

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**DETERMINAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA RIGIDEZ
AO CISALHAMENTO DEVIDO À RESTRIÇÃO DAS
TELHAS CONECTADAS NAS TERÇAS**

Engº Eduardo Lourenço Pinto

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – Ênfase em Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Renato Bertolino Júnior

Ilha Solteira, SP
Maio/ 2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

Pinto, Eduardo Lourenço

P659d Determinação teórico-experimental da rigidez ao cisalhamento devido à restrição das telhas conectadas nas terças / Eduardo Lourenço Pinto. – Ilha Solteira : [s.n.], 2006
121 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006

Orientador: Renato Bertolino Júnior

Bibliografia: p. 111-114

1. Estruturas metálicas. 2. Cobertura metálica. 3. Sistema telha-terça.
4. Rigidez ao cisalhamento.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Determinação Teórico-Experimental da Rigidez ao Cisalhamento Devido à Restrição das Telhas Conectadas nas Terças

AUTOR: EDUARDO LOURENÇO PINTO

ORIENTADOR: Prof. Dr. RENATO BERTOLINO JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA CIVIL pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RENATO BERTOLINO JUNIOR

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

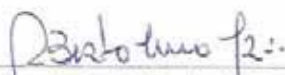
Prof. Dr. JOSE ANTONIO MATTHIESEN

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. FRANCISCO CARLOS RODRIGUES

Departamento de Engenharia de Estruturas - UFMG - Belo Horizonte-MG

Data da realização: 19 de maio de 2006.



Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. RENATO BERTOLINO JUNIOR

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Renato Bertolino Júnior pela amizade e por ser o principal responsável na realização deste trabalho de pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil.

Aos Laboratórios de Engenharia Civil e de Engenharia Mecânica da FEIS e ao Departamento de Matemática da FEIS.

Ao Laboratório CESP de Engenharia Civil pela disponibilização de suas instalações e pelo apoio técnico de seus funcionários.

A CAPES e a FAPESP pelos incentivos fornecidos a esta pesquisa.

Aos meus pais, a minha irmã e família, e a querida Kellen e aos seus pais, pelo carinho, compreensão e paciência, e hoje compartilham comigo a alegria do término desta etapa.

Aos amigos pelas sugestões e sempre dispostos a ajudar.

RESUMO

Pinto, E.L., (2006). Determinação teórico-experimental da rigidez ao cisalhamento devido à restrição das telhas conectadas nas terças. Ilha Solteira, 121 p. Dissertação (Mestrado). UNESP – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

O desenvolvimento da presente pesquisa tem a finalidade de estudar um dos efeitos principais de restrição de telhas conectadas nas terças, que é a rigidez ao cisalhamento. O valor da rigidez ao cisalhamento é determinado pela influência da restrição da telha no deslocamento lateral da terça sobre o seu eixo longitudinal, em função do espaçamento dos parafusos de conexão.

Para a determinação da rigidez ao cisalhamento foi utilizado um procedimento experimental, semelhante ao modelo numérico, referido como DOUBLE BEAM SHEAR TEST - DBST, que permite avaliar a restrição dada pela telha à terça ao cisalhamento.

Para os testes do modelo DBST foi utilizado o Laboratório de Engenharia Civil, onde foram ensaiadas séries desse conjunto para a determinação da rigidez ao cisalhamento. As terças são constituídas de perfil formado a frio. As distâncias entre as terças são compreendidas entre os valores de 1000 a 2300 mm. As telhas são do tipo ondulada com altura de 17 mm e trapezoidal com altura compreendida entre 25 mm e 100 mm. As espessuras das telhas estão entre os valores de 0,43 mm e 0,80 mm.

Os testes foram todos realizados no Laboratório de Engenharia Civil, UNESP/FEIS.

Palavras-chave: sistema telha-terça, rigidez ao cisalhamento.

ABSTRACT

Pinto, E.L., (2006). Theoretical-experimental determination of the rigidity to the shear due to restriction of the sheeting connected in purlin. Ilha Solteira, 121 p. Dissertation (Mastering). UNESP – State University Paulista, Ilha Solteira.

The development of the present research has the purpose to study one of the main effect of restriction of the sheeting connected in purlin, that it is the rigidity to the shear. The value of the rigidity to the shear is determined by the influence of the restriction of the sheeting in the lateral displacement of purlin on its longitudinal axis, in function of the spacing of the connection screws.

For the determination of the rigidity to the shear an experimental procedure was used, similar to the numerical model, related as DOUBLE BEAM SHEAR TEST - DBST, that allows to evaluate the restriction given for the sheeting to purlin to the shear.

For the tests of model DBST the Laboratory of Civil Engineering was used, where had been assayed series of this set for the determination of the rigidity to the shear. Purlins are constituted of the cold formed profile. The distances between purlins are understood between the values of 1000 the 2300 mm. The sheeting are of the type wavy with height of 17 mm and trapezoidal with height understood between 25 mm and 100 mm. The thicknesses of the sheeting are between the values of 0,43 mm and 0,80 mm.

The test had been all carried through in the Laboratory of Civil Engineering, UNESP/FEIS.

Key-words: system sheeting-purlin, rigidity to the shear.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 - Modelagem da restrição na terça pela telha.	20
Figura 2.1 - Restrições contínuas em vigas (Trahair 1996).....	21
Figura 2.2 - Restrições em vigas (vista inferior).	22
Figura 2.3 – Disposição dos tirantes com as terças.	22
Figura 2.4 – Disposições construtivas dos tirantes com as terças (Bellei 2000). .	23
Figura 2.5 – Disposição construtiva das terças de cobertura.	23
Figura 2.6 - Restrições contínuas de telhas (Trahair 2000)	24
Figura 2.7 - Deformação total para os dois casos de carregamento.	26
Figura 2.8 - Esquema da restrição fornecida pela telha (Tomà e Wittemann 1994).	27
Figura 2.9 – Simulação do sistema telha-terça por meio de molas de rotação de translação.....	28
Figura 2.10 – Discretização do Modelo Completo (Lucas <i>et ali</i> 1997a).	29
Figura 2.11 – Restrição da Telha (LUCAS <i>et ali</i> 1997a).	30
Figura 2.12 - Forma defletida da terça sob ação de sucção (LUCAS <i>et ali</i> 1997a)	31
Figura 2.13 - Forma da deflexão da terça e da telha (LUCAS <i>et ali</i> 1997a).....	32
Figura 2.14 - Modelo utilizado na determinação da rigidez ao cisalhamento (LUCAS <i>et ali</i> 1997b)	33
Figura 2.15 – Localização da resistência local transversal da alma ($R_{W, RD}$)	35
Figura 2.16 - Deformação total dividida em duas partes.	35
Figura 2.17 – Barras submetidas à flexão apresentando o modo de flambagem por distorção da seção transversal.....	38
Figura 3.1 – Modelos e tipos das telhas para ensaio (Catálogo R.Telhas)	39
Figura 3.2 – Seção transversal, numeração e localização das ondas baixas conectadas.	40
Figura 3.3 – Dimensões dos perfis utilizados para os ensaios.....	41
Figura 3.4 - Fixadores autoperfurantes zincados (1/4" x 7/8" com cabeça sextavada 3/8").....	42
Figura 3.5 – Disposição das barras submetidas ao esforço de flexão simples: (a) Perfil Ue; (b) Perfil formado por 2Ue.	43

Figura 3.6 – Localização dos momentos M_A , M_B , M_C e $M_{MÁX}$, entre dois pontos contidos lateralmente.	46
Figura 3.7 – Tensões normais de compressão no elemento analisado.	47
Figura 4.1 – Medidas dos corpos-de-prova, em milímetro.	56
Figura 4.2 – Corpo-de-prova do perfil Ue (acima) e da telha de aço (abaixo), em ambos colados extensômetros elétricos de resistência (strain gauge).	57
Figura 4.3 – Equipamentos utilizados na realização do ensaio de tração.	58
Figura 4.4 – Perfis submetidos ao esforço de flexão simples: (a) Perfil Ue 75x40x15x2.25; (b) Perfil 2Ue 100x40x15x2.25.	59
Figura 4.5 – Visualização dos ensaios: (a) Ensaio realizado na 1ª etapa; (b) Ensaio realizado na 2ª etapa.	60
Figura 4.6 – Sistema de aquisição de dados.	61
Figura 4.7 – Vista lateral do sistema estrutural ensaiado na 1ª etapa.	62
Figura 4.8 – Vistas laterais do posicionamento dos perfis e formas fletidas durante aplicação da carga: (a) ensaio da 1ª etapa; (b) ensaio da 2ª etapa.	63
Figura 4.9 – Detalhe da posição dos medidores de deslocamento localizados no meio do vão central ($L/2$): ensaio da 1ª etapa.	65
Figura 4.10 – Detalhe da posição dos medidores de deslocamento localizados no meio do vão central ($L/2$): ensaio da 2ª etapa.	66
Figura 4.11 – Detalhe do fixador autoperfurante: (a) aplicação com parafusadeira; (b) após aplicação.	67
Figura 4.12 – Flechas máximas obtidas no meio do vão central do perfil 2Ue75x40x15x2.25.	71
Figura 4.13 – Flechas máximas obtidas no meio do vão central do perfil 2Ue100x40x15x2.25.	72
Figura 4.14 – Flechas máximas obtidas no meio do vão central do perfil 2Ue127x50x15x2.65.	73
Figura 4.15 – Rigidez cisalhante fornecida pela telha RT35 com distância entre perfis de 1,90 m: (a) Espessura de 0,43 mm; (b) Espessura de 0,50 mm.	74
Figura 4.16 - Rigidez cisalhante fornecida pela telha RT35 com distância entre perfis de 1,90 m: (a) Espessura de 0,65 mm; (b) Espessura de 0,80 mm.	75
Figura 4.17 – Rigidez cisalhante fornecida pela telha RT17: (a) 4 ondas baixas conectadas (1ª, 5ª, 10ª e 14ª); (b) 8 ondas baixas conectadas (1ª, 3ª, 5ª, 7ª, 8ª, 10ª, 12ª e 14ª).	77

Figura 4.18 – Rigidez cisalhante fornecida pela telha RT25: (a) 4 ondas baixas conectadas (1ª, 3ª, 4ª e 6ª); (b) 6 ondas baixas conectadas (1ª, 2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 6ª).	79
Figura 4.19 – Rigidez cisalhante fornecida pela telha RT35: 3 ondas baixas conectadas (1ª, 2ª e 3ª).	81
Figura 4.20 – Rigidez cisalhante fornecida pela telha RT40: (a) 3 ondas baixas conectadas (1ª, 3ª e 5ª); (b) 5 ondas baixas conectadas (1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª).	82
Figura 4.21 – Rigidez cisalhante fornecida pela telha RT100: 2 ondas baixas conectadas (1ª e 2ª).	84
Figura 5.1 – Geometria do elemento SHELL 93.	91
Figura 5.2 – Geometria do elemento COMBIN 14.	92
Figura 5.3 – Modelo numérico simulado referente a 1ª etapa dos ensaios.	93
Figura 5.4 – Modelo numérico simulado referente a 2ª etapa dos ensaios.	94
Figura 5.5 – Formas fletidas dos perfis acoplados as molas, localizados no meio do vão interno: (a) Ue75x40x15x2.25, (c) Ue100x40x15x2.25, (e) Ue127x50x15x2.65	104
Figura 5.6 – Formas fletidas dos perfis acoplados as molas, localizados no meio do vão interno: (a) 2Ue75x40x15x2.25, (c) 2Ue100x40x15x2.25, (e) 2Ue127x50x15x2.65	105
Figura A.1 – Formação de ondas e semi-ondas no painel da telha RT17: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.	116
Figura A.2 – Zonas de colapso no painel da telha RT17 localizadas próximo aos apoios superiores: (a) à esquerda (b) à direita.	117
Figura A.3 – Formação de zonas de colapso no painel da telha RT25: (a) Vista frontal; (b) Detalhe das linhas de plastificação.	118
Figura A.4 – Colapso por esmagamento e rasgamento das chapas localizadas à esquerda do apoio: (a) superior; (b) inferior.	119
Figura A.5 – Formação de zonas de colapso no painel da telha RT35: (a) Vista frontal; (b) Detalhe das linhas de plastificação.	120
Figura A.6 – Detalhe da zona de colapso no painel da telha RT40, localizado à esquerda do apoio superior.	121
Figura A.7 – Forma fletida do ensaio no painel da telha RT100: (a) Vista frontal; (b) Detalhe à direita do apoio inferior.	122

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 3.1. Distâncias dos vãos utilizados nos ensaios.....	43
Tabela 3.2. Determinação da tensão de flambagem elástica no Estado Limite Último de Flambagem Lateral por Torção.	50
Tabela 3.3. Verificação da Flambagem Local no Estado Limite Último.....	51
Tabela 3.4. Determinação dos momentos fletores resistentes.....	51
Tabela 3.5. Determinação da resistência e da solicitação ao cortante.....	52
Tabela 3.6. Verificação do momento fletor e força cortante combinados.	52
Tabela 3.7. Determinação dos deslocamentos máximos correspondentes às cargas de solicitação.	52
Tabela 4.1. Seleção das amostras para o ensaio de tração.	57
Tabela 4.2. Resultados do ensaio de tração.	58
Tabela 4.3. Associação dos ensaios na 1ª etapa.....	61
Tabela 4.4. Associação dos ensaios na 2ª etapa.....	61
Tabela 4.5. Valores experimentais das flechas máximas.....	68
Tabela 4.6. Resultados experimentais das flechas mínimas e máximas fornecidas pelo painel formado por uma telha conectada à terça.....	69
Tabela 4.7. Resultados experimentais da flecha máxima, fornecida pelo painel formado por três telhas conectadas aos perfis 2Ue.	70
Tabela 4.8. Resultados experimentais da rigidez cisalhante fornecida pelo painel formado por uma telha conectada à terça.	85
Tabela 4.9. Resultados experimentais da rigidez cisalhante fornecida pelo painel formado por três telhas conectadas aos perfis.....	86
Tabela 4.10. Resumo das flechas teóricas e experimentais obtidas no meio do vão central dos perfis 2Ue.....	88
Tabela 4.11 – Resumo da rigidez cisalhante média desenvolvida pelas RT17, RT25, RT35 e RT40 ao longo das distâncias entre perfis 2Ue.	90
Tabela 4.12 – Resumo da rigidez cisalhante média desenvolvida pela telha RT100 ao longo das distâncias entre os perfis 2Ue127x5x15x2.65.	90
Tabela 5.1. Associação das simulações numéricas na 1ª etapa.....	96

Tabela 5.2. Associação das simulações numéricas na 2ª etapa.....	96
Tabela 5.3. Deslocamentos máximos no meio do vão do perfil Ue75x40x15x2.25.	97
Tabela 5.4. Tensões normais longitudinais no meio do vão do perfil Ue75x40x15x2.25.	97
Tabela 5.5. Deslocamentos máximos no meio do vão do perfil Ue100x40x15x2.25.	98
Tabela 5.6. Tensões normais longitudinais no meio do vão do perfil Ue100x40x15x2.25.	98
Tabela 5.7. Deslocamentos máximos no meio do vão do perfil Ue127x50x15x2.65.	99
Tabela 5.8. Tensões normais longitudinais no meio do vão do perfil Ue127x50x15x2.65.	99
Tabela 5.9. Deslocamentos máximos no meio do vão do perfil 2Ue75x40x15x2.25.	100
Tabela 5.10. Tensões normais máximas longitudinais no meio do vão do perfil 2Ue75x40x15x2.25.	101
Tabela 5.11. Deslocamentos máximos no meio do vão do perfil 2Ue100x40x15x2.25.	102
Tabela 5.12. Tensões normais máximas longitudinais no meio do vão do perfil 2Ue100x40x15x2.25.	102
Tabela 5.13. Deslocamentos máximos no meio do vão do perfil 2Ue127x50x15x2.65.	103
Tabela 5.14. Tensões normais máximas longitudinais no meio do vão do perfil 2Ue127x50x15x2.65.	103
Tabela 5.15. Resumo da redução ao deslocamento em relação aos valores máximos teóricos.	106
Tabela 5.16. Resumo da redução da tensão de flambagem em relação aos valores máximos teóricos.	108

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS:

- A - alongamento do corpo-de-prova na ruptura;
- C_b - coeficiente de equivalência de momentos na flexão;
- C_D - rigidez de mola rotacional total;
- $C_{D,A}$ - rigidez rotacional da conexão entre a telha e a terça;
- $C_{D,C}$ - rigidez rotacional correspondente da rigidez a flexão da telha;
- CV - coeficiente de variação de uma amostra;
- C_w - constante de empenamento;
- E - módulo de elasticidade;
- G - módulo de elasticidade transversal;
- I_{ef} - momento de inércia por unidade de largura da telha;
- I_t - momento de inércia à torção uniforme;
- I_x - momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo x;
- I_y - momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y;
- K_A - rigidez lateral correspondente a rigidez rotacional da conexão entre a telha e a terça;
- K_B - rigidez lateral devido à distorção da seção transversal da terça;
- K_C - rigidez lateral devido à rigidez a flexão da telha;
- $K_t L_t$ - comprimento de flambagem por torção;
- $K_y L_y$ - comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo y;
- L - vão central da viga;
- M_A - momento fletor solicitante, em módulo, no 1º quarto do trecho analisado para FLT;
- M_B - momento fletor solicitante, em módulo, no centro do trecho analisado para FLT;
- M_C - momento fletor solicitante, em módulo, no 3º quarto do trecho analisado para FLT;
- M_e - momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico;

$M_{m\acute{a}x}$ - momento fletor solicitante máximo, em módulo, no trecho analisado para FLT;

M_{Rd}^{InEsc} - momento fletor resistente calculado no início do escoamento da seção efetiva;

M_{Rd}^{FLT} - momento fletor resistente no estado limite da flambagem lateral com torção;

M_S - momento fletor solicitante;

M_S^{FLT} - momento fletor solicitante para flambagem lateral com torção;

N_{et} - força normal de flambagem elástica por torção;

N_{ey} - força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y;

P - ação concentrada aplicada na extremidade do balanço;

V_p - deslocamento normal da terça;

V_S - deslocamento normal da telha;
- força cortante solicitante;

V_S^{FLT} - ação concentrada aplicada no balanço no estado limite de flambagem lateral por torção;

V_S^{InEsc} - ação concentrada aplicada no balanço no início do escoamento da seção efetiva;

$W_{c,ef}$ - módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos;

W_{ef} - módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos;

W_p - deslocamento lateral da terça;

W_S - deslocamento lateral da telha.

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS:

a - distância do centro da conexão a alma da terça;

b - largura da mesa conectada a telha;
- largura do elemento;

b_a - largura da mesa da terça;

- b_{ef} - largura da região comprimida do elemento, calculada com base na seção efetiva;
- d - distância entre a linha central da mesa superior da terça até a linha central da telha, localizada na onda superior conectada;
- du/dz - tangente ou flecha transversal em função da profundidade z $\{u(z)\}$;
- f_{lim} - flecha limite;
- f_y - tensão de escoamento do aço;
- f_u - tensão de ruptura do aço;
- h - altura da parte plana da alma;
- altura da terça;
- h_W - altura da alma entre as linhas medianas das abas;
- k - coeficiente de flambagem de flambagem local calculado para elementos AA e AL;
- k_v - coeficiente de flambagem local por cisalhamento (para alma sem enrijecedores transversais: $k_v = 5,34$);
- l - comprimento do balanço;
- l_a - relação útil do comprimento pela categoria relativa;
- m_{rs} - momento torçor atuando perpendicular ao plano da telha;
- m_{ry} - momento atuando no plano da telha;
- r - raio interno dos cantos;
- r_o - raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção;
- s - desvio-padrão de uma amostra;
- espaçamento entre terças;
- t - espessura da alma;
- espessura da chapa;
- espessura do elemento;
- x - média aritmética de uma amostra.

LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS:

- Δ - deslocamento no meio do vão central;
- σ - tensão normal de compressão, calculada para a seção transversal efetiva.

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS:

- α - coeficiente pela categoria relativa;
- γ - coeficiente de ponderação das ações ($\gamma = 1,1$);
- λ_o - índice de esbeltez reduzido da barra;
- λ_p - índice de esbeltez do reduzido do elemento;
- ρ - fator de redução associado a flambagem por distorção da seção transversal ($\rho = 0,40$);
- ρ_{FLT} - fator de redução associado a flambagem lateral com torção;
- ϕ - declive da alma relativa as abas (graus);
- θ_{rs} - rotação em torno eixo longitudinal da telha;
- θ_p - rotação em torno eixo longitudinal da terça;
- θ_s - rotação em torno eixo longitudinal da telha.

SUMÁRIO

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Breve Histórico	18
1.2. Pesquisas Recentes	19
1.3. Objetivos.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. Vigas Sem Contenção Lateral	21
2.2. Vigas Restritas – Modelo Teórico	22
2.3. Terças Restringidas Pelas Telhas	25
2.4. Modelagem do Sistema Telha-Terça.....	28
2.4.1. Introdução	28
2.4.2. Consideração Sobre a Rigidez	30
2.4.3. Determinação da Rigidez ao Cisalhamento (Modelo Double Beam Shear Test - DBST)	32
2.5. Critérios do EUROCODE 3: ENV 1993-1-3	34
2.5.1. Resistência da Seção Transversal.....	34
2.5.2. Vigas Restringidas Pelas Telhas	35
2.5.3. Rigidez Lateral de Molas.....	35
2.6. Procedimento da NBR 14762: 2001	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1. Telhas.....	39
3.2. Terças.....	41
3.3. Fixadores.....	42
3.4. Método Teórico Para Dimensionamento de Barras Submetidas à Flexão Simples	43
3.4.1 Verificação do Momento Fletor (NBR 14762:2001).....	44
3.4.2 Verificação da Flambagem Local (NBR 14762:2001)	47
3.4.3 Verificação da Força Cortante (NBR 14762:2001).....	48
3.4.4 Verificação do Momento Fletor e Força Cortante Combinados (NBR 14762:2001)	49
3.4.5 Verificação da Flecha Máxima	49

3.4.6	Resultados Teóricos	50
3.4.7	Comentários.....	53
3.5.	Métodos Estatísticos.....	54
3.5.1	Coeficiente de Variação	54
3.5.2	Análise de Variância	54
4.	ANÁLISE EXPERIMENTAL	56
4.1.	Introdução.....	56
4.2.	Propriedades Mecânicas	56
4.3.	Ensaio de Determinação da Rigidez ao Cisalhamento.....	59
4.4.	Resultados Experimentais	68
4.5.	Discussão dos Resultados	87
4.5.1	Análise dos Deslocamentos.....	87
4.5.2	Análise da Rigidez Cisalhante	89
5.	ANÁLISE NUMÉRICA.....	91
5.1.	Introdução.....	91
5.2.	Elemento de Casca	91
5.3.	Elemento Mola-Amortecedor	92
5.4.	Simulação Numérica do Ensaio de Determinação da Rigidez ao Cisalhamento	93
5.5.	Discussão dos Resultados	106
5.5.1	Análise dos Deslocamentos.....	106
5.5.2	Análise das Tensões.....	107
6.	CONCLUSÃO	109
7.	PROPOSTA PARA FUTUROS TRABALHOS.....	111
8.	BIBLIOGRAFIA	112
	ANEXO A	116

1. INTRODUÇÃO

1.1. Breve Histórico

Nos últimos 30 anos, inúmeras investigações teórico-experimentais têm sido realizadas para conhecer o comportamento do sistema telha-terça. Este sistema, utilizado para coberturas ou fechamentos laterais, é normalmente constituído de terças com seção transversal na forma de U, U enrijecido, Z e Z enrijecido, em perfil formado a frio, conectado à telha de aço do tipo ondulada ou trapezoidal pôr parafusos autoperfurantes.

As seções de perfil formado a frio possuem, geralmente, espessuras menores do que as seções de perfis soldados ou laminados, e, por isso, comportam-se de maneira completamente diferente desses. As seções transversais de terças na forma de U, U enrijecido, Z e Z enrijecido, quando solicitadas à flexão, sofrem o efeito da flexão, torção e da flambagem lateral por torção. Em função da ação de restrição da telha, as terças tendem a um estado limite último, não pela flambagem global de flexo-torção, mas pelo colapso plástico, escoamento ou flambagem local, Lucas *et ali* (1997a).

As telhas conectadas nas terças apresentam dois efeitos principais de restrição: um é a rigidez ao cisalhamento e outro é a rigidez rotacional. A rigidez rotacional surge a partir da rigidez rotacional da própria telha e da rigidez rotacional da conexão entre a telha e a terça. O valor da rigidez rotacional e da rigidez ao cisalhamento é determinado pela influência da restrição da telha no deslocamento lateral e na rotação da terça em torno de seu eixo longitudinal. Em particular, essa rigidez varia com o tipo de telha, com o tipo e dimensões da terça, espaçamento de fixação da telha na terça, e outros detalhes de conexões. Tanto a rigidez ao cisalhamento, como a rigidez rotacional, causam aumento significativo na resistência das terças quando conectadas às telhas. Negligenciar esta existência no projeto e cálculo pode resultar em estimativas altamente conservadoras da capacidade resistente das terças.

1.2. Pesquisas Recentes

O comportamento do sistema telha-terça tem sido alvo de investigações, mas a complexidade do problema tem levado a uma grande dificuldade no desenvolvimento de um modelo consistente e geral. Essa complexidade tem se verificado em duas principais áreas. Primeiramente, a terça não é duplamente simétrica, tendo-se, como exemplo as seções U, U enrijecido, Z ou Z enrijecido, como é comum no projeto de vigas de seção I. As terças sofrem significantes distorções na seção transversal a partir de um carregamento no seu plano. Posteriormente, a natureza da conexão telha-terça faz com que a rigidez ao cisalhamento e rotacional, restrita pela telha na terça, seja de difícil quantificação.

Diferentes abordagens tem sido consideradas na modelagem do sistema telha-terça. Essas abordagens têm variadas considerações com relação à natureza da restrição da telha na terça e à natureza da deformação da terça e sua falha. Apesar de cada modelo ser único, cada um pode ser agrupado de acordo com três principais critérios.

Em primeiro lugar, têm-se os modelos que levam em consideração o efeito da restrição da telha na terça, impedindo o seu movimento lateral, isto é, rigidez ao cisalhamento puro, elaborado por Pincus (1963), Ings e Trahair (1984), Trahair (1996). Outros modelos, mais complexos, incluem as restrições do movimento lateral e da rotação da terça sobre o seu eixo longitudinal (Hancock *et al*, 1992; Rousch e Hancock, 1994). Posteriormente, o modelo pode assumir que a seção transversal da terça permanece indeformada durante o carregamento (Hancock *et al*, 1990; Sokol, 1996), enquanto que outros incluem o efeito significativo da distorção da seção transversal na análise (Rousch e Hancock, 1994; Rousch e Hancock, 1995). Finalmente, muitos dos modelos anteriores foram baseados na suposição do estado limite último de flambagem por flexo-torção, conforme Chung e Lawson (1999), enquanto um número mais recente identifica o modo do estado limite último como sendo uma combinação da flambagem local, distorcional e ao escoamento (Rousch e Hancock, 1995; Lucas *et al*, 1997a).

1.3. Objetivos

Os dois efeitos principais de restrição das telhas conectadas as terças são a rigidez ao cisalhamento e a rigidez rotacional. Essas rigidezes variam com o tipo de telha (ondulada ou trapezoidal), com as dimensões da terça, com o tipo de seção (U, U enrijecido, Z e Z enrijecido), todos em perfis formados a frio, com o espaçamento entre as terças e com a fixação da telha na terça.

A restrição das telhas conectadas às terças será substituída pela colocação de molas no centro da mesa superior da terça, correspondentes aos pontos de conexão da terça com a telha, conforme mostra a Figura 1.1. Esses coeficientes de mola são denominados de K_{ry} para a rigidez ao cisalhamento e K_{rx} para a rigidez rotacional.

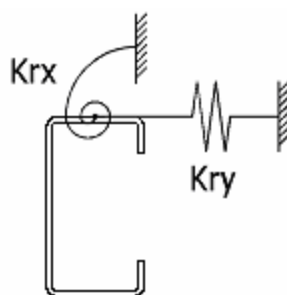


Figura 1.1 - Modelagem da restrição na terça pela telha.

Assim, o objetivo do desenvolvimento deste trabalho é a determinação teórico-experimental dos valores da rigidez ao cisalhamento K_{ry} para o sistema telha-terça, composto de telhas do tipo ondulada e trapezoidal, e de terças constituídas de perfil formado a frio, de seção U enrijecido, com diferentes valores de espaçamento de fixação dos parafusos autoperfurantes das telhas nas terças, permitindo assim, uma maior ou menor restrição.

A avaliação dos valores da rigidez ao cisalhamento K_{ry} permitirá avaliar o aumento na capacidade resistente das terças diante da união com a telha, tornando apta à redução da seção transversal da terça, dimensionada como elemento de viga submetida a ações transversais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Vigas Sem Contenção Lateral

Trahair (1996) apresentou a grande influência do comportamento da flambagem lateral elástica das vigas sem contenção lateral, prosseguindo com as pesquisas teóricas e experimentais da resistência real das vigas, e então pelos métodos de projeto contra a flambagem lateral.

Muitos estudos foram realizados para avaliar os efeitos das restrições intermediárias à flambagem lateral, sendo estas restrições intermediárias fornecidas pelos contraventamentos que podem ser elásticos ou efetivamente rígidos, contínuos ou discretos, e podem impedir deflexões laterais u , torção rotacionais ϕ , rotações laterais u' , ou deslocamento de empenamento proporcional ϕ' , Figura 2.1.

