

unesp 

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Civil

*“ESTUDO DO COMPORTAMENTO
ESTRUTURAL DO SISTEMA TELHA-TERÇA”*

ENGº AURÉLIO DE LIMA E SILVA

1210001442



Ilha Solteira - SP

unesp 

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 12 13 14 15 16 17 18 19

ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO SISTEMA TELHA-TERÇA

AURÉLIO DE LIMA E SILVA

Proc. 063/04-NPD 18

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA" SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA 18.03.04	DATA DE TOMBO 31.03.04
REGISTRADO POR Ailza	TOMBO Te. 1442
AQUISIÇÃO leocá autor R\$ 10,00	CLASSIFICAÇÃO S 586 e

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista (Unesp), como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Concentração Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Renato Bertolino Junior

30102006

60
Lp 216 492
Lp 56185



Ilha Solteira
Junho de 2003



FICHA CATALOGRÁFICA

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

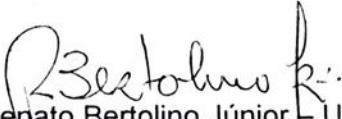
Silva, Aurélio de Lima e S586c	Estudo do comportamento estrutural do sistema telha-terça / Aurélio de Lima e Silva . – Ilha Solteira : [s.n.], 2003 x, 69 p. : il.		
	Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de concentração: Estruturas, 2003.		
	Orientador: Renato Bertolino Junior Bibliografia: p. 67-69		
	1. Estruturas metálicas. 2. Telha-Terça.		


ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO SISTEMA TELHA-TERÇA

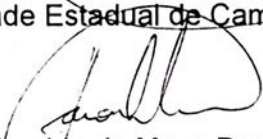
Aurélio de Lima e Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DO
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

COMISSÃO EXAMINADORA:


Prof. Dr. Renato Bertolino Júnior – UNESP/Ilha Solteira
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia - UNESP – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA


Prof. Dr. João Alberto Venegas Requena – UNICAMP
Professor Assistente Doutor do Departamento de Estruturas
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP


Prof. Dr. Haroldo de Mayo Bernardes – UNESP/Ilha Solteira
Professor Assistente Doutor do Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia - UNESP - CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

Ilha Solteira/SP, junho de 2003.



À vós Deus por todas as bênçãos que derramai constantemente sobre a minha vida

Agradecimentos Pelos Meus Pais E Irmãos

A Minha Namorada

Aos Meus Amigos



Agradecimentos

Ao Prof. Renato Bertolino Junior que nas horas difíceis buscou me acalmar e me orientar nas direções corretas deste trabalho

Ao Programa de Pós Graduação de Engenharia Civil e a coordenação, dando todo o amparo necessário a conclusão deste trabalho

Ao Prof. Amarildo Tabone do Departamento de Engenharia Mecânica nos auxílios do Programa ANSYS

E a todos os docentes do Departamento de Engenharia Civil que me incentivaram na confecção deste trabalho



Sumário

LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	VIII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
1- INTRODUÇÃO	1
1.1- Considerações gerais.....	1
1.2- Justificativa.....	3
1.3- Objetivo e escopo do trabalho.....	3
2- PERFIS FORMADOS A FRIO	4
2.1- Considerações gerais.....	4
3- SISTEMAS DE COBERTURAS.....	7
3.1- Considerações gerais.....	7
3.2- Telha trapezoidal	7
3.3- Telhas onduladas	8
3.4- Telha sanduíche	10
3.5- Telhas zipadas.....	11
4- COMPORTAMENTO DO SISTEMA TELHA-TERÇA	13
4.1- Considerações gerais.....	13



4.2-	Determinação da rigidez ao cisalhamento.....	20
4.3-	Determinação da rigidez rotacional.....	23
4.4-	Avaliação do sistema telha-terça	25
5-	ANÁLISE DO SISTEMA TELHA-TERÇA.....	34
5.1-	Considerações gerais.....	34
5.2-	Análise numérica	35
5.2.1-	Elemento finito para modelagem do sistema	37
5.2.2-	Modelagem do sistema para análise da rigidez ao cisalhamento	38
5.2.3-	Modelagem do sistema para análise da rigidez a rotação	41
5.2.4-	Modelagem das terças.....	42
6-	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	44
6.1-	Rigidez ao cisalhamento.....	45
6.2-	Rigidez a rotação.....	49
6.3-	Ensaio do conjunto telha-terça	53
7-	COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....	62
8-	APÊNDICE	64
8.1-	Dimensionamento de terças segundo NBR-14.762	64
8.1.1-	Verificação do escoamento da seção:.....	64
8.1.2-	Flambagem lateral com torção.....	64
8.1.3-	Flambagem por distorção da seção transversal	66
9-	REFERÊNCIAS	67



Lista de figuras

FIGURA 1.1 ESQUEMA E INSTRUMENTAÇÃO DOS TESTES DE COBERTURA COM DOIS E TRÊS APOIOS, SEGUNDO CHUNG & QUINTON (1996)	2
FIGURA 2.1: EVOLUÇÃO DAS SEÇÕES DAS TERÇAS FORMADAS A FRIO, SEGUNDO DAVIES (2000).....	5
FIGURA 2.2: SEÇÕES “U” E “Z” FORMADAS A FRIO. A) SEÇÕES PLANAS; B) SEÇÕES COM MESAS ENRIJECIDAS; C) SEÇÕES COM ALMAS ENRIJECIDAS; D) SEÇÕES COM ALMA E MESA ENRIJECIDAS, SEGUNDO A. I. EL-SHEIKH ET AL. (2001).....	6
FIGURA 3.1: PERFILADEIRA DA TELHA TRAPEZOIDAL, SEGUNDO CATÁLOGO PERKRON .	7
FIGURA 3.2: TELHAS TRAPEZOIDAIS, SEGUNDO CATALOGO PERKRON	8
FIGURA 3.3: TELHAS ONDULADA, SEGUNDA O CATÁLOGO PERKROM.....	9
FIGURA 3.4: PROCESSO DE CALANDRAGEM DA TELHA ONDULADA, SEGUNDO CATÁLOGO PERKRON	9
FIGURA 3.5: COBERTURA EM ARCO COM A UTILIZAÇÃO DA TELHA CALANDRADA, SEGUNDO CATÁLOGO PERKRON	10
FIGURA 3.6: TELHA SANDUÍCHE SEGUNDO CATÁLOGO PERKRON.....	11
FIGURA 3.7: TELHA ZIPADA SEGUNDO CATÁLOGO SCI	12
FIGURA 3.8: MODELO APROXIMADO DO CLIPS FIXADOR, DADO POR SERRETTE & PEKOZ (1997).....	12
FIGURA 3.9: PROCESSO PRODUTIVO DO SISTEMA DE COBERTURA SEGUNDO CATÁLOGO SCI (SISTEMAS DE COBERTURAS INTEGRADAS)	12
FIGURA 3.10: SISTEMA DE COBERTURA SEGUNDO CATÁLOGO SCI -SISTEMAS DE COBERTURAS INTEGRADAS.....	13
FIGURA 4.1: SISTEMA ESTÁVEL DE UM MEMBRO E DO DIAFRAGMA ESTABILIZANDO, SEGUNDO SOKOL (1996)	14
FIGURA 4.2: ESPAÇAMENTO SIMPLES DE TELHA, SEGUNDO LUCAS ET AL. (1997A).....	15
FIGURA 4.3: MODELO DEFLEXÃO DAS TERÇAS COM SUCCÃO LUCAS ET AL. (1997A)	16
FIGURA 4.4: PLANO DA TELHA, SEGUNDO LUCAS ET AL. (1997A).....	16
FIGURA 4.5: A) RIGIDEZ AO CISALHAMENTO (K_{RY}); B) RIGIDEZ A ROTAÇÃO (K_{RX}) AMBAS FORNECIDAS PELO PAINEL, SEGUNDO LUCAS ET AL. (1997A).....	17
FIGURA 4.6: MODELAGEM DA RESTRIÇÃO DO PAINEL OBTIDO POR LUCAS ET AL. (1997B)	19
FIGURA 4.7: TESTE DE CISALHAMENTO VIGA DUPLA, SEGUNDO LUCAS ET AL. (1997B)..	21
FIGURA 4.8: SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS TELHAS EMPREGADAS NAS ANÁLISES DE LUCAS ET AL. (1997B)	22



FIGURA 4.9: RIGIDEZ AO CISALHAMENTO COMUM PARA SEÇÕES DE PAINÉIS, SEGUNDO LUCAS ET AL. (1997B)	22
FIGURA 4.10: ENSAIO DE RESTRIÇÃO À TORÇÃO, SEGUNDO LUCAS ET AL. (1997B).....	23
FIGURA 4.11: CAIXA DE SUCÇÃO: DIMENSÕES GERAIS, SEGUNDO JAVARONI (1999).....	25
FIGURA 4.12: CAIXA DE SUCÇÃO PREPARADA PARA O INÍCIO DE UM ENSAIO, SEGUNDO JAVARONI (1999).....	26
FIGURA 4.13: CAIXA DE SUCÇÃO – DIMENSÕES GERAIS:(A) CORTE TRANSVERSAL. (B) CORTE LONGITUDINAL, SEGUNDO JAVARONI (1999).....	27
FIGURA 4.14: SISTEMAS DE COBERTURA ANALISADOS, SEGUNDO CHUNG & QUINTON (1996).....	29
FIGURA 4.15: REPRESENTAÇÃO DO MODELO ANALÍTICO E DIMENSÕES DA TERÇA UTILIZADA POR ZHI-MING YE ET AL. (2002) MODIFICADO.....	32
FIGURA 4.16: DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO CRÍTICA PRA OS DIFERENTES TIPOS DE CARREGAMENTO E CASOS DE RESTRIÇÃO COM L = 5M, SEGUNDO ZHI-MING YE ET AL. (2002).....	33
FIGURA 5.1: DETALHE DA SEÇÃO TRANSVERSAL DOS PERFIS EMPREGADOS NAS ANÁLISES DO SISTEMA TELHA-TERÇA.....	35
FIGURA 5.2: DETALHE DA SEÇÃO TRANSVERSAL DAS TELHAS EMPREGADOS NAS ANÁLISES DO SISTEMA TELHA-TERÇA.....	36
FIGURA 5.3: SISTEMA GLOBAL DO CONJUNTO TELHA-TERÇA.....	37
FIGURA 5.4: ESQUEMA ESTÁTICO DA TERÇA.....	37
FIGURA 5.5: ELEMENTO QUADRANGULAR DE 4 NÓS DO ANSYS.....	38
FIGURA 5.6: MODELAGEM DA MEIA ESTRUTURA ADOTADA NAS ANALISE DE RIGIDEZ AO CISALHAMENTO.....	39
FIGURA 5.7: ILUSTRAÇÃO DO APOIO FIXO DO MODELO.....	39
FIGURA 5.8: ILUSTRAÇÃO DO ENGASTE MÓVEL SIMULANDO A MEIA ESTRUTURA.....	40
FIGURA 5.9: DETALHE DA EXTREMIDADE DA ESTRUTURA MOSTRANDO O BALANÇO DO MODELO E AS AÇÕES APLICADAS.....	40
FIGURA 5.10: MODELAGEM DA ESTRUTURA ADOTADA NA ANALISE DE RIGIDEZ A ROTAÇÃO.....	41
FIGURA 5.11: RESTRIÇÕES APLICADAS AO MODELO NA OBTENÇÃO DA RIGIDEZ ROTACIONAL.....	41
FIGURA 5.12: CONFIGURAÇÃO DA TERÇA ENSAIADA.....	42
FIGURA 5.13: DETALHE DAS CONDIÇÕES DE VINCULAÇÕES DE APOIO SIMULANDO O EFEITO GARFO.....	43
FIGURA 5.14: DETALHE DAS CONDIÇÕES DE VINCULAÇÕES DE ENGASTE MÓVEL NA EXTREMIDADE SIMULANDO MEIA ESTRUTURA.....	43



FIGURA 6.1: O GRÁFICO CARGA-FECHA DE UMA PRÉ-ANALISE PARA A OBTENÇÃO DA CARGA FINAL DE ANALISE	44
FIGURA 6.2: GRÁFICO REPRESENTA A RIGIDEZ AO CISALHAMENTO DA TELHA UPK-25 .	46
FIGURA 6.3: GRÁFICO REPRESENTA A RIGIDEZ AO CISALHAMENTO DA TELHA UPK-40 .	47
FIGURA 6.4: GRÁFICO REPRESENTA A RIGIDEZ AO CISALHAMENTO DA TELHA UPK-100	47
FIGURA 6.5: DEFORMAÇÃO DO MODELO NA OBTENÇÃO DA RIGIDEZ AO CISALHAMENTO	48
FIGURA 6.6: DEFORMAÇÃO DO MODELO NA OBTENÇÃO DA RIGIDEZ AO CISALHAMENTO NA EXTREMIDADE DE INTERESSE	48
FIGURA 6.7: GRÁFICO REPRESENTA A RIGIDEZ ROTACIONAL DA TELHA UPK-25 COM O PERFIL “U ENRIJECIDO” DE ESPESSURA DE 3.00MM.....	49
FIGURA 6.8: GRÁFICO REPRESENTA A RIGIDEZ ROTACIONAL DA TELHA UPK-40 COM O PERFIL “U ENRIJECIDO” DE ESPESSURA DE 3.00MM.....	50
FIGURA 6.9: GRÁFICO REPRESENTA A RIGIDEZ ROTACIONAL DA TELHA UPK-100 COM O PERFIL “U ENRIJECIDO” DE ESPESSURA DE 3.00MM.....	50
FIGURA 6.10: GRÁFICO REPRESENTA A RIGIDEZ ROTACIONAL DA TELHA UPK-25 COM O PERFIL “U” DE ESPESSURA DE 3.00MM.....	51
FIGURA 6.11: GRÁFICO REPRESENTA A RIGIDEZ ROTACIONAL DA TELHA UPK-40 COM O PERFIL “U” DE ESPESSURA DE 3.00MM.....	51
FIGURA 6.12: GRÁFICO REPRESENTA A RIGIDEZ ROTACIONAL DA TELHA UPK-100 COM O PERFIL “U” DE ESPESSURA DE 3.00MM.....	52
FIGURA 6.13: DEFORMAÇÃO DO MODELO NA OBTENÇÃO DA RIGIDEZ ROTACIONAL	53
FIGURA 6.14: DETALHE DA CONFIGURAÇÃO DOS PONTOS DE APLICAÇÃO NA TERÇA DOS SISTEMAS DE MOLAS NA SIMULAÇÃO RIGIDEZ AO CISALHAMENTO E ROTACIONAL	54
FIGURA 6.15: DEFORMAÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA TERÇA COM COEFICIENTE DETERMINADO NOS ENSAIOS DE RIGIDEZ AO CISALHAMENTO E ROTACIONAL.....	54
FIGURA 6.16: DEFORMAÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DA TERÇA COM COEFICIENTE ZERO DE RIGIDEZ AO CISALHAMENTO E ROTACIONAL.....	55
FIGURA 6.17: DESLOCAMENTOS DO SISTEMA TELHA(UPK-100)-TERÇA(UE-127).....	55
FIGURA 6.18: DESLOCAMENTOS DO SISTEMA TELHA(UPK-100)-TERÇA(UE-127).....	56
FIGURA 6.19: DESLOCAMENTOS DO SISTEMA TELHA(UPK-100)-TERÇA(UE-127).....	56
FIGURA 6.20: DESLOCAMENTOS DO SISTEMA TELHA(UPK-100)-TERÇA(US-127)	57
FIGURA 6.21: DESLOCAMENTOS DO SISTEMA TELHA(UPK-100)-TERÇA(US-127)	57
FIGURA 6.22: DESLOCAMENTOS DO SISTEMA TELHA(UPK-100)-TERÇA(US-127)	58
FIGURA 6.23: DESLOCAMENTOS LATERAL DAS TERÇAS COM AS RESPECTIVAS RIGIDEZ DO SISTEMA TELHA(UPK-100)-TERÇA UE	58
FIGURA 6.24: DESLOCAMENTOS LATERAIS DAS TERÇAS COM AS RESPECTIVAS RIGIDEZES DO SISTEMA TELHA(UPK-100)-TERÇA US.....	59



FIGURA 6.25: DESLOCAMENTOS LATERAIS DAS TERÇAS COM AS RESPECTIVAS RIGIDEZES DO SISTEMA TELHA(UPK-40)-TERÇA UE.....	59
FIGURA 6.26: DESLOCAMENTOS LATERAIS DAS TERÇAS COM AS RESPECTIVAS RIGIDEZES DO SISTEMA TELHA(UPK-40)-TERÇA US.....	60
FIGURA 6.27: DESLOCAMENTOS LATERAIS DAS TERÇAS COM AS RESPECTIVAS RIGIDEZES DO SISTEMA TELHA(UPK-25)-TERÇA UE.....	60
FIGURA 6.28: DESLOCAMENTOS LATERAIS DAS TERÇAS COM AS RESPECTIVAS RIGIDEZES DO SISTEMA TELHA(UPK-25)-TERÇA US.....	61



Lista de tabelas

TABELA 4. 1: RESULTADOS OBTIDOS POR LUCAS ET AL. (1997A).....	19
TABELA 4. 2: VARIAÇÃO DA RESTRIÇÃO ROTACIONAL EM FUNÇÃO DO TIPO DE TERÇA E TELHA, E TAMBÉM DO ESPAÇAMENTO ENTRE TERÇAS, OBTIDO POR LUCAS ET AL. (1997B)	24
TABELA 4. 3: PRESSÃO DE REFERÊNCIA PARA AS TERÇAS, SEGUNDO JAVARONI (1999) .	28
TABELA 4. 4: RESULTADOS DO TESTE COM ESPAÇAMENTO SIMPLES SOBRE CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO GRAVITACIONAL, SEGUNDO CHUNG & QUINTON (1996)	30
TABELA 4. 5: RESULTADOS DO TESTE COM ESPAÇAMENTO SIMPLES SOBRE CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO DE SUÇÃO, SEGUNDO CHUNG & QUINTON (1996)	30
TABELA 4. 6: TENSÃO MÁXIMA COMPRESSÃO NORMALIZADA, SEGUNDO ZHI-MING YE ET AL. (2002)	33
TABELA 6. 1: TABELA COM RESULTADOS DA RIGIDEZ AO CISALHAMENTO OBTIDO NOS ENSAIOS	46
TABELA 6. 2: TABELA COM RESULTADOS DA RIGIDEZ ROTACIONAL OBTIDO NOS ENSAIOS	49



Lista de símbolos

- K_{rx} - Rigidez rotacional
- K_{ry} - Rigidez ao cisalhamento
- Δ - Deslocamento
- M_o - Momento, $P \times l$
- P - Carga pontual
- I - Momento de inércia
- L - Vão
- N - Carga uniforme
- δ - deflexão vertical da mesa do perfil não conectado a telha
- h - É altura da alma do perfil "U"
- $UPK-25$ - Um modelo de telha onde a altura da onda é de 25mm
- $UPK-40$ - Um modelo de telha onde a altura da onda é de 40mm
- $UPK-100$ - Um modelo de telha onde a altura da onda é de 100mm
- $uv-pf$ - Deslocamento vertical do ponto médio da mesa do perfil da terça conectado a telha no meio do vão de 7m
- $ul-pf$ - Deslocamento lateral do ponto médio da mesa do perfil da terça conectado a telha no meio do vão de 7m
- $uv-pl$ - Deslocamento vertical do ponto médio da mesa livre do perfil da terça medido no meio do vão de 7m
- $ul-pl$ - Deslocamento lateral do ponto médio da mesa livre do perfil da terça medido no meio do vão de 7m
- $127-F \times uk_0$ - Curva carga x flecha (deslocamento lateral) do perfil "U" de 127 com a rigidez ao cisalhamento e rotacional nula
- $127-F \times uk_n$ - Curva carga x flecha (deslocamento lateral) do perfil "U" de 127 com a rigidez ao cisalhamento e rotacional mínimas obtidas nos respectivos ensaios
- $150-F \times uk_0$ - Curva carga x flecha (deslocamento lateral) do perfil "U" de 150 com a rigidez ao cisalhamento e rotacional nula
- $150-F \times uk_n$ - Curva carga x flecha (deslocamento lateral) do perfil "U" de 150 com a rigidez ao cisalhamento e rotacional mínimas obtidas nos respectivos ensaios
- $200-F \times uk_0$ - Curva carga x flecha (deslocamento lateral) do perfil "U" de 200 com a rigidez ao cisalhamento e rotacional nula
- $200-F \times uk_n$ - Curva carga x flecha (deslocamento lateral) do perfil "U" de 200 com a rigidez ao cisalhamento e rotacional mínimas obtidas nos respectivos ensaios
- UE - Perfil "U" enrijecido
- US - Perfil "U" simples



Resumo

O sistema telha-terça tem sido alvo de inúmeras pesquisas no mundo objetivando a busca de estruturas mais leves e econômicas. No presente trabalho, o enfoque foi à determinação dos parâmetros que influenciam neste sistema.

Os parâmetros que influenciam o sistema telha-terça, segundo trabalho de Lucas (1997b), são as rigidezes ao cisalhamento e rigidez rotacional que a telha proporciona à terça, cujos valores foram determinados a partir de ensaios numéricos.

Inicialmente, na determinação da rigidez ao cisalhamento foi utilizado o modelo "DOUBLE BEAM SHEAR TEST" – DBST, proposto em Lucas (1997b), e na determinação da rigidez rotacional foi utilizado o modelo "TORSIONAL RESTRAINT TEST", existente no Eurocode (1996).

Posteriormente, os resultados adquiridos através destes dois modelos, as rigidezes ao cisalhamento e rotacional, foram utilizados no ensaio numérico da terça, determinando assim, a contribuição proporcionada pela telha na contenção lateral da mesa comprimida da terça, aplicando-se uma ação gravitacional no sistema de telha-terça.

Os resultados obtidos indicam uma significativa contribuição da telha na contenção lateral da terça, em relação à terça sem nenhuma contenção lateral, propiciando assim, um efeito estabilizador na terça com relação a flambagem lateral por flexo-torção, e conseqüente aumento na resistência da terça às ações externas aplicadas.



Abstract

The purlin-sheeting system has been objective of researches in the world aiming at the search of lighter and economical structures. In the present work, it was determinate which of the parameters influence the purlin-sheeting system.

The parameters that influence the purlin-sheeting system, second on Lucas et al. (1997b), are the shear stiffness and rotational stiffness provided to the purlin by the sheeting, whose values were obtained by the numerical analysis investigation.

Initially to determined the shear stiffness it was used the model "DOUBLE BEAM SHEAR TEST" DBST, proposed in Lucas et al. (1997b), and the rotational stiffness determination it was used the model "TORSIONAL RESTRAINT TEST", of agreement Eurocode (1996).

Later, with the results of these two models, shear and rotational stiffness, was investigation by numeric analysis the contribution of provided to the purlin by the sheeting, with being applied a gravitational action in the purlin-sheeting system.

The results of analysis indicate a significant contribution of provided to the purlin by the sheeting, in relation the purlin without any lateral restraint. This restraint contribute to stabilize to the flexo-torsional buckling effect in the purlin and consequent strength increase to applied external action.



1- INTRODUÇÃO

1.1-Considerações gerais

Com os avanços tecnológicos e com o aumento da competitividade do mercado, torna-se necessário a busca de um diferencial que possibilite a melhoria no desenvolvimento de projetos estruturais.

Com respeito ao projeto de cobertura de edifícios comerciais e industriais em estruturas metálicas, tem-se como herança de concepção estrutural algumas características marcantes. Um delas é a utilização de correntes com a finalidade de garantir a contenção lateral das terças e seu alinhamento, contraventando e garantindo a estabilidade geral da estrutura. Dessa maneira esses elementos tem sido empregados para aumentar a rigidez dos elementos estruturais que compõem a estrutura como um todo.

A substituição deste sistema estrutural composto por correntes, por um novo sistema estrutural formado pelo conjunto telha-terça proporcionando a contenção lateral da terças, implica em pesquisas e desenvolvimento de técnicas que comprovem um adequado comportamento para o novo conjunto estrutural.

Com a utilização dessa concepção estrutural, efeito conjunto telha-terça, abre-se um enorme campo de pesquisa para o estudo desse comportamento para diversos arranjos estruturais.

Chung & Quinton (1996) efetuaram uma investigação experimental com seis modelos de sistemas de coberturas conforme mostrado na figura 4.14 utilizando-se um isolamento térmico por cima da terça, telha sanduíche. Foram realizadas três séries de ensaios em protótipos, sendo 12 sistemas de cobertura com terças apoiadas em dois apoios e cinco apoiadas em três apoios. A figura 1.1 mostra o esquema de cobertura com dois e três apoios, ambas suportadas por terças de seções "Z" e "Sigma", solicitadas com ações gravitacionais e de sucção. Desta maneira, estimaram a contenção lateral das terças analisadas, com a utilização de diferentes formas e tamanho de fixadores à telha sanduíche, e também com a utilização de clips fixadores com diferentes alturas na fixação do sistema de cobertura nas terças.



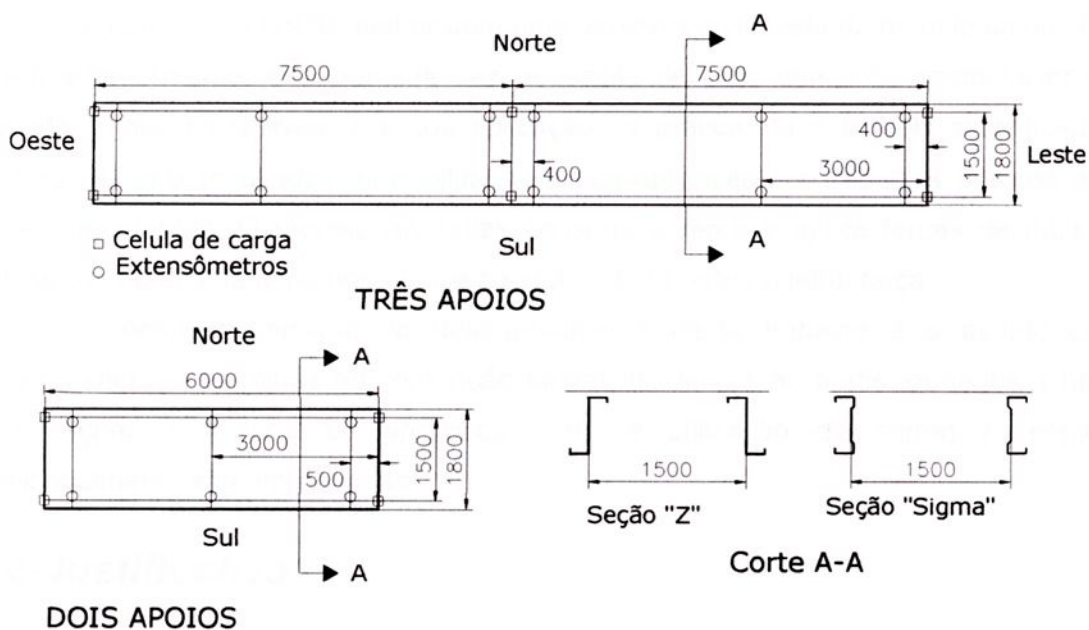


Figura 1.1 Esquema e instrumentação dos testes de cobertura com dois e três apoios, segundo Chung & Quinton (1996)

Javaroni (1999) pesquisou perfis fletidos isoladamente simulando os diversos modos de falha aos quais estão sujeitos os perfis de aço formados a frio quando submetidos à flexão, também estudou perfis conectados às telhas de aço de seção trapezoidal sob o efeito de sucção devido a ação do vento em terças de coberturas com perfis do tipo "U", "U" enrijecido e "Z" enrijecido. Para os perfis conectados às telhas de aço, os ensaios foram realizados em uma "caixa de sucção" desenvolvida especialmente para este projeto. Os perfis foram conectados às telhas por meio de parafusos auto-brocantes. Foram realizados quinze ensaios. A partir destes, foram apresentados os modos de falhas possíveis juntamente com verificação dos resultados teóricos em comparação aos resultados obtidos nesses ensaios. As seções transversais escolhidas e as suas respectivas dimensões foram as de uso freqüente nas construções em aço.

