de medição dos deslocamentos verticais cujos resultados experimentais constam dos Quadros e das Figuras que estão inseridas neste capítulo. A visualização no conjunto de telhas de cada um dos pontos de medição pode ser observado nas Figuras 3.9 a 3.12 do capítulo 3.

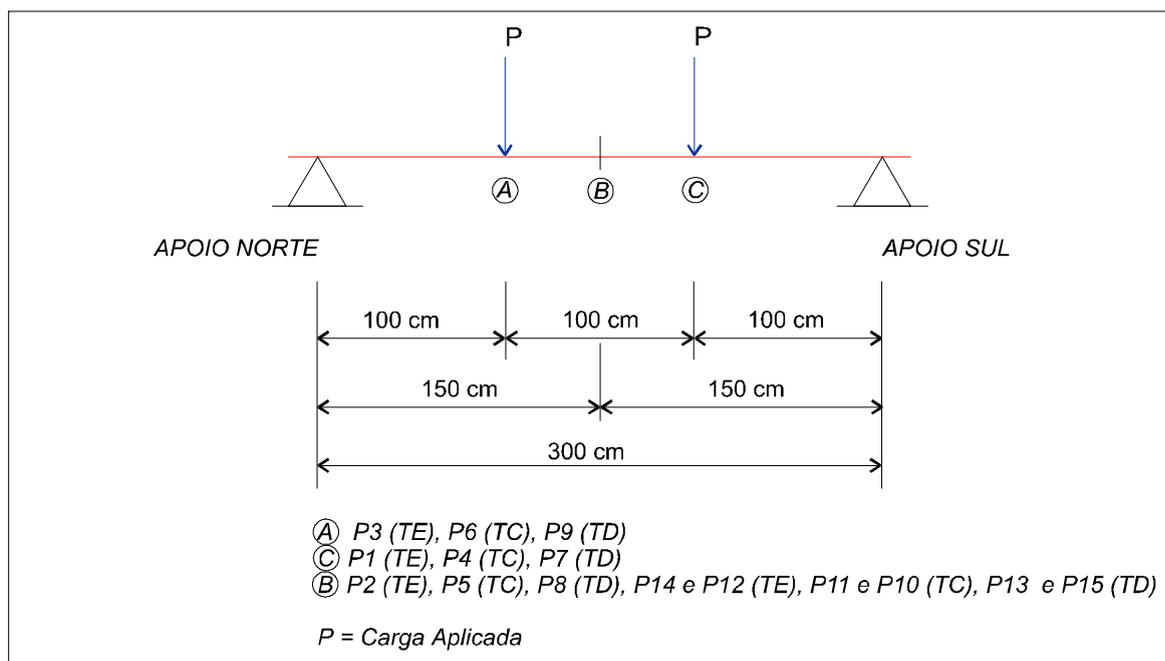


Figura 4.1 - Indica a localização dos pontos de medição em relação ao vão do espécime de telhas.

#### 4.1 ENSAIOS DO ESPÉCIME 1

Os ensaios do espécime de telhas, identificado pelo número 1, foram realizados de acordo com a seguinte ordem: E1-1, E1-2, E1-3 e E1-4.

##### 4.1.1 Ensaio E1-1, E1-2, E1-3 e E1-4

Nos ensaios E1-1, E1-2 e E1-3 o espécime de telhas foi submetido a uma carga transversal máxima de 8,89 kN aplicada nos terços do vão. Somente no ensaio E1-4 o espécime de telhas foi levado a ruptura com uma carga de 11,84 kN.

Na etapa de carga de 8,89 kN, considerando o vão de 3000 mm, os valores obtidos para a razão do deslocamento vertical medido no centro do espécime, ponto P5, telha central, em relação ao vão foram da ordem de 1/95 (31,3 mm), 1/102 (29,2 mm), 1/111 (26,8 mm), 1/134 (22,3 mm), respectivamente, E1-1, E1-2, E1-3 e E1-4. A razão da média dos deslocamentos verticais medidos na metade do espécime, pontos P10 e P11, abas retas da telha central, em relação ao vão foram da ordem de 1/337 (8,9 mm, E1-1), 1/535 (5,6 mm, E1-2), 1/508 (5,9 mm, E1-3) e 1/1111 (2,7 mm, E1-4).

##### 4.1.2 Ensaio de ruptura do espécime 1

A telha esquerda (TE) rompeu quando o espécime foi submetido no ensaio E1-4 a uma carga transversal de 11,84 kN.

A falha ocorreu por flambagem local simultaneamente no ponto central (ponto P2) e num ponto entre o ponto P2 e o ponto P3 da telha esquerda (TE), região de momento constante do espécime, conforme ilustra a Figura 4.19.

A última etapa de registro de medições de todos os pontos da instrumentação, antes da aplicação da carga que ocasionou a ruptura do espécime de telhas, foi realizada quando a carga alcançou 10,87 kN.

Para esta carga, considerando o vão de 3000 mm, o valor obtido para a máxima razão do deslocamento vertical medido no centro do espécime, ponto P5, telha central, em relação ao vão foi da ordem de 1/104 (28,8 mm). Já a máxima razão da média dos deslocamentos verticais medidos na metade do espécime, pontos P10 e P11, abas retas da telha central, em relação ao vão foi da ordem de 1/714 (4,2 mm).

O Quadro 4.1 mostra os deslocamentos verticais medidos no centro do espécime (ponto P5) e o Quadro 4.2 registra a média dos deslocamentos verticais medidos na metade do espécime (pontos P10 e P11), abas retas da telha central. Os resultados apresentados nos Quadros 4.1 e 4.2 correspondem aos quatro ensaios realizados com o espécime 1.

Quadro 4.1 - Deslocamentos verticais no ponto central do vão do espécime 1

Carga (kN)	DV P5-TC-E1-1	DV P5-TC-E1-2	DV P5-TC-E1-3	DV P5-TC-E1-4
	( mm )			
0	0	0	0	0
3,72	16,1	12,5	13,9	8,8
4,92	19,4	15,4	15,9	10,9
5,92	21,9	18,7	18,7	14,0
6,92	24,6	22,4	21,5	16,5
7,92	27,6	25,3	24,9	19,2
8,89	31,3	29,2	26,8	22,3
9,88	-	-	-	25,2
10,87	-	-	-	28,8
11,84	-	-	-	( * )
3,72	22,7	21,2	21,0	-
0	0,9	0,5	0,9	1,5

Observações: ( \* ) Ruptura da telha esquerda do espécime com carga de 11,84 kN;

( \*\* ) Medições realizadas 16 horas após o descarregamento do espécime.

Quadro 4.2 - Média dos deslocamentos verticais dos pontos das abas retas da telha central na metade do vão do espécime 1

Carga (kN)	DVM (P10 e P11)-TC-E1-1	DVM (P10 e P11)-TC-E1-2	DVM (P10 e P11)-TC-E1-3	DVM (P10 e P11)-TC-E1-4
	( mm )			
0	0	0	0	0
3,72	3,0	2,1	2,1	0,9
4,92	4,1	2,8	2,7	1,3
5,92	5,1	3,8	3,5	1,6
6,92	6,2	4,4	4,5	2,0
7,92	7,5	5,0	5,4	2,3
8,89	8,9	5,6	5,9	2,7
9,88	-	-	-	3,2
10,87	-	-	-	4,2
11,84	-	-	-	( * )
3,72	4,5	3,4	3,3	-
0	0,7	0,6	1,1	0,5
0 ( ** )	0,8	0,5	0,6	-

Observações: ( \* ) Ruptura da telha esquerda do espécime com carga de 11,84 kN;

( \*\* ) Medições realizadas 16 horas após o descarregamento do espécime.

#### 4.1.3 Apresentação gráfica dos resultados do espécime 1

As Figuras, numeradas de 4.2 até 4.13, são gráficos que mostram o comportamento do espécime 1, no centro e nos terços do vão, para as quatro condições de ligação lateral de suas telhas ao longo do comprimento. No anexo A são apresentados os valores dos deslocamentos verticais que geraram estes gráficos.

As Figuras 4.2 e 4.11 ilustram, respectivamente, os resultados apresentados nos Quadros 4.1 e 4.2. Os valores de carga, registrados tanto nos referidos Quadros como nas Figuras dos gráficos, correspondem a carga aplicada em cada linha de carregamento do espécime de telhas.

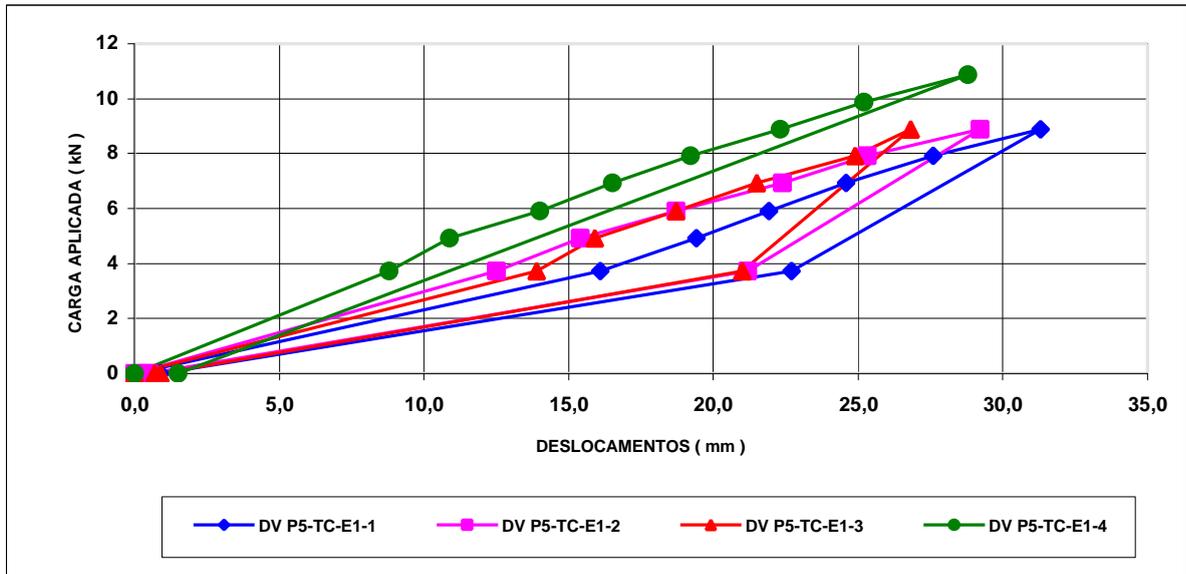


Figura 4.2 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P5, telha central, no centro do vão do espécime 1.

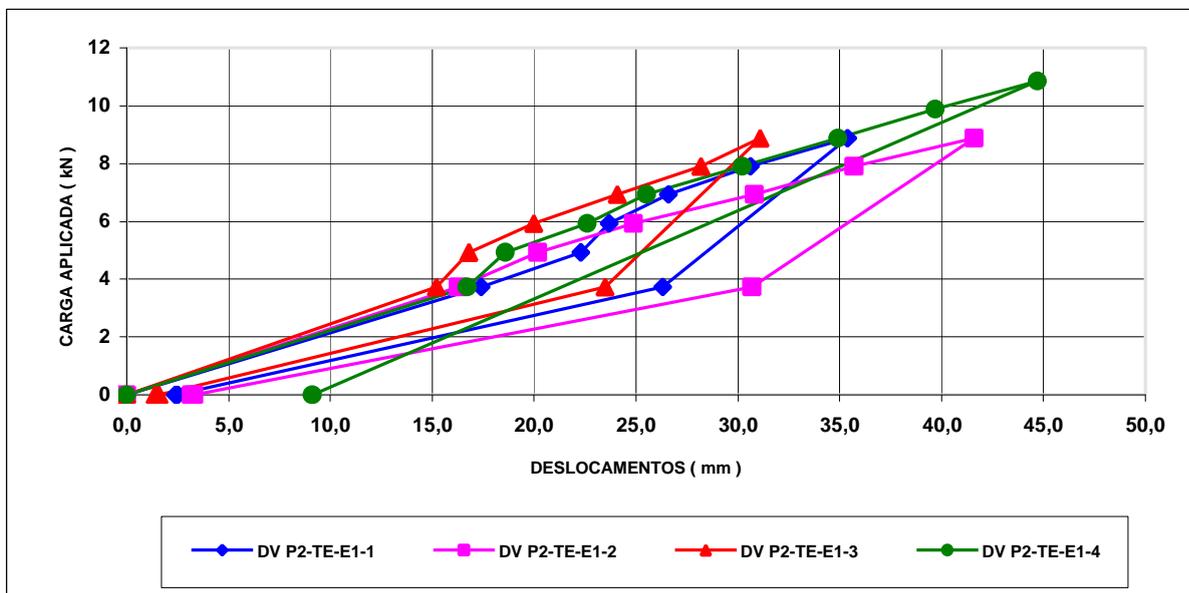


Figura 4.3 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P2, telha esquerda, no centro do vão do espécime 1.

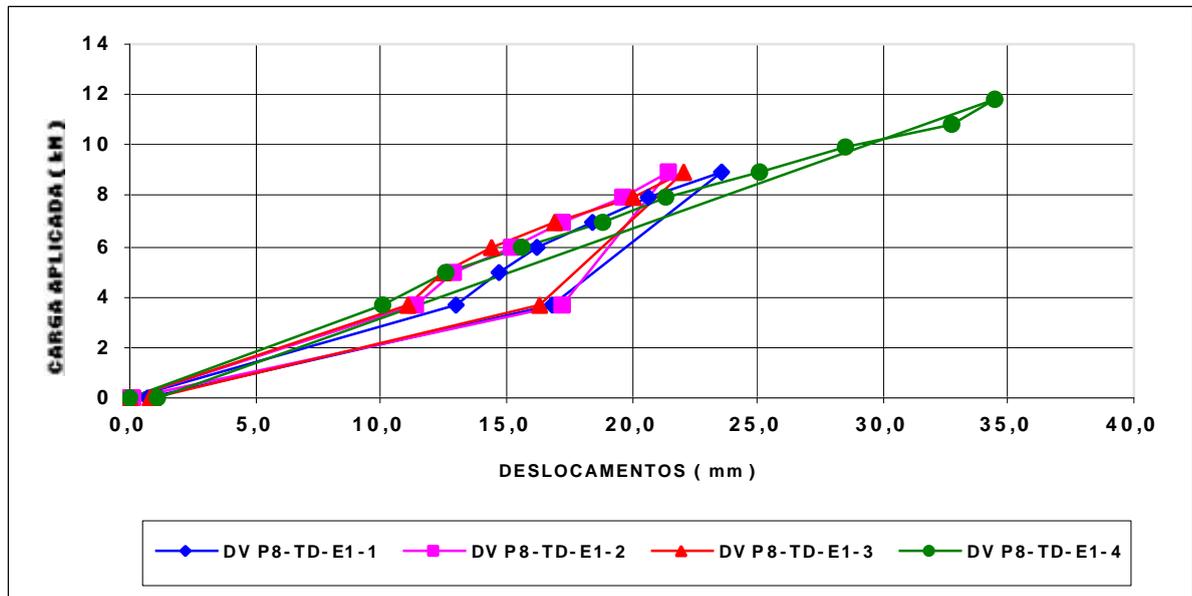


Figura 4.4 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P8, telha direita, no centro do vão do espécime 1.

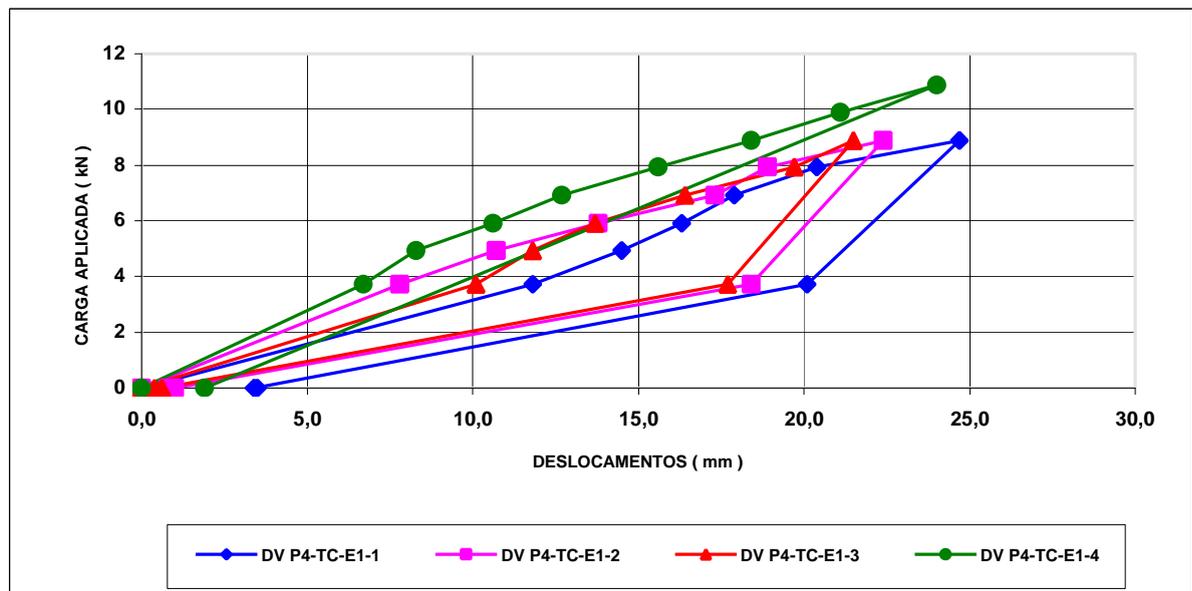


Figura 4.5 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P4, telha central, no terço do vão referido ao apoio sul do espécime 1.

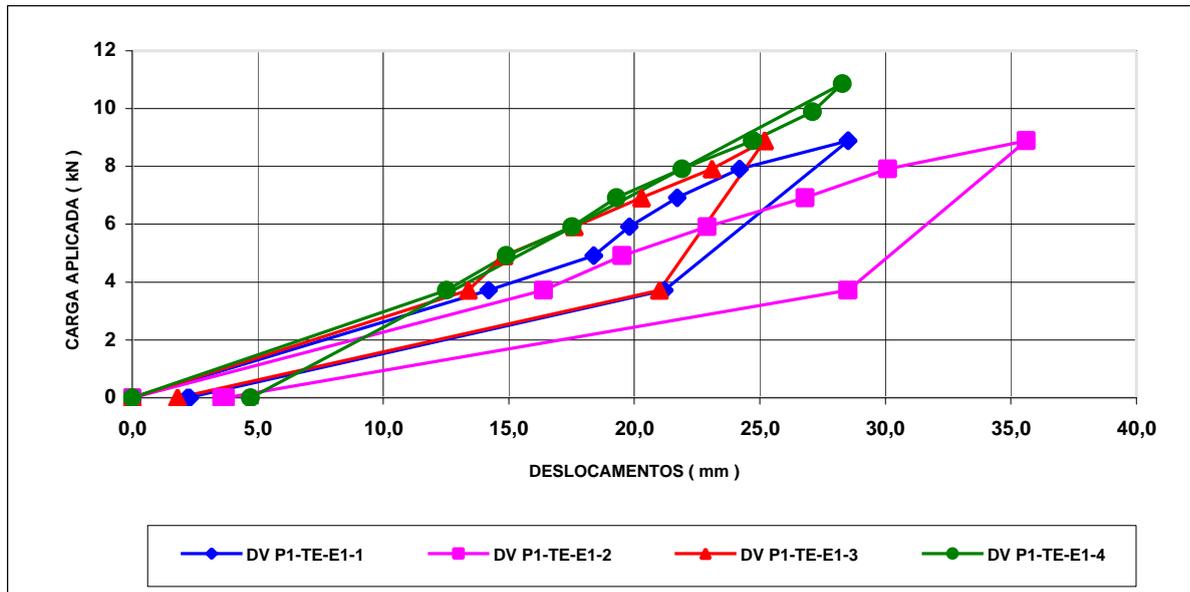


Figura 4.6 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P1, telha esquerda, no terço do vão referido ao apoio sul do espécime 1.

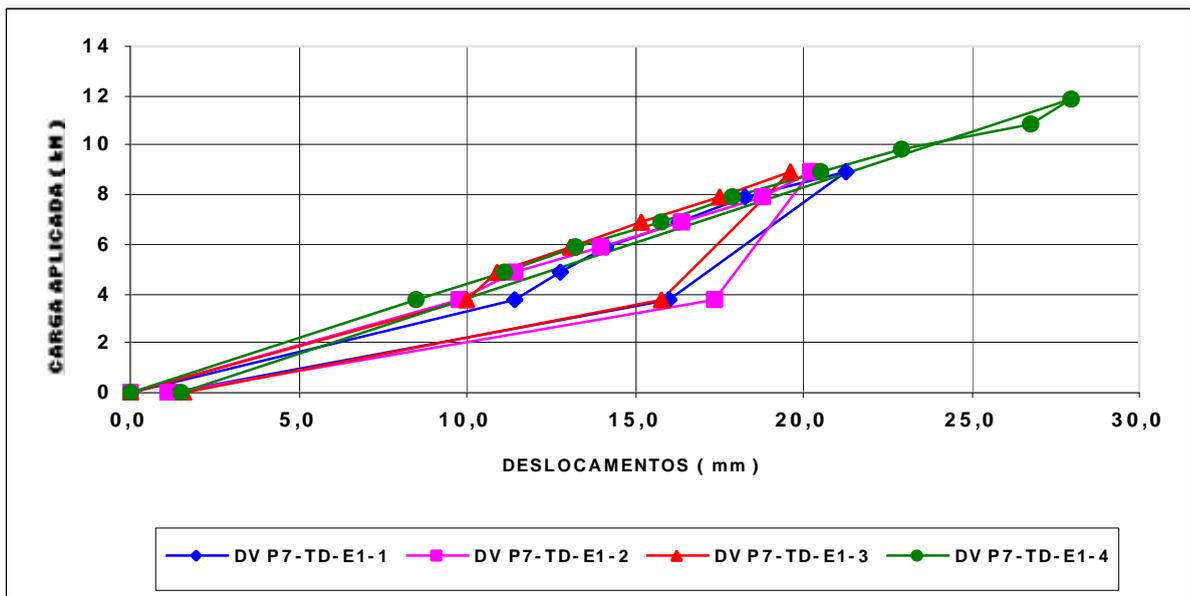


Figura 4.7 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P7, telha direita, no terço do vão referido ao apoio sul do espécime 1.

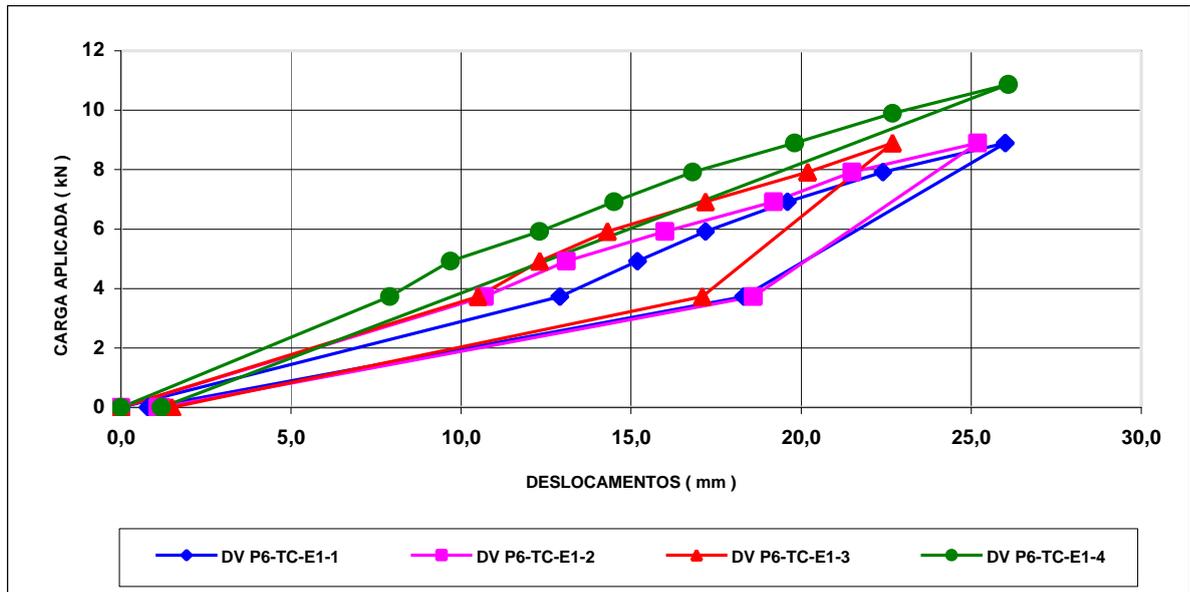


Figura 4.8 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P6, telha central, no terço do vão referido ao apoio norte do espécime 1.

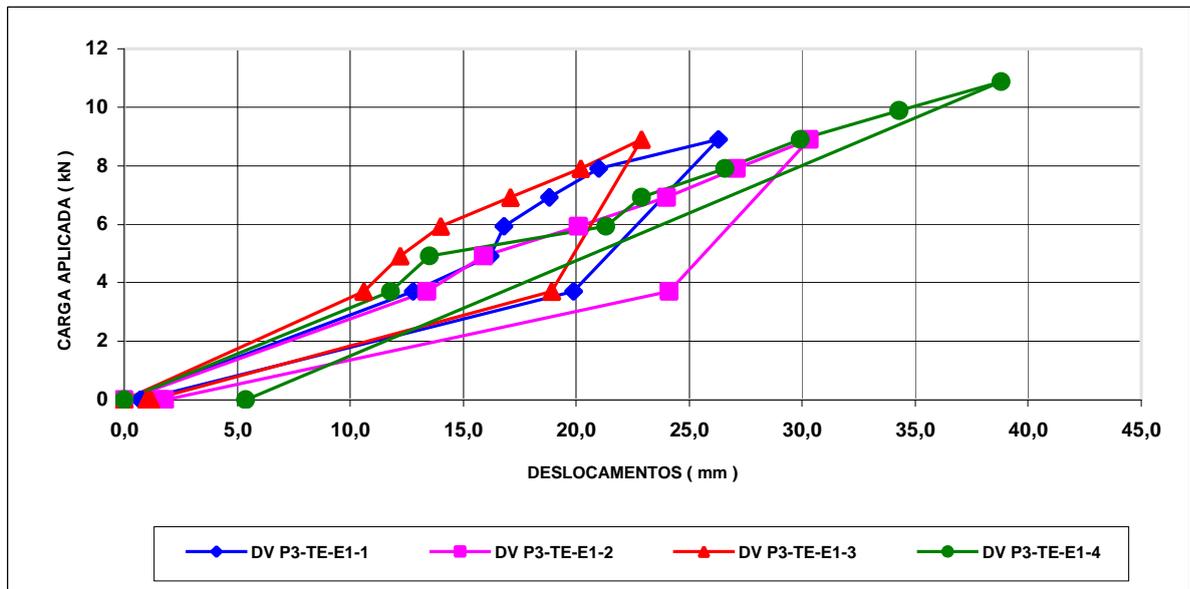


Figura 4.9 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P3, telha esquerda, no terço do vão referido ao apoio norte do espécime 1.

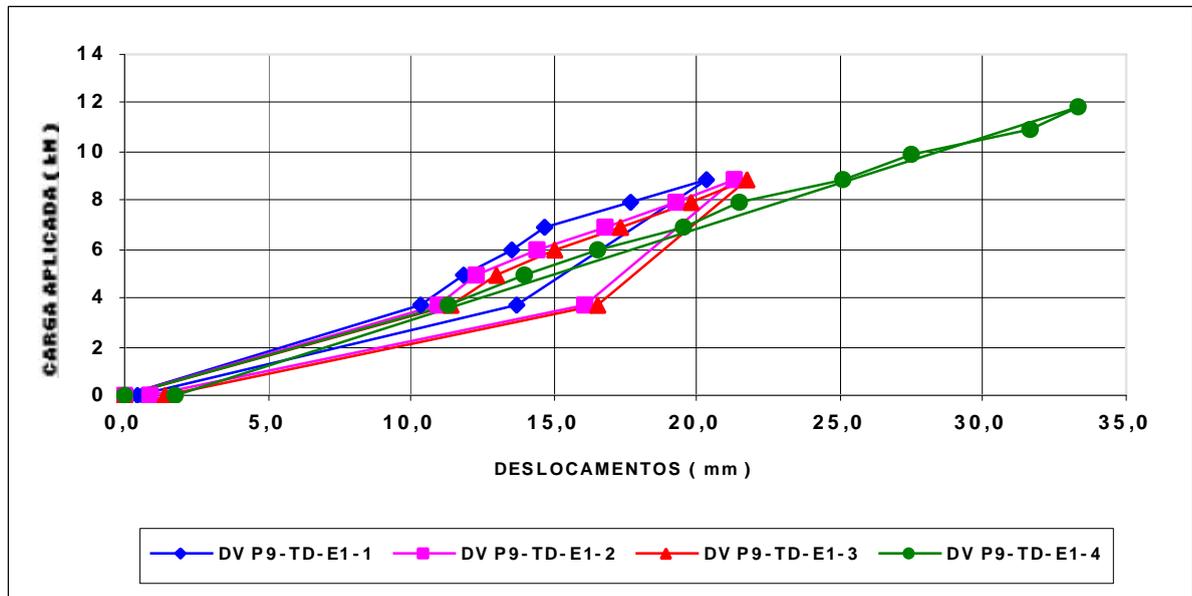


Figura 4.10 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P9, telha direita, no terço do vão referido ao apoio norte do espécime 1.

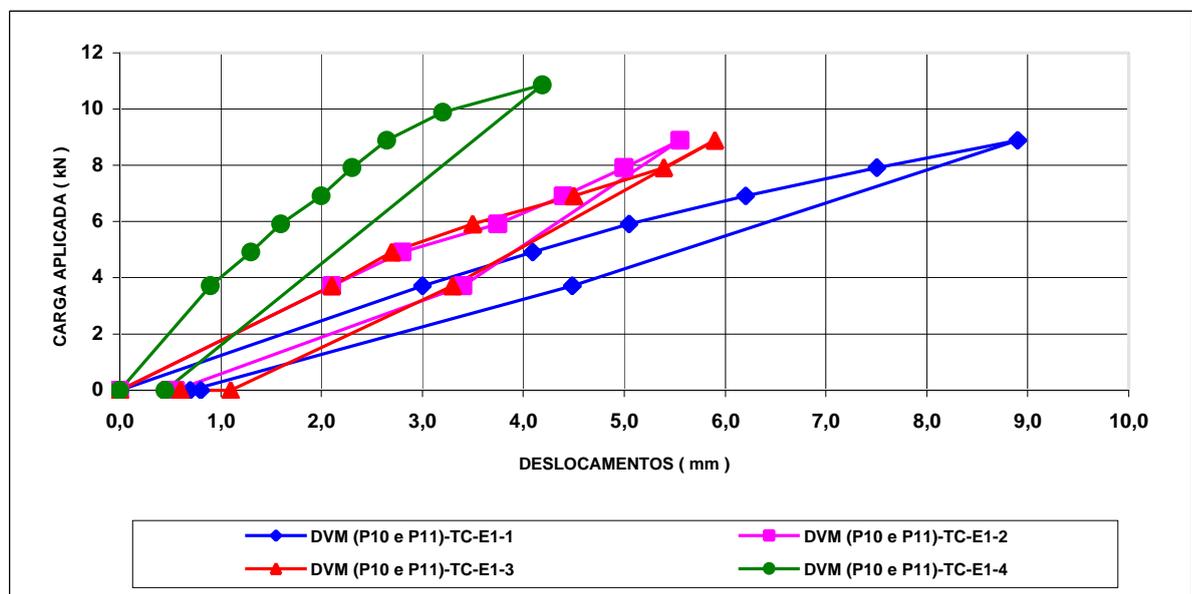


Figura 4.11 - Média dos deslocamentos verticais medidos nos pontos P10 e P11, abas retas da telha central, na metade do vão do espécime 1.

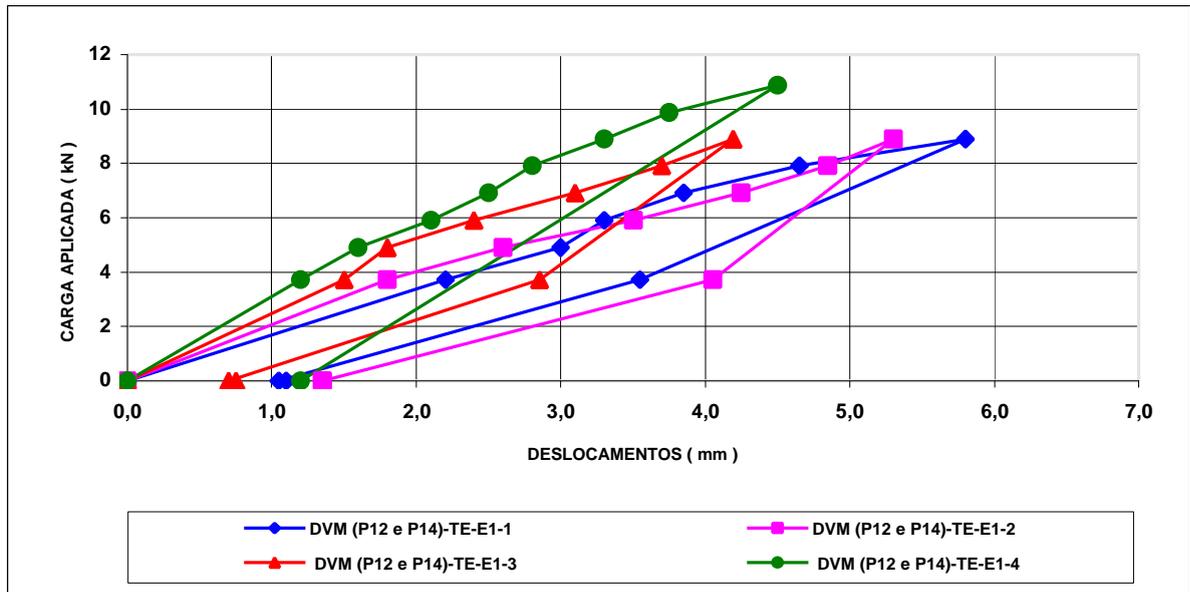


Figura 4.12 - Média dos deslocamentos verticais medidos nos pontos P12 e P14, abas retas da telha esquerda, na metade do vão do espécime 1.

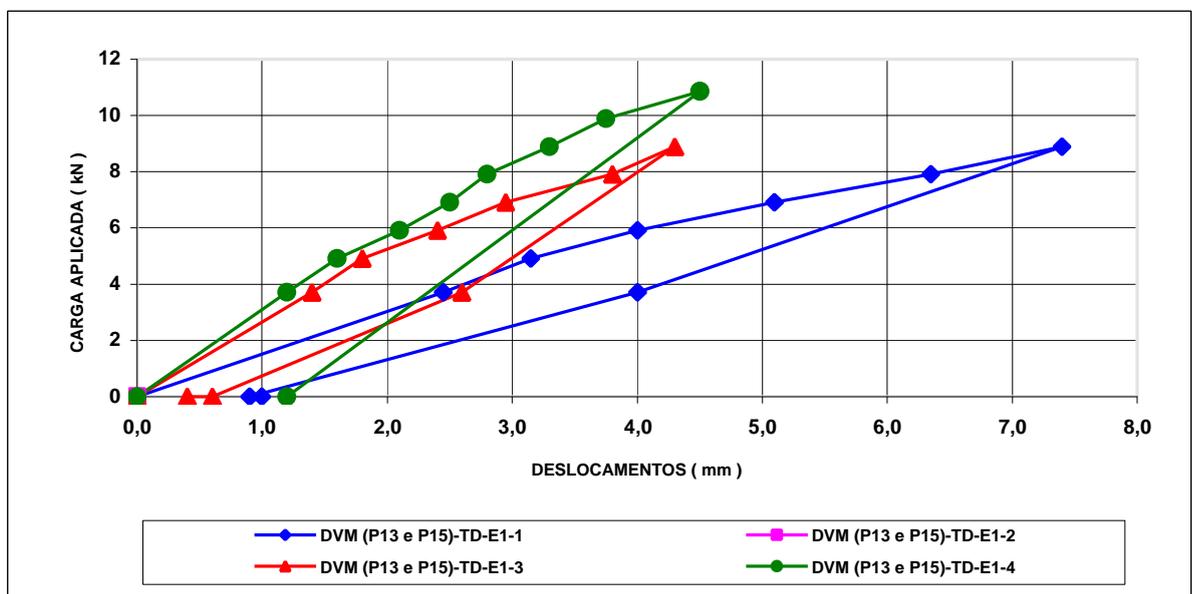


Figura 4.13 - Média dos deslocamentos verticais medidos nos pontos P13 e P15, abas retas da telha direita, na metade do vão do espécime 1.

Observação: As medições no ponto P15, ensaio E1-2, foram desprezadas por evidenciarem erro.

#### 4.1.4 Documentação fotográfica do espécime 1



Figura 4.14 - Detalhe, na metade da telha central, próximo do ponto P5, de um leve dobramento localizado, decorrente do processo de perfilação, observado antes da utilização da telha nos ensaios. Esse tipo de dobramento foi observado em outros locais da telha central e também nas demais telhas (direita e esquerda) do espécime 1.

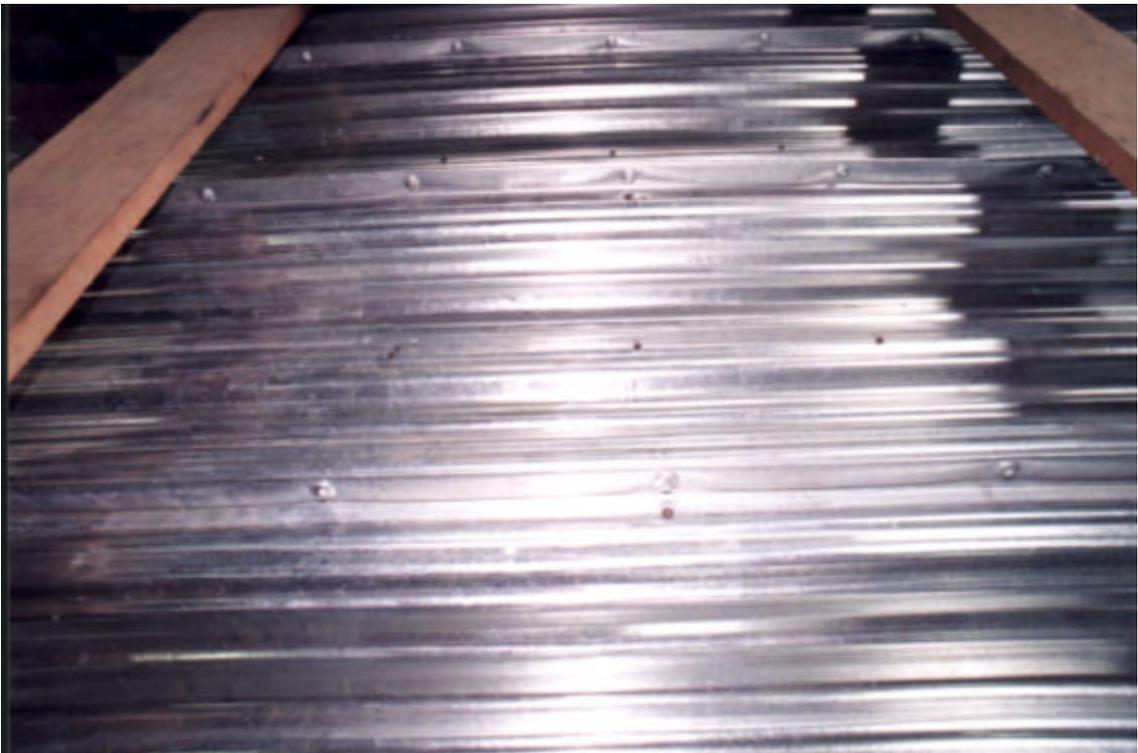


Figura 4.15 - Mostra, parcialmente, a telha direita, central e esquerda do espécime 1, na condição de ligação designada como 4, antes da realização do ensaio E1-4 (ensaio 16).



Figura 4.16 - Mostra, na condição de ligação denominada 4, na telha central do espécime 1, as capas 10 e 11 (ensaio 16 - E1-4). Observa-se também a linha de parafusos com espaçamento de 50 cm .

