

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

RODRIGO OLIVEIRA VITOR

**Modelagem Numérica de Diagonais Equivalentes
em Painéis de Cisalhamento do Sistema *Light
Steel Framing***

2012

Rodrigo Oliveira Vitor

**Modelagem Numérica de Diagonais Equivalentes em Painéis de
Cisalhamento do Sistema *Light Steel Framing***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues

Belo Horizonte

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**Modelagem Numérica de Diagonais Equivalentes em Painéis de
Cisalhamento do sistema *Light Steel Framing***

Rodrigo Oliveira Vitor

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão avaliadora:

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
EE-UFGM - (Orientador)

Prof. Dr. Marcelo Greco
EE-UFGM - (Co-Orientador)

Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas
EE-UFGM

Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP

Belo Horizonte, 25 de Setembro de 2012

Essa é a minha vida é a minha paixão, por mais que eu lute pra ser quem eu sou, não importa a distância leve o tempo que for o que importa é essa força que me leva onde eu vou, e então colorir esse mundo como nunca se viu, com as cores do nosso Brasil.

Autor desconhecido.

AGRADECIMENTOS

Mais um sonho se realiza, dentre os muitos dos quais haverei de realizar. Agradeço a DEUS por fazer brilhar em minha mente a capacidade de tornar-se protagonista desta conquista.

Dedico aos meus pais que sempre acompanharam meu crescimento para a vida e para o mundo.

À minha família pelo incansável apoio e vontade de fazer-me feliz.

Aos orientadores e professores Francisco Carlos Rodrigues, Marcelo Greco e Rodrigo Caldas, percussores deste trabalho, pelas valiosas lições de competência e por terem acreditado em mim durante todo o tempo.

Aos grandes amigos Adimar Maia, Alexandre Acipreste, Eduardo Mattos, Felipe Leite, Fernando Sales, Paula Vilela, Paulo Henrique e Phelps pelos momentos inesquecíveis vividos em Belo Horizonte.

À USIMINAS S.A, de forma especial aos Engenheiros Cláudio Gomes Pareto, Pedro Luiz da Silva, Eustáquio Nassif Saliba, Mudesto Domingues Lima e Elielson Lopes Soares pela oportunidade singular de realizar este trabalho.

À querida Republica Saudosa Maloca na cidade de Ouro Preto-MG pelo grande aprendizado.

Aos professores e funcionários do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia (UFMG), que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação acadêmica.

À CAPES, ao CNPQ e à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Considerações Iniciais | 1 |
| 1.2 Objetivo | 2 |
| 1.3 Metodologia | 3 |
| 1.4 Justificativa | 4 |
| 1.5 Sistema <i>Light Steel Framing</i> | 5 |
| 1.5.1 Perfis formados a frio | 6 |
| 1.5.2 Placas estruturais | 13 |
| 1.5.3 Parafusos estruturais | 16 |
| CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 2.1 Considerações Iniciais | 20 |
| 2.2 Trabalhos experimentais | 20 |
| 2.2.1 AISI (1997) | 21 |
| 2.2.2 Tian <i>et al.</i> (2004) | 26 |
| 2.2.3 AISI (2005) | 31 |
| 2.3 Bastos (2009) | 34 |
| 2.4 Bevilaqua (2005) | 38 |
| 2.5 Zhang <i>et al.</i> (2005) | 40 |
| 2.6 Smith (1966, 1967a) | 44 |
| 2.7 Princípio dos trabalhos virtuais | 46 |
| 2.8 Regressão linear e não linear | 49 |
| CAPÍTULO 3 – MODELO NUMÉRICO | 52 |
| 3.1 Aferição dos modelos numéricos | 52 |
| 3.1.1 Elementos finitos e propriedades dos materiais utilizados | 52 |
| 3.1.2 AISI (1997) | 56 |
| 3.1.3 Tian <i>et al.</i> (2004) | 59 |
| 3.1.4 Análise dos resultados | 62 |

| | |
|---|-----|
| CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E ANÁLISE | 65 |
| 4.1 Considerações Iniciais | 65 |
| 4.2 Desenvolvimento de novos modelos (ABAQUS) | 66 |
| 4.2.1 Painel do tipo A | 67 |
| 4.2.2 Painel do tipo B | 70 |
| 4.3 Aplicação do Princípio dos Trabalhos Virtuais | 72 |
| 4.4 Aferição dos novos modelos (SAP2000) | 77 |
| 4.5 Regressão não linear multivariada | 82 |
| 4.5.1 Equação para o painel do Tipo A | 85 |
| 4.5.2 Equação para o painel do Tipo B | 87 |
| 4.5.3 Equações para os painéis dos Tipos A e B | 89 |
| 4.5.4 Aferição da regressão | 94 |
| CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES | 98 |
| 5.1 Conclusões | 98 |
| 5.2 Sugestões para trabalhos futuros | 101 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 102 |
| APÊNDICE | 106 |
| Introdução | 106 |
| Painel do tipo A | 106 |
| Painel do tipo B | 109 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Componentes de um painel estrutural com abertura | 9 |
| Figura 2. Componentes de um painel de entrepiso | 9 |
| Figura 3. Desenho esquemático de uma residência em LSF | 10 |
| Figura 4. Painel contraventado em “X” | 11 |
| Figura 5. Sistema de ancoragem (chumbador) | 11 |
| Figura 6. <i>hold-down</i> | 12 |
| Figura 7. Sistema de distribuição de carga lateral | 12 |
| Figura 8. Ações laterais e condições de contorno | 13 |
| Figura 9. Detalhe da composição do OSB | 14 |
| Figura 10. Placas cimentícias | 15 |
| Figura 11. Placa de gesso acartonado | 16 |
| Figura 12. Parafusos autobrocantes | 16 |
| Figura 13. Parafusos autoatarraxante | 17 |
| Figura 14. Tipos de pontas de parafusos autobrocantes | 17 |
| Figura 15. Tipos da cabeça de parafusos autobrocantes | 18 |
| Figura 16. Modos de falhas <i>Pull-Out</i> e <i>Pull-Over</i> | 19 |