Lucas et al. (1997a) investigaram numericamente o sistema telha-terça modelado por meio de elementos finitos elasto-plásticos não-lineares, caracterizando assim a capacidade de resposta do sistema sem a necessidade de resultados experimentais. O modelo incorpora tanto a telha como a terça, sendo capaz de calcular a distorção da seção transversal da terça, como também a flexão e a restrição efetiva proporcionada pela telha, além do colapso da terça por flambagem local ou escoamento. Dessa forma, simularam a interação física dos dois componentes. Os resultados foram comparados com os resultados dos ensaios experimentais, verificando-se a validade do modelo numérico.

Lucas et al. (1997b) elaboraram uma versão simplificada do modelo completo citado anteriormente, que por sua vez necessita de uma demanda computacional elevada, o que torna inviável a sua aplicação na prática. Já o modelo simplificado decorre de bons resultados, possibilitando a sua aplicação em trabalhos práticos de dimensionamentos. O modelo discretiza somente a terço e aplica forças de molas simulando o efeito da telha nos pontos conectados do sistema telha-terço.

O enfoque principal do desenvolvimento deste trabalho é o estudo do comportamento das telhas na contenção lateral das terços de perfis formados a frio com seções tipo "U", "U" enrijecido, sem a utilização de correntes, como tradicionalmente são empregadas.

1.2-Justificativa

Atualmente nas estruturas metálicas de cobertura, as telhas são fixadas nas terços e a sua contenção lateral é efetuada por meio da adição de correntes. Entende-se que uma vez as telhas já estando fixadas nas terços, estas proporcionam a contenção lateral não totalmente, mas em uma grande parte e conseqüentemente proporcionam a rigidez lateral das terços. Desta maneira, entende-se a não necessidade da utilização de correntes para a contenção lateral, pois a própria telha realiza a contenção, e pode-se afirmar que quase continua.

Em vista destas observações, a estrutura de cobertura projetada considerando o efeito conjunto da telha conectada à terço poderá significar uma economia de material, conseqüentemente um menor peso da estrutura, pois o peso das terços equivale em média de quarenta (40%) a cinquenta (50%) por cento do peso total da estrutura.

1.3-Objetivo e escopo do trabalho

Ao final deste trabalho, pretende-se alcançar os seguintes objetivos para os perfis usualmente utilizados na pratica como "U", "U" enrijecido:

- obter a parcela de contribuição de rigidez ao cisalhamento e rotacional de telhas trapezoidais do tipo UPK-25, UPK-40 e UPK-100, fixadas às terços para sua contenção lateral;
- obter e comparar os deslocamentos laterais obtidos de perfis submetidos à flexão sem contenção lateral e com a contenção lateral das telhas por meio da consideração das rigidezes ao cisalhamento e rotacional.



2- PERFIS FORMADOS A FRIO

2.1-Considerações gerais

Segundo a Norma NBR-14762, um perfil estrutural de aço formado a frio é obtido por dobramento em prensa dobradeira em mesas de roletes, a partir de bobinas laminadas a frio ou a quente. As operações são realizadas com o aço em temperatura ambiente.

Davies (2000) recapitulou o desenvolvimento técnico e alguns resultados das novas aplicações do perfil formado a frio, apresentando tendências atuais das seções, que por sua vez estão tomando-se mais esbeltas e rígidas, porém mais suscetíveis a flambagem local e distorcional.

O recente aumento da utilização prática de perfis formados a frio com diferentes seções transversais nas edificações tem ocupado lugares em várias frentes. Uma delas tem sido o significativo desenvolvimento na tecnologia de formas mais complexas de seções transversais, com tensões de escoamento elevada, representando particularmente técnicas avançadas nas construções de aço. Este desenvolvimento em tecnologia proporciona o crescimento paralelo na aplicação prática, ilustrando o contínuo crescimento do mercado de diferentes seções de perfis formados a frio. Esta alteração da demanda dos procedimentos de projetos requer um desenvolvimento paralelo nos modelos de cálculo e códigos normativos. Em particular, as seções transversais necessitam agora de um tratamento mais sofisticado para a flambagem local, flambagem distorcional e a interação entre elas, tendo em vista o aumento da rigidez das seções.

Davies (2000) também destaca algumas características importantes do desenvolvimento tecnológico, tais como:

- tendência para uma melhor qualidade do aço esta ligada primeiramente ao aumento da tensão de escoamento, que vem crescendo continuamente dentre uma variação de 280 para 550 MPa, chegando a casos até 1100MPa;
- tendência para seções transversais de formas complexas, em virtude do uso de aço de alta resistência, associado a redução da espessura e consideração da estabilidade local, levando logicamente ao desenvolvimento de seções muito mais rígidas com enrijecedores intermediários. A figura 2.1 ilustra as referidas seções transversais de formas complexas.



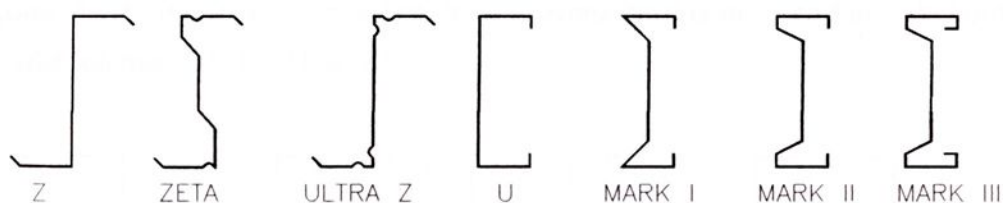


Figura 2.1: Evolução das seções das terças formadas a frio, segundo Davies (2000)

Com relação à resistência a corrosão, busca-se uma melhor proteção a corrosão da seção para os perfis formados a frio.

Constantemente observa-se o melhoramento dos processos de galvanização e outras tecnologias de revestimentos, processo de formação a frio dos perfis, e que não prejudique o desempenho da proteção dos revestimentos.

Com relação à aplicação em residências e outras edificações de poucos andares, observa-se o desenvolvimento significativo no uso de paredes de vedação. Demonstra-se uma boa performance estrutural, evitando problemas de estabilidade das montantes das paredes de vedação nas construções. O painel age na forma de diafragma contribuindo no contraventamento no plano da parede.

Relacionando a montagem de galpões em elementos pré-fabricados pode-se observar uma agilidade na execução, liberando rapidamente o local da obra. Os elementos mais empregados atualmente são painéis de piso de cobertura e treliças de cobertura. Em consequência, tem-se aumentado a fabricação de módulos pré-fabricados nas construções. Um bom exemplo disso são os banheiros pré-fabricados, utilizados nas construções de hotéis.

Nas construções de paredes finas de aço tem-se a interação com outros materiais, e algumas aplicações familiares destes efeitos são:

- paredes com pinos embutidos nos revestimentos como os *steel-decks*, que são modelos que encorparam os pinos no concreto, configurando um trabalho conjunto dos materiais;
- os painéis sanduíches, onde duas faces de metais finas interagem com um material isolante;
- a tensão da casca agindo como diafragma, onde o metal fino de revestimento age na estabilidade dos membros da estrutura.

El-Sheikh et al. (2001) discorre sobre a rigidez de barras de “U” em vários tipos de aplicações. Em seguida discute as propriedades da seção transversal com variação da forma dos enrijecedores, obtendo a melhoria do comportamento estrutural

das seções. A figura 2.2 ilustra a aplicação e a evolução dos enrijecedores de bordas e intermediários nas seções “U” e “Z”:

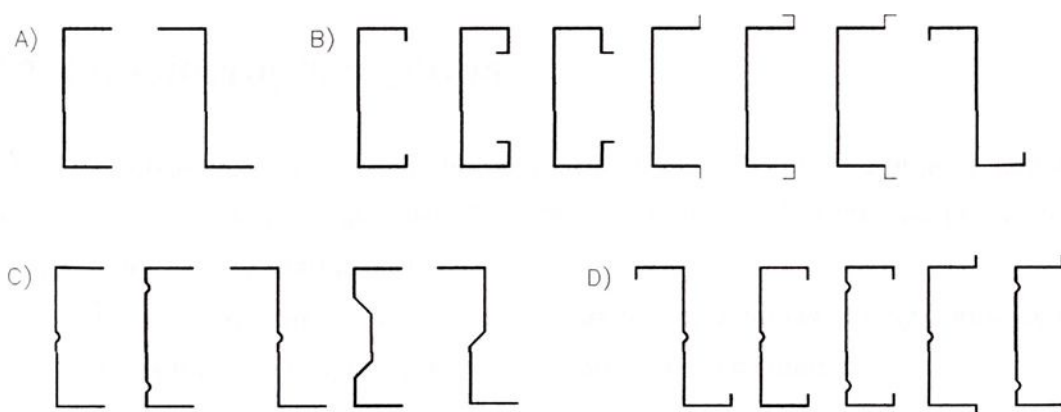


Figura 2.2: Seções “U” e “Z” formadas a frio. a) seções planas; b) seções com mesas enrijecidas; c) seções com almas enrijecidas; d) seções com alma e mesa enrijecidas, segundo A. I. El-Sheikh et al. (2001)

Javaroni (1999) cita em seu trabalho teórico experimental aspectos gerais de dimensionamento de terças utilizando perfis formados a frio, submetidos a flexão. Foram analisadas as seções do tipo “U”, “U” enrijecido e “Z” enrijecido por meio de ensaios de perfis isolados e de perfis conectados à telha trapezoidal de aço pela mesa e fixada por parafusos auto-brocantes, contabilizando os modos de falhas possíveis. Em seu trabalho, verificou os resultados teóricos obtidos das expressões teóricas da força crítica e os valores calculados por meio das recomendações normativas do AISI (1996) e do Eurocode (1993), comparando com os resultados obtidos nestes ensaios.

3- SISTEMAS DE COBERTURAS

3.1-Considerações gerais

O desenvolvimento deste trabalho terá como enfoque o sistema de cobertura de telhas trapezoidais do tipo UPK-25 UPK-40 e UPK-100 fixadas nas terças com a utilização de perfis formados a frio.

Existem no mercado vários tipos de seções para telhas em aço, onde as mais usuais são as trapezoidais, as onduladas, a sanduíche e a zipadas.

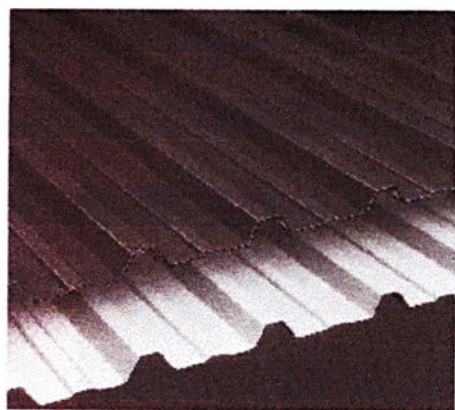
3.2-Telha trapezoidal

As telhas trapezoidais são vastamente utilizadas no mercado e seu processo de produção baseia-se na perfilação de bobinas de aço zincado podendo ou não receber uma camada de base de "primer epóxi" e seguidamente uma tinta de poliéster garantindo cores personalizadas, como mostra as figuras abaixo.

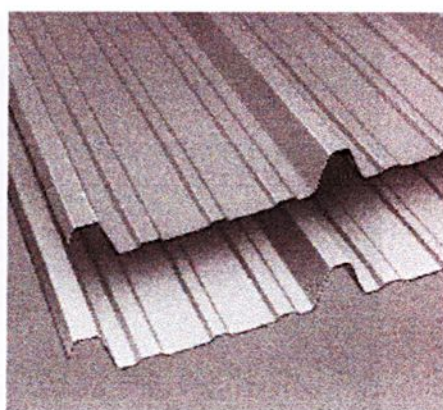


Figura 3.1: Perfiladeira da telha trapezoidal, segundo catálogo Perkrone

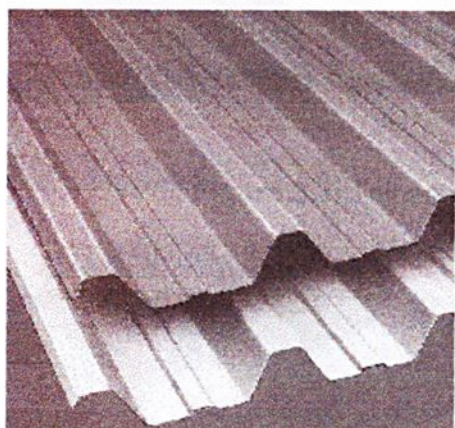
Na figura 3.2 ilustra as seções de telhas trapezoidais obtidas no processo de perfilação do catálogo Perkrone.



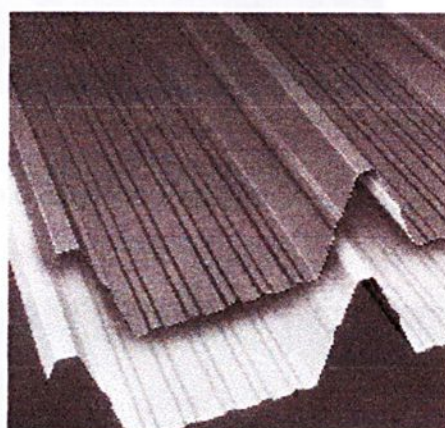
UPK-25/1025



UPK-35/1050



UPK-40/980



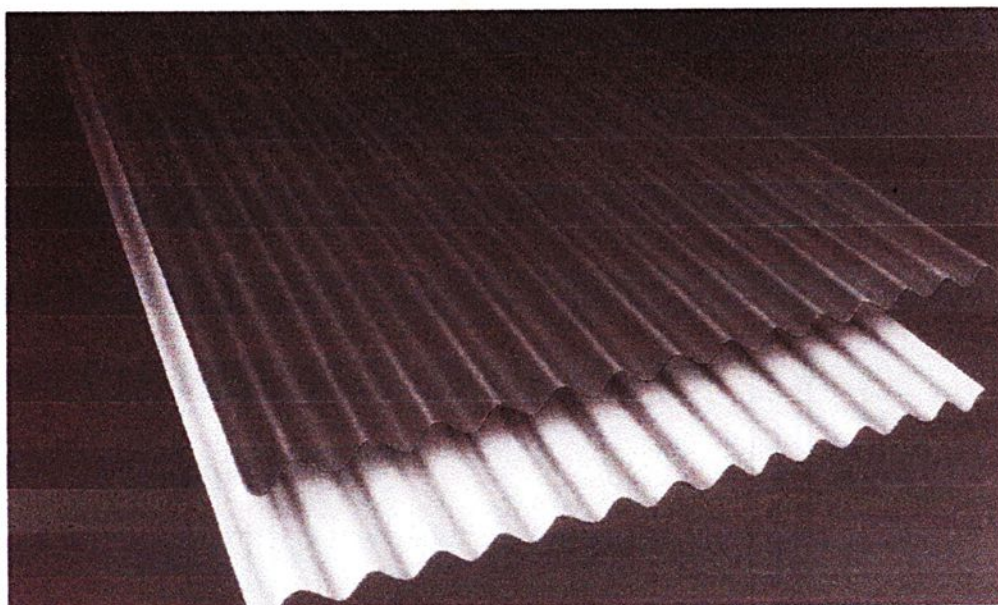
UPK-100/950

Figura 3.2: Telhas trapezoidais, segundo catalogo Perkrone

O processo de fixação da telha na terça é dado por meio de parafuso ou rebites, e quanto à sua execução é totalmente manual.

3.3-Telhas onduladas

Outro tipo de cobertura também amplamente utilizado no mercado seguindo os mesmos processos das telhas trapezoidais quanto à fabricação e execução. No entanto, a telha ondulada um processo chamado calandragem que permite curvar as telhas metálicas, para que se adaptem em coberturas em formas de arcos como mostra a figura a seguir.



UPK-17/990

Figura 3.3: Telhas ondulada, segunda o catálogo Perkrom

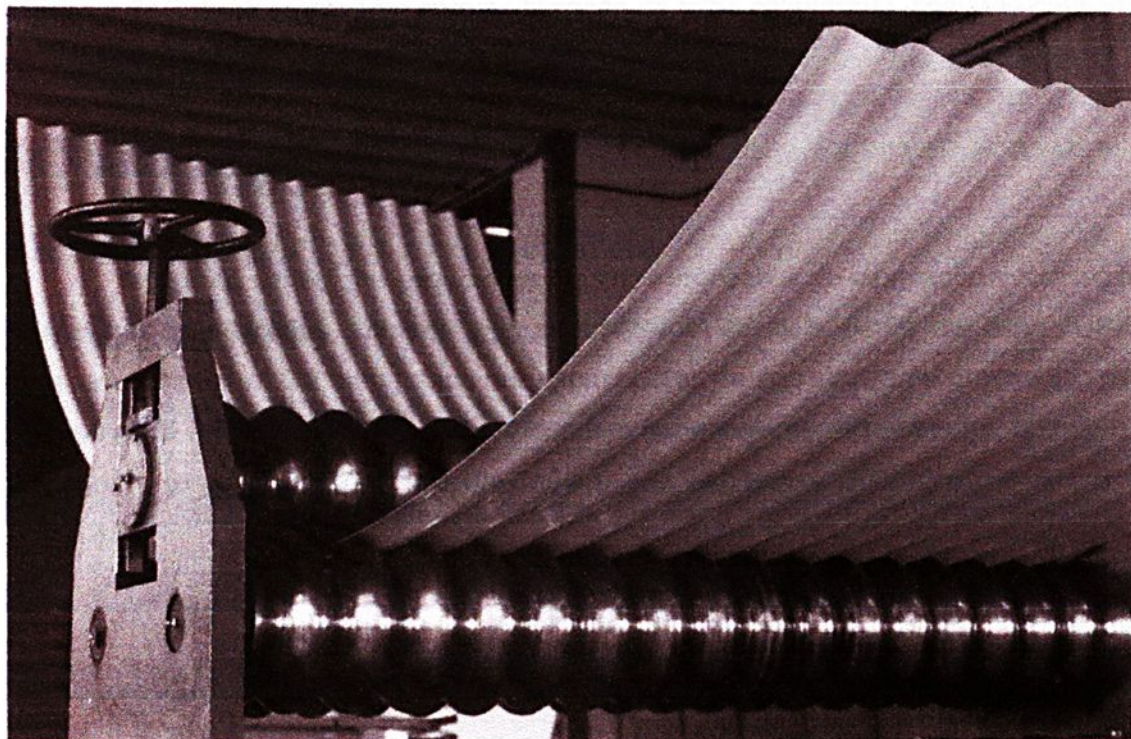
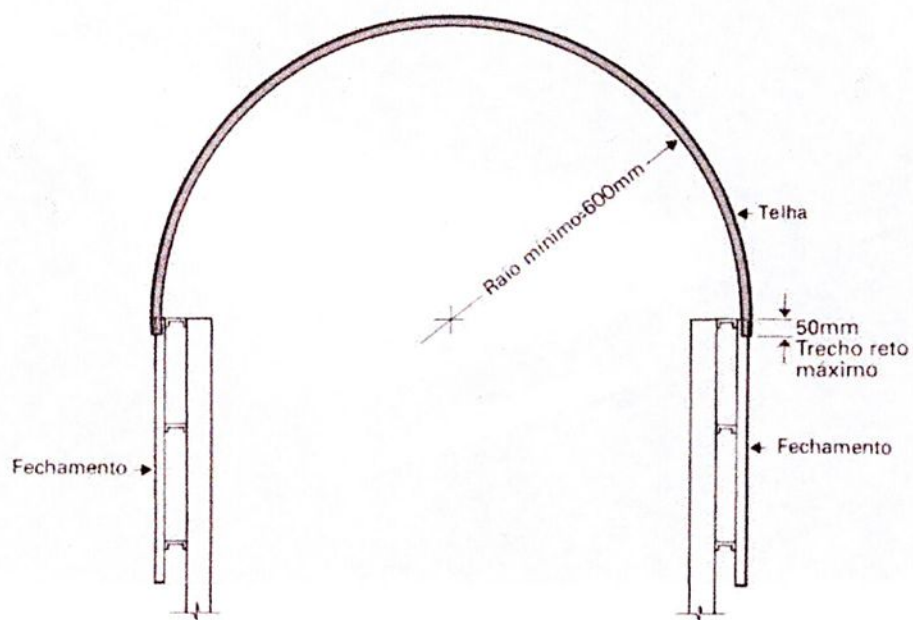


Figura 3.4: Processo de calandragem da telha ondulada, segundo catálogo Perkron



TELHA CALANDRADA
Perfil UPK 17/990

Figura 3.5: Cobertura em arco com a utilização da telha calandrada, segundo catálogo Perkron

3.4-Telha sanduíche

As telhas sanduíche seguem os mesmos processos de fabricação e execução das telhas trapezoidais, diferem por se constituir de dois perfis da linha “UPK” mostrados na figura 3.2, separados por espaçadores de aço zincado e preenchido por mantas de lã de vidro ou lã de rocha. Possuem um excelente desempenho, quanto ao isolamento termo-acústico tendo em média uma espessura 30mm, como ilustra a figura 3.6.





Figura 3.6: Telha sanduíche segundo catálogo Perkron

3.5-Telhas zipadas

O sistema de cobertura com a utilização da telha zipada processa-se pela perfilação de bobinas, executada em nível de cobertura e de piso com zipagem dos recobrimentos laterais e longitudinais.

Este segmento de cobertura e fechamento destina-se a construções com absoluta necessidade de estanqueidade, dada por meio do desbobinamento das chapas de aço galvanizadas e das chapas de aço revestidas com liga alumínio, zinco e ou chapas de alumínio natural ou pintada.

Um exemplo de seção transversal da telha zipada está apresentada na figura a seguir.

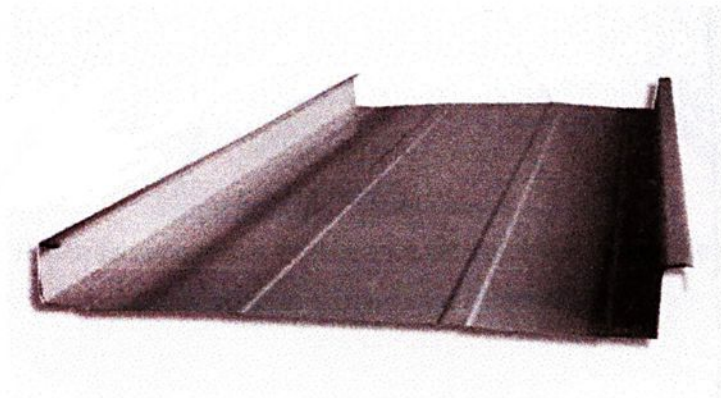
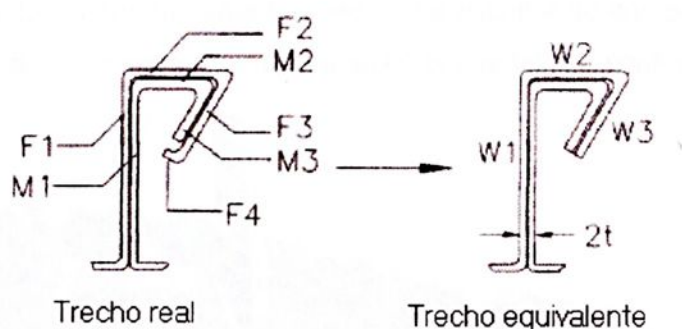


Figura 3.7: Telha zipada segundo catálogo SCI



$$W1 = \frac{F1 + M1}{2}$$

$$W2 = \frac{F2 + M2}{2}$$

$$W3 = \frac{F3 + F4 + M3}{2}$$

Figura 3.8: Modelo aproximado do clips fixador, dado por Serrette & Pekoz (1997)

As telhas são fixadas por meio de clips como mostra a figura 3.8, que são especialmente projetados e embutidos nas ondas, dispensando a utilização de parafusos, ganchos e rebites, ou seja, não exigindo furos a fim de garantir a total estanqueidade na cobertura. As telhas são zipadas mecanicamente, tomando a configuração conforme mostra a figura 3.9.

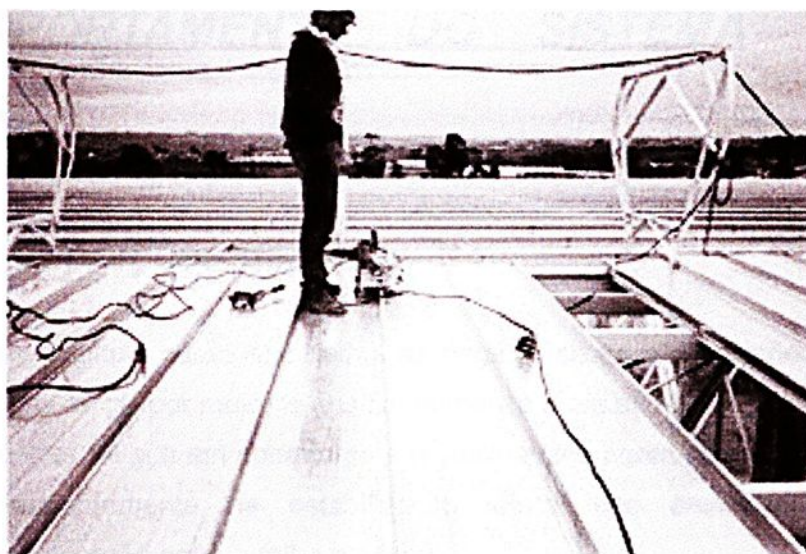


Figura 3.9: Processo produtivo do sistema de cobertura segundo catálogo SCI
(Sistemas de Coberturas Integradas)

A costura lateral, zipagem do recobrimento longitudinal das telhas é realizada na obra de forma contínua para assegurar uma vedação totalmente eficaz. O sistema de zipagem permite a perfeita vedação, dada pela escolha do comprimento exato dos painéis, evitando assim a sobreposição transversal das telhas, conforme figura 3.10.

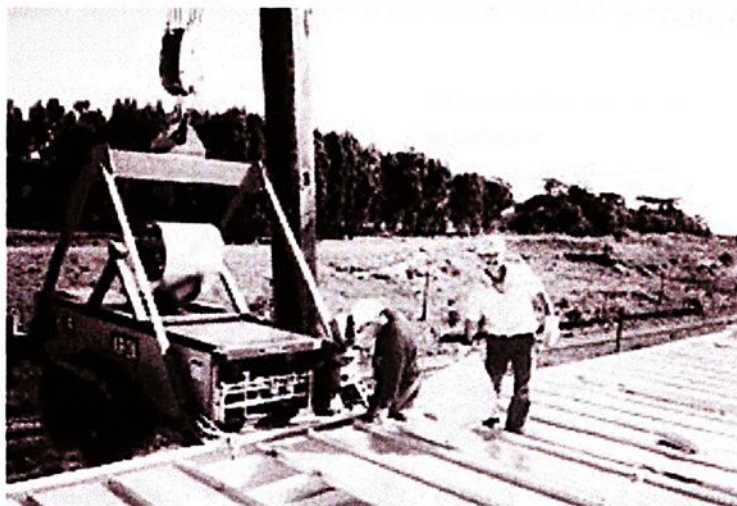


Figura 3.10: Sistema de cobertura segundo catálogo SCI -Sistemas de Coberturas Integradas

A execução é realizada no canteiro de obras e apresenta algumas vantagens, tais como o baixo custo de transporte e segurança contra danos durante esta operação.

4- COMPORTAMENTO DO SISTEMA TELHA-TERÇA

4.1-Considerações gerais

Neste capítulo serão abordadas as características e as soluções de trabalho do sistema telha-terça, por meio de análise numérica e experimental.

As telhas de aço em coberturas e revestimentos agem como diafragma e são utilizadas freqüentemente na estabilização lateral dos elementos estruturais, resultando na interação entre a telha e a terça.

Em se tratando de elementos secundários esbeltos, isto é, vigas e terças, as forças de interação usualmente são consideradas como não sendo significantes.



Sokol (1996) propôs um estudo de métodos para a determinação das forças de interação entre a telha e a estabilidade dos elementos estruturais. Nas considerações do problema utilizou o Eurocode 3, onde observou uma barra comprimida com uma deformação inicial contida lateralmente sobre ação cisalhante no painel trabalhando como diafragma, como mostra a figura 4.1.