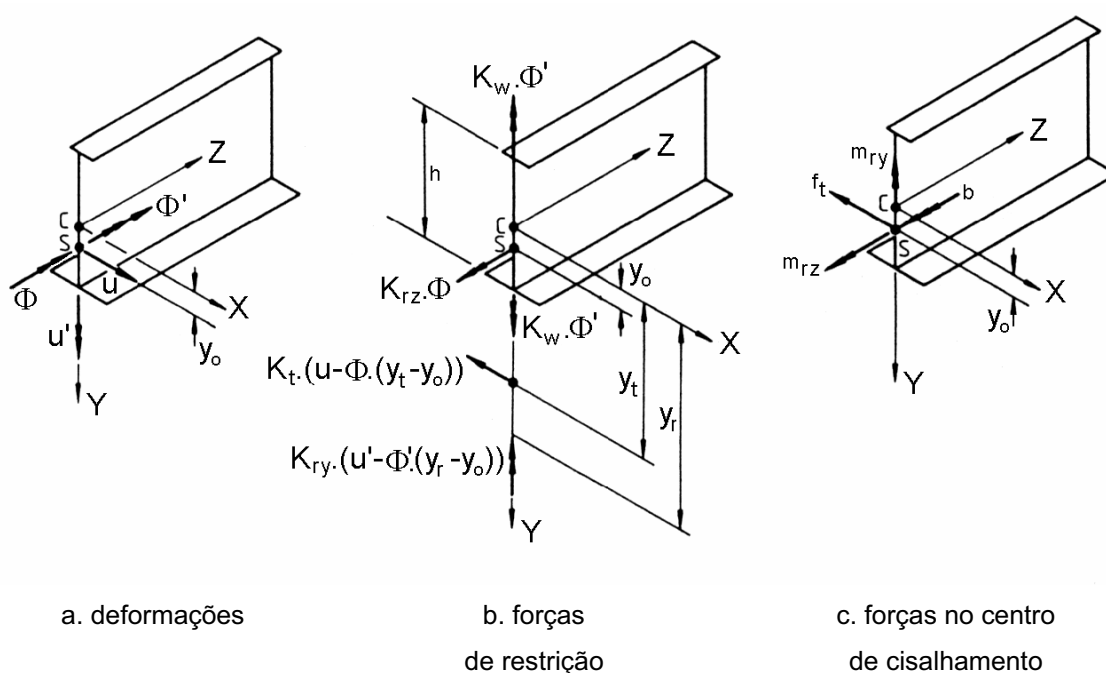


Figura 2.1 - Restrições contínuas em vigas (Trahair 1996).

A determinação da resistência real de vigas foi largamente limitada à utilização de vigas I laminadas de aço, tendo a necessidade de estender estas recomendações para vigas de outros materiais e de seções transversais.

2.2. Vigas Restritas – Modelo Teórico

As vigas são freqüentemente conectadas a outros elementos estruturais no qual esses elementos influenciam significativamente a sua resistência à flambagem. Contraventamentos são normalmente utilizados para aumentar a resistência contra a flambagem lateral das vigas, ilustrada na Figura 2.2(a), mas outros elementos tais como as telhas, que inicialmente são utilizadas com outra finalidade, são também importantes elementos de restrições.

O sistema de contraventamento no plano da cobertura é destinado principalmente a fornecer a estabilidade lateral aos elementos comprimidos.

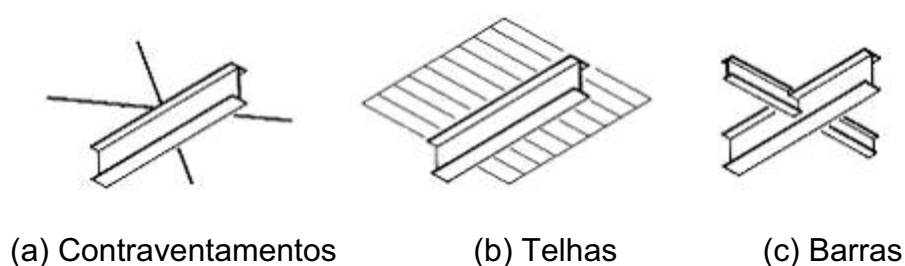
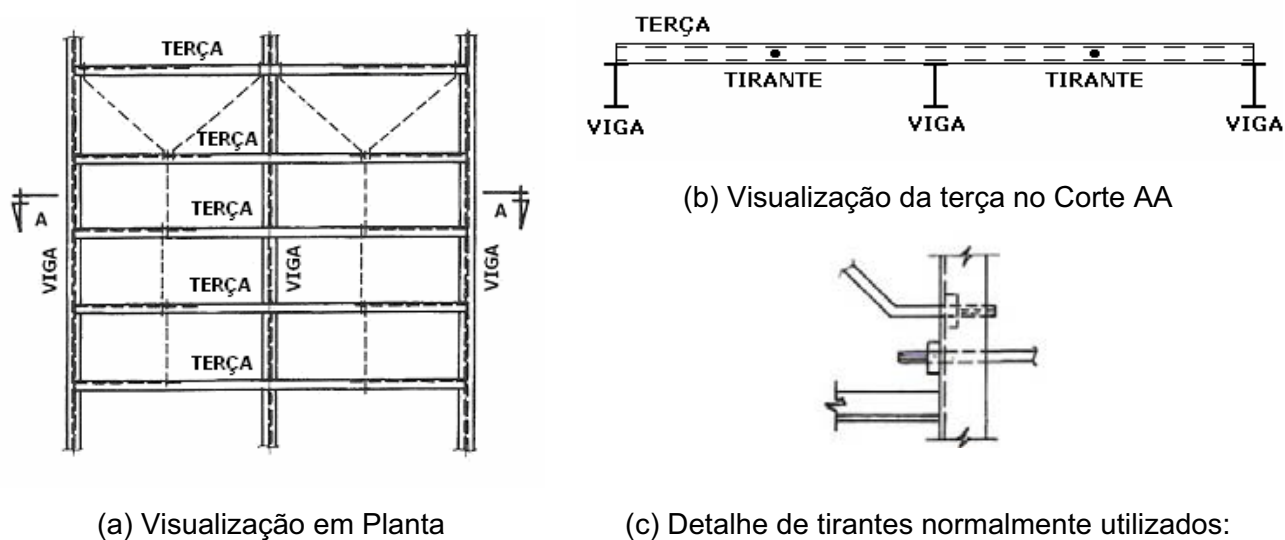


Figura 2.2 - Restrições em vigas (vista inferior).

A utilização de barras redondas (agulhas ou tirantes) atua reduzindo o vão entre as terças, sendo colocadas no plano da cobertura, perpendicular ao eixo de menor inércia das vigas, conforme a ilustração da Figura 2.3 (a) e (b).



(c) Detalhe de tirantes normalmente utilizados:
barra redondas ou cantoneiras.

Figura 2.3 – Disposição dos tirantes com as terças.

A Figura 2.4 ilustra as recomendações construtivas referente às ligações dos tirantes com as terças, apresentado por Bellei (2000). A ligação localizada no meio do perfil, conforme a Figura 2.4(a), aplica-se nos perfis de terças com altura inferior a 152mm (6"). Devido à predominância das ações da carga permanente e da carga acidental utilizam-se as ligações localizadas nos terços superiores, entretanto devido à predominância do vento de sucção utilizam-se as ligações nos terços inferiores, ver a ilustração da Figura 2.4 (b).

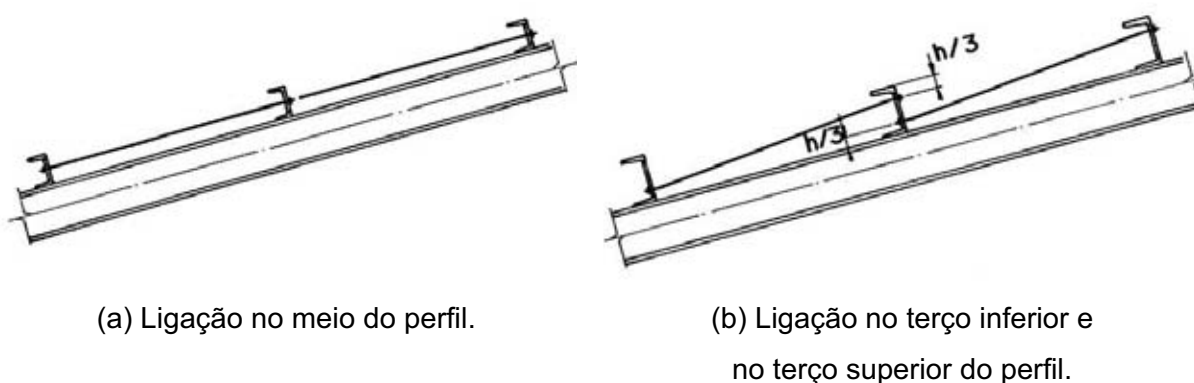


Figura 2.4 – Disposições construtivas dos tirantes com as terças (Bellei 2000).

Apesar de a correta utilização dos tirantes nos terços inferiores e superiores do perfil U, ilustrada na Figura 2.4 (b), as terças devem ser posicionadas de tal maneira que a parte aberta do perfil U fique voltado para o lado da cumeeira, conforme mostra a Figura 2.5 (b). Esta posição correta apresenta maior estabilidade diante das ações verticais, agora, mais próximas do centro de cisalhamento, CC, do perfil U.

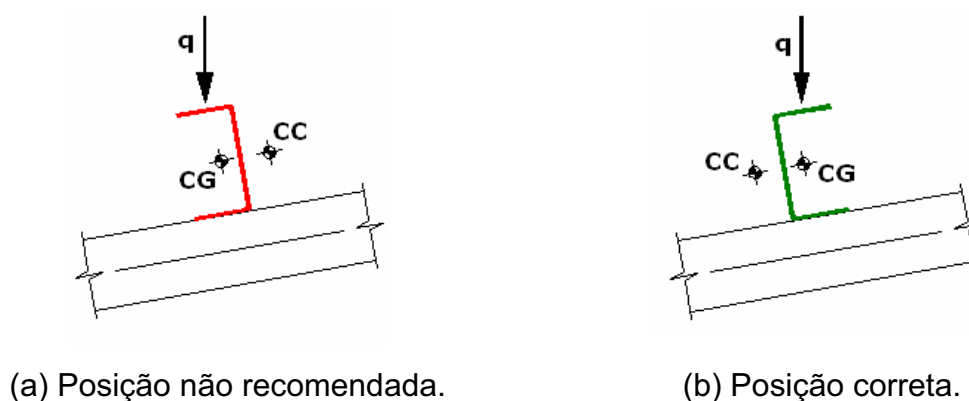


Figura 2.5 – Disposição construtiva das terças de cobertura.

A restrição fora do plano de flexão das vigas, mostrada na Figura 2.1, define a sua forma de deformada e aumenta a resistência à flambagem. Restrições discretas são pontos onde contraventamentos ou outros elementos de restrições são ligados à viga, no qual impedem o empenamento e os deslocamentos laterais e rotacionais.

As restrições contínuas são normalmente consideradas uniformes ao longo do comprimento da viga e são freqüentemente utilizadas como aproximações da ação de restrição dos elementos no qual são conectadas as vigas em intervalos predefinidos, como no caso de telhas de cobertura (Figura 2.6).

As restrições contínuas são consideradas similares às restrições discretas, no sentido que também restringem as deformações à flambagem.

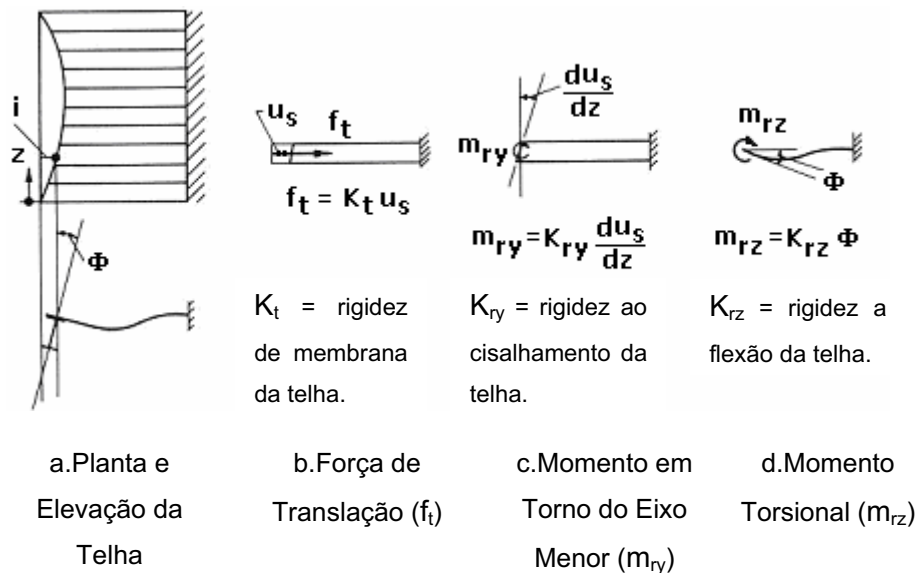


Figura 2.6 - Restrições contínuas de telhas (Trahair 2000)

A restrição contínua de uma viga, conforme ilustra a Figura 2.1, pode ser considerada através da restrição à translação, rigidez K_t , na qual atua a uma distância y_t acima do centróide; da restrição rotacional em torno do menor eixo de inércia, rigidez K_{ry} , na qual atua a uma distancia y_r acima do centróide; da restrição torsional, rigidez K_{rz} , e da restrição ao empenamento, rigidez K_w . As forças exercidas por essas restrições transferidas para o centro de cisalhamento, mostradas na Figura 2.1 (c), podem ser escritas da seguinte maneira,

$$\{f\} = \{f_t, m_{ry}, m_{rz}, b\}^T \quad (2.1)$$

onde b é o bimomento por unidade de comprimento. Para que essas forças sejam estaticamente equivalentes às restrições, elas necessitam estar relacionadas com o deslocamento do centro de cisalhamento, Figura 2.1(a), representada da seguinte maneira,

$$\{d\} = \{u, u', \phi, \phi'\}^T \quad (2.2)$$

assim a relação entre as matrizes (força, rigidez e deslocamento) é descrita como,

$$\{f\} = [K_b] \{d\}, \quad (2.3)$$

onde K_b é a matriz de rigidez, fornecida por Trahair (2000), que, para a restrição contínua, é representada por,

$$\begin{bmatrix} K_t & 0 & -K_t(y_t - y_0) & 0 \\ 0 & K_{ry} & 0 & -K_{ry}(y_r - y_0) \\ -K_t(y_t - y_0) & 0 & \{K_t(y_t - y_0)^2 + K_{rz}\} & 0 \\ 0 & -K_{ry}(y_r - y_0) & 0 & \{K_{ry}(y_t - y_0)^2 + K_w\} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.3. Terças Restringidas Pelas Telhas

Nas construções de edifícios comerciais e industriais, os perfis formados a frio são muitas vezes utilizados como terças de telhados ou como longarinas no fechamento lateral de paredes.

Peköz e Soroushian apud Tomà e Wittemann (1994) desenvolveram um modelo de cálculo muito semelhante ao utilizado no Eurocode 3 Parte 1.3, que considera o comportamento das terças restritas lateralmente perante a ação de sucção, e da mesma maneira, diante da ação de sobrepressão. A Figura 2.7 ilustra a ação de sobrepressão e de sucção, bem como a distribuição das tensões normais de compressão (sinal negativo) e de tração (sinal positivo).



(a) Ação de sobrepressão



(b) Ação de sucção

Figura 2.7 - Deformação total para os dois casos de carregamento.

O efeito da ação do vento de sobrepressão aplicado numa terça bi-apoiada origina no meio do vão do elemento estrutural, a distribuição de tensão de compressão na mesa superior, e a distribuição de tensão de tração na mesa inferior, conforme ilustra a Figura 2.7 (a). Entretanto, o efeito de sucção origina no mesmo elemento a distribuição inversa de tensões, sendo a distribuição de tensão de compressão na mesa inferior, e a distribuição de tensão de tração na mesa superior, conforme ilustra a Figura 2.7 (b). Dessa maneira, a terça encontra-se submetida internamente aos esforços de compressão e de tração, perante a solicitação de sobrepressão ou de sucção.

O efeito da ação de sobrepressão, conforme a ilustração da Figura 2.7 (a), gera na mesa livre do perfil o esforço de tração que atua reduzindo eventual excentricidade inicial construtiva. A mesa conectada comprimida encontra-se contida lateralmente pelas conexões intermediárias fornecidas pelos parafusos autoperfurantes, que contribuem significativamente na redução do comprimento de flambagem.

O efeito de sucção, conforme ilustração da Figura 2.7 (b), atua invertendo os esforços no conjunto telha-terça. A mesa tracionada conectada ao painel de telha apresenta maior redução ao efeito vibração provocado pelo vento, entretanto a mesa livre comprimida apresenta agora maiores deslocamentos laterais resultando na perda da capacidade resistente, podendo atingir o estado limite último pelo modo de flambagem por distorção da seção transversal.

A Figura 2.8 ilustra o modelo utilizado para restrição rotacional da terça conectada a telha, elaborado por Peköz e Soroushian (1982). Esta restrição rotacional, de rigidez C_D , localizada no nível da telha equivale a uma restrição lateral, de rigidez K , localizada na mesa livre da terça.

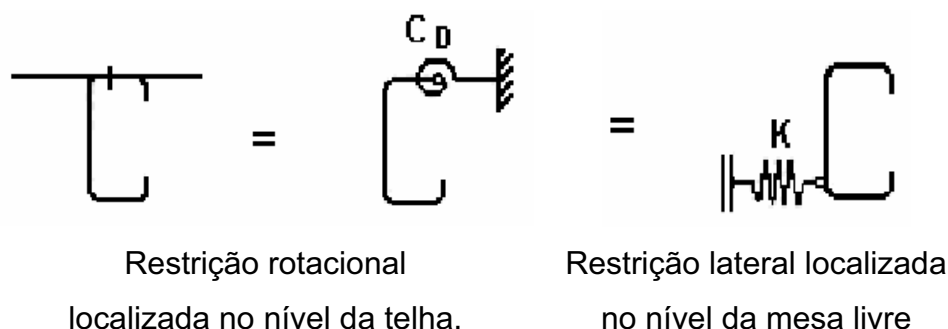


Figura 2.8 - Esquema da restrição fornecida pela telha (Tomà e Wittemann 1994).

Esta rigidez de mola lateral, K , localizada na mesa livre é composta pela:

- rigidez rotacional da conexão entre a telha e a terço;
- rigidez à distorção da seção transversal da terço;
- rigidez da curvatura da telha (esta rigidez pode ser negligenciada em comparação com as outras duas componentes de rigidez).

Os ensaios realizados em escala real, na determinação experimental dos valores de K , pelos institutos TNO Building and Construction Research e Cornell University apud Tomà e Wittemann (1994), com vãos simples das terços submetidas às ações de sobrepressão e de sucção, forneceram valores próximos dos valores obtidos por meio do Eurocode 3.

Os resultados de ensaio do instituto TNO mostram que a razão entre a carga obtida no ensaio (q_{ENSAIO}) e a carga calculada pelo Eurocode 3 ($q_{\text{CÁLCULO}}$) é, na média 19% maior na condição da ação de sobrepressão, e 36% maior na condição da ação de sucção. Nos ensaios realizados em Cornell, estas relações foram, na média, 20% maiores na ação de sucção. Nestas investigações esta margem de segurança encontrada foi capaz de indicar a subestimação do comportamento do sistema telha-terço, mostrando que os valores calculados por meio do Eurocode 3, tanto na ação de sobrepressão, como de sucção, são particularmente, conservadores.

Ye *et al* (2004) desenvolveram um modelo numérico no qual admitiram molas de rotação, K_{rx} , e de translação, K_{ry} , para simular a interação telha-terço, conforme ilustra a Figura 2.9 (b).

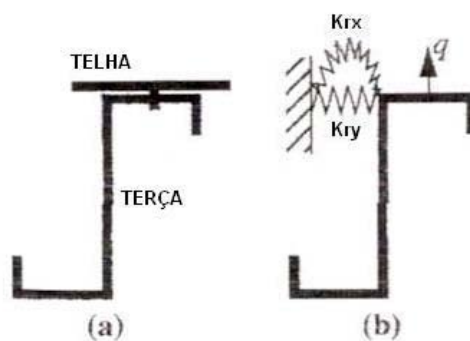


Figura 2.9 – Simulação do sistema telha-terça por meio de molas de rotação de translação.

Nessa modelagem utilizaram 3 equações diferenciais uma correspondendo à torção e duas referentes ao deslocamento (horizontal e vertical), focando a análise da distribuição de tensões na seção transversal no elemento, submetido à ação do vento de sucção.

2.4. Modelagem do Sistema Telha-Terça

2.4.1. Introdução

Lucas *et ali* (1997a) apresentaram dois modelos numéricos incorporando, ambos, a telha e a terça, sendo capazes de mostrar as distorções da seção transversal da terça, os efeitos de flexão e de restrição da membrana na telha, e a falha da terça por flambagem local ou seu escoamento.

Desta forma, utilizaram os dois modelos numéricos conhecidos como “Modelo Completo” e “Modelo Simplificado”, e compararam com os resultados experimentais do Programa de Ensaio do Aparelho de Vácuo, realizados na Universidade de Sidney.

Chin *et ali* apud Lucas *et ali* (1997a) desenvolveram um elemento retangular de chapa-esbelta, o qual foi incorporado por Lucas no Modelo Completo e Simplificado, realizando desta forma uma análise não-linear elásto-plástica do elemento finito.

O Modelo Completo, ilustrado na Figura 2.10, admite a aplicação da ação por meio da telha como acontece no sistema físico, transferindo-a para a terça por

meio da conexão do parafuso e de outros pontos de contato entre a mesa superior da terça e a telha.

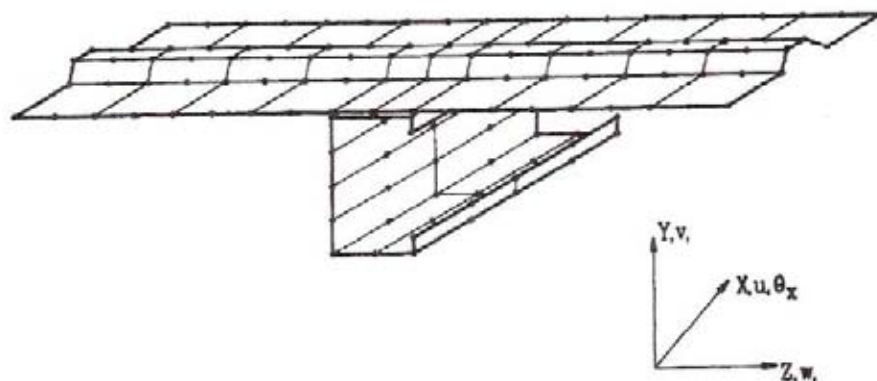


Figura 2.10 – Discretização do Modelo Completo (Lucas *et al*i 1997a).

Entretanto o Modelo Simplificado utiliza puramente a terço e representa a ação de restrição da telha pela colocação de molas localizadas em cada nó central da mesa superior, conforme ilustrado na Figura 1.1. As molas são tomadas como sendo lineares, fornecendo uma rigidez constante durante todo ciclo de carregamento.

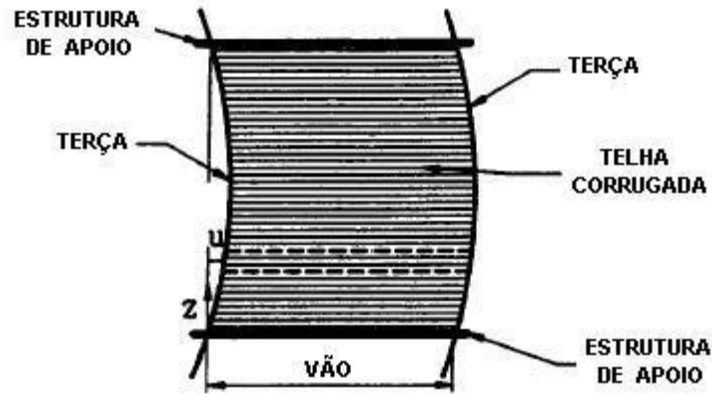
A boa correlação entre os resultados experimentais e os calculados usando o Modelo Simplificado justifica o uso da restrição por molas lineares e não faz ressaltar a necessidade para uma aproximação não-linear.

Comparando o Modelo Numérico Simplificado com o modelo das terços ensaiadas no programa de ensaio da Universidade de Sidney, Lucas *et al*i (1997b) mostraram que os resultados do Modelo Simplificado diferem, no mínimo, 8%, e no máximo, 10% dos valores experimentais nos casos estudados, mostrando excelente correlação entre eles.

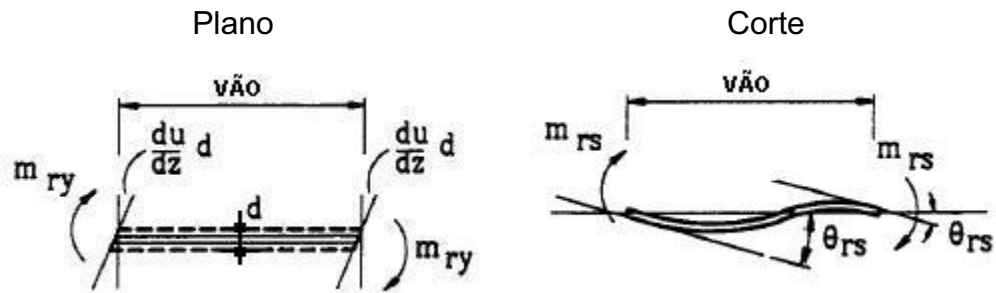
Tanto o Modelo Completo como o Modelo Simplificado foram capazes de incorporar a telha e a terço como um sistema integrado, permitindo boa interação entre estes dois componentes.

2.4.2. Consideração Sobre a Rigidez

A telha conectada à terça fornece dois efeitos principais de restrição: a rigidez cisalhante (K_{ry}) e a rigidez rotacional (K_{rx}), conforme mostrado na Figura 2.11.



(a) Plano da telha.



(b) Rigidez cisalhante da telha (K_{ry}). (c) Rigidez rotacional da telha (K_{rx}).

Figura 2.11 – Restrição da Telha (LUCAS *et ali* 1997a).

Assim,

$$K_{ry} = \frac{m_{ry}}{\frac{du}{dz}} \quad (2.5)$$

e

$$K_{rx} = \frac{m_{rs}}{\theta_{rs}} \quad (2.6)$$

onde:

- m_{ry} - momento atuando no plano da telha;
 m_{rs} - momento torçor atuando perpendicular ao plano da telha;
 du/dz - tangente ou flecha transversal em função da profundidade z $\{u(z)\}$;
 θ_{rs} - rotação em torno do eixo longitudinal da telha.

A interação telha-terça resulta num efeito retardador quanto à rotação da terça sujeita a ação de sucção (Figura 2.12). O perfil U enrijecido tende a rotacionar em torno da aba onde o parafuso conector está localizado.

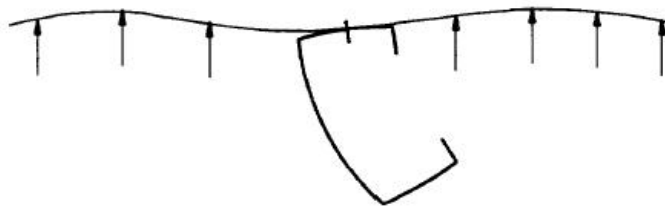


Figura 2.12 - Forma defletida da terça sob ação de sucção (LUCAS *et ali* 1997a)

O cumprimento da compatibilidade entre a deflexão da telha e da terça é obtida pela formulação de Lagrange conforme Cock apud Lucas *et ali* (1997a), na qual a configuração de referência corresponde à última configuração de equilíbrio determinada. Assim, para cada incremento de carga o referencial é transferido para a nova configuração de equilíbrio calculada.

Várias condições de contorno relativas às compatibilidades longitudinais, laterais, verticais, rotacionais no parafuso conector e os contatos nodais foram comprovados. As condições limitantes do comportamento físico do sistema adotado, conforme mostrado na Figura 2.13, são:

$$V_p = V_s \quad (2.7)$$

$$\theta_p = \theta_s \quad (2.8)$$

$$W_p = W_s + d\theta_s \quad (2.9)$$

onde:

V_p - deslocamento normal da terça;

V_s - deslocamento normal da telha;

- θ_p - rotação em torno do eixo longitudinal da terça;
- θ_s - rotação em torno do eixo longitudinal da telha;
- w_p - deslocamento lateral da terça;
- w_s - deslocamento lateral da telha;
- d - distância entre a linha central da mesa superior da terça até a linha central da telha, localizada na onda superior conectada.

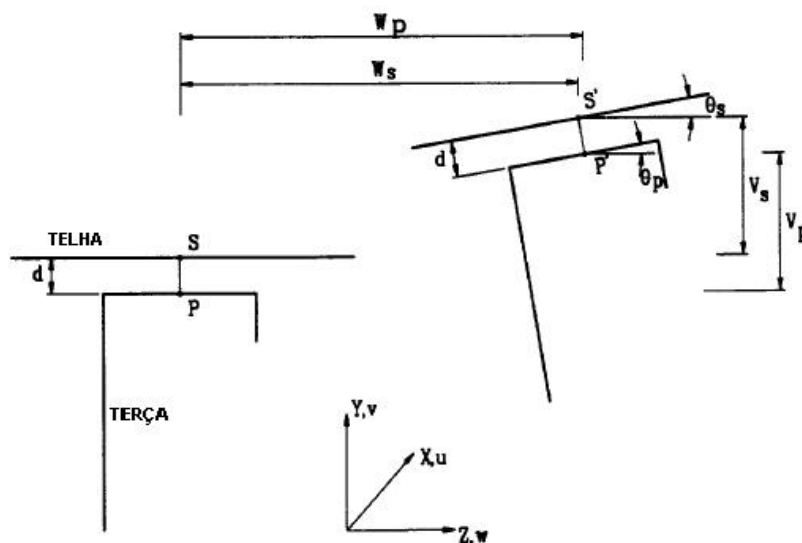


Figura 2.13 - Forma da deflexão da terça e da telha
(LUCAS *et ali* 1997a).

Por fim, a condição de contorno imposta tal que, o deslocamento normal e lateral, de cada nó central no topo da terça e nos nós adjacentes das telhas fossem iguais.

2.4.3. Determinação da Rigidez ao Cisalhamento (Modelo Double Beam Shear Test - DBST)

A restrição ao cisalhamento devido à ação da telha na terça é independente da seção transversal da terça, mas varia com o tipo de telha e o espaçamento entre as terças.