| | |
|---|----|
| Figura 17. Painéis submetidos ao ensaio experimental (AISI, 1997) | 21 |
| Figura 18. Configuração dos trabalhos experimentais (AISI, 1997) | 22 |
| Figura 19. Gráfico de força <i>versus</i> deslocamento (AISI, 1997) | 23 |
| Figura 20. Tombamento do painel (AISI, 1997) | 24 |
| Figura 21. Gráfico de força cisalhante <i>versus</i> influência abertura (AISI, 1997) | 26 |
| Figura 22. Painéis submetidos ao ensaio experimental (Tian <i>et al.</i> , 2004)..... | 27 |
| Figura 23. Painéis analisados experimentalmente (Tian <i>et al.</i> , 2004)..... | 28 |
| Figura 24. Força <i>versus</i> deslocamento do segundo modelo (Tian <i>et al.</i> , 2004) | 29 |
| Figura 25. Região de rasgamento do OSB (Tian <i>et al.</i> , 2004)..... | 30 |
| Figura 26. Painel analisado por (AISI, 2005) | 31 |
| Figura 27. Montante duplo e <i>hold-down</i> utilizados por (AISI, 2005) | 32 |
| Figura 28. Modo de falha por <i>pull-over</i> (AISI, 2005) | 33 |
| Figura 29. Determinação do MOE e MOR (Bastos, 2009)..... | 34 |
| Figura 30. Gráfico para determinação das forças e deflexões (Bastos, 2009)..... | 35 |
| Figura 31. Máquina universal de ensaio, método de Janka (Bastos, 2009)..... | 36 |
| Figura 32. Máquina de teste à compressão (Bastos, 2009)..... | 37 |
| Figura 33. Projeto arquitetônico de habitação popular (Bevilaqua, 2005) | 38 |
| Figura 34. Modelo numérico do painel elaborado por (Bevilaqua, 2005) | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 35. Carregamento uniaxial (Zhang <i>et al.</i> , 2005) | 40 |
| Figura 36. Carregamento cisalhante (Zhang <i>et al.</i> , 2005)..... | 41 |
| Figura 37. Curva normal de distribuição (Zhang <i>et al.</i> , 2005) | 42 |
| Figura 38. Concentração de tensão (Zhang <i>et al.</i> , 2005) | 43 |
| Figura 39. Comprimento de contato “ α ” (Smith, 1966) | 44 |
| Figura 40. Trabalho das forças externas (Campanari, 1985) | 47 |
| Figura 41. Elemento finito <i>Shell S4R</i> | 53 |
| Figura 42. Elemento finito <i>C3D8R</i> | 53 |
| Figura 43. Diagrama de tensão <i>versus</i> deformação do OSB (modelo numérico) | 54 |
| Figura 44. Diagrama de tensão <i>versus</i> deformação dos perfis (AISI, 1997)..... | 55 |
| Figura 45. Diagrama de tensão <i>versus</i> deformação dos perfis (Tian <i>et al.</i> , 2004) | 55 |
| Figura 46. Painéis submetidos ao ensaio experimental (AISI, 1997)..... | 56 |
| Figura 47. Modelo numérico (AISI, 1997)..... | 57 |
| Figura 48. Superfícies mestre e escrava (Bacelar, 2003) | 57 |
| Figura 49. Definição das superfícies (modelo numérico)..... | 58 |
| Figura 50. Malha elementos finitos (modelo numérico) | 59 |
| Figura 51. Modelo numérico (Tian <i>et al.</i> , 2004) | 60 |
| Figura 52. Malha elementos finitos (modelo numérico) | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 53. Condições de contorno (modelo numérico)..... | 62 |
| Figura 54. Resultados obtidos pelo AISI (1997) e no presente trabalho..... | 63 |
| Figura 55. Resultados obtidos por Tian <i>et al.</i> (2004) e no presente trabalho..... | 63 |
| Figura 56. Distribuição das tensões de von Mises..... | 64 |
| Figura 57. Diagrama de tensão <i>versus</i> deformação dos perfis (modelo numérico) | 66 |
| Figura 58. Modelo numérico do painel tipo A | 68 |
| Figura 59. Modelo numérico do painel tipo B..... | 70 |
| Figura 60. Diagonal equivalente (PTV) | 72 |
| Figura 61. Sistema estático equivalente | 72 |
| Figura 62. Problema real equivalente | 73 |
| Figura 63. Problema virtual | 74 |
| Figura 64. Modelos de painéis do tipo A. | 77 |
| Figura 65. Modelos de painéis do tipo B..... | 78 |
| Figura 66. Graus de liberdade do nó de um elemento <i>FRAME</i> | 78 |
| Figura 67. Elemento <i>FRAME</i> representando o montante | 79 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Propriedades geométricas mais utilizadas | 7 |
| Tabela 2. Designação e utilização dos PFF | 7 |
| Tabela 3. Características geométricas dos parafusos autobrocantes | 18 |
| Tabela 4. Seção transversal (AISI, 1997) | 22 |
| Tabela 5. Painéis analisados (Tian <i>et al.</i> , 2004) | 27 |
| Tabela 6. Seção transversal (Tian <i>et al.</i> , 2004). | 28 |
| Tabela 7. Resultados experimentais (Tian <i>et al.</i> , 2004) | 31 |
| Tabela 8. Seção transversal (AISI, 2005) | 32 |
| Tabela 9. Resultados experimentais (AISI, 2005) | 33 |
| Tabela 10. Resultados experimentais (Wu, 1999) | 41 |
| Tabela 11. Desvio padrão e variabilidade da densidade (Zhang <i>et al.</i> , 2005) | 42 |
| Tabela 12. Resultados numéricos (Zhang <i>et al.</i> , 2005) | 43 |
| Tabela 13. Propriedades do OSB (Wu, 1999) | 54 |
| Tabela 14. Painéis analisados experimentalmente (Tian <i>et al.</i> , 2004) | 60 |
| Tabela 15. Seção transversal (modelo numérico ABAQUS) | 67 |
| Tabela 16. Painéis do tipo A analisados numericamente | 69 |

| | |
|--|----|
| Tabela 17. Painéis do tipo B analisados numericamente..... | 71 |
| Tabela 18. Diâmetro da diagonal equivalente utilizando o PTV..... | 76 |
| Tabela 19. Seção transversal (modelo numérico SAP2000) | 79 |
| Tabela 20. Deslocamento horizontal utilizando o <i>software</i> SAP2000 | 80 |
| Tabela 21. Erro relativo do deslocamento horizontal..... | 81 |
| Tabela 22. Particularidades dos 36 modelos de painéis em estudo | 83 |
| Tabela 23. Erro relativo do diâmetro da diagonal equivalente – Painéis do tipo A | 87 |
| Tabela 24. Erro relativo do diâmetro da diagonal equivalente – Painéis do tipo B | 89 |
| Tabela 25. Erro relativo do diâmetro da diagonal equivalente – Painéis dos tipos A e B | 91 |
| Tabela 26. Erro relativo do diâmetro da diagonal equivalente – Painéis dos tipos A e B | 93 |
| Tabela 27. Erro relativo do deslocamento horizontal – Painéis do tipo A | 95 |
| Tabela 28. Erro relativo do deslocamento horizontal – Painéis do tipo B | 96 |
| Tabela 29. Erro relativo do deslocamento horizontal – Painéis dos tipos A e B..... | 97 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Romanos maiúsculos

U_e – perfil U enrijecido;

U – perfil U simples;

D – largura do enrijecedor de borda;

C_r – perfil cartola;

L – perfil cantoneira;

A_0 – área total da abertura;

H – altura total do painel;

L_i – comprimento total do painel;

F – força cisalhante aplicada ao painel;

M_{OE} – módulo de elasticidade;

M_{OR} – módulo de ruptura;

L_a – distância entre os centros dos apoios (vão);

F_1 – 10% da carga de ruptura;

F_2 – 40% da carga de ruptura;

S_1 – deflexão referente a 10% da carga de ruptura;

S_2 – deflexão referente 40% da carga de ruptura;

F_{rup} – força de ruptura;

E_a – módulo de elasticidade da vedação;

E_p – módulo de elasticidade do pórtico;

I_p – momento de inércia do pórtico

R – força na direção da diagonal equivalente;

$W_{externo}$ – trabalho externo;

$W_{interno}$ – trabalho interno;

P' – carga virtual genérica associada ao deslocamento;

N' – esforço normal no sistema virtual;

N – esforço normal no sistema real;

M' – momento fletor no sistema virtual;

M – momento fletor no sistema real;

Q' – esforço cortante no sistema virtual;

Q – esforço cortante no sistema real;

EA – módulo de rigidez à deformação axial;

EI – módulo de rigidez à flexão;

GA – módulo de rigidez ao cisalhamento;

Y – variável dependente;

X – variável independente;

X_c – termo cruzado;

A – área da seção transversal da diagonal equivalente;

ER – erro relativo;

DHA – deslocamento horizontal obtido por meio do *software* ABAQUS;

DHS – deslocamento horizontal obtido por meio do *software* SAP2000;

EO – espessura do OSB;

EM – espaçamento dos montantes;

EP – espaçamento dos parafusos.

Romanos minúsculos

b_w – largura da alma do perfil;

b_f – largura da mesa do perfil;

b_{f1} – largura da aba do perfil cantoneira;

b_{f2} – largura da aba do perfil cantoneira;

t_n – espessura da nominal da chapa;

r – influência da abertura;

e – espessura;

b – largura;

h – altura da parede de alvenaria;

w – largura da diagonal equivalente;

l – comprimento da diagonal equivalente;

t – espessura da alvenaria;

n – números reais diferentes de zero e um;

a – comprimento do painel;

u – deslocamento horizontal da diagonal equivalente.