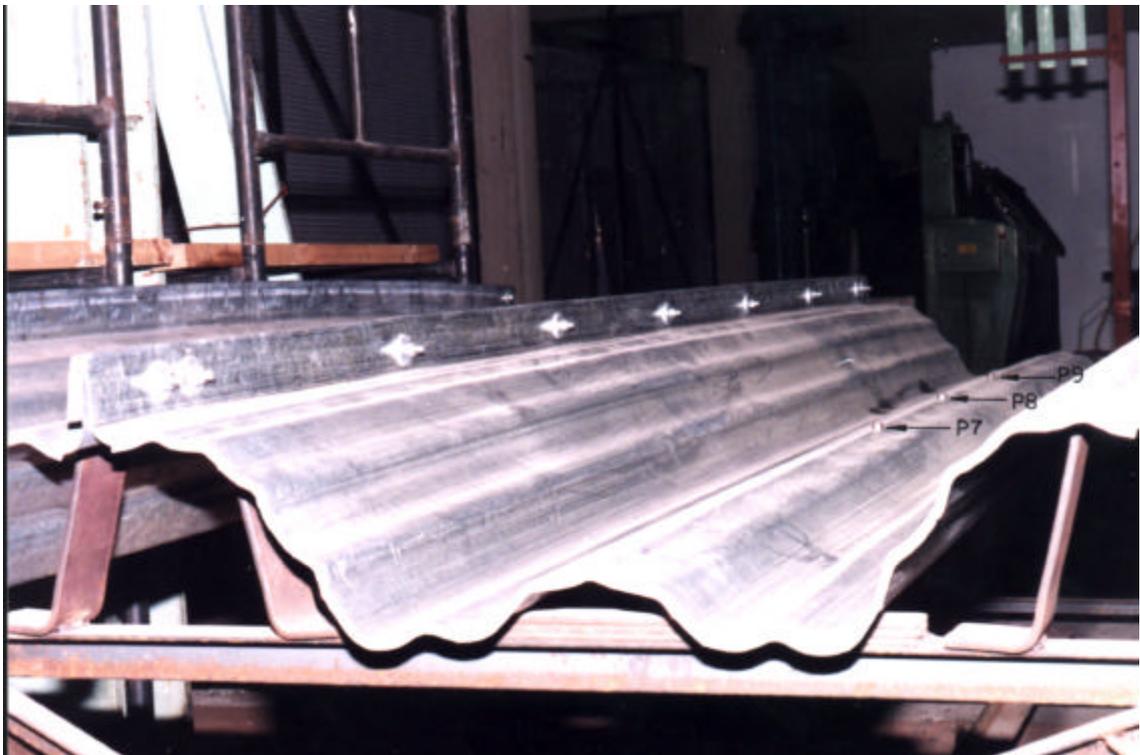


Figura 4.17 - Registra a linha de parafusos com espaçamento de 50 cm, na condição de ligação designada 4, entre a telha direita e a telha 1 (telha de extremidade). Mostra ao longo do eixo longitudinal da telha direita a posição dos pontos de medições, indicados pelas setas, P7, P8 e P9, respectivamente, terço, metade e terço do vão do espécime.



Figura 4.18 - Mostra o ensaio E1-4 (ensaio 16) das três telhas internas do espécime, na primeira etapa do carregamento, correspondente a carga de 3,72 kN. Observa-se, de baixo para cima, na seguinte ordem, telha 1, telha direita, telha central, telha esquerda e telha 5. As telhas de extremidade (1 e 5) foram utilizadas em todos os ensaios de cada espécime.

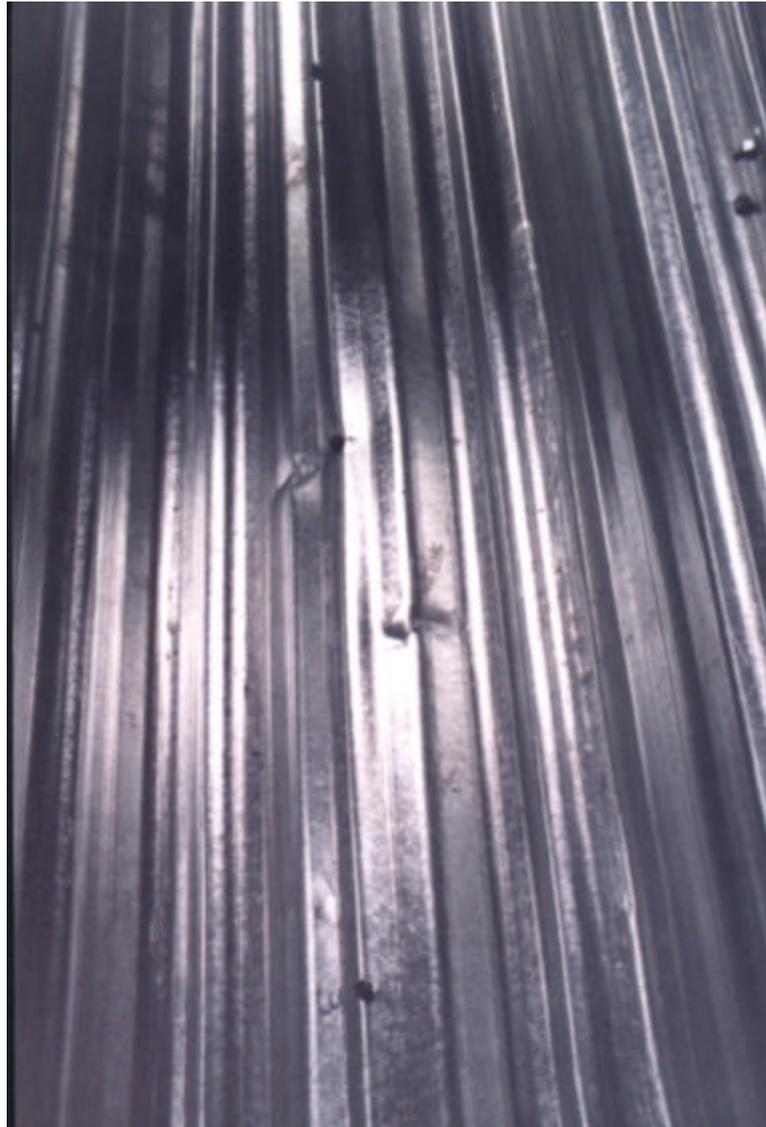


Figura 4.19 - Identifica a ruptura por flambagem local na telha esquerda no ensaio E1-4 (ensaio 16), no ponto central (ponto P2), na metade do vão do espécime, e entre o ponto P2 e o ponto P3 (terço do vão do espécime), quando a carga aplicada atingiu 11,84 kN.

## 4.2 ENSAIO DO ESPÉCIME 2

A ordem de realização dos ensaios do espécime de telhas, identificado pelo número 2, foi a seguinte: E2-2, E2-3, E2-4 e E2-1.

### 4.2.1 Ensaio E2-1, E2-2, E2-3 e E2-4

O espécime de telhas, nos ensaios E2-2, E2-3 e E2-4, foi submetido a uma carga transversal máxima de 8,89 kN aplicada nos terços do vão. O espécime de telhas foi levado a ruptura com uma carga de 12,33 kN no ensaio E2-1.

Na etapa de carga de 8,89 kN, considerando o vão de 3000 mm, os resultados registrados para a razão do deslocamento vertical medido no centro do espécime, ponto P5, telha central, em relação ao vão foram da ordem de 1/77 (38,5 mm), 1/89 (33,5 mm), 1/121 (24,7 mm), 1/89 (33,7 mm), respectivamente, E2-1, E2-2, E2-3 e E2-4. A razão da média dos deslocamentos verticais medidos na metade do espécime, pontos P10 e P11, abas retas da telha central, em relação ao vão foram da ordem de 1/400 (7,5 mm, E2-1), 1/365 (8,2 mm, E2-2), 1/555 (5,4 mm, E2-3), 1/500 (6,0 mm, E2-4).

### 4.2.2 Ensaio de ruptura do espécime 2

No ensaio E2-1 quando o espécime foi submetido a uma carga transversal de 12,33 kN a telha central (TC) rompeu.

A falha ocorreu por flambagem local no ponto central (P5) da telha central (TC), região de momento constante do espécime, conforme mostra a Figura 4.33.

Neste ensaio o último registro de medições de todos os pontos da instrumentação, antes da aplicação da carga que ocasionou a ruptura do espécime de telhas, foi realizado quando a carga alcançou 11,84 kN.

Para esta carga, considerando o vão de 3000 mm, o valor obtido para a máxima razão entre o deslocamento vertical medido no centro do espécime, ponto P5, telha central, em relação ao vão foi da ordem de 1/58 (51,5 mm). Já para a máxima razão entre a média dos deslocamentos verticais medidos na metade do espécime, pontos P10 e P11, abas retas da telha central, em relação ao vão foi da ordem de 1/294 (10,2 mm).

O Quadro 4.3 mostra os deslocamentos verticais medidos no centro do espécime (ponto P5) e o Quadro 4.4 registra o valor médio dos deslocamentos verticais medidos na metade do espécime (pontos P10 e P11), abas retas da telha central. Os resultados apresentados nos Quadros 4.3 e 4.4 correspondem aos quatro ensaios realizados com o espécime 2.

Quadro 4.3 - Deslocamentos verticais no ponto central do vão do espécime 2

Carga (kN)	DV P5-TC-E2-1	DV P5-TC-E2-2	DV P5-TC-E2-3	DV P5-TC-E2-4
	( mm )			
0	0	0	0	0
3,72	16,5	17,9	10,6	16,5
4,92	32,5	19,3	12,9	20,0
5,92	33,1	22,9	16,1	23,3
6,92	34,5	26,2	18,7	26,7
7,92	35,5	30,0	21,9	30,2
8,89	38,5	33,5	24,7	33,7
9,88	42,1	-	-	-
10,87	46,0	-	-	-
11,84	51,5	-	-	-
12,33	( * )	-	-	-
3,72	-	25,0	18,1	26,4
0	44,4	3,9	1,3	1,7
0 ( ** )	-	4,0	1,2	1,6

Observações: ( \* ) Ruptura da telha central do espécime com carga de 12,33 kN;

( \*\* ) Medições realizadas 15 horas após o descarregamento do espécime.

Quadro 4.4 - Média dos deslocamentos verticais dos pontos das abas retas da telha central na metade do vão do espécime 2

Carga (kN)	DVM (P10 e P11)-TC-E2-1	DVM (P10 e P11)-TC-E2-2	DVM (P10 e P11)-TC-E2-3	DVM (P10 e P11)-TC-E2-4
	( mm )			
0	0	0	0	0
3,72	2,5	2,8	1,7	2,0
4,92	5,1	3,2	2,4	2,8
5,92	5,6	4,2	3,0	3,5
6,92	6,2	5,4	3,7	4,3
7,92	6,5	6,7	4,6	5,1
8,89	7,5	8,2	5,4	6,0
9,88	8,2	-	-	-
10,87	9,2	-	-	-
11,84	10,2	-	-	-
12,33	( * )	-	-	-
3,72	-	4,5	2,8	3,1
0	3,1	1,4	0,5	0,9
0 ( ** )	-	1,4	0,5	0,9

Observações: ( \* ) Ruptura da telha central do espécime com carga de 12,33 kN;

( \*\* ) Medições realizadas 15 horas após o descarregamento do espécime.

#### 4.2.3 Apresentação gráfica dos resultados do espécime 2

As Figuras, numeradas de 4.20 até 4.31, são gráficos que mostram o comportamento do espécime 2, no centro e no terços do vão, para as quatro condições de ligação lateral de suas telhas ao longo do comprimento. No anexo A são apresentados os valores dos deslocamentos verticais que geraram estes gráficos.

As Figuras 4.20 e 4.29 ilustram, respectivamente, os resultados apresentados nos Quadros 4.3 e 4.4. Os valores de carga, registrados tanto nos referidos Quadros como nas Figuras dos gráficos, correspondem a carga aplicada em cada linha de carregamento do espécime de telhas.

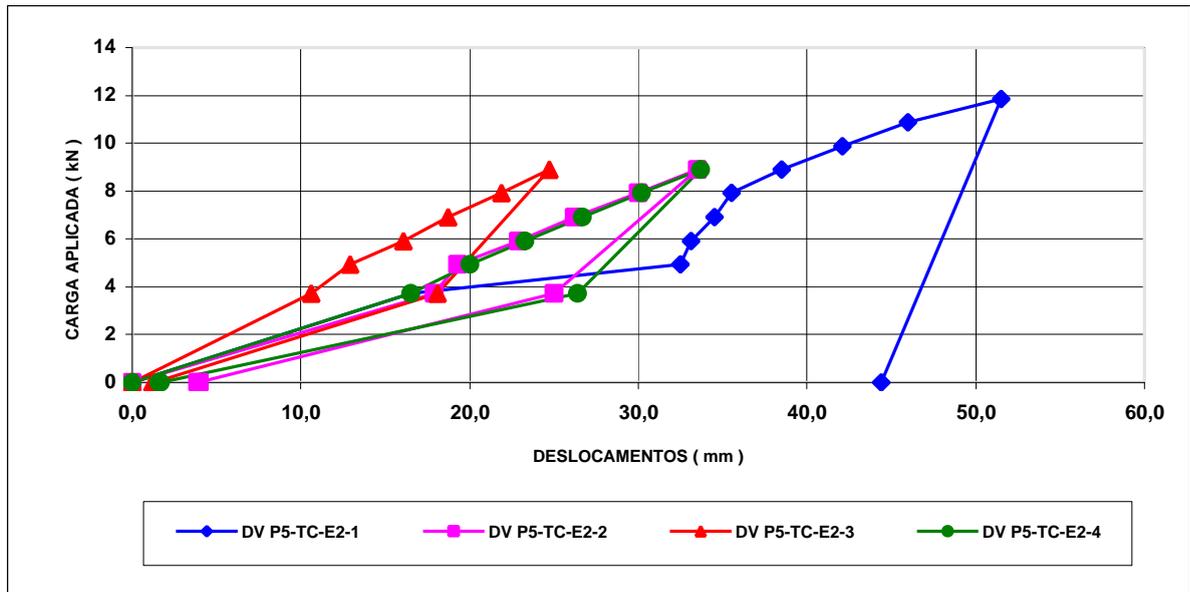


Figura 4.20 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P5, telha central, no centro do vão do espécime 2.

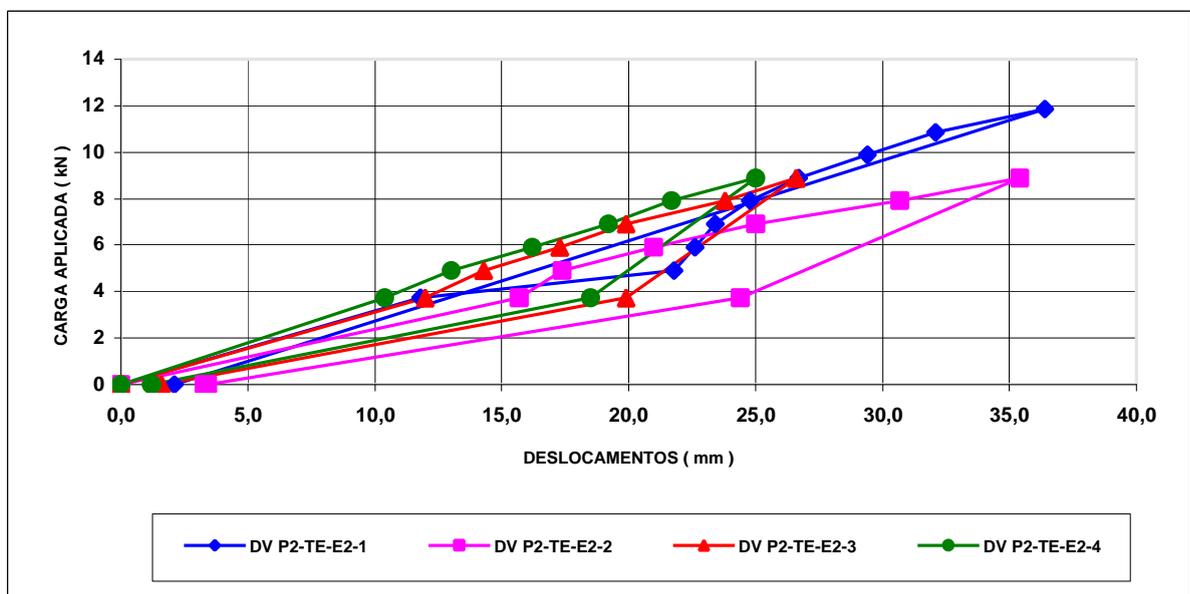


Figura 4.21 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P2, telha esquerda, no centro do vão do espécime 2.

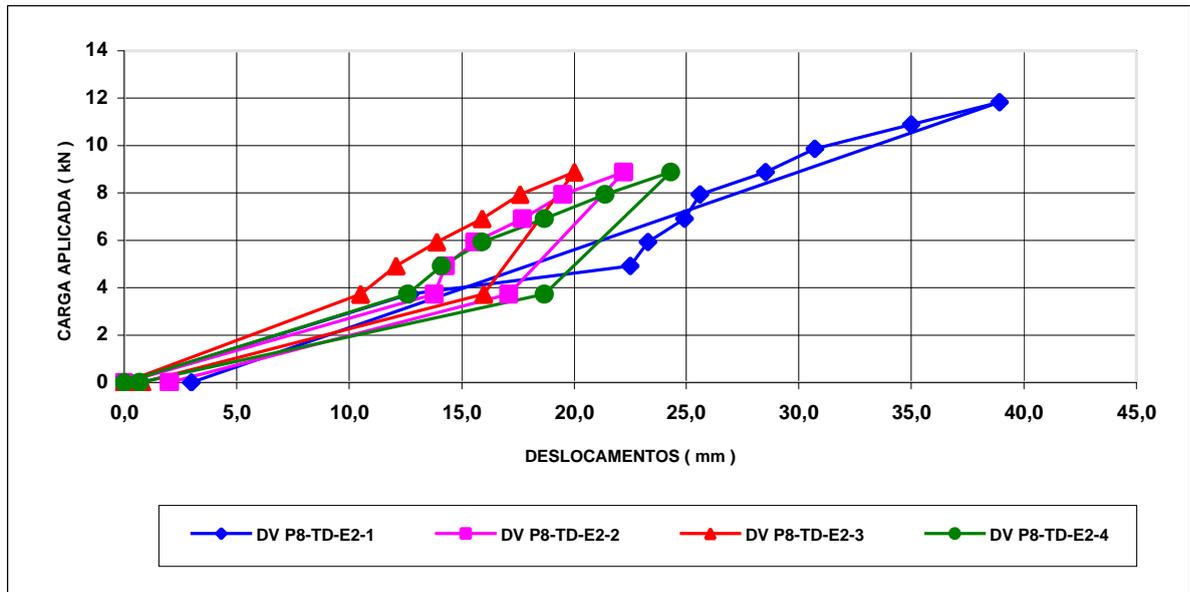


Figura 4.22 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P8, telha direita, no centro do vão do espécime 2.

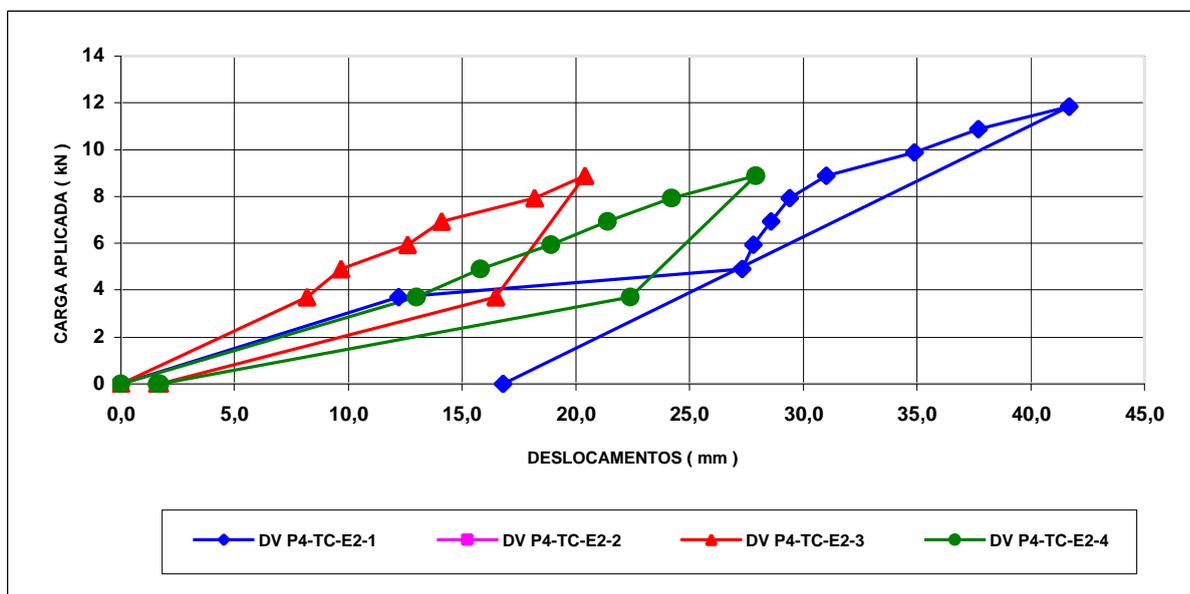


Figura 4.23 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P4, telha central, no terço do vão referido ao apoio sul do espécime 2.

Observação: As medições no ponto P4, ensaio E2-2, foram desprezadas por evidenciarem erro.

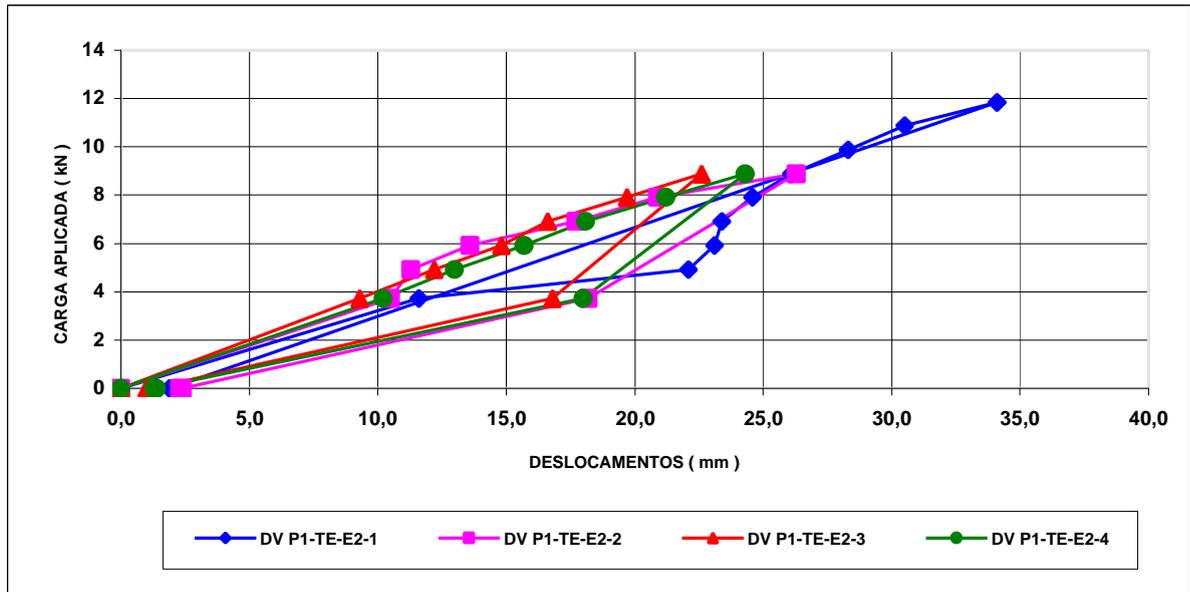


Figura 4.24 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P1, telha esquerda, no terço do vão referido ao apoio sul do espécime 2.

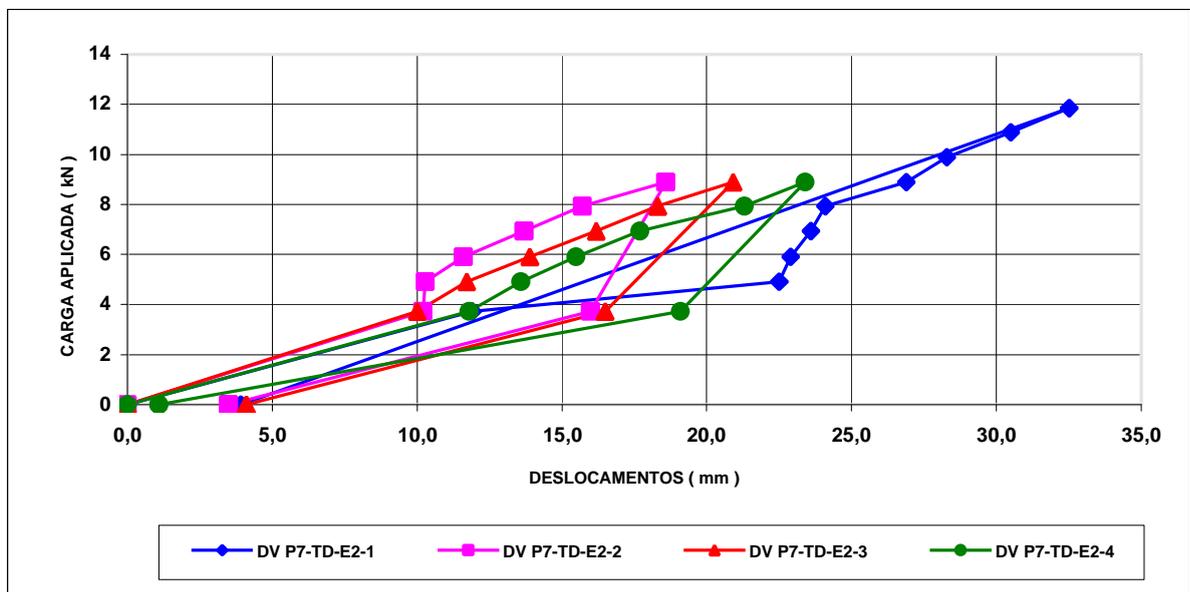


Figura 4.25 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P7, telha direita, no terço do vão referido ao apoio sul do espécime 2.

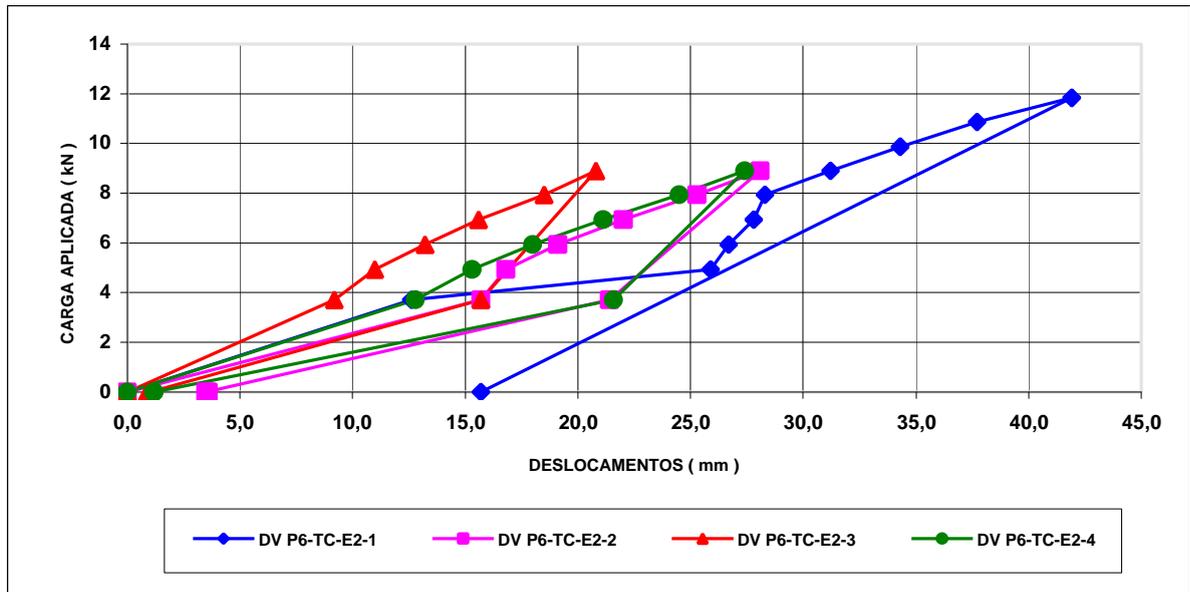


Figura 4.26 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P6, telha central, no terço do vão referido ao apoio norte do espécime 2.

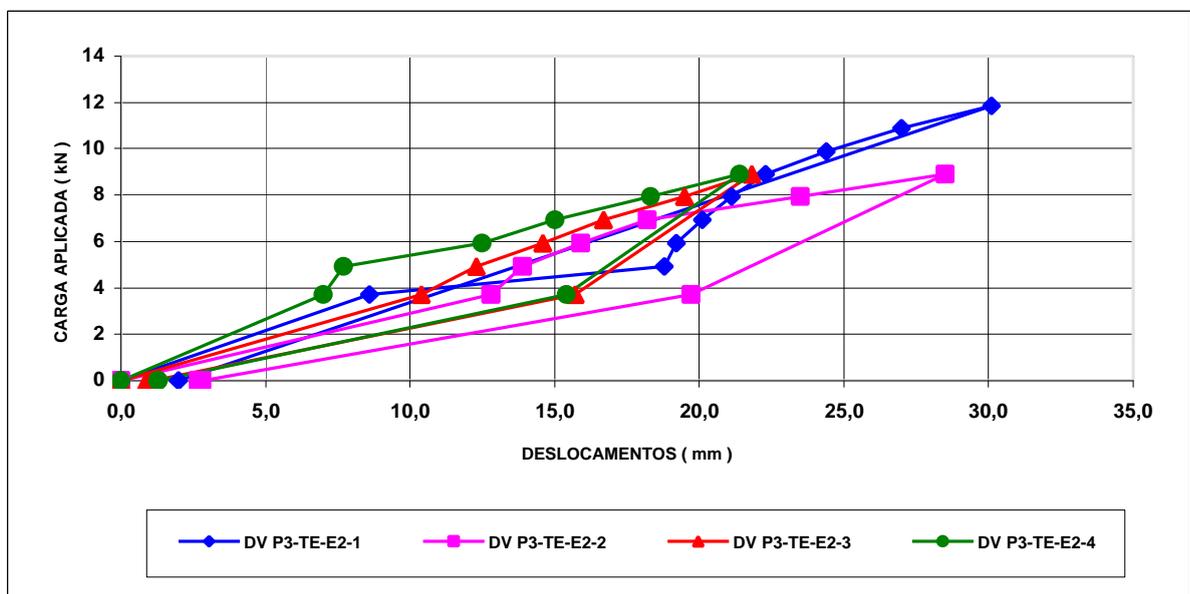


Figura 4.27 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P3, telha esquerda, no terço do vão referido ao apoio norte do espécime 2.

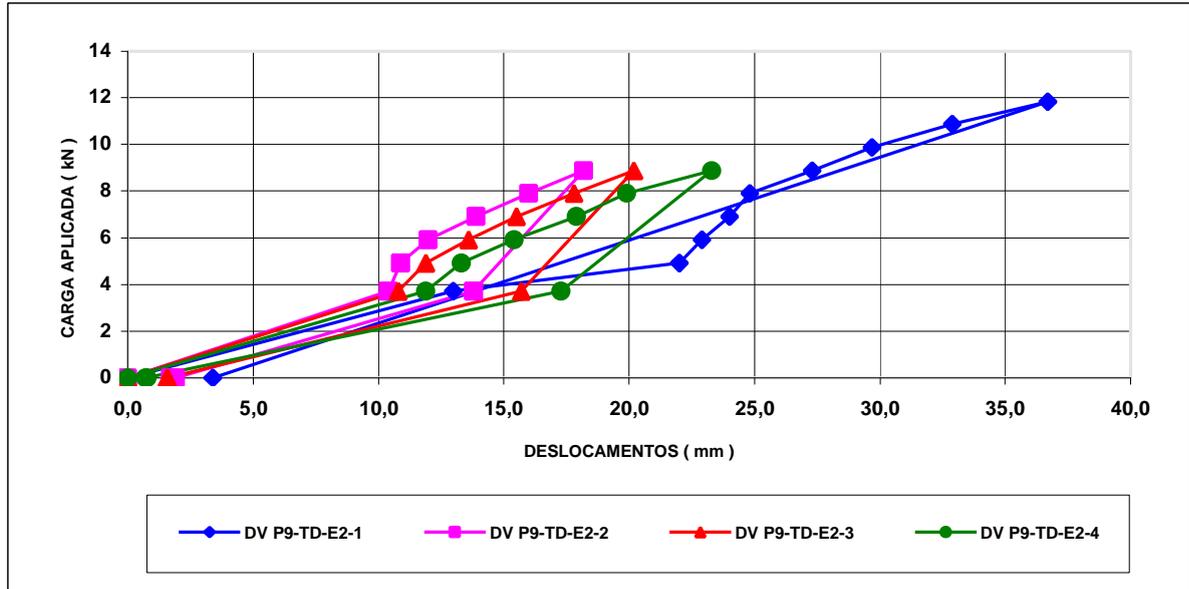


Figura 4.28 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P9, telha direita, no terço do vão referido ao apoio norte do espécime 2.

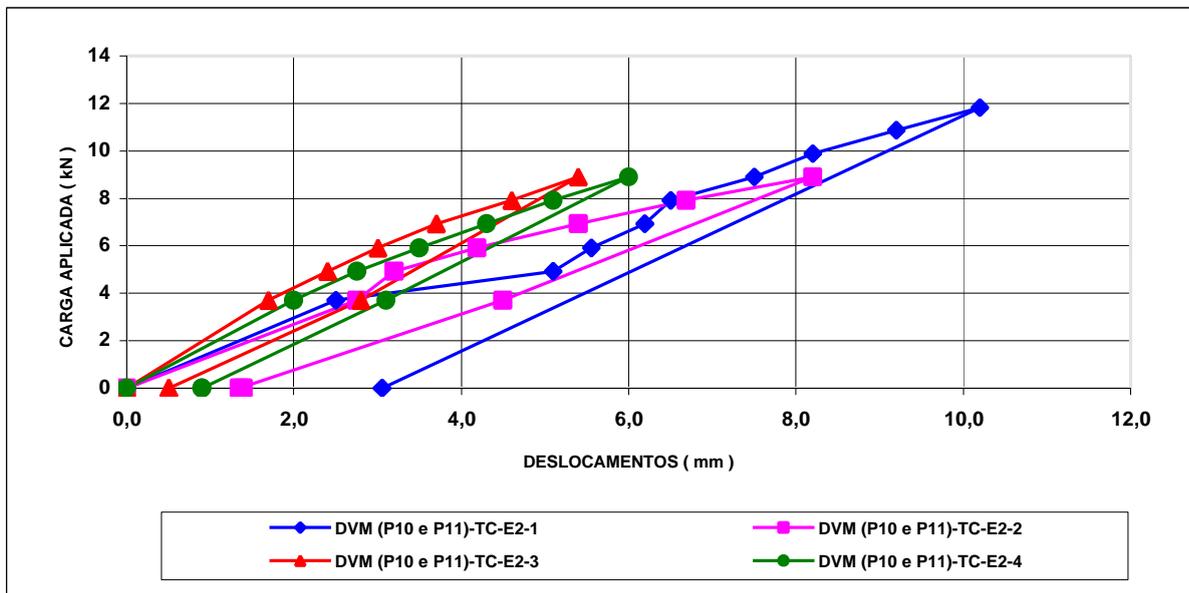


Figura 4.29 - Média dos deslocamentos verticais medidos nos pontos P10 e P11, abas retas da telha central, na metade do vão do espécime 2.

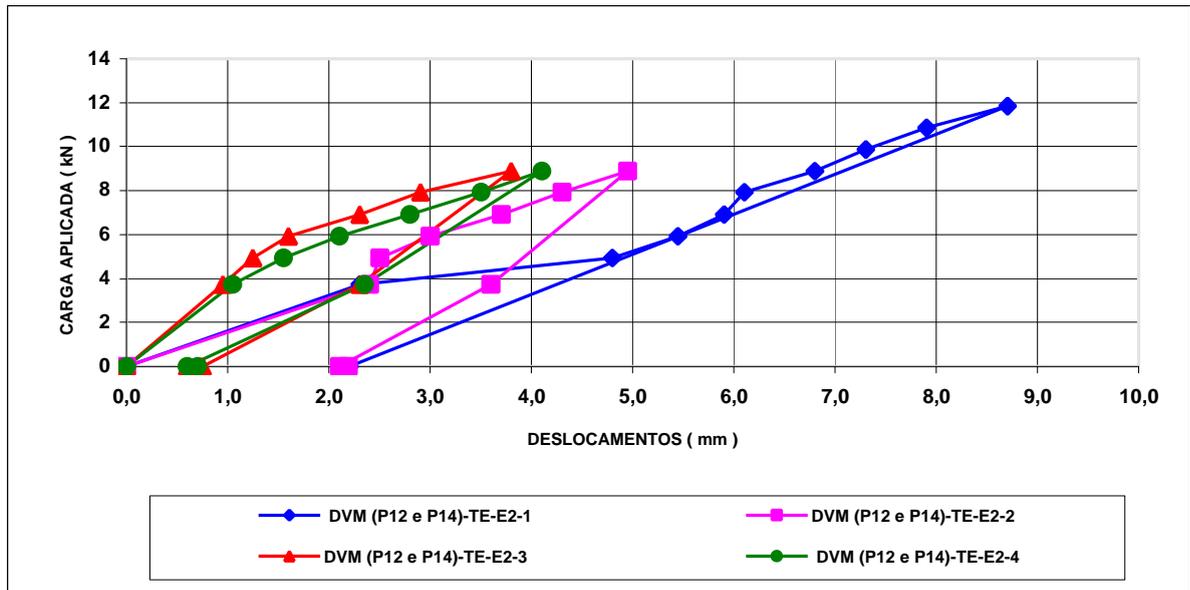


Figura 4.30 - Média dos deslocamentos verticais medidos nos pontos P12 e P14, abas retas da telha esquerda, na metade do vão do espécime 2.

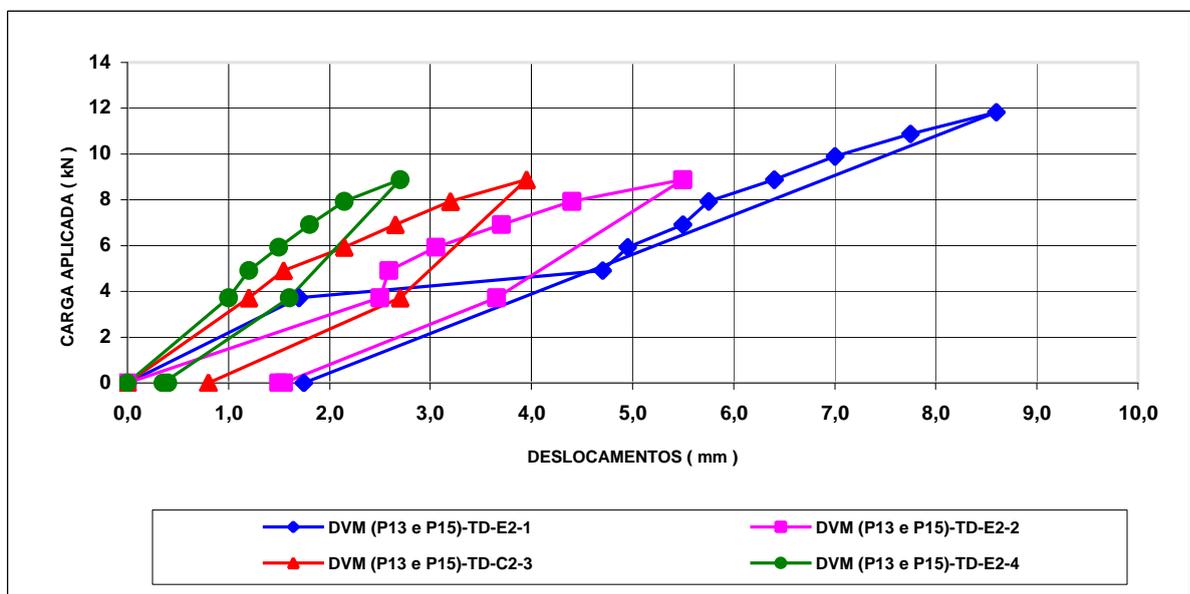


Figura 4.31 - Média dos deslocamentos verticais medidos nos pontos P13 e P15, abas retas da telha direita, na metade do vão do espécime 2.