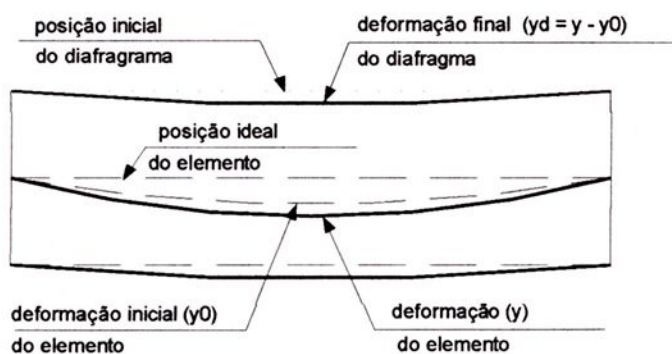


Figura 4.1: Sistema estável de um membro e do diafragma estabilizando, segundo Sokol (1996)

O sistema telha-terça usado em coberturas, geralmente é fixado nas terças de perfis formados a frio, com seções "U" e "U enrijecido" ou "Z" por parafusos auto brocantes fixados nas cristas da telha. Este sistema telha-terça tem sido objeto de inúmeras investigações teóricas e experimentais. Porém a complexidade do sistema tem levado a uma grande dificuldade no desenvolvimento de um modelo geral de projeto. A figura 4.2 ilustra o sistema de cobertura formado por telhas fixadas por parafusos auto brocantes:

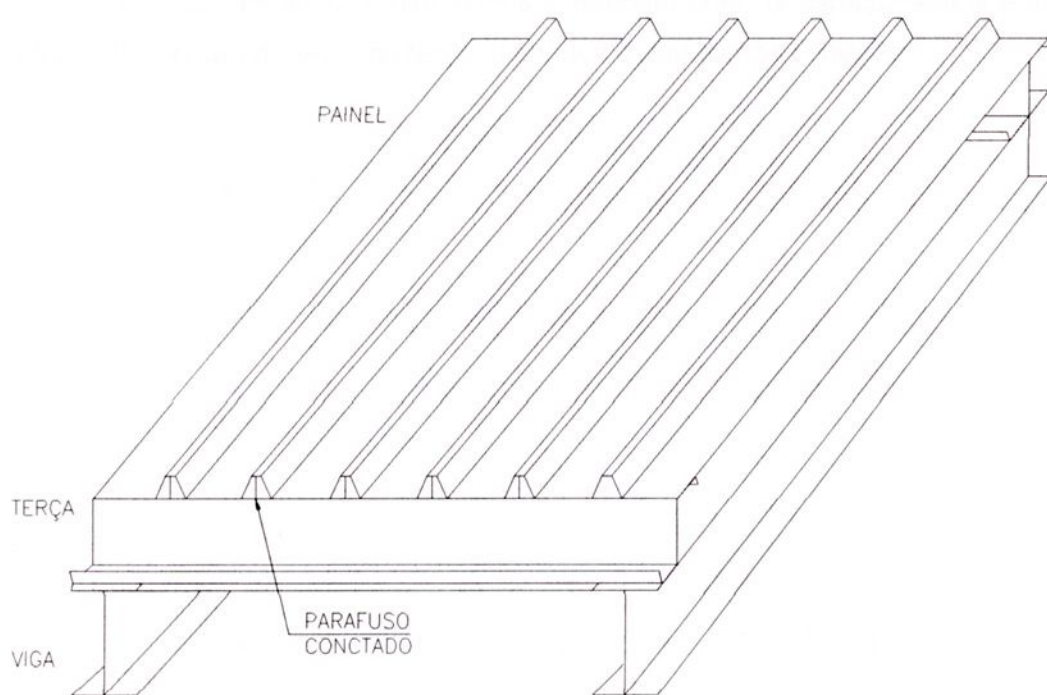


Figura 4.2: Espaçamento simples de telha, segundo Lucas et al. (1997a)

Lucas et al. (1997a) fizeram a análise por elementos finitos de uma placa fina retangular, considerando a não linearidade física e geométrica. O modelo incorpora a telha e a terça simulando a interação física dos dois componentes, sendo capaz de analisar os modelos do sistema telha-terça sem as necessidades de suposições simplificadoras ou avaliações experimentais.

A partir do modelo determina-se o valor da distorção da seção transversal da terça, da flexão, da restrição efetiva da telha e do colapso da terça por flambagem local ou escoamento da seção transversal. Os resultados fornecidos pelo modelo mostram uma boa correlação com os resultados experimentais.

Devido à contenção lateral da telha, o colapso da terça não ocorre na flexo-torção e sim no efeito local por escoamento ou por distorção local. A figura 4.3 apresenta as deflexões gerais do modelo destas terças ambas com condições de carregamento de vento de sucção.

A complexidade deste problema pode ser atribuída primeiramente às terças de seções "U" ou "Z" que não possuem dupla simetria, passando assim por significantes distorções da seção transversal desde o início do carregamento. Posteriormente a natureza da conexão telha-terça substitui a rigidez ao cisalhamento e a rotação proporcionada pela telha na terça, o que dificulta a quantificação deste efeito. A rigidez à rotação do conjunto varia de acordo com o tipo de telha e de terça

de acordo com as respectivas dimensões e também com os espaçamentos entre os parafusos de fixação da telha na terço, além dos detalhes das conexões.

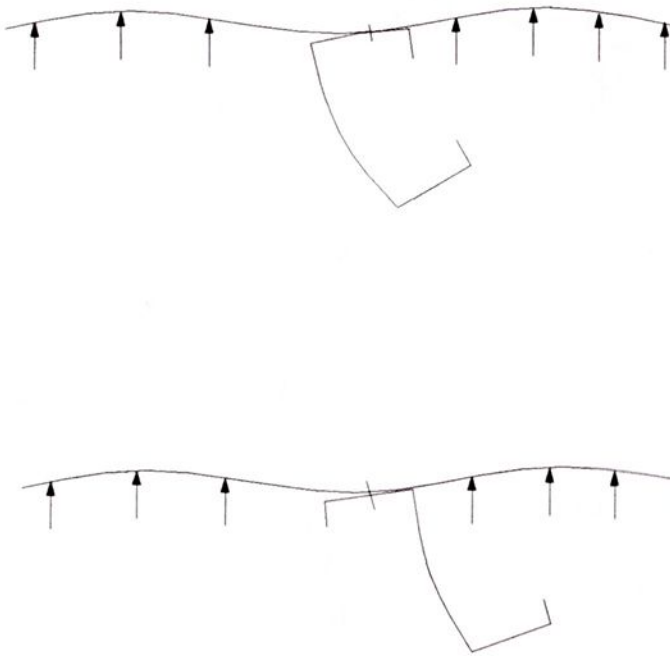


Figura 4.3: Modelo deflexão das terços com sucção Lucas et al. (1997a)

As telhas corrugadas fixadas na terço proporcionam duas restrições principais: a rigidez ao cisalhamento, dada por K_{ry} e a rigidez rotacional, por K_{rx} , figura 4.4. A rigidez rotacional total provém da contribuição da rigidez rotacional da telha e da rigidez rotacional da conexão telha-terço. A natureza da rigidez ao cisalhamento e da rigidez rotacional da telha é mostrada na figura 4.5:

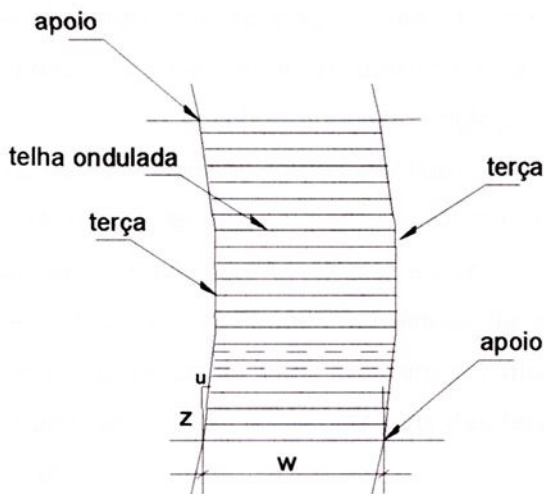
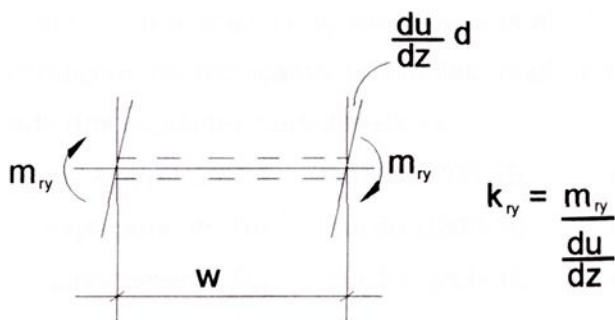
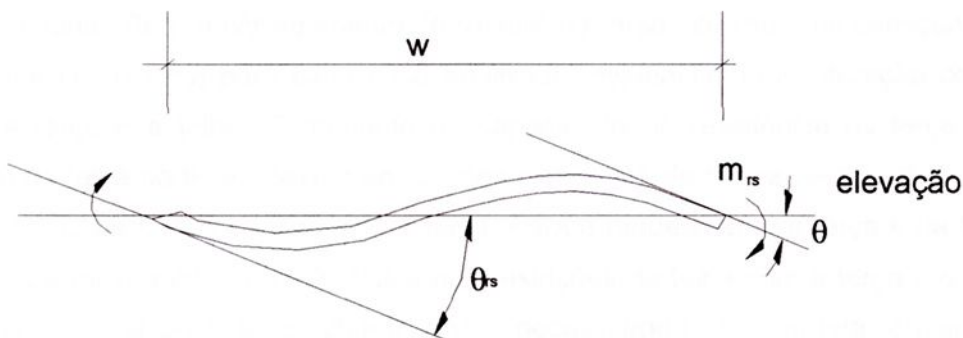


Figura 4.4: Plano da telha, segundo Lucas et al. (1997a)



a)



$$k_{rx} = \frac{m_{rs}}{\theta_{rs}} = \frac{6EI}{bw}$$

b)

Figura 4.5: a) Rigidez ao cisalhamento (K_{ry}); b) Rigidez a rotação (K_{rx}) ambas fornecidas pelo painel, segundo Lucas et al. (1997a)

As magnitudes das rigidezes ao cisalhamento e rotacional fornecem para a telha a influência dos níveis dos deslocamentos laterais e rotacionais das terças sobre o eixo longitudinal. A rigidez ao cisalhamento e a rigidez rotacional causam um significativo aumento de resistência nas terças contidas lateralmente. A negligência em projeto da existência desse fenômeno pode resultar em estimativas altamente conservadoras da capacidade de carregamento das terças.

As falhas observadas nas simulações numéricas devido a restrição provida da fixação da telha na mesa superior do perfil ocorrem por meio das combinações de colapso plástico local, flambagem local e escoamento das terças, mais propriamente por uma flambagem global.

Para uma aferição do modelo completo, Lucas et al. (1997a) realizou ensaios em protótipos nas condições de espaçamento simples, duplo e triplo. A confecção do ensaio foi dada a partir das seguintes características:

ensaio S7T1	espaçamento:7m	seção:Z200-15	nº correntes:0
ensaio S7T2	espaçamento:7m	seção:U200-15	nº correntes:0
ensaio S7T3	espaçamento:7m	seção:U200-15	nº correntes:1
ensaio S7T5	espaçamento:7m	seção:U200-15	nº correntes:2

Resultados obtidos nos ensaios numéricos e experimentais, dados na tabela 4.1.

O modelo numérico completo mostrou uma boa correlação com os resultados experimentais. Para o carregamento de ruptura da terça ocorreu uma variação de até cinco por cento (5%) para cada caso analisado, evidenciando a interação completa entre a terça e a telha. O aumento da capacidade de resistência na terça com a fixação da telha pode ser devido ao uso dos elementos de chapa permitindo a análise da distorção da seção transversal da terça. Para a modelagem da terça e da telha, o modelo permitiu a interpretação física das restrições da telha com a terça e o cálculo da rigidez rotacional e cisalhante, não necessitando da entrada empírica ou experimental.

O modelo numérico completo apresentado por Lucas et al. (1997a) oferece uma excelente ferramenta para a compreensão do sistema telha-terça, mas sendo este um recurso totalmente computacional e exige uma demanda excessiva de processamento e tempo computacional, impedindo seu uso em situações normais de projetos.



Tabela 4. 1: Resultados obtidos por Lucas et al. (1997a)

Ensaio	Protótipo (KN/m)	Modelo numérico completo(KN/m)	Varição
Espaçamento simples			
S7T1	1.85	1.87	1.01
S7T2	1.70	1.65	0.97
S7T3	1.70	1.64	0.96
S7T5	1.95	1.95	1.00
Espaçamento duplo			
S7T1	4.33	4.23	0.98
S7T2	4.93	4.87	0.99
S7T3	5.77	5.65	0.98
Espaçamento triplo			
S7T1	2.58	2.60	1.01
S7T5	2.94	2.83	0.96
S7T5	2.92	2.90	0.99
S7T6	2.69	2.81	1.04

Lucas et al. (1997b) relatam num outro trabalho uma versão simplificada do modelo numérico completo, em virtude do excessivo tempo de processamento exigido. O modelo numérico simplificado inclui somente a análise da terça, mas considera as restrições ao cisalhamento e rotacional, modelando esses efeitos por meio de molas localizadas na conexão da terça com a telha, conforme figura 4.6.

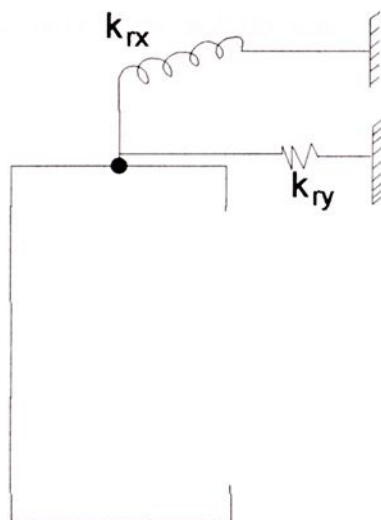


Figura 4.6: Modelagem da restrição do painel obtido por Lucas et al. (1997b)

Como no modelo numérico completo, o modelo simplificado considera a não linearidade geométrica e a não linearidade física com comportamento elasto-plástico, adotando-se elemento de placa de parede fina. O modelo simplificado analisa unicamente a terça e representa contenção lateral da telha por meio de molas no centro da mesa do perfil em cada nó conforme mostra a figura 4.6, e equivale a rigidez ao cisalhamento (K_{ry}) e a rigidez rotacional (K_{rx}).

Frente a dificuldade em se obter a parcela referente a rigidez rotacional, geralmente tem-se optado em ignorar esta restrição adotando-se valores conservativos. Alguns pesquisadores têm desenvolvido modelos nos quais obtém-se a rigidez rotacional determinada experimentalmente para cada sistema telha-terça.

A validade do modelo simplificado desenvolvido por Lucas et al. (1997a) verifica-se quando comparada com os resultados experimentais, sendo em espaçamento das terças simples, duplo e triplo, sobre ação de carregamento de sucção.

4.2-Determinação da rigidez ao cisalhamento

Para determinação da rigidez ao cisalhamento baseou-se na proposta de ensaio de Pincus apud Lucas et al. (1997b). A figura 4.7 mostra o sistema estrutural composto de duas terças com baixa rigidez a flexão e fixadas no painel com parafusos direto na mesa do perfil. A fixação da telha reduz a deflexão das terças na região flexão pura devido principalmente ao efeito da ação da força cortante na telha considerando que a seção transversal da telha não rotacione. A rigidez ao cisalhamento pode ser determinada de acordo com as considerações de energia conforme a expressão 4.1.

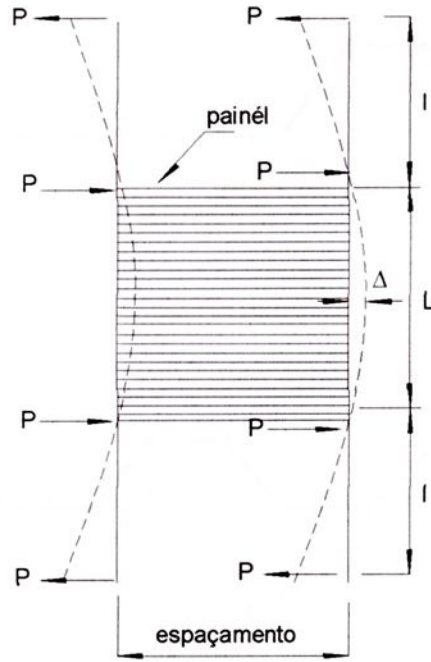


Figura 4.7: Teste de cisalhamento viga dupla, segundo Lucas et al. (1997b)

$$K_{rv} = \frac{4 M_0}{\pi \Delta} - \frac{\pi^2 EI_y}{L^2} \quad 4.1$$

Onde,

E = Módulo de elasticidade;

Δ = deslocamento;

M₀ = P * I;

I_y = momento de inércia;

L = vão

A figura 4.8 destaca os perfis de telhas utilizadas por Lucas et al. (1997b) nas suas análises de rigidezes do sistema telha-terça.

Na figura 4.9 apresenta-se a relação entre a rigidez ao cisalhamento e o vão da telha para tipos de corrugação e espessura de telha, onde observa-se os limites de rigidez aproximadamente de 300 a 1500KN/rad para espaçamento entre apoio de terças de 900 a 3300mm.

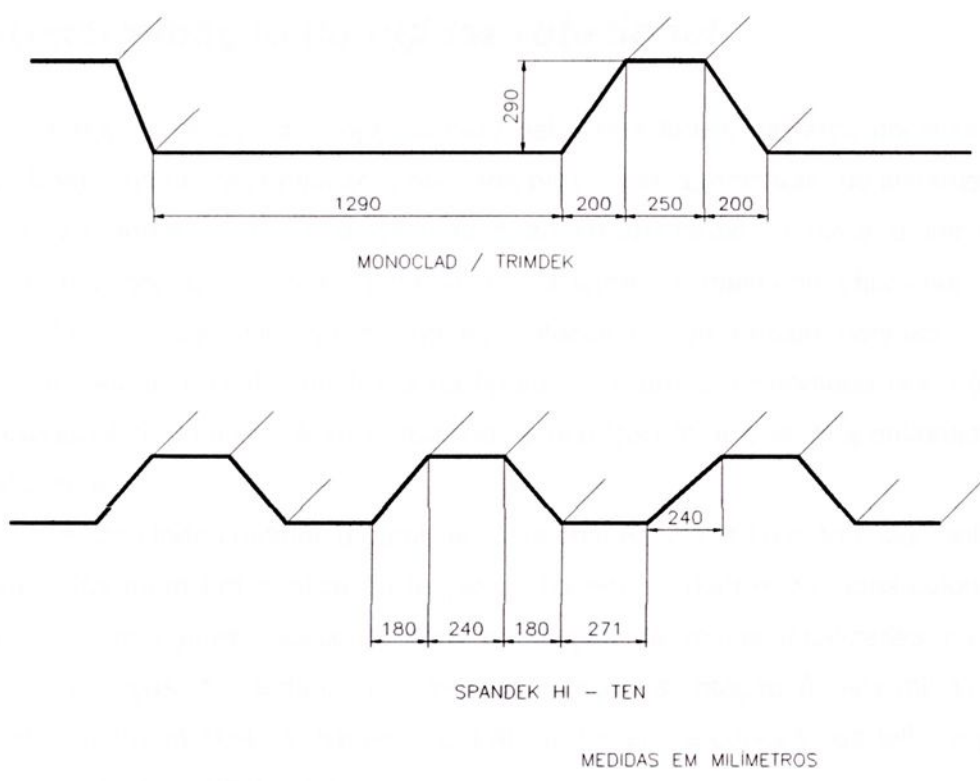


Figura 4.8: Seções transversais das telhas empregadas nas análises de Lucas et al. (1997b)

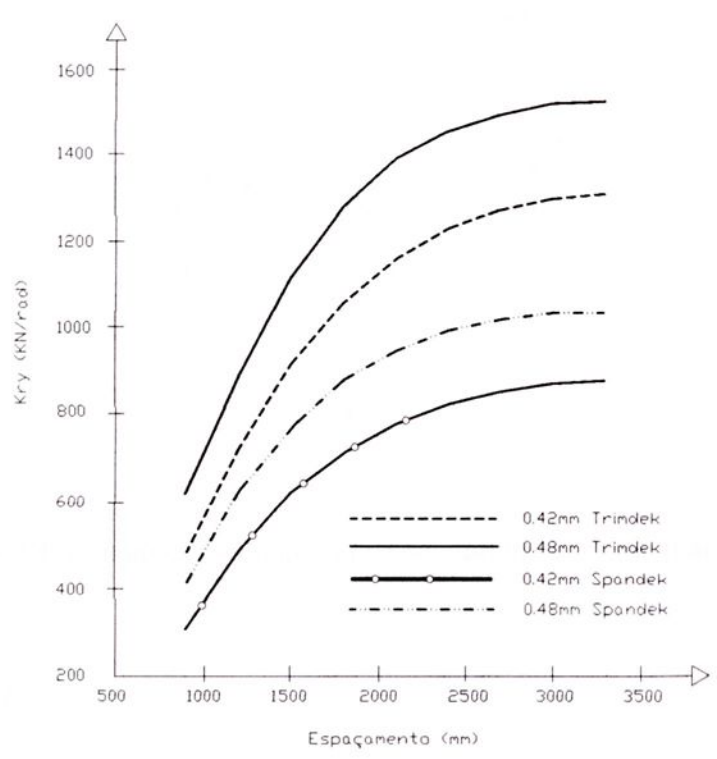


Figura 4.9: Rigidez ao cisalhamento comum para seções de painéis, segundo Lucas et al. (1997b)



4.3-Determinação da rigidez rotacional

A rigidez rotacional proporcionada pela telha fixada na terça constitui-se de um parâmetro bastante complexo, pois varia para cada combinação do sistema telha-terça. Diferentemente do caso da rigidez ao cisalhamento, a terça é sensível a restrição rotacional dentro da faixa de seções de telhas normalmente utilizadas.

Para a determinação da rigidez rotacional, um ensaio conhecido como "Torsional Restraint Test", mostrado na figura 4.10, tem sido adotado por inúmeros pesquisadores de maneira a se determinar a restrição rotacional proporcionada pela telha na terça.

Os resultados obtidos a partir do "Torsional Restraint Test" têm sido aplicados para modelos tanto em análise de terças como em elementos de vigas-colunas, ou convertidos em rigidez rotacional para translação de molas localizadas na mesa inferior das terças. No entanto o valor da restrição a rotação é determinada pelo "Torsional Restraint Test", considerando para a rigidez na conexão da telha e para a rigidez à flexão da alma da terça.

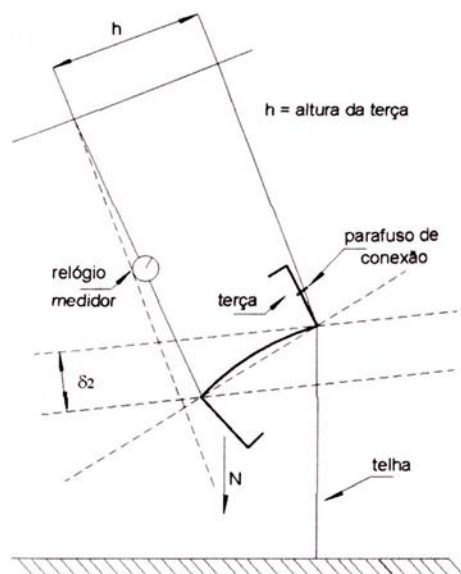


Figura 4.10: Ensaio de restrição à torção, segundo Lucas et al. (1997b)

$$K_{rx} = \frac{N}{\delta_2} \cdot h^2 \quad 4.2$$

Com referência à figura 4.10 a restrição rotacional K_{rx} pode ser obtida como sendo "N" a carga por unidade de comprimento da terça, δ_2 é a deslocamento vertical

medido com o relógio comparador da mesa não conectada sob aplicação da carga e “h” é a altura da terça (alma do perfil).

Os valores da rigidez rotacional efetuado através destas análises são mostrados na tabela 4.2, onde primeiramente obtém a rigidez variando os tipos de telha e terça, demonstrado na tabela 4.2 a), e na tabela 4.2 b) descreve os resultado da rigidez variando o espaçamento entre as terças.

Tabela 4. 2: Variação da restrição rotacional em função do tipo de terça e telha, e também do espaçamento entre terças, obtido por Lucas et al. (1997b)

a) Variação da seção da telha com a seção “U” 200-24; seção “Z” 200-24; Telha com largura de 1200mm

Seção da telha	K_{rx} (N/rad) “U”	K_{rx} (N/rad) “Z”
0.42mm Trimdek	753.7	980.8
0.48mm Trimdek	754.6	981.4
0.42mm Spandek	860.6	1104.0
0.48mm Spandek	860.6	1104.0

b) Variação com o espaçamento da telha com a seção “Z” 200-15; Telha com espessura de 0.42mm Trimdek

Largura (mm)	K_{rx} (N/rad)
900	978.9
1200	980.8
1500	982.2
1800	983.5
2100	985.0
2400	986.7
3000	990.0



4.4-Avaliação do sistema telha-terça

Javaroni (1999) estudou perfis conectados à telha trapezoidal de aço realizado por meio de uma caixa de sucção projetada com módulos de 1 metro por 6 metros sendo possíveis ensaios de dimensões de até 6 metros por 12 metros como mostra a figura 4.11.

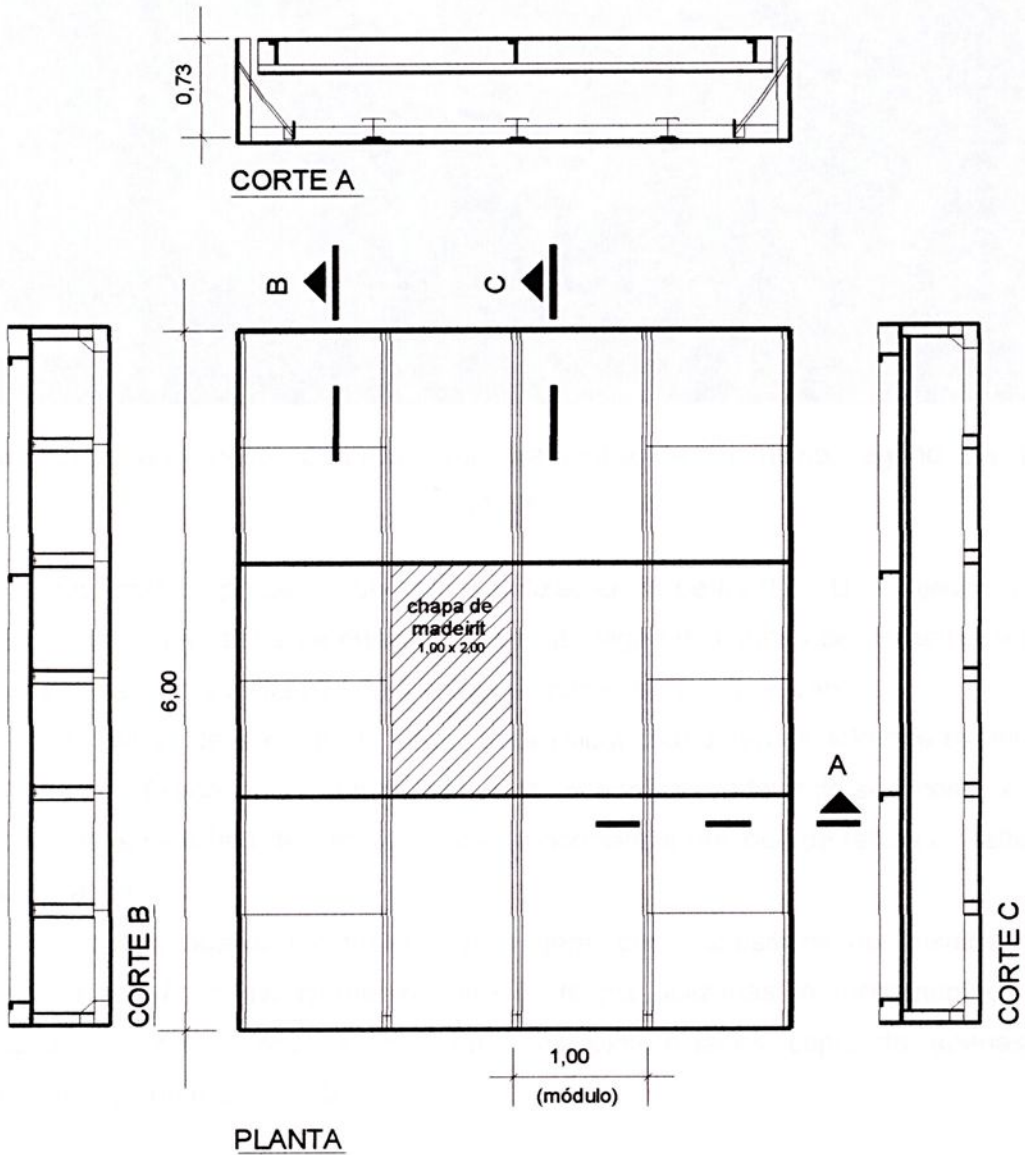


Figura 4.11: Caixa de sucção: Dimensões gerais, segundo Javaroni (1999)

O efeito do carregamento de sucção e gravitacional fez-se por meio da diferença entre a pressão interna e externa, com a caixa devidamente vedada, como mostra a figura 4.12.