Gregos

α – comprimento de contato;

λ – adimensional;

θ – inclinação da diagonal;

Δ_d – deslocamento na direção da diagonal;

Δ – deslocamento genérico a ser calculado no sistema real;

χ – fator de forma que define a área efetiva para cisalhamento;

β – coeficiente de regressão;

ϕ_{PTV} – diâmetro da diagonal equivalente utilizando o *PTV*;

$\phi_{MINITAB}$ – diâmetro da diagonal equivalente utilizando o *software* MINITAB.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre a estabilidade estrutural de painéis de cisalhamento “*Shear Wall*” do sistema *Light Steel Framing* (LSF). O sistema construtivo LSF, também conhecido como sistema autoportante de construção a seco estruturado em aço, vem se consolidando no mercado brasileiro da construção civil. Esse sistema é composto por painéis reticulados de perfis de aço galvanizado formado a frio que trabalham em conjunto com placas, proporcionando uma estrutura autoportante. Os reticulados são compostos por perfis esbeltos, denominados de guias e montantes. As placas podem ser de *Oriented Strand Board* (OSB) ou cimentícias, ambas com considerável resistência mecânica, ou de gesso acartonado, com função apenas de vedação. No presente trabalho é desenvolvido um modelo numérico tendo como base o método dos elementos finitos, empregando o *software* ABAQUS para a análise estrutural. Com os resultados obtidos do modelo numérico, é proposto um modelo analítico para o método da diagonal equivalente e uma equação baseada na regressão não linear multivariada para representar o modelo de modo mais geral. Desta forma, a análise estrutural do painel de cisalhamento poderá ser realizada com o processamento dos reticulados metálicos sem as placas estruturais, mas contraventado com uma barra circular fictícia trabalhando à tração (Diagonal Equivalente).

Palavras-chave: Light Steel Framing; painéis de cisalhamento; diagonal equivalente.

Abstract

This paper presents a study regarding the structural stability of Shear Wall of the Light Steel Framing System (LSF). The construction system named LSF, also known as self-supporting steel dry construction system, has been consolidated in the Brazilian civil construction. This system consists of frame galvanized steel cold-formed profiles that works with panels, providing self-supporting structure. The frames are composed of slender structural members, named track and stud. The wall bracing can be made using Oriented Strand Board (OSB) or cementitious board, both have considerable mechanical strength, or gypsum board, that only has sealing function. The numerical model is based on the Finite Elements Method, running on the software ABAQUS. Through the evaluation of the obtained results, it is proposed an analytical model for the equivalent diagonal and an equation based on the nonlinear regression to represent the model in a general way. Thus, the frame structural analysis with shear wall can be performed without the structural board, but with a circular cross-section fictitious bracing member working under tensile stress (Equivalent Diagonal).

Keywords: Light Steel Framing; shear wall; equivalent diagonal.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Os Estados Unidos, entre os anos de 1810 e 1860, obtiveram um crescimento de forma acelerada. Estima-se que em todo o seu território a população americana se multiplicou por dez. Com uma crescente demanda de edificações em um curto prazo e através da revolução industrial com o emprego dos conceitos de velocidade, produtividade e praticidade, recorreu-se à utilização da madeira para suprir essa necessidade, visto que naquela época existiam grandes reservas florestais. Logo, deu-se o início ao sistema construtivo denominado de *Wood Framing*.

Em 1992 a costa leste dos Estados Unidos foi atingida pelo furacão *Andrew*, causando enorme destruição. Houve então a necessidade de reconstruir rapidamente as cidades afetadas pelo furacão. Durante a reconstrução foi observado que as trocas dos perfis de madeira utilizado no sistema *Wood Framing* eram lentas. Naquela época já existia a tecnologia dos perfis de aço galvanizado. Adotou-se então o sistema construtivo denominado de *Light Steel Framing* (LSF), que além de proporcionar uma troca rápida de perfis, possui boa relação resistência/peso.

O sistema construtivo LSF é composto por painéis reticulados em aço galvanizado conformado a frio que trabalham em conjunto com placas de diversos materiais, tais como as placas cimentícias e as placas de tiras orientadas de madeira, internacionalmente denominadas de *Oriented Strand Board* (OSB), proporcionando assim uma estrutura autoportante com função estrutural.

De acordo com Rodrigues (2006), existem dois conceitos básicos relativos ao sistema LSF: *Frame* é o esqueleto estrutural composto por Perfis Formados a Frio (PFF) projetados para suportar e dar forma à edificação, e *Framing* é o processo pelo qual se unem e vinculam os perfis. Logo, pode-se encontrar na bibliografia as seguintes expressões *Light Steel Frame Housing* ou *Residential Cold-Formed Steel Framing*, referindo-se às residências construídas com perfis de aço formados a frio.

1.2 Objetivo

Como objetivo geral, este trabalho almeja desenvolver um modelo analítico para o método da diagonal equivalente baseada na regressão não linear multivariada para o sistema *Light Steel Framing*. Desta forma, a análise estrutural do painel de cisalhamento poderá ser realizada com o processamento dos reticulados metálicos sem as placas de OSB, mas contraventados com uma barra de aço fictícia trabalhando à tração (Diagonal Equivalente).

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Obter um modelo numérico por meio do *software* ABAQUS capaz de representar o comportamento estrutural do painel de cisalhamento apresentado nos trabalhos experimentais desenvolvidos pelo *American Iron Steel Institute* (AISI, 1997) e por Tian *et al.* (2004).
- b) Realizar um estudo numérico para avaliar a eficiência da placa de *Oriented Strand Board* (OSB) no contraventamento de painéis do sistema LSF trabalhando como *Shear Wall*.
- c) Calibrar um modelo analítico para o método da diagonal equivalente utilizando o Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV). Essa diagonal circular terá diâmetro

equivalente, que proporcionará ao painel a mesma rigidez quando contraventado com o OSB.

1.3 Metodologia

A presente pesquisa dá ênfase aos estudos sobre diagonal equivalente, análise experimental e análise numérica em painéis de cisalhamento do sistema LSF.

A aferição dos modelos concebidos para a análise numérica foi realizada utilizando o *software* ABAQUS (*Simulia Corp.*, 2010) por meio de comparações com os resultados experimentais obtidos pelo AISI (1997) e por Tian *et al.* (2004). O modelo numérico tem por base o método dos elementos finitos.

Após a aferição dos modelos numéricos, foram desenvolvidos dois modelos com as seguintes dimensões: 4,80 m de comprimento por 2,80 m de altura e 1,80 m de comprimento por 3,12 m de altura. Essas dimensões foram adotadas para que o ângulo formado entre a diagonal equivalente e a guia inferior do painel fosse aproximadamente de 30° e de 60° respectivamente, considerando a altura do painel correspondente com o pé direito de uma edificação convencional.

Outros modelos foram desenvolvidos mantendo as dimensões dos painéis descritos no parágrafo precedente, alternando a espessura do OSB e os espaçamentos entre os montantes e entre os parafusos de fixação das placas no reticulado metálico, a fim de se obter a rigidez de cada modelo.

Com a rigidez determinada para cada painel estudado, foi calculado o diâmetro da diagonal equivalente utilizando o Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV). A diagonal

foi considerada como uma barra circular, sendo atribuído o valor do módulo de elasticidade longitudinal do aço.

O diâmetro da diagonal equivalente proposto pela teoria do PTV foi averiguado com o uso do *software* SAP2000 (2004).

De posse das particularidades de cada modelo de painel analisado (comprimento do painel, altura do painel, espessura da placa de OSB, espaçamentos entre os montantes, espaçamentos entre os parafusos, força máxima cisalhante obtida por meio do *software* ABAQUS, deslocamento horizontal obtido por meio do *software* SAP2000 e o diâmetro da diagonal equivalente obtido pela teoria do PTV), e empregando o *software* MINITAB®, o presente trabalho apresenta uma proposta de equação para o cálculo da diagonal equivalente em painéis de cisalhamento para o sistema LSF.