#### 4.2.4 Documentação fotográfica do espécime 2



Figura 4.32 - Detalhe, na metade da telha direita, próximo do ponto P13, de um leve dobramento localizado, decorrente do processo de perfilação, observado antes da utilização da telha nos ensaios. Esse tipo de dobramento foi observado em outros locais da telha direita e também nas demais telhas (central e esquerda) do espécime 2.

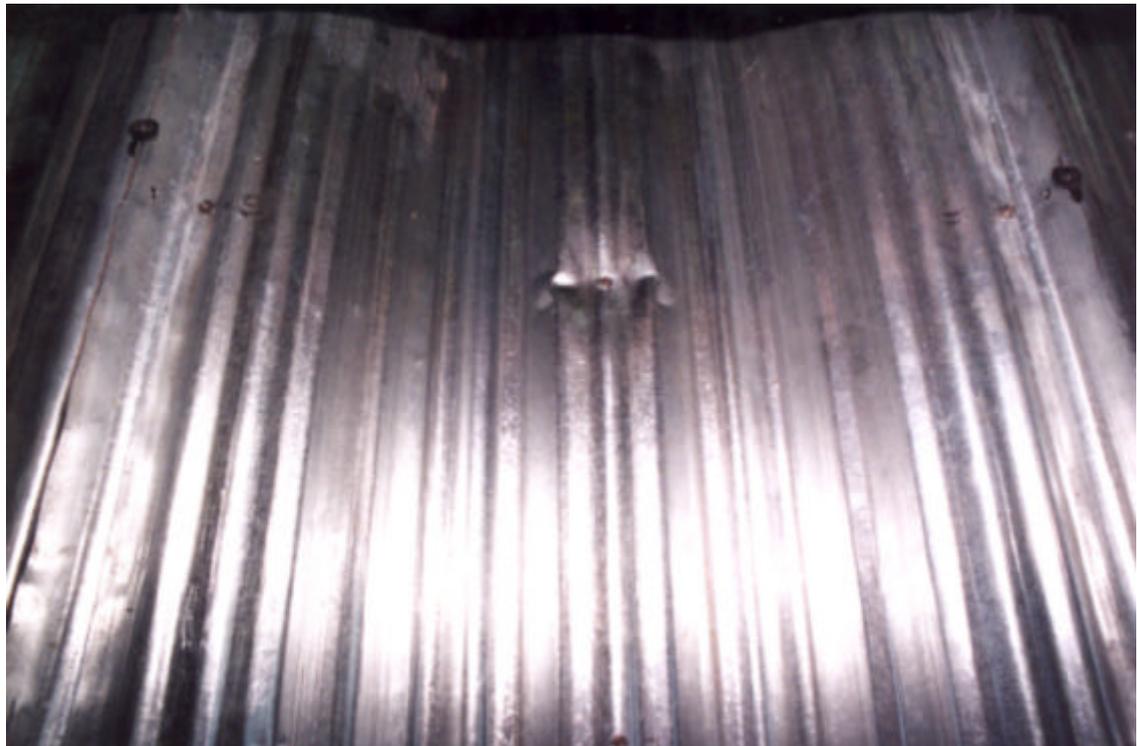


Figura 4.33 - Mostra, longitudinalmente na telha central, a ruptura por flambagem local no ponto central de medição (P5), na metade do vão do espécime, no ensaio E2-1 (ensaio 13).

### 4.3 ENSAIOS DO ESPÉCIME 3

Os ensaios do espécime de telhas, identificado pelo número 3, foram realizados de acordo com a seguinte ordem: E3-3, E3-4, E3-1 e E3-2.

#### 4.3.1 Ensaios E3-1, E3-2, E3-3 e E3-4

Nos ensaios E3-1, E3-3 e E3-4 o espécime de telhas foi submetido a uma carga transversal máxima de 8,89 kN aplicada nos terços do vão. Somente no ensaio E3-2 o espécime de telhas foi levado a ruptura com uma carga de 13,80 kN.

Na etapa de carga de 8,89 kN, considerando o vão de 3000 mm, os valores obtidos para a razão do deslocamento vertical medido no centro do espécime, ponto P5, telha central, em relação ao vão foram da ordem de 1/127 (23,6 mm), 1/109 (27,4 mm), 1/72 (41,2 mm), 1/133 (22,4 mm), respectivamente, E3-1, E3-2, E3-3 e E3-4. A razão da média dos deslocamentos verticais medidos na metade do espécime, pontos P10 e P11, abas retas da telha central, em relação ao vão foram da ordem de 1/447 (6,7 mm, E3-1), 1/491 (6,1 mm, E3-2), 1/476 (6,3 mm, E3-3) e 1/731 (4,1 mm, E3-4).

#### 4.3.2 Ensaio de ruptura do espécime 3

A telha direita (TD) rompeu quando o espécime foi submetido no ensaio E3-2 a uma carga transversal de 13,80 kN.

A falha ocorreu por flambagem local no ponto central (P8) da telha direita (TD), região de momento constante do espécime, conforme ilustra a Figura 4.47.

A última etapa de registro de medições de todos os pontos da instrumentação no ensaio, antes da aplicação da carga que ocasionou a ruptura do espécime de telhas, foi realizada quando a carga alcançou 12,83 kN.

Para esta carga, considerando o vão de 3000 mm, o valor obtido para a máxima razão do deslocamento vertical medido no centro do espécime, ponto P5, telha central, em relação ao vão foi da ordem de 1/74 (40,4 mm). Neste ensaio, para a carga de ruptura de 13,80 kN (espécime de telhas rompeu durante a realização

das medições), a máxima razão do deslocamento vertical medido no centro do espécime, ponto P5, telha central, em relação ao vão foi da ordem de 1/68 (43,9 mm). Ainda para a carga de 12,83 kN a máxima razão da média dos deslocamentos verticais medidos na metade do espécime, pontos P10 e P11, abas retas da telha central, em relação ao vão foi da ordem de 1/306 (9,8 mm).

Cabe registrar que, por ocasião do carregamento do espécime, na etapa de carga de 9,88 kN houve necessidade de interromper o ensaio face ao surgimento de uma instabilidade localizada gerada pela inclinação de um dos perfis utilizado como parte da carga de 3,72 kN. Feita a correção se procedeu o carregamento do espécime até a carga de 9,88 kN. Isto esclarece o registro de duas medições nessa etapa de carga no ensaio do espécime em apreço.

O Quadro 4.5 mostra os deslocamentos verticais medidos no centro do espécime (ponto P5) e o Quadro 4.6 registra o valor médio dos deslocamentos verticais medidos na metade do espécime (pontos P10 e P11), abas retas da telha central. Os resultados apresentados nos Quadros 4.5 e 4.6 correspondem aos quatro ensaios realizados com o espécime 3.

Quadro 4.5 - Deslocamentos verticais no ponto central do vão do espécime 3

Carga (kN)	DV P5-TC-E3-1	DV P5-TC-E3-2	DV P5-TC-E3-3	DV P5-TC-E3-4
	( mm )			
0	0	0	0	0
3,72	10,6	12,6	17,8	9,5
4,92	12,8	15,0	20,7	11,5
5,92	15,4	18,1	24,9	14,0
6,92	17,8	21,4	30,0	16,5
7,92	20,8	24,7	36,6	19,8
8,89	23,6	27,4	41,2	22,4
9,88	-	32,1	-	-
9,88	-	31,4	-	-
10,87	-	34,1	-	-
11,84	-	36,7	-	-
12,83	-	40,4	-	-
13,80	-	43,9 ( * )	-	-
3,72	16,0	-	29,5	15,6
0	1,0	1,8	3,4	1,1
0 ( ** )	0,6	-	3,2	0,9

Observações: ( \* ) Ruptura na telha direita do espécime com carga de 13,80 kN;

( \*\* ) Medições realizadas 16 horas após o descarregamento do espécime.

Quadro 4.6 - Média dos deslocamentos verticais dos pontos das abas retas da telha central na metade do vão do espécime 3

Carga (kN)	DVM (P10 e P11)-TC-E3-1	DVM (P10 e P11)-TC-E3-2	DVM (P10 e P11)-TC-E3-3	DVM (P10 e P11)-TC-E3-4
	( mm )			
0	0	0	0	0
3,72	2,7	1,9	2,1	1,1
4,92	3,2	2,6	2,5	1,7
5,92	4,1	3,5	3,3	2,3
6,92	4,7	4,4	4,2	2,9
7,92	5,7	5,3	5,3	3,5
8,89	6,7	6,1	6,3	4,1
9,88	-	7,0	-	-
9,88	-	6,6	-	-
10,87	-	7,6	-	-
11,84	-	8,5	-	-
12,83	-	9,8	-	-
13,80	-	( * )	-	-
3,72	3,3	-	3,5	1,9
0	0,6	2,7	2,0	0,2
0 ( ** )	0,7	-	2,0	0,3

Observações: ( \* ) Ruptura da telha direita do espécime com carga de 13,80 kN;

( \*\* ) Medições realizadas 16 horas após o descarregamento do espécime.

### 4.3.3 Apresentação gráfica dos resultados do espécime 3

As Figuras, numeradas de 4.34 até 4.45, são gráficos que mostram o comportamento do espécime 3, no centro e no terços do vão, para as quatro condições de ligação lateral de suas telhas ao longo do comprimento. No anexo A são apresentados os valores dos deslocamentos verticais que geraram estes gráficos.

As Figuras 4.34 e 4.43 ilustram, respectivamente, os resultados apresentados nos Quadros 4.5 e 4.6. Os valores de carga, registrados tanto nos referidos Quadros como nas Figuras dos gráficos, correspondem a carga aplicada em cada linha de carregamento do espécime de telhas.

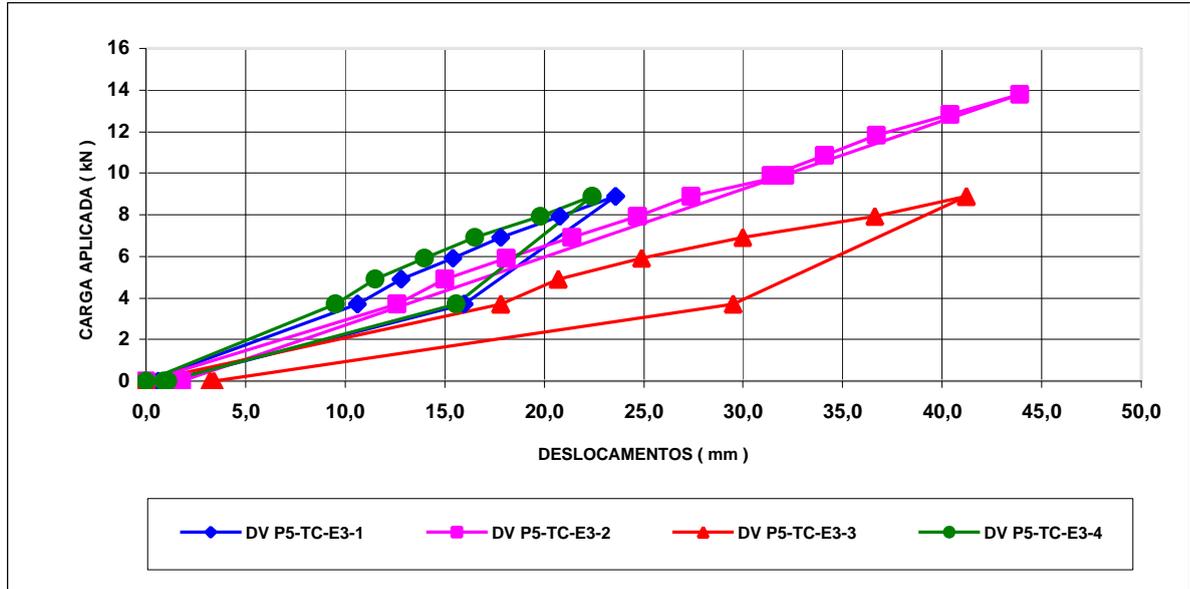


Figura 4.34 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P5, telha central, no centro do vão do espécime 3.

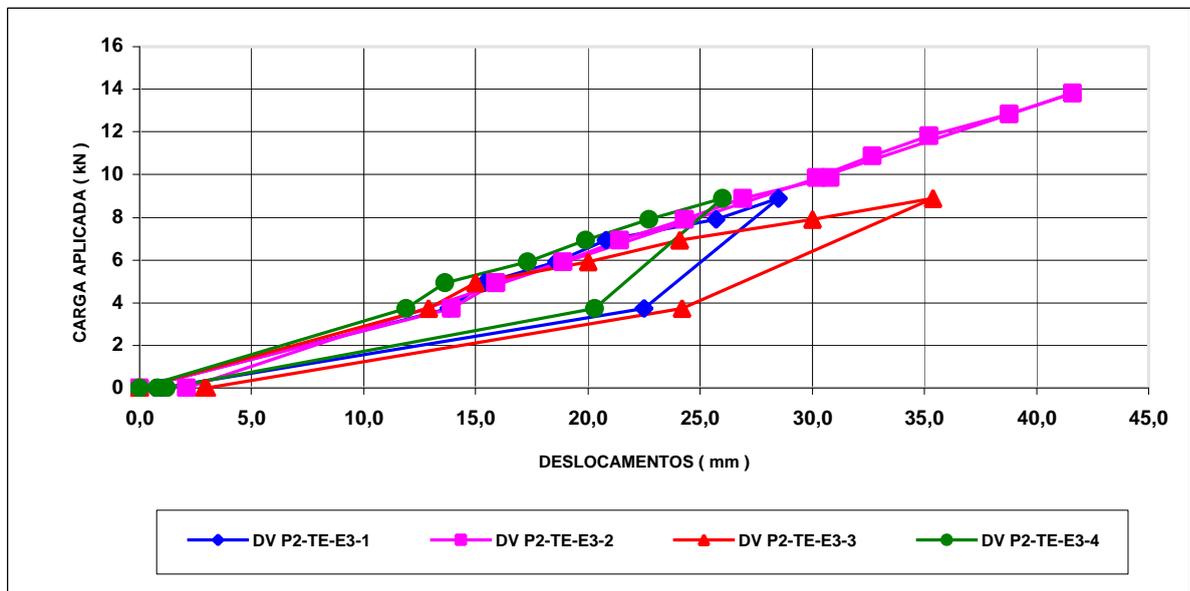


Figura 4.35 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P2, telha esquerda, no centro do vão do espécime 3.

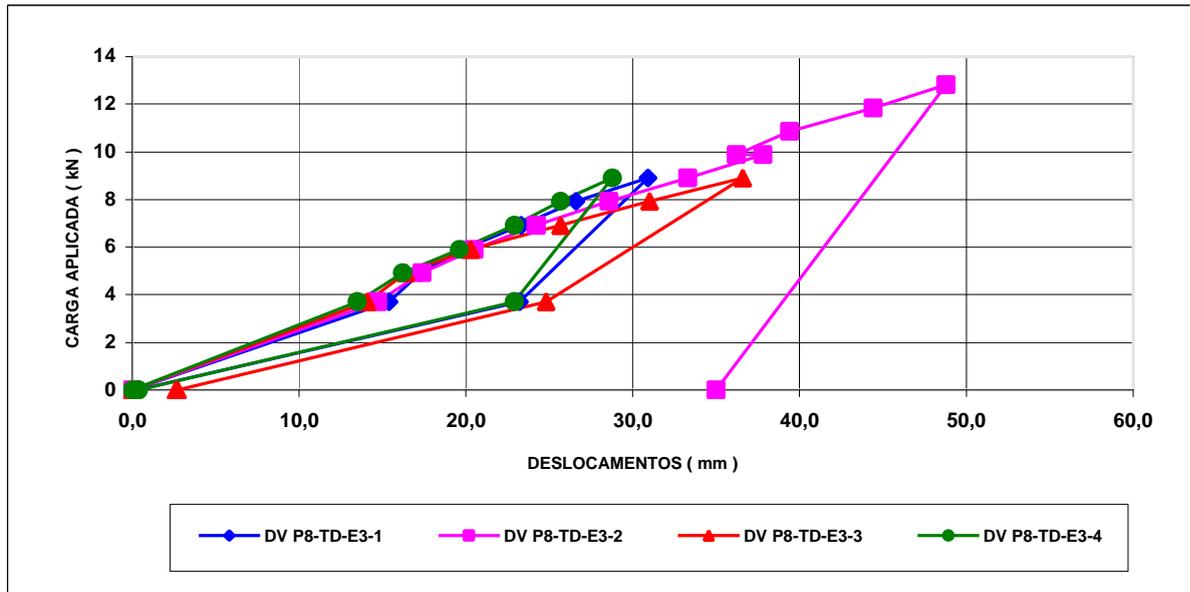


Figura 4.36 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P8, telha direita, no centro do vão do espécime 3.

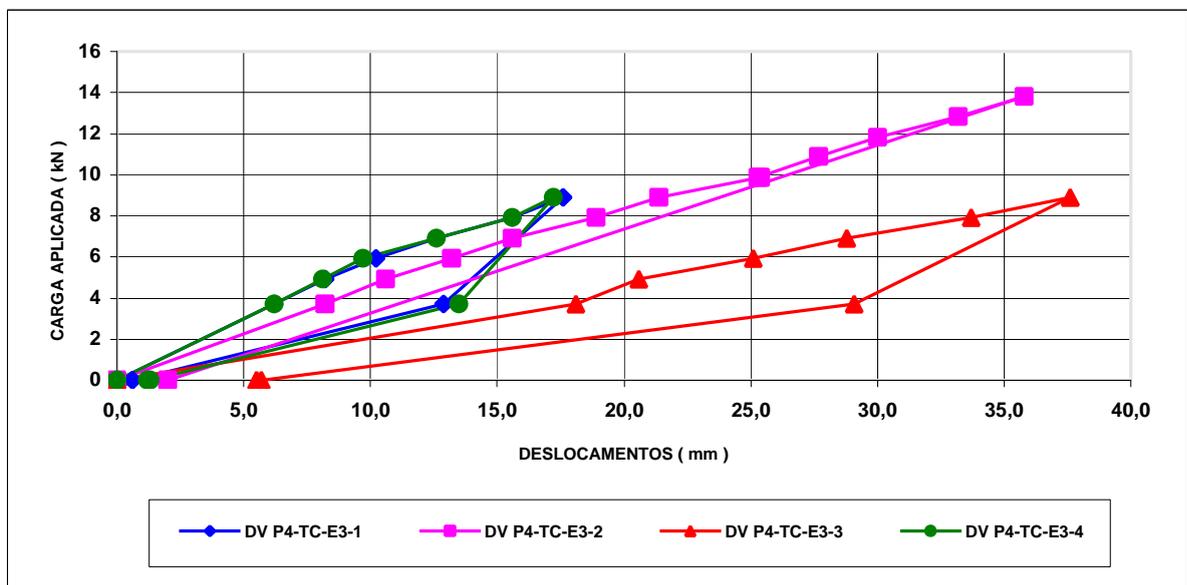


Figura 4.37 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P4, telha central, no terço do vão referido ao apoio sul do espécime 3.

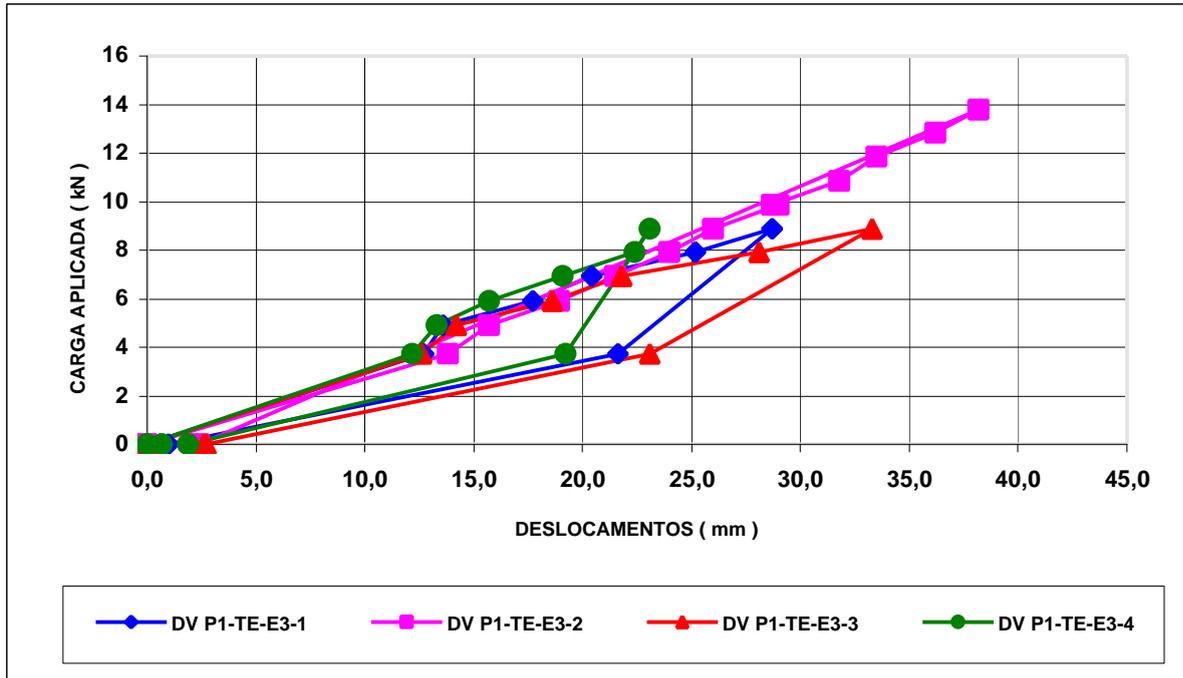


Figura 4.38 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P1, telha esquerda, no terço do vão referido ao apoio sul do espécime 3.

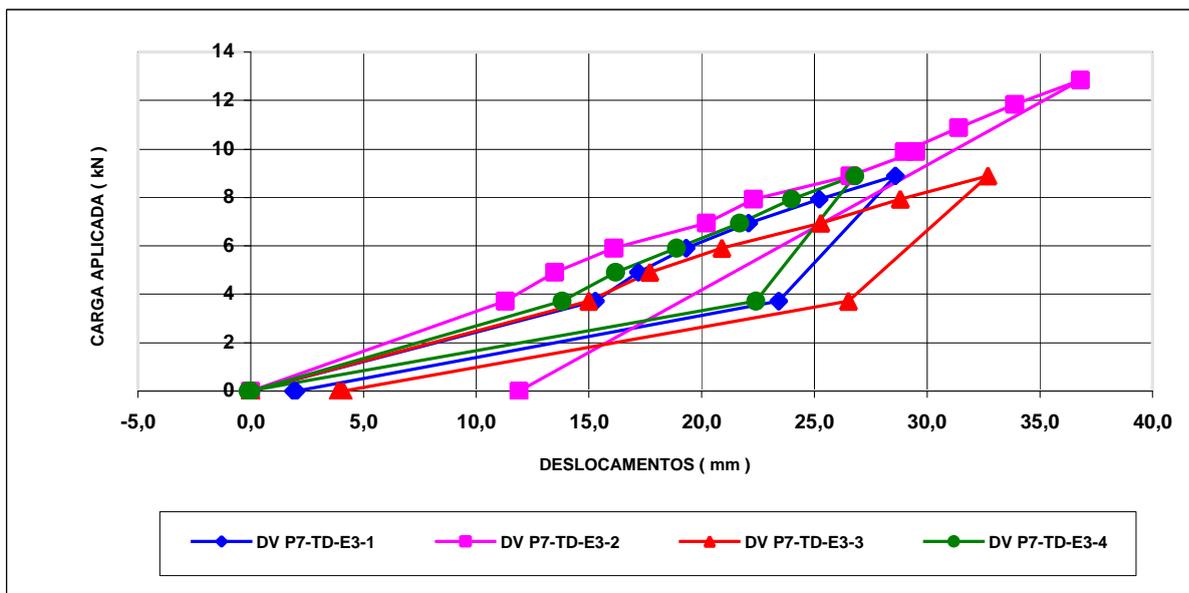


Figura 4.39 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P7, telha direita, no terço do vão referido ao apoio sul do espécime 3.

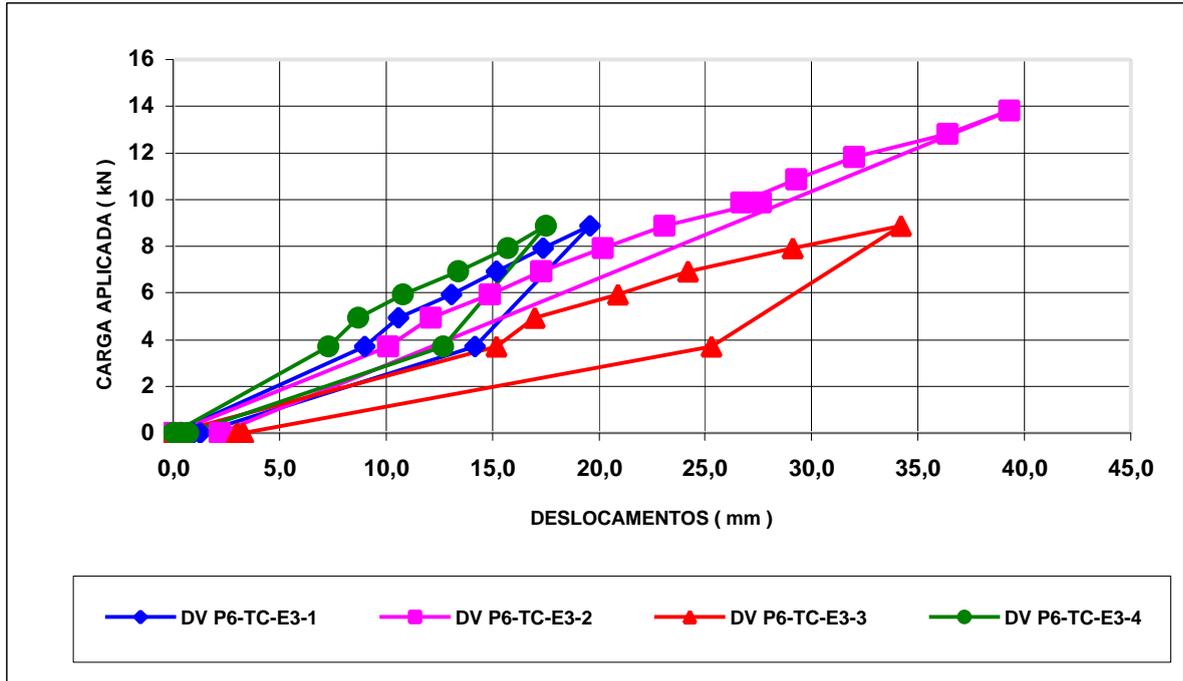


Figura 4.40 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P6, telha central, no terço do vão referido ao apoio norte do espécime 3.

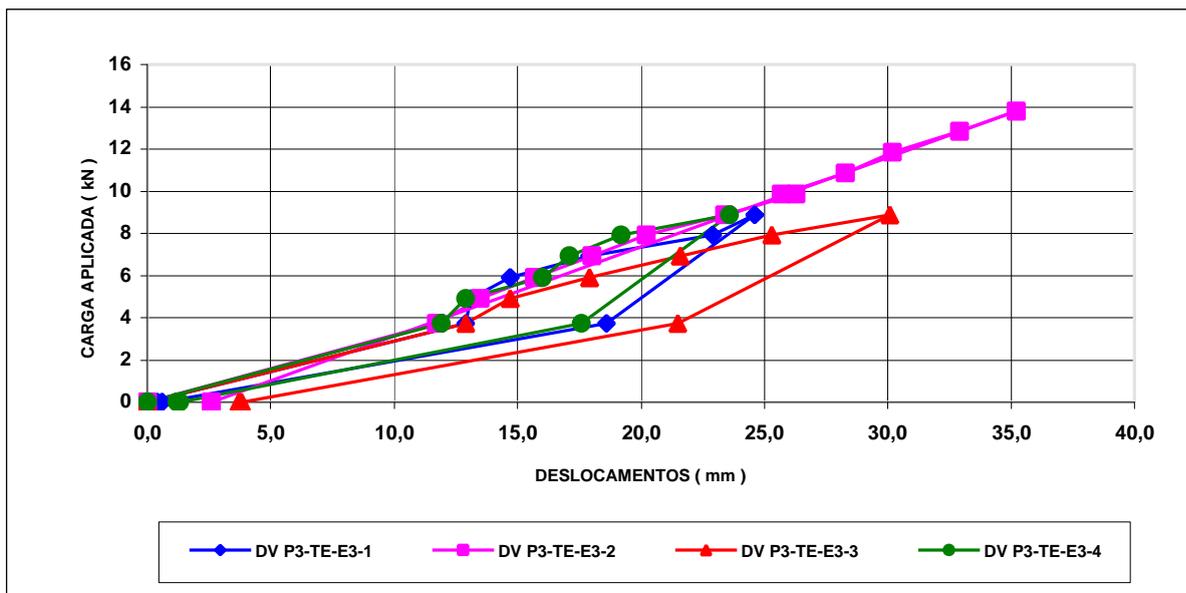


Figura 4.41 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P3, telha esquerda, no terço do vão referido ao apoio norte do espécime 3.

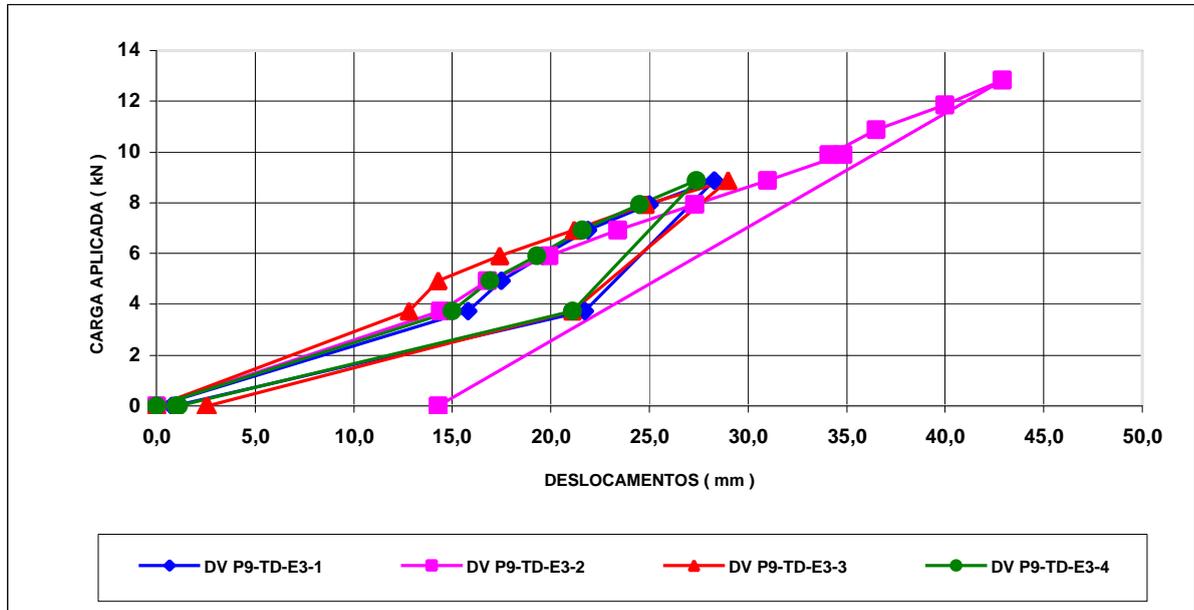


Figura 4.42 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P9, telha direita, no terço do vão referido ao apoio norte do espécime 3.

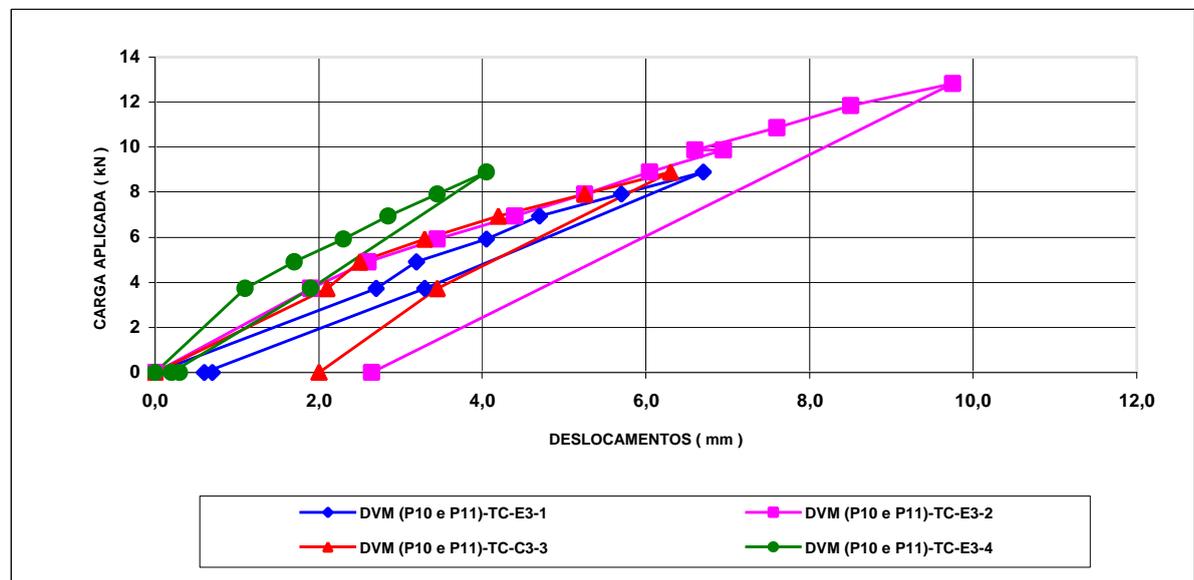


Figura 4.43 - Média dos deslocamentos verticais medidos nos pontos P10 e P11, abas retas da telha central, na metade do vão do espécime 3.

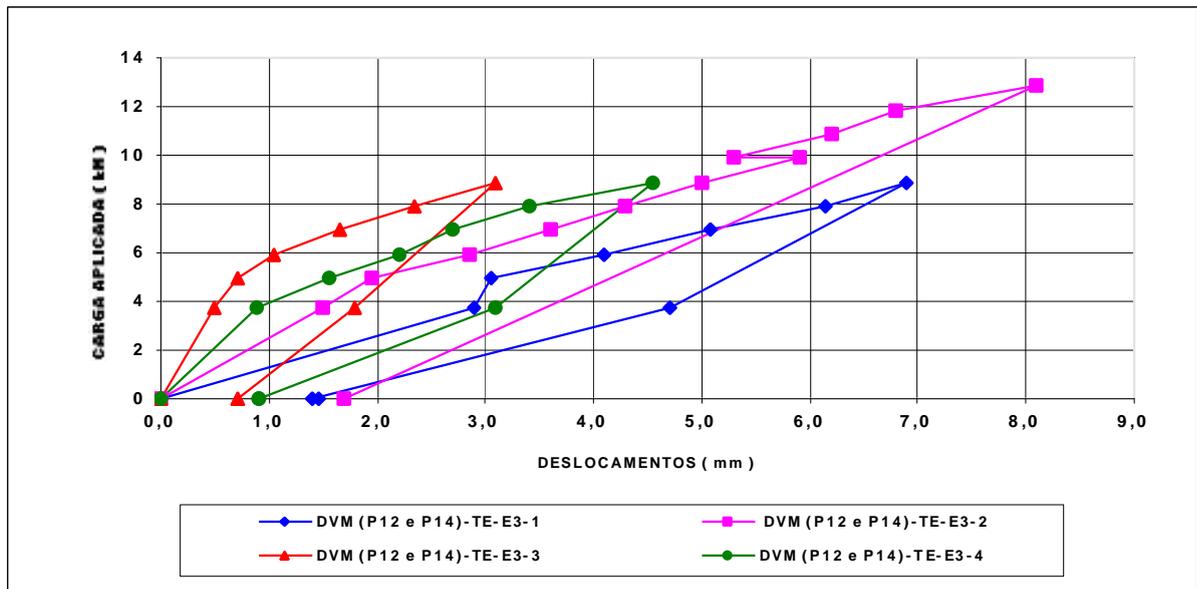


Figura 4.44 - Média dos deslocamentos verticais medidos nos pontos P12 e P14, abas retas da telha esquerda, na metade do vão do espécime 3.

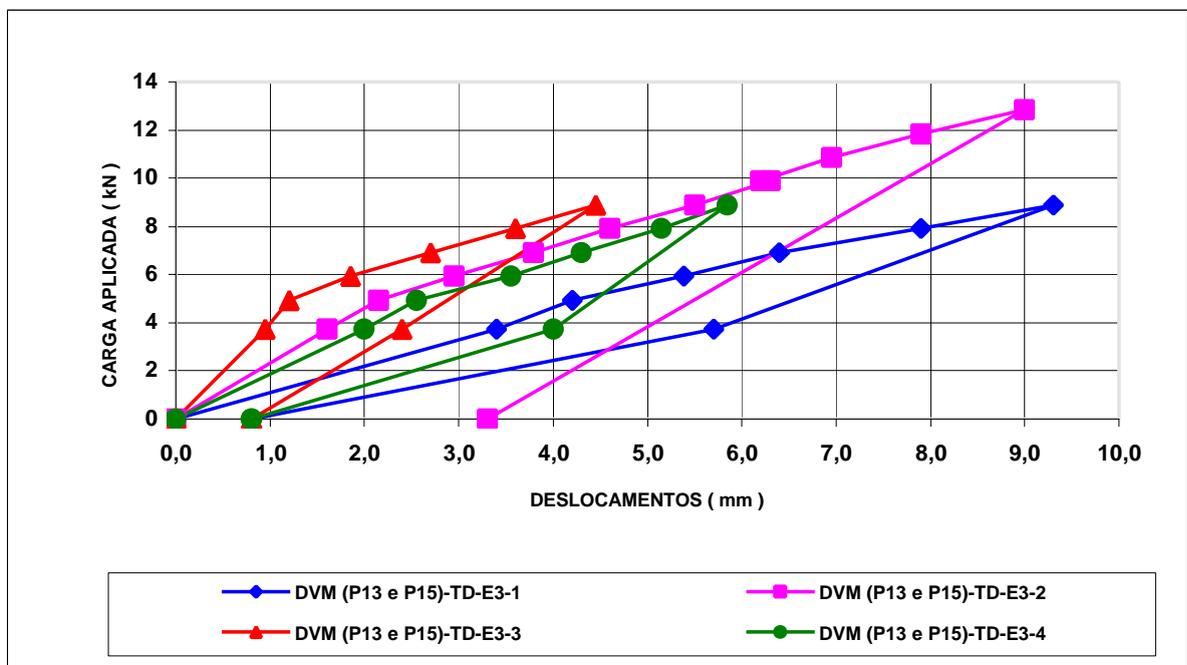


Figura 4.45 - Média dos deslocamentos verticais medidos nos pontos P13 e P15, abas retas da telha direita, na metade do vão do espécime 3.

#### 4.3.4 Documentação fotográfica do espécime 3



Figura 4.46 - Detalhe, na telha direita, próximo do apoio sul do espécime, de um leve dobramento localizado, decorrente do processo de perfilação, observado antes da utilização da telha nos ensaios. Esse tipo de dobramento foi observado em outros locais da telha direita e também nas demais telhas (central e esquerda) do espécime 3.