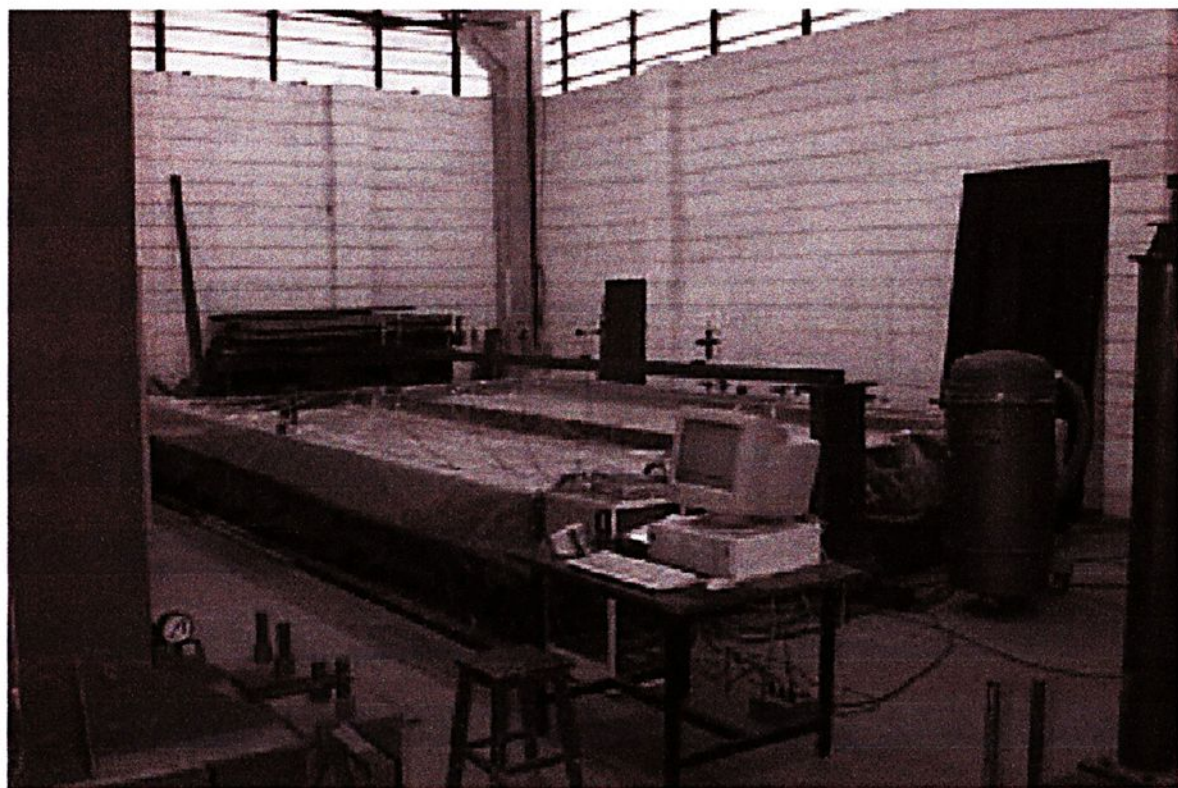


Figura 4.12: Caixa de sucção preparada para o início de um ensaio, segundo Javaroni (1999)

Os ensaios procedeu-se com a utilização de perfis “U”, “U” enrijecido e “Z” enrijecido, com uma série de ensaios sem a utilização das linhas de correntes e uma segunda série com a utilização de 2 linhas de correntes a 1/3 de vão.

As telhas de aço são de seção trapezoidal com altura de 40mm e espessura de 0,65mm fixada por parafusos auto-brocantes, adotando-se com essas características pelo fato de não se desejar a ocorrência precoce de falhas na telha ou na sua fixação.

A figura abaixo mostra o arranjo geral dos dispositivos de ensaios e as dimensões de vão e espaçamento entre as terças utilizadas. A instrumentação foi realizada no perfil central e os perfis das extremidades captando apenas os deslocamentos no meio do vão.



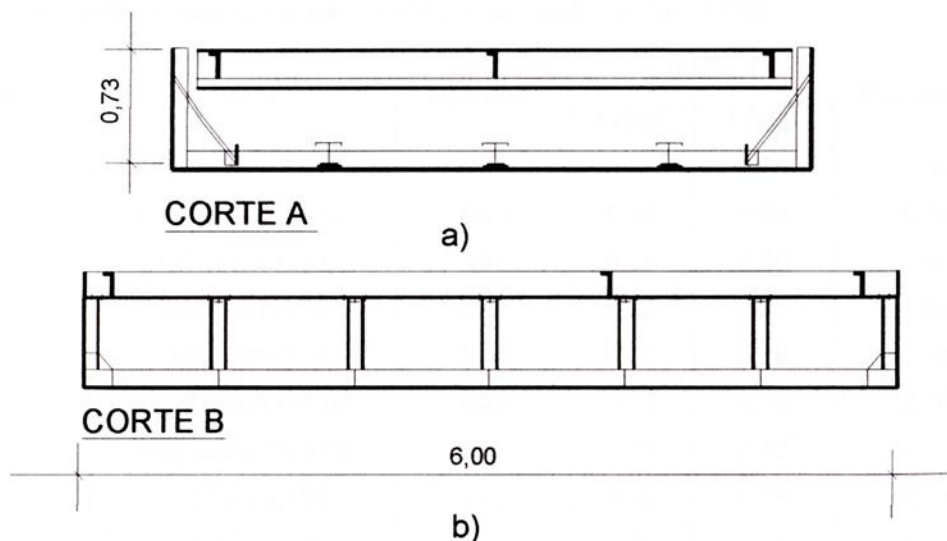


Figura 4.13: Caixa de sucção – dimensões gerais: (a) Corte transversal. (b) Corte longitudinal, segundo Javaroni (1999)

Na tabela a seguir apresentam-se os resultados dos deslocamentos e a pressão aplicada nos ensaios. Para efeito de comparação dos valores obtidos, essa pressão está referida a dois valores relativos da flecha: o primeiro para uma flecha igual a $1/180$ do vão (31,22 mm) e o segundo, para uma flecha igual a $1/100$ do vão (56,2 mm).

A utilização desses dois valores justifica-se tendo em vista que o primeiro é utilizado como limite de deslocamento máximo para terças enquanto o segundo admite-se como sendo aquele para o qual tem-se o prejuízo do uso da estrutura, caracterizando-se a sua falha.

O valor do momento fletor na seção do meio do vão, M_{ref} , corresponde ao valor da pressão para $1/100$ do vão. Este momento é o de um carregamento uniformemente distribuído ao longo do comprimento do perfil, cujo valor é obtido pelo produto entre o valor da pressão de referência e a largura de influência para o perfil. Esta largura de influência foi determinada a partir dos deslocamentos verticais medidos no meio do vão para os perfis laterais e para o perfil instrumentado.

Tabela 4. 3: Pressão de referência para as terças, segundo Javaroni (1999)

Ensaio	Perfil	Corrente	p (kN/m ²)		M _{ref} (kN.m)
			L/180	L/100	
1	U127x50x3,00	Não	0,65	0,85	4,30
2	U127x50x17x3,00	Não	0,60	0,93	5,65
3	Z127x50x17x3,00	Não	0,50	0,80	3,60
4	U127x50x3,00	Não	0,40	0,61	3,09
5	U127x50x3,00	Não	0,30	0,50	2,53
6	U127x50x17x3,00	Não	0,33	0,55	2,78
7	U127x50x17x3,00	Não	0,31	0,52	2,15
8	U127x50x2,25	Sim	0,50	0,75	4,74
9	U127x50x2,25	Sim	0,20	0,65	4,41
10	U127x50x2,25	Sim	0,50	0,75	4,62
11	U127x50x3,00	Sim	0,55	1,00	6,87
12	Z127x50x17x2,25	Sim	0,45	0,80	5,81
13	Z127x50x17x2,25	Sim	0,45	0,80	5,81
14	Z127x50x17x3,00	Sim	0,54	0,96	8,03
15	Z127x50x17x3,00	Sim	0,54	0,98	8,20

M_{ref} corresponde ao valor de p para L/100.

Da Tabela 4.3 pode-se observar dispersões nos valores de "p" para os mesmos tipos de perfis correspondentes ao limite de deslocamento L/180. Tal fato pode ser justificado pelo grande número de variáveis envolvidas no problema.

Em uma outra investigação experimental Chung & Quinton (1996) estudaram o comportamento estrutural das terças quando contidas lateralmente pela fixação de telhas sanduíche com camadas de isolamento térmico. Foram realizadas três séries de ensaios em protótipos do sistema telha-terça, considerando as terças com dois e três apoios. As seções transversais da terça considerada foram em "Z" e "Sigma" com as condições de carregamento de peso próprio e sucção.

Esta investigação experimental procurou confirmar os efeitos de estabilidade da terça devido a grande utilização prática do uso de diferentes formas e tamanhos de telhas sanduíches; e a utilização de clips de fixação com diferentes alturas para o sistema telha-terça, conforme se observa na figura 4.14.



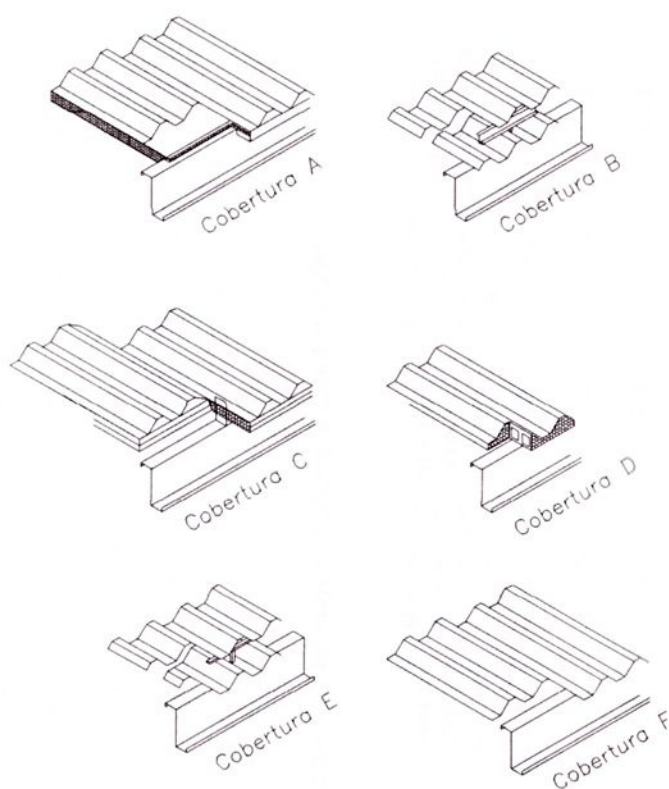


Figura 4.14: Sistemas de cobertura analisados, segundo Chung & Quinton (1996)

Nos teste de protótipos realizados por Chung & Quinton (1996) na investigação do sistema telha-terça, procedeu-se no equipamento de teste a vácuo permitindo uma capacidade de carregamento de 8KN/m^2 .

Os testes S1 a S6, estão configurados para espaçamentos simples na verificação das restrições lateral e rotacional em diferentes sistemas de telha-terça.

O protótipo é equipado com duas terça com 6 metros de comprimento e 1.5 metros de largura e com o painel de 6 metros de comprimento e 1.8 metros de largura, sendo ambas as terças simplesmente apoiadas e com quatro células de carga usada para medir as reações dos apoios e as medidas de deslocamentos lineares captadas por transdutor, posicionados na mesa do perfil disposto no meio do vão da terça, estas condições foram aplicadas para análises sob carregamento de sucção e gravitacional.

Os resultados destes ensaios estão relacionados nas tabelas 4.4 e 4.5.

Teste	Sistema cobertura /seção da terça	Local do colapso	M ax. Carreg. imposto (KN)	Modo de falha	Peso próprio (KN)	Carreg. total por espaçamento (KN/m)	Momento resistente (KN/m)	Medida da tensão de escoamento (N/mm ²)	Medida da espessura (mm)	Momento normal resistente (KN/m)	Razão da resistência
S1	Cobertura A/ seção "Z"	Sul	20,97	A	0,56	21,53	16,15	359	2,00	15,42	0,93
S2	Cobertura B/ seção "Z"	Sul	24,67	B	0,72	25,39	19,04	361	2,00	18,09	1,09
S3	Cobertura C/ seção "Z"	Norte	17,46	C	0,56	18,02	13,52	377	1,96	12,55	0,76
S4	Cobertura D/ seção "Z"	Norte	19,90	C	0,80	20,70	15,53	371	1,96	14,65	0,89
S5	Cobertura E/ seção "Z"	Norte	25,00	B	0,72	25,72	19,29	371	1,97	18,11	1,10
S6	Cobertura F/ seção "Z"	Norte	22,77	B	0,56	23,33	17,50	356	2,00	16,85	1,02
-	-	-	-	-	-	-	-	350	1,96	16,54	1,00

Tabela 4. 5: Resultados do teste com espaçamento simples sobre condições de carregamento de sucção, segundo Chung & Quinton (1996)

Teste	Sistema cobertura /seção da terça	Local do colapso	M ax. Carreg. imposto (KN)	Modo de falha	Peso próprio (KN)	Carreg. total por espaçamento (KN/m)	Momento resistente (KN/m)	Medida da tensão de escoamento (N/mm ²)	Medida da espessura (mm)	Momento normal resistente (KN/m)	Razão da resistência
S1	Cobertura A/ seção "Sigma"	Norte	10,76	A	0,56	11,32	8,49	411	1,96	7,23	0,40
S2	Cobertura B/ seção "Z"	Norte	16,56	A	0,72	17,28	12,96	379	1,99	11,79	0,71
S3	Cobertura B/ seção "Sigma"	Norte	10,86	A	0,72	11,58	8,69	391	1,93	7,90	0,44
S4	Cobertura B/ sag bars seção "Z"	Norte	19,51	A	0,72	20,30	15,02	378	1,99	13,70	0,83
S5	Cobertura C/ seção "Sigma"	Sul	15,34	A	0,56	15,90	11,93	413	1,97	10,05	0,55
S6	Cobertura D/ seção "Sigma"	Norte	14,90	A	0,80	15,70	11,78	412	1,96	10,01	0,55
-	-	-	-	-	-	-	-	350	1,96	16,54	1,00
-	-	-	-	-	-	-	-	350	1,96	18,17	1,00

Nos testes foram identificados três tipos de falhas descritas a seguir:

Modelo A: flambagem torcional lateral quando a fixação do sistema de cobertura pode não ter proporcionado uma restrição completa para o membro da terça.

Modelo B: falha na flexão no meio do vão quando a terça é totalmente restringida.

Modelo C: falha do clips de fixação entre o sistema de cobertura e a seção da terça.

Zhi-ming Ye et al. (2002), estudaram a influência dos modelos de flambagem no sistema telha-terça sobre a ação de carregamento de sucção e a restrição a translação e rotação proporcionada pela telha na terça, representado por meio de molas, usando-se método das faixas finitas, calculando a tensão crítica de acordo com as análises de flambagem.

Os resultados obtidos deste estudo comprovam que para ambas, a flambagem distorcional e lateral, a restrição tem uma influência significativa na determinação do carregamento crítico e tensão crítica, não implicando com os modos de flambagem, enquanto para flambagem lateral-torsional a influência das restrições está ligada diretamente a determinação do carregamento crítico, influenciando principalmente os modos de flambagem não atenuando as tensões críticas.

Nas simulações Zhi-ming Ye et al. (2002), considera terças de seções "Z" e com comprimento de cinco metros, relacionando quatro diferentes combinações das restrições com três tipos diferentes de carregamento sendo todos eles uniformemente distribuídos variando somente o ponto de aplicação "a" com relação à linha de referência do eixo "Z" da seção transversal da terça, pois os pontos de aplicação dos efeitos de molas estão relacionados com o centro de cisalhamento da seção, como mostra figura a seguir.



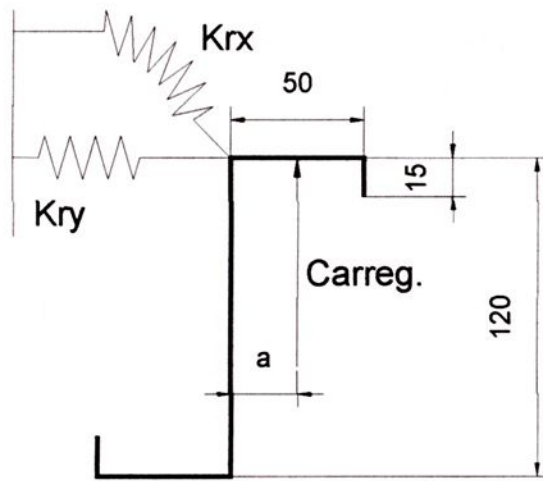


Figura 4.15: Representação do modelo analítico e dimensões da terça utilizada por Zhi-ming Ye et al. (2002) modificado

Na figura a seguir estão relacionadas os tipos de combinações de restrições e carregamentos obtidos por Zhi-ming Ye et al. (2002), mostrando-se as diferentes condições de carregamento e casos de restrição e a normalização da tensão crítica distribuída na seção transversal da terça quando submetida a um carregamento uniformemente distribuído de sucção. Todas as tensões estão normalizadas com a tensão máxima de compressão no caso de $a=b/2$ e $K_{ry} = k_{rx} = \infty$.

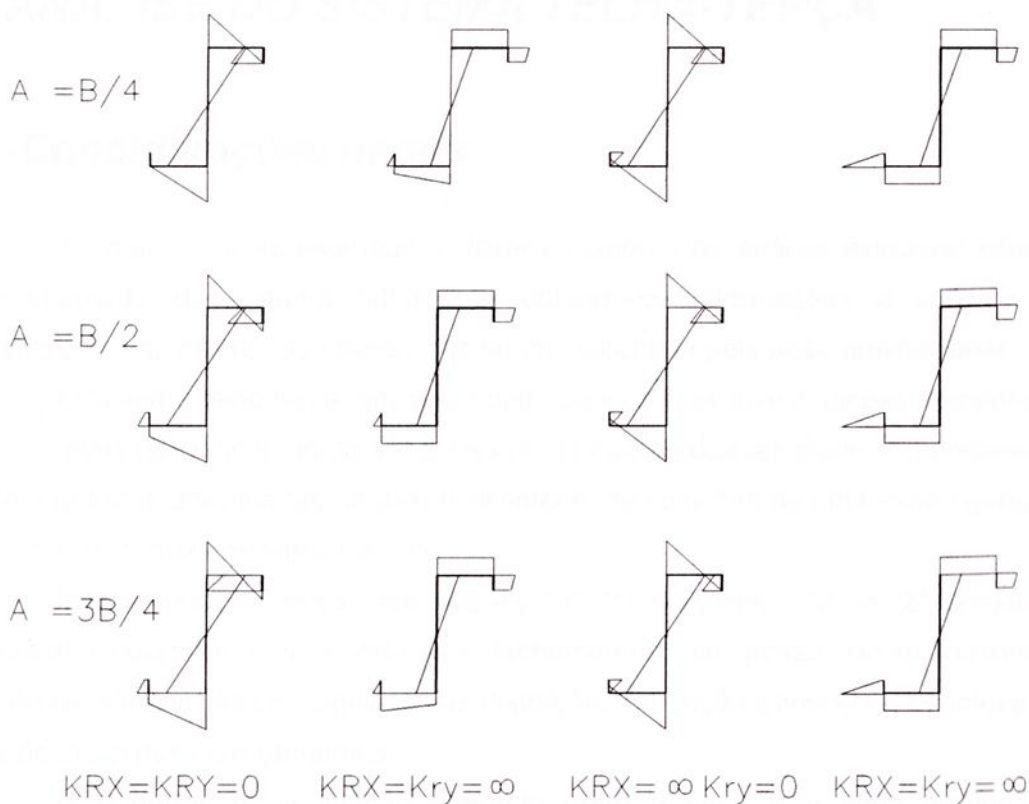


Figura 4.16: Distribuição da tensão crítica pra os diferentes tipos de carregamento e casos de restrição com $L = 5m$, segundo Zhi-ming Ye et al. (2002)

Tabela 4. 6: Tensão máxima compressão normalizada, segundo Zhi-ming Ye et al. (2002)

Caso	$K_{rx}=k_{ry}=0$	$K_{rx}=0, k_{ry}=\infty$	$K_{rx}=\infty, k_{ry}=0$	$K_{rx}=\infty, k_{ry}=\infty$
$a=b/4$	2.2756	1.1732	2.2756	1.0000
$a=b/2$	2.5563	1.0978	2.2756	-
$a=3b/4$	2.3229	1.7689	2.2756	1.0000

Pode-se notar na figura 4.16 e na tabela 4.6 as constantes de molas têm uma influência significativa no valor da tensão máxima de compressão e também na distribuição das tensões.

Com base nos trabalhos relatados neste capítulo conseguiu-se um direcionamento nas pesquisas e a possibilidade de calibração do modelo adotado, verificando-se assim a validade do modelo ensaiado.



5- ANÁLISE DO SISTEMA TELHA-TERÇA

5.1-Considerações gerais

A seguir será apresentado o desenvolvimento da análise estrutural sobre o comportamento do sistema telha-terça obtendo-se informações a respeito da contenção lateral das terças através das telhas, solicitada pela ação gravitacional.

O sistema telha-terça tem sido objeto de inúmeras investigações numéricas e experimentais nos últimos trinta anos. Devido às complexidades deste comportamento existem grandes dificuldades no desenvolvimento de soluções de um modelo geral, as quais possuem duas principais linhas.

Inicialmente, as terças em seções "U", "U enrijecido", "Z" e "Z" enrijecido, comumente utilizadas nas coberturas e fechamentos, não possui seção transversal com dupla simetria. Assim, significantes distorções da seção transversal acontecem a partir do início dos carregamentos.

Posteriormente, a ligação efetuada entre a terça e a telha proporciona rigidezes ao cisalhamento e rotacional na terça devido à telha dificilmente quantificável.

A rigidez rotacional, em particular, varia de acordo com os tipos de telhas, figuras 3.2, tipos de terças e suas dimensões, figura 2.2, espaçamentos de fixação nas telhas e outros detalhes de ligação.

Diferentes tipos de análises têm sido feita para o estudo do comportamento do sistema telha-terça. Estas análises têm variado de acordo com a natureza da conexão da telha na terça e da natureza da deformação e falha da terça, podendo assim ser agrupadas em três principais características:

- a consideração do efeito da restrição da telha na terça impedindo o deslocamento lateral da terça (rigidez ao cisalhamento), segundo Errera et al. e Ings et al. apud Lucas et al. (1997a). Outras análises mais completas incluem ambas as restrições, do deslocamento lateral e a da rotação sobre o eixo longitudinal da terça, segundo Celebi e Rousch and Hancock apud Lucas et al. (1997a);
- a consideração que a seção transversal da terça permanece indeformada durante o carregamento, segundo Errera et al. e Celebi apud Lucas et al. (1997a) enquanto outras incluem efeitos significativos da distorções da seção transversal da terça, segundo Wikström e Rousch and Hancock apud Lucas et al. (1997a);
- a consideração da ruptura por flambagem na flexo torção, segundo Errera et al. e Ings et al. apud Lucas et al. (1997a) enquanto que recentes análises tem mostrado



um modo de ruptura como sendo uma combinação entre a flambagem local e de distorção e escoamento da seção, segundo Wikström e Rousch and Hancock apud Lucas et al. (1997a).

Algumas pesquisas realizadas na obtenção da contenção lateral da terça proporcionadas pela fixação da telha têm sido efetuadas experimentalmente para cada sistema telha-terça. Este procedimento experimental é freqüentemente simplificados observando-se que a restrição rotacional restringe a mesa fixada, resultando assim em deslocamentos somente da mesa livre e uma pequena parcela da alma.

5.2-Análise numérica

A seguir são apresentadas as etapas desenvolvidas na análise numérica para a verificação da contenção lateral da terça pela telha.

Nas figuras 5.1 e 5.2 mostraremos os tipos de telhas e perfis com as configurações de suas seções transversais que serão empregados nas análises do sistema telha-terça.

A determinação da rigidez ao cisalhamento será obtida através do esquema estrutural, conforme mostra a figura 4.7, e utilizando-se da equação 4.1.

A determinação da rigidez rotacional será obtida através do esquema estrutural, conforme mostra a figura 4.10, e utilizando-se a equação 4.2.

A análise do comportamento global do conjunto telha-terça será efetuada por meio do esquema estrutural apresentado na figura 5.3.

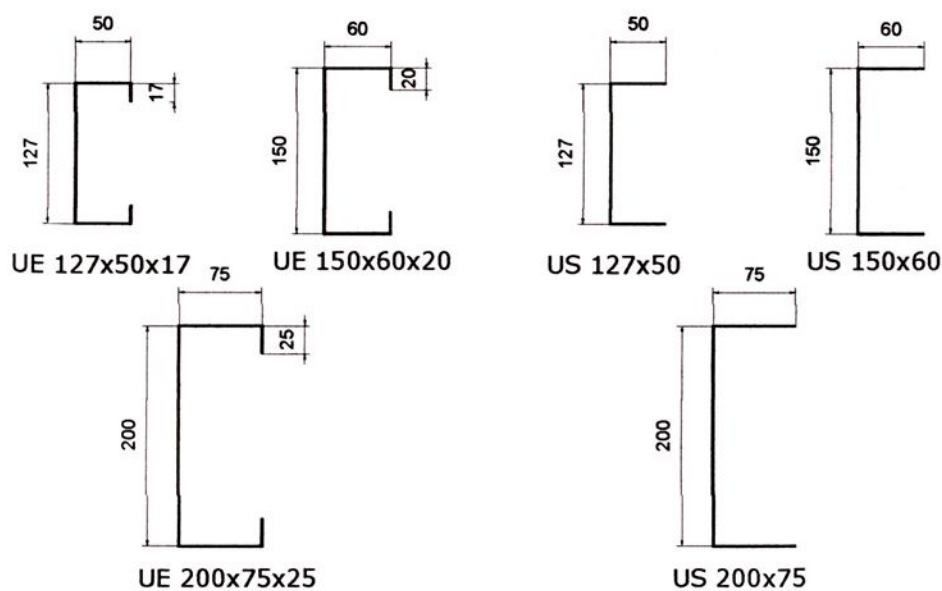


Figura 5.1: Detalhe da seção transversal dos perfis empregados nas análises do sistema telha-terça

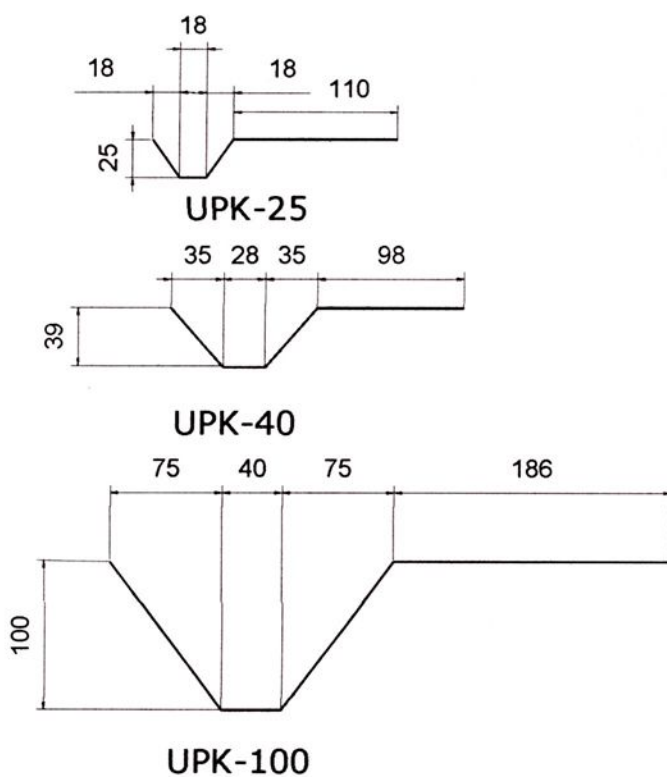


Figura 5.2: Detalhe da seção transversal das telhas empregados nas análises do sistema telha-terça

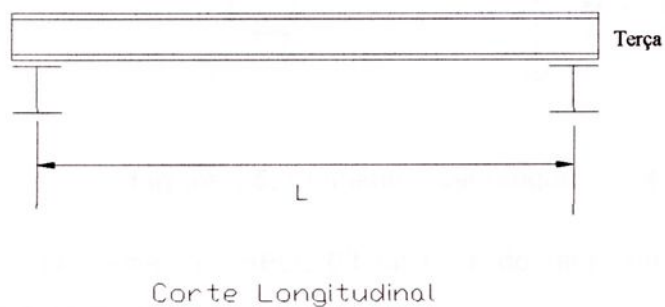
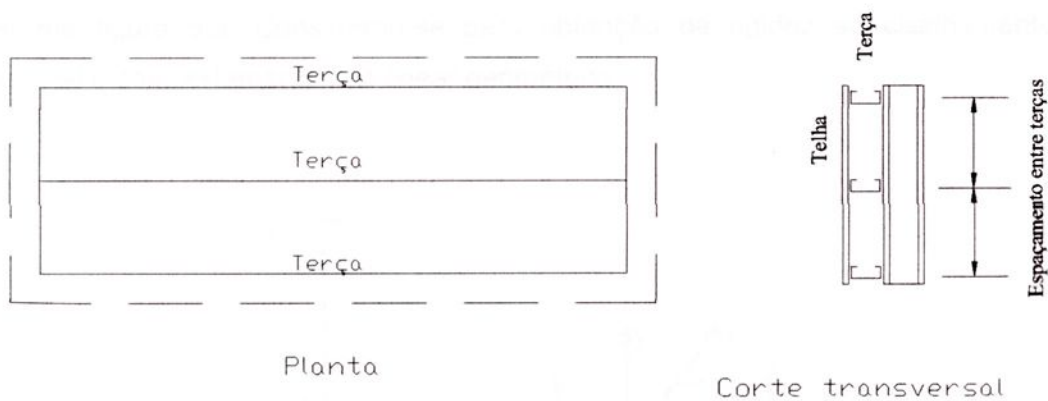


Figura 5.3: Sistema global do conjunto telha-terça

O esquema estático para análise da terça esta mostrado na figura 5.4.