1.4 Justificativa

Soluções estruturais utilizando perfis formados a frio estão cada vez mais presentes em obras devido à tendência de industrialização e agilidade na execução. Logo, o conhecimento do comportamento do painel de cisalhamento do sistema LSF é de extrema importância, uma vez que a substituição das placas de OSB por diagonais equivalentes pode facilitar e agilizar a análise estrutural por meio de programas computacionais comerciais, por exemplo, o *software* STRAP.

Não foi encontrado na literatura trabalho que propusesse uma equação analítica para o método da diagonal equivalente utilizando o sistema LSF, onde placas de OSB podem ser empregadas como contraventamento.

É importante destacar que esta dissertação vai de encontro aos objetivos do PROPEEs/UFMG (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da UFMG) e está relacionada com a linha de pesquisa Estruturas Metálicas.

1.5 Sistema *Light Steel Framing*

O sistema construtivo *Light Steel Framing*, também conhecido como sistema autoportante de construção a seco em aço, vem se consolidando no mercado da construção civil. De acordo com Rodrigues (2006), pode-se considerar que o sistema estrutural de um edifício construído segundo os conceitos do LSF pode ser dividido em dois grupos de subsistemas, os horizontais e os verticais. Os subsistemas horizontais são responsáveis por receber e transmitir as cargas de pisos e tetos para os subsistemas verticais. Os subsistemas verticais são painéis que compõem as paredes com ou sem função estrutural. Painéis com função estrutural são capazes de resistir e transmitir as cargas verticais e horizontais para a fundação.

Como este trabalho visa analisar a estabilidade estrutural de painéis de cisalhamento do sistema LSF, os subsistemas verticais com painéis estruturais terão atenção especial. Os painéis estruturais são compostos basicamente pelos perfis formados a frio, placas estruturais e parafusos estruturais.

1.5.1 Perfis formados a frio

No Brasil, ações para a utilização do aço como peças estruturais vêm sendo desenvolvidas pelo Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA). No ano de 2006 foram publicados dois manuais de construção em aço, um para arquitetura e outro para engenharia, ambos relacionados ao sistema construtivo LSF. O manual de construção para arquitetura escrito por Freitas e Castro (2006), apresenta os aspectos de projeto, desenhos técnicos e montagem para edificações utilizando o sistema construtivo LSF. O manual de construção para engenharia escrito por Rodrigues (2006), apresenta os principais conceitos relativos aos perfis formados a frio, as diretrizes para o projeto estrutural incluindo as ligações empregadas no LSF e o dimensionamento segundo os critérios da norma ABNT NBR 14762:2001.

Os perfis formados a frio utilizados no sistema LSF devem ser fabricados a partir de bobinas de aço Zincado de Alta Resistência (ZAR) com no mínimo 230 MPa de resistência ao escoamento. As chapas de aço mais utilizadas no sistema LSF possuem espessuras de 0,80 mm, 0,95 mm e 1,25 mm, considerando o revestimento de galvanização com no mínimo 180 g/m² (CAIXA, 2003). Os aços que compõem o reticulado metálico devem ser revestidos com zinco ou liga alumínio-zinco pelo processo de imersão a quente ou por galvanização eletrolítica. O processo de galvanização recebido pelas bobinas de aço que compõem os perfis do sistema LSF garante uma alta proteção contra a corrosão.

A norma ABNT 15253:2005 apresenta os requisitos gerais para os perfis formados a frio, com revestimento metálico, para painéis reticulados em edificações. Apresenta a nomenclatura dos PFF no sistema LSF, suas aplicações mais comuns e tabelas com propriedades geométricas dos perfis das séries comerciais para esse sistema, seguindo a norma ABNT 6355:2003. As Tabelas 1 e 2 apresentam respectivamente as propriedades geométricas e a designação e aplicação dos perfis mais utilizados em estruturas com até dois pavimentos.

Tabela 1. Propriedades geométricas mais utilizadas.

| Dimensões (mm) | Designação (mm) | Largura da alma b_w (mm) | Largura da mesa b_f (mm) | Largura do enrijecedor de borda D (mm) |
|-------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|--|
| Ue 90x40x12x0,95 | Montante | 90,0 | 40,0 | 12,0 |
| Ue 90x40x12x1,25 | Montante | 90,0 | 40,0 | 12,0 |
| Ue 90x40x12x1,55 | Montante | 90,0 | 40,0 | 12,0 |
| Ue 140x40x12x1,55 | Montante | 140,0 | 40,0 | 12,0 |
| Ue 140x40x12x1,25 | Montante | 140,0 | 40,0 | 12,0 |
| Ue 140x40x12x1,55 | Montante | 140,0 | 40,0 | 12,0 |
| U 92x38x0,95 | Guia | 92,0 | 38,0 | - |
| U 92x38x1,25 | Guia | 92,0 | 38,0 | - |
| U 92x38x1,55 | Guia | 92,0 | 38,0 | - |
| U 142x38x0,95 | Guia | 142,0 | 38,0 | - |
| U 142x38x1,25 | Guia | 142,0 | 38,0 | - |
| U 142x38x1,55 | Guia | 142,0 | 38,0 | - |

Tabela 2. Designação e utilização dos PFF (continua).

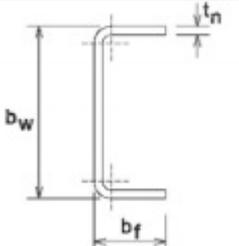
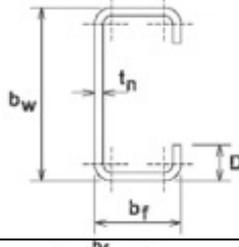
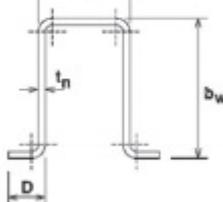
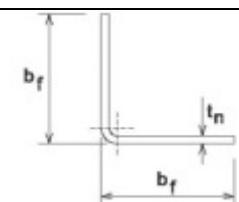
| Seção transversal | Série designação NBR 6355:2003 | Utilização |
|---|--|--|
|  | U simples $U b_w \times b_f \times t_n$ | Guia Ripa Bloqueador Sanefa |
|  | U enrijecedor $Eu b_w \times b_f \times D \times t_n$ | Bloqueador Enrijecedor de alma Montante Verga Viga |
|  | Cartola $Cr b_w \times b_f \times D \times t_n$ | Ripa |

Tabela 2. Designação e utilização dos PFF (conclusão).

| Seção transversal | Série designação NBR 6355:2003 | Utilização |
|---|--|------------|
|  | Cantoneira de abas iguais L $b_{f1} \times b_{f2} \times t_n$ | Cantoneira |

No item 1.4 do Manual de Construção em Aço do *Steel Framing: Engenharia* (Rodrigues, 2006) são apresentadas as principais definições dos PFF que constituem o sistema estrutural LSF, a saber:

- a) Guia: Perfil utilizado na horizontal para formar a base e o topo dos painéis de parede e entrepiso. É também combinado com fitas para travar lateralmente os montantes e as vigas.
- b) Montante: Perfil utilizado verticalmente na composição de painéis de parede. Os montantes devem apresentar espaçamentos entre si de 400 mm ou de 600 mm.
- c) Bloqueador: Perfil utilizado horizontalmente no travamento lateral de montantes e de vigas.
- d) Sanefa: Perfil utilizado para encabeçamento de estruturas de entrepisos e de telhados.
- e) Verga: Perfil utilizado horizontalmente sobre as aberturas para o suporte da estrutura do entrepiso e/ou do painel do andar superior.
- f) Viga: Perfil utilizado horizontalmente na composição de entrepisos.
- g) Fita: Fita de aço galvanizado empregada na diagonal como elemento de contraventamento e, em combinação com os bloqueadores, para diminuir os comprimentos efetivos de flambagem global dos montantes.