Pincus apud Lucas *et ali* (1997b) desenvolveu este modelo numérico para determinar a restrição ao cisalhamento proveniente da telha na terça, referindo-se como Double Beam Shear Test - DBST, conforme mostra a Figura 2.14. As terças são dispostas em relação a sua menor inércia, onde as telhas são fixadas por

parafusos autoperfurante na mesa da terça e submetidas ao mesmo momento fletor. A conexão com a telha reduz os deslocamentos das terças na região de flexão pura. A rigidez ao cisalhamento K_{ry} da telha pode então ser determinada a partir da expressão, elaborada por Lucas *et ali* (1997b):

$$K_{ry} = \frac{4M_o}{\pi \cdot \Delta} - \frac{\pi^2 EI_y}{L^2} \quad (2.10)$$

onde M_o ($M_o = P \times l$), L é o comprimento da região da flexão pura e I_y , E e Δ , referem-se ao menor momento de inércia da terça, ao módulo de elasticidade longitudinal e ao deslocamento do ponto central da terça, respectivamente.

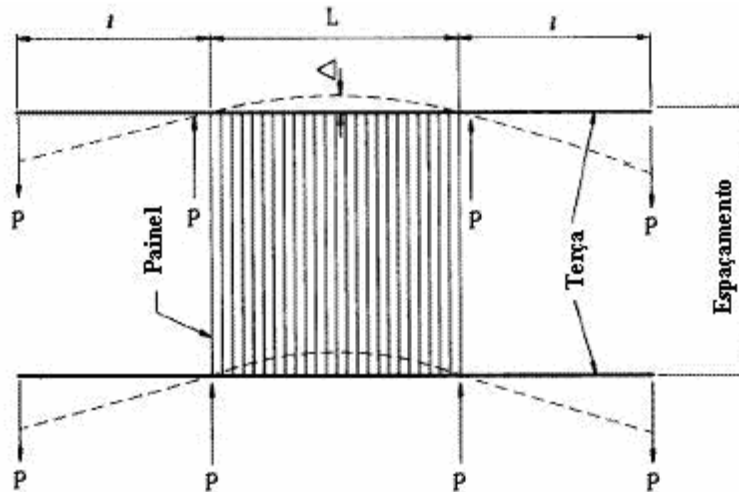


Figura 2.14 - Modelo utilizado na determinação da rigidez ao cisalhamento (LUCAS *et ali* 1997b)

2.5. Critérios do EUROCODE 3: ENV 1993-1-3

2.5.1. Resistência da Seção Transversal

O critério normativo Eurocode 3 (1993) define regras suplementares para perfis de aço formados a frio, de espessura esbelta, conectados as telhas, levam em consideração a resistência local transversal da alma ($R_{w, RD}$). Tanto em perfis de aço de seção com uma alma (no caso de terças) ou com duas ou mais almas (no caso de telhas), a seção transversal deve satisfazer os seguintes critérios:

$$r/t \leq 10 \quad (2.11)$$

$$h_w \leq 200 \times \sin \phi \quad (2.12)$$

$$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \quad (2.13)$$

onde:

h_w - altura da alma entre as linhas medianas das abas;

r - raio interno dos cantos;

ϕ - declive da alma relativa as abas (graus);

t - espessura da chapa.

A resistência local transversal da alma, $R_{w, RD}$, deve ser determinada por:

$$R_{w, RD} = \alpha \cdot t^2 \sqrt{f_y \cdot E} \cdot (1 - 0,1 \sqrt{r/t}) \cdot [0,5 + \sqrt{0,02 \cdot l_a/t}] \cdot (2,4 + (\phi/90)^2) / \gamma \quad (2.14)$$

onde:

l_a - relação útil do comprimento pela categoria relativa;

α - coeficiente pela categoria relativa;

f_y - tensão de escoamento do aço;

E - módulo de elasticidade;

γ - coeficiente de resistência aplicado a perfis de aço e telhas que falham pela flambagem (igual a 1,1).

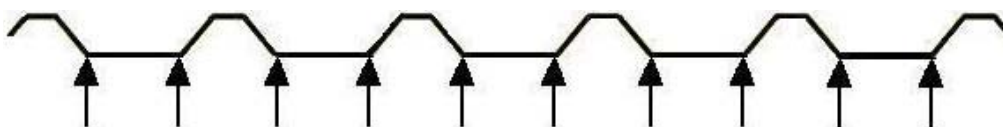


Figura 2.15 – Localização da resistência local transversal da alma ($R_{W, RD}$)

2.5.2. Vigas Restringidas Pelas Telhas

No Eurocode 3 (1996), encontram-se algumas aplicações particulares referentes à restrição lateral contínua, para uma mesa da terço restrita pela telha.

O comportamento das terças lateralmente restritas deve ser modelado como mostra a Figura 2.8: a conexão da telha na terço restringe parcialmente a torção da terço. Esta restrição parcial torsional é representada pela rotação da mola de rigidez C_D , sendo este modelo desenvolvido por Peköz e Soroushian apud Tomà e Wittemann (1994).

A Figura 2.16 mostra a deformação total para o caso da ação de sucção.



Figura 2.16 - Deformação total dividida em duas partes.

2.5.3. Rigidez Lateral de Molas

A resistência lateral da mola foi modelada como uma mola lateral atuando na mesa inferior, conforme ilustrado na Figura 2.8.

O total da rigidez lateral de mola K , por unidade de comprimento, é determinado por:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_C} \quad (2.15)$$

onde:

K_A - rigidez lateral correspondente a rigidez rotacional da conexão entre a telha e a terça;

K_B - rigidez lateral devido a distorção da seção transversal da terça;

K_C - rigidez lateral devido a rigidez a flexão da telha.

Normalmente, o termo $1/K_C$ é desprezado, devido K_C ser um valor muito maior quando comparado com K_A e K_B .

A rigidez lateral de mola K , por unidade de comprimento, pode ser determinada por:

$$\frac{1}{K} = \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot h^2 \cdot (h + 2a + b)}{E \cdot t^3} + \frac{h^2}{C_D} \quad (2.16)$$

onde:

a - distância do centro da conexão a alma da terça;

b - largura da mesa conectada a telha;

C_D - rigidez de mola rotacional total;

h - altura da terça;

A restrição rotacional dada à terça pela telha deve ser modelada como sendo uma mola rotacional atuando no topo da mesa da terça, determinada por:

$$C_D = \frac{1}{(1/C_{D,A} + 1/C_{D,C})} \quad (2.17)$$

onde:

$C_{D,A}$ - rigidez rotacional da conexão entre a telha e a terça;

$C_{D,C}$ - rigidez rotacional correspondente da rigidez a flexão da telha.

$C_{D,C}$ pode ser obtido pelo seguinte valor conservador:

$$C_{D,C} = \frac{2 \cdot E \cdot I_{ef}}{s} \quad (2.18)$$

onde:

s - espaçamento entre terças;

I_{ef} - momento de inércia por unidade de largura da telha.

O valor de $C_{D,A}$ para telha trapezoidal conectada na mesa superior da terça pode ser determinado por:

i) para $b_a \leq 125$ mm:

$$C_{D,A} = 1,7 \cdot \left(\frac{b_a}{100} \right)^2 \quad (2.19)$$

ii) para $125 \text{ mm} < b_a \leq 200 \text{ mm}$

$$C_{D,A} = 2,125 \cdot \left(\frac{b_a}{100} \right)^2 \quad (2.20)$$

onde:

b_a - largura da mesa da terça.

O procedimento de projeto do Eurocode 3 é amplamente seguro quando comparado com os resultados de ensaio analisados por Tomà e Wittemann (1994), tanto para situações da ação de sobrepressão, como para ação de sucção.

Na situação de ação de sobrepressão são subestimados os seguintes efeitos:

- o comportamento de carga na borda enrijecida da mesa comprimida;
- o efeito enrijecedor da telha na mesa comprimida, aumentando a força crítica de flambagem local;
- o efeito da plastificação na seção transversal (zonas comprimidas e tracionadas).

Da mesma forma, para a carga de sucção têm-se:

- o comportamento de carga na borda enrijecida da mesa comprimida e o efeito da plastificação na seção transversal (zonas comprimidas e tracionadas);
- a determinação do comprimento de flambagem para vão simples de terças;
- a curva de flambagem a_0 fornece melhor comparação entre resultados calculados e ensaiados.

2.6. Procedimento da NBR 14762: 2001

Anexo F (informativo)

Barras com painel conectado à mesa tracionada

O momento fletor resistente de cálculo, M_{Rd} , de barras submetidas à flexão, com carregamento num plano paralelo à alma, com a mesa tracionada conectada a um painel (terças com telhas de aço parafusadas e sujeitas à ação de um vento de sucção, por exemplo) e a mesa comprimida sem travamento lateral, conforme ilustra a Figura 2.17 (b), pode ser calculado por:

$$M_{Rd} = \rho \cdot W_{ef} \cdot f_y / \gamma \quad (2.21)$$

sendo esta formulação válida para vigas biapoiadas em perfil U enrijecido, onde:

ρ - fator de redução associado a flambagem por distorção da seção transversal ($\rho = 0,40$);

W_{ef} - módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos.

f_y - resistência ao escoamento do aço;

γ - coeficiente de ponderação das ações ($\gamma = 1,1$).

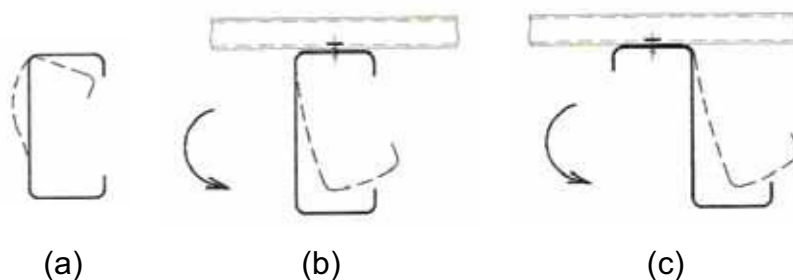


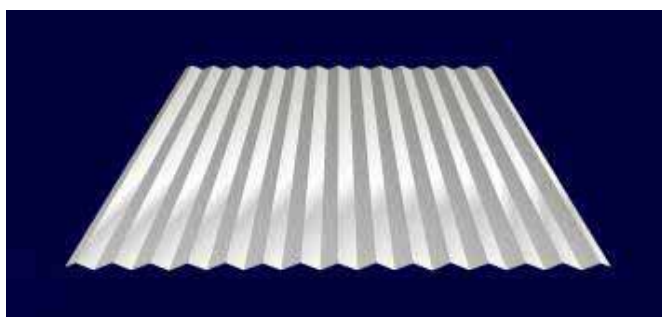
Figura 2.17 – Barras submetidas à flexão apresentando o modo de flambagem por distorção da seção transversal.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Telhas

O material utilizado para confecção das telhas é constituído por chapas de aço galvanizado, identificado como o aço SAE 1010, fornecidas pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), sendo posteriormente perfiladas pela empresa R.Telhas.

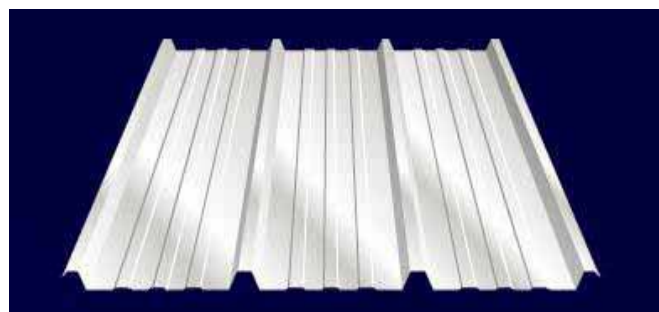
As telhas, de acordo com o catálogo de produtos da R.Telhas, são designadas pelos modelos da linha RT mostrados nas Figuras 3.1 e 3.2.



Ondulada RT17



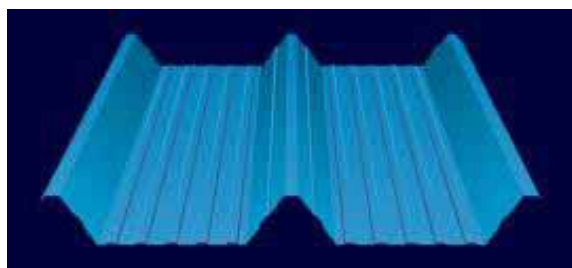
Trapezoidal RT25



Trapezoidal RT35



Trapezoidal RT40

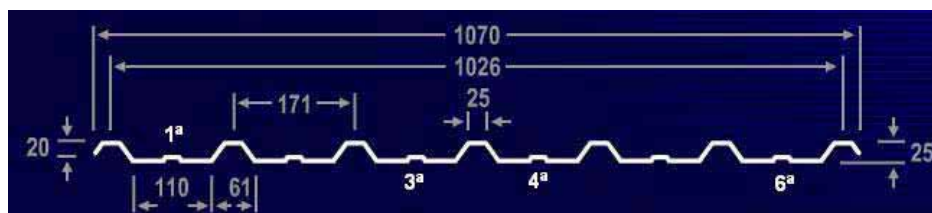


Trapezoidal RT100

Figura 3.1 – Modelos e tipos das telhas para ensaio (Catálogo R.Telhas)



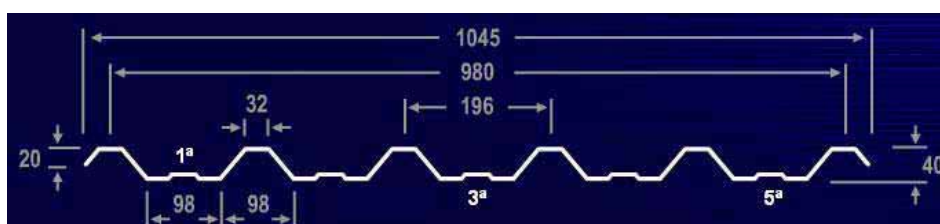
Ondulada RT17



Trapezoidal RT25



Trapezoidal RT35



Trapezoidal RT40



Trapezoidal RT100

Figura 3.2 – Seção transversal, numeração e localização das ondas baixas conectadas.

3.2. Terças

Os perfis de aço formado a frio, Figura 3.3, são fornecidos pela empresa SEMAR, identificado como aço SAE 1010, conhecido como aço comercial não estrutural, com tensão de escoamento, f_y , igual a 180 MPa e de ruptura, f_u , igual a 330 MPa.



Ue 75 x 40 x 15 x 2.25 Ue 100 x 40 x 15 x 2.25 Ue 127 x 50 x 15 x 2.65



2Ue 75 x 40 x 15 x 2.25 2Ue 100 x 40 x 15 x 2.25 2Ue 127 x 50 x 15 x 2.65

Figura 3.3 – Dimensões dos perfis utilizados para os ensaios.

3.3. Fixadores

Os fixadores utilizados na união entre a telha galvanizada e o perfil da terço são do tipo autoperfurante zincado com cabeça sextavada e arruela vulcanizada, Figura 3.4, conforme descrição do fabricante Multi-Fix do Brasil Indústria e Comércio de Parafusos.

Ao contrário das fixações convencionais aplicadas em painéis metálicos (ganchos), que promovem apenas uma fixação, o parafuso autoperfurante possui além da ponta-broca, seus primeiros fios de rosca na forma de um tronco cônico, que durante aplicação repuxam as chapas de aço, unindo-as, impedindo a formação de lacunas entre as mesmas. Além disso, o parafuso exerce também uma função estrutural, atuando na distribuição dos esforços, atenuando os deslocamentos pelo conjunto estrutural e eliminando casos comuns de infiltração.

Para melhor desempenho deste tipo de fixação, o fabricante recomenda que, na aplicação dos fixadores, seja utilizando o conjunto do fixador autoperfurante para sistemas de coberturas metálicas.



Figura 3.4 - Fixadores autoperfurantes zincados (1/4" x 7/8" com cabeça sextavada 3/8").

3.4. Método Teórico Para Dimensionamento de Barras Submetidas à Flexão Simples

O presente procedimento de cálculo consiste na determinação da resistência de cálculo aplicada às barras fletidas, conforme ilustra a Figura 3.5. Este procedimento encontra-se adequado ao presente trabalho e segue as orientações de projeto da norma NBR 14762:2001.

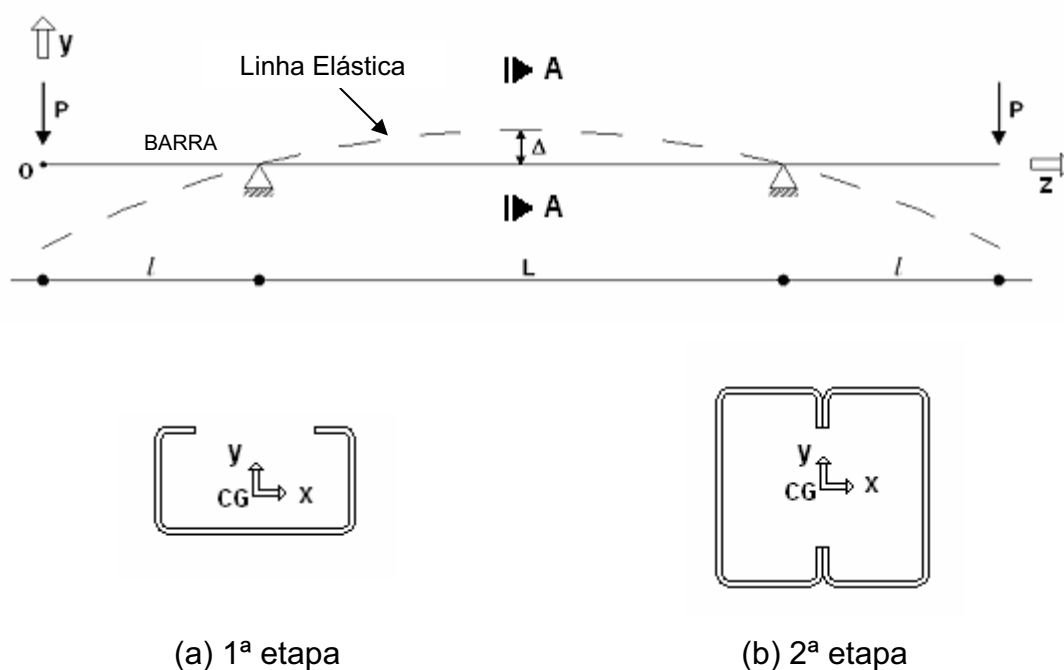


Figura 3.5 – Disposição das barras submetidas ao esforço de flexão simples:
(a) Perfil Ue; (b) Perfil formado por 2Ue.

Tabela 3.1. Distâncias dos vãos utilizados nos ensaios.

Ensaio	Perfil	Vãos (cm)	
		l (balanço)	L (biapoiado)
1ª etapa	Ue75x40x15x2.25	89,00	112,00
	Ue100x40x15x2.25		
	Ue127x50x15x2.65		
2ª etapa	2Ue75x40x15x2.25	133,00	324,00
	2Ue100x40x15x2.25		
	2Ue127x50x15x2.65		

3.4.1 Verificação do Momento Fletor (NBR 14762:2001)

A resistência de cálculo, M_{Rd} , utilizada no dimensionamento das barras será a de menor valor entre os calculados, de acordo com os itens a seguir:

i) O momento fletor resistente calculado no início do escoamento da seção efetiva, M_{Rd}^{InEsc} , é definido por:

$$M_{Rd}^{InEsc} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{\gamma} \quad (3.1)$$

onde:

W_{ef} - módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos;

f_y - resistência ao escoamento do aço;

γ - coeficiente de ponderação das ações ($\gamma = 1,1$).

ii) O momento fletor resistente da flambagem lateral com torção, M_{Rd}^{FLT} , é definido por:

$$M_{Rd}^{FLT} = \frac{[\rho_{FLT} \cdot W_{c,ef} \cdot f_y]}{\gamma} \quad (3.2)$$

onde:

$W_{c,ef}$ - módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos;

ρ_{FLT} - coeficiente de flambagem referido ao valor da tensão de flambagem elástica, σ , atuante no elemento comprimido, dada por:

$$\sigma = \rho_{FLT} \cdot f_y \quad (3.3)$$

em que:

ρ_{FLT} - fator de redução associado a flambagem lateral com torção, calculado a partir de:

$$\lambda_o = \left(\frac{W_{ef} \cdot f_y}{M_e} \right)^{0,5} \quad (3.4)$$

onde:

λ_o - índice de esbeltez reduzido da barra;

M_e - momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, para as barras com seções diversas.

Desta maneira, realiza-se a seguinte verificação:

$$\lambda_o \leq 0,6: \rho_{FLT} = 1,0 \quad (3.5)$$

$$0,6 < \lambda_o < 1,336: \rho_{FLT} = 1,11(1 - 0,278\lambda_o^2) \quad (3.6)$$

$$\lambda_o \geq 1,336: \rho_{FLT} = \frac{1}{\lambda_o^2} \quad (3.7)$$

a) Para as barras com seção monossimétrica sujeitas à flexão, têm-se:

$$M_e = C_b \cdot r_o \cdot (N_{ey} \cdot N_{et})^{0,5} \quad (3.8)$$

onde:

C_b - coeficiente de equivalência de momentos na flexão;

r_o - raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção;

N_{ey} - força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y, calculado por:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} \quad (3.9)$$

onde:

E - módulo de elasticidade;

I_y - momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y;

$K_y L_y$ - comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo y;

N_{et} - força normal de flambagem elástica por torção, calculado por:

$$N_{et} = \frac{1}{r_o^2} \cdot \left\{ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot I_t \right\} \quad (3.10)$$

onde:

C_w - constante de empenamento;

$K_t L_t$ - comprimento de flambagem por torção.

b) No caso de barras com seção fechada (tipo caixão) sujeitas à flexão, têm-se:

$$M_e = C_b \cdot (N_{ey} \cdot G \cdot I_t)^{0,5} \quad (3.11)$$

onde:

I_t - momento de inércia à torção uniforme;

G - módulo de elasticidade transversal, calculado por:

$$G = 0,385 \cdot E \quad (3.12)$$

O coeficiente C_b pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$C_b = \frac{12,5 \cdot M_{máx}}{2,5 \cdot M_{máx} + 3,0 \cdot M_A + 4,0 \cdot M_B + 3,0 \cdot M_C} \quad (3.13)$$

onde:

$M_{máx}$ - momento fletor solicitante máximo, em módulo, no trecho analisado para FLT;

M_A - momento fletor solicitante, em módulo, no 1º quarto do trecho analisado para FLT;

M_B - momento fletor solicitante, em módulo, no centro do trecho analisado para FLT;

M_C - momento fletor solicitante, em módulo, no 3º quarto do trecho analisado para FLT.

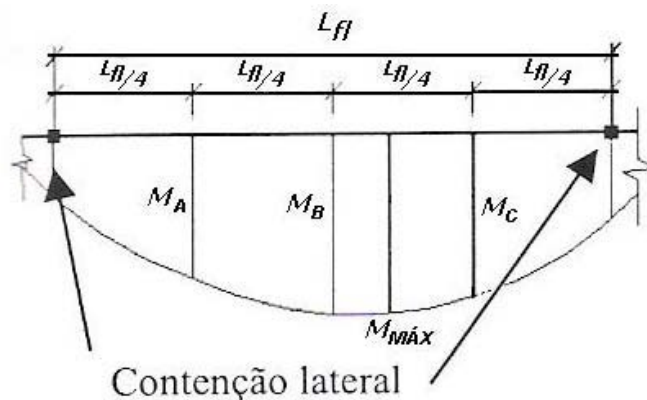


Figura 3.6 – Localização dos momentos M_A , M_B , M_C e $M_{MÁX}$, entre dois pontos contidos lateralmente.

Finalmente: A resistência de cálculo, M_{Rd} , a ser adotada será a de menor valor entre:

$$M_{Rd} = \text{menor} \left(M_{Rd}^{InEsc}, M_{Rd}^{FLT} \right) \quad (3.14)$$

3.4.2 Verificação da Flambagem Local (NBR 14762:2001)

Em se tratando de perfis formados a frio por elementos esbeltos, deve-se considerar a redução da resistência provocada pela flambagem local. Desta maneira, devem ser calculadas as larguras efetivas b_{ef} dos elementos da seção transversal, que se encontrem submetidos às tensões normais de compressão.

O índice de esbelteza reduzido do elemento λ_p , é definido pela expressão:

$$\lambda_p = \frac{b/t}{0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma}}} \quad (3.15)$$

onde:

- b - largura do elemento;
- t - espessura do elemento;
- k - coeficiente de flambagem de flambagem local calculado para elementos AA e AL;
- σ - tensão normal de compressão, calculada para a seção transversal efetiva.

A Figura 3.7 ilustra a posição das tensões normais de compressão, σ_1 e σ_2 , ambas localizadas na extremidade da parte plana do elemento analisado.

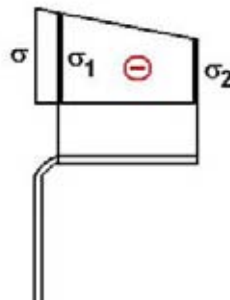


Figura 3.7 – Tensões normais de compressão no elemento analisado.

Desta maneira, realiza-se a seguinte verificação:

$$\lambda_p \leq 0,673 \rightarrow b_{ef} = b \quad (3.16)$$

$$\lambda_p > 0,673 \rightarrow b_{ef} = \frac{b \cdot (1 - 0,22/\lambda_p)}{\lambda_p} \quad (3.17)$$

onde:

b_{ef} - largura da região comprimida do elemento, calculada com base na seção efetiva.

3.4.3 Verificação da Força Cortante (NBR 14762:2001)

A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} é calculada da seguinte maneira:

- para: $h/t \leq 1,08 \cdot \left(\frac{E \cdot k_v}{f_y} \right)^{0,5}$

$$V_{Rd} = 0,60 \cdot f_y \cdot h \cdot t / \gamma \quad (3.18)$$

- para: $1,08 \cdot \left(\frac{E \cdot k_v}{f_y} \right)^{0,5} < h/t \leq 1,40 \cdot \left(\frac{E \cdot k_v}{f_y} \right)^{0,5}$

$$V_{Rd} = 0,65 \cdot t^2 \cdot (k_v \cdot f_y \cdot E)^{0,5} / \gamma \quad (3.19)$$

- para: $h/t > 1,40 \cdot \left(\frac{E \cdot k_v}{f_y} \right)^{0,5}$

$$V_{Rd} = (0,905 \cdot E \cdot k_v \cdot t^3 / h) / \gamma \quad (3.20)$$

onde:

t - espessura da alma;

h - altura da parte plana da alma;

k_v - coeficiente de flambagem local por cisalhamento (para alma sem enrijecedores transversais: $k_v = 5,34$).

3.4.4 Verificação do Momento Fletor e Força Cortante Combinados (NBR 14762:2001)

Para barras sem enrijecedores transversais de alma, o momento fletor solicitante de cálculo e a força cortante solicitante de cálculo na mesma seção devem satisfazer a seguinte expressão de interação:

$$\left(\frac{M_S}{M_{Rd}} \right)^2 + \left(\frac{V_S}{V_{Rd}} \right)^2 \leq 1,00 \quad (3.21)$$

onde:

M_S - momento fletor solicitante;

V_S - força cortante solicitante.

3.4.5 Verificação da Flecha Máxima

Por meio dos conceitos da resistência dos materiais, a linha elástica para barras de inércia constante pode ser determinada a partir da seguinte expressão:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{E \cdot I} \quad (3.22)$$

Esta expressão diferencial básica aplicada ao modelo analisado, conforme ilustrado na Figura 3.12, deve ser integrada e juntamente inserida às condições de contorno. Desta maneira, o deslocamento “ Δ ” localizado no meio do vão, na seção AA, pode ser determinado pela expressão:

$$\Delta = \frac{1}{8} \cdot \frac{P}{E \cdot I_x} \cdot l \cdot L^2 \quad (3.23)$$

onde:

Δ - deslocamento no meio do vão central;

P - ação concentrada aplicada na extremidade do balanço;

l - comprimento do balanço;

E - módulo de elasticidade;

- I_x - momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo x;
 L - vão central da viga.

O Anexo A da NBR 14762:2001 informa os deslocamentos limites recomendados para os elementos estruturais verificados no Estado Limite de Utilização da estrutura.

De posse deste critério, o limite de serviço para terças e longarinas de fechamento, pela NBR 14762, é dado por:

$$f_{\text{lim}} = \frac{L}{180} \quad (3.24)$$

onde:

f_{lim} - flecha limite.

3.4.6 Resultados Teóricos

As Tabelas 3.2 a 3.7 correspondem ao dimensionamento dos perfis submetidos a flexão simples, conforme a disposição ilustrada na Figura 3.5.

Tabela 3.2. Determinação da tensão de flambagem elástica no Estado Limite Último de Flambagem Lateral por Torção.

Perfil	N_{ey} (kN)	N_{et} (kN)	M_e (kN.cm)	λ_o	ρ_o	σ (kN/cm ²)
Ue75x40x15x2.25	139,52	113,84	603,27	0,32	1,00	18,00
Ue100x40x15x2.25	154,84	155,65	807,30	0,29	1,00	18,00
Ue127x50x15x2.65	328,56	304,03	2023,82	0,24	1,00	18,00
2Ue75x40x15x2.25	751,13	227,24	877,88	0,58	1,00	18,00
2Ue100x40x15x2.25	946,04	255,64	1058,30	0,59	1,00	18,00
2Ue127x50x15x2.65	2214,05	465,70	2327,46	0,55	1,00	18,00

Tabela 3.3. Verificação da Flambagem Local no Estado Limite Último.