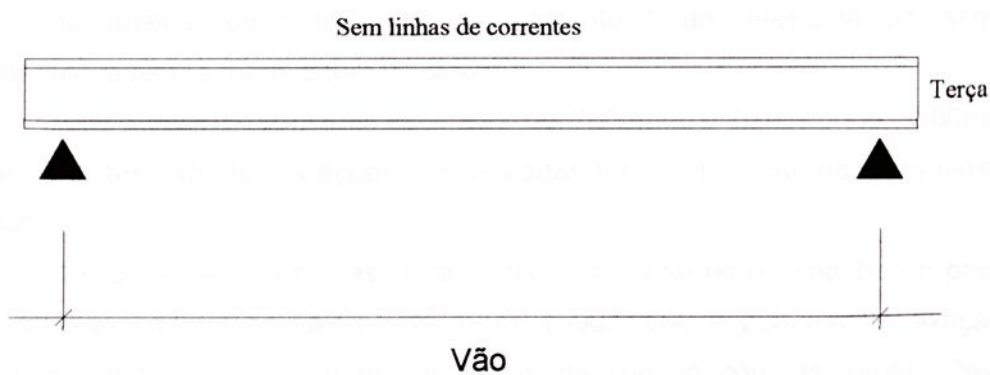


Figura 5.4: Esquema estático da terça

5.2.1- Elemento finito para modelagem do sistema

A análise numérica foi efetuada por meio do programa ANSYS, utilizando-se o elemento da casca (SHELL 63), que possui 4 nós com 6 graus de liberdade por nó,



conforme figura 5.5. Considerou-se para obtenção da rigidez ao cisalhamento e rotacional o comportamento não linear geométrico.

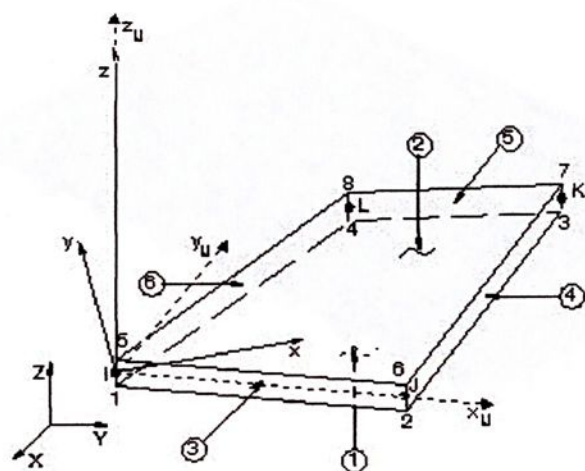


Figura 5.5: Elemento quadrangular de 4 nós do ANSYS

O elemento SHELL 63 foi utilizado tanto na discretização da terça como também da telha.

5.2.2- Modelagem do sistema para análise da rigidez ao cisalhamento

Na análise da rigidez ao cisalhamento foram efetuadas as seguintes considerações para a modelagem do sistema.

Duas terças bi-apoiadas com vão de 7000mm e balanço de 1000mm em ambas as extremidades. As ações concentradas foram aplicadas na extremidade do balanço.

O espaçamento entre as terças tomou-se conforme o tamanho do painel da telha, variando dentro dos valores de 1000, 1500, 2000 e 2500mm. A fixação dos painéis foi considerada em todas as ondas de contato com as terças. Devido à simetria, possibilitou-se a análise de somente metade da estrutura, conforme ilustra a figura 5.6.

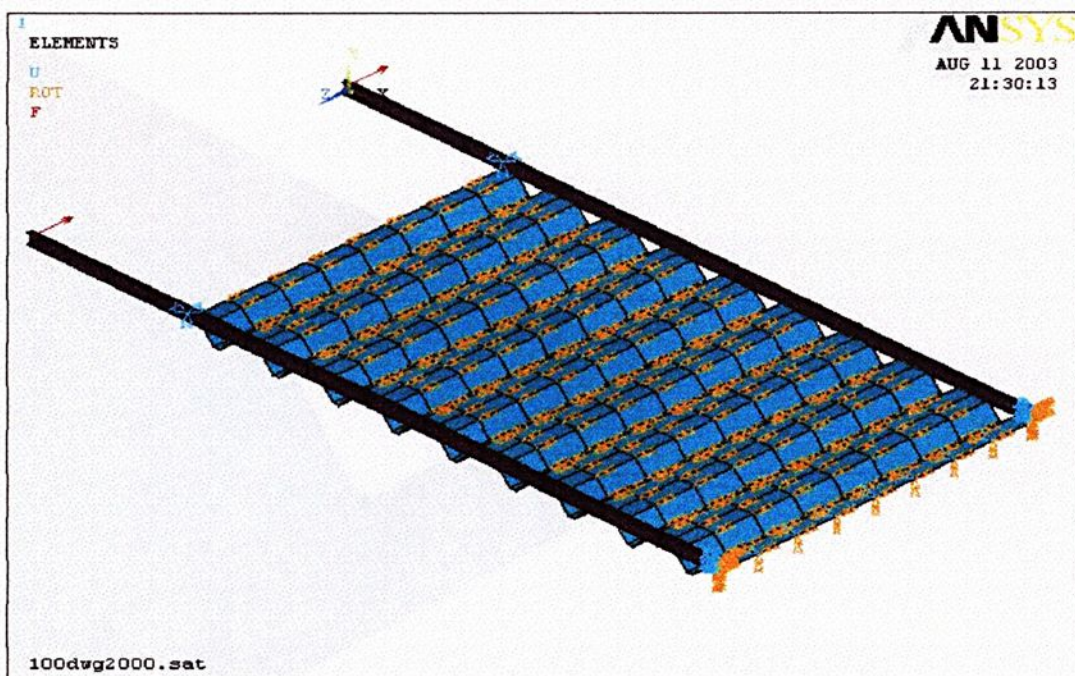


Figura 5.6: Modelagem da meia estrutura adotada nas análise de rigidez ao cisalhamento

Nas figuras a seguir mostraremos em detalhes as condições de restrições impostas no modelo de simulação, ilustrado de forma ampla na figura 5.6.

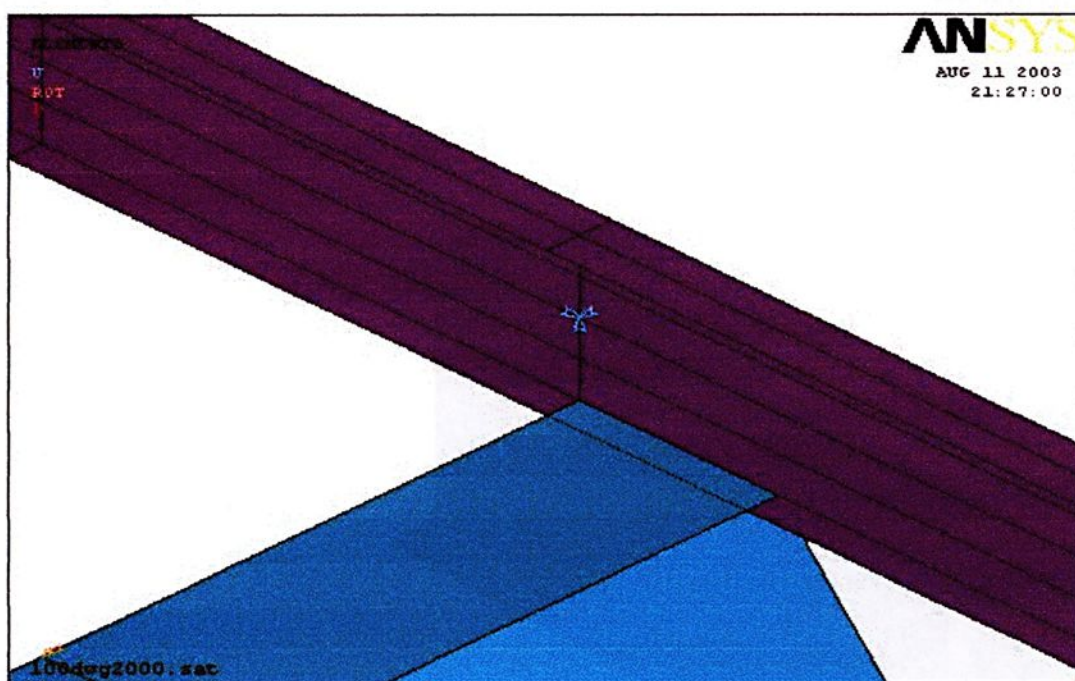


Figura 5.7: Ilustração do apoio fixo do modelo

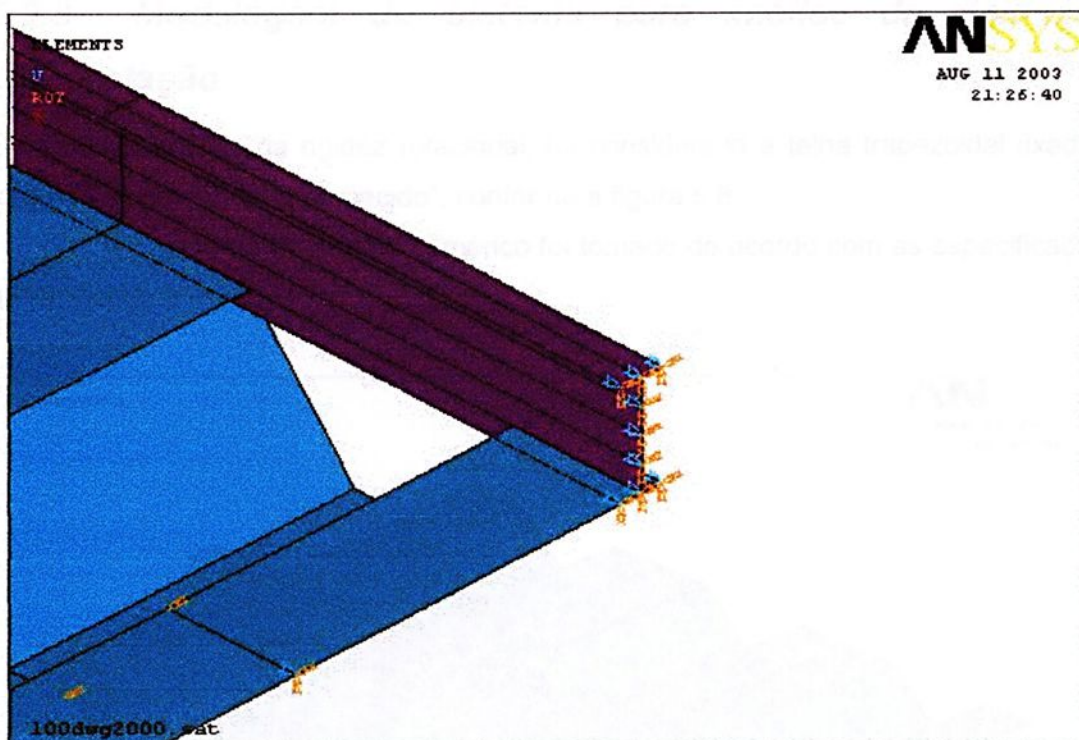


Figura 5.8: Ilustração do engaste móvel simulando a meia estrutura

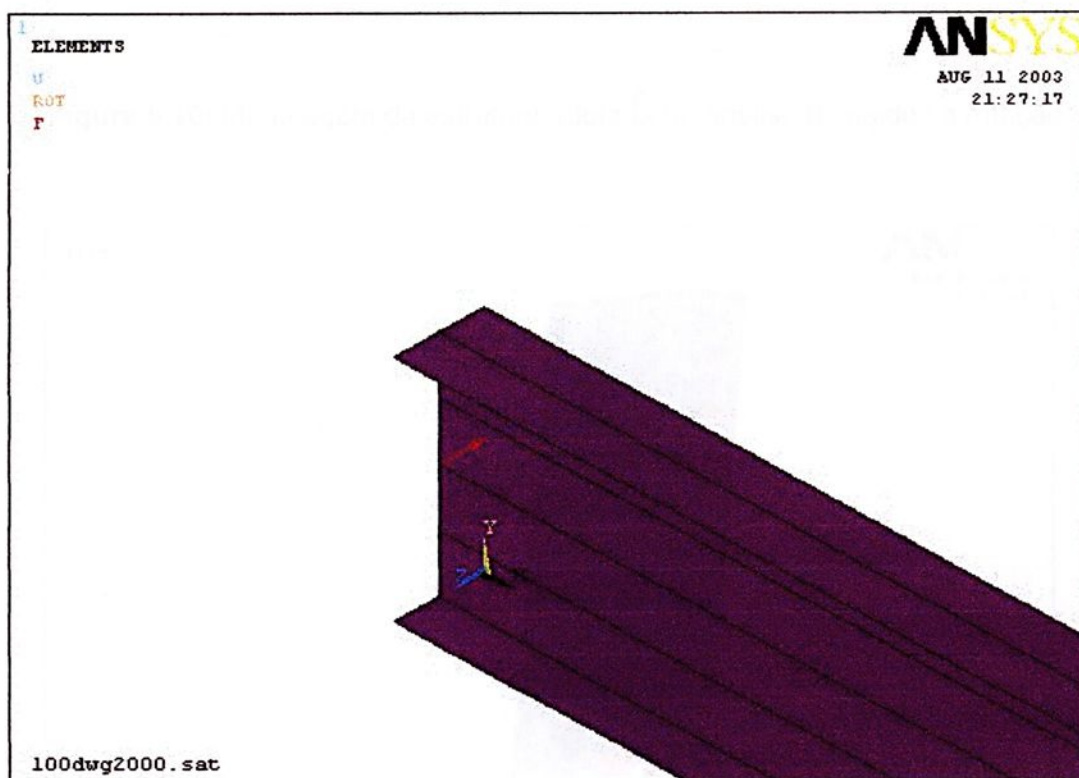


Figura 5.9: Detalhe da extremidade da estrutura mostrando o balanço do modelo e as ações aplicadas

5.2.3- Modelagem do sistema para análise da rigidez a rotação

Na análise da rigidez rotacional, foi considerada a telha trapezoidal fixada a terça de seção "U" e "U enrijecido", conforme a figura 5.8.

A geometria do ensaio numérico foi tomado de acordo com as especificações do Eurocode 3 (1996).

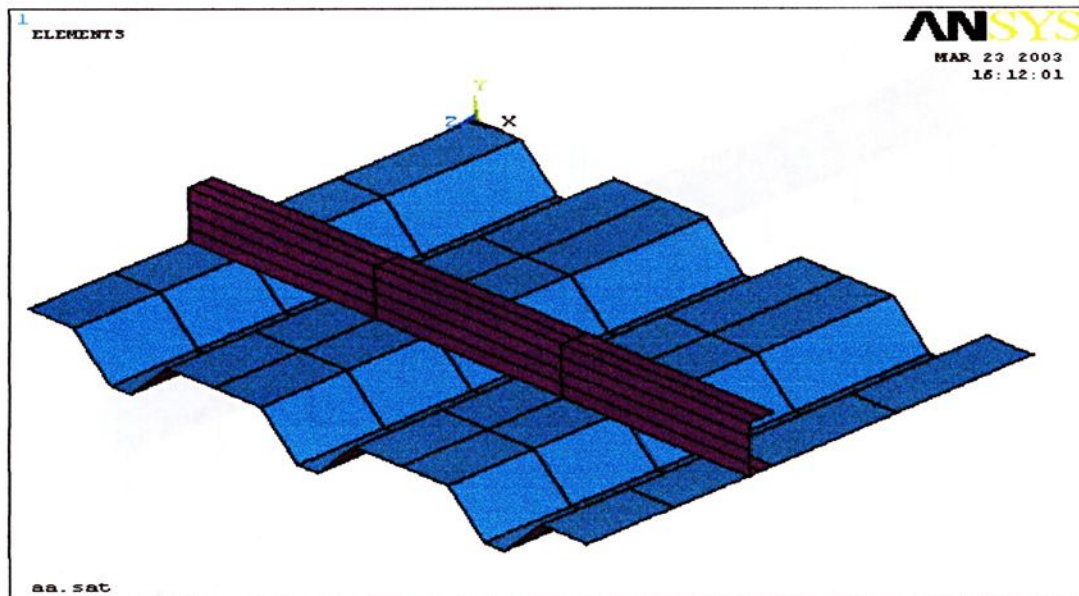


Figura 5.10: Modelagem da estrutura adotada na análise de rigidez a rotação

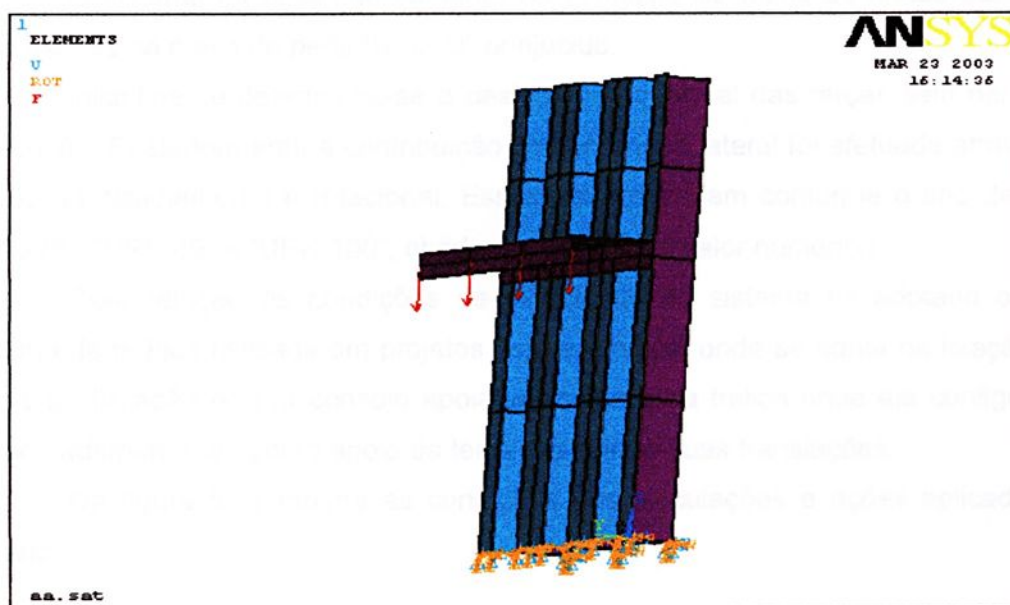


Figura 5.11: Restrições aplicadas ao modelo na obtenção da rigidez rotacional

5.2.4- Modelagem das terças

As terças foram analisadas utilizando-se perfis formados a frio de seção transversal na forma de "U", "U enrijecido", para as alturas de 127, 150 e 200mm conforme a figura 5.10.

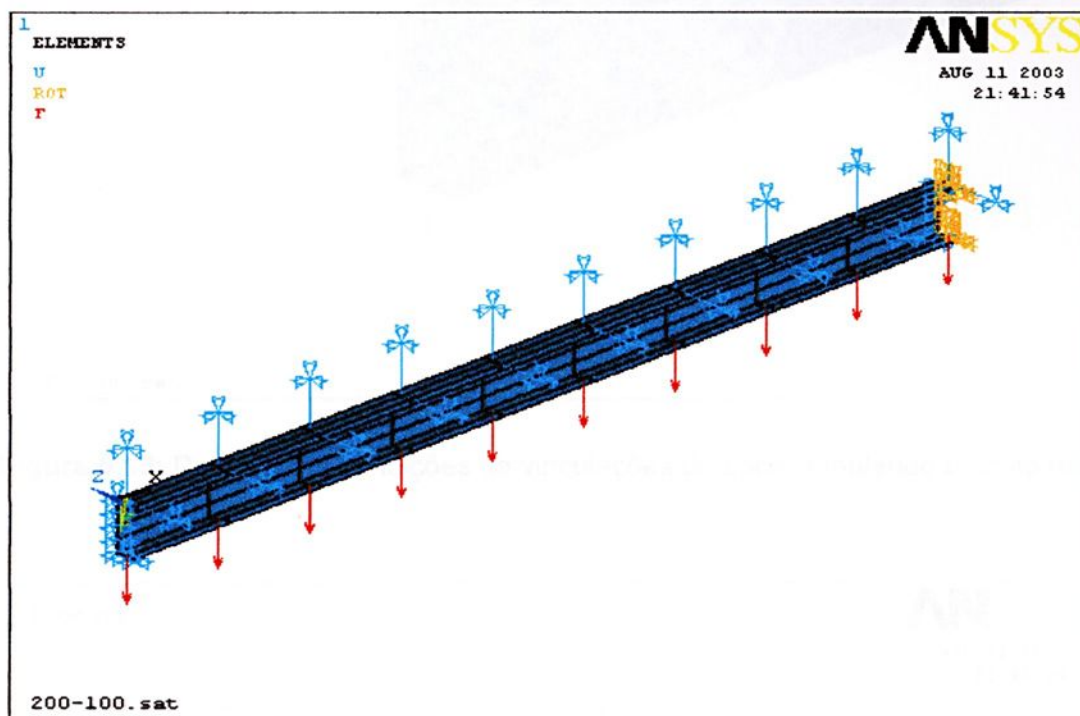


Figura 5.12: Configuração da terça ensaiada

O sistema foi ensaiado somente na condição de todas as ondas baixas da telha fixadas na mesa do perfil "U" e "U" enrijecido.

Inicialmente determinou-se o deslocamento lateral das terças sem nenhuma contenção. Posteriormente a contribuição da contenção lateral foi efetuada através da rigidez ao cisalhamento e rotacional. Esses valores variam conforme o tipo de telha "UPK-25", "UPK-40" e "UPK-100", obtido a partir de um valor numérico.

Com relação às condições de vinculação do sistema foi adotado o mais próximo da prática utilizada em projetos convencionais, onde se adota na fixação das terças a utilização de um consolo apoiado em cima da treliça onde ele configura-se aproximadamente um ponto apoio da terça impedindo suas translações.

Na figura 5.11 mostra as condições das vinculações e ações aplicadas no modelo.

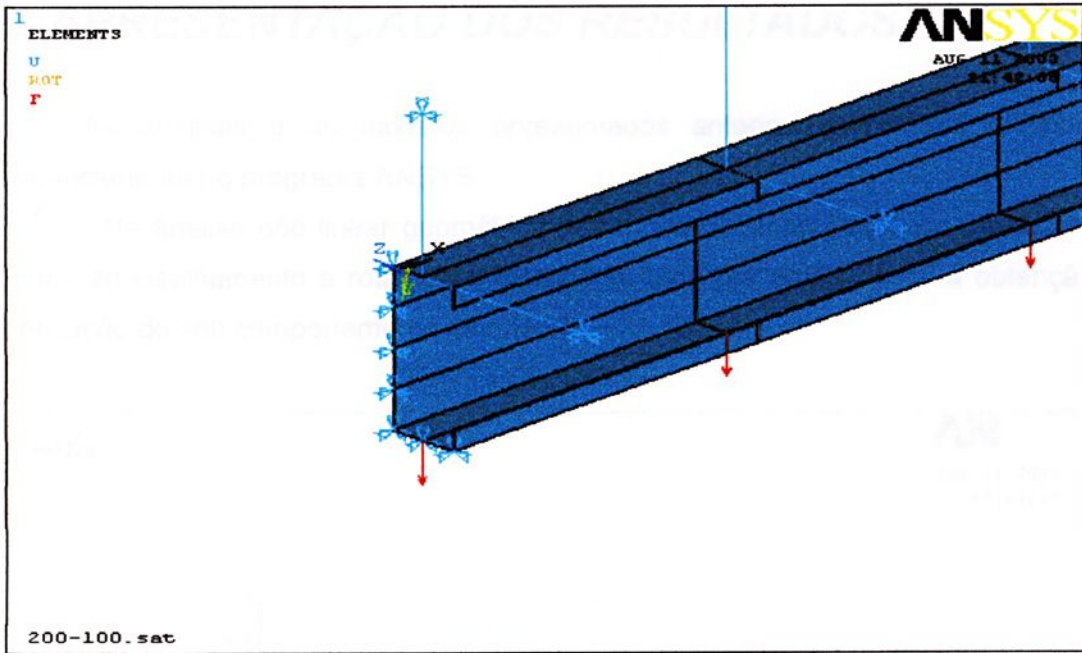


Figura 5.13: Detalhe das condições de vinculações de apoio simulando o efeito garfo

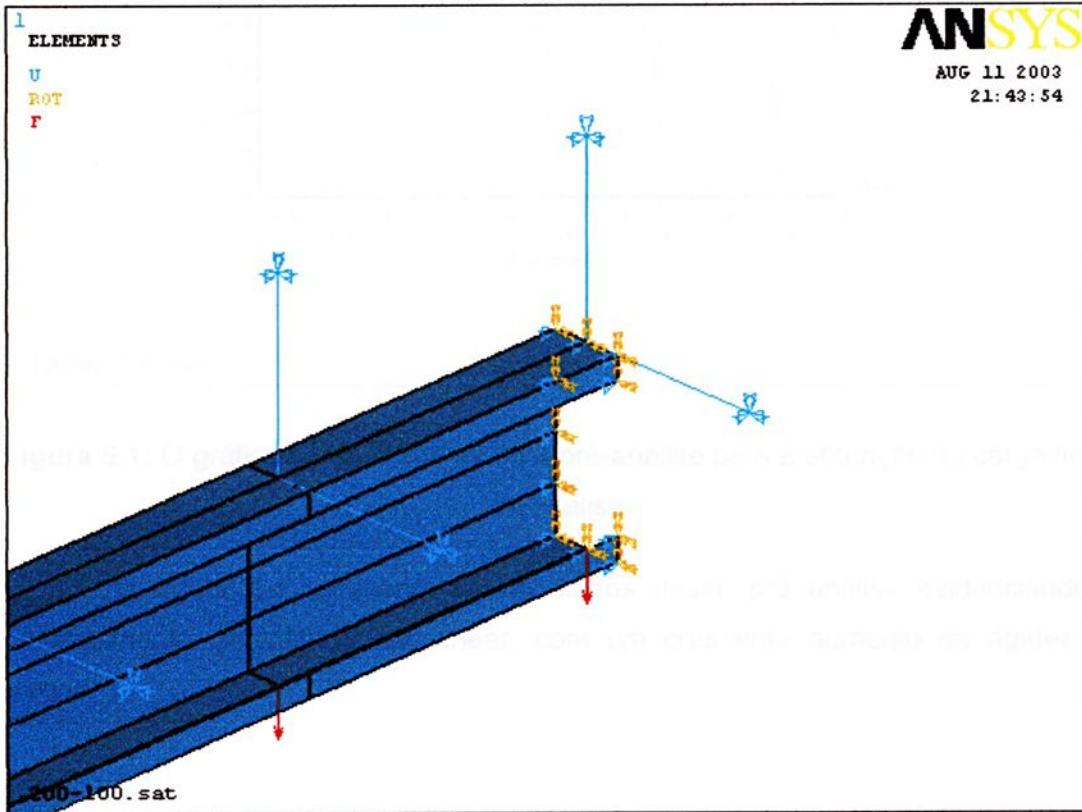


Figura 5.14: Detalhe das condições de vinculações de engaste móvel na extremidade simulando meia estrutura

6- APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

As análises e os modelos apresentados anteriormente foram ensaiados numericamente no programa ANSYS.