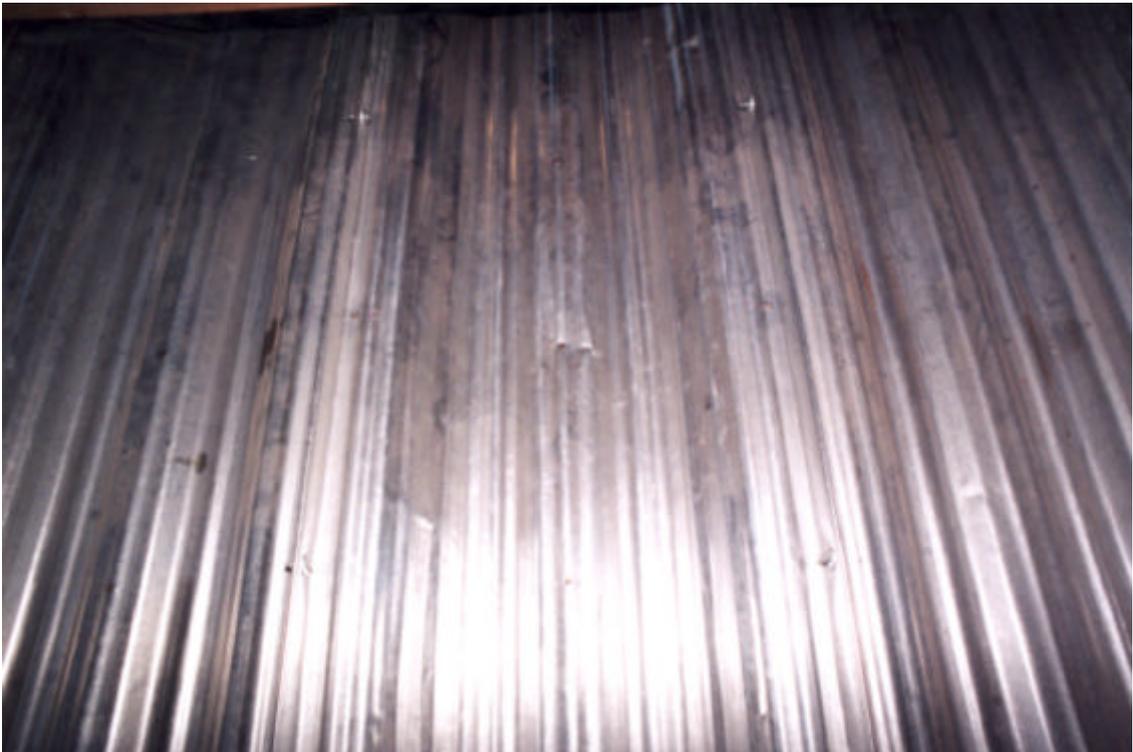


Figura 4.47 - Mostra, longitudinalmente na telha direita, a ruptura por flambagem local no ponto central de medição (P8), na metade do vão do espécime, no ensaio E3-2 (ensaio 14).

#### 4.4 ENSAIOS DO ESPÉCIME 4

A ordem de realização dos ensaios do espécime de telhas, identificado pelo número 4, foi a seguinte: E4-4, E4-1, E4-2 e E4-3.

##### 4.4.1 Ensaios E4-1, E4-2, E4-3 e E4-4

O espécime de telhas, nos ensaios E4-1, E4-2 e E4-4, foi submetido a uma carga transversal máxima de 8,89 kN aplicada nos terços do vão. O espécime de telhas foi levado a ruptura com uma carga de 11,34 kN no ensaio E4-3.

Na etapa de carga de 8,89 kN, considerando o vão de 3000 mm, os resultados registrados para a razão do deslocamento vertical medido no centro do espécime, ponto P5, telha central, em relação ao vão foram da ordem de 1/105 (28,4 mm), 1/102 (29,2 mm), 1/75 (39,8 mm), 1/98 (30,5 mm), respectivamente, E4-1, E4-2, E4-3 e E4-4. A razão da média dos deslocamentos verticais medidos na metade do espécime, pontos P10 e P11, abas retas da telha central, em relação ao vão foram da ordem de 1/461 (6,5 mm, E4-1), 1/461 (6,5 mm, E4-2), 1/545 (5,5 mm, E4-3) e 1/638 (4,7 mm, E4-4).

##### 4.4.2 Ensaio de ruptura do espécime 4

No ensaio E4-3 quando o espécime foi submetido a uma carga transversal de 11,34 kN a telha central (TC) rompeu.

A falha ocorreu por flambagem local no ponto central (P5) da telha central (TC), região de momento constante do conjunto, conforme mostra a Figura 4.61.

Neste ensaio o último registro de medições de todos os pontos da instrumentação, antes da aplicação da carga que ocasionou a ruptura do espécime de telhas, foi realizado quando a carga alcançou 10,87 kN.

Para esta carga, considerando o vão de 3000 mm, o valor obtido para a máxima razão do deslocamento vertical medido no centro do espécime, ponto P5, telha central, em relação ao vão foi da ordem de 1/55 (53,8 mm). Já para a máxima razão da média dos deslocamentos verticais medidos na metade do espécime, pontos P10 e P11, abas retas da telha central, em relação ao vão foi da ordem de 1/422 (7,1 mm).

O Quadro 4.7 mostra os deslocamentos verticais medidos no centro do espécime (ponto P5) e o Quadro 4.8 registra o valor médio dos deslocamentos verticais medidos na metade do espécime (pontos P10 e P11), abas retas da telha central. Os resultados apresentados nos Quadros 4.7 e 4.8 correspondem aos quatro ensaios realizados com o espécime 4.

Quadro 4.7 - Deslocamentos verticais no ponto central do vão do espécime 4

Carga (kN)	DV P5-TC-E4-1	DV P5-TC-E4-2	DV P5-TC-E4-3	DV P5-TC-E4-4
	( mm )			
0	0	0	0	0
3,72	11,4	13,5	19,1	13,5
4,92	14,7	17,6	21,0	15,2
5,92	17,1	19,4	25,5	18,8
6,92	20,1	22,5	29,9	22,2
7,92	24,6	26,1	35,1	26,7
8,89	28,4	29,2	39,8	30,5
9,88	-	-	45,6	-
10,87	-	-	53,8	-
11,34	-	-	( * )	-
3,72	19,3	21,4	-	22,8
0	0,6	1,0	45,5	2,5
0 ( ** )	0,6	0,9	-	2,2

Observações: ( \* ) Ruptura da telha central do espécime com carga de 11,34 kN;

( \*\* ) Medições realizadas 16 horas após o descarregamento do espécime.

Quadro 4.8 - Média dos deslocamentos verticais dos pontos das abas retas da telha central na metade do vão do espécime 4

Carga (kN)	DVM (P10 e P11)-TC-EJ4-1	DVM (P10 e P11)-TC-E4-2	DVM (P10 e P11)-TC-E4-3	DVM (P10 e P11)-TC-E4-4
	( mm )			
0	0	0	0	0
3,72	2,3	2,4	2,3	1,2
4,92	3,1	3,5	2,6	1,6
5,92	3,7	4,2	3,4	2,3
6,92	4,4	5,0	4,1	3,0
7,92	5,4	5,7	4,8	3,8
8,89	6,5	6,5	5,5	4,7
9,88	-	-	6,2	-
10,87	-	-	7,1	-
11,34	-	-	( * )	-
3,72	3,3	3,3	-	2,4
0	0,7	0,7	2,7	0,7
0 ( ** )	0,8	0,7	-	0,7

Observações: ( \* ) Ruptura da telha central do espécime com carga de 11,34 kN;

( \*\* ) Medições realizadas 16 horas após o descarregamento do espécime.

#### 4.4.3 Apresentação gráfica dos resultados do espécime 4

As Figuras, numeradas de 4.48 até 4.59, são gráficos que mostram o comportamento do espécime, no centro e no terços do vão, para as quatro condições de ligação lateral de suas telhas ao longo do comprimento. No anexo A são apresentados os valores dos deslocamentos verticais que geraram estes gráficos.

As Figuras 4.48 e 4.57 ilustram, respectivamente, os resultados apresentados nos Quadros 4.7 e 4.8. Os valores de carga, registrados tanto nos referidos Quadros como nas Figuras dos gráficos, correspondem a carga aplicada em cada linha de carregamento do espécime de telhas.

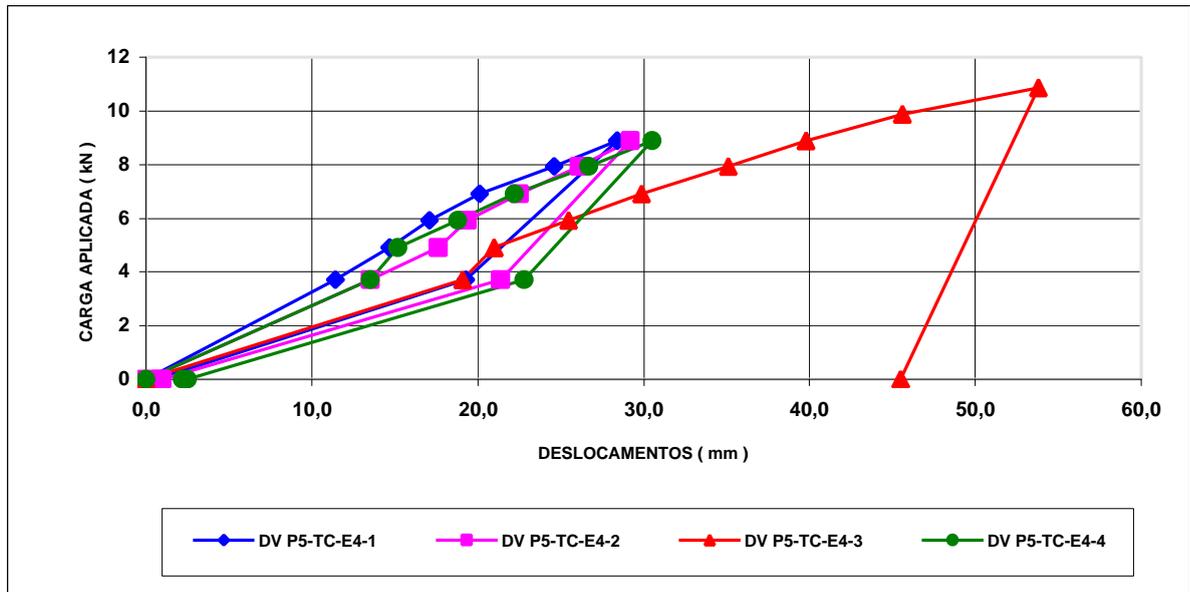


Figura 4.48 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P5, telha central, no centro do vão do espécime 4.

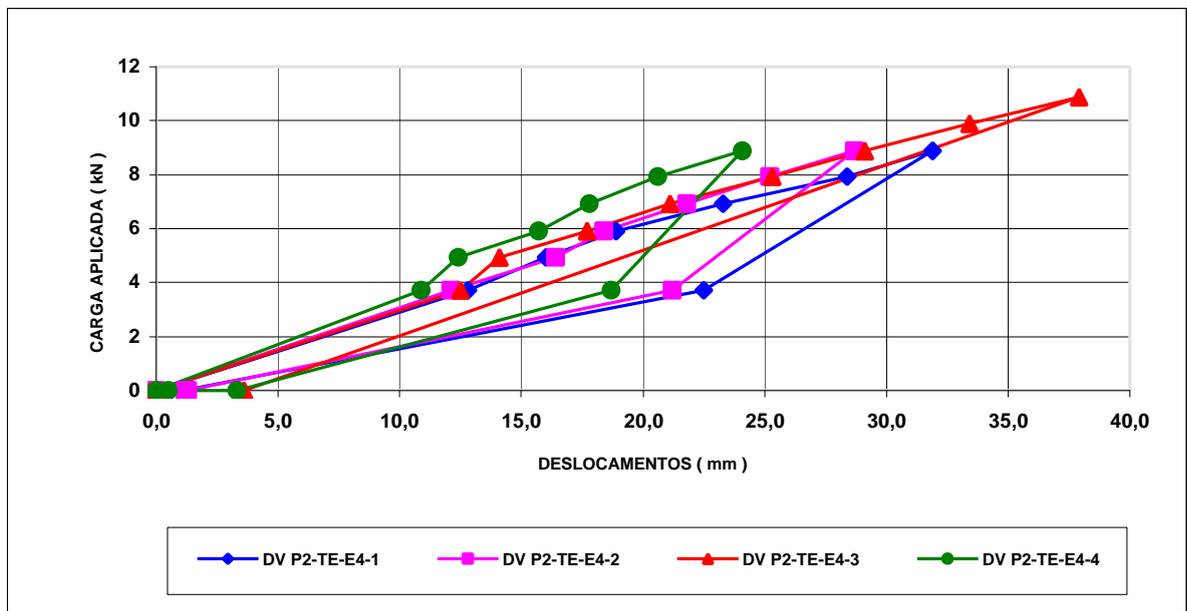


Figura 4.49 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P2, telha esquerda, no centro do vão do espécime 4.

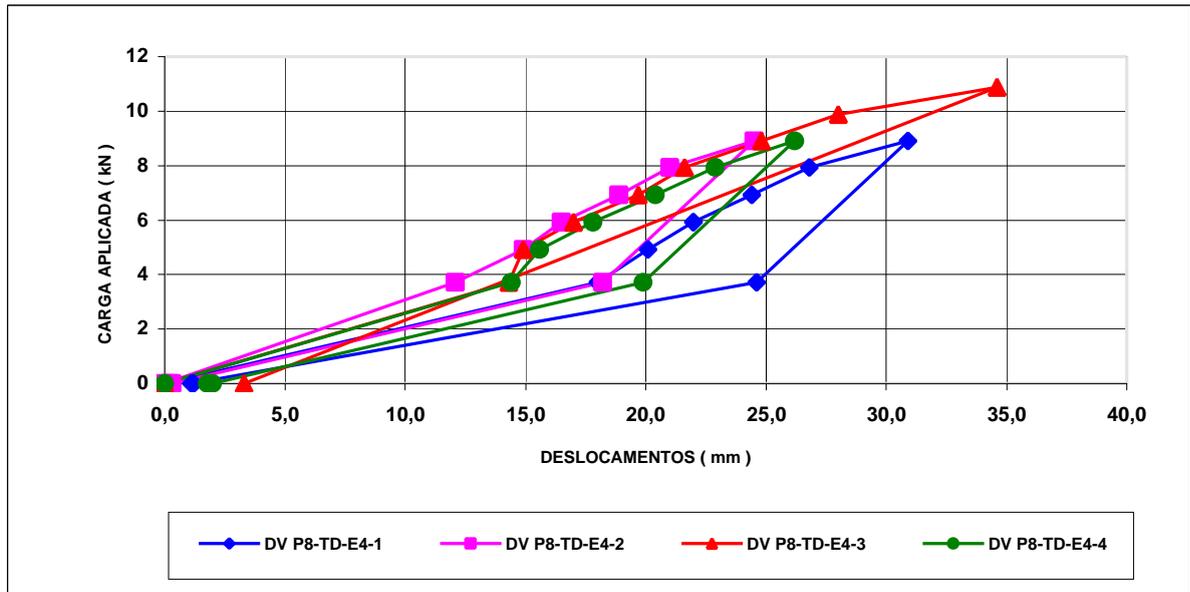


Figura 4.50 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P8, telha direita, no centro do vão do espécime 4.

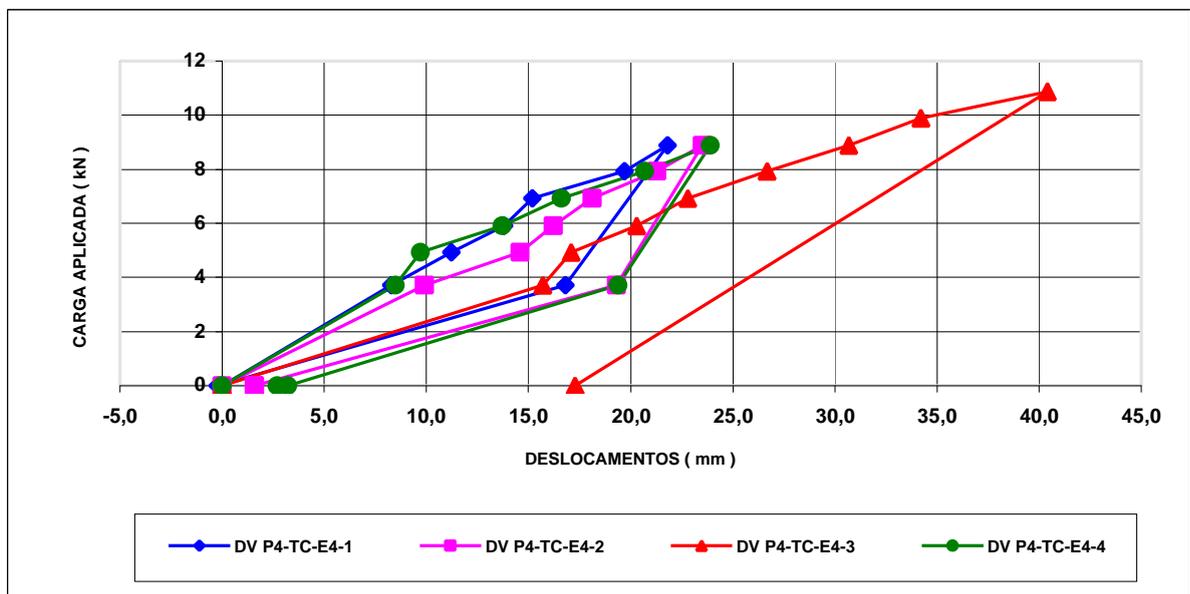


Figura 4.51 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P4, telha central, no terço do vão referido ao apoio sul do espécime 4.

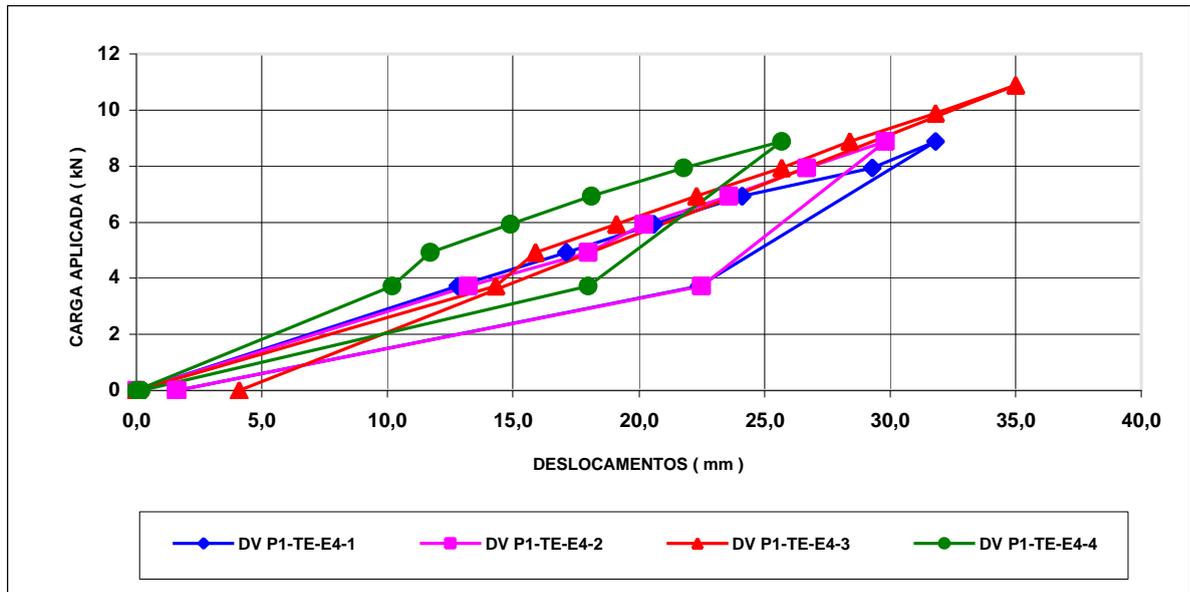


Figura 4.52 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P1, telha esquerda, no terço do vão referido ao apoio sul do espécime 4.

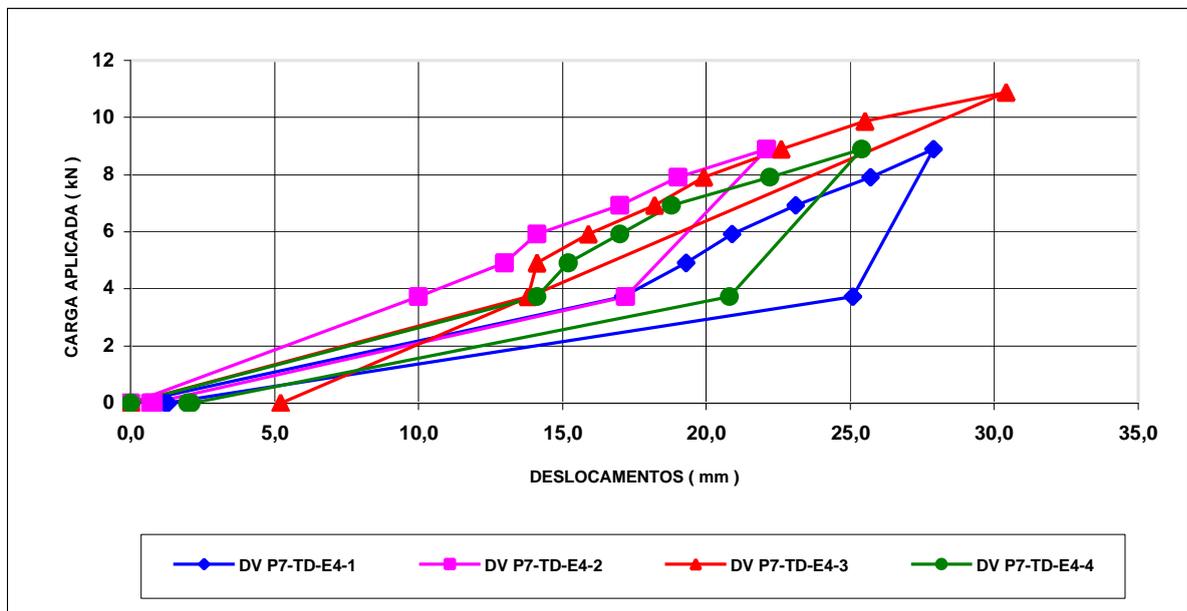


Figura 4.53 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P7, telha direita, no terço do vão referido ao apoio sul do espécime 4.

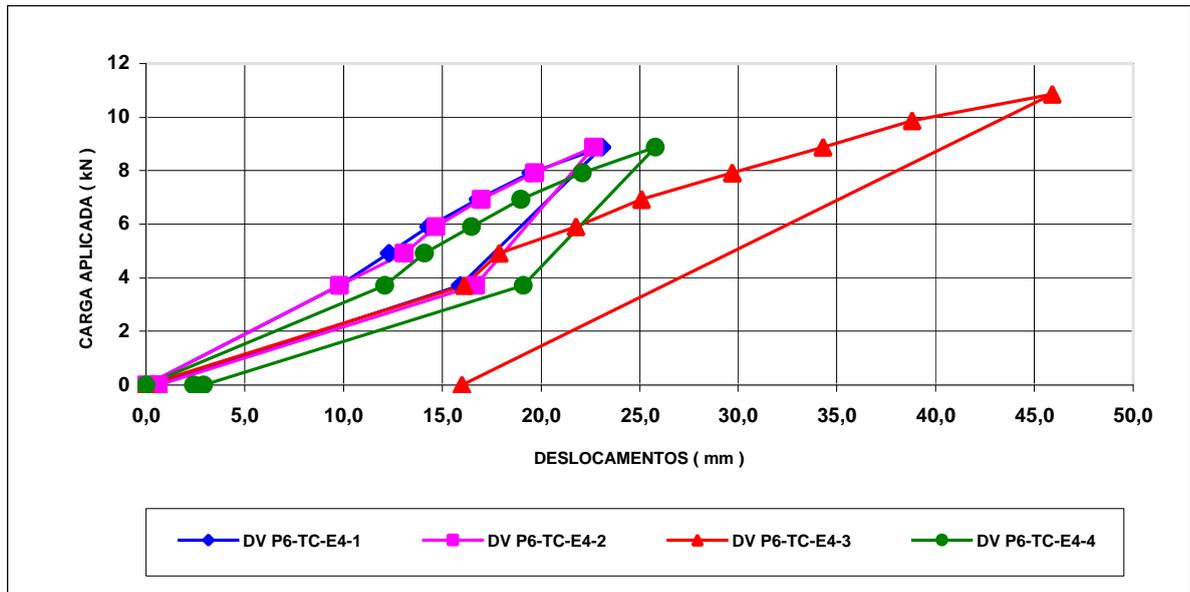


Figura 4.54 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P6, telha central, no terço do vão referido ao apoio norte do espécime 4.

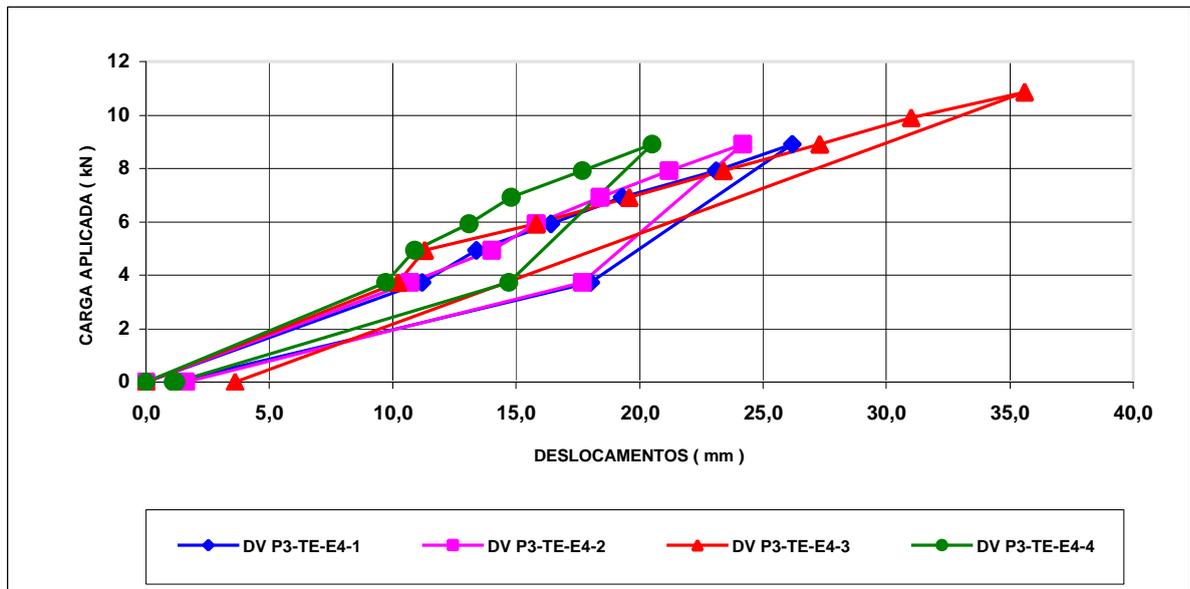


Figura 4.55 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P3, telha esquerda, no terço do vão referido ao apoio norte do espécime 4.

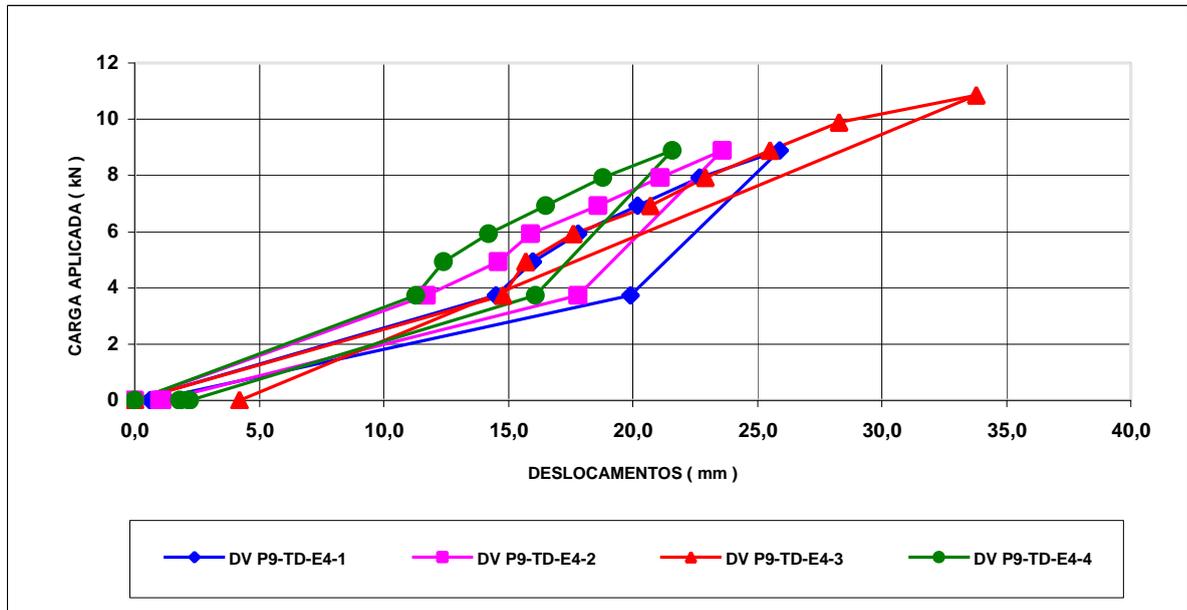


Figura 4.56 - Deslocamentos verticais medidos no ponto P9, telha direita, no terço do vão referido ao apoio norte do espécime 4.

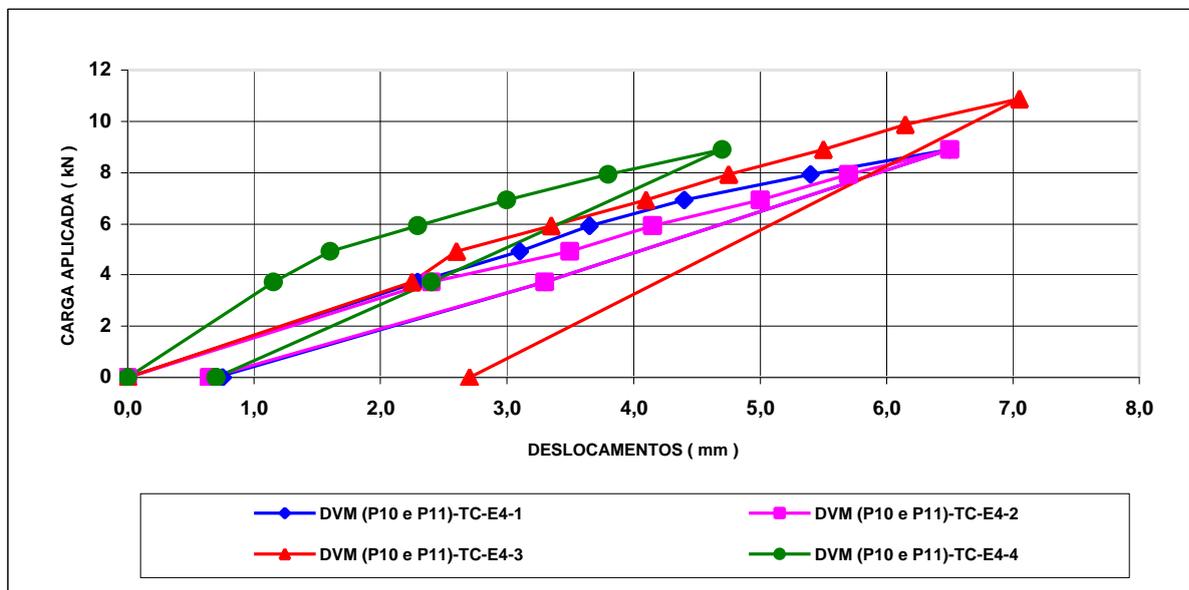


Figura 4.57 - Média dos deslocamentos verticais medidos nos pontos P10 e P11, abas retas da telha central, na metade do vão do espécime 4.

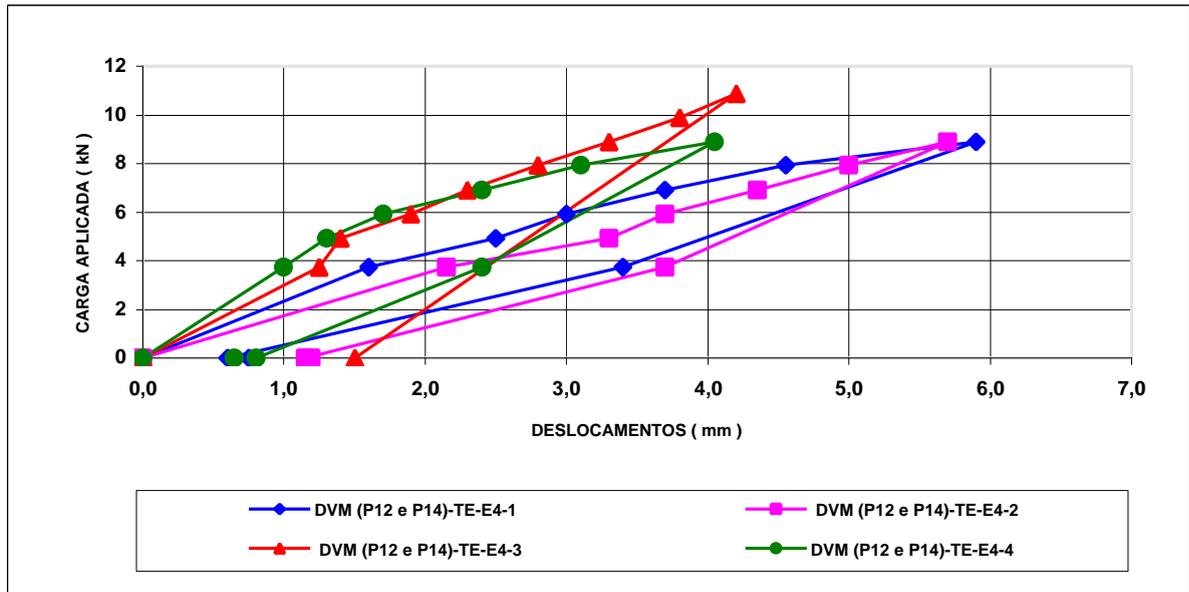


Figura 4.58 - Média dos deslocamentos verticais medidos nos pontos P12 e P14, abas retas da telha esquerda, na metade do vão do espécime 4.

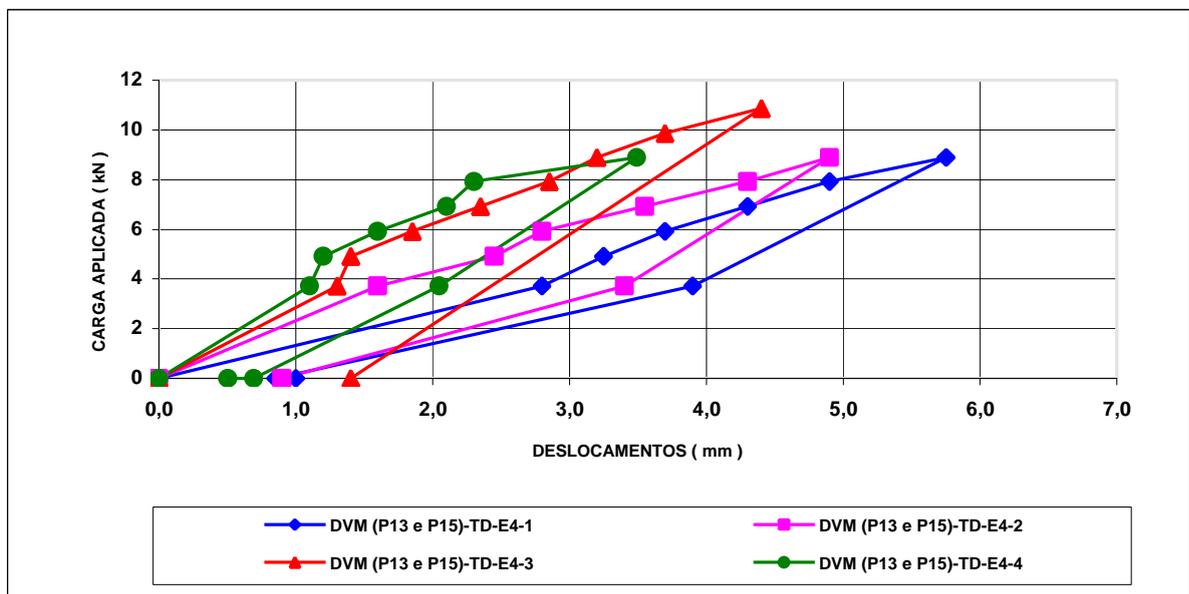


Figura 4.59 - Média dos deslocamentos verticais medidos nos pontos P13 e P15, abas retas da telha direita, na metade do vão do espécime 4.

#### 4.4.4 Documentação fotográfica do espécime 4

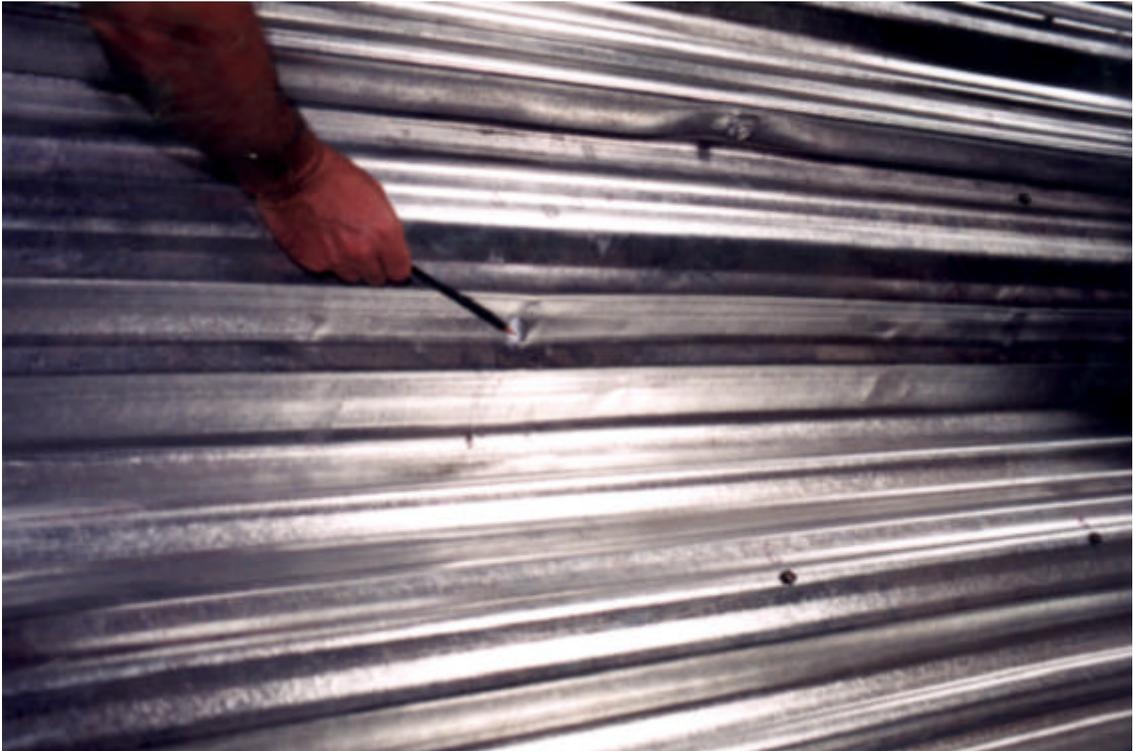


Figura 4.60 - Detalhe, na telha direita, próximo do ponto P9, de um leve dobramento localizado, decorrente do processo de perfilação, observado antes da utilização da telha nos ensaios. Esse tipo de dobramento foi observado em outros locais da telha direita e também nas demais telhas (central e esquerda) do espécime 4.

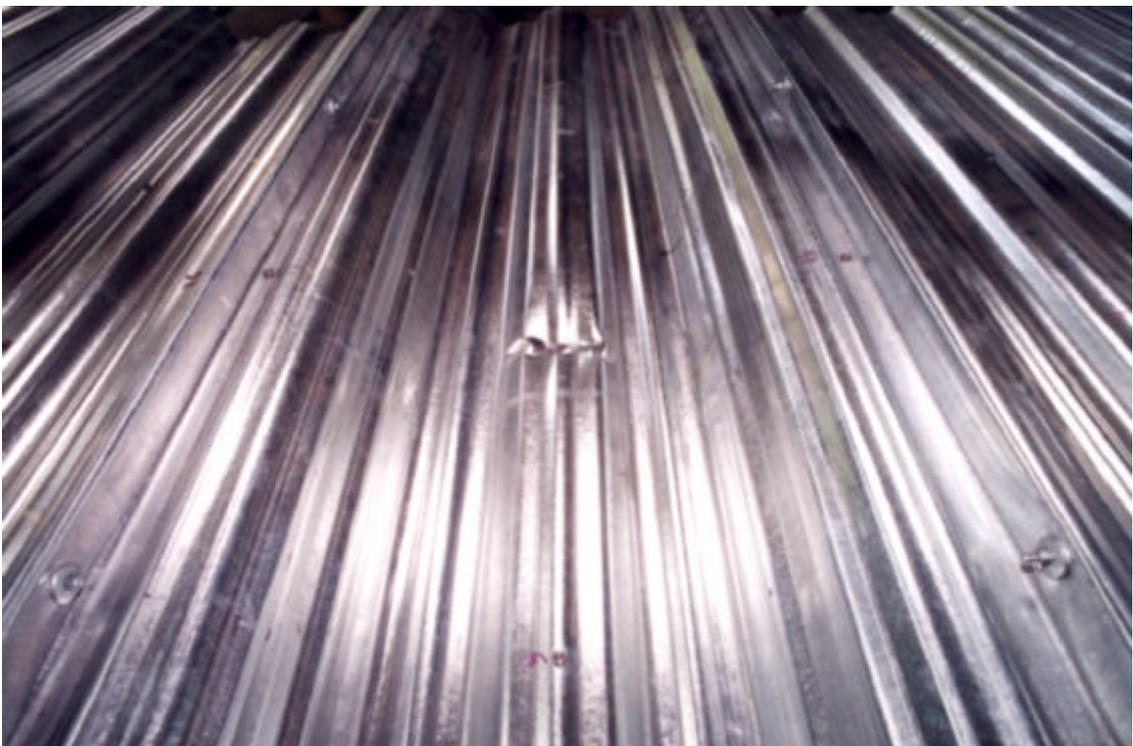


Figura 4.61 - Identifica a ruptura por flambagem local ocorrida na telha central no ensaio E4-3 (ensaio 15), no ponto central de medição (P5), na metade do vão do espécime, quando a carga aplicada atingiu 11,34 kN.