Perfil	Elemento comprimido	σ (kN/cm ²)	σ_1 (kN/cm ²)	σ_2 (kN/cm ²)	λ_p	Limite
Ue75x40x15x2.25	Dobra	18,00	16,99	-	0,211	0,673
	Mesa		13,95	-	0,077	
	Alma		16,99	-	0,444	
Ue100x40x15x2.25	Dobra	18,00	16,99	-	0,211	0,673
	Mesa		13,95	-	0,077	
	Alma		16,99	-	0,613	
Ue127x50x15x2.25	Dobra	18,00	17,05	-	0,166	0,673
	Mesa		14,18	-	0,084	
	Alma		17,05	-	0,667	
2Ue75x40x15x2.25	Dobra	18,00	15,84	10,80	0,150	0,673
	Mesa		17,46	-	0,637	
	Alma		15,84	-	0,175	
2Ue100x40x15x2.25	Dobra	18,00	16,38	12,60	0,169	0,673
	Mesa		17,60	-	0,641	
	Alma		16,38	-	0,246	
2Ue127x50x15x2.25	Dobra	18,00	16,50	13,75	0,142	0,673
	Mesa		17,62	-	0,630	
	Alma		16,50	-	0,268	

Tabela 3.4. Determinação dos momentos fletores resistentes.

Perfil	M_{Rd}^{InEsc} (kN.cm)	M_{Rd}^{FLT} (kN.cm)	M_{Rd} (kN.cm)
Ue75x40x15x2.25	56,62	56,62	56,62
Ue100x40x15x2.25	62,34	62,34	62,34
Ue127x50x15x2.65	103,84	103,84	103,84
2Ue75x40x15x2.25	292,06	292,06	292,06
2Ue100x40x15x2.25	432,20	432,20	432,20
2Ue127x50x15x2.65	797,49	797,49	797,49

Tabela 3.5. Determinação da resistência e da solicitação ao cortante.

Perfil	h/t	$1,08 \cdot \left(\frac{E \cdot k_v}{f_y} \right)^{0,5}$	V_{Rd} (kgf)	V_s^{InEsc} (kgf)	V_s^{FLT} (kgf)
Ue75x40x15x2.25	13,78	84,22	684,82	63,60	63,60
Ue100x40x15x2.25	13,78		684,82	70,00	70,00
Ue127x50x15x2.65	14,87		1025,12	116,50	116,50
2Ue75x40x15x2.25	29,33		1458,00	217,00	217,00
2Ue100x40x15x2.25	40,44		2010,27	320,00	320,00
2Ue127x50x15x2.65	43,92		3028,52	588,00	588,00

Tabela 3.6. Verificação do momento fletor e força cortante combinados.

Perfil	$\left(\frac{M_s^{InEsc} = M_s^{FLT}}{M_{Rd}} \right)^2 + \left(\frac{V_s^{InEsc} = V_s^{FLT}}{V_{Rd}} \right)^2$	Limite
Ue75x40x15x2.25	$(0,9941)^2 + (0,0929)^2 = 0,9969$	1,00
Ue100x40x15x2.25	$(0,9938)^2 + (0,1022)^2 = 0,9981$	
Ue127x50x15x2.65	$(0,9929)^2 + (0,1136)^2 = 0,9988$	
2Ue75x40x15x2.25	$(0,9882)^2 + (0,1488)^2 = 0,9987$	
2Ue100x40x15x2.25	$(0,9847)^2 + (0,1592)^2 = 0,9950$	
2Ue127x50x15x2.65	$(0,9806)^2 + (0,1942)^2 = 0,9993$	

Tabela 3.7. Determinação dos deslocamentos máximos correspondentes às cargas de solicitação.

Perfil	$V_s^{InEsc} = V_s^{FLT} = V_s$ (kgf)	Flechas (mm)	
		$\Delta_{Teórico}$	f_{lim}
Ue75x40x15x2.25	63,60	4,977	6,222
Ue100x40x15x2.25	70,00	4,936	
Ue127x50x15x2.65	116,50	3,871	
2Ue75x40x15x2.25	217,00	27,602	18,000
2Ue100x40x15x2.25	320,00	20,629	
2Ue127x50x15x2.65	588,00	16,175	

3.4.7 Comentários

- Os resultados apresentados na Tabela 3.4 limitam o momento resistente, M_{Rd} , aos valores das solicitações verticais atuantes V_s^{FLT} e V_s^{InEsc} , apresentadas nas Tabela 3.5.
- Na Tabela 3.7 são apresentados os deslocamentos $\Delta_{Teórico}$ e f_{lim} calculados pela expressões 3.23 e 3.24, utilizando-se a força cortante V_s .
- A condição limitante dos valores da força cortante V_s imposta ao dimensionamento das barras fletidas, será também utilizada nos ensaios do Capítulo 4: Análise Experimental.
- As tensões obtidas por meio da análise da flambagem local nos elementos comprimidos, conforme a Tabela 3.3, permitirão posteriores análises e discussões presentes no Capítulo 5: Análise Numérica. Estas avaliações serão realizadas utilizando-se a simulação numérica dos perfis Ue e 2Ue conectados nas telhas.

3.5. Métodos Estatísticos

Neste capítulo são apresentados os métodos estatísticos empregados na análise dos coeficientes da rigidez cisalhante, K_{ry} , objetivando a obtenção de conclusões válidas.

Para isso são utilizados dois métodos, convenientemente escolhidos, capazes de permitir a tomada de decisões razoáveis, baseadas em tais análises.

3.5.1 Coeficiente de Variação

Este coeficiente, expresso em porcentagem, é definido como o quociente entre o desvio-padrão e a média aritmética, dado pela seguinte equação:

$$CV = \frac{s}{x} \cdot 100 \quad (3.25)$$

onde:

CV - coeficiente de variação de uma amostra;

s - desvio-padrão de uma amostra;

x - média aritmética de uma amostra.

A vantagem do uso deste parâmetro é caracterização da dispersão dos resultados em relação ao valor médio. Desta maneira, para a qualidade da amostra ser aceitável, ou, não duvidosa, o coeficiente de variação não pode ser superior a 25%.

3.5.2 Análise de Variância

A análise de variância é um método suficientemente poderoso na identificação de diferença entre as médias, realizado por meio do teste da hipótese nula de igualdade entre as médias.

O emprego da análise de variância na comparação de Q grupos está baseada na relação da variabilidade das médias entre os grupos, e da variabilidade das observações dentro dos grupos.

Para efetuar os cálculos desta etapa, LAPPONI (2000) recomenda e utiliza a ferramenta computacional “EXCEL”.

Na elaboração da tabela ANOVA deve-se calcular a soma dos quadrados, o desvio padrão, os graus de liberdade, as médias quadradas, o valor de F calculado, e por fim, determinar F tabelado.

O planejamento do teste de hipótese possuirá o nível de significância de 5%, resultando num nível de confiança de 95% aos coeficientes da rigidez cisalhante, Kry.

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1. Introdução

Os materiais que compõem o presente trabalho são constituídos por perfis de chapas de aço formados a frio, onde as seções transversais das telhas e das terças foram escolhidas devido ao uso, freqüentemente empregadas, nas coberturas das edificações mais comuns e tão presentes em nossos dias.

Nesta fase, realizaram-se os ensaios de caracterização do aço componente das telhas e das terças, bem como a investigação, por meio de ensaios preliminares, da determinação da rigidez ao cisalhamento, observando-se os deslocamentos, as deformações e as tensões geradas na terça, diante ora da ausência e ora da presença da contenção lateral causada pela telha.

4.2. Propriedades Mecânicas

Para determinar as propriedades mecânicas da matéria-prima utilizada na fabricação das chapas de aço, realiza-se o ensaio de tração ASTM A370-97 da American Society for Testing and Materials (ASTM).

A nomenclatura das amostras utilizadas encontra-se na Tabela 4.1.

As Figuras 4.1 e 4.2, mostram as dimensões e a conformação final do corpo-de-prova, respectivamente.

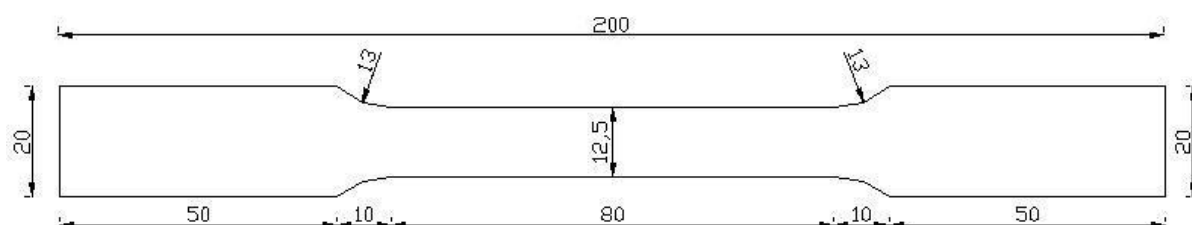


Figura 4.1 – Medidas dos corpos-de-prova, em milímetro.



Figura 4.2 – Corpo-de-prova do perfil Ue (acima) e da telha de aço (abaixo), em ambos colados extensômetros elétricos de resistência (strain gauge).

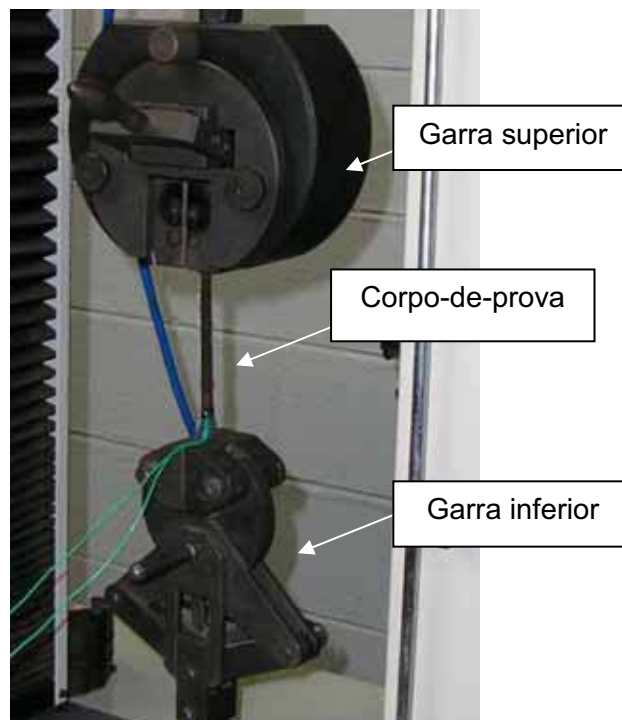
Tabela 4.1. Seleção das amostras para o ensaio de tração.

Nº do Corpo-de-prova	Elemento
01 e 02	Perfil Ue 75 x 40 x 15 x 2.25
03 e 04	Perfil Ue 100 x 40 x 15 x 2.25
05 e 06	Perfil Ue 127 x 50 x 15 x 2.65
07	Telha RT40 #0.43
08	Telha RT40 #0.50
09	Telha RT40 #0.65
10	Telha RT40 #0.80

A realização do ensaio de tração ocorreu no Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC), Ilha Solteira/ SP. A Figura 4.3 mostra os equipamentos disponíveis no laboratório.



(a) Prensa para Ensaio Universal de Tração, Modelo Versat 2000.



(b) Detalhe da posição do corpo-de-prova na prensa

Figura 4.3 – Equipamentos utilizados na realização do ensaio de tração.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados do ensaio de tração.

Tabela 4.2. Resultados do ensaio de tração.

Nº do Corpo-de-prova	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)	A (%)
01	187,1	372,4	209773	26
02	184,9	353,4	215576	27
03	184,5	374,0	214748	23
04	178,0	373,6	218536	22
05	181,3	405,4	213799	25
06	181,4	403,3	212998	24
07	195,9	354,5	222249	20
08	192,3	355,9	213559	16
09	184,9	354,0	225696	19
10	188,0	366,6	211803	17

onde:

- f_y - tensão de escoamento do aço;
- f_u - tensão de ruptura do aço;
- E - módulo de elasticidade obtido no ensaio;
- A - alongamento do corpo-de-prova na ruptura.

4.3. Ensaio de Determinação da Rigidez ao Cisalhamento

Os ensaios realizados nesta fase ocorreram no Laboratório de Engenharia Civil, UNESP/ FEIS.

Os trabalhos iniciaram-se com os ensaios dos perfis submetidos ao esforço de flexão simples, conforme ilustra a Figura 4.4 (a) e (b). Na seqüência, a Figura 4.5 (a) e (b) apresenta a visualização do ensaio de determinação da rigidez ao cisalhamento na 1ª e 2ª etapa, respectivamente.



(a)

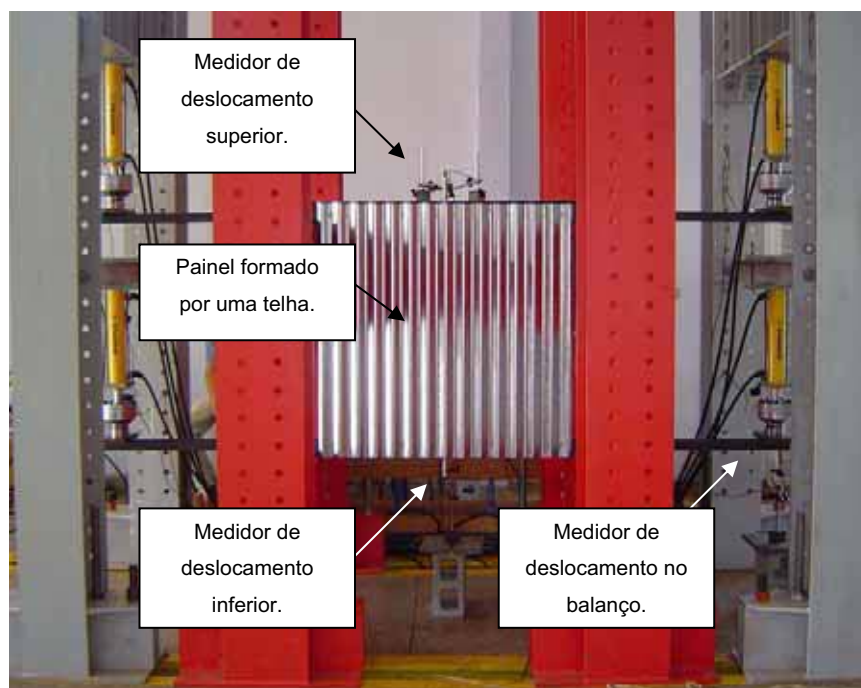


(b)

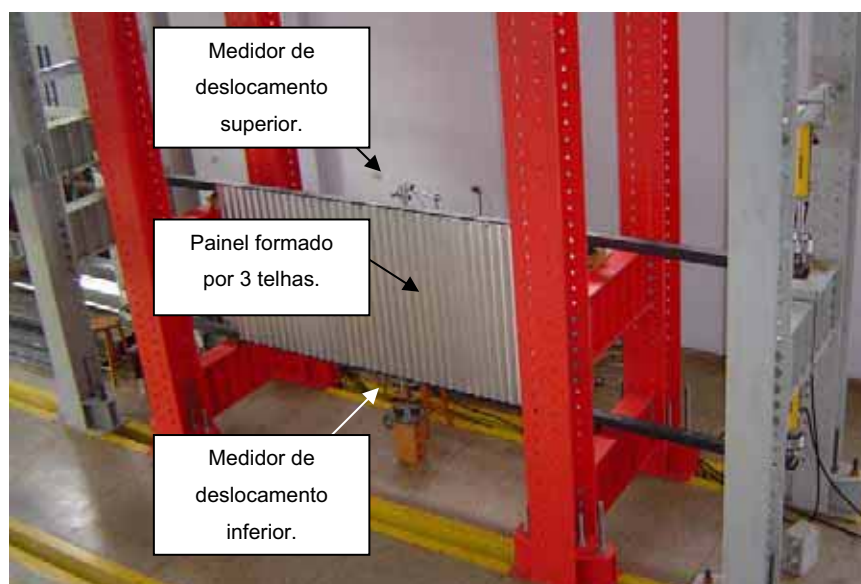
Figura 4.4 – Perfis submetidos ao esforço de flexão simples:

(a) Perfil Ue 75x40x15x2.25; (b) Perfil 2Ue 100x40x15x2.25

Tanto nos ensaios de flexão simples como nos ensaios de determinação da rigidez cisalhante, em ambos, foram aplicados os carregamentos até atingir os valores máximos de V_s , valores estes apresentados na Tabela 3.7, seguidos dos descarregamentos, perfazendo em sua totalidade ensaios não-destrutivos. Cada ensaio foi confeccionado pela substituição de materiais não-ensaiados (parafusos, perfis e telhas).



(a)



(b)

Figura 4.5 – Visualização dos ensaios: (a) Ensaio realizado na 1ª etapa;
(b) Ensaio realizado na 2ª etapa.

Os ensaios realizados na 1ª etapa, em número de 76, e os ensaios da 2ª etapa, em número de 20, estão identificados nas Tabelas 4.3 e 4.4, respectivamente.

Tabela 4.3. Associação dos ensaios na 1ª etapa.

Tipo de Telha	Espessura (mm)	Distância Entre Perfis (m)	Perfil Ue Compr. = 3,00 m
Ondulada RT17	0.43/ 0.50/ 0.65/ 0.80	1.00/ 1.30/ 1.50/ 1.70	Ue 75x40x15x2.25
Trapezoidal RT25	0.43/ 0.50/ 0.65/ 0.80	1.50/ 1.70/ 1.90/ 2.10	Ue 75x40x15x2.25
Trapezoidal RT35	0.43/ 0.50/ 0.65/ 0.80	1.50/ 1.70/ 1.90/ 2.10	Ue 100x40x15x2.25
Trapezoidal RT40	0.43/ 0.50/ 0.65/ 0.80	1.50/ 1.70/ 1.90/ 2.10	Ue 100x40x15x2.25
Trapezoidal RT100	0.50/ 0.65/ 0.80	1.70/ 1.90/ 2.10/ 2.30	Ue 127x50x15x2.65

Tabela 4.4. Associação dos ensaios na 2ª etapa.

Tipo de Telha	Espessura (mm)	Distância Entre Perfis (m)	Perfil 2Ue Compr. = 6,00m
Ondulada RT17	0.43	1.00/ 1.30/ 1.50/ 1.70	2Ue 75x40x15x2.25
Trapezoidal RT25	0.43	1.50/ 1.70/ 1.90/ 2.10	2Ue 75x40x15x2.25
Trapezoidal RT35	0.43	1.50/ 1.70/ 1.90/ 2.10	2Ue 100x40x15x2.25
Trapezoidal RT40	0.43	1.50/ 1.70/ 1.90/ 2.10	2Ue 100x40x15x2.25
Trapezoidal RT100	0.50	1.75/ 1.95/ 2.15/ 2.30	2Ue 127x50x15x2.65

Estes ensaios foram realizados mediante a utilização do sistema de aquisição de dados DAQbook 120 lotech, com interface ao programa de computador DASYLab 5.0, conforme a Figura 4.6.



Figura 4.6 – Sistema de aquisição de dados.

Na Figura 4.7 é apresentada sob vista lateral o sistema estrutural referente a 1ª etapa dos ensaios.

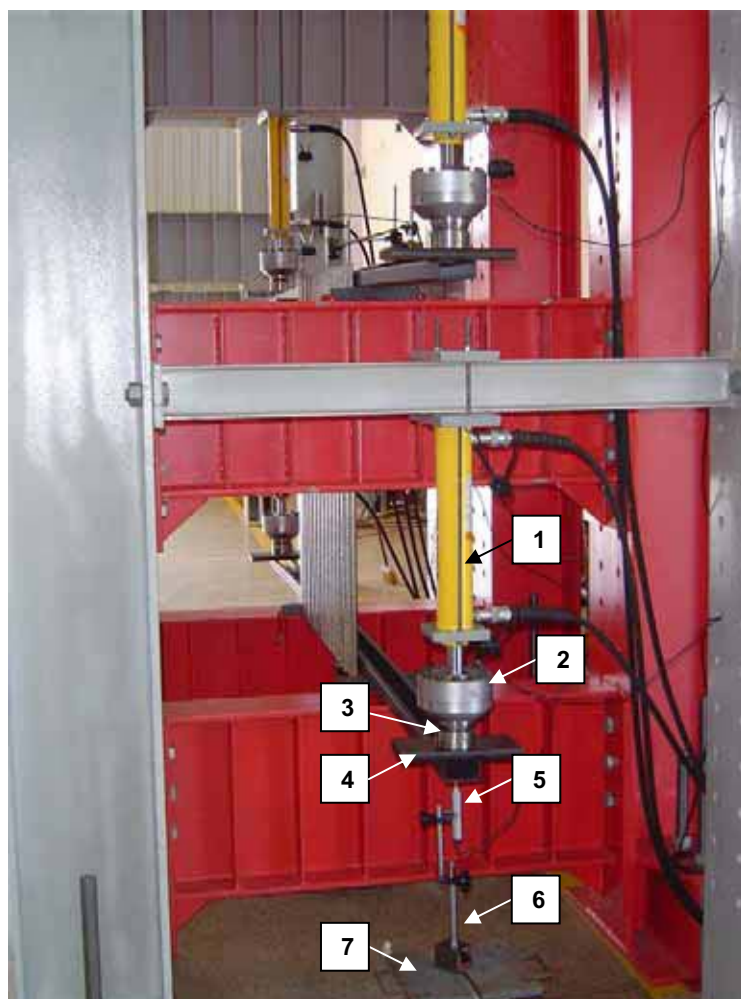


Figura 4.7 – Vista lateral do sistema estrutural ensaiado na 1ª etapa.

Os itens enumerados na Figura 4.7 encontram-se descritos a seguir:

- 1 - atuador hidráulico (ENERPAC – Capacidade: 10 tf);
- 2 - célula de carga (MSI: Modelo MUF-2-10TD6 – Capacidade: 10 tf));
- 3 - rótula de aço;
- 4 - barra chata de aço;
- 5 - medidor de deslocamento LVDT (KYOWA: DTH-A-30);
- 6 - base magnética (Mitutoyo);
- 7 - chapa metálica de apoio.

A Figura 4.8 mostra a posição dos perfis na montagem do sistema estrutural ensaiado.



(a)



(b)

Figura 4.8 – Vistas laterais do posicionamento dos perfis e formas fletidas durante aplicação da carga: (a) ensaio da 1ª etapa; (b) ensaio da 2ª etapa.

O posicionamento dos perfis mostrados na Figura 4.8 leva em consideração duas situações:

1ª) barra com seção monossimétrica submetida à flexão em torno do eixo de menor inércia, conforme mostra a Figura 4.8 (a), esta situação é utilizada pela necessidade de se analisar os deslocamentos e as tensões geradas no perfil, com a mesa tracionada conectada ao painel e a mesa comprimida sem travamento lateral; podendo o conjunto assim disposto corresponder ao modo de flambagem por distorção da seção transversal;

2ª) barra com seção fechada (caixão) submetida à flexão em torno do eixo de maior inércia, conforme se encontra na Figura 4.8 (b), nesta situação pretende-se observar a maior participação da contenção lateral fornecida pelo painel (formado por três telhas) ao perfil 2Ue, agora, submetido a maiores cargas de solicitação V_s impondo, desta maneira, maiores deslocamentos no meio do vão ($L/2$).

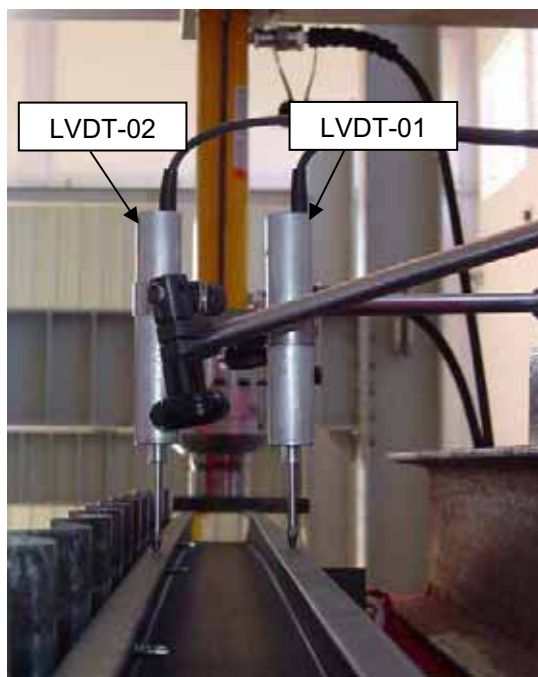
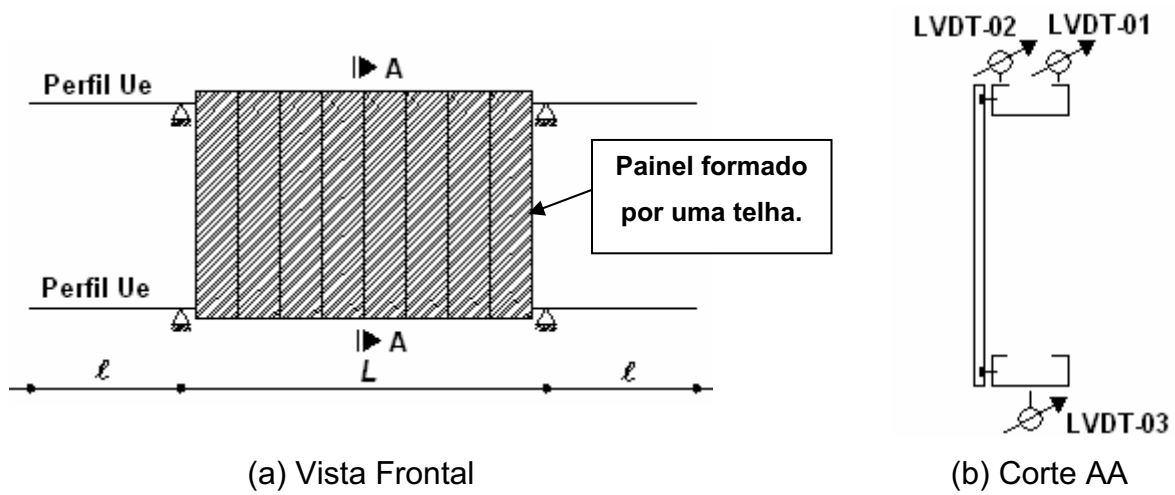
As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam as posições dos medidores de deslocamento LVDT, utilizados na 1ª e 2ª etapa, correspondendo aos seguintes coeficientes da rigidez cisalhante:

Kry_01 - rigidez obtida a partir do medidor deslocamento LDVT-01;

Kry_02 - rigidez obtida a partir do medidor deslocamento LDVT-02;

Kry_03 - rigidez obtida a partir do medidor deslocamento LDVT-03;

Kry_04 - rigidez obtida a partir do medidor deslocamento LDVT-04.

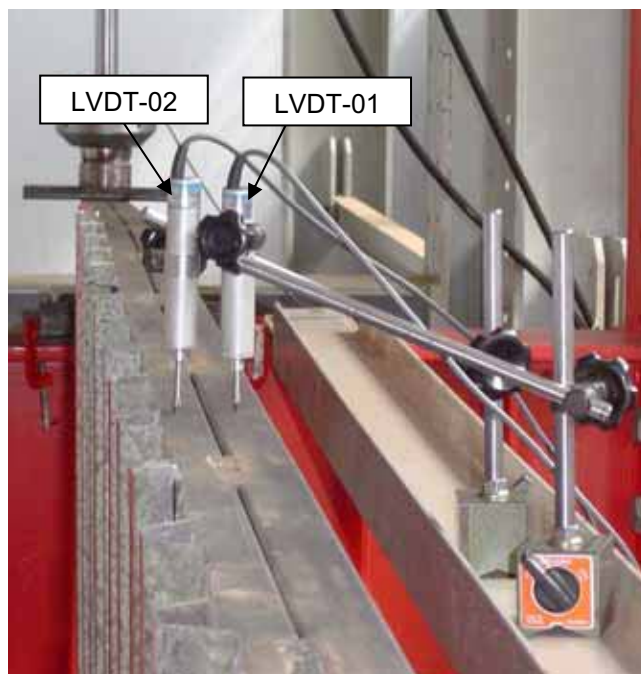
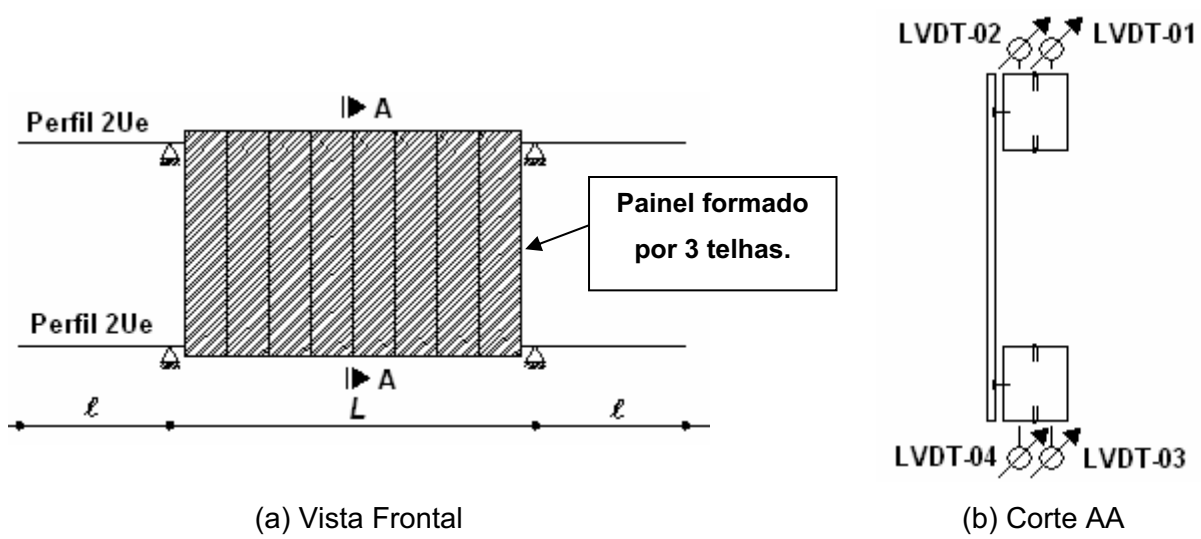


(c)

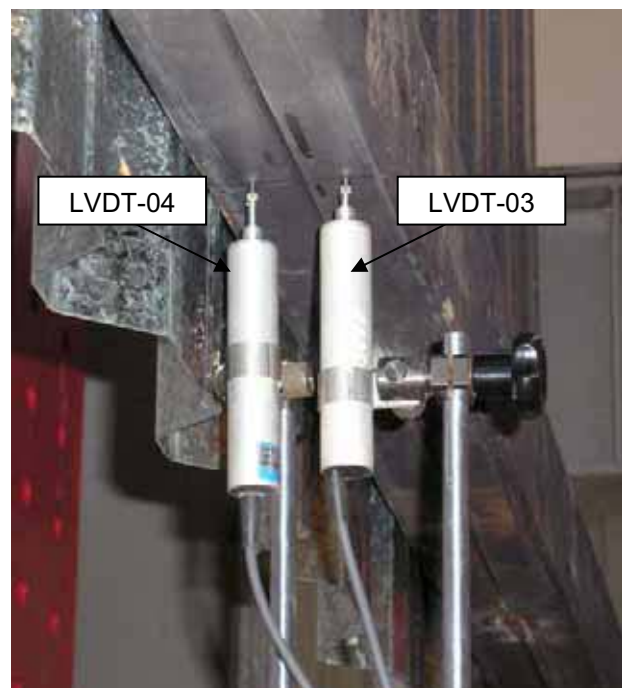


(d)

Figura 4.9 – Detalhe da posição dos medidores de deslocamento localizados no meio do vão central ($L/2$): ensaio da 1ª etapa.