Na análise não linear geométrica dos modelos empregados na obtenção da rigidez ao cisalhamento e rotacional, efetuou-se uma pré análise para a obtenção e verificação do seu comportamento estrutural.

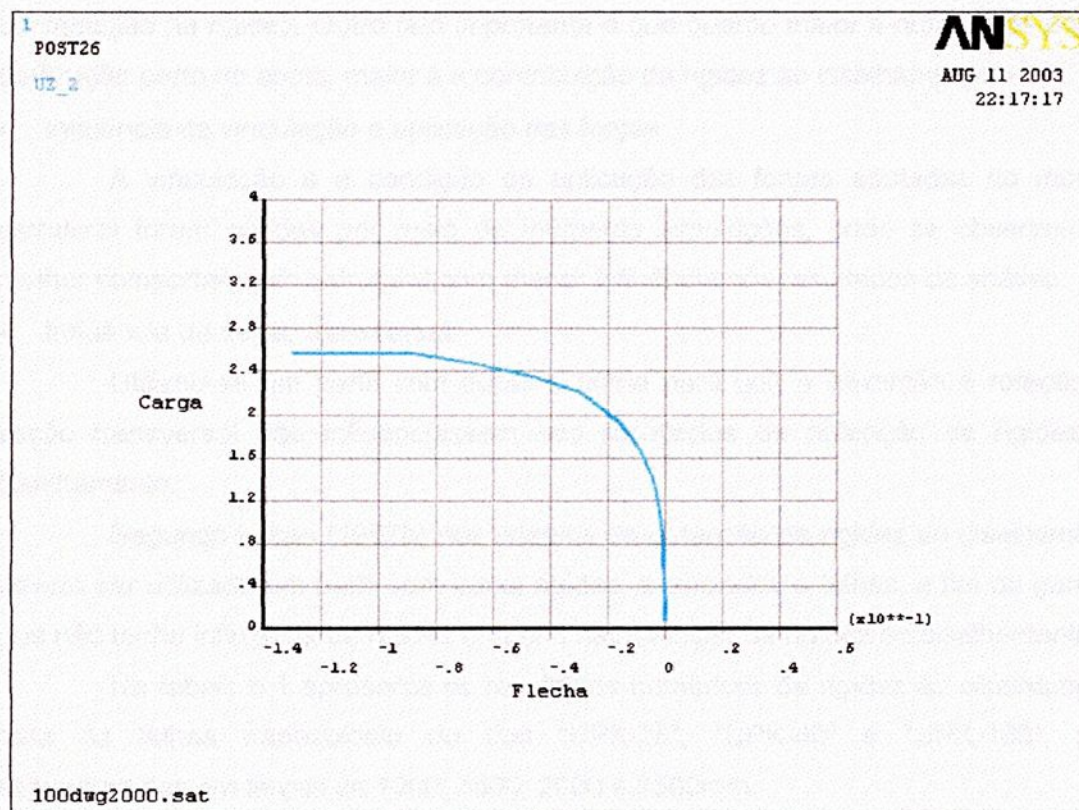


Figura 6.1: O gráfico carga-fecha de uma pré-análise para a obtenção da carga final de análise

Na figura 6.1 apresenta os resultados dessa pré análise evidenciando o comportamento geométrico não linear, com um crescente aumento da rigidez do sistema.



6.1-Rigidez ao cisalhamento

Na determinação da rigidez ao cisalhamento observaram-se algumas influências relevantes na sua obtenção. A seguir serão apresentados alguns parâmetros que mais influenciaram nesta quantificação.

- Influência de pontos de fixação do conjunto telha-terça

A quantidade de pontos de fixação da telha na terça tem uma influência significativa na rigidez ao cisalhamento, quanto mais pontos de fixação maior a contribuição na rigidez. Outro fato importante é que quanto maior o número de pontos de fixação perto do apoio, maior é a contribuição da rigidez ao cisalhamento.

- Influência da vinculação e aplicação das forças

A vinculação e a condição de aplicação das forças adotadas no modelo estrutural foram obtidas por meio de inúmeras simulações, onde se observou um melhor comportamento estrutural com menor influência nos resultados da análise.

- Influência da seção transversal

Utilizou-se um perfil com dupla simetria para que a distorção e rotação da seção transversal não influenciassem nos resultados da obtenção da rigidez ao cisalhamento.

Segundo Lucas (1997b) nos ensaios da obtenção da rigidez ao cisalhamento deverá ser utilizado um perfil com baixa rigidez, associados a telhas, a fim de garantir que não tenha influência da rigidez do perfil na obtenção da rigidez ao cisalhamento.

Na tabela 6.1 apresenta os resultados numéricos da rigidez ao cisalhamento para as telhas trapezoidais do tipo "UPK-25", "UPK-40" e "UPK-100", com espaçamentos em terças de 1000, 1500, 2000 e 2500mm.



Tabela 6. 1: Tabela com resultados da rigidez ao cisalhamento obtido nos ensaios

	RIGIDEZ AO CISALHAMENTO kN/rad)				
	ESP.(mm)	L=1000	L=1500	L=2000	L=2500
UPK-25	0.50	35.41	72.61	91.06	104.66
	0.65	49.74	81.35	96.37	106.16
	0.80	58.50	83.64	101.87	110.72
UPK-40	0.50	84.44	101.08	139.11	141.48
	0.65	85.78	96.52	144.04	152.80
	0.80	89.35	101.06	159.17	173.64
UPK-100	0.50	29.45	57.26	90.59	124.36
	0.65	41.22	79.07	119.40	158.82
	0.80	54.78	101.32	147.90	190.13

Estes resultados estão ilustrados na figura 6.2, 6.3 e 6.4.

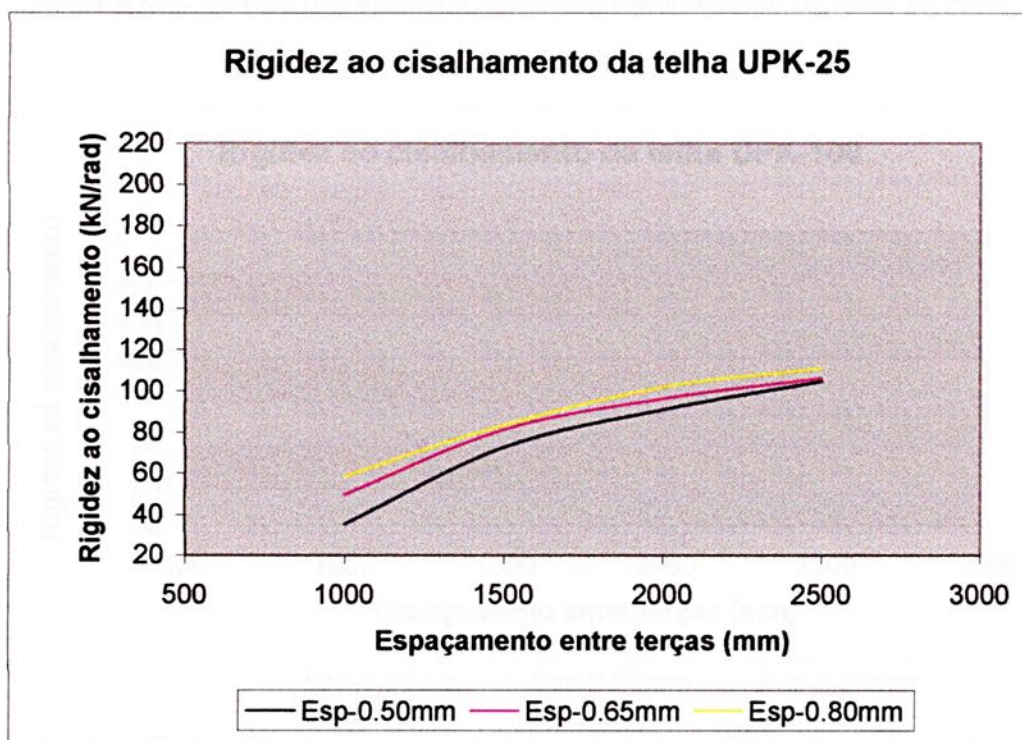


Figura 6.2: Gráfico representa a rigidez ao cisalhamento da telha UPK-25

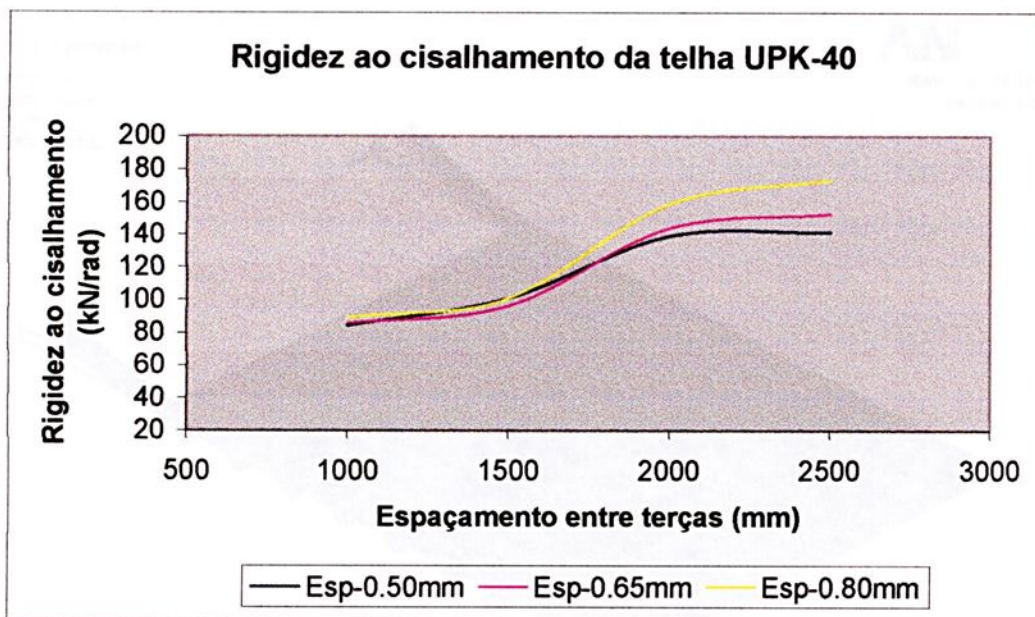


Figura 6.3: Gráfico representa a rigidez ao cisalhamento da telha UPK-40

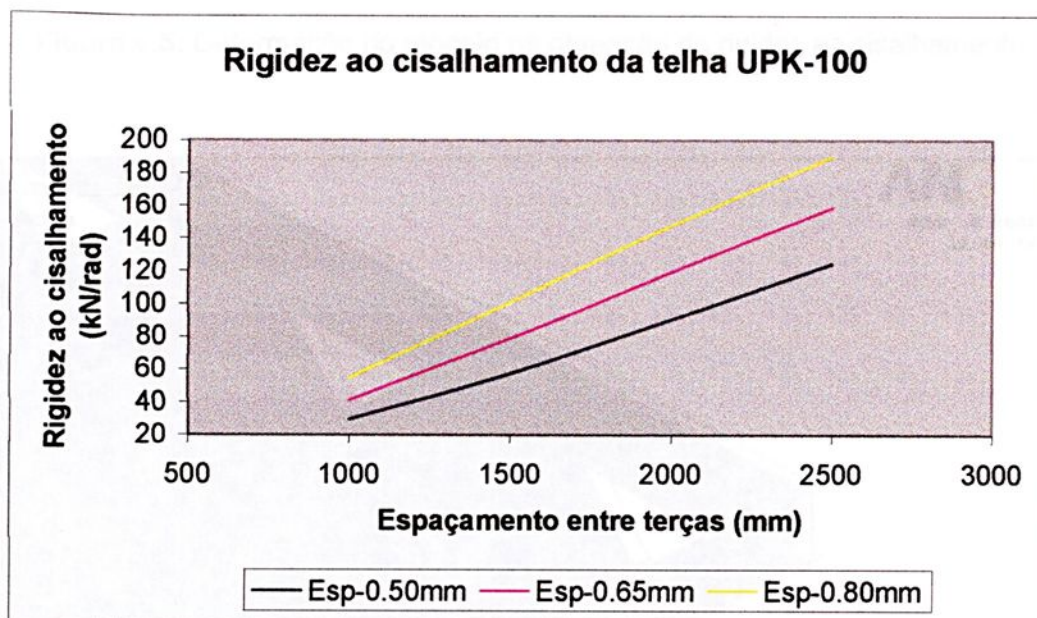


Figura 6.4: Gráfico representa a rigidez ao cisalhamento da telha UPK-100

A figura 6.5 e 6.6 ilustra a deformação do modelo na obtenção da rigidez ao cisalhamento.

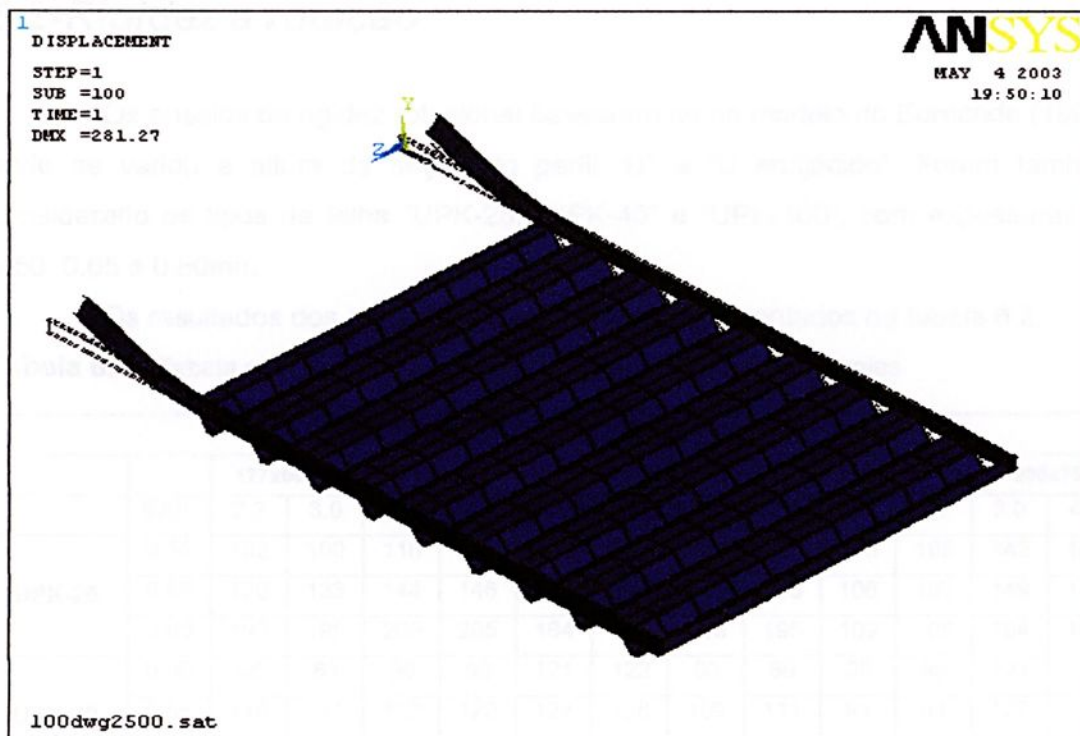


Figura 6.5: Deformação do modelo na obtenção da rigidez ao cisalhamento

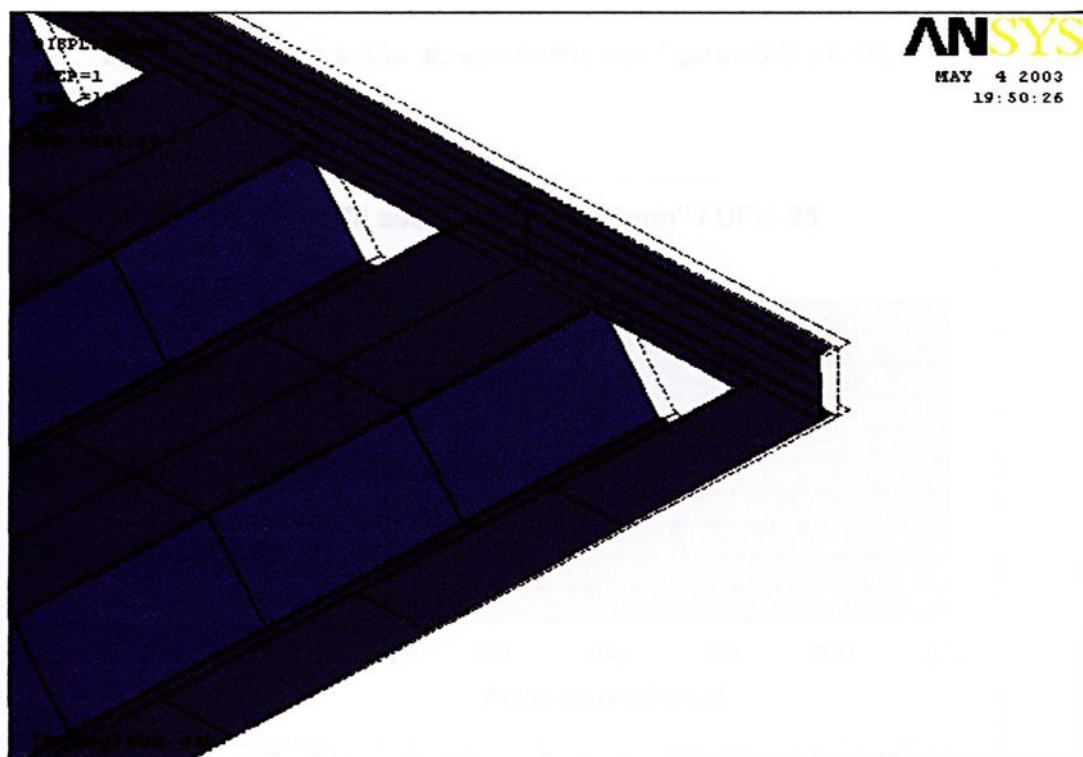


Figura 6.6: Deformação do modelo na obtenção da rigidez ao cisalhamento na extremidade de interesse

6.2-Rigidez a rotação

Os ensaios da rigidez rotacional basearam-se no modelo do Eurocode (1996), onde se variou a altura da seção do perfil “U” e “U enrijecido”. Foram também considerado os tipos de telha “UPK-25, “UPK-40” e “UPK-100”, com espessuras de 0.50, 0.65 e 0.80mm.

Os resultados dos ensaios numéricos estão apresentados na tabela 6.2.

Tabela 6. 2: Tabela com resultados da rigidez rotacional obtido nos ensaios

RIGIDEZ A ROTAÇÃO (N/rad)													
	ESP.	127x50x17		150x60x20		200x75x25		127x50		150x60		200x75	
		2.3	3.0	3.0	4.7	3.0	4.7	2.3	3.0	3.0	4.7	3.0	4.7
UPK-25	0.50	102	100	116	116	140	142	101	101	105	105	142	142
	0.65	120	133	144	146	147	149	133	133	106	106	149	149
	0.80	193	195	205	205	164	168	193	195	109	108	164	165
UPK-40	0.50	86	85	98	99	121	122	86	86	90	89	121	121
	0.65	110	111	122	120	128	128	109	111	91	91	127	128
	0.80	157	158	167	168	142	143	158	159	94	94	142	143
UPK-100	0.50	138	139	162	162	215	215	138	138	163	163	215	215
	0.65	149	148	172	172	222	222	149	149	173	172	221	221
	0.80	173	174	193	193	242	240	171	171	193	193	240	239

Esses resultados estão apresentados nas figuras 6.5 a 6.10.

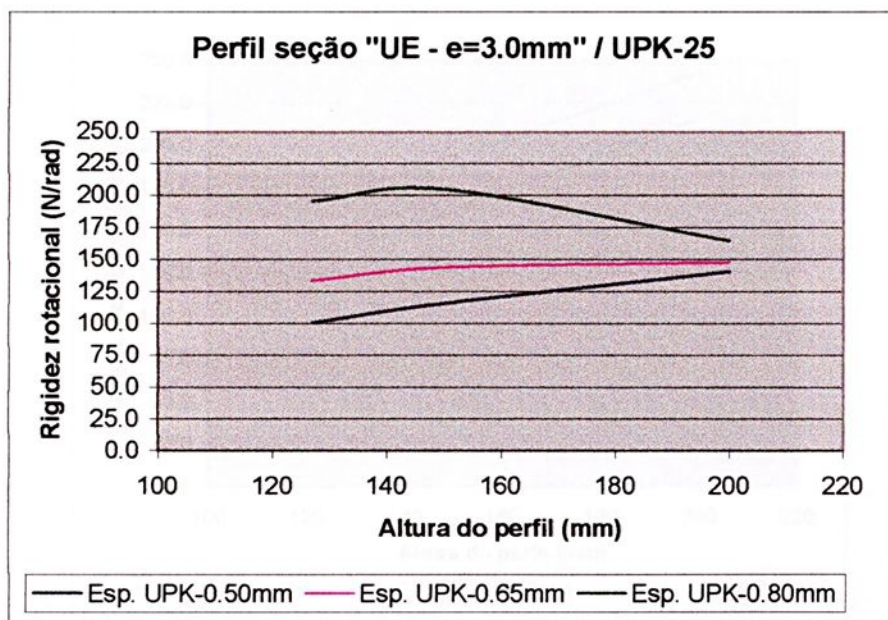


Figura 6.7: Gráfico representa a rigidez rotacional da telha UPK-25 com o perfil “U enrijecido” de espessura de 3.00mm

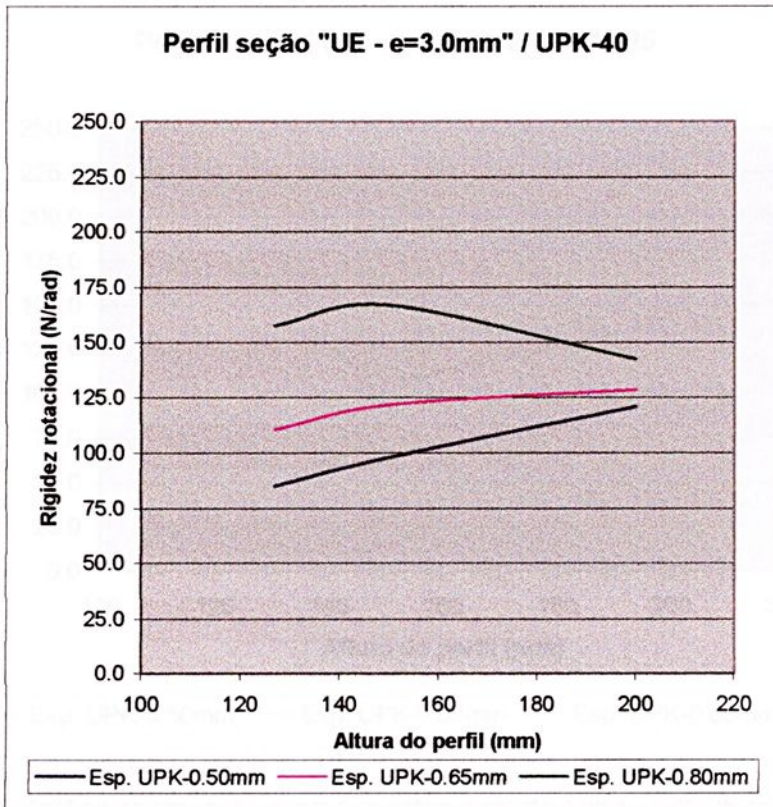


Figura 6.8: Gráfico representa a rigidez rotacional da telha UPK-40 com o perfil "U enrijecido" de espessura de 3.00mm

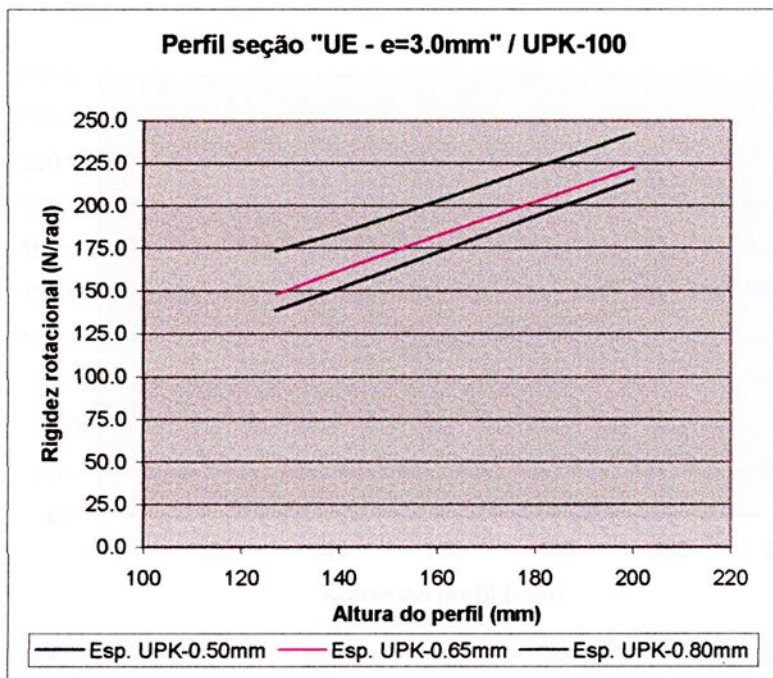


Figura 6.9: Gráfico representa a rigidez rotacional da telha UPK-100 com o perfil "U enrijecido" de espessura de 3.00mm



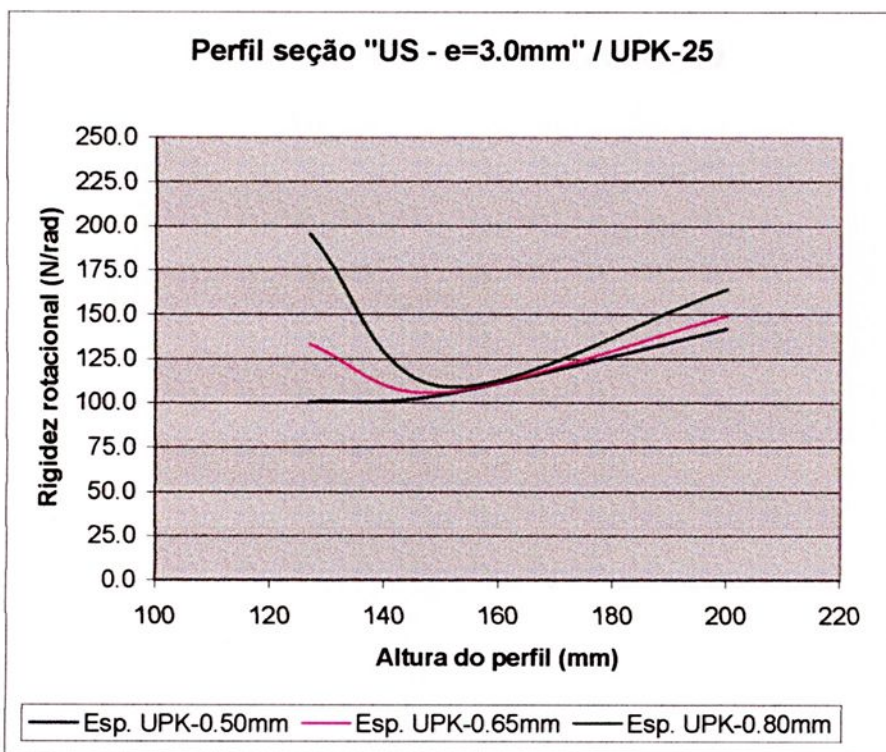


Figura 6.10: Gráfico representa a rigidez rotacional da telha UPK-25 com o perfil "U" de espessura de 3.00mm