## 5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

O programa experimental compreendeu a realização de 16 (dezesesseis) ensaios de flexão em 4 (quatro) espécimes constituídos de 5 (cinco) telhas, sendo avaliadas 3 (três) condições diferentes de ligação entre o elemento capa e as telhas tomando-se como referência a condição de ligação das telhas ensaiadas sem a presença do elemento capa. A avaliação está baseada no comportamento elástico de cada espécime ensaiado, para cada uma das 4 (quatro) condições de ligação das telhas, até atingir a etapa de carregamento de 8,89 kN, considerando-se a média dos deslocamentos verticais medidos no ponto central da telha disposta no centro dos espécimes constituídos de 5 (cinco) telhas. É conveniente ressaltar que os 4 (quatro) espécimes foram ensaiados para uma mesma condição de ligação das telhas, sendo que somente um dos espécimes foi conduzido até a ruptura. A avaliação realizada se baseia no comportamento elástico e na resistência última à flexão dos espécimes de telhas ensaiados. Os resultados experimentais foram comparados com os resultados teóricos gerados analiticamente a partir dos critérios de cálculo e das especificações recomendadas pela LRFD – AISI (1991) e com os obtidos através de uma análise linear elástica com base no método de elementos finitos. Complementando a análise dos resultados experimentais foram os mesmos submetidos a uma avaliação estatística.

### 5.1 AVALIAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Os deslocamentos verticais médios utilizados na presente avaliação foram obtidos a partir da média aritmética dos resultados dos quatro ensaios que contemplam cada uma das condições de ligação das telhas, já descritas no item 3.1 do capítulo 3.

Neste caso foi avaliada a efetividade da condição de ligação das telhas, designadas como 2, 3 e 4 em relação a condição de ligação das telhas designada como 1.

A referida avaliação tomou como referência o ponto central das telhas centrais (ponto P5), mesmo que nos ensaios, principalmente dos espécimes 1 e 3, tenham sido observados deslocamentos verticais maiores no ponto central das

telhas laterais, o cálculo teórico indica que o deslocamento vertical máximo para o espécime de telhas ocorre no ponto P5.

Os valores médios dos deslocamentos verticais, para cada uma das condições de ligação das telhas, constam do Quadro 5.1 e foram utilizados para criar o gráfico da Figura 5.1.

A avaliação foi realizada para a média dos deslocamentos verticais da etapa de carregamento de 8,89 kN (78,4% da menor carga de ruptura registrada nos ensaios), valor máximo de carga aplicada nos espécimes antes da realização dos ensaios em que as telhas foram submetidas a ruptura.

Desta forma, na etapa de carga de 8,89 kN, a média aritmética dos deslocamentos verticais mostra que o desempenho da condição de ligação das telhas designada como 2 (presença do elemento capa na ligação das telhas), 29,8 mm, é praticamente igual ao registrado na condição de ligação das telhas designada como 1 (sem a presença do elemento capa na ligação das telhas), 30,5 mm. Diante da pequena diferença observada cabe acrescentar que a presença do elemento capa na ligação das telhas não contribui significativamente para melhorar a rigidez dos espécimes.

O desempenho da condição de ligação das telhas designada como 4 (27,2 mm) se mostra bastante tímido em relação a condição de ligação designada como 1 (30,5 mm). É conveniente ressaltar que esse pequeno acréscimo de rigidez, na condição de ligação das telhas designada como 4, deve ser associado muito mais a adição de 12 parafusos na linha de fixação longitudinal das telhas (ver Figuras 4.16 e 4.17) do que pela presença do elemento capa.

Finalmente, na condição de ligação das telhas designada como 3 (33,1 mm), se observa que os espécimes apresentaram uma redução de rigidez em relação a condição de ligação designada como 1 (30,5 mm).

A perda de rigidez dos espécimes, apontada pela média aritmética dos deslocamentos verticais, para a condição de ligação das telhas designada como 3, foi observada nas etapas de carga de 6,92 a 8,89 kN. Essa perda de rigidez pode estar associada ao formato do esmagamento feito nos elementos capa-telha, na posição dos parafusos. O referido esmagamento pode ter acarretado uma redução da efetividade do travamento do parafuso na ligação capa-telha (ver Figuras 3.7 e 3.8). Isto possibilitaria um comportamento mais flexível do espécime de telhas por ocasião do carregamento, principalmente nas etapas relativas aos maiores valores

de carga aplicada. Além disso é necessário ressaltar que a condição de ligação das telhas designada como 1, na etapa de carga de 4,92 kN, apresenta um comportamento diferenciado em relação as curvas que constituem as demais condições de ligação das telhas (ver Figura 5.1).

Convém também avaliar o desempenho dos espécimes que contemplam a presença do elemento capa. Os resultados registrados na condição de ligação das telhas designadas como 3 (33,1 mm) e 4 (27,2 mm) em relação a condição de ligação designada como 2 (29,8 mm) evidenciam que as pequenas diferenças apontadas podem ser associadas ao formato do esmagamento e ao aumento do número de parafusos. Complementando convém acrescentar que a média aritmética dos deslocamentos verticais médios, na etapa de carga de 8,89 kN, para a condição de ligação das telhas designadas como 2, 3 e 4 (todas com a presença do elemento capa) é de 30,03 mm. Tal desempenho mostra um comportamento equivalente ao apresentado pela condição de ligação designada como 1, 30,5 mm, sem a presença do elemento capa.

Estas considerações sinalizam que a presença do elemento capa na ligação das telhas apresenta uma contribuição inexpressiva quanto ao aspecto de melhoria da rigidez dos espécimes.

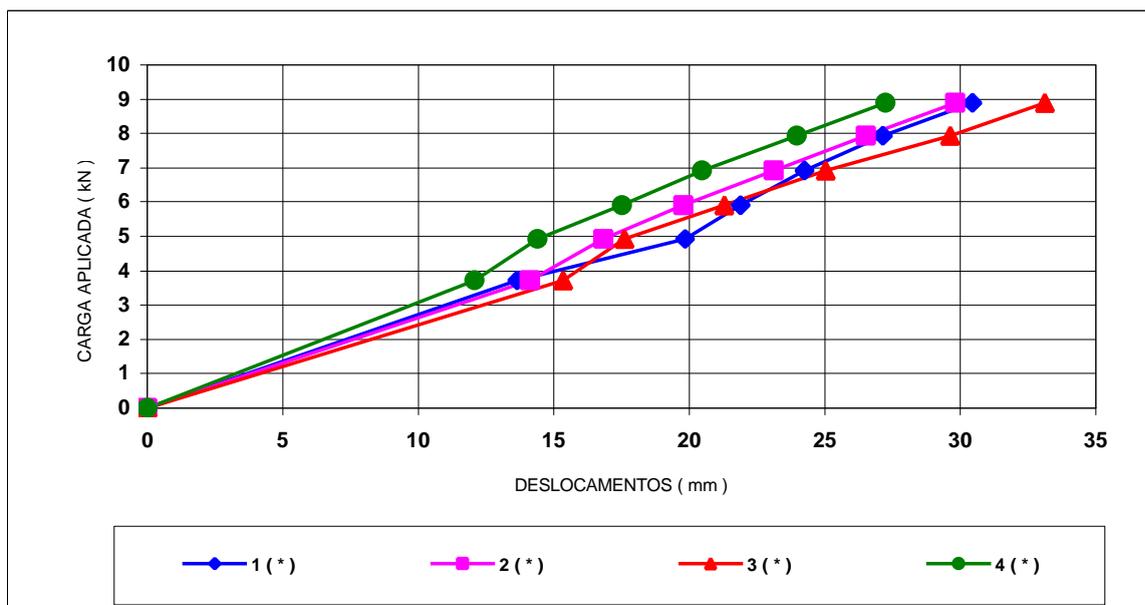


Figura 5.1 - Registra o comportamento dos deslocamentos verticais médios do ponto P5 para cada uma das condições de ligação das telhas.

Quadro 5.1 - Deslocamentos verticais médios do ponto P5 para as condições de ligação das telhas (mm)

Carga (kN)	Designação da condição de ligação das telhas			
	1 (*)	2 (*)	3 (*)	4 (*)
0	0	0	0	0
3,72	13,7	14,1	15,4	12,1
4,92	19,9	16,8	17,6	14,4
5,92	21,9	19,8	21,3	17,5
6,92	24,3	23,1	25,0	20,5
7,92	27,1	26,5	29,6	24,0
8,89	30,5	29,8	33,1	27,2

(\*) 1 - ensaios E1-1, E2-1, E3-1 e E4-1;

3 - ensaios E1-3, E2-3, E3-3 e E4-3;

2 - ensaios E1-2, E2-2, E3-2 e E4-2;

4 - ensaios E1-4, E2-4, E3-4 e E4-4.

Os deslocamentos verticais obtidos nos ensaios E2-1, E3-2, E4-3 e E1-4, ensaios nos quais os espécimes foram conduzidos até a ruptura, foram utilizados para avaliar a efetividade da condição de ligação das telhas, designadas como 2, 3 e 4 em relação a condição de ligação designada como 1.

Os deslocamentos verticais obtidos nos referidos ensaios constam do Quadro 5.2 e foram utilizados para criar o gráfico registrado na Figura 5.2.

A última etapa do carregamento comum a todos os espécimes, nos quatro ensaios em que as telhas apresentaram ruptura por flambagem local, corresponde a etapa de carga de 10,87 kN (95,85% da menor carga de ruptura registrada nos ensaios).

Os deslocamentos verticais, na etapa de carga de 10,87 kN, evidenciam um acréscimo de rigidez do espécime na condição de ligação das telhas designada como 2 (presença do elemento capa), 34,1 mm, em relação ao desempenho apresentado na condição de ligação designada como 1 (sem a presença do elemento capa), 46,0 mm.

A condição de ligação das telhas designada como 4 (28,8 mm) também registra um acréscimo de rigidez do espécime em relação a condição de ligação das telhas designada como 1 (46,0 mm). É conveniente ressaltar que o acréscimo de

rigidez do espécime na condição de ligação das telhas designada como 4 (28,8 mm) em relação a condição de ligação designada como 2 (34,1 mm) deve ser associado a adição de mais 12 parafusos na fixação das telhas.

A condição de ligação das telhas designada como 3 (53,8 mm) registra uma redução na rigidez do espécime em relação a condição de ligação designada como 1 (46,0 mm).

Convém acrescentar que a redução de rigidez do espécime, indicada pelos deslocamentos verticais, para a condição de ligação das telhas designadas como 3, foi observada nas etapas de carga de 8,89 a 10,87 kN. Essa redução de rigidez deve ser associada ao formato do esmagamento nos elementos capa-telha, na posição dos parafusos. O esmagamento pode ter acarretado uma redução da efetividade do travamento do parafuso na ligação capa-telha. Isto permitiria um comportamento mais flexível do espécime de telhas quando submetido ao carregamento, principalmente nas etapas que correspondem aos maiores valores de carga aplicada.

É conveniente ressaltar que a condição de ligação das telhas designada como 1, principalmente nas etapas de cargas de 4,92 a 6,92 kN, mostra um comportamento diferenciado em relação as curvas geradas para as demais condições de ligação de telhas. Este comportamento, principalmente na etapa de carga de 4,92 kN, pode ser associado a eventuais alargamentos dos furos das telhas realizados durante a preparação dos ensaios que contemplavam a presença do elemento de ligação denominado capa.

Admitindo os alargamentos dos furos, convém colocar que o travamento das telhas, através dos parafusos, somente seria efetivo a partir do contato do topo do furo da telha com o corpo do parafuso. Assim o alargamento dos furos pode ter acarretado, no ensaio da condição de ligação das telhas designada como 1 (os ensaios que previam a presença do elemento capa, condições de ligação 2, 3 e 4, já haviam sido realizados), na etapa de carga de 4,92 kN, um deslizamento das telhas, ocasionando o registro de um deslocamento vertical maior, fato este que pode ter gerado a ocorrência de uma falsa perda de rigidez.

Quadro 5.2 - Deslocamento verticais do ponto P5 nos ensaios de ruptura para as condições de ligação das telhas ( mm )

Carga (kN)	Designação da condição de ligação das telhas			
	1 ( * )	2 ( * )	3 ( * )	4 ( * )
0	0	0	0	0
3,72	16,5	12,6	19,1	8,8
4,92	32,5	15,0	21,0	10,9
5,92	33,1	18,1	25,5	14,0
6,92	34,5	21,4	29,9	16,5
7,92	35,5	24,7	35,1	19,2
8,89	38,5	27,4	39,8	22,3
9,88	42,1	32,1	45,6	25,2
9,88	-	31,4	-	-
10,87	46,0	34,1	53,8	28,8
11,84	51,5	36,7	-	-
12,83	-	40,4	-	-
13,80	-	43,9	-	-
0	44,4 ( ** )	1,8 ( *** )	45,5 ( ** )	1,5 ( *** )

Observações: ( \* ) 1 - ensaio E2-1, 2 - ensaio E3-2, 3 - ensaio E4-3, 4 - ensaio E1-4.

( \*\* ) Ruptura de telha central.

( \*\*\* ) Ruptura de telha lateral.

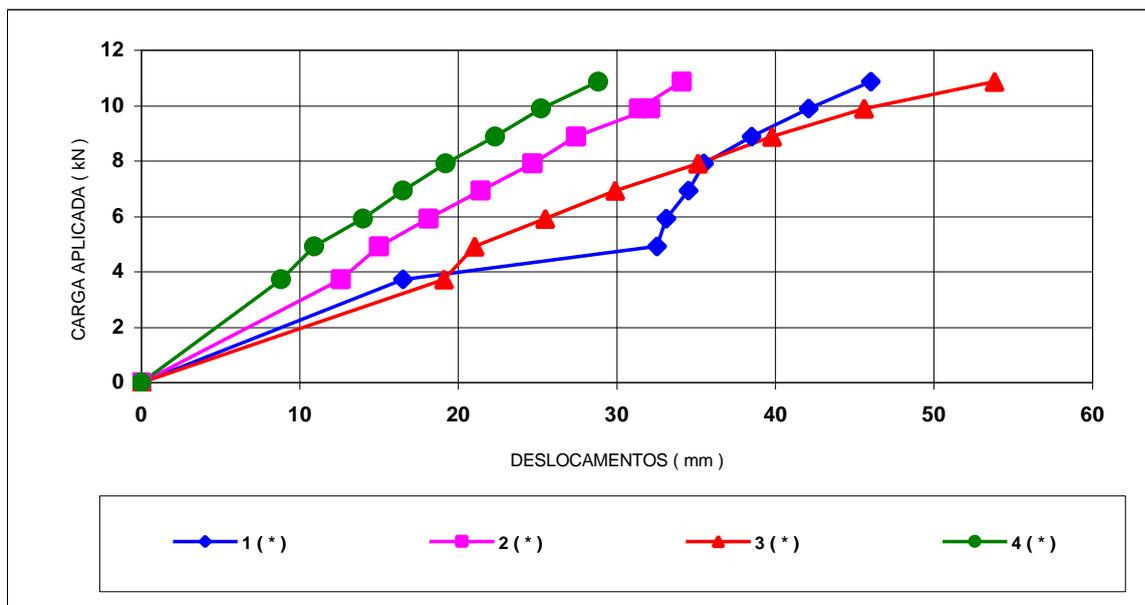


Figura 5.2 - Registra o comportamento dos deslocamentos verticais do ponto P5 nos ensaios de ruptura, até a etapa de carga de 10,87 kN, para cada uma das condições de ligação das telhas.

O Quadro 5.3 contém os dados que foram usados na avaliação do comportamento das telhas face a sua reutilização nos ensaios de cada um dos espécimes.

A avaliação utiliza os deslocamentos verticais do ponto P5, ponto central do conjunto de telhas, na etapa de carga de 8,89 kN, etapa esta alcançada em todos os ensaios, portanto comum para todos os espécimes. A referida avaliação se atém a cada uma das condições de ligação das telhas, designadas como 1, 2, 3 e 4 e contempla os 4 (quatro) espécimes ensaiados.

Na observação do Quadro 5.3 se constata que, na condição de ligação das telhas designada como 1, o melhor desempenho foi obtido quando da reutilização das telhas pela terceira vez, 23,6 mm (espécime 3). Nessa mesma condição de ligação das telhas, a reutilização das telhas pela quarta vez apresentou o pior desempenho, alcançando 38,5 mm (espécime 2). Este resultado é atenuado quando se verifica que a utilização das telhas pela primeira vez ficou com o terceiro melhor desempenho, 31,3 mm (espécime 1).

Na condição de ligação das telhas designadas como 2 o melhor desempenho foi registrado quando da reutilização das telhas pela quarta vez com um deslocamento vertical de 27,4 mm (espécime 3). O pior desempenho, na referida condição de ligação das telhas, foi observado quando da utilização das telhas pela primeira vez, 33,5 mm (espécime 2). Ainda na condição de ligação das telhas designadas como 2, a reutilização das telhas pela segunda e pela terceira vez apresentaram desempenhos equivalentes, 29,2 mm (espécimes 1 e 4).

Já na condição de ligação das telhas designada como 3 o melhor desempenho foi alcançado quando da reutilização das telhas pela segunda vez com 24,7 mm (espécime 2). Ainda na mesma condição de ligação das telhas, o pior desempenho foi obtido quando da utilização das telhas pela primeira vez com 41,2 mm (espécime 3). A reutilização das telhas pela quarta vez ficou com o terceiro melhor desempenho, 39,8 mm (espécime 4).

Finalmente na condição de ligação das telhas designada como 4 o melhor desempenho foi registrado quando da reutilização das telhas pela quarta e pela segunda vez, as quais apresentaram, respectivamente, deslocamento vertical de 22,3 mm (espécime 1) e de 22,4 mm (espécime 3). Na mesma condição de ligação das telhas o pior desempenho ocorreu quando da reutilização das telhas pela terceira vez, 33,7 mm (espécime 2). Ainda na condição de ligação designada

como 4, a utilização das telhas pela primeira vez ficou com o segundo melhor desempenho alcançando um deslocamento de 30,5 mm (espécime 4).

A avaliação realizada permite concluir que aparentemente a reutilização das telhas não se apresentou como um variável que tenha contribuído efetivamente para modificar os resultados registrados durante o desenvolvimento dos ensaios. Isto se fundamenta no fato de que em duas das condições de ligação das telhas, designadas como 2 e 4, a reutilização das telhas pela quarta vez apresentaram o melhor desempenho nos espécimes. Este resultado equivale a 50% das condições de ligação testadas para os espécimes de telhas. Cabe acrescentar que somente em uma (25%) das quatro condições de ligação testadas a reutilização das telhas pela quarta vez apresentou o pior desempenho.

Complementando é conveniente colocar que em nenhuma das quatro condições de ligação das telhas, portanto 100% das condições testadas, a utilização das telhas pela primeira vez obtiveram o melhor desempenho. Porém em 50% das condições testadas, condições de ligação das telhas designadas como 2 e 3, a utilização das telhas pela primeira vez obtiveram o pior desempenho. As conclusões relativas a variável reutilização das telhas podem ser visualizadas na Figura 5.3.

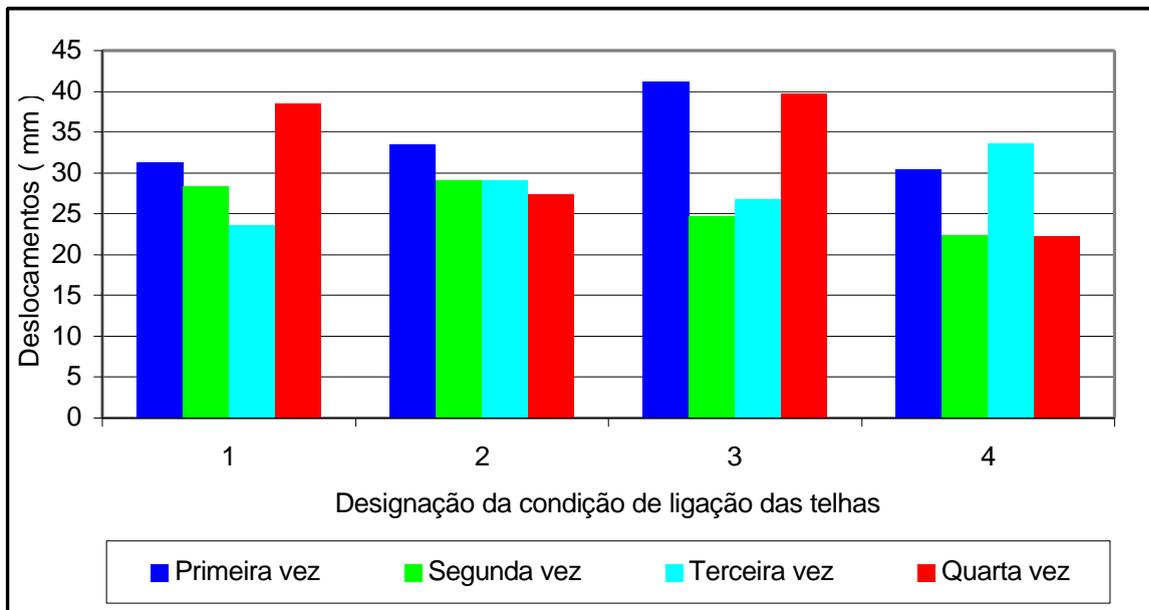


Figura 5.3 - Mostra o comportamento da variável reutilização das telhas para cada uma das condições de ligação utilizadas nos ensaios.

Quadro 5.3 - Análise da variável reutilização das telhas

Carga (kN)	Designação da condição de ligação das telhas			
	1	2	3	4
8,89				
DV P5-TC-E1 ( mm )	31,3	29,2	26,8	22,3
Ordem de realização dos ensaios do espécime 1	1	2	3	4
DV P5-TC-E2 ( mm )	38,5	33,5	24,7	33,7
Ordem de realização dos ensaios do espécime 2	4	1	2	3
DV P5-TC-E3 ( mm )	23,6	27,4	41,2	22,4
Ordem de realização dos ensaios do espécime 3	3	4	1	2
DV P5-TC-E4 ( mm )	28,4	29,2	39,8	30,5
Ordem de realização dos ensaios do espécime 4	2	3	4	1

Observação: Resultados dos deslocamentos verticais registrados por ocasião da realização dos dezesseis ensaios de flexão.

## 5.2 AVALIAÇÃO SEGUNDO AS ESPECIFICAÇÕES DA LRFD – AISI

Os resultados das solicitações experimentais do espécime de telhas foram obtidos a partir do modelo de carregamento apresentado na Figura 5.4.

Os espécimes foram levados à ruptura para cada uma das condições de ligação das telhas designadas como 1,2, 3 e 4, respectivamente, nos ensaios E2-1, E3-2, E4-3 e E1-4.

Os resultados dos ensaios apresentados no capítulo 4 indicam que a carga aplicada, em cada linha de carregamento, nos terços do vão do espécime, por ocasião da ruptura, para cada uma das condições de ligação das telhas designadas como 1,2,3 e 4, correspondem, respectivamente, a 12,33 kN (E2-1), 13,80 kN (E3-2), 11,34 kN (E4-3) e 11,84 kN (E1-4).

As telhas de todos os espécimes, quando da realização dos ensaios, em relação aos diagramas da Figura 5.4, apresentaram ruptura no trecho de momento máximo e de esforço cortante nulo.

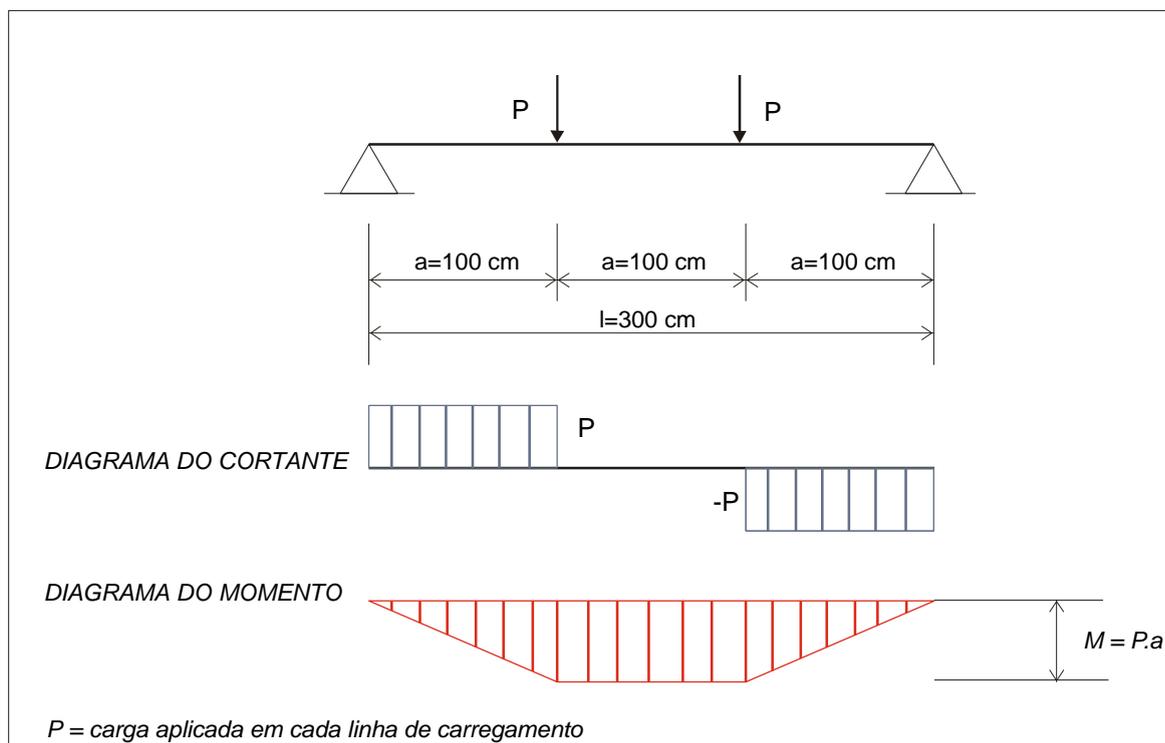


Figura 5.4 - Registra o modelo adotado a partir do carregamento do espécime de telhas para a obtenção das solicitações.

O momento resistente último, obtido a partir dos dados experimentais, considera como carga última a aplicada no espécime de telhas no momento em que ocorreu a ruptura.

Considerando as referidas cargas e sua aplicação nos terços do vão do espécime, a 100 cm de cada apoio, o cálculo realizado para a obtenção do momento resistente último para cada uma das condições de ligação das telhas designadas como 1, 2, 3 e 4 gerou, respectivamente, os seguintes valores: 1.233 kN cm, 1.380 kN cm, 1.134 kN cm e 1.184 kN cm.

O momento resistente último obtido para cada uma das condições de ligação das telhas designadas como 1, 2, 3 e 4 foi comparado com o momento nominal de cálculo, condição de ligação das telhas designada como 1, obtido analiticamente a partir das recomendações estabelecidas, para o elemento do tipo viga, nas especificações da "Load and Resistance Factor Design Specification for Cold-Formed Steel Structural Members" - American Iron Steel Institute (1991).

As dimensões da seção transversal da telha utilizada na formação dos espécimes ensaiados foram apresentados na Figura 2.1, capítulo 2. A seção transversal da telha é simétrica em relação ao seu eixo vertical. As propriedades da seção transversal do perfil da telha foram obtidas através do Método Linear.

Considerando a seção transversal como totalmente efetiva, a posição da linha neutra ficou localizada a 9,01 cm dos elementos retos de sua base (elementos 6 e 8 da Figura 5.5). O momento de inércia da seção da telha para a espessura de 0,8 mm é de  $626,3 \text{ cm}^4$ .

A Figura 5.5 mostra a posição da linha neutra e a numeração adotada na identificação de cada um dos elementos do perfil da telha, no cálculo das propriedades de sua seção transversal.

Inicialmente se verificou o limite dimensional da alma da telha. O cálculo do comprimento da alma da telha, elementos 10 a 14 da Figura 5.5, em relação a espessura da referida alma, mostra que a relação  $(h/t)$  atende o limite recomendado no item B1.2 (p. I-29 - 1991), LRFD - AISI,  $(h/t)_{\text{máx}} = 300$ , quando há enrijecedores intermediários, no caso de almas submetidas a flexão.

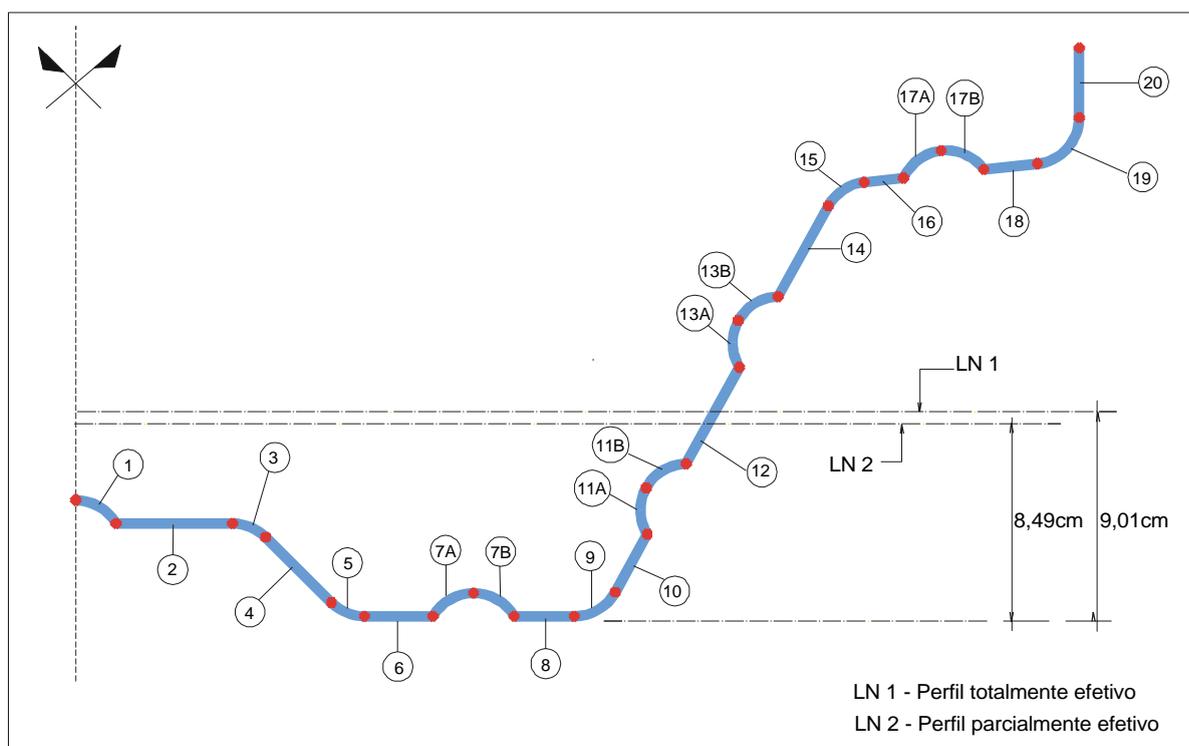


Figura 5.5 - Registra a posição da linha neutra, perfil totalmente efetivo e parcialmente efetivo, e a numeração adotada para identificar os elementos que formam o perfil da telha.

O momento nominal de cálculo da seção do perfil da telha foi obtido a partir das recomendações do item C3.1.1 (a) da LRFD - AISI (1991). Foi utilizada a tensão de escoamento de  $34,5 \text{ kN} / \text{cm}^2$ , menor valor obtido nos ensaios de corpos-de-prova extraídos das telhas que formaram os espécimes, conforme dados apresentados no Quadro 2.3, capítulo 2.

Os procedimentos de cálculo para os elementos da seção parcialmente efetiva do perfil da telha atendeu os critérios estabelecido nos itens B2.3 (a) e B 3.1 (a), LRFD-AISI (1991). A presença de enrijecedores ao longo do perfil da telha foram avaliados de acordo com o item B5 da referida especificação da AISI.

Cabe acrescentar que a seção do perfil da telha, como parcialmente efetiva, gerou os seguintes valores: momento de inércia de  $554,7 \text{ cm}^4$ , módulo resistente de  $34,6 \text{ cm}^3$  e a localização da linha neutra a  $8,49 \text{ cm}$  dos elementos retos da base da telha ( elementos 6 e 8 da Figura 5.5 ).

O momento nominal de cálculo da seção parcialmente efetiva do perfil de uma telha, espessura de  $0,8 \text{ mm}$ , é de  $1.195 \text{ kN cm}$ . O momento nominal de cálculo para a seção do espécime, correspondente a três telhas, resulta em  $3.585 \text{ kN cm}$ .

O Quadro 5.4 mostra o momento nominal de cálculo obtido analiticamente de acordo com as especificações da LRFD-AISI e os resultados do momento resistente último gerados a partir dos ensaios realizados nos espécimes de telhas.

Quadro 5.4 - Resultados do momento resistente último e do momento nominal de cálculo ( kN cm )

Designação da condição de ligação das telhas				
1 ( * )	2 ( * )	3 ( * )	4 ( * )	1 ( LRFD - AISI )
1.233	1.380	1.134	1.184	3.585

( \* ) 1 - ensaio C2-1, 2 - ensaio C3-2, 3 - ensaio C4-3, 4 - ensaio C1-4.

A seguir a Figura 5.6 mostra graficamente a comparação dos resultados experimentais do momento resistente último e do momento nominal de cálculo, segundo as recomendações da LRFD – AISI, apresentados no Quadro 5.4.

O menor resultado obtido experimentalmente para o momento resistente último corresponde a aproximadamente um terço (33%) do momento nominal de cálculo decorrente da utilização dos critérios da LRFD - AISI.

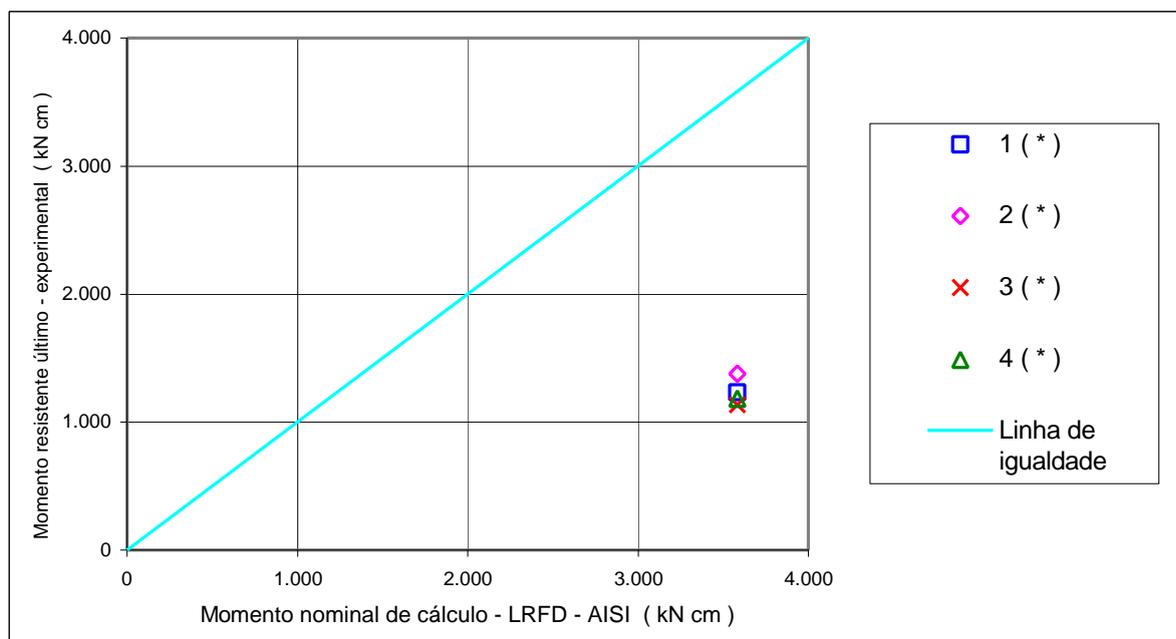


Figura 5.6 - Mostra o comportamento do momento resistente último para as condições de ligação das telhas, designadas como 1, 2, 3 e 4, e do momento nominal de cálculo segundo as recomendações da LRFD – AISI, para a condição de ligação das telhas designada como 1.

Considerando a significativa diferença observada entre resultados experimentais e o de cálculo cabe acrescentar que tal comportamento sugere claramente que a referida telha não deve ser dimensionada como elemento do tipo viga, segundo os critérios da LRFD - AISI.

Além disso é conveniente acrescentar que a ruptura de cada espécime ocorreu sempre na região central da telha, elemento 1 da Figura 5.5, a 5 cm acima dos elementos retos de sua base (elementos 6 e 8), região teoricamente tracionada quando submetida a flexão, considerando a localização da linha neutra. O comportamento da telha, nos ensaios de flexão até a ruptura do espécime, evidenciou que sua região central foi submetida a esforços de compressão.

Portanto, a localização da linha neutra real, no referido trecho do perfil, estava localizada em posição diferente da obtida analiticamente.

Complementando a avaliação teórica do espécime de telhas foi realizado um estudo do comportamento elástico linear utilizando o software Algor com base no método de elementos finitos, cujo desenvolvimento será apresentado no item 5.3.

A partir dos dados experimentais foi realizada uma avaliação da resistência do esforço cortante atuante nos espécimes de telhas em relação ao obtido analiticamente através do item C3.2 (c), especificado na LRFD - AISI (1991).

Foi verificado que os resultados do esforço cortante, constante no trecho do apoio até o terço do vão do espécime (linha de aplicação da carga), obtidos experimentalmente, para cada uma das condições de ligação das telhas, são menores que o esforço cortante de cálculo. O esforço cortante nominal de cálculo da seção do perfil de uma telha, espessura de 0,8 mm, é de 5,34 kN. O esforço cortante nominal de cálculo para a seção do espécime, correspondente a três telhas, resulta em 16,02 kN.

O resultado de cálculo do esforço cortante nominal supera em 16% o maior valor do esforço cortante resistente gerado experimentalmente. Isto mostra um comportamento conservador dos espécimes de telhas submetidos aos ensaios diante das especificações recomendadas na LRFD - AISI (1991).

O Quadro 5.5 mostra o esforço cortante nominal de cálculo obtido de acordo com as especificações da LRFD - AISI e os resultados do esforço cortante resistente último gerados a partir dos ensaios realizados nos espécimes de telhas.

Quadro 5.5 - Resultados do esforço cortante resistente último e do esforço cortante nominal de cálculo ( kN )

Designação da condição de ligação das telhas				
1 ( * )	2 ( * )	3 ( * )	4 ( * )	1 ( LRFD - AISI )
12,33	13,80	11,34	11,84	16,02

( \* ) 1 - ensaio E2-1, 2 - ensaio E3-2, 3 - ensaio E4-3, 4 - ensaio E1-4.

A Figura 5.7 registra graficamente a comparação entre os resultados experimentais do esforço cortante resistente e do esforço cortante nominal de cálculo, segundo as recomendações da LRFD – AISI, apresentados no Quadro 5.5.