Por meio das Figuras 1 e 2 é possível visualizar os componentes de um painel estrutural e de um painel de entrepiso respectivamente.

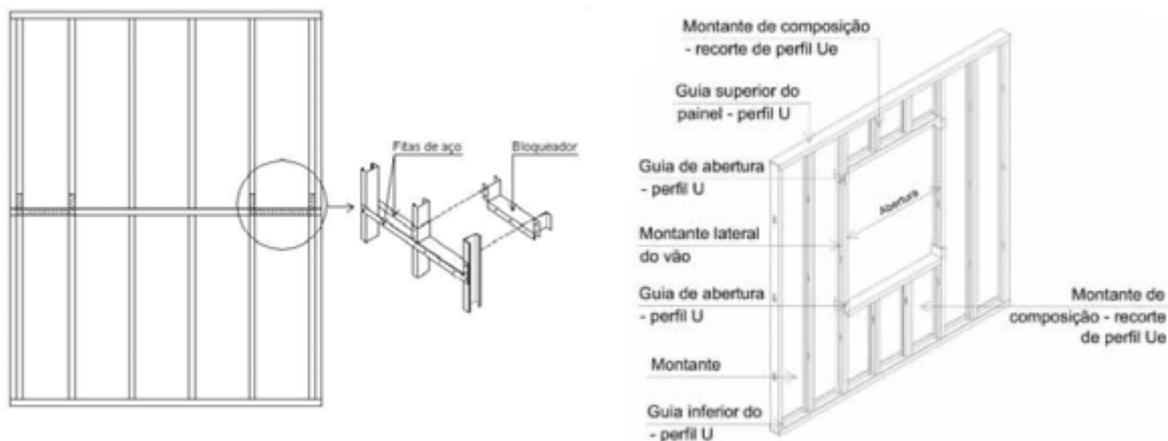


Figura 1. Componentes de um painel estrutural com abertura (Fonte: Freitas *et al.*, 2006).

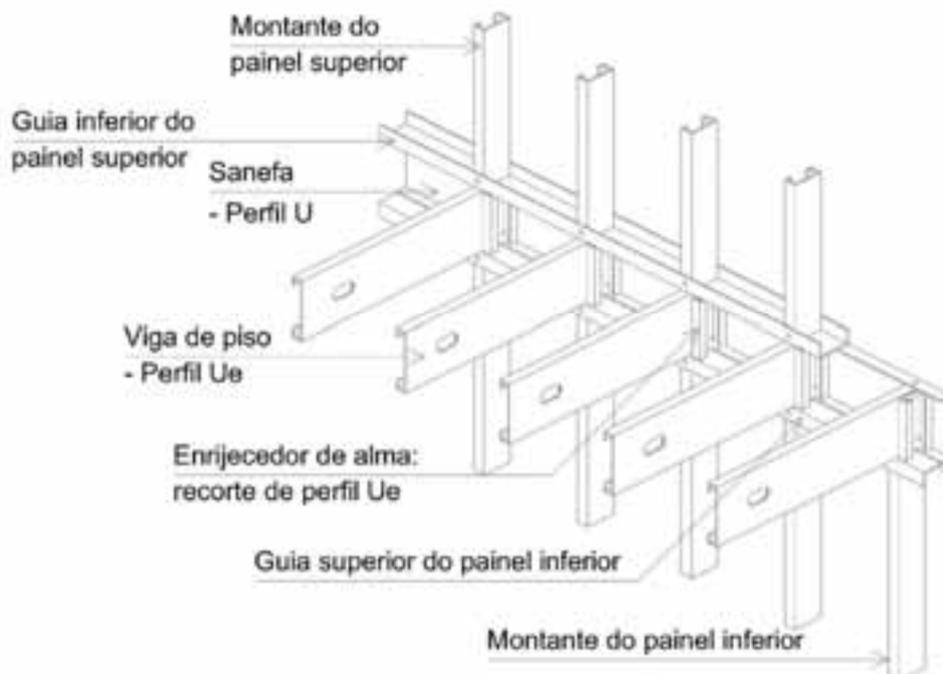


Figura 2. Componentes de um painel de entrepiso (Fonte: Freitas *et al.*, 2006).

O desenho esquemático de uma residência em LSF é apresentado na Figura 3, onde a estrutura é composta de paredes, pisos e cobertura.

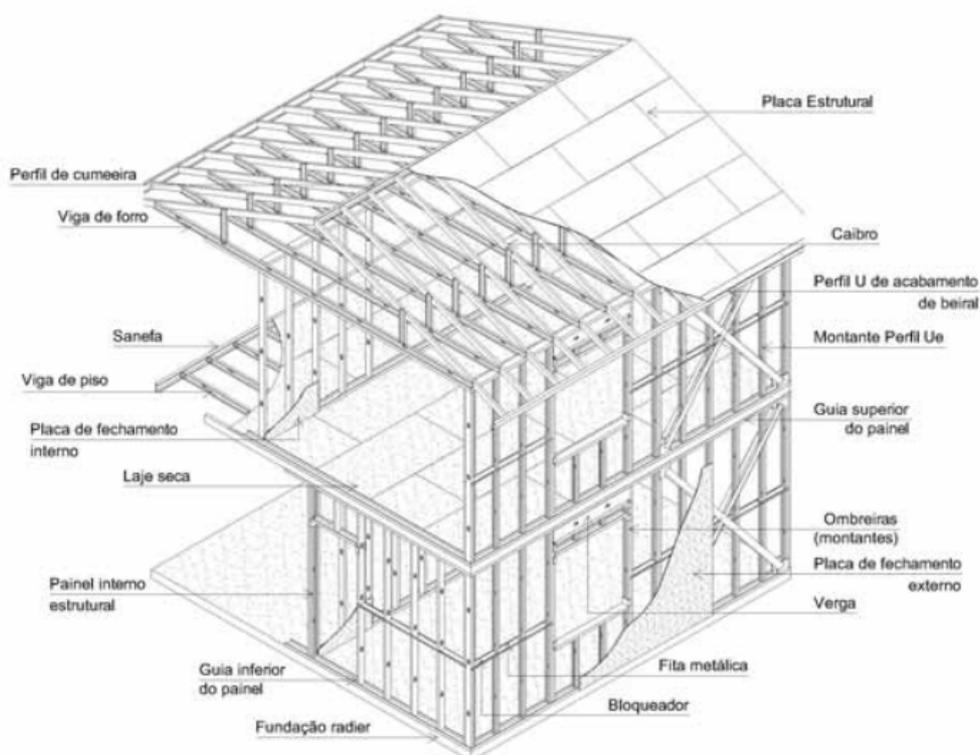


Figura 3. Desenho esquemático de uma residência em LSF (Fonte: Freitas *et al.*, 2006).

Existem três métodos de construção utilizando o LSF. No primeiro método, conhecido como *Stick*, os perfis são cortados e fixados no canteiro da obra. A grande vantagem deste método é que não há necessidade de um local para a pré-fabricação, porém todas as atividades são realizadas na obra. Outro método bastante conhecido é o método por painéis, que consiste em pré-fabricar painéis fora do canteiro de obras, em que a vantagem é a velocidade de montagem. Por fim, existe o método de construção modular, onde unidades completamente pré-fabricadas, inclusive revestimentos e acabamentos podem ser entregues no local da obra.

Apenas o reticulado metálico do sistema LSF não é capaz de absorver esforços horizontais no plano do painel. Logo, devem ser previstas placas e/ou contraventamento em fitas de aço como elementos estruturais adicionais para que possam resistir e transmitir tais esforços. O método mais comum de utilização do contraventamento é o uso de fitas de aço em formato de “X” (Figura 4). Quando a utilização do contraventamento em “X” não é adequada, devido por exemplo a uma interferência com

uma janela, outra alternativa é a utilização do contraventamento em “K”. Neste tipo de contraventamento as barras devem resistir às solicitações de compressão e de tração, alternadamente, carecendo ser utilizado o perfil U enrijecido.