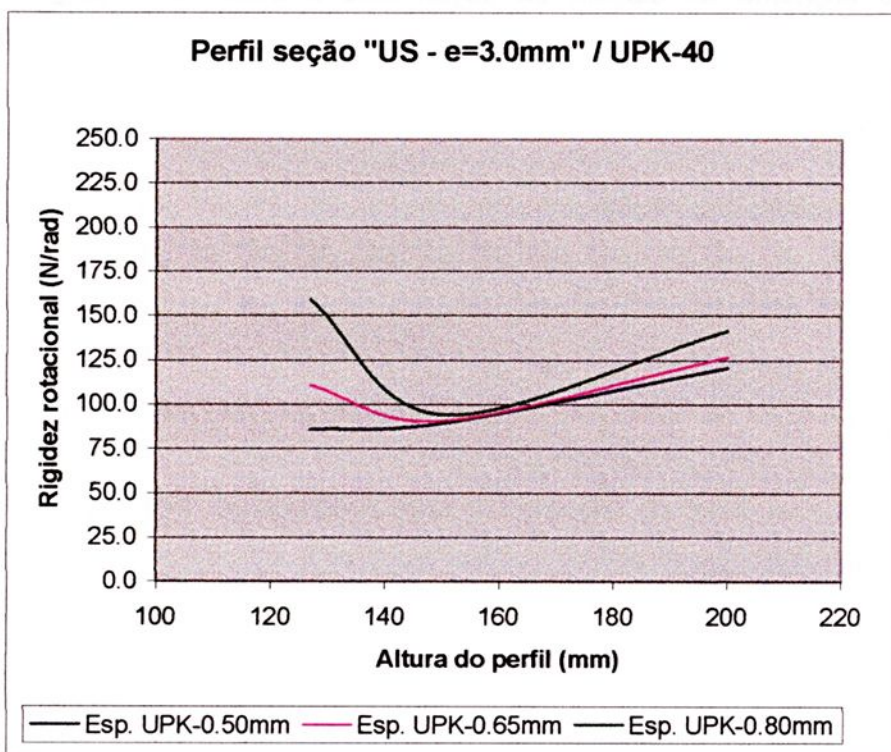


Figura 6.11: Gráfico representa a rigidez rotacional da telha UPK-40 com o perfil "U" de espessura de 3.00mm

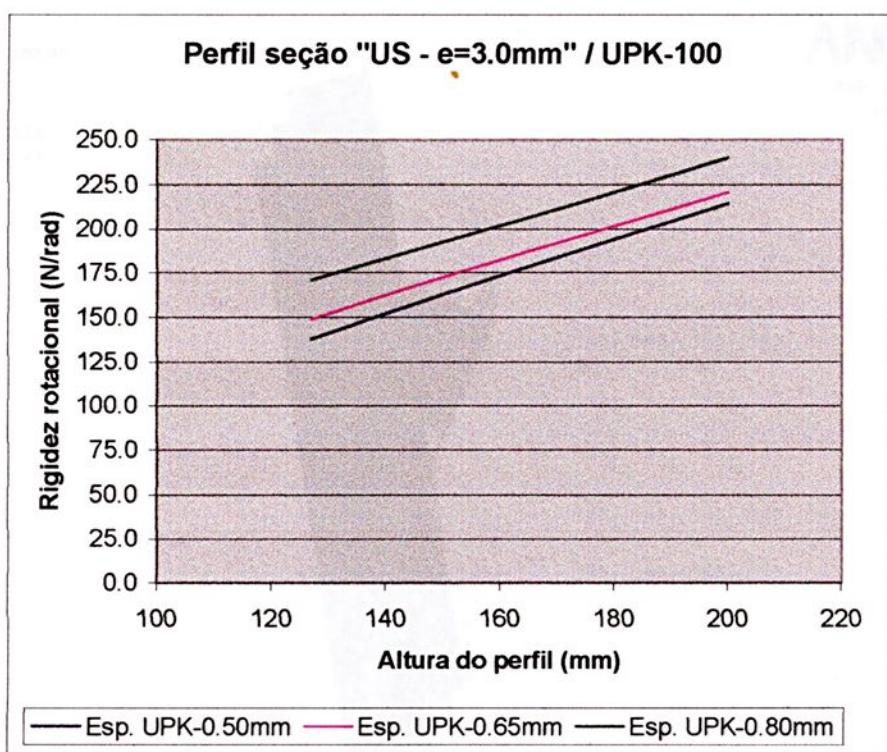


Figura 6.12: Gráfico representa a rigidez rotacional da telha UPK-100 com o perfil "U" de espessura de 3.00mm

A figura 6.12 ilustra a deformação do modelo na obtenção da rigidez rotacional.

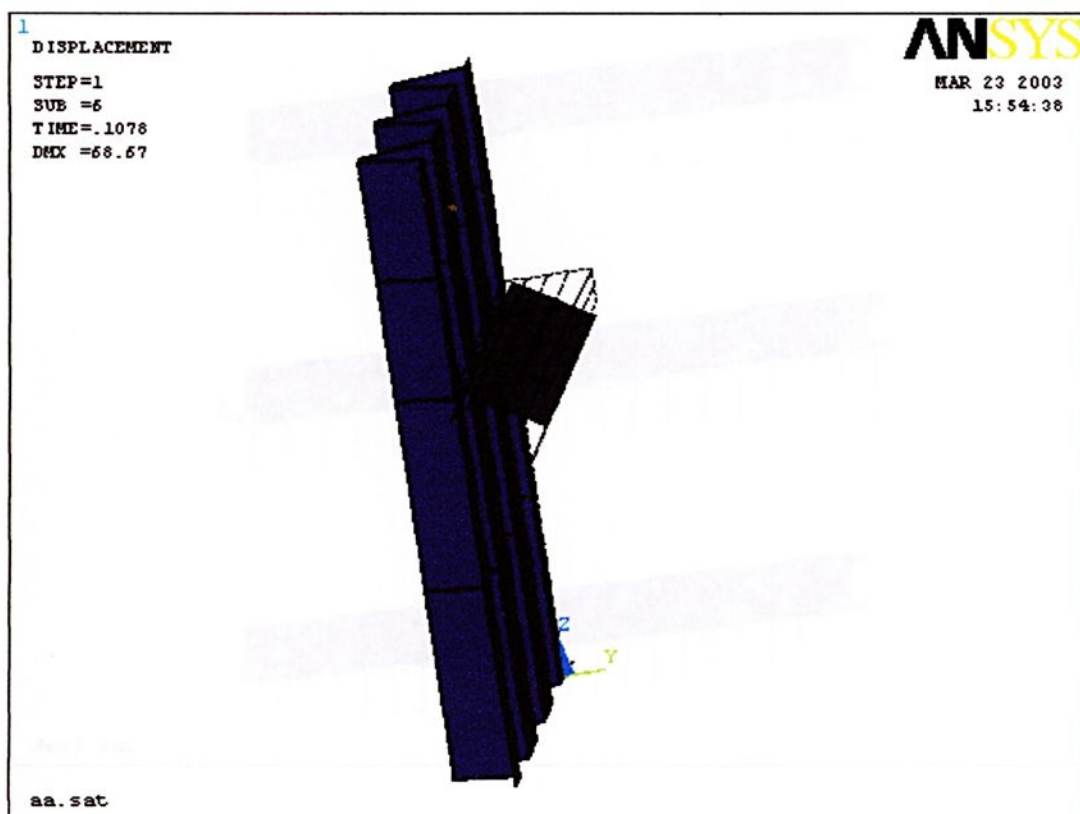


Figura 6.13: Deformação do modelo na obtenção da rigidez rotacional

6.3-Ensaio do conjunto telha-terça

Nos ensaios das terças utilizou-se do modelo simplificado de Lucas et al. (1997b), discretizando somente as terças, com a simulação dos efeitos da rigidez ao cisalhamento e rotacional representados por molas conectadas nos nós da terça. A discretização do modelo da terça foi igual àquela utilizada para os ensaios de obtenção da rigidez de cisalhamento e rotacional. Os coeficientes de mola foram colocados nos mesmos pontos onde foi efetuada a conexão da telha com as terças, para os diversos tipos de telhas, conforme ilustra a figura 6.13.

Na figura 6.14 mostraremos uma deformação da terça sem o sistema de molas e na figura 6.15 com os efeitos dos coeficientes de molas relativos a rigidez ao cisalhamento e rotacional.

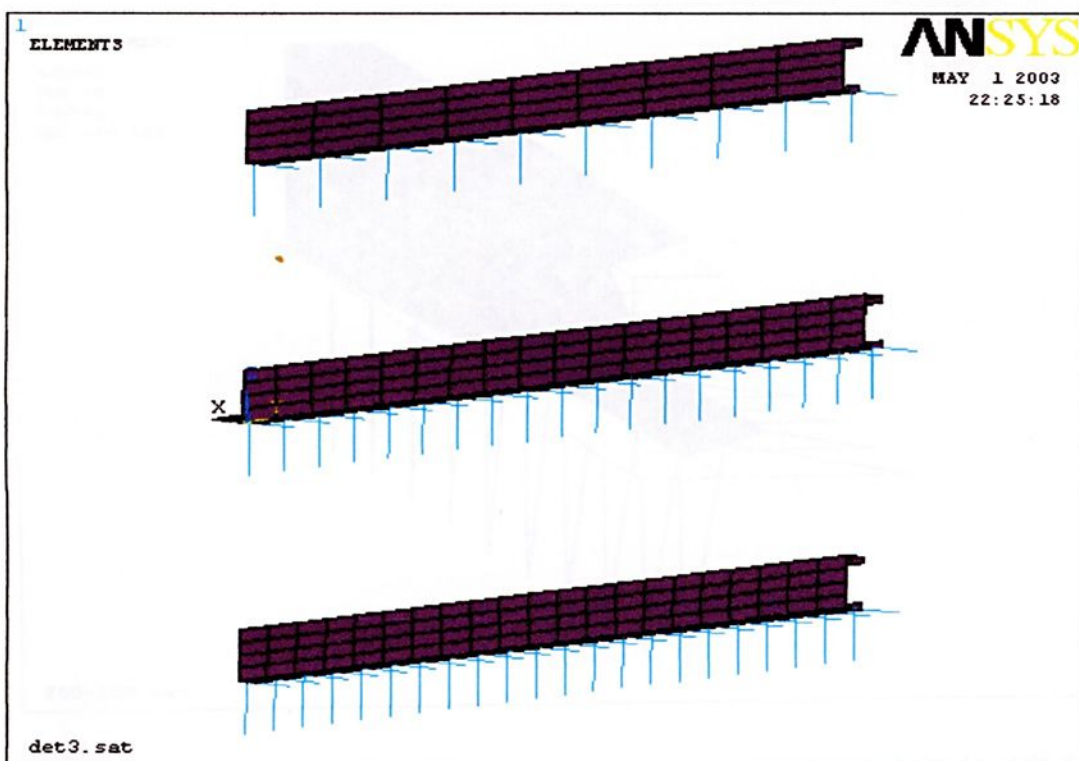


Figura 6.14: Detalhe da configuração dos pontos de aplicação na terça dos sistemas de molas na simulação rigidez ao cisalhamento e rotacional

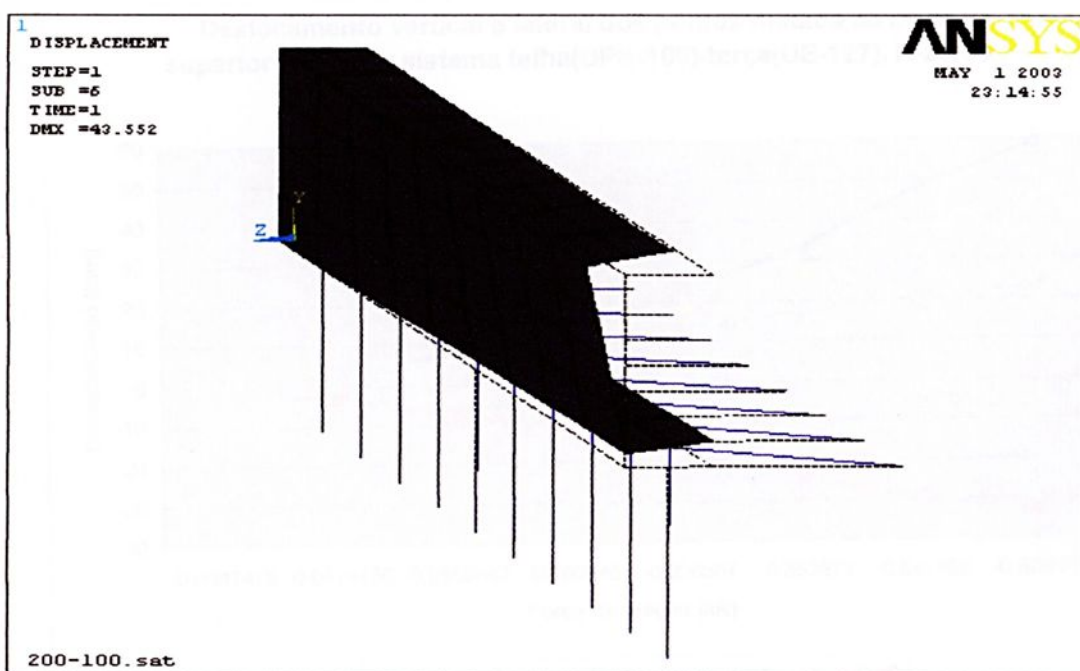


Figura 6.15: Deformação da seção transversal da terça com coeficiente determinado nos ensaios de rigidez ao cisalhamento e rotacional

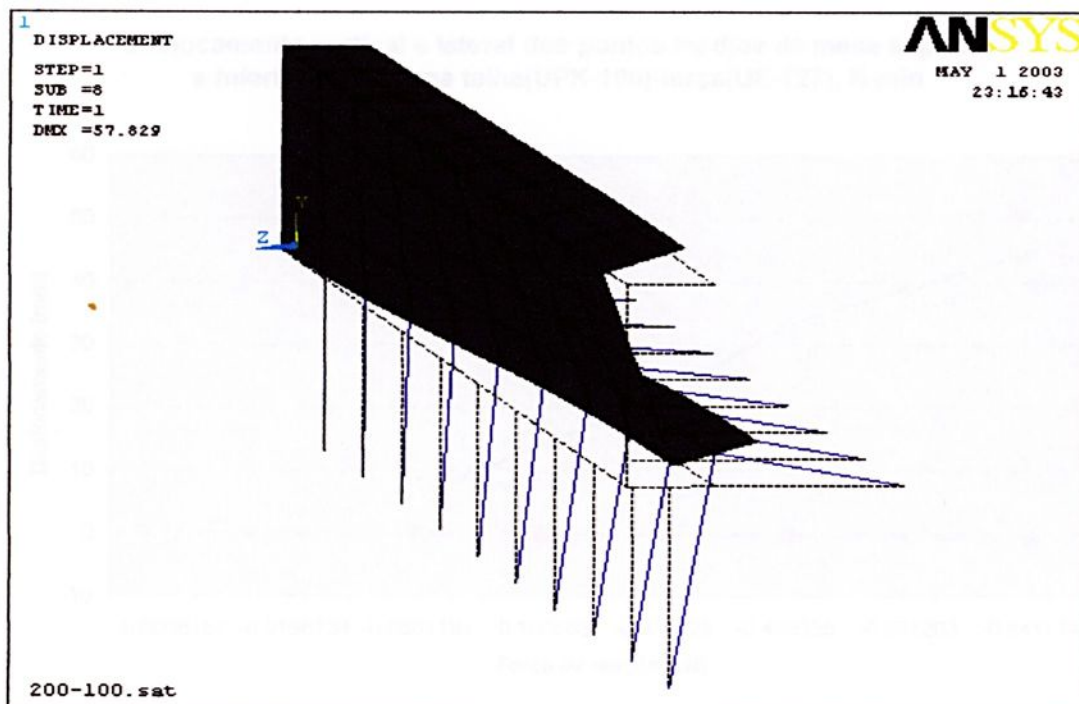


Figura 6.16: Deformação da seção transversal da terça com coeficiente zero de rigidez ao cisalhamento e rotacional

Os resultados finais estão apresentados nas figuras 6.16 a 6.20

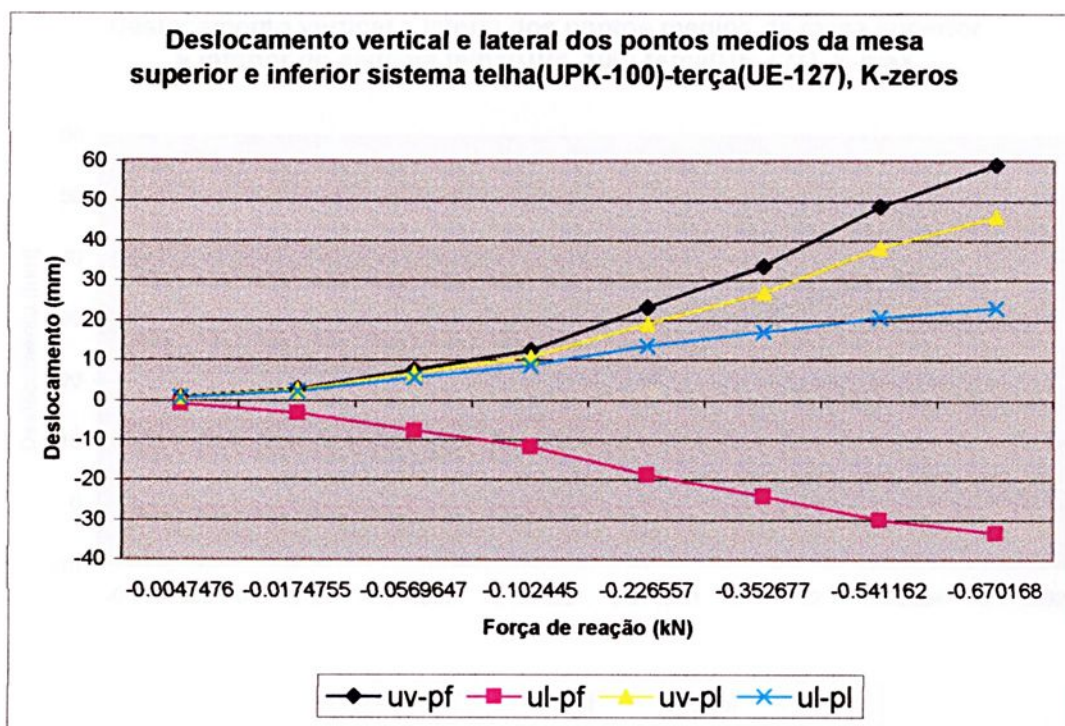


Figura 6.17: Deslocamentos do sistema telha(UPK-100)-terça(UE-127)

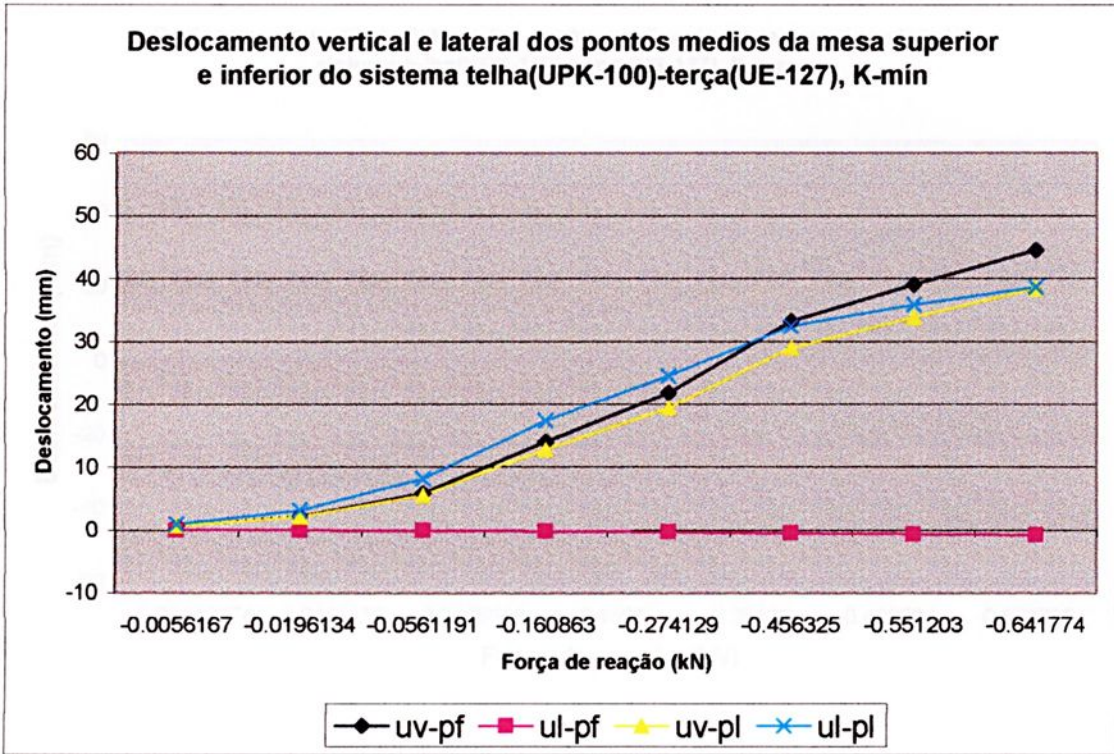


Figura 6.18: Deslocamentos do sistema telha(UPK-100)-terça(UE-127)

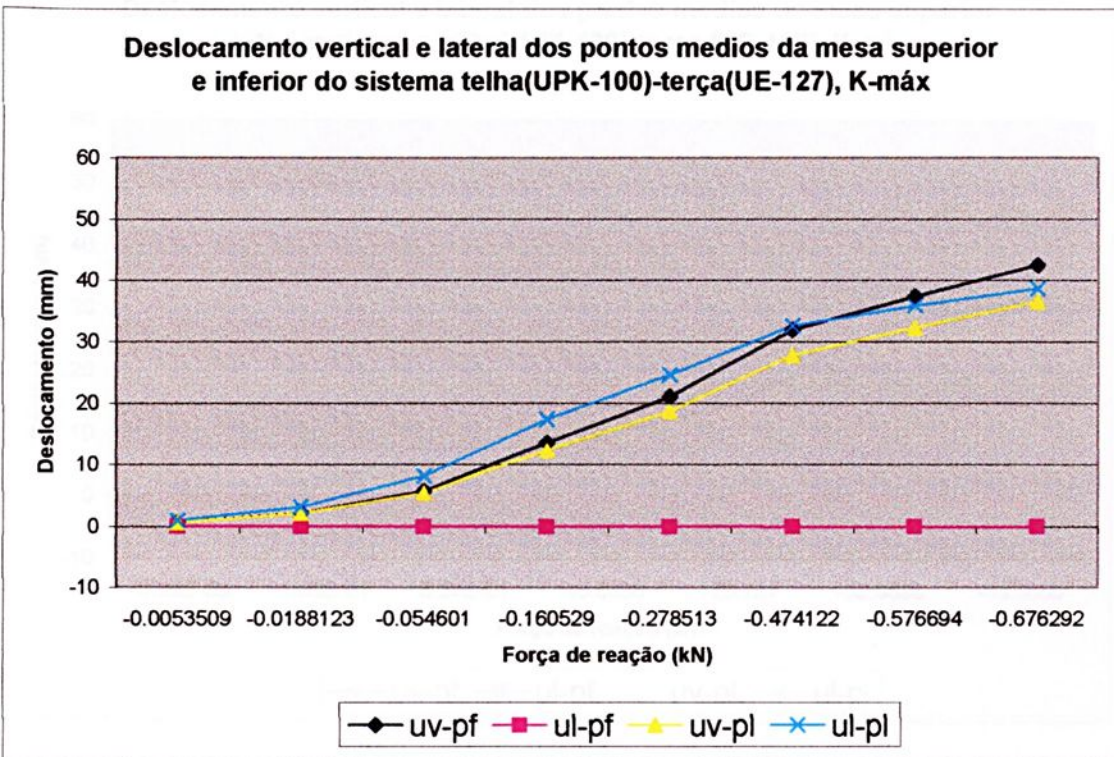


Figura 6.19: Deslocamentos do sistema telha(UPK-100)-terça(UE-127)



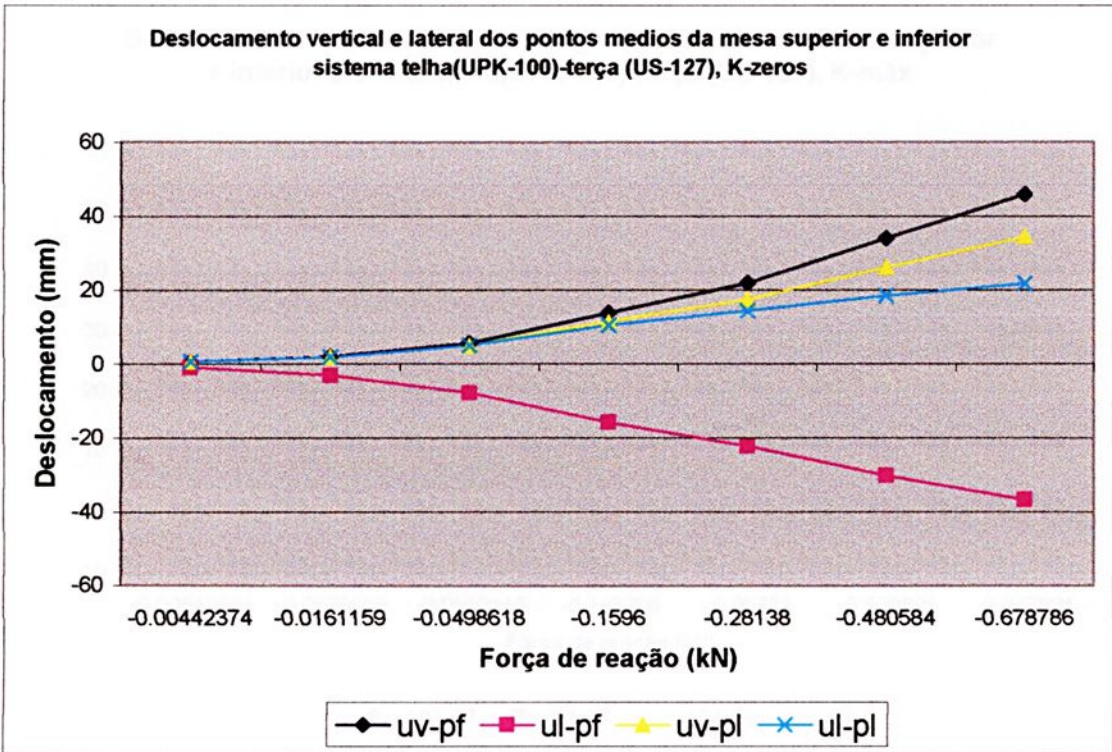


Figura 6.20: Deslocamentos do sistema telha(UPK-100)-terça(US-127)