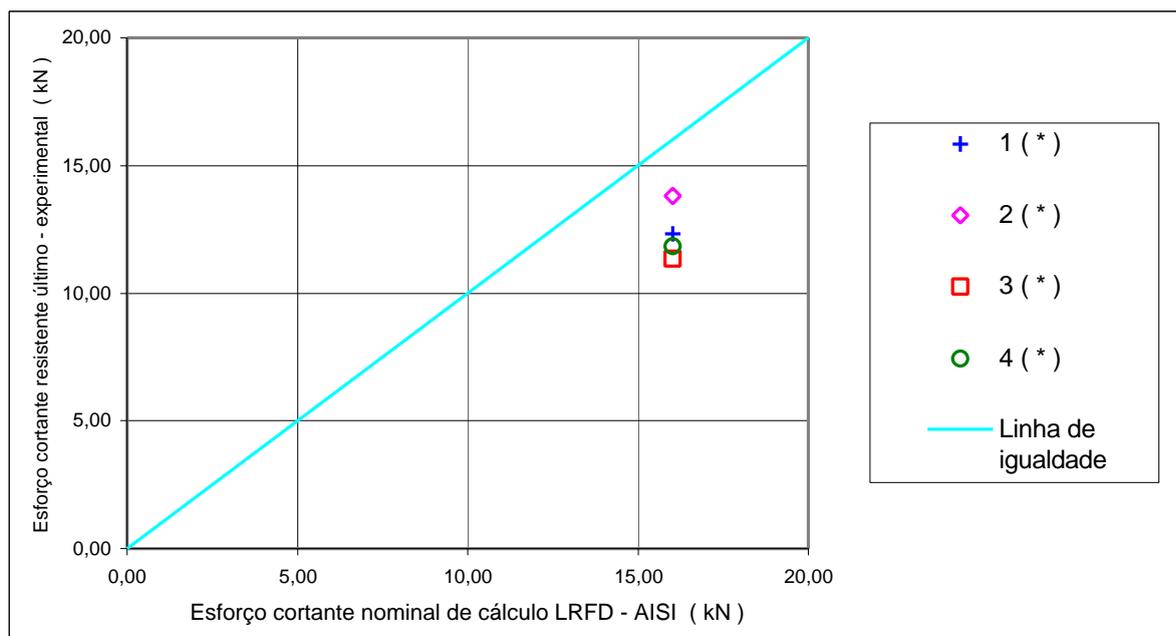


Figura 5.7 - Mostra o comportamento do esforço cortante resistente último para as condições de ligação das telhas, designadas como 1, 2, 3 e 4, e o esforço cortante nominal de cálculo segundo as recomendações da LRFD – AISI, para o condição de ligação de telhas designada como 1.

### 5.3 AVALIAÇÃO COM BASE NO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

#### 5.3.1 Modelo computacional

A primeira etapa dos procedimentos necessários para a realização da avaliação computacional através do método de elementos finitos foi definir o modelo que melhor representasse fisicamente o espécime de telhas. A partir da seção transversal da telha, fornecida pelo fabricante, construída com o software Autocad R 13, foi a mesma importada pelo software Algor.

A elaboração de metade da seção transversal do modelo foi gerada a partir do ponto central da telha central do espécime real formado por cinco telhas. O modelo computacional, constituído de duas e meia telhas, foi formado pela metade da seção transversal da telha central (TC) e pelas seções transversais da telha direita (TD) e da telha de extremidade (telha 1) para a condição de ligação das telhas designada como 1, portanto sem a presença do elemento capa.

A utilização de metade do modelo para representar o espécime de telhas somente foi possível devido a existência de condições de simetria geométrica, de carregamento e das condições de contorno.

Também foi definido que a telha seria modelada com o elemento do tipo placa. Cada ponto nodal de cada elemento de placa utilizado na presente investigação possui cinco graus de liberdade no elemento ou no sistema local xyz, sendo três deslocamentos na direção dos eixos x, y e z e duas rotações em torno dos eixos x e y. Nenhum grau de liberdade rotacional é especificado em torno de z, direção normal ao elemento placa.

A utilização do elemento de placa determinou alguns procedimentos na preparação do modelo. Assim, antes do lançamento da malha (discretização), foi necessário transformar os segmentos curvos da seção transversal da telha em segmentos retos. A referida medida é recomendada pelo software Algor para a utilização do elemento do tipo placa.

Os elementos identificados como enrijecedores da seção transversal da telha receberam quatro segmentos retos e para os demais elementos curvos foram adotados três segmentos retos. Os elementos retos da seção transversal da telha quando não mantidos como de um elemento foram transformados em dois ou em três elementos em função de seu comprimento inicial.

Desta forma, em função dos procedimentos acima descritos, a metade da seção transversal da telha do modelo ficou definida com 54 elementos retos, totalizando portanto 108 elementos retos para a seção transversal da telha do modelo. O comprimento desses elementos variavam entre 0,5 e 2,5 cm.

O comprimento do modelo entre apoios era de 300 cm, medida do vão do espécime de telhas. Este elemento reto de 300 cm foi transformado em 60 elementos com comprimento variável entre 2,5 e 6,25 cm. A malha utilizada para o elemento do tipo placa gerou 16.200 elementos retangulares ( 270 x 60 ).

A Figura 5.8 mostra a numeração dos nós dos 54 elementos retos adotados na formação dos elementos de placa do modelo computacional da metade da seção transversal do perfil da telha.

Para completar o modelo do espécime de telhas foi adotado o elemento do tipo viga para representar o parafuso empregado na condição de ligação das telhas, designada como 1 (sem a presença do elemento capa). O elemento de viga tridimensional possui seis graus de liberdade por nó, isto é, três deslocamentos na direção dos eixos x, y e z e três rotações em torno dos eixos x, y e z, referidos ao sistema global.

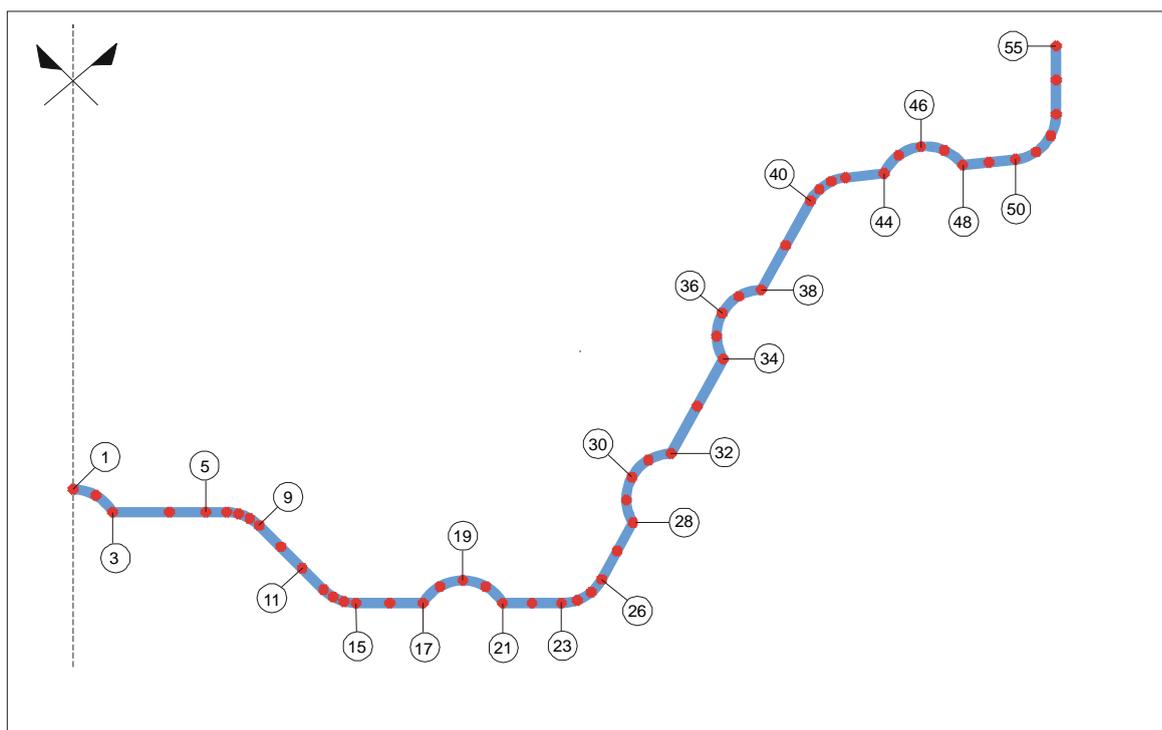


Figura 5.8 - Identifica o número dos nós que formam os elementos de placa do modelo computacional da metade da seção transversal do perfil da telha.

Cada linha de ligação das telhas continha 2 parafusos, sendo um parafuso utilizado na fixação da telha central com a telha direita e o outro parafuso na ligação da telha direita com a telha de extremidade. A fixação das referidas telhas foi feita a 2,5 cm e a 100 cm do eixo de cada um dos apoios. O modelo registra a utilização de 8 parafusos. O elemento do tipo viga utilizado em cada um dos parafusos de ligação das telhas foi transformado em dois segmentos retos, gerando, portanto, 16 elementos.

Cabe acrescentar que a composição dos elementos placa (telha) e viga (parafuso) utilizado pelo software Algor registrou um total de 16.216 elementos e 16.667 nós para o modelo correspondente a metade do espécime real de telhas na condição de ligação designada como 1.

A etapa que segue relata as condições de contorno utilizadas para o modelo. As condições de contorno, nos apoios de extremidade, restringiu translações na direção do eixo z para os nós dos elementos efetivamente apoiados, claramente definidos quando da montagem do espécime real de telhas.

A modelagem de somente metade do espécime real gerou condições de simetria para os nós dos elementos de placa localizados ao longo do eixo longitudinal da telha central. Neste caso as condições de contorno estabeleceram restrições de translações na direção do eixo  $x$  e de rotações em torno dos eixos  $y$  e  $z$ . O apoio do nó central do elemento viga, correspondente aos 4 parafusos de ligação das telhas, localizados a 2,5 cm da linha dos apoios do espécime, foi considerado totalmente restringido.

A carga no modelo foi aplicada num trecho de 25 cm, localizados nos terços do vão, a 100 cm de cada apoio, e foi distribuída em cinco linhas de nós dos elementos do tipo placa das telhas central e direita do espécime. Para a metade do modelo a carga aplicada na linha dos terços do vão, distribuída nos nós dos elementos, foi de 4,445 kN e corresponde a etapa de 8,89 kN, etapa de carga máxima aplicada em todos os espécimes de telhas antes da realização dos ensaios que provocaram a ruptura dos referidos espécimes. A Figura 5.9 mostra a malha adotada no modelo e a carga aplicada, nos terços do vão do espécime de telhas.

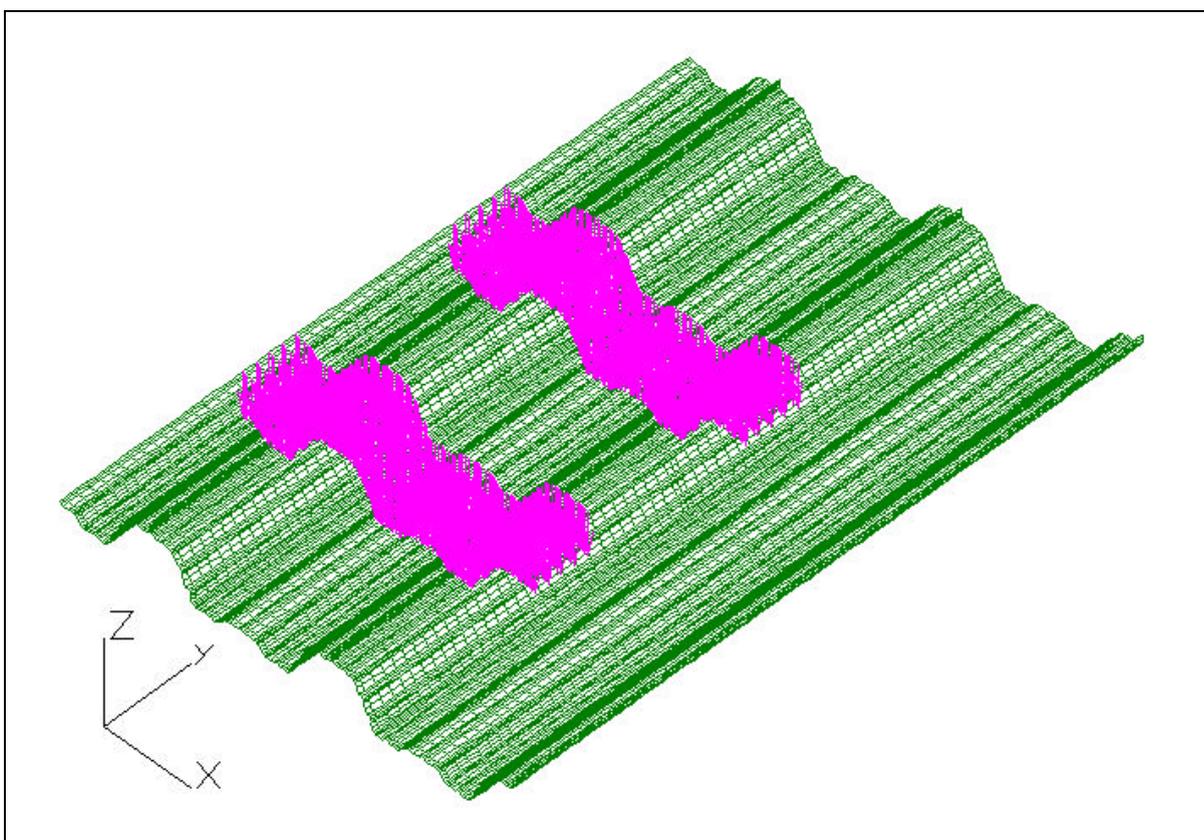


Figura 5.9 - Mostra a distribuição da malha e o carregamento do modelo, correspondente nos ensaios experimentais a etapa de carga de 8,89 kN, decorrente de forças aplicadas nos nós dos elementos de placa, nos terços do vão do espécime, na condição de ligação da telhas designada como 1.

### 5.3.2 Avaliação das tensões atuantes no modelo

Os resultados das tensões geradas pela análise linear de elementos finitos com o software Algor registra, na etapa de carga de 8,89 kN, que a maior tensão de compressão atuante no modelo é de 16,32 kN / cm<sup>2</sup>, obtida na seção transversal da telha central, na direção y, nó 1 do elemento 1 da Figura 5.8. O referido elemento do modelo esta localizado na metade do vão na região onde efetivamente ocorreu a ruptura das telhas que falharam por flambagem local nos espécimes experimentais. A Figura 5.10 mostra, na etapa de carga de 8,89 kN, o diagrama de distribuição das tensões na face superior dos elementos de placa do modelo.

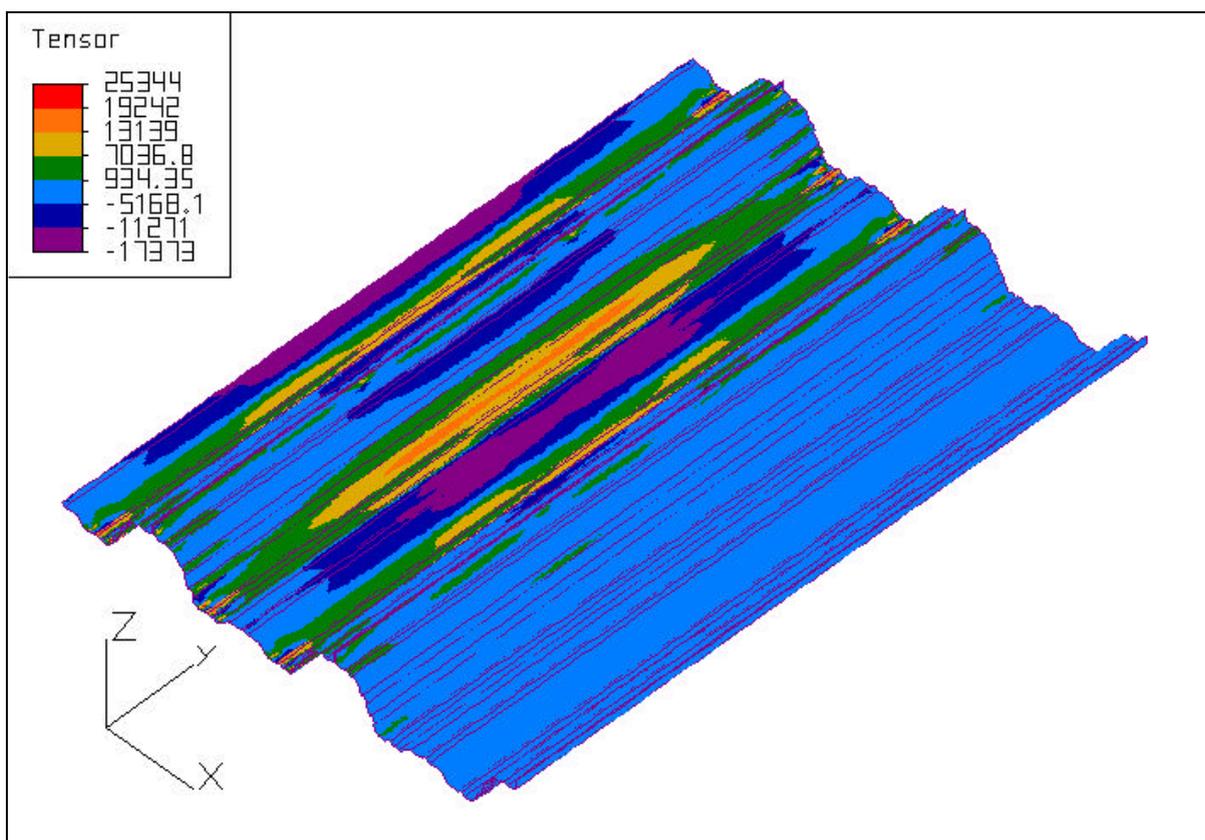


Figura 5.10 - Apresenta o diagrama de tensões de compressão e de tração na face superior dos elementos de placa do modelo, na direção y, na etapa de carga de 8,89 kN. A legenda de tensões atuantes no diagrama da figura, inserida no canto superior esquerdo, apresenta unidades em N / cm<sup>2</sup>.

Além disso, os resultados obtidos para as tensões de compressão e de tração atuantes no modelo mostram que a seção transversal da telha apresenta um comportamento bastante complexo quando submetida a esforços de flexão. Os resultados mostram que tanto nos elementos mais externos (“alma maior”) quanto nos elementos mais internos (“alma menor”) da seção transversal da telha se observam trechos distintos onde atuam esforços de compressão e tração. Este comportamento mostra, na seção transversal da telha, de forma bem definida os dois pontos que marcam a inversão das tensões de compressão e de tração atuantes no modelo.

O ponto de inversão das tensões de compressão e de tração atuantes nos elementos entre os nós 24 e 50, da seção transversal da telha apresentada na Figura 5.8, passa pelo elemento dos nós 33 e 34 da telha central e pelos elementos entre os nós 33 e 37 da telha direita do modelo. Esses elementos formam a chamada “alma maior” da seção transversal da telha.

O outro ponto de inversão das tensões de compressão e de tração atuantes nos elementos entre os nós 1 e 24, da seção transversal da telha apresentada na Figura 5.8, passa pelo elemento dos nós 11 e 12 das telhas central e direita do modelo. Esses elementos formam a chamada “alma menor” da seção transversal da telha.

A distribuição das tensões atuantes na seção transversal do modelo sugerem a não utilização das recomendações da LRFD-AISI (1991) no dimensionamento de elementos na flexão quando a seção transversal do elemento apresenta um comportamento bastante complexo ou seja semelhante ao observado na presente investigação.

As Figuras 5.11 até 5.19 mostram, na etapa de carga de 8,89 kN, o comportamento das tensões de compressão e tração atuantes nos nós dos elementos de placa, na seção transversal da metade do vão do modelo, respectivamente, na metade direita da seção transversal da telha central (TC) e na metade esquerda e direita da seção transversal da telha direita (TD). No anexo B são apresentados os valores das tensões de compressão e tração atuantes no modelo e que geraram as Figuras 5.11 a 5.19.

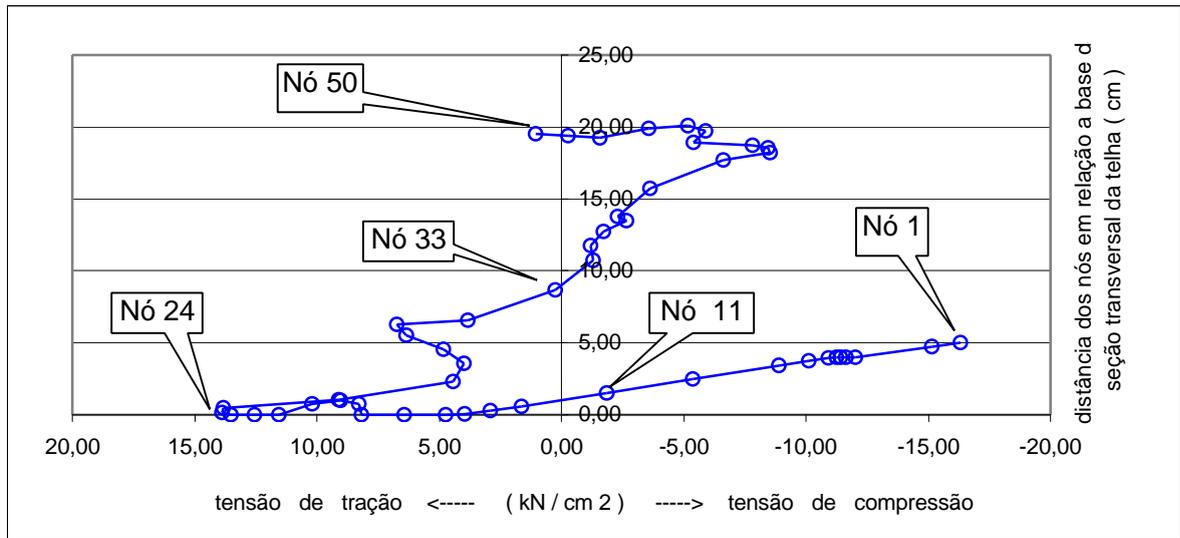


Figura 5.11 - Registra o comportamento das tensões de compressão e de tração, nó 1 até o nó 50, identificados na Figura 5.8, na face superior dos elementos de placa, na metade direita da seção transversal da telha central (TC) do modelo, na etapa de carga de 8,89 kN.

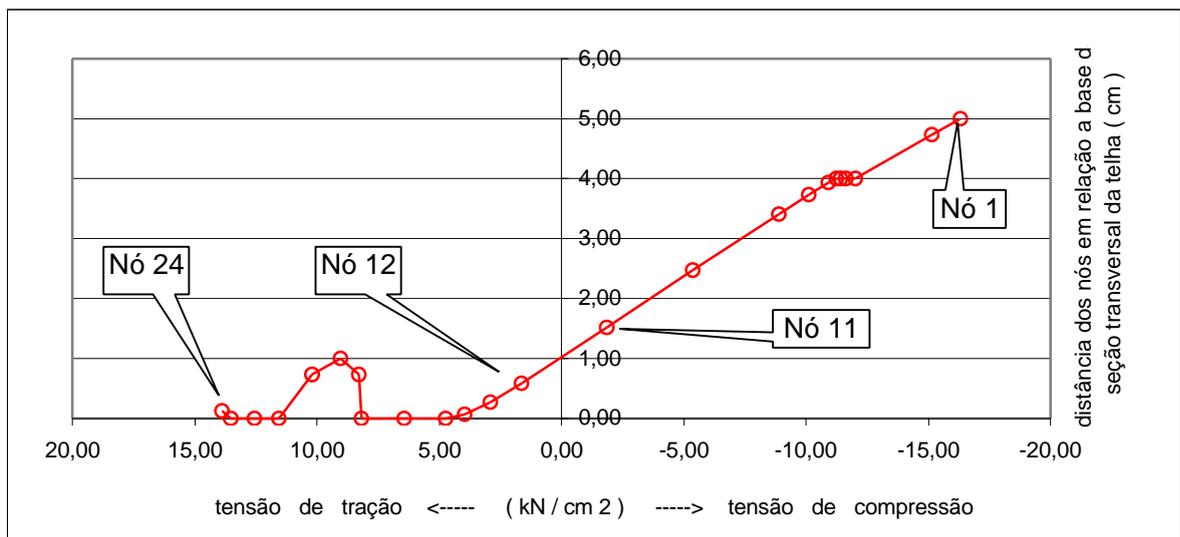


Figura 5.12 - Mostra o comportamento das tensões de compressão e de tração, nó 1 até o nó 24, identificados na Figura 5.8, na face superior dos elementos de placa, na metade direita da seção transversal da telha central (TC) do modelo, na etapa de carga de 8,89 kN.

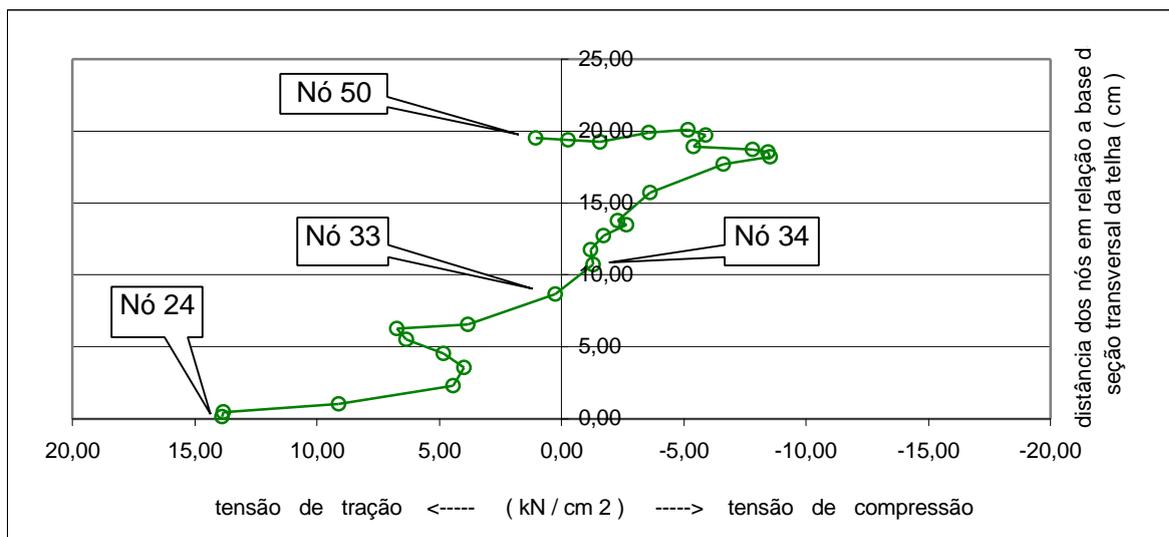


Figura 5.13 - Mostra o comportamento das tensões de compressão e de tração, nó 24 até o nó 50, identificados na Figura 5.8, na face superior dos elementos de placa, na metade direita da seção transversal da telha central (TC) do modelo, na etapa de carga de 8,89 kN.

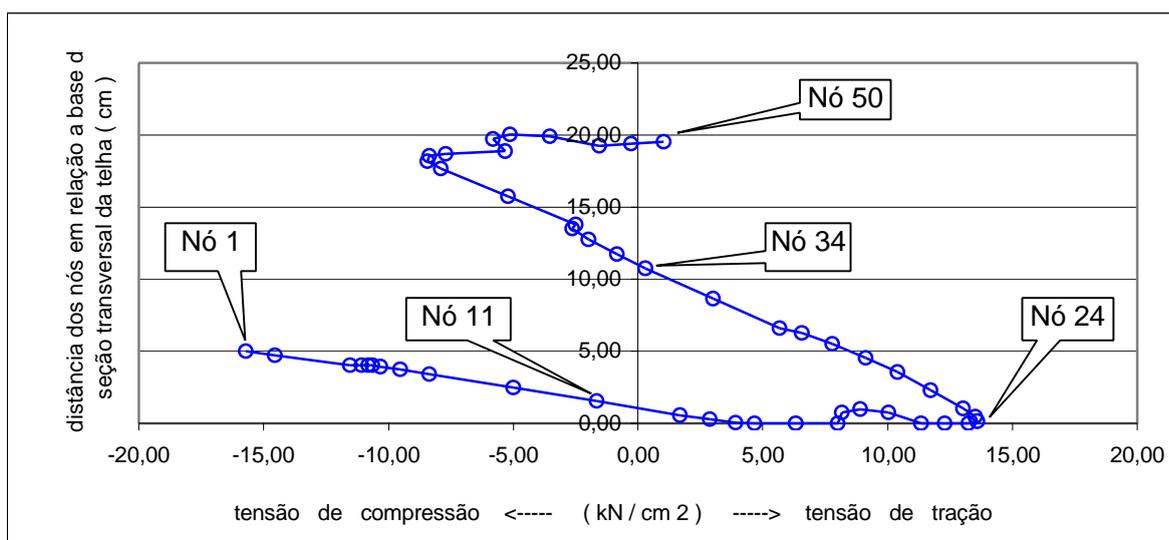


Figura 5.14 - Registra o comportamento das tensões de compressão e de tração, nó 1 até o nó 50, identificados na Figura 5.8, na face superior dos elementos de placa, na metade esquerda da seção transversal da telha direita (TD) do modelo, na etapa de carga de 8,89 kN.

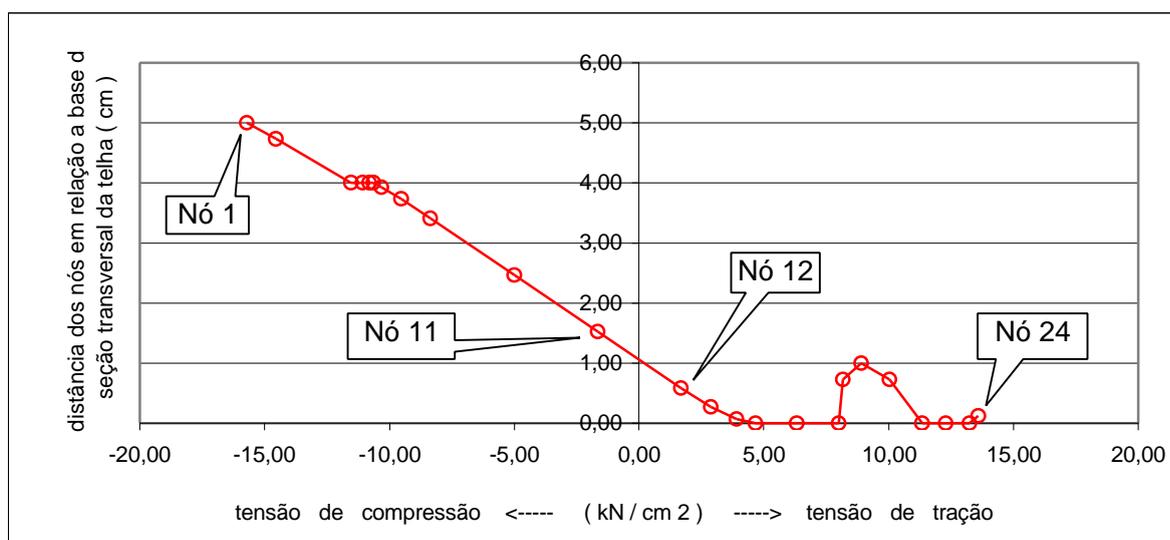


Figura 5.15 - Mostra o comportamento das tensões de compressão e de tração, nó 1 até o nó 24, identificados na Figura 5.8, na face superior dos elementos de placa, na metade esquerda da seção transversal da telha direita (TD) do modelo., na etapa de carga de 8,89 kN.

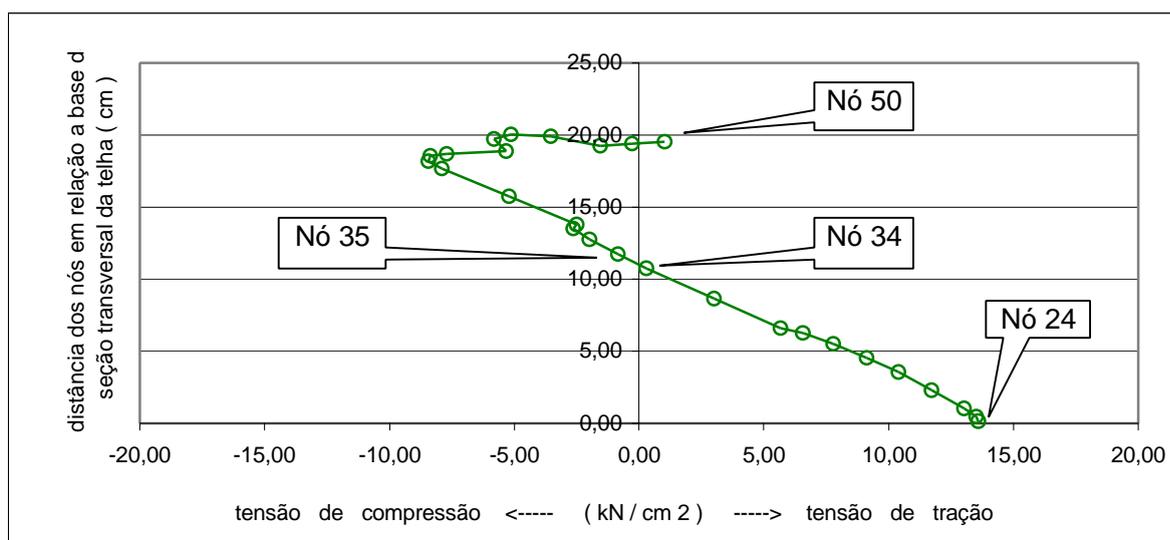


Figura 5.16 - Mostra o comportamento das tensões de compressão e de tração, nó 24 até o nó 50, identificados na Figura 5.8, na face superior dos elementos de placa, na metade esquerda da seção transversal da telha direita (TD) do modelo., na etapa de carga de 8,89 kN.

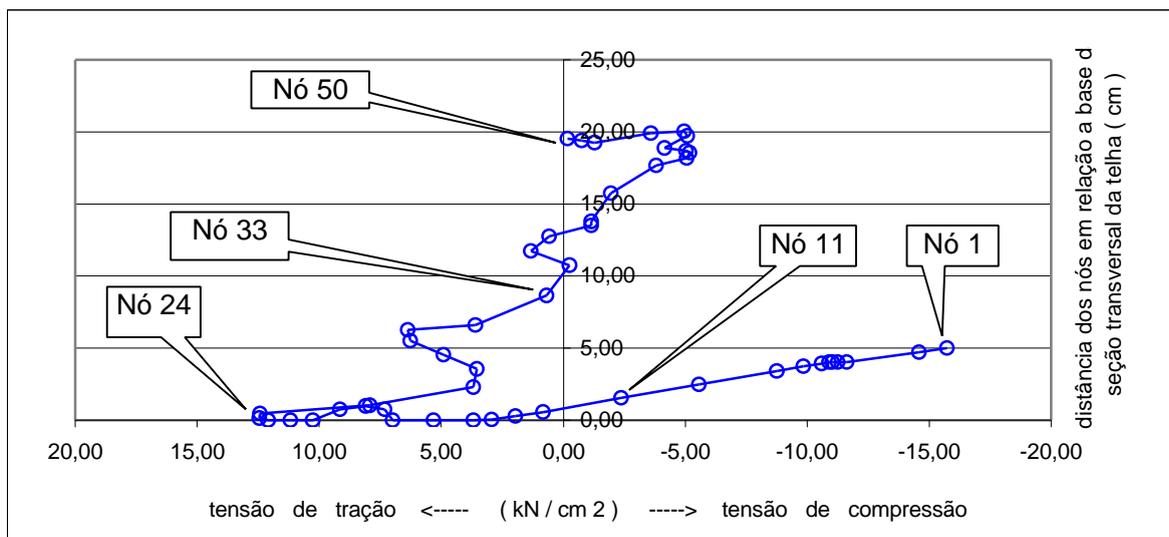


Figura 5.17 - Registra o comportamento das tensões de compressão e de tração, nó 1 até o nó 50, identificados na Figura 5.8, na face superior dos elementos de placa, na metade direita da seção transversal da telha direita (TD) do modelo, na etapa de carga de 8,89 kN.

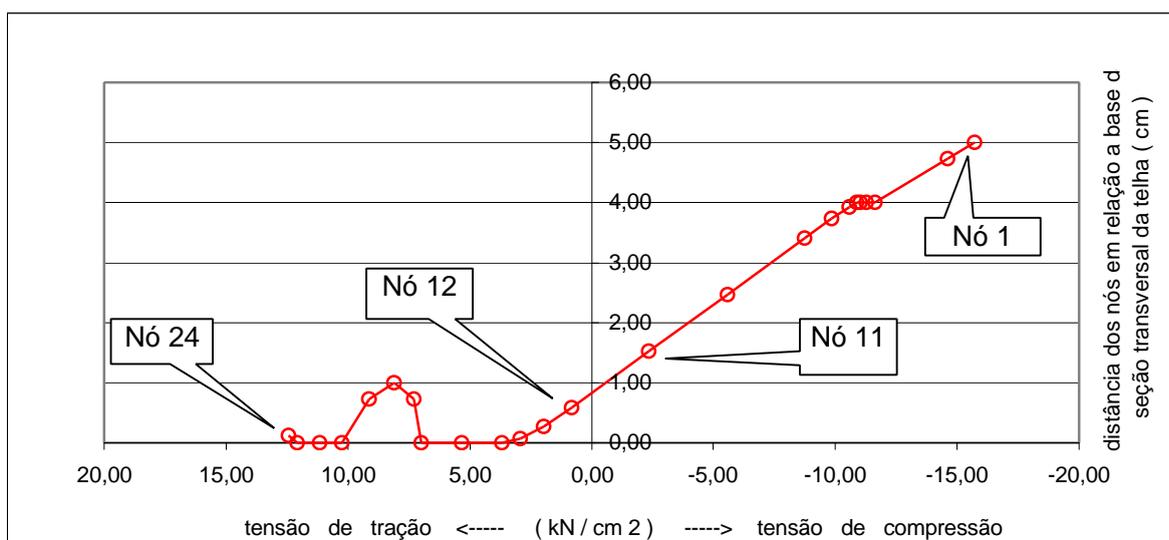


Figura 5.18 - Mostra o comportamento das tensões de compressão e de tração, nó 1 até o nó 24, identificados na Figura 5.8, na face superior dos elementos de placa, na metade direita da seção transversal da telha direita (TD) do modelo, na etapa de carga de 8,89 kN.

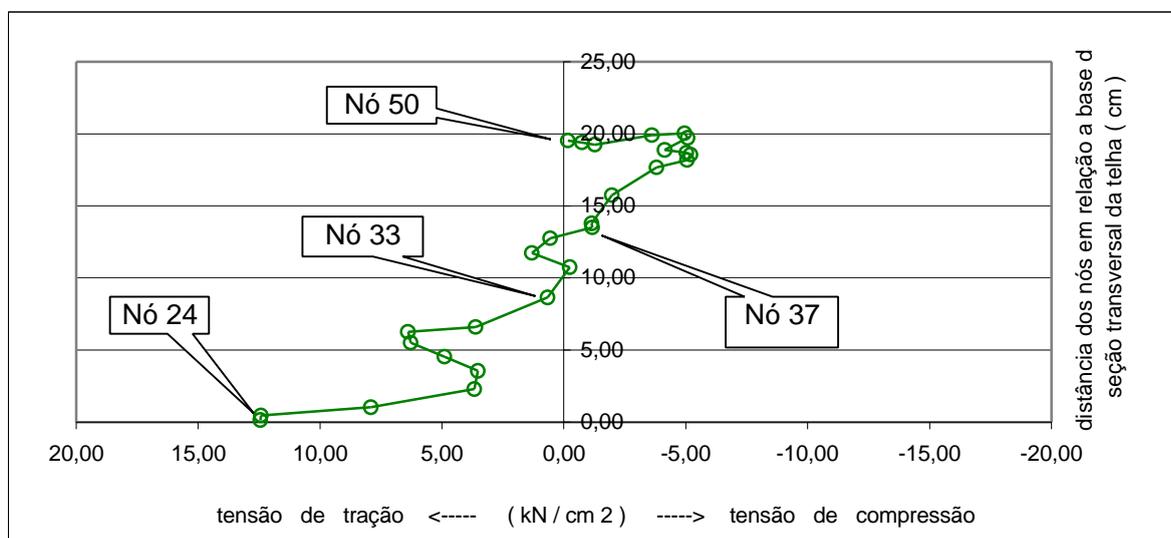


Figura 5.19 - Mostra o comportamento das tensões de compressão e de tração, nó 24 até o nó 50, identificados na Figura 5.8, na face superior dos elementos de placa, na metade direita da seção transversal da telha direita (TD) do modelo, na etapa de carga de 8,89 kN.