De acordo com Consulsteel (2002), o ângulo formado entre a fita de aço utilizada no contraventamento e a guia inferior deve estar compreendido entre 30° e 60°. Scharff (1966) concluiu que quanto menor for o ângulo formado entre a guia inferior e a diagonal, menor será a tensão na fita.



Figura 4. Painel contraventado em “X”.

A força aplicada na guia superior é distribuída para as placas e montantes através de parafusos autobrocantes. Em seguida a guia inferior recebe estes esforços e os transmite para a fundação através do parafuso de ancoragem (ver Figura 5).

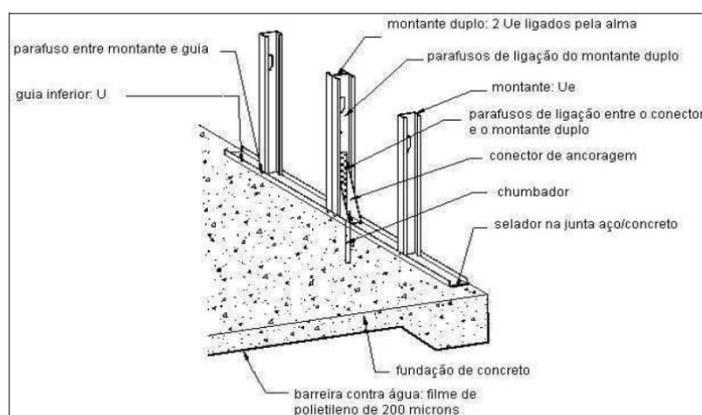


Figura 5. Sistema de ancoragem (chumbador).

A Figura 6 mostra o elemento estrutural denominado *hold-down* (conector de ancoragem). Este elemento estrutural é de extrema importância em painéis de cisalhamento, pois oferece maior resistência ao movimento de tombamento do painel. De acordo com NASFA (2000), o *hold-down* deve ser instalado nas extremidades de cada painel. Na vertical, os parafusos autobrocantes fixam este elemento estrutural ao montante e na horizontal o parafuso de ancoragem fixa a guia inferior à fundação.



Figura 6. *hold-down*.

Assim como em outras estruturas, o LSF deve ser dimensionado para resistir a esforços diversos, inclusive quando submetidos a ações laterais. De acordo com Faherty e Williamson (1997), o painel de barlavento recebe a carga lateral e transfere os esforços para a laje, que tem a função de diafragma horizontal. O diafragma, em seguida, recebe estes esforços e os distribui para os painéis de cisalhamentos (*shear wall*) (ver Figura 7).

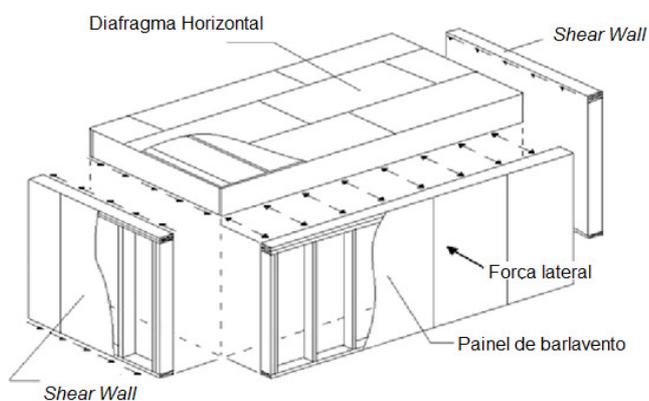


Figura 7. Sistema de distribuição de carga lateral.

Segundo Bredel (2003), pode-se considerar que no sistema LSF o painel que trabalha como *Shear Wall* é engastado na parte inferior e livre na parte superior, servindo de apoio para a laje. Logo, as ações laterais estão aplicadas na parte superior, oriundas da presença do diafragma rígido (ver Figura 8).

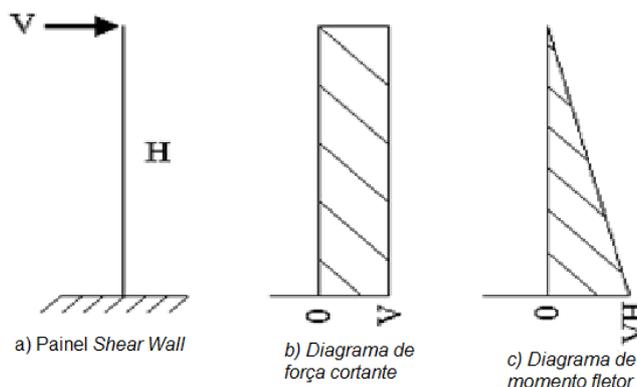


Figura 8. Ações laterais e condições de contorno.

1.5.2 Placas estruturais

De acordo com Rodrigues *et al.* (2004), uma placa de vedação é considerada um diafragma rígido quando confere à estrutura do reticulado metálico uma resistência necessária para absorver as cargas laterais.

Conforme Crandell (2004), um painel de cisalhamento utilizado no sistema LSF deve ser composto pelo reticulado metálico e por placas de OSB, ambos conectados por parafusos que são capazes de resistir às forças cortantes solicitantes.

As placas empregadas no sistema LSF podem ser de OSB ou cimentícias, ambas com considerável resistência mecânica, ou de gesso acartonado, com função apenas de

vedação. As placas estruturais que constituem os painéis de cisalhamento do sistema *Light Steel Framing* são utilizadas para resistirem aos esforços de cisalhamento, aumentando assim a rigidez do painel.

As propriedades mecânicas do OSB se assemelham às da madeira sólida, pois não são utilizados resíduos de serraria em sua fabricação. Essas placas possuem dimensões nominais de 1,20 m de largura por 2,40 m de comprimento ou de 1,60 m de largura por 2,50 m de comprimento, tendo as seguintes espessuras: 11 mm, 13 mm, 15 mm e 18 mm. A placa de OSB possui maior resistência ao cisalhamento quando comparada ao compensado, pois possui alta homogeneidade.

De acordo com Mendes (2002), o OSB é considerado uma placa estrutural. Sua resistência mecânica é adquirida devido ao método de fabricação, que utiliza partículas de madeira dispostas em várias camadas (ver Figura 9). As camadas são unidas por resina e prensadas sob altas temperaturas, o que oferece excelentes resultados de resistência à flexão e módulo de elasticidade.



Figura 9. Detalhe da composição do OSB.

No processo de fabricação do OSB, são empregadas madeiras de densidade em torno de 600 a 800 kg/m³, caracterizando madeiras macias de menor resistência mecânica. Porém, não se usa resíduos de serraria, o que difere o OSB das placas de madeira compensada.

De acordo com o catálogo técnico da ETERNIT (2007), a placa cimentícia é considerada como isotrópica e possui considerável resistência mecânica, tendo módulo de elasticidade igual a 6,0 GPa. É produzida através da mistura homogênea de cimento portland, agregados naturais (quartzo) e fios sintéticos. Com o objetivo de reduzir o coeficiente de dilatação e absorção de umidade, a placa é submetida a calor e vácuo sob pressão (autoclave).

As placas cimentícias (ver Figura 10) podem ser utilizadas em áreas internas e externas, possuindo largura igual a 1,20 m e comprimento variando de 2,40 m a 3,00 m, com espessuras de: 4 mm, 6 mm, 8 mm e 10 mm.



Figura 10. Placas cimentícias.