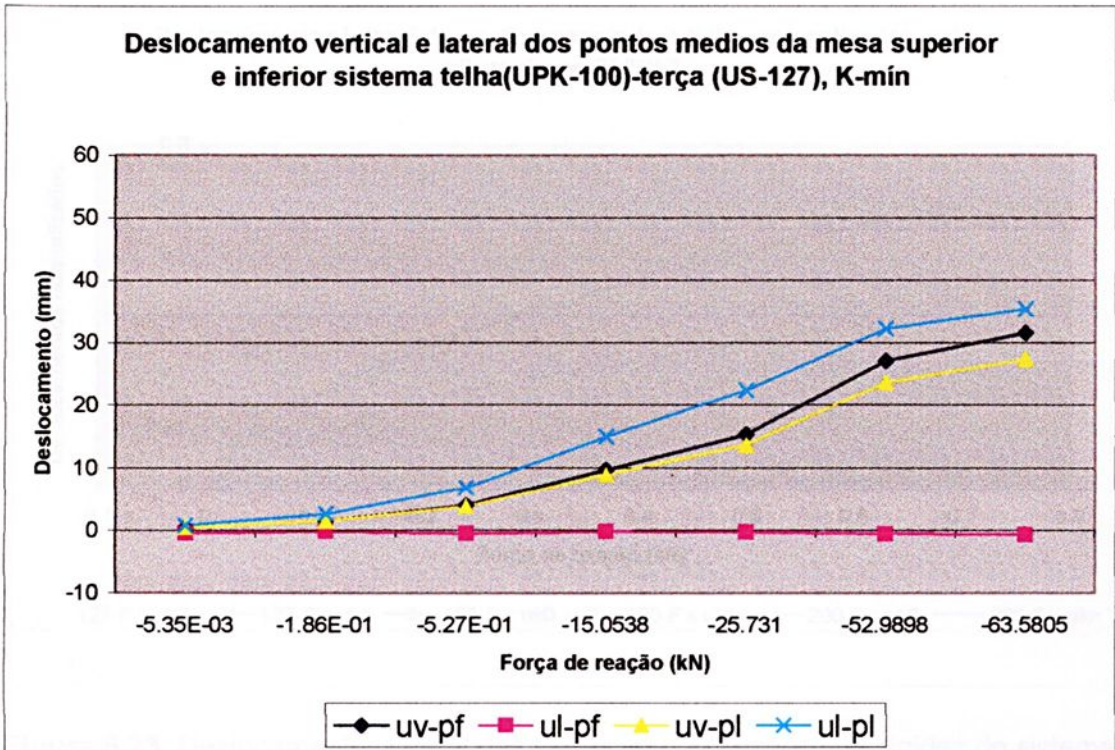


Figura 6.21: Deslocamentos do sistema telha(UPK-100)-terça(US-127)



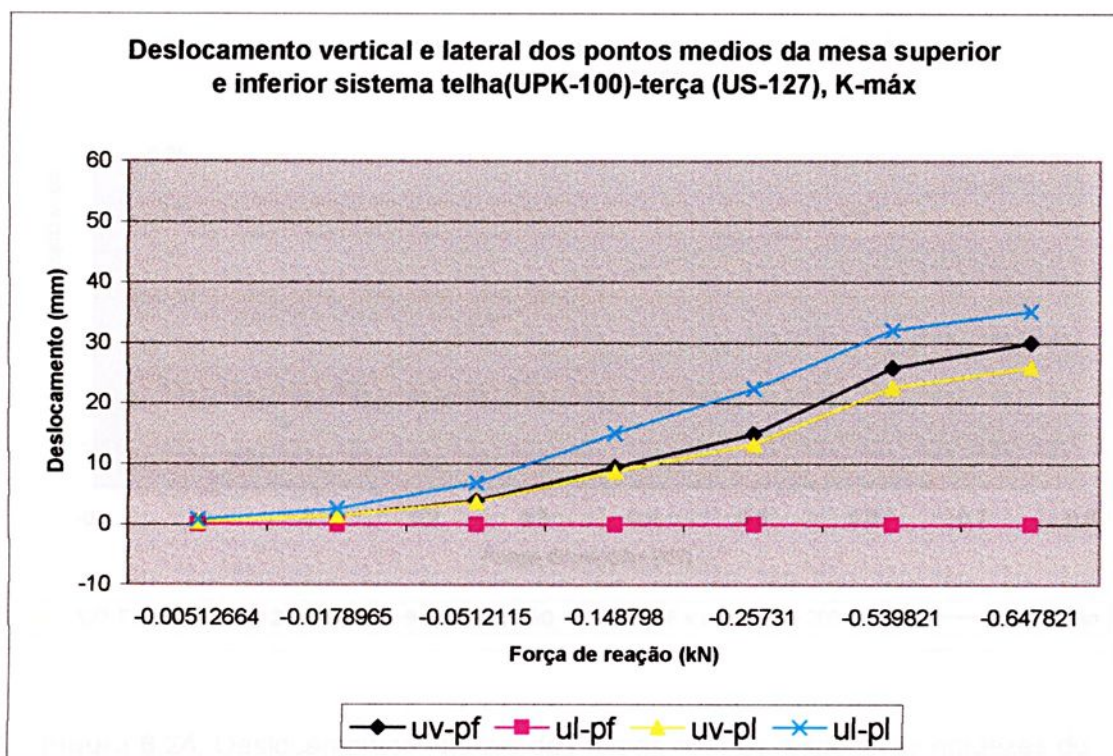


Figura 6.22: Deslocamentos do sistema telha(UPK-100)-terça(US-127)

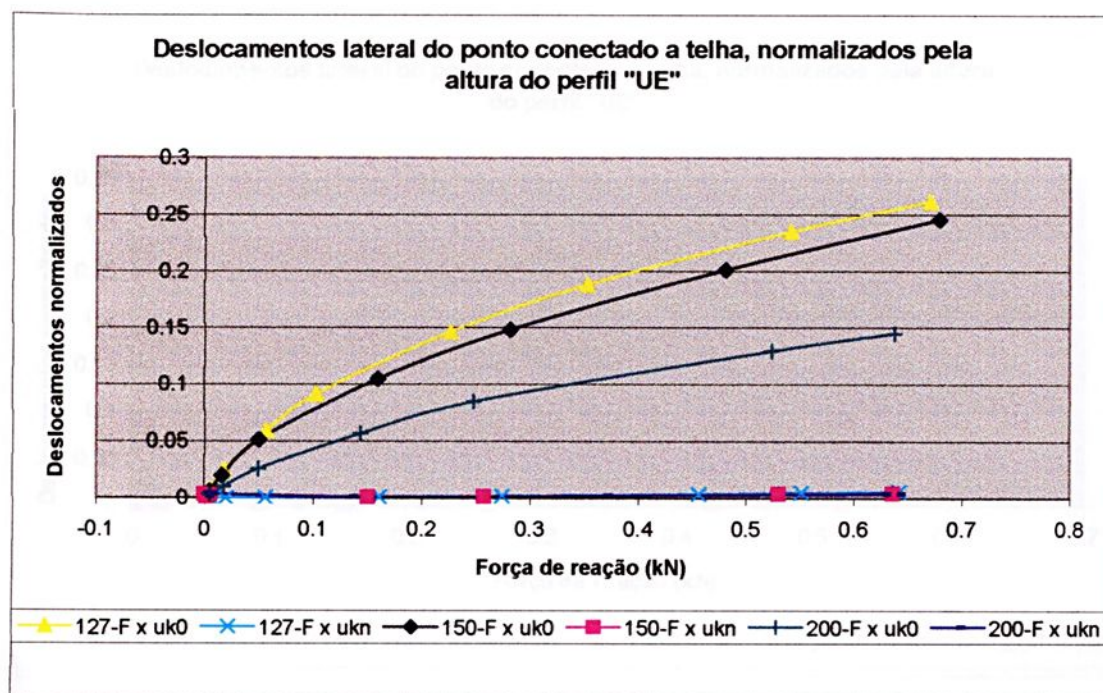


Figura 6.23: Deslocamentos lateral das terças com as respectivas rigidez do sistema telha(UPK-100)-terça UE



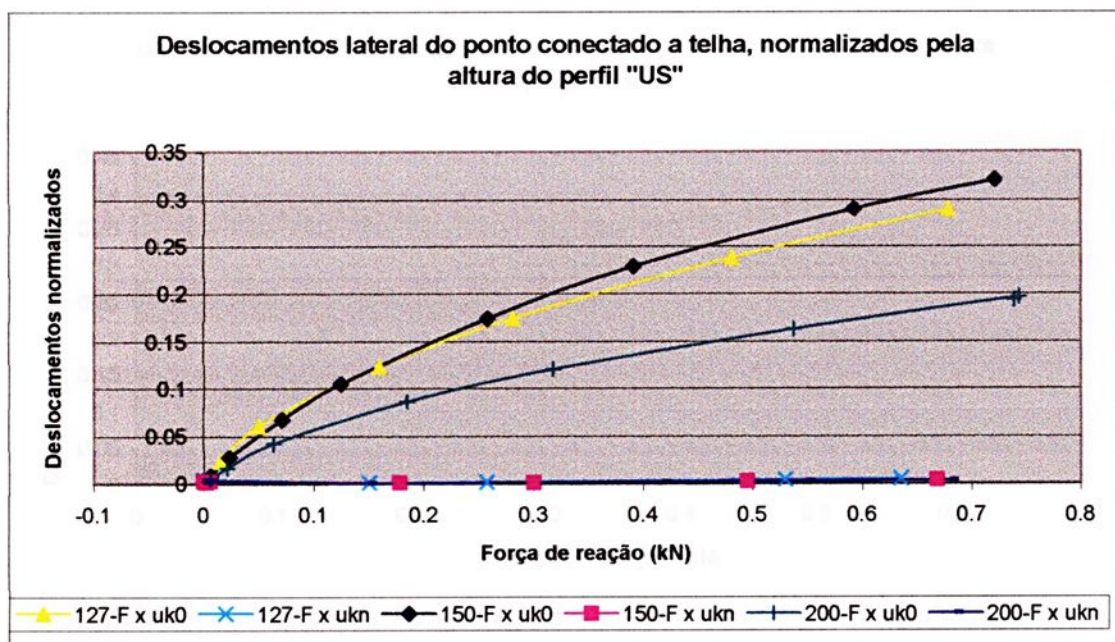


Figura 6.24: Deslocamentos laterais das terças com as respectivas rigidezes do sistema telha(UPK-100)-terça US

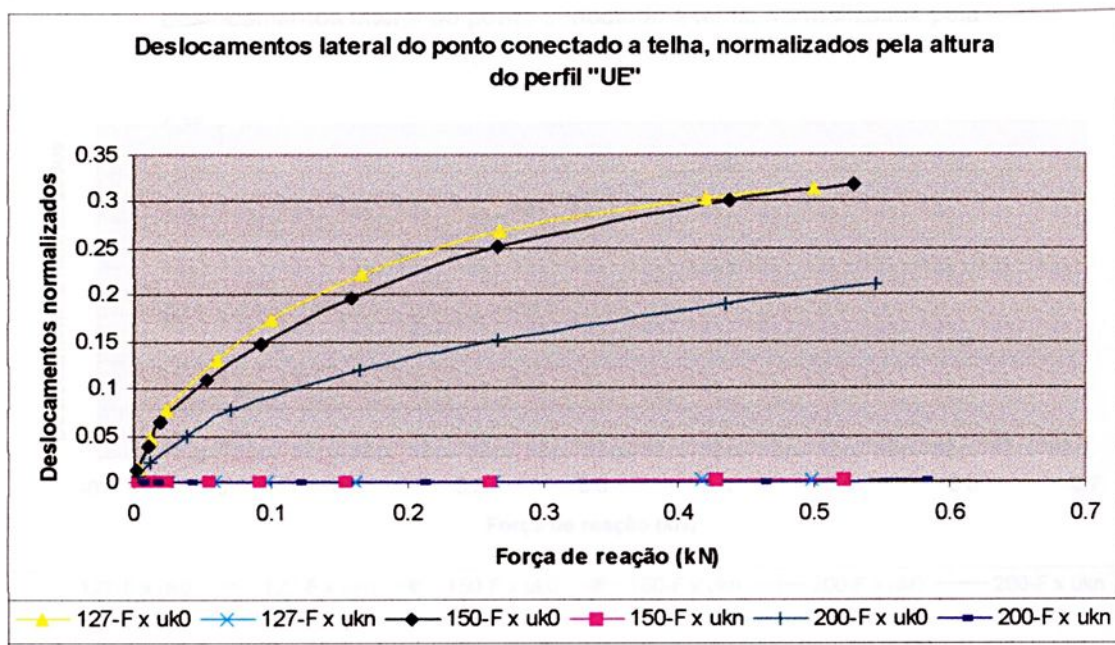


Figura 6.25: Deslocamentos laterais das terças com as respectivas rigidezes do sistema telha(UPK-40)-terça UE

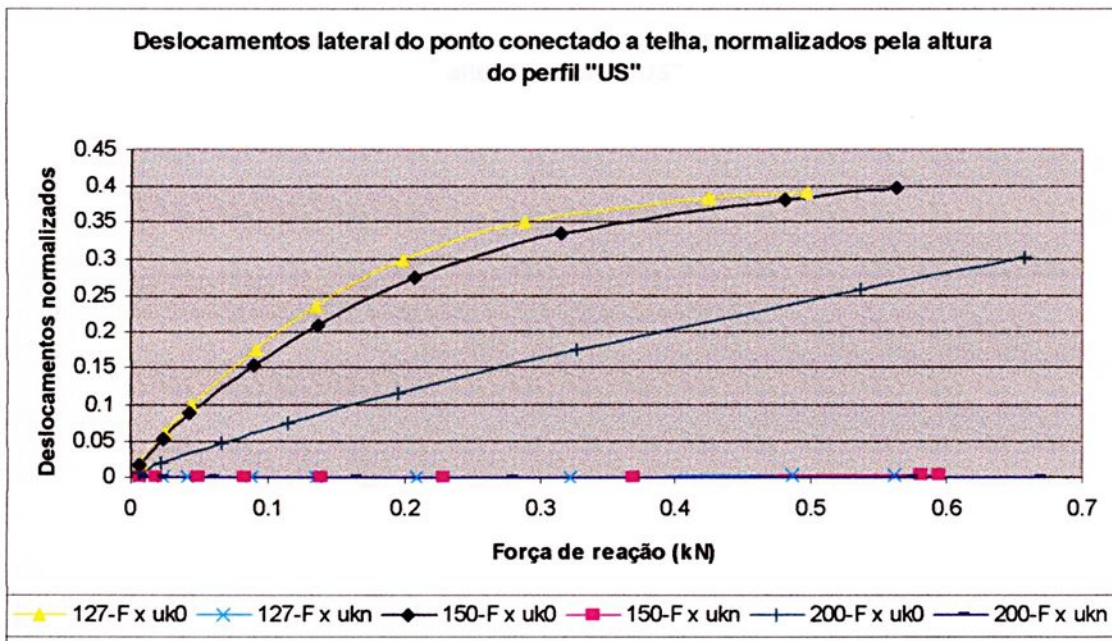


Figura 6.26: Deslocamentos laterais das terças com as respectivas rigidezes do sistema telha(UPK-40)-terça US

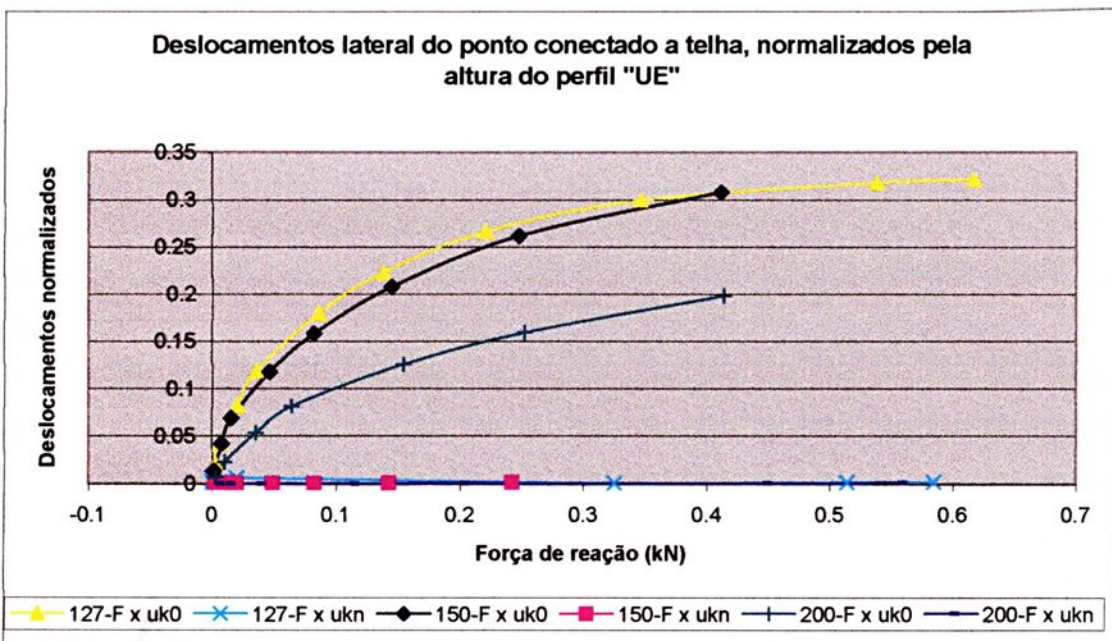


Figura 6.27: Deslocamentos laterais das terças com as respectivas rigidezes do sistema telha(UPK-25)-terça UE

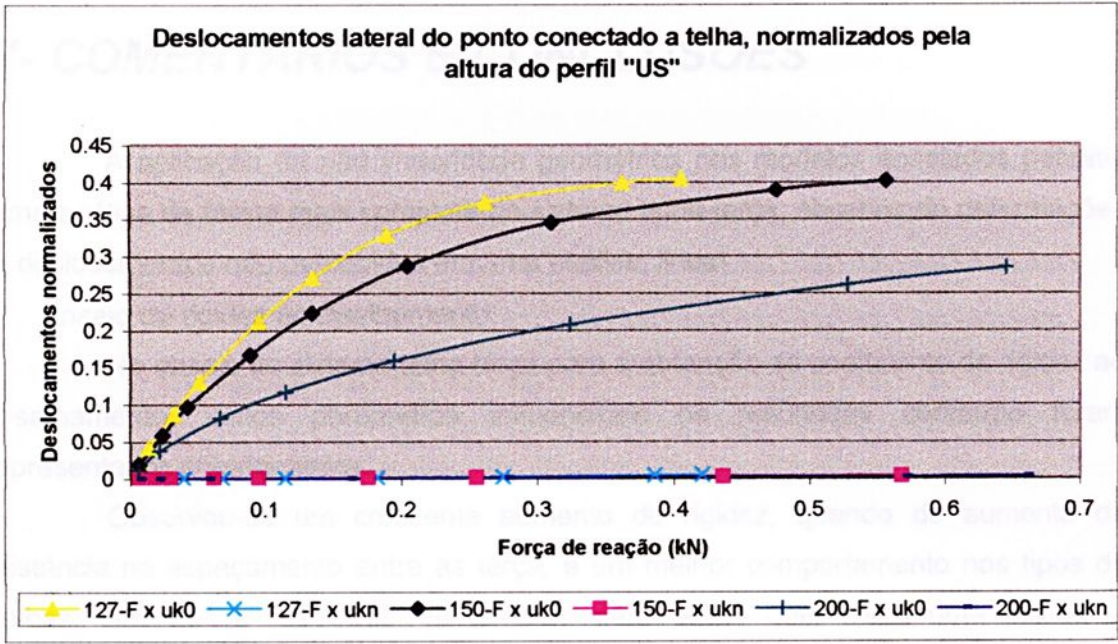


Figura 6.28: Deslocamentos laterais das terças com as respectivas rigidezes do sistema telha(UPK-25)-terça US



7- COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

A aplicação da não linearidade geométrica nos modelos ensaiados permitiu uma análise de forma mais completa do sistema telha-terça, observando deformações e deslocamentos não percebidos em uma análise, linear.

- Ensaio de rigidez ao cisalhamento

No ensaio do sistema telha-terça para a obtenção do coeficiente de rigidez ao cisalhamento, vários parâmetros influenciaram os resultados conforme foram apresentados anteriormente.

Observou-se um crescente aumento da rigidez, quando do aumento da distância no espaçamento entre as terças, e um melhor comportamento nos tipos de telhas “UPK-25” e “UPK-100”, e também para esses dois tipos, uma influência significativa da espessura da telha. Para a telha do tipo “UPK-40” isto não foi verificado, possivelmente devido à relação geométrica existente da seção transversal da telha.

Este aumento de rigidez, em função do aumento da distância no espaçamento entre as terças, observado nos resultados apresentados e nos de Lucas (1997b), é devido à similaridade do sistema telha-terça com um perfil de seção transversal do tipo “I”, pois as terças trabalham como sendo a mesa do perfil e a telha executando o trabalho da alma do perfil “I”.

- Ensaio de rigidez rotacional

O ensaio rotacional é um modelo normalizado pelo Eurocode 3 (1996), propondo os parâmetros e definindo suas faixas de trabalho, facilitando assim sua confecção.

Observou-se nos resultados da rigidez rotacional a importância da quantidade de pontos de fixação, sendo diretamente proporcional à rigidez rotacional do sistema telha-terça e uma influência mais significativa das espessuras da telha nos resultados. Já a influência da variação da seção transversal do perfil não foi significativa para a obtenção da rigidez rotacional conforme apresenta a tabela 6.2, no capítulo anterior.

- Ensaio das terças com o sistema de molas

Com relação a estes ensaios, observou-se a contribuição significativa que os sistemas de molas proporcionam na contenção lateral das terças. Esse sistema de molas significa a contribuição da telha para com a terça.



Tanto nos perfis “U” como “U” enrijecido, a contribuição da telha na contenção lateral da terça foi bastante significativa para os deslocamentos laterais da mesa comprimida do perfil, com relação às terças sem os coeficientes de molas.

Posteriormente verificou-se que os coeficientes de mola além de contribuírem para a contenção lateral, também têm influência nos deslocamentos verticais das terças, tanto no ponto médio da mesa comprimida como também da mesa tracionada.

É importante salientar que nos resultados apresentados nos ensaios das terças utilizaram-se os menores valores obtidos da rigidez ao cisalhamento e rotacional. Desta forma, qualquer conexão da telha com a terça, proporcionará uma contribuição na contenção lateral da terça e nos deslocamentos verticais. Este comportamento é observado tanto para os perfis do tipo “U” ou “U” enrijecido.

8.1-Dimensionamento de terças segundo NBR-14.762

8.1.1- Verificação do escoamento da região:

$$V_{adm} = \frac{F_y A_w}{2}$$

onde:

F_y =

A_w =

Nota-se que neste verificação não são temas a influência da curvatura do perfil.

8.1.2- Flambagem lateral com torção

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3 M_{min} + 4 M_0 + 2 M_1}$$



8- APÊNDICE

Dimensionamento das terças segundo os procedimentos da norma NBR-14762

Analisaremos qual a contribuição o trabalho proporciona no dimensionamento dos perfis conformados a frio, sendo utilizados como terças:

Primeiramente temos que verificar 3 condições no dimensionamento de perfis abertos, neste caso analisaremos o perfil "U-Simples, nas condições de flexão simples.

Condições de contorno imposta pelo modelo:

- o vão analisado será da mesmas proporções analisadas numericamente $v=7m$
- restrições de apoio tipo garfo, restringindo o apoio nas translações u_x , u_y e u_z
- considerando também o travamento lateral que o painel de telha proporciona no modelo, ou seja o comprimento de flambagem lateral do perfil será considerado reduzido na verificação.

8.1-Dimensionamento de terças segundo NBR-14.762

8.1.1- Verificação do escoamento da seção:

$$M_{Rd} = \frac{w_{ef} \cdot f_y}{\gamma}$$

onde:

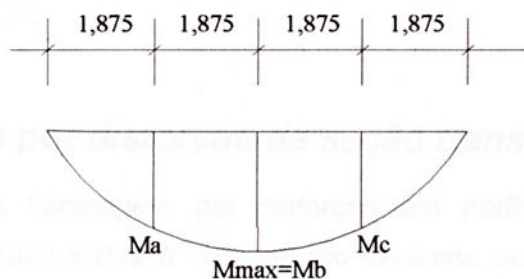
$$w_{ef} = \frac{I_x}{\bar{y}_s}$$

Notifica-se que nesta verificação nos não temos a influência da contecção lateral do perfil.

8.1.2- Flambagem lateral com torção

$$C_b = \frac{12,5.M_{max}}{2,5.M_{max} + 3.Ma + 4.M_b + 3.M_c}$$





MOMENTOS NOS QUARTOS DO VÃO PARA OBTENÇÃO DE C_B .

$$C_b = \frac{12,5 \cdot (M_{max})}{2,5 \cdot (M_{max}) + 3 \cdot (M_a) + 4 \cdot (M_b) + 3 \cdot (M_c)}$$

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(k_y l_y)^2}, \text{ neste caso notificamos a influência no dimensionamento da}$$

terças, onde o parâmetro $(k_y l_y)^2$, fica muito pequeno, tornando-se assim uma força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y-y maior.

$$N_{et} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E \cdot C_w}{(k_t l_t)^2} + G \cdot I_t \right], \text{ neste caso notificamos a influência no}$$

dimensionamento da terças, onde o parâmetro $(k_t l_t)$, fica muito pequeno, tornando-se assim uma força normal de flambagem elástica por torção maior.

$M_e = C_b \cdot r_0 \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot N_{et}}$, verificando um aumento no momento fletor de flambagem elástica.

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{w_c \cdot f_y}{M_e}} = 0,35 \leq 0,6 \Rightarrow \rho_{FLT} = 1,0, \text{ tomando o índice de esbeltez da}$$

barra pequeno, obtendo-se assim valores pequenos ou ausentes no fator de redução associado à flambagem lateral com torção da barra.

$$\sigma = \rho_{FLT} \cdot f_y = 250 \text{ MPa}$$

Dai: o modulo de resistência elástica da seção efetiva em relação à fibra comprimida, referente à flambagem lateral com torção, toma igual ao modulo de resistência elástica da seção efetiva referente ao inicio do escoamento da seção efetiva.

$$w_{c,ef} = w_{ef}$$

Assim,

$$M_{Rd} = \frac{\rho_{FLT} \cdot w_{c,ef} \cdot f_y}{\gamma}$$

8.1.3- Flambagem por distorção da seção transversal

A verificação da flambagem por distorção em perfis U simples (sem enrijecedores de borda) submetidos à compressão centrada ou à flexão pode ser dispensada, exceto no caso de perfis submetidos à flexão com painel conectado à mesa tracionada e a mesa comprimida livre, onde a flambagem por distorção do conjunto alma-mesa comprimida pode corresponder ao modo crítico. Nesse caso deve-se consultar bibliografia especializada.

No caso apresentado a mesa comprimida que está sendo considerada como travada, assim o nosso perfil tem como fator limitante o escoamento da seção efetiva.

Lembrado que nos casos de dimensionamento de perfis "UE" tem que verificar o caso da flambagem por distorção da seção transversal.



9- REFERÊNCIAS

American Iron and Steel Institute, 1996. NBR-14762 – Cold-formed Steel Design Manual. Washington.

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

Chung, K. F. e Lawson, R. M. 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, 1999.

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

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

De Matteis, G. e Landolfo, R. Mechanical fasteners for cladding sandwich panels: Interpretative models for shear behaviour. *THIN-WALLED STRUCTURES*, v. 35, p. 61-79, 1999.

De Matteis, G.; Landolfo, R. e Mazzolani, F. M. Diaphragm Effect for Industrial Steel Buildings under Earthquake Loading. *Journal of Constructional Steel Research*, n. 1-3, v. 46, p. 357-358, 1998.

Dubina, D.; Goina, D.; Georgescu, M.; Ungureanu, V.; e Zaharia, R. 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, 1998.



El-Sheikh, A. I.; El-Kassas, E. M. A. e Mackie, R. I. Performance of stiffened and unstiffened cold-formed channel members in axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 23, p. 1221-1231, 2001.

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.

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

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

Jung, D. W. e Yang, K. B. Comparative investigation into membrane, shell and continuum elements for the rigid-plastic finite element analysis of two-dimensional sheet metal forming problems. *Materials Processing Technology*, v. 104, p. 185-190, 2000.

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

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

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

PERKROM (São Paulo-SP): catálogo. São Paulo, 23p.



Rousch, C. J.; Hancock, G J. Comparison of Tests of Brindged and Unbridged Purlins with a Non-Linear Analysis Model. *Journal of Constructional Steel Research*, n. 2/3, v. 41, p. 197-220, 1997.

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

SCI-SISTEMA DE COBERTURAS INTEGRADAS (São Paulo-SP): catálogo. São Paulo, 8p.

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

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

Tristão, G. A. Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numérica. 2002, 125p. Dissertação Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Wright, H. D. e Hossain, K. M. A. In-Plane Shear Behaviour of Profiled Steel Sheeting. *THIN-WALLED STRUCTURES*, n. 1-4, v. 29, p. 79-100, 1997.

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

Zhi-ming Ye, Roger J. Kettle, Long-yuan Li e Benjamin W. Schafer. Buckling behavior of cold-formed zed-purlins partially restrained by steel sheeting. *THIN-WALLED STRUCTURES*, v. 40, p. 853-864, 2002.



unesp 

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**

**Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dec.feis.unesp.br**