Estendendo os resultados da análise linear elástica para a etapa de carga de 10,89 kN, aplicada na linha dos terços do vão, sendo esta a última etapa de carga alcançada no ensaio E4-3 antes da ruptura do espécime, se obtém uma tensão de compressão de 19,99 kN / cm<sup>2</sup>, atuante na direção y, no nó 1 da seção transversal da telha central do modelo. Admitindo como tensão limite para o espécime de telhas a tensão de compressão atuante no modelo, 19,99 kN / cm<sup>2</sup>, cabe acrescentar que esse valor é da ordem de 58 % da tensão de escoamento do aço (34,5 kN / cm<sup>2</sup> - ver Quadro 2.3) das amostras extraídas das telhas submetidas ao carregamento experimental.

O comportamento teórico do modelo associado aos resultados experimentais dos espécimes sugere que a determinação da tensão limite no dimensionamento de telhas metálicas autoportantes deve ser investigada através de uma análise que considere a não linearidade geométrica e física do material com base no método de elementos finitos.

### 5.3.3 Avaliação dos deslocamentos verticais

A análise linear elástica registrou com base no método de elementos finitos (MEF), na etapa de carga de 8,89 kN, um deslocamento vertical no ponto central do modelo de 26,9 mm. A partir desse dado, analiticamente, foram obtidos, para as demais etapas de carregamento, os valores relativos ao comportamento do modelo e que constam dos Quadros 5.6 e 5.7. No anexo C são apresentados os valores dos deslocamentos verticais do modelo, obtidos através do método de elementos finitos para os pontos P5, P8, P4, P6, P7, P9, P10, P13 e P15.

As curvas geradas a partir dos resultados médios dos deslocamentos verticais obtidos experimentalmente, condições de ligação das telhas designadas como 1, 2, 3 e 4, quando comparadas com a curva do modelo com base no método de elementos finitos (MEF), condição de ligação das telhas designada como 1, mostram um comportamento bastante linear.

Na Figura 5.20 (Dados do Quadro 5.6), na etapa de 8,89 kN, se observa que a curva experimental da condição de ligação das telhas designada como 4 (27,2 mm) apresenta desempenho semelhante ao da curva do modelo, condição de ligação das telhas designada como 1 (26,9 mm). Além disso se verifica, na etapa de 8,89 kN, que os deslocamentos verticais das demais curvas experimentais, condições de ligação das telhas designadas como 1 (30,5 mm), 2 (29,8 mm) e 3 (33,1 mm), são maiores do que os deslocamentos verticais que geraram a curva do modelo, condição de ligação das telhas designada como 1 (26,9 mm). Isto mostra que os espécimes nas condições de ligação das telhas designadas como 1, 2 e 3, quando submetidas ao carregamento real, evidenciaram rigidez menor em relação a condição de ligação das telhas adotada pelo modelo com base no método de elementos finitos.

Cabe complementar, tomando como referência a condição de ligação das telhas adotada pelo modelo, que a presença do elemento capa, condições de ligação das telhas designadas como 2, 3 e 4, apresentam um desempenho nada satisfatório, não contribuindo, portanto, para melhorar a rigidez do espécime. Para a condição de ligação das telhas designada com 4, que apresenta um desempenho semelhante ao do modelo, devemos associar o seu comportamento ao acréscimo do número de parafusos.

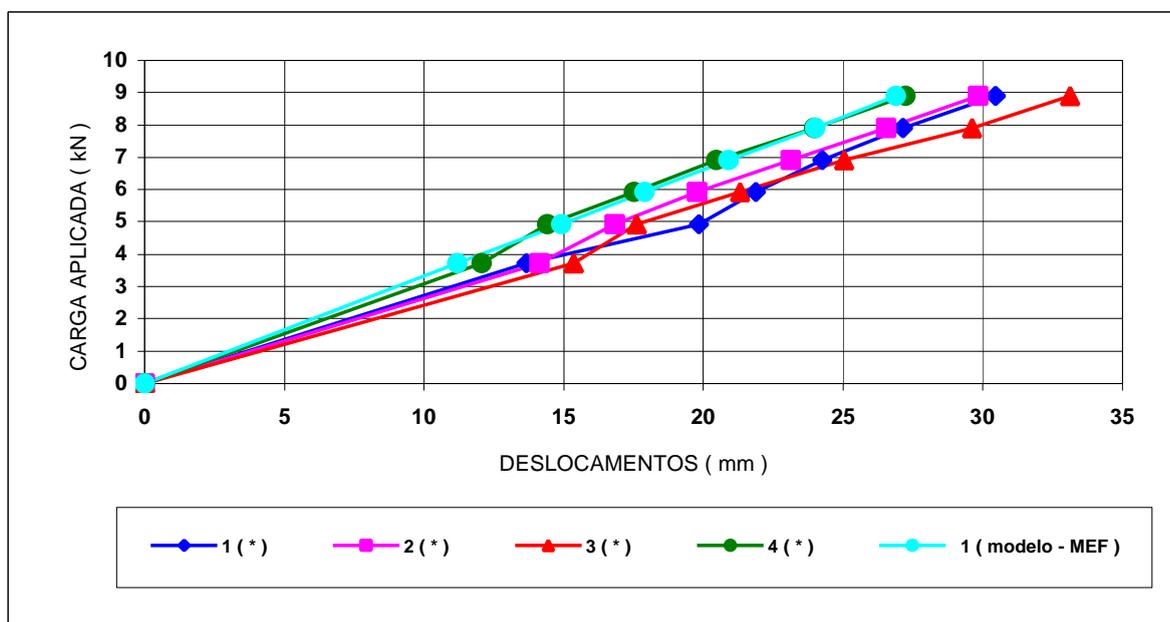


Figura 5.20 - Mostra o comportamento dos resultados experimentais e do modelo com base no método de elementos finitos - MEF.

Quadro 5.6 - Deslocamentos verticais médios do ponto P5 para as condições de ligação das telhas e deslocamentos verticais obtidos através da análise linear elástica do modelo pelo método de elementos finitos ( mm )

Carga (kN)	Designação da condição de ligação das telhas				
	1 (*)	2 (*)	3 (*)	4 (*)	1 ( modelo - MEF )
0	0	0	0	0	0
3,72	13,7	14,1	15,4	12,1	11,2
4,92	19,9	16,8	17,6	14,4	14,9
5,92	21,9	19,8	21,3	17,5	17,9
6,92	24,3	23,1	25,0	20,5	20,9
7,92	27,1	26,5	29,6	24,0	24,0
8,89	30,5	29,8	33,1	27,2	26,9

(\*) 1 - ensaios E1-1, E2-1, E3-1 e E4-1; 3 - ensaios E1-3, E2-3, E3-3 e E4-3;  
 2 - ensaios E1-2, E2-2, E3-2 e E4-2; 4 - ensaios E1-4, E2-4, E3-4 e E4-4.

O comportamento dos espécimes, nos ensaios em que foram conduzidos à ruptura, para as condições de ligação das telhas designadas como 1,

2, 3 e 4 em relação a condição de ligação das telhas designada como 1 adotada pelo modelo com base no método de elementos finitos (MEF) é mostrado na Figura 5.21. Os dados utilizados na referida figura constam do Quadro 5.7.

As curvas decorrente dos resultados dos deslocamentos verticais obtidos experimentalmente, nos ensaios conduzidos até a ruptura, condições de ligação das telhas designadas como 2, 3 e 4, quando comparadas com a curva gerada a partir dos deslocamentos verticais obtidos pelo modelo, condição de ligação das telhas designada como 1, mostram um comportamento bastante linear.

A curva experimental da condição de ligação das telhas designada como 1 apresenta restrições num determinado trecho, já referidas no item 5.1. Cabe acrescentar que mesmo considerando as restrições anteriormente apontadas se observa que a curva experimental da condição de ligação das telhas designada como 1, na etapa inicial (3,72 kN) e nas etapas finais do carregamento (8,89 a 10,87 kN), registra uma tendência de linearidade

Na etapa de carga de 10,87 kN, se observa que a curva experimental da condição de ligação das telhas designada como 2 (34,1 mm) apresenta desempenho semelhante ao da curva do modelo, condição de ligação das telhas designada como 1 (32,9 mm). Ainda nessa mesma etapa de carga se verifica que o deslocamento vertical registrado para a curva experimental, condição de ligação das telhas designada como 4 (28,8 mm), é menor que o da curva do modelo, condição de ligação das telhas designada como 1 (32,9 mm). A pequena diferença observada para a condição de ligação das telhas designada com 4 (28,8 mm) em relação a condição de ligação 2 (34,1 mm), ambas com a presença do elemento capa, deve ser associada ao acréscimo do número de parafusos na condição de ligação designada como 4. Os deslocamentos verticais das curvas experimentais, obtidos na etapa de carga de 10,87 kN, nas condições de ligação das telhas designadas como 3 (53,8 mm) e 1 (46,0 mm), são maiores que o da curva do modelo, condição de ligação das telhas designada como 1 (32,9 mm).

Isto mostra que os espécimes nas condições de ligação das telhas designadas como 1 e 3, quando submetido ao carregamento real, evidenciaram rigidez menor em relação a condição de ligação das telhas adotada pelo modelo com base no método de elementos finitos.

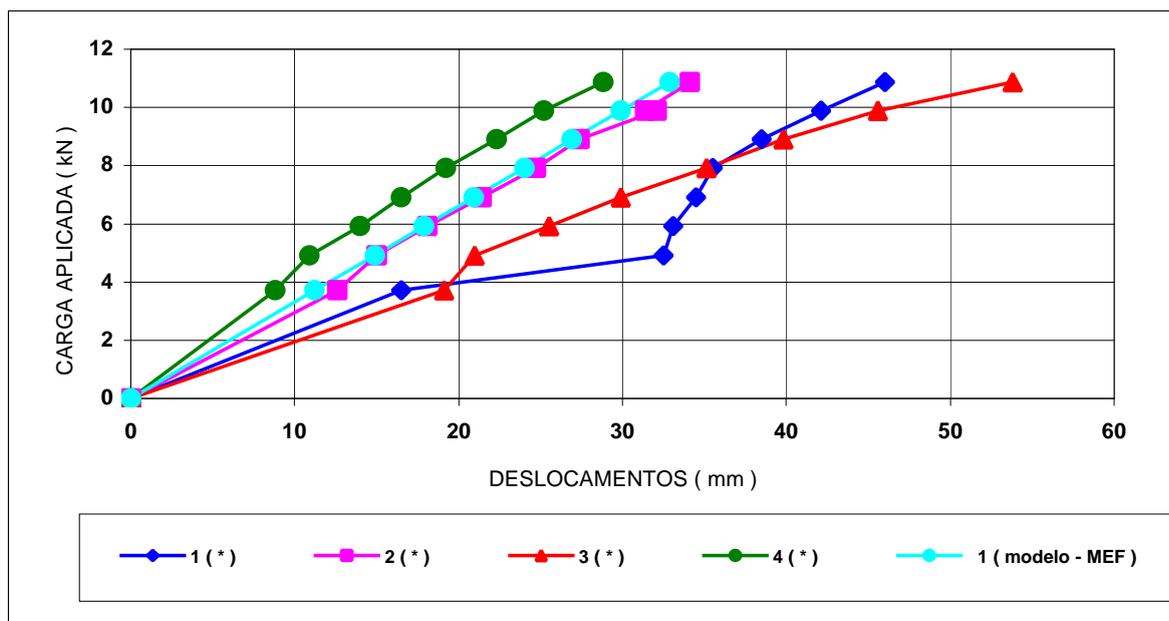


Figura 5.21 - Registra o comportamento dos deslocamentos verticais do ponto P5 até a etapa de carga de 10,87 kN nos ensaios de ruptura, condição de ligação das telhas designadas como 1, 2, 3 e 4, e os deslocamentos verticais para a condição de ligação das telhas designada como 1, adotada pelo modelo com base no método de elementos finitos.

Quadro 5.7 - Deslocamentos verticais do ponto P5 nos ensaios de ruptura para as condições de ligação de ligação das telhas e os deslocamentos verticais para a condição de ligação das telhas adotada pelo modelo (mm)

Carga (kN)	Designação da condição de ligação das telhas				
	1 (*)	2 (*)	3 (*)	4 (*)	1 ( modelo - MEF )
0	0	0	0	0	0
3,72	16,5	12,6	19,1	8,8	11,2
4,92	32,5	15,0	21,0	10,9	14,9
5,92	33,1	18,1	25,5	14,0	17,9
6,92	34,5	21,4	29,9	16,5	20,9
7,92	35,5	24,7	35,1	19,2	24,0
8,89	38,5	27,4	39,8	22,3	26,9
9,88	42,1	32,1	45,6	25,2	29,9
9,88	-	31,4	-	-	-
10,87	46,0	34,1	53,8	28,8	32,9

Observação: (\*) 1 - ensaio E2-1, 2 - ensaio E3-2, 3 - ensaio E4-3, 4 - ensaio E1-4.

Cabe acrescentar que a média aritmética dos deslocamentos verticais registrado nos pontos P10 e P11 (nó 49 da Figura 5.8), localizados na aba reta da telha central, na seção da metade do vão do espécime, apresentado no Quadro 5.8,

etapa de carga de 8,89 kN, para cada uma das condições de ligação das telhas designadas como 1 (7,4 mm), 2 (6,6 mm), 3 (5,8 mm) e 4 (4,4 mm), mostram que estes valores correspondem, respectivamente, a 24,2%, 22,1%, 17,5% e 16,1% dos valores médios dos deslocamentos verticais do ponto central da telha, ponto P5 (nó 1 da Figura 5.8), para cada uma das condições de ligação das telhas designadas como 1 (30,5 mm), 2 (29,8 mm), 3 (33,1 mm) e 4 (27,2 mm), apresentados no Quadro 5.1. É conveniente ressaltar que a localização dos pontos P10 e P11 no perfil da telha era bastante próxima do elemento capa utilizado nas condições de ligação das telhas designadas como 2, 3 e 4.

A significativa diferença observada entre os deslocamentos verticais do ponto central da telha (nó 1 da Figura 5.8) e os deslocamentos verticais médios da aba reta da telha (nó 49 da Figura 5.8) podem ser justificados, considerando os valores bastantes reduzidos de tensões atuantes no nó 49 (Figura 5.8), registradas no modelo de elementos finitos, conforme mostram graficamente as Figuras 5.11 e 5.13.

Quadro 5.8 - Média aritmética dos deslocamentos verticais médios dos pontos P10 e P11 para as condições de ligação das telhas e deslocamentos verticais obtidos através da análise linear elástica do modelo pelo método de elementos finitos ( mm )

Carga (kN)	Designação da condição de ligação das telhas				
	1 (*)	2 (*)	3 (*)	4 (*)	1 ( modelo - MEF )
0	0	0	0	0	0
3,72	2,6	2,3	2,0	1,3	2,7
4,92	3,9	3,0	2,6	1,8	3,5
5,92	4,6	3,9	3,3	2,4	4,3
6,92	5,4	4,8	4,1	3,0	5,0
7,92	6,3	5,7	5,0	3,7	5,7
8,89	7,4	6,6	5,8	4,4	6,4

( \* ) 1 - ensaios E1-1, E2-1, E3-1 e E4-1;

2 - ensaios E1-2, E2-2, E3-2 e E4-2;

3 - ensaios E1-3, E2-3, E3-3 e E4-3;

4 - ensaios E1-4, E2-4, E3-4 e E4-4.

#### 5.4 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA

A abordagem estatística realizada teve como objetivo avaliar o desempenho dos quatro espécimes, constituídos de cinco telhas, sendo que cada um dos espécimes foi submetido a quatro ensaios de flexão, correspondendo cada

ensaio a cada uma das condições de ligação das telhas, totalizando, portanto, dezesseis ensaios de flexão.

A avaliação foi feita através de um projeto quadrado latino que considerou como variável principal o desempenho dos espécimes e como variáveis auxiliares a ordem dos ensaios e a condição de ligação das telhas. Assim, cada um dos espécimes aparece uma e somente uma vez em cada linha (ordem dos ensaios) e também uma e somente uma vez em cada coluna (condição de ligação das telhas). Nesta avaliação foram utilizados os deslocamentos verticais obtidos experimentalmente, na etapa de carga de 8,89 kN, por ocasião da realização dos ensaios de flexão dos espécimes de cinco telhas.

Primeiramente a avaliação se ateve aos deslocamentos verticais registrados no ponto central da telha central de cada um dos espécimes, ponto P5, os quais estão inseridos na Tabela 5.1. Cabe acrescentar que nesta tabela a identificação dos espécimes foi feita através dos números 1, 2, 3 e 4, colocados entre parênteses, de acordo com a ordem dos ensaios, os quais antecedem as quatro colunas de dados relativos aos deslocamentos verticais de cada uma das condições de ligação das telhas.

Tabela 5.1 - Deslocamentos verticais (mm) do ponto central (P5) dos espécimes, nos ensaios de flexão que avaliaram o desempenho da condição de ligação das telhas - Projeto Quadrado Latino.

Ordem dos ensaios	Designação da condição de ligação das telhas							
		1		2		3		4
1	( 1 )	31,3	( 2 )	33,5	( 3 )	41,2	( 4 )	30,5
2	( 4 )	28,4	( 1 )	29,2	( 2 )	24,7	( 3 )	22,4
3	( 3 )	23,6	( 4 )	29,2	( 1 )	26,8	( 2 )	33,7
4	( 2 )	38,5	( 3 )	27,4	( 4 )	39,8	( 1 )	22,3

A Tabela 5.2 mostra que os deslocamentos verticais utilizados na avaliação do desempenho dos espécimes, para um nível de significância de 5 %, não foram influenciados tanto pela condição de ligação das telhas como pela ordem adotada para a realização dos ensaios. Isto se fundamenta no fato de que os resultados obtidos no teste F associado a esses efeitos, condição de ligação das telhas e ordem dos ensaios, resultou respectivamente,  $F = 0,61$  e  $F = 1,34$ . Esses

valores são menores que o valor indicado pela tabela da distribuição F (  $F_{0,05} ( 3,6 ) = 4,76$  ).

Tabela 5.2 - Análise de variância ANOVA - Projeto Quadrado Latino - Ponto central (P5) da telha central dos espécimes ensaiados.

Fonte	Soma de Quadrados	Graus de liberdade	Médias Quadradas	F	Nível de significância	Significativo ?
Identificação dos espécimes	76,58	3	25,53	0,6725	0,05	não
Ordem dos ensaios	153,42	3	51,14	1,3472	0,05	não
Condição de ligação das telhas	70,41	3	23,47	0,6183	0,05	não
Resíduos	227,75	6	37,96			
Total	528,16	15				

Complementando, a avaliação considerou a média dos deslocamentos verticais registrados nas abas retas da telha central dos espécimes, pontos P10 e P11, os quais constam na Tabela 5.3. Convém novamente enfatizar que na Tabela 5.3 a identificação dos espécimes foi feita através dos números 1, 2, 3 e 4, colocados entre parêntese, de acordo com a ordem dos ensaios, os quais antecedem as quatro colunas de dados relativos a média dos deslocamentos verticais de cada uma das condições de ligação das telhas.

Tabela 5.3 - Média dos deslocamentos verticais ( mm ) dos pontos P10 e P11, nas abas retas da telha central dos espécimes, nos ensaios de flexão que avaliaram o desempenho da condição de ligação das telhas - Projeto Quadrado Latino.

Ordem dos ensaios		Designação da condição de ligação das telhas						
		1	2	3	4			
1	( 1 )	8,9	( 2 )	8,2	( 3 )	6,3	( 4 )	4,7
2	( 4 )	6,5	( 1 )	5,6	( 2 )	5,4	( 3 )	4,1
3	( 3 )	6,7	( 4 )	6,5	( 1 )	5,9	( 2 )	6,0
4	( 2 )	7,5	( 3 )	6,1	( 4 )	5,5	( 1 )	2,7

É conveniente registrar que na Tabela 5.4 se observa que o desempenho dos espécimes, para um nível de significância de 5 %, não foi influenciado pela ordem adotada para a realização dos ensaios, visto que o teste F para esse efeito, resultou  $F = 4,09$ . Este valor é menor que o valor indicado pela

tabela da distribuição F (  $F_{0,05} ( 3,6 ) = 4,76$  ). Esta conclusão não pode ser estendida para a condição de ligação das telhas visto que o resultado apresentado na Tabela 5.4 indica que esse efeito é considerado significativo, para um nível de significância de 5 %. Isto se baseia no fato de que o resultado obtido no teste F para o efeito da condição de ligação das telhas,  $F = 11,50$ , é maior que o valor indicado pela tabela da distribuição F (  $F_{0,05} ( 3,6 ) = 4,76$  ).

Tabela 5.4 - Análise de variância ANOVA - Projeto Quadrado Latino - Média dos deslocamentos verticais dos pontos P10 e P11, pontos das abas retas da telha central dos espécimes ensaiados.

Fonte	Soma de Quadrados	Graus de liberdade	Médias Quadradas	F	Nível de significância	Significativo ?
Identificação dos espécimes	2,9	3	0,97	1,6682	0,05	não
Ordem dos ensaios	7,13	3	2,38	4,0992	0,05	não
Condição de ligação das telhas	20,02	3	6,67	11,5075	0,05	sim
Resíduos	3,48	6	0,58			
Total	33,54	15				

Finalizando, os resultados da avaliação estatística realizada com os deslocamentos verticais registrados no ponto central da telha central dos espécimes, ponto P5, evidenciam que a presença do elemento capa, isto é, condição de ligação das telhas designadas como 2, 3 e 4, não contribuíram para melhorar o comportamento dos espécimes. Isto se alinha com as considerações já apontadas no item 5.1 quanto ao comportamento dos espécimes que contemplam a presença do elemento capa, condição de ligação das telhas, designadas como 2, 3 e 4, em relação a condição de ligação das telhas designada como 1.

Os resultados da avaliação estatística feita com a média dos deslocamentos verticais registrados nas abas retas da telha central dos espécimes, pontos P10 e P11, mostram que a presença do elemento capa contribui para melhorar o comportamento dos espécimes. Entretanto cabe ressaltar que essa efetividade decorre da proximidade dos pontos P10 e P11 em relação ao elemento capa. Além disso é conveniente colocar que os valores da média dos deslocamentos verticais dos pontos P10 e P11 são bastante reduzidos quando comparados com os deslocamentos verticais do ponto P5 (ver Quadros do capítulo 4). Esta constatação se justifica diante das tensões atuantes (Figuras 5.11 a 5.19) nos nós 1 e 49 do perfil da telha (Figura 5.8). Esta considerações já foram apontadas nos itens 5.3.2 e 5.3.3 deste capítulo.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos dados coletados durante a realização desta investigação, cabe registrar as seguintes conclusões e sugestões para a realização de futuros trabalhos:

- A avaliação comparativa com base nos resultados experimentais dos deslocamentos verticais obtidos nos ensaios de flexão mostram que a presença do elemento capa na ligação das telhas apresenta uma contribuição inexpressiva quanto ao aspecto de melhoria da rigidez dos espécimes.
- As curvas geradas a partir dos resultados experimentais dos deslocamentos verticais evidenciaram que os espécimes ensaiados, na maioria das vezes, apresentaram uma rigidez menor ou quando muito semelhante ao do modelo computacional, considerando os resultados teóricos obtidos através de uma análise linear elástica por elementos finitos.
- Os resultados obtidos sugerem a substituição do atual processo de ligação das telhas por um sistema de zipagem. A utilização do sistema de zipagem proporcionará uma fixação uniforme e contínua entre as telhas, ao longo do seu comprimento, em detrimento da fixação pontual utilizada nos espécimes ensaiados.
- O indicativo de substituição do elemento capa também se fundamenta na baixa efetividade apontada pelos pequenos valores de deslocamentos verticais registrados nos espécimes nas posições contíguas ao referido elemento de ligação (Quadro 5.8). Esses pequenos deslocamentos verticais se justificam plenamente pois decorrem de pequenas tensões de compressão, atuantes na região próxima ao elemento capa, indicadas nas Figuras 5.11, 5.13, 5.14, 5.16, 5.17 e 5.19 (nó 49 na Figura 5.8).

- É conveniente ressaltar que a decisão de substituição do elemento capa está condicionada a um reestudo do projeto da seção transversal do perfil da telha metálica autoportante, principalmente quanto aos elementos localizados em suas extremidades, com o objetivo de garantir a efetividade da ligação através do sistema de zipagem.
- Além disso cabe acrescentar que a utilização do sistema de zipagem em detrimento do elemento capa e dos parafusos (capa com espessura de 1,55 mm nos espécimes ensaiados) sugere também a realização de uma avaliação econômica. Tal avaliação poderá indicar eventuais benefícios no custo final de coberturas com telhas metálicas autoportantes de aço zincado associado ao sistema de zipagem.
- Com base nos resultados experimentais (obtidos nos ensaios de flexão em que os espécimes foram levados até a ruptura) e teóricos obtidos na presente investigação, cabe ressaltar que não é recomendável a utilização das especificações da LRFD-AISI (1991) no dimensionamento de telhas metálicas autoportantes quando as solicitações consideradas são as que atuam no elemento do tipo viga.
- Convém acrescentar que tal recomendação decorre da significativa diferença observada na comparação dos resultados experimentais do momento resistente último e do momento nominal de cálculo obtido através das especificações da LRFD-AISI (1991). Isto é, o menor valor obtido nos ensaios de flexão corresponde a aproximadamente 33% do valor de cálculo.
- Os valores teóricos das tensões de compressão e de tração atuantes no modelo, obtidos através de uma análise linear elástica com base no método de elementos finitos, mostram que a seção transversal da telha apresenta um comportamento bastante complexo quando submetida a esforços de flexão. Foi constatada a existência de dois pontos que marcam na seção transversal da telha do modelo a inversão das tensões atuantes de compressão e de tração.

- A distribuição das tensões atuantes na seção transversal do modelo sugerem a não utilização das recomendações da LRFD-AISI (1991) no dimensionamento de elementos na flexão quando a seção transversal do elemento apresenta um comportamento bastante complexo ou seja semelhante ao observado na presente investigação.
- O comportamento apresentado pela seção transversal do modelo também explica a significativa diferença dos resultados experimentais do momento resistente último e do momento nominal de cálculo obtido através das especificações da LRFD-AISI (1991).
- A ruptura, nos espécimes ensaiados, na região central da seção transversal da telha, região teoricamente tracionada para elemento do tipo viga, segundo as especificações da LRFD-AISI, considerando a localização da linha neutra do perfil parcialmente efetivo (ver Figura 5.5), fica esclarecida quando se observa que a maior tensão de compressão atuante no modelo está localizada na região onde efetivamente ocorreu a referida ruptura nos espécimes ensaiados (ver elemento 1 da Figura 5.5 e nó 1 da Figura 5.8).
- Também convém acrescentar que o comportamento teórico do modelo, associado aos resultados experimentais dos espécimes, sugere que a determinação da tensão limite no dimensionamento de telhas metálicas autoportantes deve ser investigada através de uma análise que considere a não linearidade geométrica e física do material com base no método de elementos finitos.
- Além disso, cabe sugerir que trabalhos complementares quanto ao reestudo do projeto da seção transversal do perfil da referida telha metálica autoportante, através do método de elementos finitos, em espécimes solicitados à flexão, deve focar a determinação da tensão limite efetiva atuante por ocasião da ruptura.

- No caso da realização de novos trabalhos experimentais sugiro que seja avaliado o travamento transversal dos espécimes através da colocação de enrijecedores ao longo da seção transversal das telhas.
- Complementando, no caso de novas investigações experimentais quanto ao reestudo do projeto do perfil da telha metálica autoportante, também sugiro que se proceda, através do emprego de extensômetros elétricos, o registro das deformações atuantes na seção transversal do referido perfil, quando do desenvolvimento das etapas de carregamento dos espécimes.
- A colocação de extensômetros, na face superior e inferior da seção transversal do espécime, possibilitará o mapeamento experimental dessas deformações, a definição da posição da linha neutra (regiões tracionadas e comprimidas) e conseqüentemente a determinação das tensões atuantes e da resistência última a partir da tensão de escoamento real do aço. Os resultados experimentais devem ser utilizados para aferir/calibrar os resultados teóricos obtidos pela análise do modelo computacional através do método de elementos finitos.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-SAYED, G.; FUNG, C.; MONASA, F. State of Art – Cylindrical Cold-Formed Steel Farm Structures. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 5., 1980, St. Louis. **Recent Research and Design Trends in Cold-Formed Steel Structures.** St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1980. p.571-589.

ALGOR, Inc. **Stress Decoder Reference Manual.** Pittsburgh. Pennsylvania.1995.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **Load and Resistance Factor Design Specification for Cold-Formed Steel Structural Members:** March 16, Edition. Washington - DC, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized) or Zinc-Iron Alloy-Coated (Galvannealed) by the Hot-Dip Process:** ASTM A 653/A 653M. Philadelphia, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel:** ASTM A 370 - 95. Philadelphia, 1996.

AMMAR, A R.; TSENG, G.S.; HEALEY, J.J. Blast-Resistant Design of Cold-Formed Steel Panels. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 3., 1975, St. Louis. **Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction.** St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1975. 2v. v1., p.457-489.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Chapa de aço-carbono zincadas pelo processo contínuo de imersão a quente:** NBR 7008. Rio de Janeiro, 1994. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Chapa de aço de alta resistência mecânica zincadas continuamente por imersão a quente:** NBR 10735. Rio de Janeiro, 1989. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Produtos planos de aço – Determinação das propriedades mecânicas à tração:** NBR 6673. Rio de Janeiro, 1981. 22p.

BAEHRE, ROLF. Sheet Metal Panels for Use in Building Construction; Current Research Projects in Sweden. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 3., 1975, St. Louis. **Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction.** St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1975. 2v. v1., p.383-455.

BAEHRE, ROLF. Cold-Formed Steel Structural Elements: Developments in Design and Application. In: **THE MICHAEL R. HORNE CONFERENCE.** 1983, Manchester. **Instability and Plastic Collapse of Steel Structures.** London: Granada Publ. – Technal Books Division, 1983. p.455-468.

BERGFELT, A.; EDLUND, BO.; LARSSON, H. Experiments on Trapezoidal Steel Sheets in Bending. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 3., 1975, St. Louis. **Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction.** St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1975. 2v. v1., p.285-314.

BROOKS, STEVEN D.; MURRAY, THOMAS M. A Method for Determining the Strength of Z – and C – Purlin Supported Standing Seam Roof Systems. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 10., 1990, St. Louis. **Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction.** St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1990. p.421-440.

BRYAN, E. R.; JACSON, P. The Shear Behaviour of Corrugated Steel Sheeting. In: SYMPOSIUM AT UNIVERSITY COLLEGE OF SWANSEA SCHOOL OF ENGINEERING, 1., 1967, Swansea. **Thin Walled Steel Structures**; Their Design and Use in Building. London: Crosby Lockwood, 1969, p.258-274.

CHERN, CHINGMIIN.; JORGENSON, JAMES L. Shear Strenght of Deep Corrugated Steel Panels. In: SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 2., 1973, St. Louis. **Currents Research and Design Trends**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1973. p.381-415.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL - CSN. **Construção civil**. [São Paulo]. [1999?]. 20 p. (Catálogo).

DANNEMANN, ROBERT W. Effective Widht in Elastic Post-Buckling of Thin Flanges. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 10., 1990, St. Louis. **Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Cronstruction**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1990. p.281-297.

DAVIES, J. MICHEL. Developments in Inexpensive Lightweight Structures. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 4., 1978, St. Louis. **Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Structures**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1978. 2v. v2., p.701-724.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN - Normas fundamentales para la técnica mecánica - Manual I. **Rosca Whitworth**: DIN 11. 7ª edición española, traducción autorizada pelo Comité de Normas Alemán (DNA). Editorial Balzola. Bilbao, 1963.

- EL-ATROUZY, M. N.; ABDEL-SAYED, G. Shell Roofs and Grain Bins Made of Corrugated Steel Sheets. In: SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 2., 1973, St. Louis. **Currents Research and Design Trends**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1973. p.303-323.
- ELLIFRITT, DUANE S.; LUTRELL, LARRY D. Strength and Stiffness of Steel Deck Shear Diaphragms. In: SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 1., 1971, St. Louis. **Proceedings**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1973. p.99-110.
- HARVEY, J. M. The Integral Behaviour of Roof Sheets and Purlins. In: SYMPOSIUM AT UNIVERSITY COLLEGE OF SWANSEA SCHOOL OF ENGINEERING, 1., 1967, Swansea. **Thin Walled Steel Structures**; Their Design and Use in Building. London: Crosby Lockwood, 1969. p.275-288.
- HAUSSLER, ROBERT W.; PABERS, RICHARD F. Connection Strength in Thin Metal Roof Structures. In: SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 2., 1973, St. Louis. **Currents Research and Design Trends**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1973. p.857-874.
- HOFMEYER, H.; KERSTENS, J. G. M.; SNIJDER, H. H.; BAKKER, M. C. M. Experimental Research on the Behaviour of Combined Web Crippling and Bending of Steel Deck Sections. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 13., 1996, St. Louis. **Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1996. p.275-292.

JORGENSON, JAMES L.; CHERN, CHINGMIIN. Bending Strength of Deep Corrugated Steel Panels. In: SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 2., 1973, St. Louis. **Currents Research and Design Trends**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1973. p.225-257.

JORGENSON, JAMES L.; CHOWDHURY, ASADUL H. Buckling Strength of Cold-Formed Steel Curved Panels. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 6., 1982, St. Louis. **Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1982. p.115-133.

KINLOCH, H. An Experimental and Theoretical Investigation of Orthotropic Plate Structures. In: SYMPOSIUM AT UNIVERSITY COLLEGE OF SWANSEA SCHOOL OF ENGINEERING, 1., 1967, Swansea. **Thin Walled Steel Structures**; Their Design and Use in Building. London: Crosby Lockwood, 1969. p.213-235.

LANDOLFO, RAFFAELE; MAZZOLANI, FEDERICO M. Ultimate Behaviour of Trapezoidal Steel Sheets in Bending. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 12., 1994, St. Louis. **Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1994. p.205-215.

LIBOVE, CHARLES. On the Stiffness, Stress and Buckling Analysis of Corrugated Shear Webs. In: SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 2., 1973, St. Louis. **Currents Research and Design Trends**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1973. p.259-301.

- LUTTRELL, LARRY D. Screw Connected Shear Diaphragms. In: SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 2., 1973, St. Louis. **Currents Research and Design Trends**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1973. p.365-380.
- MALITE, M.; SALES, J. J.; GONÇALVES, R. M. Algumas considerações sobre a nova norma brasileira de dimensionamento de elementos estruturais de aço formados a frio. **Construção Metálica**, São Paulo, v. 8, n.33, p.22-26, 2º trim. 1998.
- NANNI, LUIS F.; RIBEIRO, JOSÉ LUIS. **Planejamento e avaliação de experimentos**. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS. 1991. 193p. (Caderno de Engenharia, 17).
- NEAL, B.G. **The Plastic Methods of Structural Analysis**. London: Chapman & Hall, 1970.
- NILSON, ARTHUR H. Analysis of Light Gage Steel Shear Diaphragms. In: SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 2., 1973, St. Louis. **Currents Research and Design Trends**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1973. p.325-363.
- ROCKEY, K. C.; EVANS, H. R. The Behaviour of Corrugated Flooring Systems. In: SYMPOSIUM AT UNIVERSITY COLLEGE OF SWANSEA SCHOOL OF ENGINEERING, 1., 1967, Swansea. **Thin Walled Steel Structures**; Their Design and Use in Building. London: Crosby Lockwood, 1969. p.236-257.
- RHODES, J.; KING, W.; HARVEY, J. M.; KEITH, J. Test on a Continuous Purlin Roofing System. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 4., 1978, St. Louis. **Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Structures**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1978. 2v. v1., p.253-282.

SCHAFER, B. W.; PEKÖZ, T. Direct Strength Prediction of Cold-Formed Steel Members Using Numerical Elastic Buckling Solutions. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 14., 1998, St. Louis. **Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction.** St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1998. p.69-76.

**SPECIFICATION for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members.** In: COLD-FORMED Steel Design Manual. Washington, DC, American Iron and Steel Institute,. August 19, 1986. Part 1, p I-1/I-61.

SERRETTE, R. L.; PEKÖZ, T. Flexural Capacity of Continuous Span Standing Seam Panels; Gravity Load. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 12., 1994, St. Louis. **Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction.** St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1994. p.195-204.

SOKOL, LEOPOLD. A Non Linear Design Model for Continuous Multi-span Light Gauge Sheeting and Members. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 14., 1998, St. Louis. **Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction.** St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1998. p.105-118.

SOKOL JR, TED T. Buckling of Excentrically Loaded Curved Panels. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 6., 1982, St. Louis. **Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction.** St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1982. p.75-113.

- SPYRAKOS, CONSTANTINE C. **Finite Element Modeling in Engineering Practice**: Includes Examples with Algor. West Virginia: West Virginia University, 1994.
- STUDNICKA, JIRI. Web Crippling of Wide Deck Sections. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 10., 1990, St. Louis. **Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1990. p.317-334.
- TAMAGNA, A.; HENNEMANN, J. C. F.; DE MOURA, C. G. S. **Projeto de estruturas de chapa dobrada a frio**. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS. 1985. 75 p. (Caderno Técnico, 70).
- TELHAS Zincadas de Aço para Coberturas e Fechamentos Laterais (2ª parte). **Construção Metálica**, São Paulo, n.6, p.25-27, 1992.
- YU, WEI-WEN. **Cold-Formed Steel Design**. 2. ed., New York: John Wiley, 1991.
- WINTER, GEORGE.; URIBE, JAIRO. Effects of Cold Work on Cold Formed Steel Members. In: SYMPOSIUM AT UNIVERSITY COLLEGE OF SWANSEA SCHOOL OF ENGINEERING, 1., 1967, Swansea. **Thin Walled Steel Structures**; Their Design and Use in Building. London: Crosby Lockwood, 1969. p.119-136.
- WU, SHAOJIE; YU, WEI-WEN; LABOUBE, ROGER. A. Flexural Strength of Cold-Formed Steel Panels Using Structural Grade 80 of A653 Steel. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE ON COLD-FORMED STEEL STRUCTURES. 13., 1996, St. Louis. **Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction**. St. Louis, Mo: Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla, 1996. p.255-274.

## ANEXO A - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### Ensaio E1-1 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E1-1	DV P2-TE-E1-1	DV P8-TD-E1-1	DV P4-TC-E1-1	DV P6-TC-E1-1	DV P1-TE-E1-1	DV P3-TE-E1-1	DV P7-TD-E1-1	DV P9-TD-E1-1
	( mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	16,1	17,4	13,0	11,8	12,9	14,2	12,8	11,4	10,3
4,92	19,4	22,3	14,7	14,5	15,2	18,4	16,2	12,8	11,8
5,92	21,9	23,7	16,2	16,3	17,2	19,8	16,8	14,1	13,5
6,92	24,6	26,6	18,4	17,9	19,6	21,7	18,8	16,3	14,7
7,92	27,6	30,6	20,7	20,4	22,4	24,2	21,0	18,3	17,7
8,89	31,3	35,4	23,6	24,7	26,0	28,5	26,3	21,3	20,3
3,72	22,7	26,3	16,8	20,1	18,3	21,2	19,9	16,0	13,7
0	0,9	2,4	0,7	3,4	0,8	2,2	0,7	1,2	0,4
0	0,8	2,5	0,8	3,5	0,8	2,3	0,8	1,3	0,6

Carga ( kN )	DV P10-TC-E1-1	DV P11-TC-E1-1	DV P12-TE-E1-1	DV P13-TD-E1-1	DV P15-TD-E1-1	DV P14-TE-E1-1	DVM(P10e11)-TC-E1-1	DVM(P12e14)-TE-E1-1	DVM(P13e15)-TD-E1-1
	( mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	3,0	3,0	1,8	2,7	2,2	2,6	3,0	2,2	2,5
4,92	3,9	4,3	2,6	3,8	2,5	3,4	4,1	3,0	3,2
5,92	5,1	5,0	3,1	4,8	3,2	3,6	5,1	3,3	4,0
6,92	6,5	5,9	3,7	6,3	4,0	4,0	6,2	3,9	5,1
7,92	7,8	7,3	4,6	7,8	4,9	4,7	7,5	4,7	6,4
8,89	9,0	8,9	5,8	9,0	5,9	5,8	8,9	5,8	7,4
3,72	4,4	4,6	3,1	4,5	3,5	4,0	4,5	3,6	4,0
0	0,7	0,8	1,0	0,6	1,2	1,1	0,7	1,1	0,9
0	0,7	0,9	1,1	0,7	1,3	1,1	0,8	1,1	1,0

### Ensaio E2-2 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E2-2	DV P2-TE-E2-2	DV P8-TD-E2-2	DV P4-TC-E2-2	DV P6-TC-E2-2	DV P1-TE-E2-2	DV P3-TE-E2-2	DV P7-TD-E2-2	DV P9-TD-E2-2
	(mm)								
0	0,0	0,0	0,0	(*)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	17,9	15,7	13,8	(*)	15,7	10,5	12,8	10,2	10,4
4,92	19,3	17,4	14,3	(*)	16,8	11,3	13,9	10,3	10,9
5,92	22,9	21,0	15,6	(*)	19,1	13,6	15,9	11,6	12,0
6,92	26,2	25,0	17,7	(*)	22,0	17,7	18,2	13,7	13,9
7,92	30,0	30,7	19,5	(*)	25,3	20,9	23,5	15,7	16,0
8,89	33,5	35,4	22,2	(*)	28,1	26,3	28,5	18,6	18,2
3,72	25,0	24,4	17,1	(*)	21,4	18,2	19,7	16,0	13,8
0	3,9	3,4	2,0	(*)	3,5	2,4	2,8	3,5	1,9
0	4,0	3,3	2,0	(*)	3,6	2,3	2,7	3,5	1,7

(\*) Medições desprezadas por apresentarem erro.