(c)



(d)

Figura 4.10 – Detalhe da posição dos medidores de deslocamento localizados no meio do vão central ($L/2$): ensaio da 2ª etapa.

A Figura 4.11 mostra a aplicação dos fixadores autoperfurantes.



(a)



(b)

Figura 4.11 – Detalhe do fixador autoperfurante:
(a) aplicação com parafusadeira; (b) após aplicação.

4.4. Resultados Experimentais

A Tabela 4.5 apresenta os valores dos deslocamentos máximos experimentais, localizados no meio do vão central, dos perfis Ue e 2Ue submetidos aos ensaios de flexão simples.

Tabela 4.5. Valores experimentais das flechas máximas.

Perfil	Flecha no Vão (mm)
	$\Delta_{Experimental}$
Ue 75 x 40 x 15 x 2.25	5,086
Ue 100 x 40 x 15 x 2.25	5,057
Ue 127 x 50 x 15 x 2.65	3,740
2Ue 75 x 40 x 15 x 2.25	28,762
2Ue 100 x 40 x 15 x 2.25	21,818
2Ue 127 x 50 x 15 x 2.65	16,190

A Tabela 4.6 fornece os valores das flechas mínimas e máximas em cada medidor de deslocamento (LVDT) nos ensaios realizados na 1ª etapa.

Tabela 4.6. Resultados experimentais das flechas mínimas e máximas fornecidas pelo painel formado por uma telha conectada à terça.

Telha (Modelo)	Ondas Conectadas	Dist. entre Perfis (m)	Intervalo da Flecha (mm)		
			LVDT_01 (mín. ; máx.)	LVDT_02 (mín. ; máx.)	LVDT_03 (mín. ; máx.)
RT17	1ª, 5ª, 10ª e 14ª	1,00	3,498 ; 4,102	2,022 ; 2,534	2,264 ; 3,391
		1,30	3,493 ; 4,311	1,411 ; 2,632	1,889 ; 3,265
		1,50	3,723 ; 4,014	1,348 ; 2,213	2,144 ; 2,801
		1,70	2,970 ; 3,869	1,080 ; 1,718	1,893 ; 2,198
RT25	1ª, 3ª, 4ª e 6ª	1,50	3,704 ; 4,888	1,744 ; 2,909	2,384 ; 3,664
		1,70	3,920 ; 4,776	2,024 ; 2,772	2,615 ; 3,185
		1,90	3,156 ; 3,823	1,763 ; 2,656	2,372 ; 2,803
		2,10	3,949 ; 4,557	1,387 ; 1,624	2,469 ; 2,782
RT35	1ª, 2ª e 3ª	1,50	4,135 ; 4,899	2,214 ; 3,586	2,894 ; 4,250
		1,70	4,027 ; 4,496	2,210 ; 2,900	3,240 ; 3,551
		1,90	3,756 ; 4,950	2,523 ; 3,753	2,794 ; 4,541
		2,10	4,022 ; 4,890	2,674 ; 3,665	3,075 ; 4,132
RT40	1ª, 3ª e 5ª	1,50	4,778 ; 5,618	2,890 ; 4,635	3,374 ; 4,648
		1,70	4,229 ; 4,831	2,819 ; 3,460	2,797 ; 3,777
		1,90	4,376 ; 4,570	2,501 ; 3,244	3,408 ; 3,703
		2,10	4,298 ; 5,054	2,776 ; 3,462	3,506 ; 3,727
RT100	1ª e 2ª	1,70	3,534 ; 3,742	3,171 ; 3,495	3,254 ; 3,609
		1,90	3,716 ; 3,765	3,175 ; 3,410	3,661 ; 3,681
		2,10	3,616 ; 3,725	3,416 ; 3,587	3,623 ; 3,668
		2,30	3,505 ; 3,608	3,129 ; 3,470	3,454 ; 3,563

Tabela 4.7. Resultados experimentais da flecha máxima, fornecida pelo painel formado por três telhas conectadas aos perfis 2Ue.

Telha (Modelo)	Ondas Conectadas	Distância entre Perfis (m)	Flecha Máxima (mm)			
			LVDT_01	LDVT_02	LVDT_03	LVDT_04
RT17	1ª, 5ª, 10ª e 14ª (4 ondas)	1,00	14,830	14,677	14,808	14,748
		1,30	14,083	14,068	13,390	13,028
		1,50	10,817	10,668	10,744	9,870
		1,70	10,117	10,086	10,090	9,931
	1ª, 3ª, 5ª, 7ª, 8ª 10ª, 12ª e 14ª (8 ondas)	1,00	6,809	6,739	6,585	6,573
		1,30	5,281	4,786	4,474	4,395
		1,50	4,836	3,266	4,387	3,590
		1,70	4,106	2,978	4,378	3,574
RT25	1ª, 3ª, 4ª e 6ª (4 ondas)	1,50	12,761	12,092	12,870	12,031
		1,70	11,992	11,669	12,058	11,947
		1,90	11,784	11,380	10,970	10,892
		2,10	11,933	11,667	11,633	11,517
	1ª, 2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 6ª (6 ondas)	1,50	6,100	5,828	6,672	5,941
		1,70	5,994	5,826	6,005	5,824
		1,90	7,316	6,344	6,632	6,437
		2,10	5,683	4,642	5,267	5,232
RT35	1ª, 2ª e 3ª (3 ondas)	1,50	19,456	19,139	19,183	18,936
		1,70	16,277	15,931	16,772	16,089
		1,90	11,424	11,412	11,413	11,185
		2,10	18,752	18,358	19,490	19,454
RT40	1ª, 3ª e 5ª (3 ondas)	1,50	18,808	18,567	18,480	18,387
		1,70	16,013	15,817	15,357	15,254
		1,90	15,505	15,420	15,182	15,182
		2,10	14,869	14,662	15,059	14,608
	1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª (5 ondas)	1,50	10,137	9,481	9,814	9,139
		1,70	8,311	7,197	6,497	6,316
		1,90	10,549	10,427	10,195	9,939
		2,10	9,750	9,148	8,468	8,315
RT100	1ª e 2ª (2 ondas)	1,75	15,420	14,609	15,294	15,036
		1,95	14,562	14,445	14,719	14,614
		2,15	13,663	13,568	14,633	14,357
		2,30	14,165	13,704	14,662	14,633

Nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 foram plotados os deslocamentos dos perfis 2Ue submetidos ao esforço de flexão simples, resultados apresentados nas Tabelas 3.7 e 4.5, e os deslocamentos do ensaio de determinação da rigidez cisalhante, conforme encontrados na Tabela 4.7.

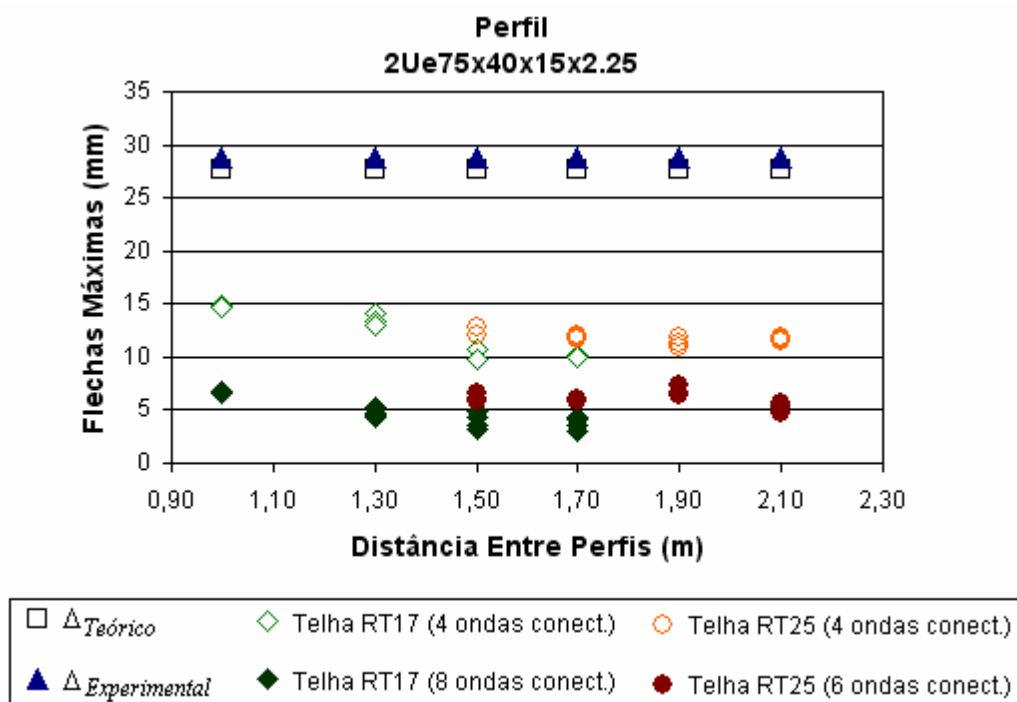


Figura 4.12 – Flechas máximas obtidas no meio do vão central do perfil 2Ue75x40x15x2.25.

A Figura 4.12 permite apreciar comparativamente a restrição ao deslocamento imposto ao perfil 2Ue75x40x15x2.25 quando conectado ao painel formado pelas telhas RT17 e RT25. Observa-se nestas associações que o maior número de fixadores aplicados através da Telha RT17, com 8 ondas baixas, e da Telha RT25, com 6 ondas baixas conectadas aos perfis, ambas impõem apreciáveis reduções ao deslocamento vertical do conjunto, na média, valores em torno de 25% das flechas máximas previstas (flecha teórica e experimental).

Uma situação normalmente encontrada e executada em muitas obras (fechamentos laterais e coberturas) é a utilização de 4 fixações tanto para a Telha RT17, bem como para a Telha RT25. Nestas associações comprovaram-se também a redução ao deslocamento vertical do conjunto, na média, valores em torno de 43% das flechas máximas previstas.

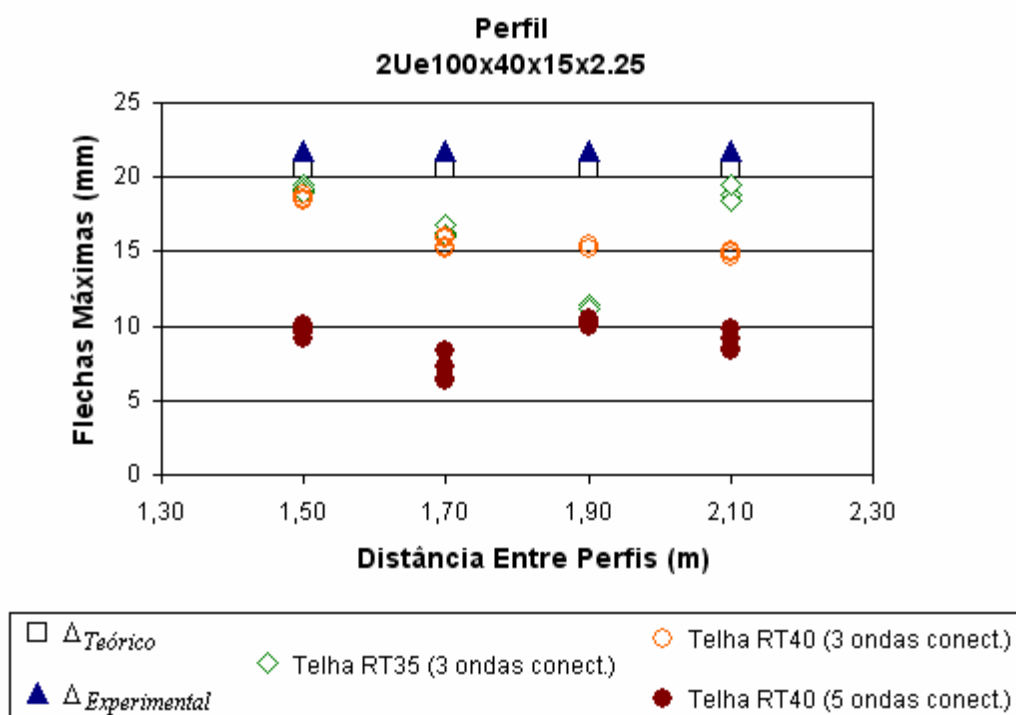


Figura 4.13 – Flechas máximas obtidas no meio do vão central do perfil 2Ue100x40x15x2.25.

Da mesma maneira na Figura 4.13 realiza-se a comparação entre os deslocamentos fornecidos pelo perfil 2Ue100x40x15x2.25, quando submetido ao ensaio de flexão simples e quando conectado ao painel formado pelas telhas RT35 e RT40. Nesta comparação nota-se que o maior número de fixadores aplicados através da Telha RT40, com 5 ondas baixas conectadas aos perfis, impõem ao conjunto formado menores deslocamentos, na média, valores em torno de 42% das flechas máximas previstas (flecha teórica e experimental).

Seguindo as recomendações fornecidas pelo fabricante na montagem dos painéis formados pelas associações das Telhas RT35 e da Telha RT40, ambas com 3 ondas baixas conectadas aos perfis, estas comprovaram ser menos eficientes ao deslocamento vertical obtendo, na média, valores em torno de 76% das flechas máximas previstas.

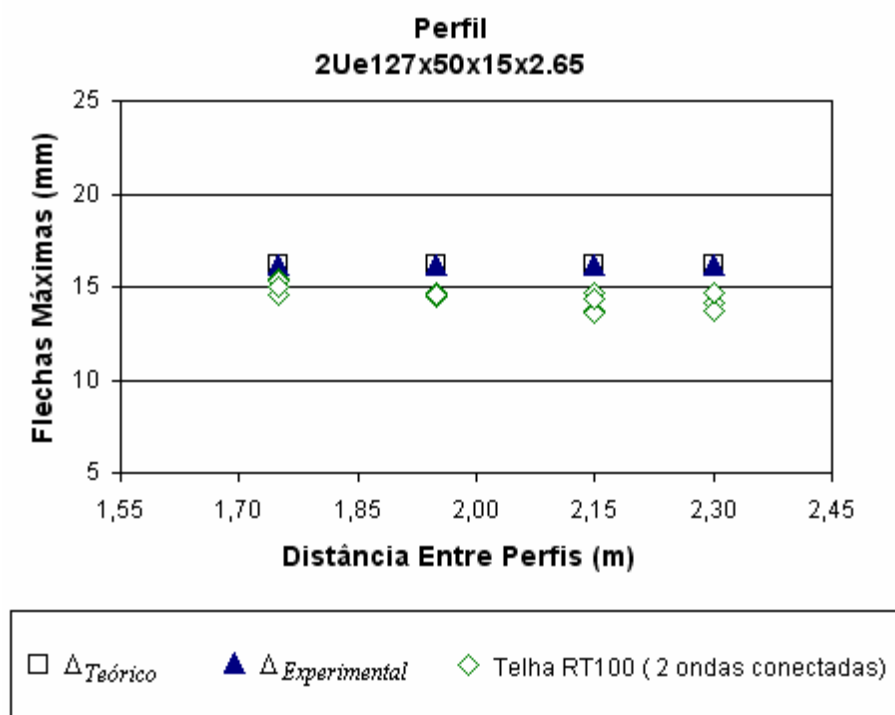
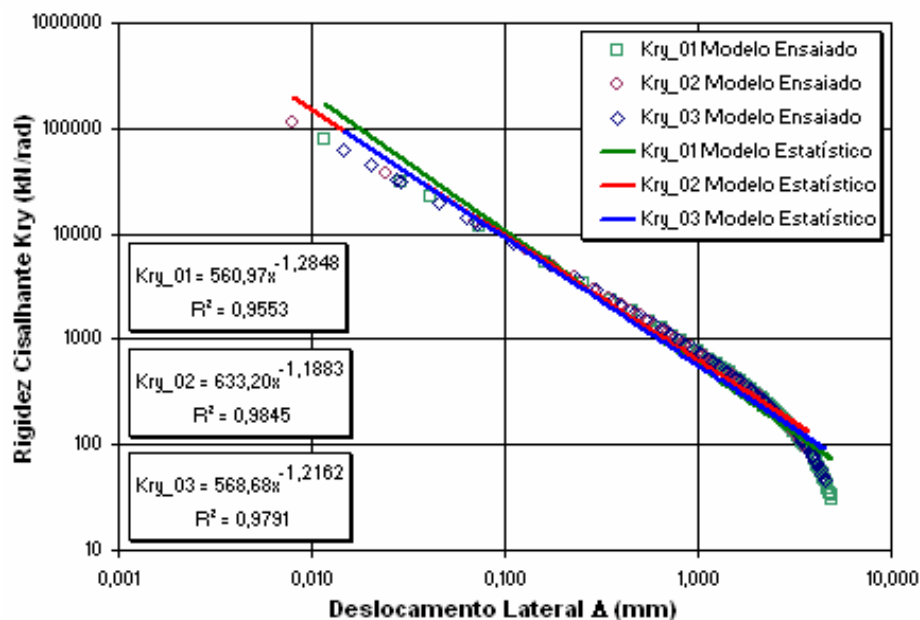


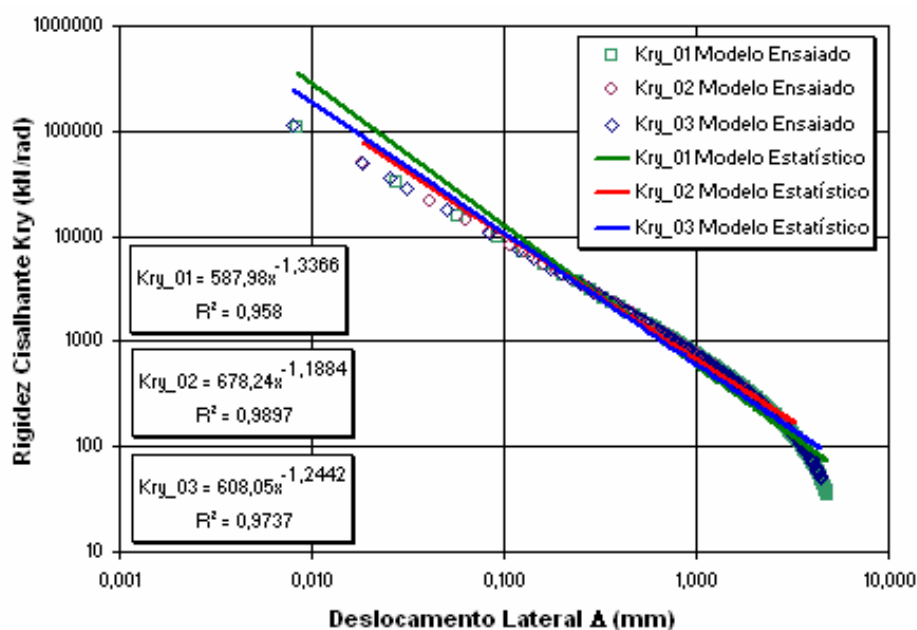
Figura 4.14 – Flechas máximas obtidas no meio do vão central do perfil 2Ue127x50x15x2.65.

Por meio da Figura 4.14 realiza-se o mesmo procedimento de comparação entre os deslocamentos fornecidos pelo perfil 2Ue127x50x15x2.65 quando submetido ao ensaio de flexão simples e quando conectado ao painel formado pela telha RT100. Nesta associação constata-se que a utilização de apenas 2 fixadores aplicados através da Telha RT100, impõem ao conjunto formado baixíssima eficiência ao deslocamento vertical obtendo, na média, valores em torno de 90% das flechas máximas previstas.

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam as distribuições da rigidez cisalhante Kry fornecida pelo painel formado por uma telha trapezoidal RT35, com distância entre os perfis Ue100x40x15x2.25 de 1,90 m (ensaios realizados na 1ª etapa).

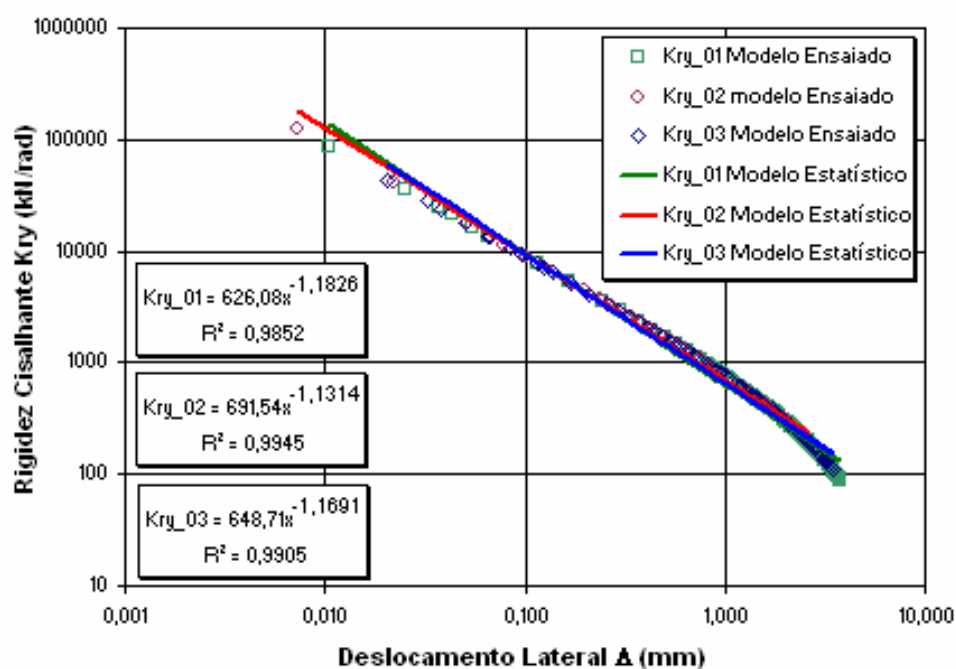


(a)

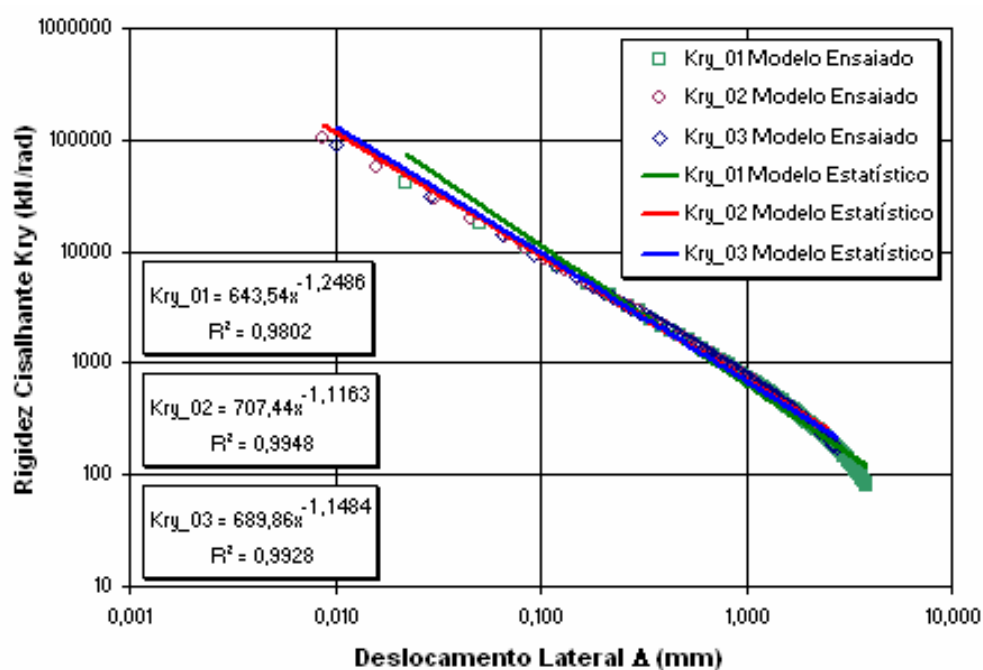


(b)

Figura 4.15 – Rigidez cisalhante fornecida pela telha RT35 com distância entre perfis de 1,90 m: (a) Espessura de 0,43 mm; (b) Espessura de 0,50 mm.



(a)



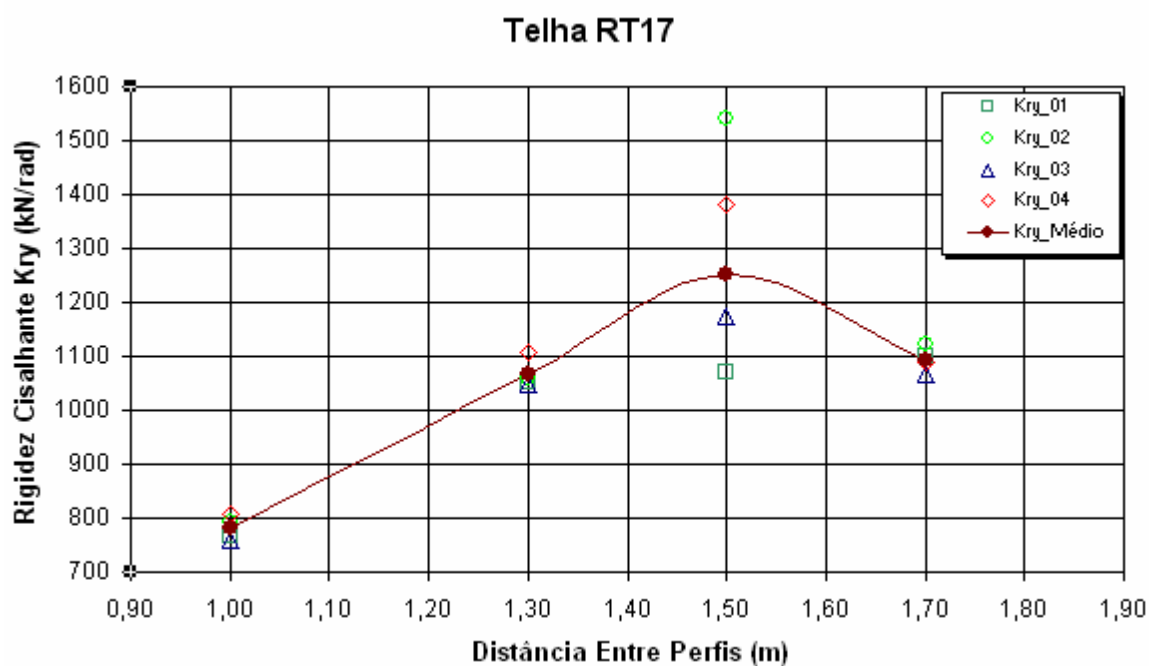
(b)

Figura 4.16 - Rigidez cisalhante fornecida pela telha RT35 com distância entre perfis de 1,90 m: (a) Espessura de 0,65 mm; (b) Espessura de 0,80 mm.

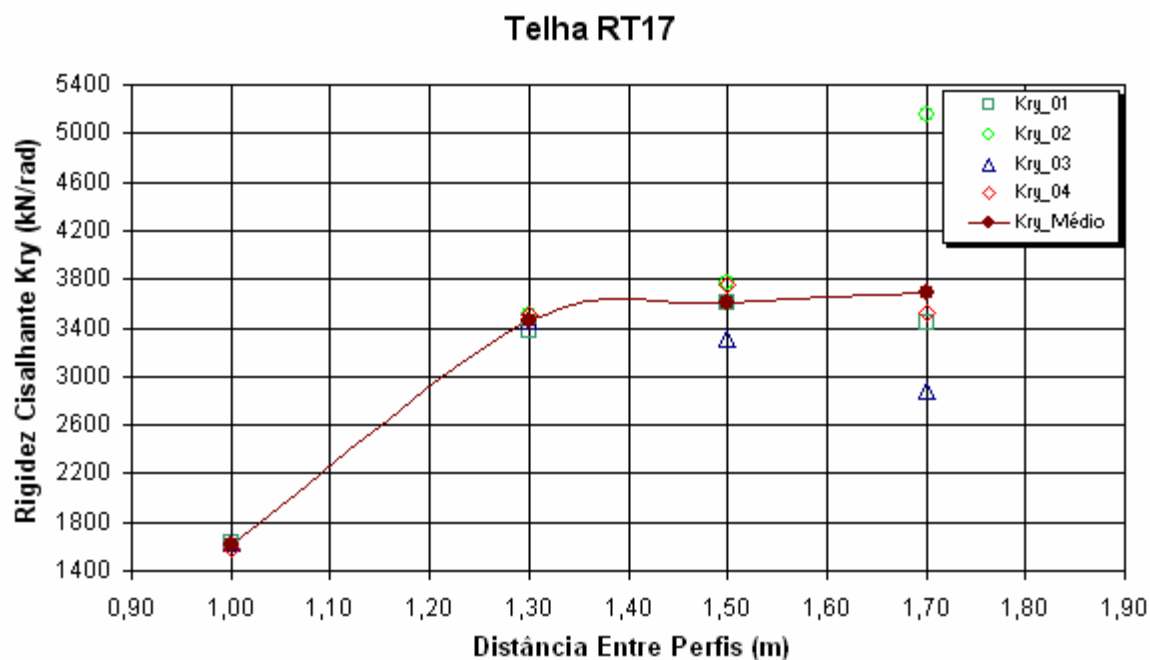
Os valores apresentados nas Figuras 4.15 e 4.16 de rigidez cisalhante Kry_01, Kry_02 e Kry_03 referidos como Modelo Ensaiado, tratam-se dos valores obtidos a partir dos medidores de deslocamento LVDT-01, LVDT-02 e LVDT-03, respectivamente, durante a realização dos ensaios da 1ª etapa. De posse destes valores de rigidez, emprega-se o método estatístico de regressão linear chamado de método dos mínimos quadrados, capaz de melhor ajustar e definir uma reta, e sua respectiva expressão, aos dados observados dentro de um intervalo.