A placa de gesso acartonado (ver Figura 11) é produzida a partir da gipsita, que é um minério de sulfato de cálcio hidratado. Não possui função estrutural e é apenas utilizada como fechamento interno nas edificações. A placa de gesso acartonado pode conter retardante de chama, sendo indicada para uso em áreas de rotas de fuga, por exemplo. Em áreas molhadas são utilizadas placas hidrófugas, conhecidas também como placa Resistente à Umidade (RU) ou placa verde. As placas de gesso acartonado possuem largura igual a 1,20 m e comprimento variando de 2,60 m a 3,00 m, com espessuras de 12,0 mm, 15,0 mm e 18,0 mm.



Figura 11. Placa de gesso acartonado.

1.5.3 Parafusos estruturais

Conforme ilustrado na Figura 12, os parafusos estruturais que constituem o meio de fixação do sistema LSF são denominados de parafusos autobrocantes ou autoperfurantes, pois possuem a característica de executar o próprio furo, eliminando o trabalho de furação antes da fixação das peças.

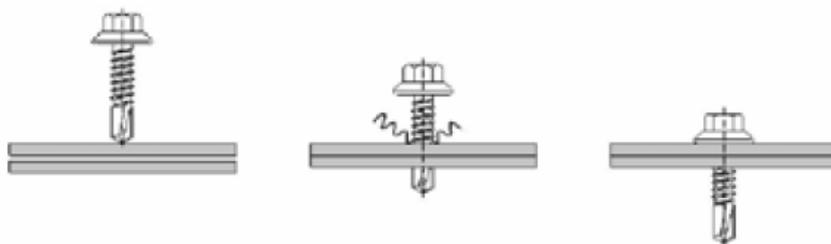


Figura 12. Parafusos autobrocantes.

Os parafusos são fabricados a partir do aço carbono revestidos com zinco ou liga alumínio-zinco, evitando assim a corrosão e mantendo as mesmas características dos PFF do sistema LSF.

De acordo com a NASFA (2000), para que o parafuso seja considerado como autoatarraxante, depois de concluído o rosqueamento, no mínimo 3 (três) fios da rosca deverão ultrapassar a última chapa conectada, assim o atarraxamento é garantido (ver Figura 13).

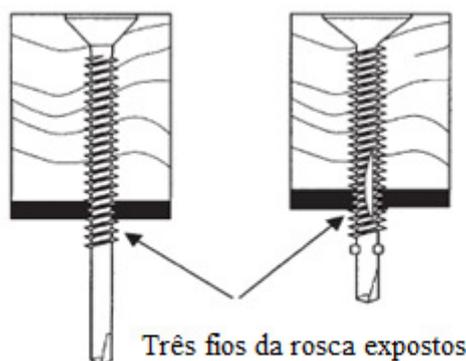


Figura 13. Parafusos autoatarraxante.

Os parafusos autobrocantes apresentam dois tipos de ponta (ver Figura 14), segundo NASFA (2000). Parafusos com ponta agulha (*Self-Piercing*) são utilizados quando o PFF possui espessura de até 0,80 mm; são normalmente utilizados em painéis não estruturais. Já os parafusos com ponta broca (*Self-Drilling*) são utilizados quando o PFF possui espessura maior que 0,80 mm.



Figura 14. Tipos de pontas de parafusos autobrocantes.

Os tipos da cabeça dos parafusos autobrocantes a ser utilizado no sistema LSF, dependem exatamente do tipo dos materiais a serem fixados (ver Figura 15).



Figura 15. Tipos de cabeças de parafusos autobrocantes.

Os parafusos com cabeça lentilha e sextavada são utilizados para fixar metal com metal. Parafusos com cabeça lentilha são normalmente utilizados em ligações de montante com guia, onde posteriormente serão fixadas placas de fechamento. Já o parafuso com cabeça sextavada é utilizado em ligações entre painéis, a geometria da cabeça impede sua utilização em locais onde posteriormente serão fixadas placas de fechamento.

Parafusos com cabeça trombeta são utilizados para fixar as placas ao reticulado metálico, o formato da cabeça permite a penetração nas placas de fechamento, proporcionando assim um melhor acabamento.

A Tabela 3 apresenta algumas características geométricas importantes dos parafusos autobrocantes com a designação por bitolas, diâmetros e comprimentos.

Tabela 3. Características geométricas dos parafusos autobrocantes.

| Bitola (#) | Diâmetro (mm) | Comprimento (mm) |
|-------------------|----------------------|-------------------------|
| 8 | 4,2 | 12,7 a 25,4 |
| 10 | 4,8 | 12,7 a 38,1 |
| 12 | 5,5 | 12,7 a 38,1 |

Pull-Out e *Pull-Over* são dois modos de falhas originados quando os parafusos autobrocantes são submetidos à tração. O modo de falha por *Pull-out* é caracterizado pelo o arrancamento do parafuso, enquanto no *Pull-Over* ocorre o puncionamento da chapa e/ou placa. Esses dois modos de falhas são representados na Figura 16.

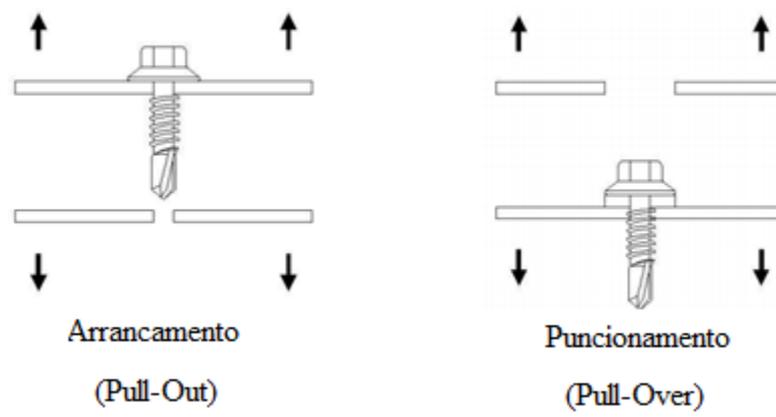


Figura 16. Modos de falhas *Pull-Out* e *Pull-Over*.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta alguns trabalhos experimentais e numéricos encontrados na literatura que abordam assuntos relacionados aos painéis de cisalhamento do sistema *Light Steel Framing*. Também será apresentada uma breve teoria sobre o princípio dos trabalhos virtuais e o método da regressão não linear multivariada.

2.2 Trabalhos experimentais

A indústria norte-americana de aço no ano de 1995 formou um comitê entre o *American Iron and Steel Institute* (AISI) e o *Canadian Sheet Steel Building Institute* (CSSBI) para ampliar o uso do aço em edificações. Assim, diversos trabalhos foram realizados com o propósito de difundir a utilização do LSF em edificações.

2.2.1 AISI (1997)

O *American Iron and Steel Institute* AISI (1997) realizou quatro ensaios experimentais em painéis de cisalhamento. O ensaio 1 corresponde a um painel em LSF sem abertura, os ensaios 2A, 2B e 4 correspondem a painéis com aberturas (ver Figura 17). Porém, o painel 2B não possui o componente de fixação dos montantes (*hold-down*).