Carga ( kN )	DV P10-TC-E2-2	DV P11-TC-E2-2	DV P12-TE-E2-2	DV P13-TD-E2-2	DV P15-TD-E2-2	DV P14-TE-E2-2	DVM(P10e11)-TC-E2-2	DVM(P12e14)-TE-E2-2	DVM(P13e15)-TD-E2-2
	(mm)								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	3,8	1,7	2,6	3,2	1,9	2,2	2,8	2,4	2,5
4,92	4,5	1,9	2,7	3,3	1,9	2,3	3,2	2,5	2,6
5,92	5,7	2,7	3,2	4,1	2,0	2,8	4,2	3,0	3,1
6,92	7,2	3,6	4,0	5,0	2,4	3,4	5,4	3,7	3,7
7,92	8,9	4,5	4,6	6,1	2,8	4,0	6,7	4,3	4,4
8,89	10,9	5,5	5,4	7,8	3,3	4,5	8,2	5,0	5,5
3,72	6,1	3,0	4,0	4,8	2,5	3,2	4,5	3,6	3,7
0	1,5	1,2	2,3	2,2	0,9	2,0	1,4	2,1	1,6
0	1,5	1,3	2,3	2,2	0,9	2,1	1,4	2,2	1,5

### Ensaio E3-3 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E3-3	DV P2-TE-E3-3	DV P8-TD-E3-3	DV P4-TC-E3-3	DV P6-TC-E3-3	DV P1-TE-E3-3	DV P3-TE-E3-3	DV P7-TD-E3-3	DV P9-TD-E3-3
	( mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	17,8	12,9	14,1	18,1	15,2	12,6	12,9	15,0	12,8
4,92	20,7	15,0	16,4	20,6	17,0	14,2	14,7	17,7	14,3
5,92	24,9	20,0	20,3	25,1	20,9	18,6	17,9	20,9	17,4
6,92	30,0	24,1	25,7	28,8	24,2	21,8	21,6	25,3	21,2
7,92	36,6	30,0	31,0	33,7	29,1	28,1	25,3	28,8	24,8
8,89	41,2	35,4	36,6	37,6	34,2	33,3	30,1	32,7	29,0
3,72	29,5	24,2	24,8	29,1	25,3	23,1	21,5	26,5	21,1
0	3,4	3,0	2,7	5,7	3,3	2,7	3,8	4,1	2,6
0	3,2	2,9	2,6	5,5	3,0	2,6	3,7	3,9	2,5

Carga ( kN )	DV P10-TC-E3-3	DV P11-TC-E3-3	DV P12-TE-E3-3	DV P13-TD-E3-3	DV P15-TD-E3-3	DV P14-TE-E3-3	DVM(P10e11)-TC-E3-3	DVM(P12e14)-TE-E3-3	DVM(P13e15)-TD-E3-3
	( mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	1,2	3,0	0,5	0,8	1,1	0,5	2,1	0,5	1,0
4,92	1,6	3,5	0,6	1,0	1,5	0,8	2,5	0,7	1,2
5,92	2,3	4,4	0,9	1,6	2,1	1,2	3,3	1,1	1,9
6,92	3,2	5,2	1,3	2,6	2,9	2,0	4,2	1,7	2,7
7,92	4,3	6,2	2,1	3,8	3,5	2,6	5,3	2,4	3,6
8,89	5,2	7,4	2,9	4,7	4,2	3,3	6,3	3,1	4,5
3,72	2,6	4,3	1,3	2,1	2,7	2,4	3,5	1,8	2,4
0	0,7	3,3	0,9	0,8	0,8	0,5	2,0	0,7	0,8
0	0,7	3,3	0,9	0,8	0,8	0,5	2,0	0,7	0,8

### Ensaio E4-4 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E4-4	DV P2-TE-E4-4	DV P8-TD-E4-4	DV P4-TC-E4-4	DV P6-TC-E4-4	DV P1-TE-E4-4	DV P3-TE-E4-4	DV P7-TD-E4-4	DV P9-TD-E4-4
	(mm)								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	13,5	10,9	14,4	8,5	12,1	10,2	9,7	14,1	11,3
4,92	15,2	12,4	15,6	9,7	14,1	11,7	10,9	15,2	12,4
5,92	18,8	15,7	17,8	13,7	16,5	14,9	13,1	17,0	14,2
6,92	22,2	17,8	20,4	16,6	19,0	18,1	14,8	18,8	16,5
7,92	26,7	20,6	22,9	20,7	22,1	21,8	17,7	22,2	18,8
8,89	30,5	24,1	26,2	23,9	25,8	25,7	20,5	25,4	21,6
3,72	22,8	18,7	19,9	19,4	19,1	18,0	14,7	20,8	16,1
0	2,5	3,3	2,0	3,2	2,9	0,2	1,2	2,1	2,2
0	2,2	0,5	1,8	2,7	2,4	0,1	1,1	2,0	1,8

Carga ( kN )	DV P10-TC-E4-4	DV P11-TC-E4-4	DV P12-TE-E4-4	DV P13-TD-E4-4	DV P15-TD-E4-4	DV P14-TE-E4-4	DVM(P10e11)-TC-E4-4	DVM(P12e14)-TE-E4-4	DVM(P13e15)-TD-E4-4
	(mm)								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	1,1	1,2	0,8	1,0	1,2	1,2	1,2	1,0	1,1
4,92	1,7	1,6	1,0	1,2	1,3	1,6	1,6	1,3	1,2
5,92	2,4	2,2	1,4	1,6	1,6	2,0	2,3	1,7	1,6
6,92	3,1	2,9	2,0	2,2	2,0	2,9	3,0	2,4	2,1
7,92	3,9	3,7	2,6	2,1	2,5	3,7	3,8	3,1	2,3
8,89	4,8	4,6	3,5	3,9	3,1	4,6	4,7	4,1	3,5
3,72	2,7	2,1	1,7	2,2	1,9	3,2	2,4	2,4	2,1
0	0,8	0,6	0,7	0,6	0,8	0,9	0,7	0,8	0,7
0	0,8	0,6	0,5	0,5	0,5	0,8	0,7	0,7	0,5

### Ensaio E4-1 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E4-1	DV P2-TE-E4-1	DV P8-TD-E4-1	DV P4-TC-E4-1	DV P6-TC-E4-1	DV P1-TE-E4-1	DV P3-TE-E4-1	DV P7-TD-E4-1	DV P9-TD-E4-1
	( mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	11,4	12,8	18,0	8,3	9,8	12,8	11,2	17,1	14,5
4,92	14,7	16,0	20,1	11,2	12,3	17,1	13,4	19,3	16,0
5,92	17,1	18,9	22,0	13,8	14,3	20,6	16,4	20,9	17,8
6,92	20,1	23,3	24,4	15,2	16,8	24,1	19,3	23,1	20,2
7,92	24,6	28,4	26,8	19,7	19,5	29,3	23,1	25,7	22,7
8,89	28,4	31,9	30,9	21,8	23,1	31,8	26,2	27,9	25,9
3,72	19,3	22,5	24,6	16,8	15,9	22,4	18,0	25,1	19,9
0	0,6	1,1	1,1	-0,2	0,4	1,6	1,1	1,2	0,6
0	0,6	1,2	1,2	-0,2	0,5	1,6	1,2	1,3	0,9

Carga ( kN )	DV P10-TC-E4-1	DV P11-TC-E4-1	DV P12-TE-E4-1	DV P13-TD-E4-1	DV P15-TD-E4-1	DV P14-TE-E4-1	DVM(P10e11)-TC-E4-1	DVM(P12e14)-TE-E4-1	DVM(P13e15)-TD-E4-1
	( mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	2,7	1,9	1,7	2,2	3,5	1,5	2,3	1,6	2,8
4,92	3,5	2,7	2,9	2,6	3,9	2,2	3,1	2,5	3,3
5,92	4,0	3,3	3,4	3,0	4,4	2,6	3,7	3,0	3,7
6,92	4,8	4,1	4,2	3,7	5,0	3,2	4,4	3,7	4,3
7,92	5,6	5,3	5,2	4,2	5,6	3,9	5,4	4,6	4,9
8,89	6,5	6,5	7,1	5,2	6,3	4,7	6,5	5,9	5,8
3,72	3,8	2,8	3,8	3,4	4,4	3,0	3,3	3,4	3,9
0	0,8	0,6	0,9	0,7	1,0	0,3	0,7	0,6	0,9
0	0,8	0,7	1,0	0,9	1,1	0,5	0,8	0,8	1,0

### Ensaio E1-2 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E1-2	DV P2-TE-E1-2	DV P8-TD-E1-2	DV P4-TC-E1-2	DV P6-TC-E1-2	DV P1-TE-E1-2	DV P3-TE-E1-2	DV P7-TD-E1-2	DV P9-TD-E1-2
	(mm)								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	12,5	16,3	11,4	7,8	10,7	16,4	13,4	9,8	11,0
4,92	15,4	20,2	12,9	10,7	13,1	19,5	15,9	11,4	12,3
5,92	18,7	24,9	15,2	13,8	16,0	22,9	20,1	14,0	14,4
6,92	22,4	30,8	17,2	17,3	19,2	26,8	24,0	16,4	16,8
7,92	25,3	35,7	19,6	18,9	21,5	30,1	27,1	18,8	19,3
8,89	29,2	41,6	21,5	22,4	25,2	35,6	30,3	20,2	21,3
3,72	21,2	30,7	17,2	18,4	18,6	28,5	24,1	17,4	16,1
0	0,5	3,3	0,1	1,0	1,2	3,7	1,8	1,2	0,9
0	0,4	3,2	0,1	0,8	1,1	3,6	1,6	1,1	0,9

Carga ( kN )	DV P10-TC-E1-2	DV P11-TC-E1-2	DV P12-TE-E1-2	DV P13-TD-E1-2	DV P15-TD-E1-2	DV P14-TE-E1-2	DVM(P10e11)-TC-E1-2	DVM(P12e14)-TE-E1-2	DVM(P13e15)-TD-E1-2
	(mm)								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	(*)	0,0	0,0	0,0	-
3,72	2,2	2,0	2,0	0,8	(*)	1,6	2,1	1,8	-
4,92	3,1	2,5	3,2	1,6	(*)	2,1	2,8	2,6	-
5,92	4,3	3,2	4,1	1,8	(*)	2,9	3,8	3,5	-
6,92	5,1	3,7	4,8	3,9	(*)	3,7	4,4	4,3	-
7,92	5,8	4,2	5,3	3,9	(*)	4,4	5,0	4,9	-
8,89	6,5	4,6	5,5	4,0	(*)	5,1	5,6	5,3	-
3,72	3,5	3,3	4,2	4,0	(*)	3,9	3,4	4,1	-
0	0,3	0,8	1,8	2,3	(*)	0,9	0,6	1,4	-
0	0,3	0,8	1,8	2,1	(*)	0,9	0,5	1,4	-

(\*) Medições desprezadas por apresentarem erro.

### Ensaio E2-3 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E2-3	DV P2-TE-E2-3	DV P8-TD-E2-3	DV P4-TC-E2-3	DV P6-TC-E2-3	DV P1-TE-E2-3	DV P3-TE-E2-3	DV P7-TD-E2-3	DV P9-TD-E2-3
	( mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	10,6	12,0	10,5	8,2	9,2	9,3	10,4	10,0	10,8
4,92	12,9	14,3	12,1	9,7	11,0	12,2	12,3	11,7	11,9
5,92	16,1	17,3	13,9	12,6	13,2	14,8	14,6	13,9	13,6
6,92	18,7	19,9	15,9	14,1	15,6	16,6	16,7	16,2	15,5
7,92	21,9	23,8	17,6	18,2	18,5	19,7	19,5	18,3	17,8
8,89	24,7	26,6	20,0	20,4	20,8	22,6	21,8	20,9	20,2
3,72	18,1	19,9	16,0	16,5	15,7	16,8	15,7	16,5	15,7
0	1,3	1,6	0,8	1,7	1,0	1,2	1,1	4,1	1,6

Carga ( kN )	DV P10-TC-E2-3	DV P11-TC-E2-3	DV P12-TE-E2-3	DV P13-TD-E2-3	DV P15-TD-E2-3	DV P14-TE-E2-3	DVM(P10e11)-TC-E2-3	DVM(P12e14)-TE-E2-3	DVM(P13e15)-TD-E2-3
	( mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	2,1	1,3	0,9	0,9	1,5	1,0	1,7	1,0	1,2
4,92	3,0	1,8	1,1	1,1	2,0	1,4	2,4	1,3	1,6
5,92	3,7	2,3	1,3	1,6	2,7	1,9	3,0	1,6	2,2
6,92	4,6	2,9	2,1	2,0	3,3	2,5	3,7	2,3	2,7
7,92	5,4	3,8	2,6	2,4	4,0	3,3	4,6	2,9	3,2
8,89	6,2	4,7	3,1	3,1	4,8	4,6	5,4	3,8	4,0
3,72	3,5	2,1	1,8	1,7	3,7	2,9	2,8	2,3	2,7
0	0,7	0,4	0,6	0,6	1,0	0,9	0,5	0,8	0,8
0	0,6	0,4	0,5	0,6	1,0	0,8	0,5	0,6	0,8

### Ensaio E3-4 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E3-4	DV P2-TE-E3-4	DV P8-TD-E3-4	DV P4-TC-E3-4	DV P6-TC-E3-4	DV P1-TE-E3-4	DV P3-TE-E3-4	DV P7-TD-E3-4	DV P9-TD-E3-4
	(mm)								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	9,5	11,9	13,5	6,2	7,3	12,2	11,9	13,8	15,0
4,92	11,5	13,6	16,2	8,1	8,7	13,3	12,9	16,2	16,9
5,92	14,0	17,3	19,6	9,7	10,8	15,7	16,0	18,9	19,3
6,92	16,5	19,9	22,9	12,6	13,4	19,1	17,1	21,7	21,6
7,92	19,8	22,7	25,7	15,6	15,7	22,4	19,2	24,0	24,5
8,89	22,4	26,0	28,8	17,2	17,5	23,1	23,6	26,8	27,4
3,72	15,6	20,3	22,9	13,5	12,7	19,2	17,6	22,4	21,1
0	1,1	1,2	0,4	1,3	0,7	1,9	1,3	-0,1	1,1
0	0,9	0,8	0,3	1,2	0,4	0,7	1,2	0,0	1,0

Carga ( kN )	DV P10-TC-E3-4	DV P11-TC-E3-4	DV P12-TE-E3-4	DV P13-TD-E3-4	DV P15-TD-E3-4	DV P14-TE-E3-4	DVM(P10e11)-TC-E3-4	DVM(P12e14)-TE-E3-4	DVM(P13e15)-TD-E3-4
	(mm)								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	1,6	0,7	0,1	2,4	1,7	1,7	1,1	0,9	2,0
4,92	2,2	1,3	1,0	3,2	1,9	2,1	1,7	1,6	2,6
5,92	3,1	1,6	1,4	4,6	2,5	3,1	2,3	2,2	3,6
6,92	3,7	2,0	1,5	5,6	3,0	4,0	2,9	2,7	4,3
7,92	4,3	2,6	2,2	6,6	3,7	4,7	3,5	3,4	5,2
8,89	4,9	3,2	3,6	7,5	4,2	5,5	4,1	4,6	5,9
3,72	2,6	1,2	2,0	4,8	3,3	4,3	1,9	3,1	4,0
0	0,5	0,0	0,7	1,3	0,3	1,2	0,2	0,9	0,8
0	0,5	0,1	0,8	1,3	0,3	1,0	0,3	0,9	0,8

### Ensaio E3-1 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E3-1	DV P2-TE-E3-1	DV P8-TD-E3-1	DV P4-TC-E3-1	DV P6-TC-E3-1	DV P1-TE-E3-1	DV P3-TE-E3-1	DV P7-TD-E3-1	DV P9-TD-E3-1
	(mm)								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	10,6	13,8	15,4	6,2	9,0	12,7	12,9	15,3	15,8
4,92	12,8	15,4	17,3	8,2	10,6	13,6	13,1	17,2	17,5
5,92	15,4	18,6	19,8	10,2	13,1	17,7	14,7	19,3	19,6
6,92	17,8	20,8	23,3	12,6	15,2	20,4	17,9	22,1	21,9
7,92	20,8	25,7	26,6	15,6	17,4	25,2	22,9	25,2	25,0
8,89	23,6	28,5	30,9	17,6	19,6	28,7	24,6	28,6	28,3
3,72	16,0	22,5	23,2	12,9	14,2	21,6	18,6	23,4	21,7
0	1,0	1,0	0,3	0,6	1,3	1,0	0,6	2,0	0,9
0	0,6	0,7	0,3	0,2	0,9	0,6	0,4	1,9	0,8

Carga ( kN )	DV P10-TC-E3-1	DV P11-TC-E3-1	DV P12-TE-E3-1	DV P13-TD-E3-1	DV P15-TD-E3-1	DV P14-TE-E3-1	DVM(P10e11)-TC-E3-1	DVM(P12e14)-TE-E3-1	DVM(P13e15)-TD-E3-1
	(mm)								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	2,7	2,7	2,5	2,8	4,0	3,3	2,7	2,9	3,4
4,92	3,3	3,1	2,7	3,7	4,8	3,4	3,2	3,1	4,2
5,92	4,2	3,9	3,9	4,9	5,9	4,4	4,1	4,1	5,4
6,92	5,0	4,5	5,1	6,1	6,8	5,1	4,7	5,1	6,4
7,92	6,0	5,4	5,9	7,8	8,0	6,4	5,7	6,2	7,9
8,89	7,4	6,1	6,4	9,7	8,9	7,5	6,7	6,9	9,3
3,72	3,5	3,1	4,3	5,3	6,2	5,1	3,3	4,7	5,7
0	0,3	0,9	1,4	0,8	0,8	1,4	0,6	1,4	0,8
0	0,5	0,9	1,5	0,9	0,7	1,4	0,7	1,5	0,8

### Ensaio E4-2 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E4-2	DV P2-TE-E4-2	DV P8-TD-E4-2	DV P4-TC-E4-2	DV P6-TC-E4-2	DV P1-TE-E4-2	DV P3-TE-E4-2	DV P7-TD-E4-2	DV P9-TD-E4-2
	( mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	13,5	12,1	12,1	9,9	9,8	13,2	10,7	10,0	11,7
4,92	17,6	16,4	14,9	14,6	13,1	18,0	14,0	13,0	14,6
5,92	19,4	18,4	16,5	16,2	14,7	20,2	15,8	14,1	15,9
6,92	22,5	21,8	18,9	18,1	17,0	23,6	18,4	17,0	18,6
7,92	26,1	25,2	21,0	21,3	19,7	26,7	21,2	19,0	21,1
8,89	29,2	28,7	24,5	23,5	22,7	29,8	24,2	22,1	23,6
3,72	21,4	21,2	18,2	19,3	16,7	22,5	17,7	17,2	17,8
0	1,0	1,3	0,3	1,6	0,6	1,6	1,6	0,7	1,1
0	0,9	1,2	0,2	1,6	0,6	1,6	1,6	0,8	1,0

Carga ( kN )	DV P10-TC-E4-2	DV P11-TC-E4-2	DV P12-TE-E4-2	DV P13-TD-E4-2	DV P15-TD-E4-2	DV P14-TE-E4-2	DVM(P10e11)-TC-E4-2	DVM(P12e14)-TE-E4-2	DVM(P13e15)-TD-E4-2
	( mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	1,9	2,9	2,0	1,6	1,7	2,3	2,4	2,2	1,6
4,92	2,9	4,2	3,5	2,6	2,3	3,2	3,5	3,3	2,5
5,92	3,4	4,9	3,8	2,9	2,7	3,6	4,2	3,7	2,8
6,92	4,2	5,8	4,6	3,8	3,3	4,1	5,0	4,4	3,6
7,92	4,8	6,7	5,4	4,7	3,9	4,7	5,7	5,0	4,3
8,89	5,4	7,6	6,2	5,4	4,4	5,2	6,5	5,7	4,9
3,72	2,6	4,1	3,8	3,2	3,7	3,6	3,3	3,7	3,4
0	0,3	1,0	1,5	0,7	1,2	0,8	0,7	1,2	0,9
0	0,4	0,9	1,6	0,7	1,1	0,8	0,7	1,2	0,9

### Ensaio E1-3 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E1-3	DV P2-TE-EC1-3	DV P8-TD-E1-3	DV P4-TC-E1-3	DV P6-TC-E1-3	DV P1-TE-E1-3	DV P3-TE-E1-3	DV P7-TD-E1-3	DV P9-TD-E1-3
	( mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	13,9	15,2	11,1	10,1	10,5	13,4	10,6	10,0	11,4
4,92	15,9	16,8	12,5	11,8	12,3	14,8	12,2	10,9	13,0
5,92	18,7	20,0	14,4	13,7	14,3	17,6	14,0	13,1	15,0
6,92	21,5	24,1	16,9	16,4	17,2	20,3	17,1	15,2	17,3
7,92	24,9	28,2	20,1	19,7	20,2	23,1	20,2	17,5	19,8
8,89	26,8	31,1	22,1	21,5	22,7	25,2	22,9	19,6	21,7
3,72	21,0	23,5	16,3	17,7	17,1	21,0	18,9	15,8	16,5
0	0,9	1,6	0,9	0,6	1,5	1,8	1,2	1,6	1,4
0	0,7	1,4	0,8	0,4	1,3	1,8	1,0	1,6	1,4

Carga ( kN )	DV P10-TC-E1-3	DV P11-TC-E1-3	DV P12-TE-E1-3	DV P13-TD-E1-3	DV P15-TD-E1-3	DV P14-TE-E1-3	DVM(P10e11)-TC-E1-3	DVM(P12e14)-TE-E1-3	DVM(P13e15)-TD-E1-3
	( mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	2,7	1,6	1,2	1,8	1,0	1,8	2,1	1,5	1,4
4,92	3,4	2,0	1,5	2,6	1,1	2,2	2,7	1,8	1,8
5,92	4,4	2,6	2,2	3,5	1,3	2,7	3,5	2,4	2,4
6,92	5,7	3,3	2,9	4,4	1,5	3,3	4,5	3,1	3,0
7,92	6,9	3,9	3,5	5,7	1,9	3,9	5,4	3,7	3,8
8,89	7,5	4,3	4,0	6,6	2,1	4,4	5,9	4,2	4,3
3,72	4,2	2,4	2,6	3,8	1,5	3,1	3,3	2,9	2,6
0	1,8	0,4	0,8	0,9	0,3	0,6	1,1	0,7	0,6
0	0,8	0,4	0,8	0,5	0,4	0,7	0,6	0,8	0,4

### Ensaio E2-4 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E2-4	DV P2-TE-E2-4	DV P8-TD-E2-4	DV P4-TC-E2-4	DV P6-TC-E2-4	DV P1-TE-E2-4	DV P3-TE-E2-4	DV P7-TD-E2-4	DV P9-TD-E2-4
	( mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	16,5	10,4	12,6	13,0	12,8	10,2	7,0	11,8	11,9
4,92	20,0	13,0	14,1	15,8	15,3	13,0	7,7	13,6	13,3
5,92	23,3	16,2	15,9	18,9	18,0	15,7	12,5	15,5	15,4
6,92	26,7	19,2	18,7	21,4	21,1	18,1	15,0	17,7	17,9
7,92	30,2	21,7	21,4	24,2	24,5	21,2	18,3	21,3	19,9
8,89	33,7	25,0	24,3	27,9	27,4	24,3	21,4	23,4	23,3
3,72	26,4	18,5	18,7	22,4	21,6	18,0	15,4	19,1	17,3
0	1,7	1,2	0,7	1,7	1,2	1,3	1,3	1,1	0,7
0	1,6	1,2	0,7	1,6	1,2	1,4	1,3	1,1	0,8

Carga ( kN )	DV P10-TC-E2-4	DV P11-TC-E2-4	DV P12-TE-E2-4	DV P13-TD-E2-4	DV P15-TD-E2-4	DV P14-TE-E2-4	DVM(P10e11)-TC-E2-4	DVM(P12e14)-TE-E2-4	DVM(P13e15)-TD-E2-4
	( mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	2,0	2,0	1,0	0,9	1,1	1,1	2,0	1,1	1,0
4,92	2,6	2,9	1,6	1,1	1,3	1,5	2,8	1,6	1,2
5,92	3,2	3,9	2,2	1,3	1,7	2,0	3,5	2,1	1,5
6,92	3,8	4,9	3,2	1,5	2,1	2,5	4,3	2,8	1,8
7,92	4,4	5,8	4,1	1,7	2,6	2,9	5,1	3,5	2,2
8,89	5,1	7,0	5,2	2,2	3,3	3,1	6,0	4,1	2,7
3,72	2,6	3,6	2,5	0,9	2,3	2,2	3,1	2,4	1,6
0	0,4	1,4	0,5	0,1	0,6	0,7	0,9	0,6	0,4
0	0,4	1,5	0,6	0,2	0,7	0,8	0,9	0,7	0,4

### Ensaio E2-1 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E2-1	DV P2-TE-E2-1	DV P8-TD-E2-1	DV P4-TC-E2-1	DV P6-TC-E2-1	DV P1-TE-E2-1	DV P3-TE-E2-1	DV P7-TD-E2-1	DV P9-TD-E2-1
	(mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	16,5	11,8	12,7	12,2	12,6	11,6	8,6	11,9	13,0
4,92	32,5	21,8	22,5	27,3	25,9	22,1	18,8	22,5	22,0
5,92	33,1	22,6	23,3	27,8	26,7	23,1	19,2	22,9	22,9
6,92	34,5	23,4	24,9	28,6	27,8	23,4	20,1	23,6	24,0
7,92	35,5	24,8	25,6	29,4	28,3	24,6	21,1	24,1	24,8
8,89	38,5	26,7	28,5	31,0	31,2	26,1	22,3	26,9	27,3
9,88	42,1	29,4	30,7	34,9	34,3	28,3	24,4	28,3	29,7
10,87	46,0	32,1	35,0	37,7	37,7	30,5	27,0	30,5	32,9
11,84	51,5	36,4	38,9	41,7	41,9	34,1	30,1	32,5	36,7
12,33	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
0	44,4	2,1	3,0	16,8	15,7	1,9	2,0	3,9	3,4

(\*) Ruptura da telha central do espécime.

Carga ( kN )	DV P10-TC-E2-1	DV P11-TC-E2-1	DV P12-TE-E2-1	DV P13-TD-E2-1	DV P15-TD-E2-1	DV P14-TE-E2-1	DVM(P10e11)-TC-E2-1	DVM(P12e14)-TE-E2-1	DVM(P13e15)-TD-E2-1
	(mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	2,9	2,1	1,8	1,5	1,9	2,9	2,5	2,3	1,7
4,92	5,7	4,5	4,1	3,4	6,0	5,5	5,1	4,8	4,7
5,92	6,2	4,9	4,2	3,7	6,2	6,7	5,6	5,5	5,0
6,92	7,0	5,4	4,7	4,4	6,7	7,2	6,2	5,9	5,5
7,92	7,4	5,7	5,0	4,6	6,9	7,3	6,5	6,1	5,8
8,89	8,5	6,5	5,6	5,2	7,6	8,0	7,5	6,8	6,4
9,88	9,3	7,2	6,0	5,7	8,3	8,6	8,2	7,3	7,0
10,87	10,2	8,2	6,6	6,2	9,3	9,3	9,2	7,9	7,8
11,84	11,3	9,1	7,4	6,8	10,4	10,0	10,2	8,7	8,6
12,33	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
0	3,3	2,8	2,8	1,7	1,8	1,6	3,1	2,2	1,8

(\*) Ruptura da telha central do espécime.

### Ensaio E3-2 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E3-2	DV P2-TE-E3-2	DV P8-TD-E3-2	DV P4-TC-E3-2	DV P6-TC-E3-2	DV P1-TE-E3-2	DV P3-TE-E3-2	DV P7-TD-E3-2	DV P9-TD-E3-2
	(mm)								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	12,6	13,9	14,7	8,2	10,1	13,8	11,7	11,3	14,4
4,92	15,0	15,9	17,4	10,6	12,1	15,7	13,5	13,5	16,8
5,92	18,1	18,9	20,5	13,2	14,9	18,9	15,7	16,1	19,9
6,92	21,4	21,4	24,2	15,6	17,3	21,5	18,0	20,2	23,4
7,92	24,7	24,3	28,6	18,9	20,2	24,0	20,2	22,3	27,3
8,89	27,4	26,9	33,3	21,4	23,1	26,0	23,4	26,6	31,0
9,88	32,1	30,8	37,8	25,4	27,6	29,0	26,3	29,5	34,8
9,88	31,4	30,2	36,2	25,3	26,7	28,7	25,7	29,0	34,1
10,87	34,1	32,7	39,4	27,7	29,3	31,8	28,3	31,4	36,5
11,84	36,7	35,2	44,4	30,0	32,0	33,5	30,2	33,9	40,0
12,83	40,4	38,8	48,8	33,2	36,4	36,2	32,9	36,8	42,9
13,80	43,9	41,6	(*)	35,8	39,3	38,2	35,2	(*)	(*)
0	1,8	2,1	35,0	2,0	2,2	2,4	2,6	11,9	14,3

(\*) Ruptura da telha direita do espécime.

Carga ( kN )	DV P10-TC-E3-2	DV P11-TC-E3-2	DV P12-TE-E3-2	DV P13-TD-E3-2	DV P15-TD-E3-2	DV P14-TE-E3-2	DVM(P10e11)-TC-E3-2	DVM(P12e14)-TE-E3-2	DVM(P13e15)-TD-E3-2
	(mm)								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	1,5	2,3	1,7	1,5	1,8	1,3	1,9	1,5	1,6
4,92	2,1	3,2	2,4	1,9	2,4	1,5	2,6	2,0	2,2
5,92	2,8	4,1	3,6	2,6	3,3	2,1	3,5	2,9	3,0
6,92	3,7	5,2	4,5	3,3	4,3	2,7	4,4	3,6	3,8
7,92	4,3	6,2	5,3	4,0	5,2	3,3	5,3	4,3	4,6
8,89	4,9	7,2	6,2	4,9	6,1	3,8	6,1	5,0	5,5
9,88	5,4	8,5	7,4	5,6	7,1	4,5	7,0	5,9	6,3
9,88	5,5	7,8	6,3	5,7	6,7	4,3	6,6	5,3	6,2
10,87	6,5	8,8	7,4	6,4	7,5	5,0	7,6	6,2	7,0
11,84	7,2	9,8	8,2	7,4	8,5	5,5	8,5	6,8	7,9
12,83	8,1	11,4	9,7	8,4	9,7	6,5	9,8	8,1	9,0
13,80	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
0	2,1	3,2	2,7	3,1	3,5	0,7	2,7	1,7	3,3

(\*) Ruptura da telha direita do espécime.

### Ensaio E4-3 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E4-3	DV P2-TE-E4-3	DV P8-TD-E4-3	DV P4-TC-E4-3	DV P6-TC-E4-3	DV P1-TE-E4-3	DV P3-TE-E4-3	DV P7-TD-E4-3	DV P9-TD-E4-3
	(mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	19,1	12,5	14,3	15,7	16,1	14,3	10,2	13,8	14,8
4,92	21,0	14,1	14,9	17,1	17,9	15,9	11,3	14,1	15,7
5,92	25,5	17,7	17,0	20,3	21,8	19,1	15,8	15,9	17,6
6,92	29,9	21,1	19,7	22,8	25,1	22,3	19,6	18,2	20,7
7,92	35,1	25,3	21,6	26,7	29,7	25,7	23,4	19,9	22,9
8,89	39,8	29,1	24,8	30,7	34,3	28,4	27,3	22,6	25,5
9,88	45,6	33,4	28,0	34,2	38,8	31,8	31,0	25,5	28,3
10,87	53,8	37,9	34,6	40,4	45,9	35,0	35,6	30,4	33,8
11,34	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
0	45,5	3,6	3,3	17,3	16,0	4,1	3,6	5,2	4,2

(\*) Ruptura da telha central do espécime.

Carga ( kN )	DV P10-TC-E4-3	DV P11-TC-E4-3	DV P12-TE-E4-3	DV P13-TD-E4-3	DV P15-TD-E4-3	DV P14-TE-E4-3	DVM(P10e11)-TC-E4-3	DVM(P12e14)-TE-E4-3	DVM(P13e15)-TD-E4-3
	(mm )								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	2,6	1,9	1,0	0,8	1,8	1,5	2,3	1,3	1,3
4,92	2,9	2,3	1,2	0,9	1,9	1,7	2,6	1,4	1,4
5,92	3,7	3,0	1,6	1,7	2,0	2,2	3,4	1,9	1,9
6,92	4,5	3,7	2,0	2,2	2,5	2,7	4,1	2,3	2,4
7,92	5,1	4,4	2,5	2,6	3,1	3,1	4,8	2,8	2,9
8,89	6,0	5,0	3,0	2,9	3,5	3,6	5,5	3,3	3,2
9,88	6,6	5,7	3,6	3,4	4,0	4,0	6,2	3,8	3,7
10,87	7,4	6,7	4,0	3,9	4,9	4,4	7,1	4,2	4,4
11,34	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
0	2,4	3,0	1,8	1,4	1,4	1,2	2,7	1,5	1,4

(\*) Ruptura da telha central do espécime.

### Ensaio E1-4 - deslocamentos verticais

Carga ( kN )	DV P5-TC-E1-4	DV P2-TE-E1-4	DV P8-TD-E1-4	DV P4-TC-E1-4	DV P6-TC-E1-4	DV P1-TE-E1-4	DV P3-TE-E1-4	DV P7-TD-E1-4	DV P9-TD-E1-4
	(mm)								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	8,8	16,7	10,1	6,7	7,9	12,5	11,8	8,5	11,3
4,92	10,9	18,6	12,6	8,3	9,7	14,9	13,5	11,1	14,0
5,92	14,0	22,6	15,6	10,6	12,3	17,5	21,3	13,2	16,5
6,92	16,5	25,5	18,8	12,7	14,5	19,3	22,9	15,8	19,5
7,92	19,2	30,2	21,4	15,6	16,8	21,9	26,6	17,9	21,5
8,89	22,3	34,9	25,1	18,4	19,8	24,7	29,9	20,5	25,1
9,88	25,2	39,7	28,5	21,1	22,7	27,1	34,3	22,9	27,5
10,87	28,8	44,7	32,7	24,0	26,1	28,3	38,8	26,8	31,6
11,84	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	28,0	33,3
0	1,5	9,1	1,1	1,9	1,2	4,7	5,4	1,5	1,8

(\*) Ruptura da telha esquerda do espécime.

Carga ( kN )	DV P10-TC-E1-4	DV P11-TC-E1-4	DV P12-TE-E1-4	DV P13-TD-E1-4	DV P15-TD-E1-4	DV P14-TE-E1-4	DVM(P10e11)-TC-E1-4	DVM(P12e14)-TE-E1-4	DVM(P13e15)-TD-E1-4
	(mm)								
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,72	0,8	1,1	1,0	1,9	0,9	1,5	0,9	1,2	1,4
4,92	1,3	1,4	1,4	2,8	1,3	1,8	1,3	1,6	2,0
5,92	1,6	1,7	2,0	3,3	1,6	2,2	1,6	2,1	2,4
6,92	2,2	1,8	2,4	4,2	2,5	2,6	2,0	2,5	3,4
7,92	2,8	1,9	2,6	5,0	3,2	3,0	2,3	2,8	4,1
8,89	3,2	2,1	3,1	5,8	3,7	3,5	2,7	3,3	4,7
9,88	3,9	2,5	3,7	6,5	4,5	3,8	3,2	3,8	5,5
10,87	5,1	3,3	4,6	7,8	5,3	4,5	4,2	4,5	6,5
11,84	(*)	(*)	(*)	8,2	5,6	(*)	(*)	(*)	6,9
0	0,6	0,3	1,5	1,7	1,2	0,9	0,5	1,2	1,5

(\*) Ruptura da telha esquerda do espécime.

## ANEXO B – TENSÕES ATUANTES NO MODELO (MEF)

Tensões de compressão e tração (kN / cm<sup>2</sup>) atuantes na seção transversal, na metade do vão do modelo com carga de 8,89 kN

Nó	TC - md	TD - me	TD - md
1	-16,32	-15,72	-15,72
2	-15,14	-14,55	-14,60
3	-12,03	-11,52	-11,62
4	-11,64	-11,08	-11,26
5	-11,40	-10,80	-11,03
6	-11,25	-10,63	-10,89
7	-10,92	-10,30	-10,59
8	-10,11	-9,52	-9,85
9	-8,89	-8,36	-8,75
10	-5,38	-5,00	-5,56
11	-1,86	-1,65	-2,36
12	1,63	1,67	0,81
13	2,90	2,88	1,96
14	3,95	3,90	2,94
15	4,74	4,66	3,68
16	6,42	6,31	5,31
17	8,16	8,00	6,99

Observações: Tensão de compressão ( - );  
Tensão de tração ( + );

Nó	TC - md	TD - me	TD - md
18	8,28	8,16	7,31
19	9,02	8,91	8,10
20	10,19	10,04	9,14
21	11,55	11,34	10,25
22	12,54	12,29	11,17
23	13,51	13,23	12,08
24	13,89	13,59	12,45
25	13,82	13,52	12,43
26	9,11	13,03	7,93
27	4,44	11,71	3,67
28	4,00	10,39	3,54
29	4,83	9,13	4,90
30	6,35	7,79	6,27
31	6,72	6,57	6,38
32	3,83	5,66	3,60
33	0,26	3,00	0,68
34	-1,30	0,30	-0,26

TC - telha central do modelo;  
TD - telha direita do modelo;

Nó	TC - md	TD - me	TD - md
35	-1,20	-0,85	1,31
36	-1,71	-1,98	0,56
37	-2,65	-2,64	-1,16
38	-2,29	-2,51	-1,14
39	-3,64	-5,21	-1,97
40	-6,62	-7,90	-3,81
41	-8,53	-8,43	-5,06
42	-8,46	-8,36	-5,19
43	-7,81	-7,71	-5,03
44	-5,40	-5,33	-4,15
45	-5,90	-5,82	-5,08
46	-5,19	-5,12	-4,95
47	-3,58	-3,53	-3,60
48	-1,59	-1,56	-1,28
49	-0,27	-0,26	-0,76
50	1,04	1,03	-0,17
-	-	-	-

md - metade direita da seção transversal;  
me - metade esquerda da seção transversal.

## ANEXO C – DESLOCAMENTOS VERTICAIS ATUANTES NO MODELO (MEF)

Carga ( kN )	DV P5-TC	DV P8-TD	DV P4-TC	DV P6-TC	DV P7-TD	DV P9-TD	DV P10-TC	DV P13-TD	DV P15-TD
	( mm )								
8,89	26,9	26,0	24,7	24,7	23,8	23,8	6,4	6,5	3,1