Desta maneira, permite-se por meio deste critério obter as retas Kry_01, Kry_02 e Kry_03 referidas como Modelo Estatístico e determinar suas respectivas expressões (funções-potência), conforme ilustram as Figuras 4.15 e 4.16. Os valores do coeficiente de determinação R^2 encontram-se entre 95,53 e 99,48 %, comprovando o quanto cada reta de regressão consegue ajustar-se à variabilidade dos dados observados (Kry_01, Kry_02 e Kry_03 referidos ao Modelo Ensaiado).

A Figura 4.17 apresenta o desenvolvimento da rigidez cisalhante K_{ry} fornecida pelo painel formado por 3 telhas onduladas RT17 conectadas aos perfis 2Ue75x40x15x2.25 (ensaios realizados na 2ª etapa).



(a)



(b)

Figura 4.17 – Rigidez cisalhante fornecida pela telha RT17:

(a) 4 ondas baixas conectadas (1ª, 5ª, 10ª e 14ª);

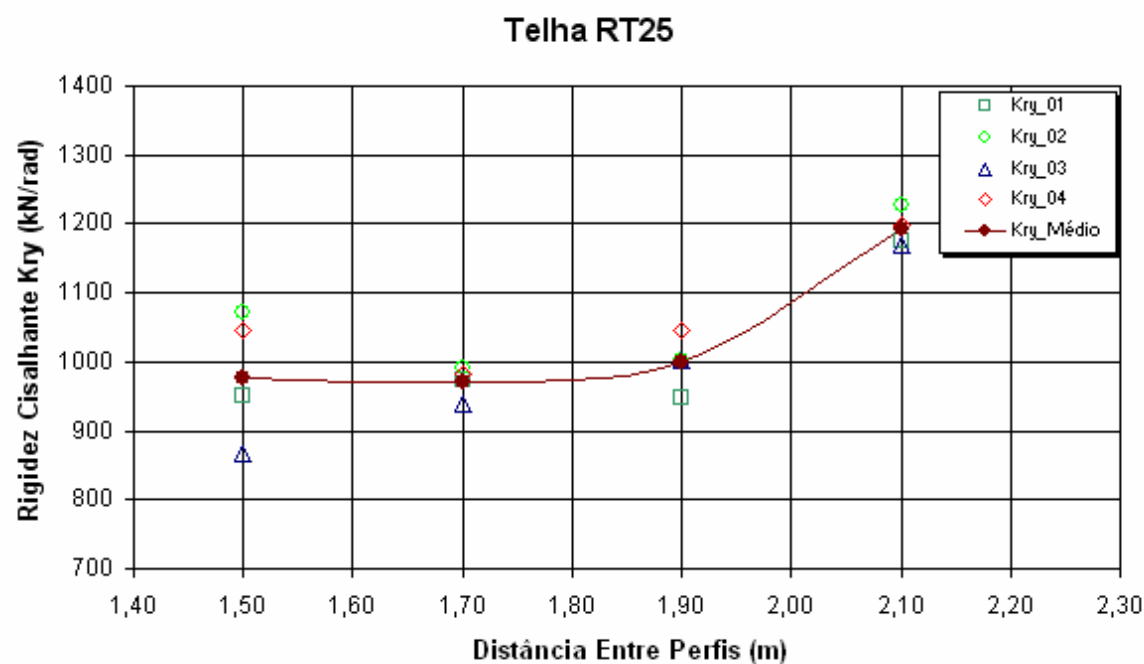
(b) 8 ondas baixas conectadas (1ª, 3ª, 5ª, 7ª, 8ª, 10ª, 12ª e 14ª).

Comparando-se a Figura 4.17 (a) com a (b) constata-se um aumento significativo da rigidez cisalhante devido a maior participação das ondas baixas conectadas, mesmo aumentando-se a distância entre perfis.

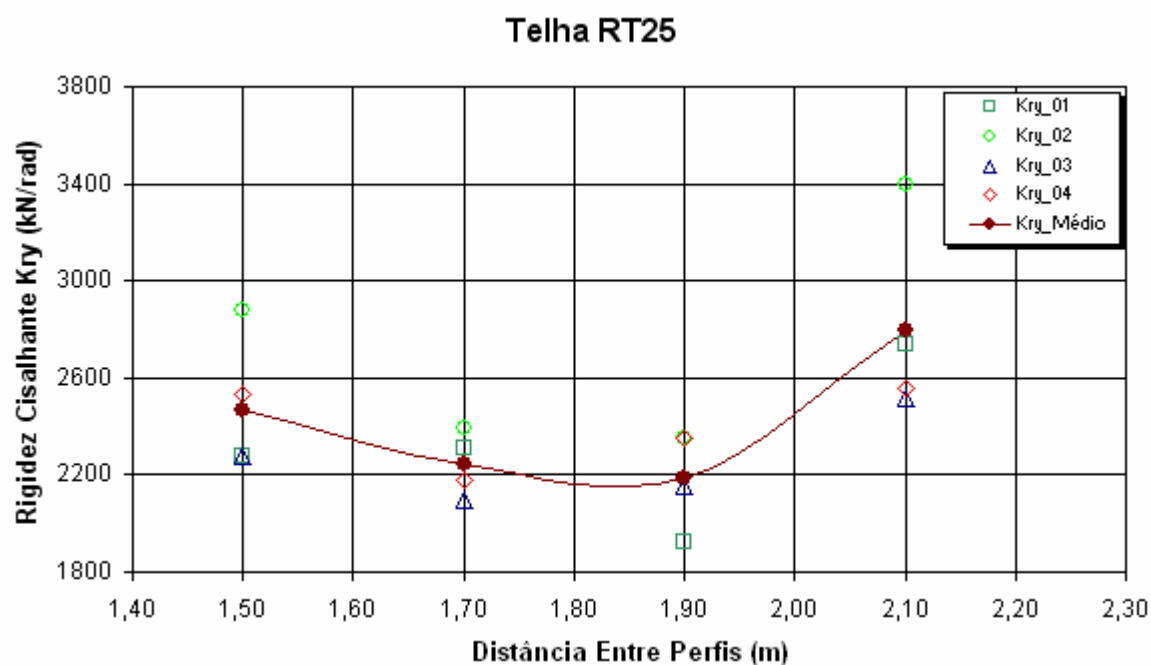
O uso comercialmente recomendado e utilizado na telha RT17 com 4 ondas baixas conectadas, conforme mostra a Figura 4.17 (a), fornece baixa rigidez cisalhante mesmo com a distância entre perfis de 1,50 m. Além disso, nestes ensaios não se obteve a marca mínima de 1600 kN/rad, a qual foi obtida com a distância entre perfis de 1,00 m, utilizando-se para isso apenas o dobro de conexões, de acordo com a Figura 4.17 (b).

Observando-se as distâncias entre perfis de 1,30 m, 1,50 m e 1,70 m, de acordo com a Figura 4.17 (b), verifica-se apreciável e considerável aumento da rigidez cisalhante. Nas distâncias de 1,30 e 1,70 m constatou-se, no mínimo, um aumento 3 vezes superior; e na distância de 1,50 m a rigidez atingiu um aumento de 2,8 vezes superior, representando quase o triplo do resultado obtido anteriormente conforme a Figura 4.17 (a).

A Figura 4.18 apresenta o desenvolvimento da rigidez cisalhante K_{ry} fornecida pelo painel formado por 3 telhas trapezoidais RT25 conectadas aos perfis 2Ue75x40x15x2.25 (ensaios realizados da 2ª etapa).



(a)



(b)

Figura 4.18 – Rigidez cisalhante fornecida pela telha RT25:

(a) 4 ondas baixas conectadas (1ª, 3ª, 4ª e 6ª);

(b) 6 ondas baixas conectadas (1ª, 2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 6ª).

Comparando-se a Figura 4.18 (a) com a (b) constata-se da mesma maneira um aumento significativo da rigidez cisalhante devido a maior participação das ondas baixas conectadas, mesmo aumentando-se a distância entre perfis.

Seguindo as recomendações do fabricante na montagem do painel formado pela telha RT25 com 3 ondas baixas conectadas, a rigidez cisalhante na média apresentou-se muito próxima a 1000 e não ultrapassando 1200 kN/rad, conforme mostra a Figura 4.18 (a).

Por meio da Figura 4.18 (b) comprovou-se um aumento da rigidez cisalhante na média, valores em torno de 2,4 vezes superior nas distâncias entre perfis de 1,50 m, 1,70 m e 2,10 m; e de 2,2 vezes superior na distância de 1,90 m.

A Figura 4.19 apresenta o desenvolvimento da rigidez cisalhante K_{ry} fornecida pelo painel formado por 3 telhas trapezoidais RT35 conectadas aos perfis 2Ue100x40x15x2.25 (ensaios realizados na 2ª etapa).

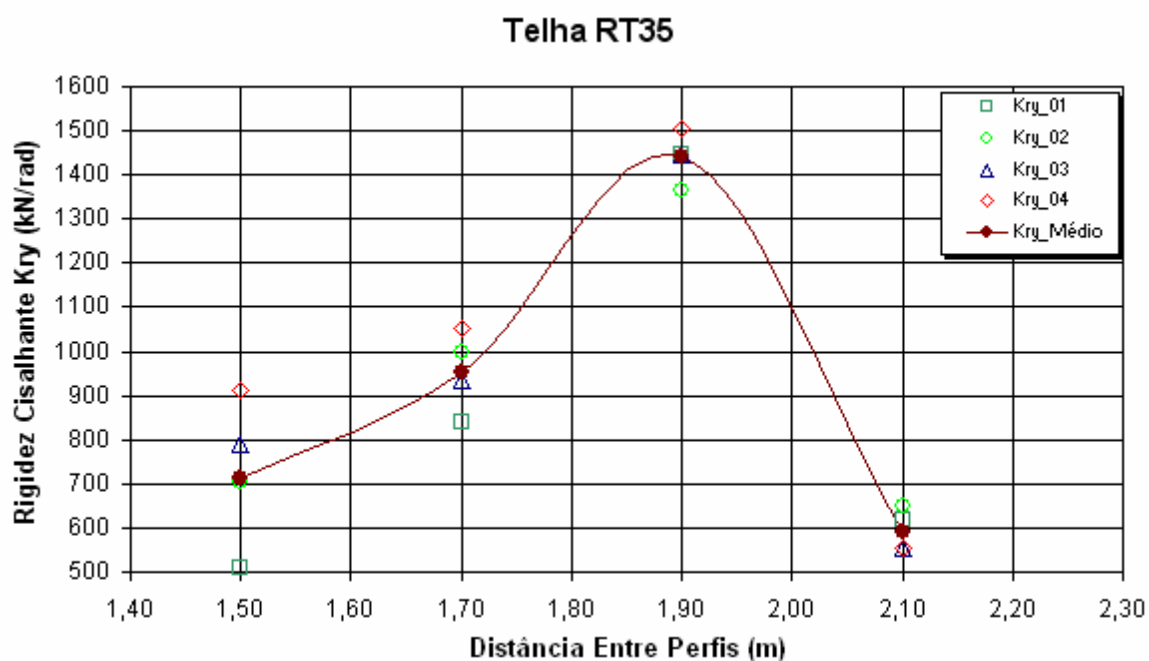
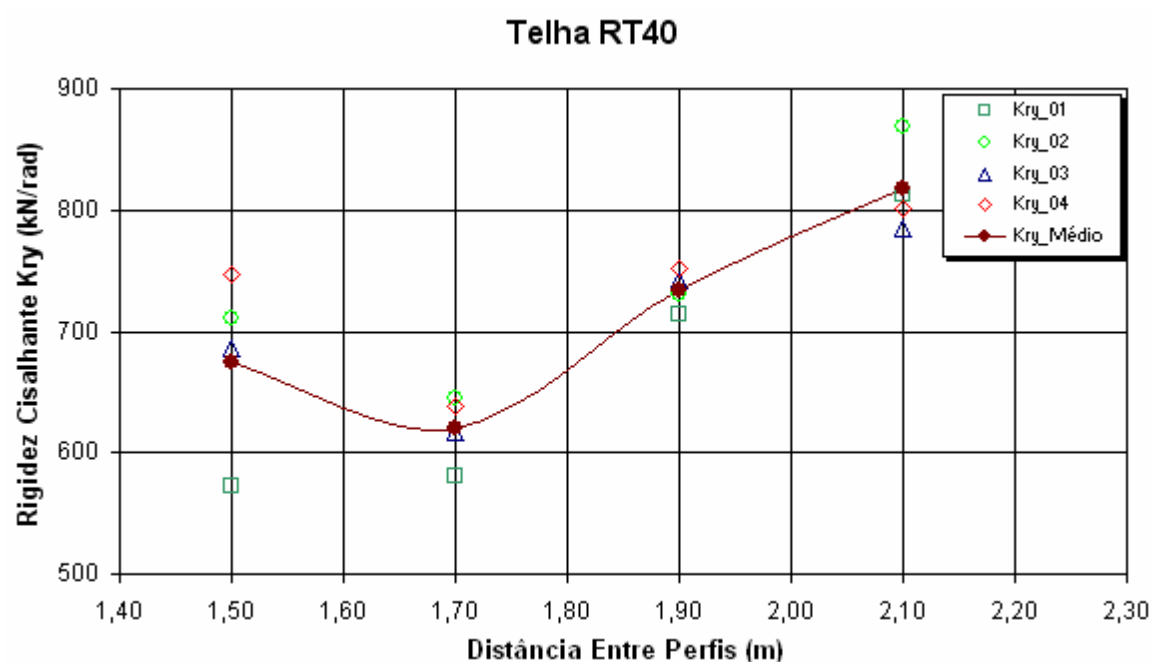


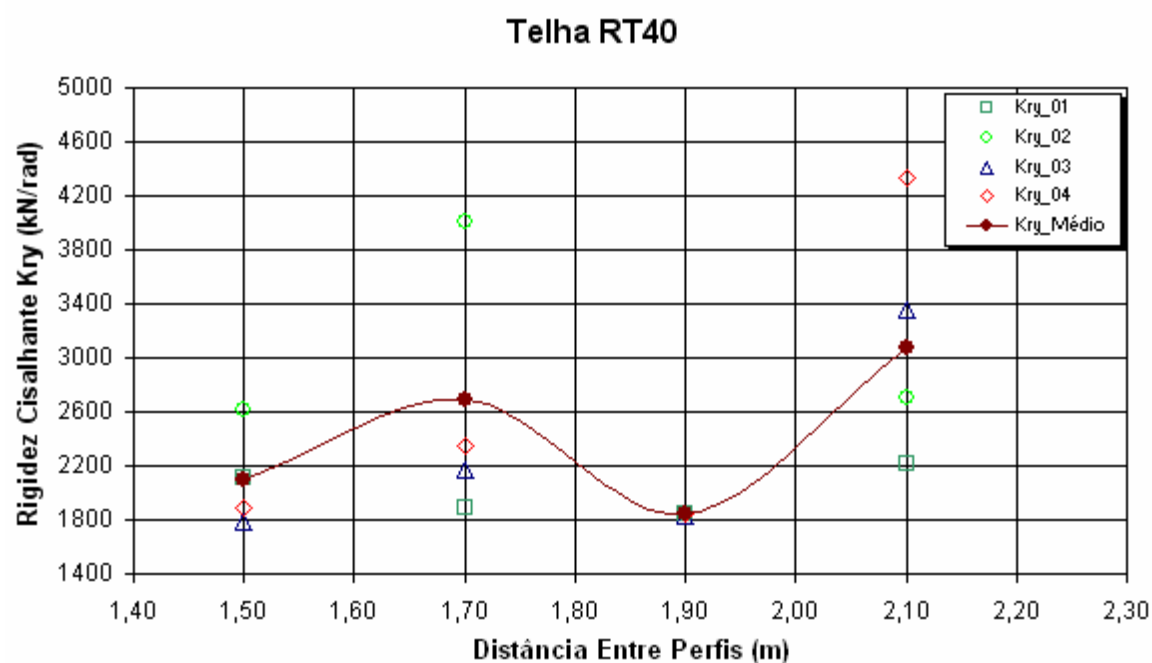
Figura 4.19 – Rigidez cisalhante fornecida pela telha RT35:
3 ondas baixas conectadas (1ª, 2ª e 3ª).

O uso comercialmente utilizado na telha RT35 com 3 ondas baixas conectadas, conforme mostra a Figura 4.19, fornece valores baixos de rigidez cisalhante nas distâncias entre perfis de 1,50 m, 1,70 m e 2,10 m. Nestas distâncias a rigidez cisalhante média não ultrapassou 1000 kN/rad, entretanto obteve-se melhor desempenho da telha ao utilizar a distância entre perfis de 1,90m, resultando em aproximadamente 1440 kN/rad.

A Figura 4.20 apresenta o desenvolvimento da rigidez cisalhante K_{ry} fornecida pelo painel formado por 3 telhas trapezoidais RT40 conectadas aos perfis 2Ue100x40x15x2.25 (ensaios realizados na 2ª etapa).



(a)



(b)

Figura 4.20 – Rigidez cisalhante fornecida pela telha RT40:

(a) 3 ondas baixas conectadas (1ª, 3ª e 5ª);

(b) 5 ondas baixas conectadas (1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª).

Comparando-se a Figura 4.20 (a) com a (b) comprova-se um aumento significativo da rigidez cisalhante devido a maior participação das ondas baixas conectadas, mesmo aumentando-se a distância entre perfis.

Seguindo as recomendações do fabricante na montagem do painel formado pela telha RT40 com 3 ondas baixas conectadas, conforme mostra a Figura 4.20 (a), esta fornece baixa rigidez cisalhante quando comparada aos valores fornecidos na Figura 4.20 (b).

Observando-se a Figura 4.20 (b), verifica-se apreciável e considerável aumento da rigidez cisalhante, no mínimo, de 2,5 vezes superior quando a distância entre perfis encontra-se em 1,90 m; nas demais distâncias obtiveram-se um aumento, no mínimo, representando o triplo do resultado obtido anteriormente conforme a Figura 4.20 (a).

A Figura 4.21 apresenta o desenvolvimento da rigidez cisalhante K_{ry} fornecida pelo painel formado por 3 telhas trapezoidais RT100 conectadas aos perfis 2Ue127x50x15x2.65 (ensaios realizados na 2ª etapa).

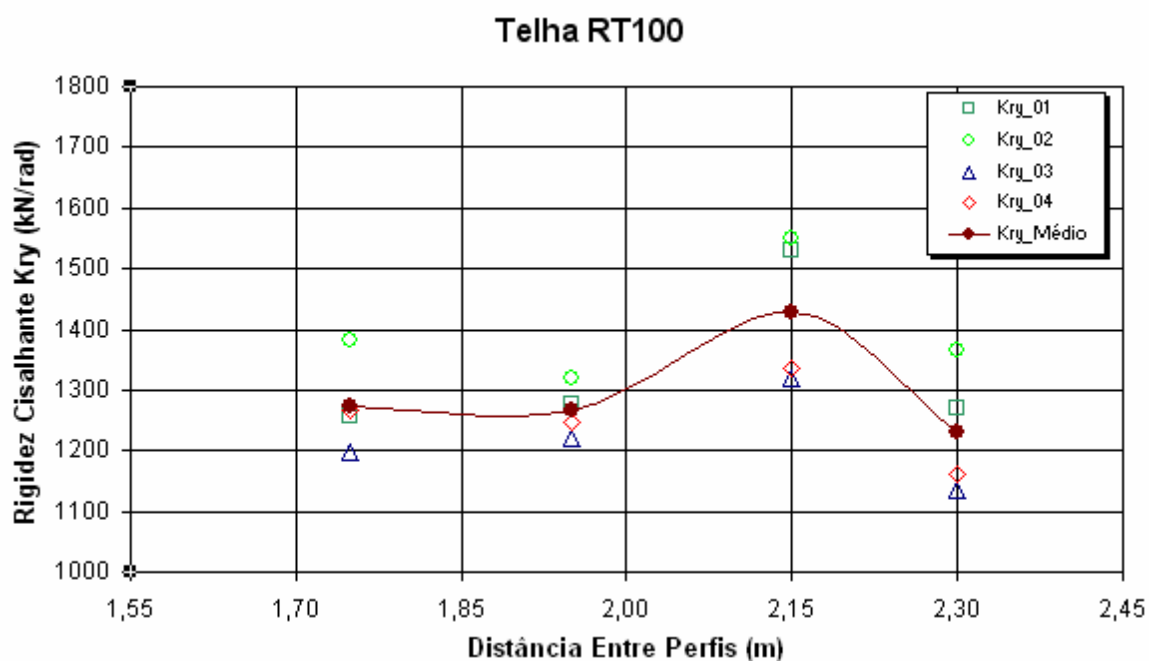


Figura 4.21 – Rigidez cisalhante fornecida pela telha RT100:
2 ondas baixas conectadas (1ª e 2ª).

O desempenho apresentado pela telha RT100 com 2 ondas baixas conectadas forneceu valores medianos de rigidez cisalhante, conforme mostra a Figura 4.21; tais valores encontram-se situados entre 1222 a 1430 kN/rad.

Os resultados experimentais apresentados nas Tabelas 4.8 e 4.9 fornecem os valores da rigidez cisalhante obtida conforme associação dos ensaios mostrados nas Tabelas 4.3 e 4.4, respectivamente.

Tabela 4.8. Resultados experimentais da rigidez cisalhante fornecida pelo painel formado por uma telha conectada à terça.

Telha (Modelo)	Ondas Conectadas	Distância entre Perfis (m)	Kry médio (kN/rad)		
			Kry_01	Kry_02	Kry_03
RT17	1ª, 5ª, 10ª e 14ª	1,00	394,41	848,20	698,59
		1,30	522,69	1451,44	1113,59
		1,50	395,25	1117,32	926,14
		1,70	483,90	1276,44	924,82
RT25	1ª, 3ª, 4ª e 6ª	1,50	310,02	830,57	741,22
		1,70	285,77	650,81	678,05
		1,90	416,16	981,93	733,80
		2,10	296,79	866,44	681,15
RT35	1ª, 2ª e 3ª	1,50	349,16	1145,98	848,93
		1,70	294,69	701,83	516,90
		1,90	380,33	737,27	571,45
		2,10	230,32	675,81	461,49
RT40	1ª, 3ª e 5ª	1,50	201,97	424,84	373,78
		1,70	299,99	551,01	533,26
		1,90	348,88	693,56	504,42
		2,10	478,12	956,08	621,13
RT100	1ª e 2ª	1,70	530,39	592,40	637,20
		1,90	607,05	698,45	642,51
		2,10	602,70	687,83	666,26
		2,30	598,52	670,60	679,28

Tabela 4.9. Resultados experimentais da rigidez cisalhante fornecida pelo painel formado por três telhas conectadas aos perfis.

Telha (Modelo)	Ondas Conectadas	Dist. entre Perfis (m)	Kry (kN/rad)				
			Kry_01	Kry_02	Kry_03	Kry_04	Kry_Médio
RT17	1ª, 5ª, 10ª e 14ª	1,00	764,92	792,24	758,33	806,80	781,84
		1,30	1053,61	1060,48	1048,82	1107,05	1067,24
		1,50	1069,17	1541,77	1173,47	1379,89	1290,98
		1,70	1100,64	1120,68	1066,95	1087,26	1094,30
	1ª, 3ª, 5ª, 7ª, 8ª 10ª, 12ª e 14ª	1,00	1608,12	1637,21	1575,96	1633,30	1613,46
		1,30	3374,79	3513,86	3464,51	3503,88	3463,82
		1,50	3609,91	3770,57	3315,78	3754,52	3620,50
		1,70	3437,96	5159,77	2874,56	3530,94	3660,81
RT25	1ª, 3ª, 4ª e 6ª	1,50	950,1	1072,89	867,32	1045,59	984,90
		1,70	974,57	991,02	940,51	982,02	973,91
		1,90	948,52	1001,18	1002,23	1046,38	998,66
		2,10	1176,05	1228,45	1169,03	1199,34	1194,23
	todas ondas baixas	1,50	2277,47	2880,39	2279,34	2533,05	2481,18
		1,70	2312,53	2391,52	2097,12	2179,71	2239,10
		1,90	1927,09	2353,23	2153,11	2352,62	2197,20
		2,10	2741,24	3400,7	2515,38	2554,38	2779,20
RT35	1ª, 2ª e 3ª	1,50	509,54	702,52	790,92	912,53	747,34
		1,70	841,27	996,54	933,75	1051,19	958,96
		1,90	1366,78	1447,45	1447,38	1507,02	1437,77
		2,10	616,84	649,92	554,13	554,34	592,14
RT40	1ª, 3ª e 5ª	1,50	573,19	710,20	685,63	746,59	674,82
		1,70	581,42	644,26	616,47	639,06	619,88
		1,90	713,40	730,00	742,40	751,06	733,96
		2,10	813,40	869,35	785,19	801,09	817,47
	todas ondas baixas	1,50	2115,38	2607,89	1787,84	1894,06	2094,05
		1,70	1882,12	4005,72	2170,61	2346,74	2687,90
		1,90	1838,23	1841,77	1824,12	1844,81	1837,19
		2,10	2211,15	2701,27	3357,17	4337,71	3067,49
RT100	1ª e 2ª	1,75	1257,38	1381,63	1198,59	1266,17	1272,48
		1,95	1276,82	1319,08	1220,23	1247,22	1265,70
		2,15	1530,06	1548,18	1320,93	1334,4	1428,75
		2,30	1268,94	1364,13	1136,02	1162,74	1221,79

4.5. Discussão dos Resultados

Para investigar os deslocamentos e a rigidez cisalhante apresentados nas Tabelas 4.5 a 4.9 foram utilizados os esforços cortantes no início do escoamento da seção efetiva, V_s^{InEsc} , apresentados na Tabela 3.5.

4.5.1 Análise dos Deslocamentos

- Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 3.7, 4.5 e 4.6 constata-se o seguinte (relativamente ao perfil Ue):

1º) Apesar da igualdade no número das ondas baixas conectadas aos perfis utilizando-se um painel de telha, no caso das telhas RT17 e RT25 e das telhas RT35 e RT40, em ambas as situações ocorreram semelhante redução de deslocamentos, proporcional à flecha teórica em cada perfil utilizado nestas associações;

2º) As diferenças apresentadas nos medidores de deslocamento LVDT_01, LVDT_02 e LVDT_03 indicam a perda da capacidade resistente do perfil Ue pela flambagem lateral por flexo-torção, apesar da rotação e da translação do conjunto configurarem, também, a flambagem por distorção da seção transversal;

3º) Tais diferenças, registradas pelos medidores de deslocamento, como também os valores das tensões geradas nos elementos, serão novamente retomados por meio de análise numérica, a ser realizada no Capítulo 5: Análise Numérica.

- Comparando os resultados apresentados nas Tabelas 3.7, 4.5 e 4.7 pode-se concluir o seguinte (relativamente ao perfil 2Ue):

1º) Apesar da redução imposta ao deslocamento dos perfis caixões formados por 2Ue conectados às telhas nos modelos RT17 a RT100, observou-se nestas barras, que o modo da flambagem lateral por torção é mais significativo diante do maior número de conexões.

2º) Para fins de avaliação dos deslocamentos observados, na Tabela 4.10 encontra-se o resumo das flechas ($\Delta_{Teórico}$ e $\Delta_{Experimental}$), bem como os valores médios dos deslocamentos (LVDT_Médio) obtidos por meio dos resultados apresentados na Tabela 4.7

Tabela 4.10. Resumo das flechas teóricas e experimentais obtidas no meio do vão central dos perfis 2Ue.

Telha (Modelo)	Ondas Conectadas	Distância entre Perfis (m)	Flecha (mm)		
			$\Delta_{Teórico}$	$\Delta_{Experimental}$	LVDT_Médio
RT17	1 ^a , 5 ^a , 10 ^a e 14 ^a (4 ondas)	1,00	27,602	28,762	14,766
		1,30			13,642
		1,50			10,525
		1,70			10,056
	1 ^a , 3 ^a , 5 ^a , 7 ^a , 8 ^a 10 ^a , 12 ^a e 14 ^a (8 ondas)	1,00	27,602	28,762	6,677
		1,30			4,734
		1,50			4,020
		1,70			3,759
RT25	1 ^a , 3 ^a , 4 ^a e 6 ^a (4 ondas)	1,50	27,602	28,762	12,439
		1,70			11,917
		1,90			11,257
		2,10			11,688
	1 ^a , 2 ^a , 3 ^a , 4 ^a , 5 ^a e 6 ^a (6 ondas)	1,50	27,602	28,762	6,135
		1,70			5,912
		1,90			6,682
		2,10			5,206
RT35	1 ^a , 2 ^a e 3 ^a (3 ondas)	1,50	20,629	21,818	19,179
		1,70			16,267
		1,90			11,359
		2,10			19,014
RT40	1 ^a , 3 ^a e 5 ^a (3 ondas)	1,50	20,629	21,818	18,563
		1,70			15,610
		1,90			15,320
		2,10			14,800
	1 ^a , 2 ^a , 3 ^a , 4 ^a e 5 ^a (5 ondas)	1,50	20,629	21,818	9,643
		1,70			7,083
		1,90			10,278
		2,10			8,920
RT100	1 ^a e 2 ^a (2 ondas)	1,75	16,175	16,190	15,090
		1,95			14,585
		2,15			14,055
		2,30			14,291

3º) No Anexo A são apresentados mais detalhes (em fotos) destes ensaios, bem como as conformações finais do modo de plastificação e rasgamento das telhas.

4.5.2 Análise da Rigidez Cisalhante

- As retas representando a distribuição da rigidez cisalhante K_{ry} , conforme ilustram as Figuras 4.15 e 4.16, foram obtidas utilizando-se os métodos estatísticos, buscando avaliar a confiabilidade dos resultados.

- Os ajustes das funções-potência com os valores obtidos no ensaio de determinação da rigidez cisalhante K_{ry_01} , K_{ry_02} , K_{ry_03} e K_{ry_04} , realizaram-se utilizando o método dos mínimos quadrados. As Tabelas 4.8 e 4.9 fornecem os valores médios calculados com 95% de confiança, analisados por meio do teste de hipótese de igualdade entre as médias.

- O aumento da rigidez fornecida aos perfis é comprovado pela presença dos números de conexões realizadas, comparando as Figuras 4.17 (a) e (b), as Figuras 4.18 (a) e (b) e por fim as Figuras 4.20 (a) e (b). Este comportamento representa no mínimo o dobro de rigidez nos modelos das telhas RT17 e RT25, no caso do modelo RT40 o valor da rigidez foi três vezes maior.

- Apesar de o maior número de conexões representar um acréscimo de resistência aos perfis, os modelos das telhas RT35 e RT40 apresentaram rigidez equivalente aos modelos RT17 e RT25 com 4 ondas baixas conectadas.

- Por fim, o modelo RT100 forneceu baixas variações da rigidez, conforme ilustra a Figura 4.21, entretanto os seus valores foram superiores aos demais modelos com 3 e 4 ondas baixas conectadas.

- Os valores determinados da rigidez cisalhante neste capítulo serão utilizados na entrada de dados do Capítulo 5: Análise Numérica.

- As Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam o resumo da rigidez cisalhante média ($K_{ry_Médio}$) desenvolvida ao longo das distâncias entre os perfis 2Ue.

Tabela 4.11 – Resumo da rigidez cisalhante média desenvolvida pelas RT17, RT25, RT35 e RT40 ao longo das distâncias entre perfis 2Ue.

Tipo de Telha	Ondas Conect.	Distância entre Perfis (m)						
		1,00	1,30	1,50	1,70	1,90	2,10	
RT17	4	781,84	1067,24	1290,98	1094,30			Kry_Médio (kN/rad)
	8	1613,46	3463,82	3620,50	3660,81			
RT25	4			984,90	973,91	998,66	1194,23	
	6			2481,18	2239,10	2197,20	2779,20	
RT35	3			747,34	958,96	1437,77	592,14	
RT40	3			674,82	619,88	733,96	817,47	
	5			2094,05	2687,90	1837,19	3067,49	

Tabela 4.12 – Resumo da rigidez cisalhante média desenvolvida pela telha RT100 ao longo das distâncias entre os perfis 2Ue127x5x15x2.65.

Tipo de Telha	Ondas Conectadas	Distância entre Perfis (m)				
		1,75	1,95	2,15	2,30	
RT100	2	1272,48	1265,70	1428,75	1221,79	Kry_Médio (kN/rad)

5. ANÁLISE NUMÉRICA

5.1. Introdução

Para efetuar a validade e a comparação dos resultados obtidos por meio dos ensaios de laboratório, realizou-se a análise numérica utilizando o programa ANSYS, discretizando a terça em elemento de casca, e a telha em elemento de mola-amortecedor.

Nesta etapa foram realizadas duas análises numéricas a linear e não-linear geométrica, em ambos casos manteve-se a linearidade física dos materiais.

O foco desta modelagem é impor ao modelo numérico a mesma metodologia aplicada ao modelo experimental, compondo desta maneira o mesmo ensaio não-destrutivo realizado.

A modelagem numérica seguiu conforme a metodologia utilizada no modelo físico ensaiado na 1ª etapa, em número de 20 simulações, e na 2ª etapa, em número de 32 simulações.

5.2. Elemento de Casca

O elemento de casca empregado, SHELL 93, possui 8 nós com 6 graus de liberdade cada um, translação e rotação nodal nas direções de x, y e z, e a forma de deformação quadrática em ambas as direções no plano. O elemento apresenta também o efeito da plasticidade e a compatibilidade de grandes deflexões e deformações, Figura 5.1.

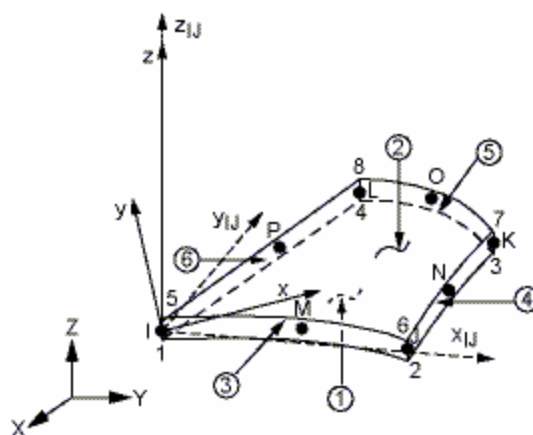


Figura 5.1 – Geometria do elemento SHELL 93.

Para incorporar o elemento casca nos perfis Ue e 2Ue foi necessário utilizar o conceito do método linear, dividindo-se o perfil em elementos primários de linhas e arcos, localizados a meia espessura da chapa de aço.

5.3. Elemento Mola-Amortecedor

A geometria, a posição dos nós, e o sistema coordenado para este elemento são mostrados na Figura 5.2. O elemento mola-amortecedor, COMBIN 14, possui a capacidade longitudinal ou torcional em aplicações uni, bi ou tridimensionais.

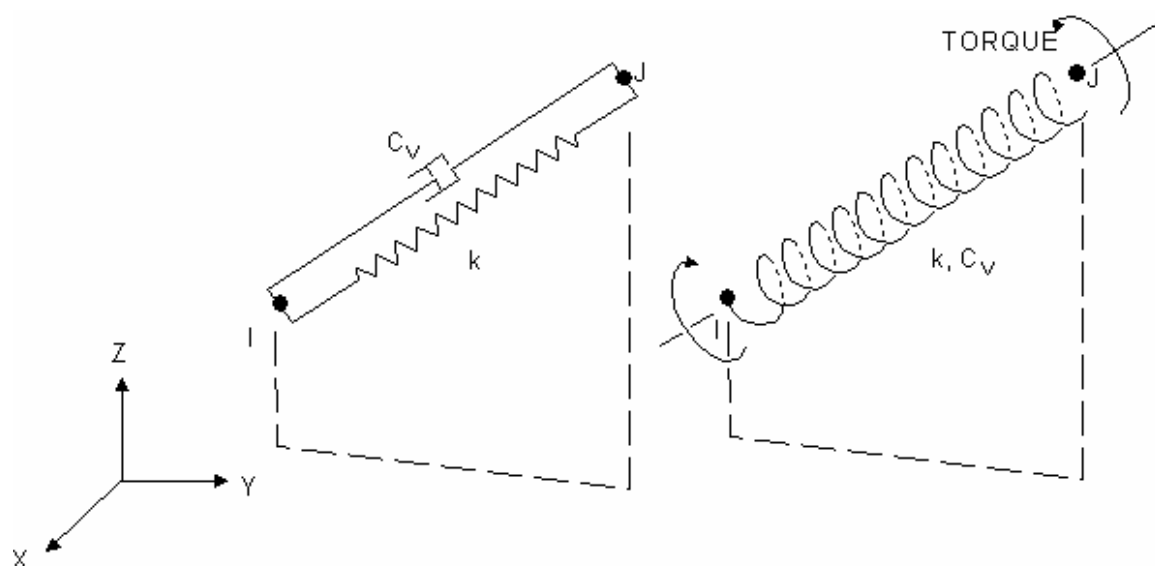


Figura 5.2 – Geometria do elemento COMBIN 14.

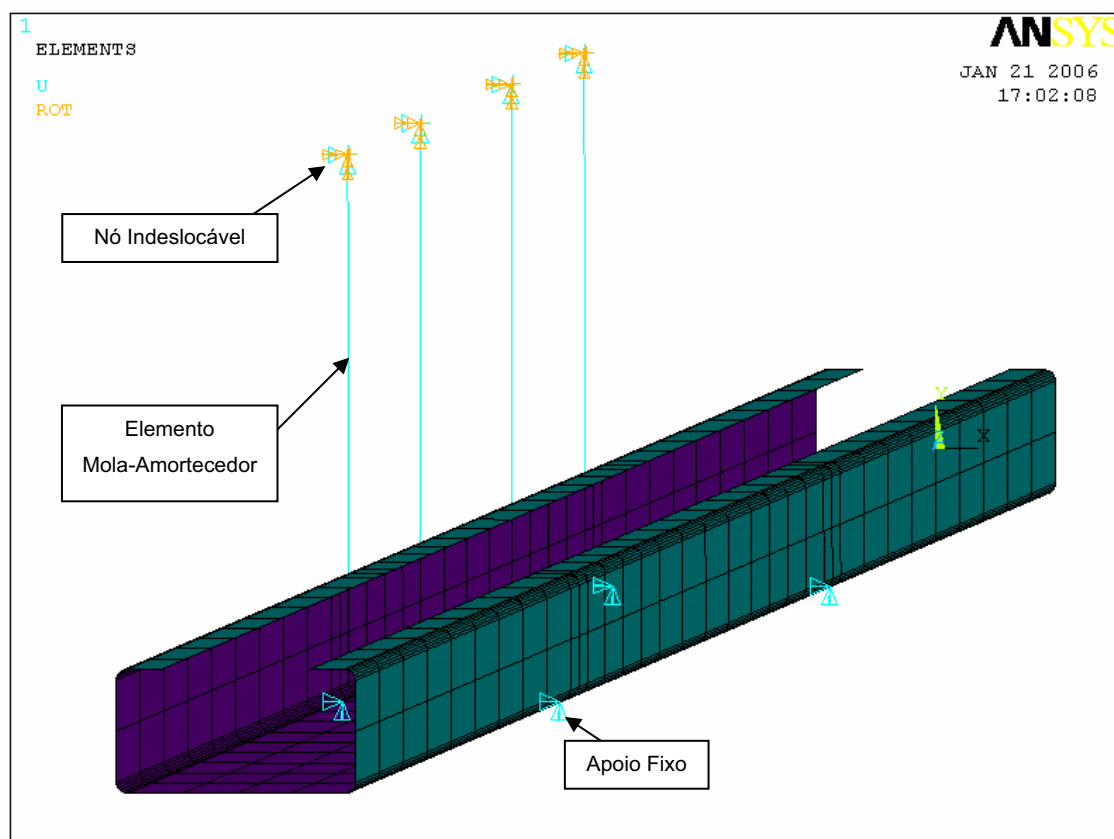
A capacidade longitudinal do elemento é uniaxial de tração-compressão com até três graus de liberdade em cada nó: traduzido no sentido nodal de x, y, e z. Nenhum deslocamento ou torção é considerado.

A capacidade de torção do elemento puramente rotatório com três graus de liberdade em cada nó: traduzido em rotações sobre os eixos nodais x, y, e z. Nenhum deslocamento ou carga axial é considerado.

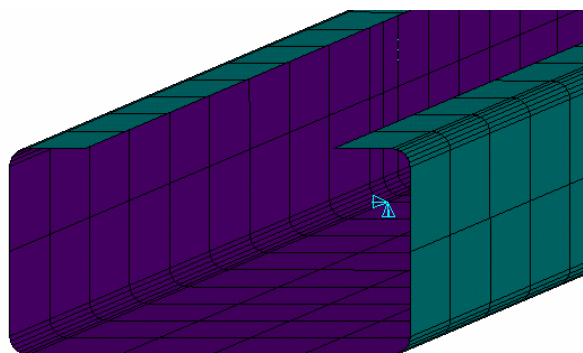
O elemento é definido por dois nós, uma constante da mola (k) e coeficiente de amortecimento (c_v).

5.4. Simulação Numérica do Ensaio de Determinação da Rigidez ao Cisalhamento

A modelagem numérica desenvolvida semelhante aos ensaios realizados no Laboratório de Engenharia Civil, UNESP/FEIS, apresenta-se conforme as Figuras 5.3 e 5.4.

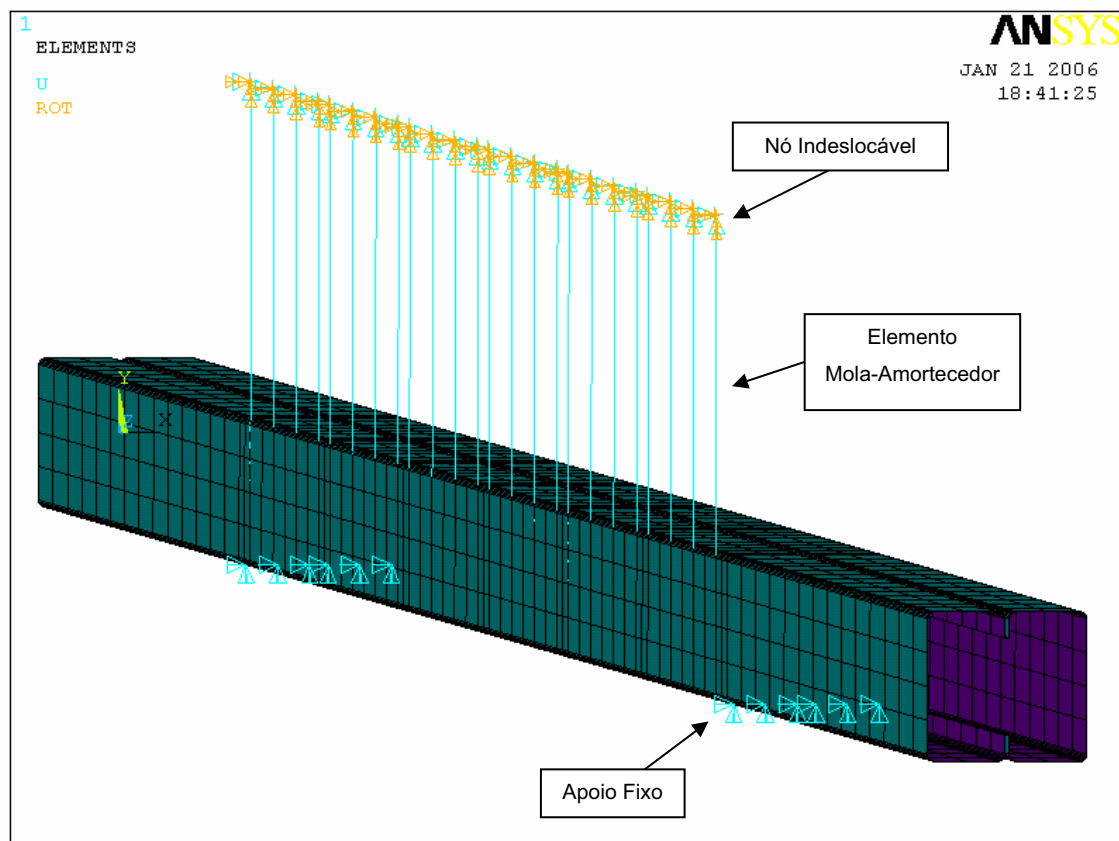


a) Vista superior da simulação numérica: perfil, molas acopladas e apoios.

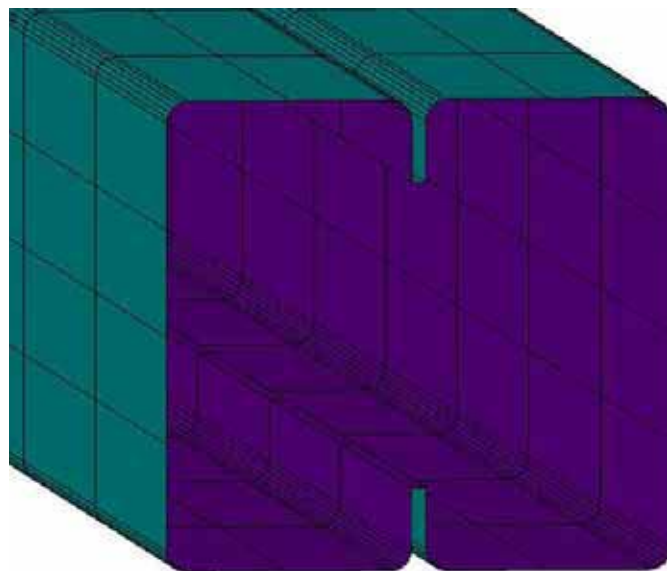


b) Detalhe da discretização no perfil Ue75x40x15x2,25.

Figura 5.3 – Modelo numérico simulado referente a 1ª etapa dos ensaios.



a) Vista superior da simulação numérica: perfil, molas acopladas e apoios.



b) Detalhe da discretização no perfil 2Ue100x40x15x2.25.

Figura 5.4 – Modelo numérico simulado referente a 2ª etapa dos ensaios.

Nesta modelagem foram feitas as seguintes considerações:

- 1ª) A discretização dos perfis Ue e 2Ue, ilustrados nas Figuras 5.3 (b) e 5.4 (b), seguiu de acordo com o Modelo Completo apresentado por Lucas *et al* (1997a), conforme mostrado na Figura 2.10;
- 2ª) A não-linearidade geométrica considerada no modelo utiliza o método de solução incremental/ iterativo de Newton-Raphson;
- 3ª) A aplicação das cargas no balanço do perfil realizou-se conforme o sistema estrutural ensaiado, mostrado na Figura 4.5 (a) e (b), utilizando os mesmos valores da força cortante, V_s^{InEsc} , encontrados na Tabela 3.5;
- 4ª) Aos nós do perfil representando os apoios foram restringidos os deslocamentos verticais e laterais, entretanto as rotações foram liberadas de acordo com as Figuras 5.3(a) e 5.4(a);
- 5ª) Aos nós das molas representando o engaste, conforme a modelagem ilustrada na Figura 1.1, foram restringidas as translações e as rotações, ver Figura 5.3 (a) e 5.4 (a);
- 6ª) Os nós de acoplamento dos perfis as molas, localizados no meio da mesa conforme mostra a Figura 5.3 (a), ou localizados no meio da alma do perfil conforme mostra a Figura 5.4 (a), ambos possuem os mesmo graus de liberdade sem restrição à translação e a rotação;
- 7ª) O módulo de elasticidade do aço foi considerado 205000 MPa e o coeficiente de Poisson igual a 0,30 ;
- 8ª) Para reproduzir o comportamento mais fiel possível dos ensaios, foram inseridos os valores de rigidez cisalhante determinada em cada ensaio, $K_{ry\ ENSAIO}$, valores estes investigados no Capítulo 4: Análise Experimental, e na sequência foram analisadas as respostas destas simulações numéricas (deslocamentos verticais e as tensões normais longitudinais);
- 9ª) Da mesma maneira realizada no capítulo anterior, os valores dos deslocamentos apresentados, nesta seção, estão localizados nas mesmas posições dos medidores de deslocamentos (LVDTs).

As associações das simulações numéricas referentes a 1ª etapa e a 2ª etapa estão mostradas nas Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente.

Tabela 5.1. Associação das simulações numéricas na 1ª etapa.

Tipo de Telha	Espessura (mm)	Ondas Conectadas	Distância entre Perfis (m)	Perfis (Compr. = 3,00m)
Ondulada RT17	0.43	1ª, 5ª, 10ª e 14ª	1.00/ 1.30/ 1.50/ 1.70	Ue 75x40x15x2.25
Trapezoidal RT25	0.43	1ª, 3ª, 4ª e 6ª	1.50/ 1.70/ 1.90/ 2.10	Ue 75x40x15x2.25
Trapezoidal RT35	0.43	1ª, 2ª e 3ª	1.50/ 1.70/ 1.90/ 2.10	Ue 100x40x15x2.25
Trapezoidal RT40	0.43	1ª, 3ª e 5ª	1.50/ 1.70/ 1.90/ 2.10	Ue 100x40x15x2.25
Trapezoidal RT100	0.50	1ª e 2ª	1.70/ 1.90/ 2.10/ 2.30	Ue 127x50x15x2.65

Tabela 5.2. Associação das simulações numéricas na 2ª etapa.

Tipo de Telha	Espessura (mm)	Ondas Conectadas	Distância entre Perfis (m)	Perfis (Compr. = 6,00m)
Ondulada RT17	0.43	1ª, 5ª, 10ª e 14ª	1.00/ 1.30/ 1.50/ 1.70	2Ue 75x40x15x2.25
		1ª, 3ª, 5ª, 7ª, 8ª 10ª, 12ª e 14ª	1.00/ 1.30/ 1.50/ 1.70	2Ue 75x40x15x2.25
Trapezoidal RT25	0.43	1ª, 3ª, 4ª e 6ª	1.50/ 1.70/ 1.90/ 2.10	2Ue 75x40x15x2.25
		todas ondas baixas	1.50/ 1.70/ 1.90/ 2.10	2Ue 75x40x15x2.25
Trapezoidal RT35	0.43	1ª, 2ª e 3ª	1.50/ 1.70/ 1.90/ 2.10	2Ue 100x40x15x2.25
Trapezoidal RT40	0.43	1ª, 3ª e 5ª	1.50/ 1.70/ 1.90/ 2.10	2Ue 100x40x15x2.25
		todas ondas baixas	1.50/ 1.70/ 1.90/ 2.10	2Ue 100x40x15x2.25
Trapezoidal RT100	0.50	1ª e 2ª	1.75/ 1.95/ 2.15/ 2.30	2Ue 127x50x15x2.65

Os deslocamentos máximos e as tensões normais longitudinais, ambos localizados no meio do vão do perfil Ue75x40x15x2.25, estão apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.4, respectivamente.

Tabela 5.3. Deslocamentos máximos no meio do vão do perfil Ue75x40x15x2.25.

Tipo de Telha	Ondas Conectadas	Vão (m)	Kry _{ENSAIO} (kN/rad)	Deslocamentos Máximos (mm)		
				Δ_{01}	Δ_{02}	Δ_{03}
RT17	1 ^a , 5 ^a , 10 ^a e 14 ^a	1,00	439,80	3,536	1,574	1,984
		1,30	550,97	3,532	1,574	1,978
		1,50	672,10	3,527	1,574	1,968
		1,70	682,80	3,526	1,573	1,967
RT25	1 ^a , 3 ^a , 4 ^a e 6 ^a	1,50	348,42	3,945	1,648	2,501
		1,70	425,86	3,938	1,647	2,487
		1,90	660,73	2,964	1,397	1,491
		2,10	489,11	2,976	1,401	1,497

Tabela 5.4. Tensões normais longitudinais no meio do vão do perfil Ue75x40x15x2.25.

Tipo de Telha	Ondas Conectadas	Vão (m)	Kry _{ENSAIO} (kN/rad)	Tensões Normais (kN/cm ²)	
				Mesa Conectada	Mesa Livre
RT17	1 ^a , 5 ^a , 10 ^a e 14 ^a	1,00	439,80	2,884	-6,345
		1,30	550,97	2,905	-6,345
		1,50	672,10	2,940	-6,346
		1,70	682,80	2,938	-6,344
RT25	1 ^a , 3 ^a , 4 ^a e 6 ^a	1,50	348,42	5,068	-7,897
		1,70	425,86	5,132	-7,903
		1,90	660,73	1,456	-5,156
		2,10	489,11	1,590	-5,214

Os deslocamentos máximos e as tensões normais longitudinais, ambos localizados no meio do vão do perfil Ue100x40x15x2.25, estão apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6, respectivamente.

Tabela 5.5. Deslocamentos máximos no meio do vão do perfil Ue100x40x15x2.25.

Tipo de Telha	Ondas Conectadas	Vão (m)	Kry _{ENSAIO} (kN/rad)	Deslocamentos Máximos (mm)		
				Δ_{01}	Δ_{02}	Δ_{03}
RT35	1ª, 2ª e 3ª	1,50	329,45	4,390	4,110	4,174
		1,70	496,76	4,371	4,064	4,151
		1,90	452,09	4,376	4,073	4,156
		2,10	659,63	4,363	4,040	4,139
RT40	1ª, 3ª e 5ª	1,50	232,89	4,294	4,267	4,260
		1,70	352,46	4,270	4,245	4,249
		1,90	435,36	4,249	4,249	4,237
		2,10	181,09	4,351	4,284	4,332

Tabela 5.6. Tensões normais longitudinais no meio do vão do perfil Ue100x40x15x2.25.

Tipo de Telha	Ondas Conectadas	Vão (m)	Kry _{ENSAIO} (kN/rad)	Tensões Normais (kN/cm ²)	
				Mesa Conectada	Mesa Livre
RT35	1ª, 2ª e 3ª	1,50	329,45	3,423	-6,688
		1,70	496,76	3,640	-6,714
		1,90	452,09	3,596	-6,709
		2,10	659,63	3,748	-6,727
RT40	1ª, 3ª e 5ª	1,50	232,89	7,667	-8,264
		1,70	352,46	8,066	-8,345
		1,90	435,36	8,362	-8,403
		2,10	181,09	6,803	-8,095

Os deslocamentos máximos e as tensões normais longitudinais, ambos localizados no meio do vão do perfil Ue127x50x15x2.65, estão apresentados nas Tabelas 5.7 e 5.8, respectivamente.

Tabela 5.7. Deslocamentos máximos no meio do vão do perfil Ue127x50x15x2.65.

Tipo de Telha	Ondas Conectadas	Vão (m)	Kry _{ENSAIO} (kN/rad)	Deslocamentos Máximos (mm)		
				Δ_{01}	Δ_{02}	Δ_{03}
RT100	1ª e 2ª	1,70	610,65	4,047	4,047	4,046
		1,90	557,93	4,047	4,047	4,048
		2,10	704,07	4,041	4,041	4,043
		2,30	617,46	4,048	4,048	4,045

Tabela 5.8. Tensões normais longitudinais no meio do vão do perfil Ue127x50x15x2.65.

Tipo de Telha	Ondas Conectadas	Vão (m)	Kry _{ENSAIO} (kN/rad)	Tensões Normais (kN/cm ²)	
				Mesa Conectada	Mesa Livre
RT100	1ª e 2ª	1,70	610,65	-5,428	-5,420
		1,90	557,93	-5,428	-5,420
		2,10	704,07	-5,433	-5,419
		2,30	617,46	-5,374	-5,404

Os deslocamentos máximos e as tensões normais longitudinais, ambos localizados no meio do vão do perfil 2Ue75x40x15x2.25, estão apresentados nas Tabelas 5.9 e 5.10, respectivamente.

Tabela 5.9. Deslocamentos máximos no meio do vão do perfil 2Ue75x40x15x2.25.

Tipo de Telha	Ondas Conectadas	Vão (m)	Kry _{ENSAIO} (kN/rad)	Deslocamentos Máximos (mm)	
				$\Delta_{01} = \Delta_{02}$	$\Delta_{03} = \Delta_{04}$
RT17	1ª, 5ª, 10ª e 14ª	1,00	781,84	13,600	13,600
		1,30	1067,24	11,250	11,250
		1,50	1290,98	9,945	9,946
		1,70	1094,30	11,070	11,070
RT17	1ª, 3ª, 5ª, 7ª, 8ª 10ª, 12ª e 14ª	1,00	1613,46	6,421	6,421
		1,30	3463,82	4,004	4,005
		1,50	3620,50	3,902	3,903
		1,70	3660,81	3,882	3,883
RT25	1ª, 3ª, 4ª e 6ª	1,50	984,90	14,350	14,350
		1,70	973,91	14,430	14,440
		1,90	998,66	14,250	14,250
		2,10	1194,23	12,930	12,930
RT25	todas ondas baixas	1,50	2481,18	7,043	7,043
		1,70	2239,10	7,467	7,467
		1,90	2197,20	7,548	7,549
		2,10	2779,20	6,608	6,608

Tabela 5.10. Tensões normais máximas longitudinais no meio do vão do perfil 2Ue75x40x15x2.25.

Tipo de Telha	Ondas Conectadas	Vão (m)	Kry _{ENSAIO} (kN/rad)	Tensões Normais (kN/cm ²)	
				Mesa Superior	Mesa Inferior
RT17	1 ^a , 5 ^a , 10 ^a e 14 ^a	1,00	781,84	5,250	-5,250
		1,30	1067,24	3,546	-3,546
		1,50	1290,98	2,614	-2,614
		1,70	1094,30	3,418	-3,411
RT17	1 ^a , 3 ^a , 5 ^a , 7 ^a , 8 ^a , 10 ^a , 12 ^a e 14 ^a	1,00	1613,46	-1,024	1,034
		1,30	3463,82	-1,516	1,538
		1,50	3620,50	-1,504	1,526
		1,70	3660,81	-1,500	1,523
RT25	1 ^a , 3 ^a , 4 ^a e 6 ^a	1,50	984,90	5,225	-5,212
		1,70	973,91	5,284	-5,271
		1,90	998,66	5,151	-5,139
		2,10	1194,23	4,231	-4,226
RT25	todas ondas baixas	1,50	2481,18	-0,750	0,752
		1,70	2239,10	-0,525	0,537
		1,90	2197,20	-0,480	0,492
		2,10	2779,20	-0,959	0,972

Os deslocamentos máximos e as tensões normais longitudinais, ambos localizados no meio do vão do perfil 2Ue100x40x15x2.25, estão apresentados nas Tabelas 5.11 e 5.12, respectivamente.

Tabela 5.11. Deslocamentos máximos no meio do vão do perfil 2Ue100x40x15x2.25.

Tipo de Telha	Ondas Conectadas	Vão (m)	Kry _{ENSAIO} (kN/rad)	Deslocamentos Máximos (mm)	
				$\Delta_{01} = \Delta_{02}$	$\Delta_{03} = \Delta_{04}$
RT35	1ª, 2ª e 3ª	1,50	747,34	17,290	17,300
		1,70	958,96	16,120	16,130
		1,90	1437,77	15,360	15,370
		2,10	592,14	18,270	18,280
RT40	1ª, 3ª e 5ª	1,50	685,30	17,760	17,770
		1,70	619,65	18,170	18,190
		1,90	734,24	17,460	17,480
		2,10	816,92	16,990	17,000
RT40	todas ondas baixas	1,50	2065,97	11,970	11,970
		1,70	2481,29	9,855	9,858
		1,90	1837,22	12,650	12,660
		2,10	3078,26	9,645	9,648

Tabela 5.12. Tensões normais máximas longitudinais no meio do vão do perfil 2Ue100x40x15x2.25.

Tipo de Telha	Ondas Conectadas	Vão (m)	Kry _{ENSAIO} (kN/rad)	Tensões Normais (kN/cm ²)	
				Mesa Superior	Mesa Inferior
RT35	1ª, 2ª e 3ª	1,50	747,34	12,010	-12,010
		1,70	958,96	10,790	-10,850
		1,90	1437,77	10,010	-10,060
		2,10	592,14	13,020	-13,100
RT40	1ª, 3ª e 5ª	1,50	685,30	13,080	-13,150
		1,70	619,65	13,460	-13,540
		1,90	734,24	12,800	-12,870
		2,10	816,92	12,360	-12,420
RT40	todas ondas baixas	1,50	2065,97	7,661	-7,685
		1,70	2481,29	5,690	-5,709
		1,90	1837,22	8,301	-8,328
		2,10	3078,26	5,494	-5,513

Os deslocamentos máximos e as tensões normais longitudinais, ambos localizados no meio do vão do perfil 2Ue127x50x15x2.65, estão apresentados nas Tabelas 5.13 e 5.14, respectivamente.

Tabela 5.13. Deslocamentos máximos no meio do vão do perfil 2Ue127x50x15x2.65.

Tipo de Telha	Ondas Conectadas	Vão (m)	Kry _{ENSAIO} (kN/rad)	Deslocamentos Máximos (mm)	
				$\Delta_{01} = \Delta_{02}$	$\Delta_{03} = \Delta_{04}$
RT100	1ª e 2ª	1,75	1272,48	14,560	14,580
		1,95	1265,70	14,570	14,590
		2,15	1428,75	14,210	14,230
		2,30	1221,79	14,680	14,690

Tabela 5.14. Tensões normais máximas longitudinais no meio do vão do perfil 2Ue127x50x15x2.65.

Tipo de Telha	Ondas Conectadas	Vão (m)	Kry _{ENSAIO} (kN/rad)	Tensões Normais (kN/cm ²)	
				Mesa Superior	Mesa Inferior
RT100	1ª e 2ª	1,75	1272,48	13,900	-14,000
		1,95	1265,70	13,920	-14,020
		2,15	1428,75	13,490	-13,580
		2,30	1221,79	14,040	-14,140

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam as formas fletidas das barras simuladas nos modelos pertencentes a 1ª e 2ª etapa, respectivamente.

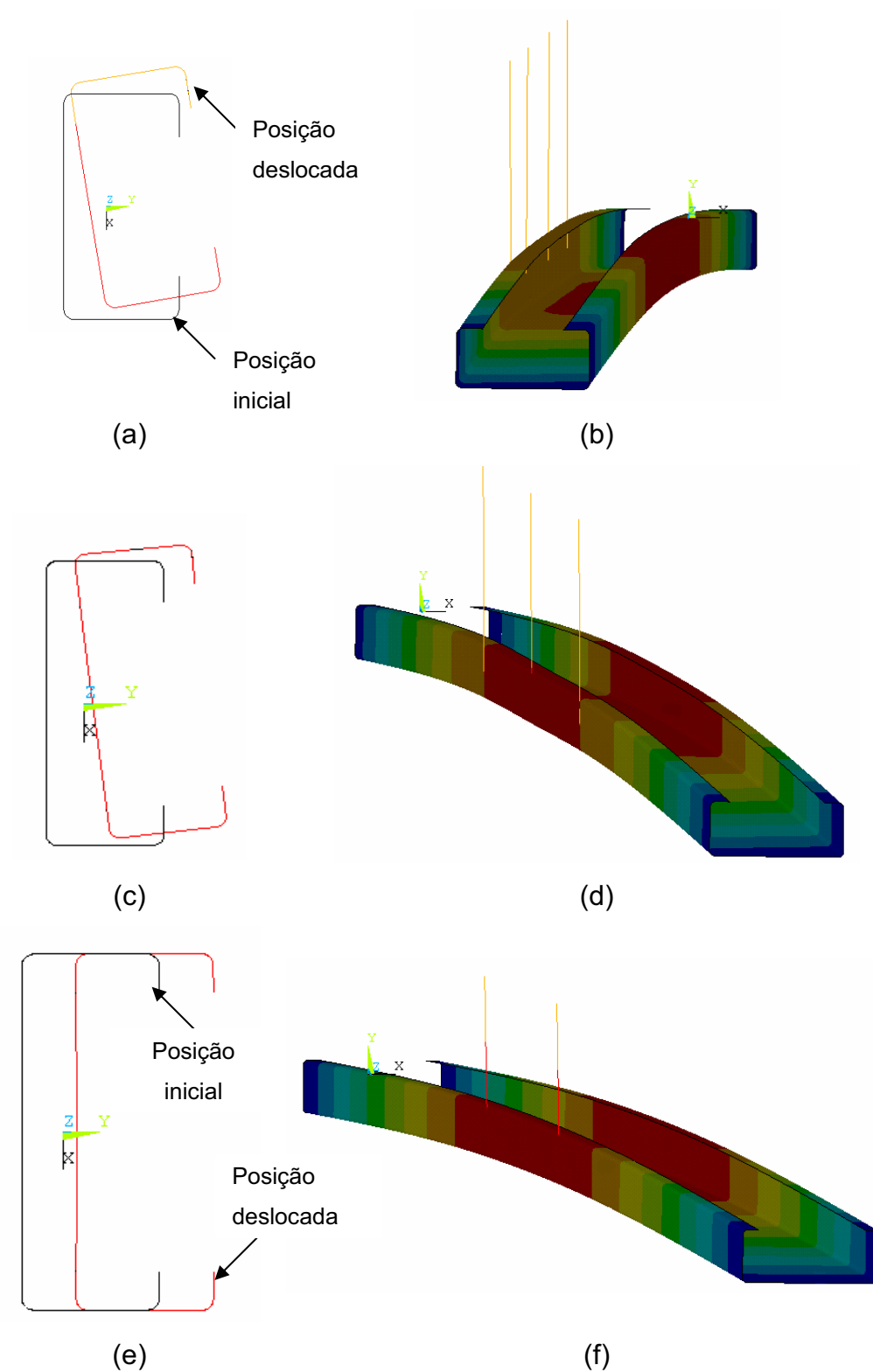


Figura 5.5 – Formas fletidas dos perfis acoplados as molas, localizados no meio do vão interno: (a) Ue75x40x15x2.25, (c) Ue100x40x15x2.25, (e) Ue127x50x15x2.65

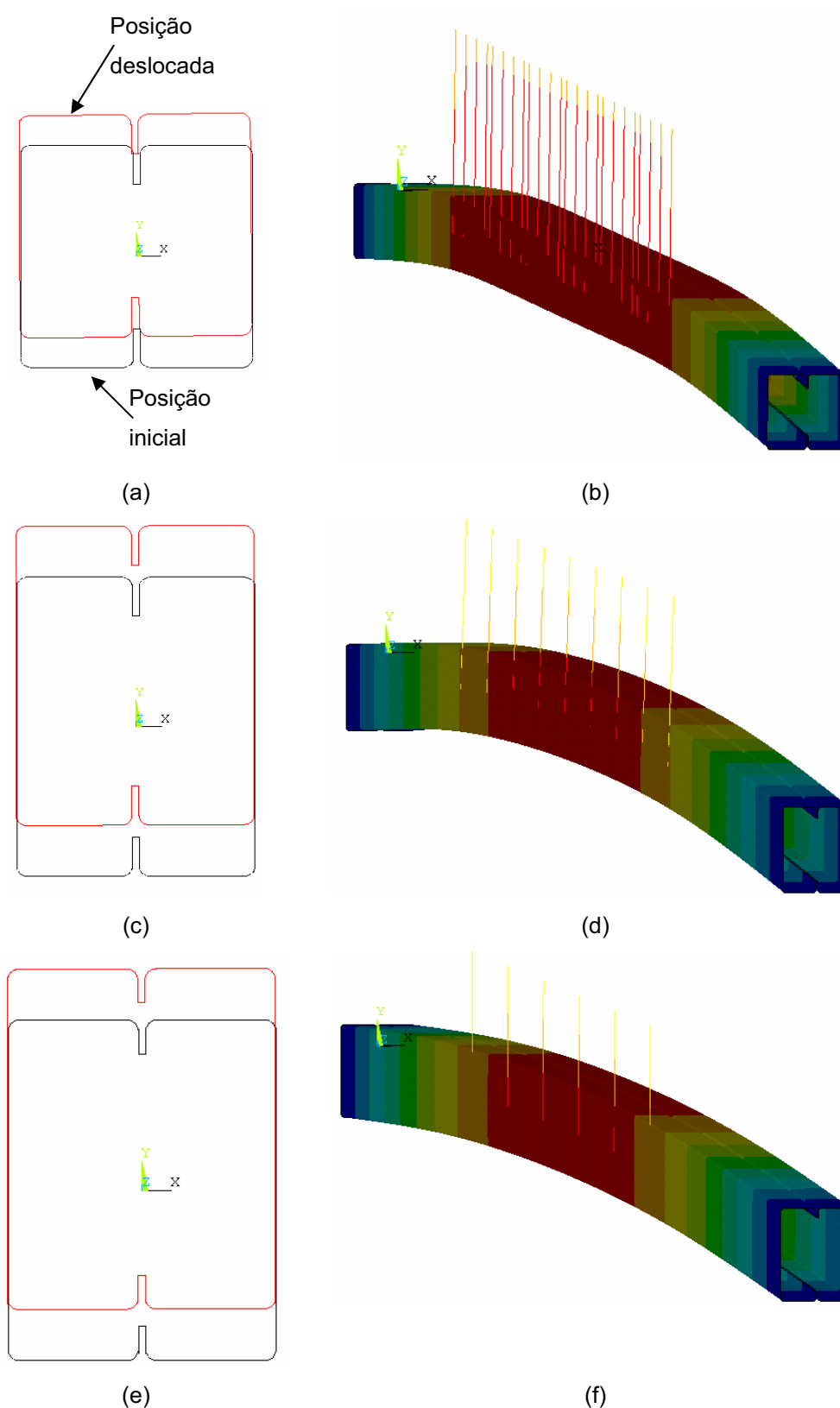


Figura 5.6 – Formas fletidas dos perfis acoplados as molas, localizados no meio do vão interno: (a) 2Ue75x40x15x2.25, (c) 2Ue100x40x15x2.25, (e) 2Ue127x50x15x2.65

5.5. Discussão dos Resultados

5.5.1 Análise dos Deslocamentos

Nesta seção foram comparados os deslocamentos apresentados no Capítulo 4: Análise Experimental (Tabelas 4.6 e 4.7) e os obtidos por meio da análise numérica (Tabelas 5.3, 5.5, 5.7, 5.9, 5.11 e 5.13), em relação aos deslocamentos máximos teóricos da Tabela 3.7. Esta comparação, expressa em porcentagem, busca analisar a redução imposta aos perfis.

Tabela 5.15. Resumo da redução ao deslocamento em relação aos valores máximos teóricos.

Perfil	Telha	Ondas Baixas Conectadas	Redução (%)	
			Ensaio	Numérico
Ue75x40x15x2.25	RT17	4	48	64
	RT25		44	65
Ue100x40x15x2.25	RT35	3	23	17
	RT40		22	14
Ue127x50x15x2.65	RT100	2	8	4
2Ue75x40x15x2.25	RT17	4	56	59
		8	83	84
	RT25	4	58	50
		6	79	74
2Ue100x40x15x2.25	RT35	3	21	20
	RT40	3	23	16
		5	57	47
2Ue127x50x15x2.65	RT100	2	12	12

Apesar da utilização do coeficiente de rigidez Kry_{ENSAIO} na simulação numérica com os perfis Ue, estes apresentaram certa discordância com relação aos deslocamentos medidos nos ensaios. Esta discordância é justificada pela diferença da rigidez imposta ao perfil localizada mesa livre (Kry_{01}), na mesa conectada (Kry_{02}) e no meio da alma (Kry_{03}).

Além disso, deve-se observar que com a maior participação das telhas conectadas nos dois modelos analisados (experimental e numérico), obtiveram-se reduções muito próximas.

5.5.2 Análise das Tensões

- Analisando as tensões apresentadas nas Tabelas 5.4, 5.6 e 5.8, constatou-se o seguinte:

1º) As tensões geradas nos perfis Ue apresentaram valores abaixo das tensões calculadas por meio do método teórico, no qual foi realizada a verificação da flambagem local dos elementos comprimidos, conforme os resultados da Tabela 3.3;

2º) A forma fletida dos perfis, localizada no meio do vão, está em concordância com o modo de flambagem por distorção da seção transversal;

3º) O comportamento do perfil Ue127x50x15x2.65 impôs aos seus elementos internos a distribuição clássica de tensões numa barra fletida, entretanto constata-se o decréscimo desta distribuição, ocasionado pelo efeito amortecedor.

- Comparando as tensões apresentadas na Tabela 5.10, 5.12 e 5.14 com os resultados da Tabela 3.3, constatou-se o seguinte:

1º) Da mesma maneira, as tensões geradas nos perfis 2Ue apresentaram valores abaixo das tensões calculadas por meio do método teórico, na qual foi realizada a verificação da flambagem local dos elementos comprimidos;

2º) A Tabela 5.16 apresenta a redução de tensões obtidas nos elementos internos componentes dos perfis. Esta redução, expressa em porcentagem, é a comparação entre as tensões médias da análise numérica em relação às tensões teóricas de flambagem.

Tabela 5.16. Resumo da redução da tensão de flambagem em relação aos valores máximos teóricos.

Perfil	Telha	Ondas Baixas Conectadas	Redução (%)
Ue75x40x15x2.25	RT17	4	55
	RT25		53
Ue100x40x15x2.25	RT35	3	52
	RT40		41
Ue127x50x15x2.65	RT100	2	62
2Ue75x40x15x2.25	RT17	4	75
		8	90
	RT25	4	66
		6	95
2Ue100x40x15x2.25	RT35	3	15
	RT40	3	4
		5	50
2Ue127x50x15x2.65	RT100	2	4

6. CONCLUSÃO

O modelo proposto analisado neste trabalho, tanto na modelagem experimental como numérica, foi configurado utilizando-se molas para simular a rigidez do painel, tendo como pioneiro, nos estudos dos modos de instabilidade, o trabalho de Lucas *et ali* (1997a). Entretanto as conexões localizadas nas ondas baixas e a adoção de parafusos autoperfurantes para efetuar estas conexões entre a telha e a terça, realizados neste trabalho, forneceram satisfatórias avaliações teórico-experimentais.

As discordâncias relatadas referentes aos deslocamentos registrados na análise numérica, devem-se ao fato da diferença de rigidez imposta ao perfil Ue (localizada na mesa conectada, na alma e na mesa livre) e a utilização de apenas 1 painel de telha conectada ao perfil. Isto é comprovado, pelos bons resultados apresentados na associação com o painel formado por 3 telhas conectadas aos perfis 2Ue, comparativamente aos resultados da análise experimental como os da análise numérica.

Em termos de análise de tensões geradas, devido à fixação dos parafusos autoperfurantes, localizados no meio da mesa do perfil, constatou-se a obtenção de baixas tensões de compressão e de tração, fato também observado por Ye *et ali* (2004), que estudou o comportamento de terças Z parcialmente restritas pelas telhas.

De acordo com o procedimento da NBR 14762:2001, na determinação das tensões de flambagem nos elementos comprimidos, as tensões obtidas encontram-se abaixo dos limites recomendados (comparações também realizadas na Tabela 5.16), entretanto a perda da capacidade resistente do perfil Ue encontra-se próxima ao limite das tensões de flambagem por distorção da seção transversal. Basaglia *et ali* (2004) relata também este modo de flambagem, à medida que se eleva a relação largura/espessura dos elementos que constituem o perfil.

Na tentativa de determinar os valores da rigidez ao cisalhamento Kry para o sistema telha-terça e tornar hábil a redução da seção transversal da terça, pode-se constatar o seguinte:

- A associação realizada com o perfil 2Ue75x40x15x2.25 e a telha RT17, com 8 ondas baixas conectadas, comprovou fornecer maior rigidez cisalhante e maior redução aos deslocamentos verticais ao longo das distâncias analisadas. Apresentando-se desta maneira como a solução mais econômica diante das demais associações, tomando-se para isso como referência a distância entre perfis de 1,50 e 1,70 m;

- O conjunto formado entre o perfil 2Ue75x40x15x2.25 confeccionado com as telhas RT17 e RT25, com 4 ondas baixas conectadas, e o perfil 2Ue100x40x15x2.25 confeccionado com as telhas RT35 e RT40, com 3 ondas baixas conectadas em cada telha, constata novamente a maior eficiência fornecida pelo perfil 2Ue75 confeccionado com a telha RT17, tomando-se a mesma distância entre perfis de 1,50 e 1,70 m, vista anteriormente;

- A associação formada pelos perfis 2Ue75x40x15x2.25 e 2Ue100x40x15x2.25 confeccionados com as telhas RT25 e RT40 com 6 e 5 ondas baixas conectadas, respectivamente, ambas apresentam rigidez cisalhante equivalente, entretanto a restrição ao deslocamento vertical relatado no perfil 2Ue75 foi na média 20% superior ao deslocamento registrado no perfil 2Ue100. Permite-se tomar, desta maneira, como decisão econômica de projeto a utilização do perfil 2Ue75 com a telha RT25, ao invés do perfil 2Ue100 com a telha RT40.

- Os resultados fornecidos pelas associações realizadas com o perfil 2Ue127x50x15x2.65 e a telha RT100, tanto a rigidez cisalhante observada, como a redução imposta ao deslocamento vertical, apresentaram-se pouco significativos diante do desempenho fornecido pelo perfil 2Ue75 e 2Ue100, confeccionados com as telhas RT25 e RT40, com 6 e 5 ondas baixas conectadas, respectivamente.

Diante dos resultados obtidos concluímos que o presente trabalho comprova o efeito da restrição representado pela mola de translação, análise efetuada no Capítulo 5: Análise Numérica, e também o aumento na capacidade resistente do perfil, inclusive a eficiência dos parafusos autoperfurantes nas conexões entre a telha e a terça, tornando-as mais rígidas.

7. PROPOSTA PARA FUTUROS TRABALHOS

Como proposta de continuidade desta pesquisa, objetivando aprofundar a viabilidade da utilização do conceito de molas de translação, e até mesmo de rotação, outros estudos devem ser realizados para avaliar a interação telha-terça, em especial as terças de coberturas, sugerindo-se:

- realizar ensaios de flexão em terças simplesmente apoiadas com comprimento de 5 metros (de uso comercial), conectadas ao painel formado por 5 telhas utilizando-se parafusos autoperfurantes. A aplicação de carga deve ser realizada no meio do vão, ou, se possível, aplicar uma carga distribuída ao longo da linha dos parafusos autoperfurantes, simulando o efeito do vento atuante na estrutura (cargas de sobrepressão e de sucção);

- analisar numericamente o procedimento descrito acima, utilizando molas para simular o efeito amortecedor das telhas conectadas;

- realizar modelagens numéricas das telhas conectadas por meio de ligações que simulem os parafusos autoperfurantes, observando as tensões normais de compressão e tração, bem como, as zonas de colapso e a formação das linhas de plastificação desenvolvidas nas telhas.

- refazer os ensaios realizados neste trabalho utilizando tanto nos perfis como nas telhas aços estruturais. Além disso, recomenda-se a utilização de perfis U_e e $2U_e$ em elementos esbeltos;

- confrontar mais detalhadamente os resultados obtidos com os oriundos de prescrições de normas (Eurocode 3, AISI, e outras).

8. BIBLIOGRAFIA

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, (1996). Specification for the design of cold-formed steel structural members. AISI, Washington, DC, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, (1997). Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ASTM A370-97, Philadelphia, USA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (2001). NBR-14762 - Dimensionamento de estruturas de aço construídas por perfis formados a frio – Procedimento. Rio de Janeiro.

Baságli, C. D.; Malite, M. e Gonçalves, R. M. Análise Não-Linear do Comportamento Estrutural de Terças de Aço Associadas às Telhas. In: Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, 31, Mendoza, Argentina, p.1-20.

Bellei, I.H. (2000). Edifícios Industriais em Aço. Pini, S.P., Brasil.

Bryan, E.R. and El-Dakhkhni, W.M. (1968). Shear flexibility and strength of corrugated decks. Journal of the Structural Division. ASCE, 9411, p. 2549-2580.

Chung, K. F. e Lawson, R. M. (1999). Structural Performance of shear resisting connections between cold-formed steel sections using web cleats of cold-formed steel strip. Engineering Structures, v. 22, p. 1350-1366.

Chung, K. F. e Quinton, D. (1996). Structural Performance of Modern Roofs with Thick Over-purlins Insulation-Experimental Investigation. Journal of Constructional Steel Research, n. 1, v. 40, p. 17-38.

Davies, J.M. (1976). Calculation of steel diaphragm behaviour. Journal of the Structural Division, ASCE, 1027, 1411-1430.

Davies, J. M. (2000). Recent research advances in cold-formed steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 55, p. 267-288.

Dubina, D.; Goina, D.; Georgescu, M.; Ungureanu, V.; e Zaharia, R. (1998). Recent Research on Stability analysis of Thin-walled Cold-formed Steel Members. *Journal of Constructional Steel Research*, n. 1-3, v. 46, p. 172-173.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, (1996). ENV 1993-1-3: Eurocode 3 – Design of steel structures. Part 1.3: General rules Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting. Brussels.

Hancock, G.J., Celeban, M., Healy, C., Georgiou, P.N. and Ings, N.L. (1990). Tests of purlins with screw fastened sheeting under wind uplift. *Proc. Tenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. University of Missouri - Rolla, St. Louis, MO, pp. 393-419.

Hancock, G.J., Celeban, M., Healy, C. (1992). Tests of continuous under downwards loading. *Proc. Eleventh International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. University of Missouri - Rolla, St. Louis, MO, pp. 157-179.

Ings, N.L. and Trahair, N.S. (1994). Lateral buckling of restrained roof purlins. *Thin-Walled Structures*, 2, 285-306.

Javaroni, C. E. (1999). Perfis de aço formados a frio submetido à flexão: análise teórica-experimental. 258p. Tese Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Jiang, C.; Davies, J. M. (1997). Design of Thin-Walled Purlins for Distortional Buckling. *Thin-Walled Structures*, n. 1-4, v. 29, p. 189-202.

Laponi, J.C., Estatística Usando Excel (2000). Lapponi Treinamento e Editora, São Paulo.

Lucas, R. M.; Al-Bermani, F. G. A. e Kitipornchai S. (1997a). Modelling of Cold-Formed Purlins-Sheeting Systems Part 1. Full Model. *Thin-Walled Structures*, n. 3, v. 27, p. 223-243.

Lucas, R. M.; Al-Bermani, F. G. A. e Kitipornchai S. (1997b). Modelling of Cold-Formed Purlins-Sheeting Systems Part 2. Simplified Model. *Thin-Walled Structures*, n. 4, v. 27, p. 263-286.

Mäkeläinen P. e Sun Y. (1999). The longitudinal shear behaviour of a new steel sheeting profile for composite floor slabs. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 49, p. 117-128.

Peköz, T.; Soroushian D. (1982), Behavior of C and Z purlins under wind uplift. In: *International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. St Louis, Missouri, USA. p. 409 – 429.

Rousch, C. J.; Hancock, G J. (1994). A non-linear analysis model for simply-supported and continuous purlins. Research Report R688. School of Civil and Mining Engineering. The University of Sydney.

Rousch, C. J.; Hancock, G J. (1995). Tests of channel and Z-section purlins undergoing non-linear twisting. Research Report R708. School of Civil and Mining Engineering. The University of Sydney.

Pincus, G. (1963). The performance of columns and beams continuously braced with diaphragms. Ph.D. thesis, Cornell University.

Serrette, R. e Peköz, T. (1997). Bending Strength of Standing Seam Roof Panels. *Thin-Walled Structures*, n. 1, v. 27, p. 55-64.

Sokol, L. (1996). Lateral stabilization by Steel Sheeting of Structural Members. *Thin-Walled Structures*, n. 3, v. 25, p. 207-217.

Tomà, T. e Wittemann, K. (1994). Design of Cold-Formed Purlins and Rails Restrained by Sheeting. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 31, p. 149-168.

Trahair, N. S. (1996). Laterally unsupported beams. *Engineering Structures*, n.10, v. 18, p. 759-768.

Trahair, N.S. (2000). *Flexural-Torsional Buckling of Structures*, CRC Press Inc., N.W., USA.

Wright, H. D. e Hossain, K. M. A. (1997). In-Plane Shear Behaviour of Profiled Steel Sheeting. *Thin-Walled Structures*, n. 1-4, v. 29, p. 79-100.

Ye, Z.-m.; Kettle, R. e Li L.-y. (2004). Analysis of Cold-Formed Zed-Purlins Partially Restrained by Steel Shetting. *Computers and Structures*, v. 82, p.731-739.

York C.B. e Pedreschi R. (2000). The influence of geometry on the strength of shear wall panels in light steel construction. *Construction and Building Materials*, v. 14, p. 277-285.

ANEXO A

Ensaio de Determinação da Rigidez ao Cisalhamento.



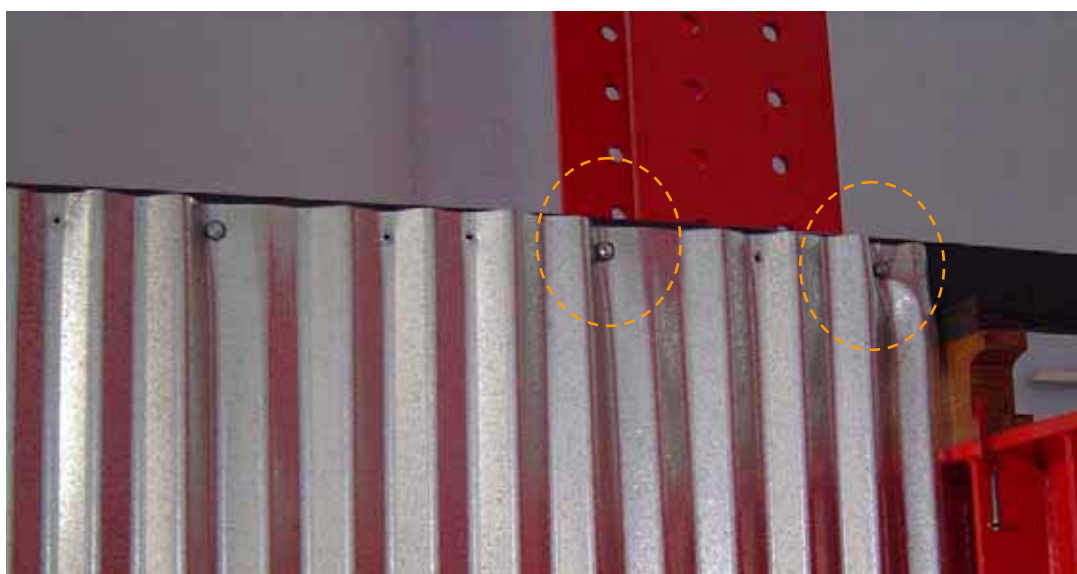
(a)



(b)

Figura A.1 – Formação de ondas e semi-ondas no painel da telha RT17:

(a) Vista frontal; (b) Vista lateral.



(a)



(b)

Figura A.2 – Zonas de colapso no painel da telha RT17 localizadas próximo aos apoios superiores: (a) à esquerda (b) à direita.



(a)



(b)

Figura A.3 – Formação de zonas de colapso no painel da telha RT25:
(a) Vista frontal; (b) Detalhe das linhas de plastificação.



(a)



(b)

Figura A.4 – Colapso por esmagamento e rasgamento das chapas localizadas à esquerda do apoio: (a) superior; (b) inferior.



(a)



(b)

Figura A.5 – Formação de zonas de colapso no painel da telha RT35:
(a) Vista frontal; (b) Detalhe das linhas de plastificação.

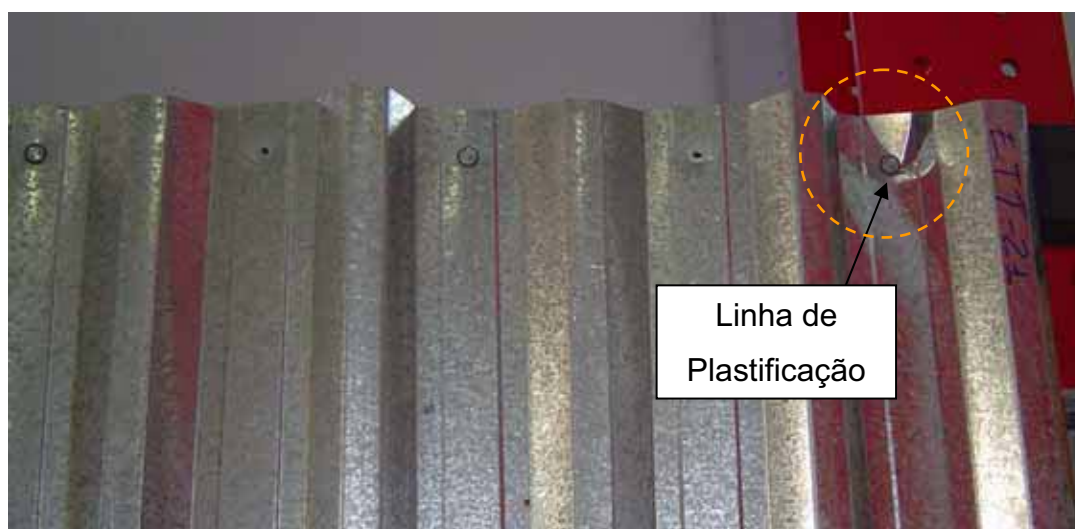


Figura A.6 – Detalhe da zona de colapso no painel da telha RT40, localizado à esquerda do apoio superior.



(a)



(b)

Figura A.7 – Forma fletida do ensaio no painel da telha RT100:
(a) Vista frontal; (b) Detalhe à direita do apoio inferior.