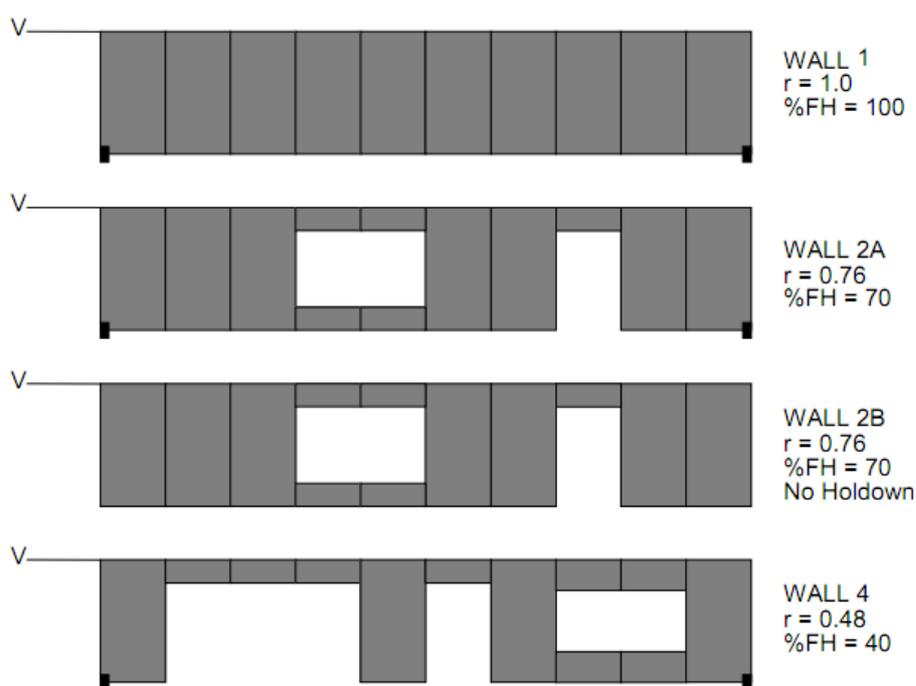


Figura 17. Painéis submetidos ao ensaio experimental (AISI, 1997).

Os painéis possuem 12 m de comprimento por 2,40 m de altura. Os montantes são espaçados de 60 cm e cada placa de OSB, posicionada na vertical em apenas uma face do painel, possui 13 mm de espessura, 1,20 m de largura e 2,40 m de comprimento. As placas são fixadas ao reticulado metálico por meio de parafusos espaçados a cada 15 cm na horizontal (nas guias) e 30 cm na vertical (nos montantes). Na outra face do painel, são fixadas placas de gesso acartonado com largura igual a 1,20 m, comprimento de 2,40 m e 15,0 mm de espessura.

Os perfis que constituem o reticulado metálico são fabricados com aço ZAR360, possuindo o módulo de elasticidade igual a 200 GPa e 360 MPa de resistência ao

escoamento. A seção transversal referente ao montante e a guia (ambos com 0,80 mm de espessura) é representada na Tabela 4.

Tabela 4. Seção transversal (AISI, 1997).

| | Montante (mm) | Guia (mm) |
|----------------------------|---------------|-----------|
| Largura da alma (b_w) | 90,0 | 92,0 |
| Largura da mesa (b_f) | 40,0 | 38,0 |
| Largura do enrijecedor (D) | 12,0 | - |

Os painéis de cisalhamento foram ensaiados na posição vertical. Um atuador hidráulico aplicou o carregamento no canto superior direito. Uma viga de aço de 92 mm x 92 mm foi acoplada na parte superior do reticulado metálico para que o carregamento fosse distribuído igualmente na guia superior (ver Figura 18). Transdutores de deslocamentos foram posicionados na outra extremidade para registrar os respectivos deslocamentos gerados pelo atuador hidráulico.

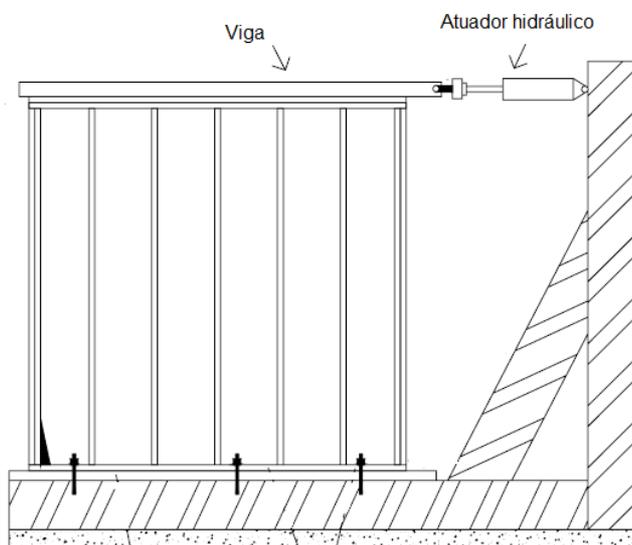


Figura 18. Configuração dos trabalhos experimentais (AISI, 1997).

Cada configuração de painel foi ensaiada apenas uma única vez. O objetivo desse trabalho foi determinar a capacidade máxima de carga de cisalhamento, rigidez e modos de falhas dos painéis. As curvas de força *versus* deslocamento de cada painel estão mostradas na Figura 19.

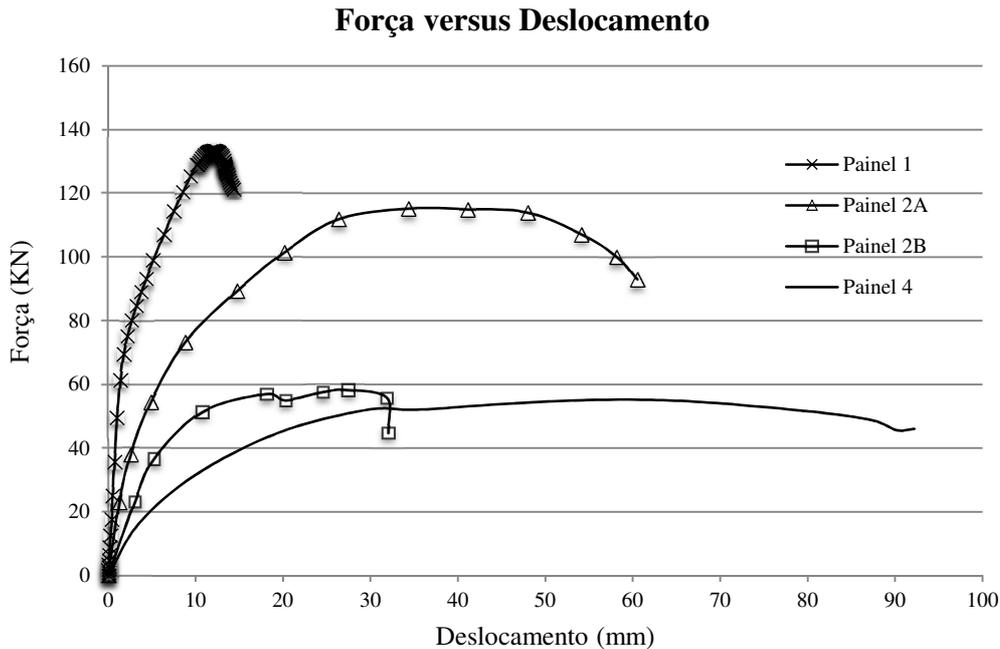


Figura 19. Gráfico de força *versus* deslocamento (AISII, 1997).

Pode-se observar na Figura 19 que o painel 1 (sem aberturas) possui maior rigidez comparado com os demais, e que o modelo 4 por possuir maiores aberturas, representa o painel menos rígido. Os painéis 2A e 2B possuem aberturas iguais, porém o painel 2A possui *hold-down*, o que proporcionou maior rigidez ao painel.

AISI (1997) observou que os modos de falhas foram praticamente idênticos nos painéis que possuem *hold-down*. Primeiramente ocorreu o *pull-over* nos parafusos que fixavam a placa de gesso acartonado, como essa placa possui função apenas de vedação, a rigidez do painel não foi alterada. Houve uma redução da rigidez do painel no momento em que a carga aplicada pelo atuador hidráulico atingiu a capacidade de resistência do OSB. Foram observadas fissuras no OSB ao redor dos parafusos e, por conseguinte ocorreu o *pull-over* em alguns parafusos que fixavam o OSB na guia superior.

No painel 2B, ocorreu primeiramente o *pull-over* nos parafusos que fixavam a placa de gesso acartonado. No entanto, como a fixação do painel à fundação não possui o *hold-down*, houve um desprendimento da guia inferior na região próxima ao atuador hidráulico, ocasionando assim um tombamento do painel e conseqüentemente uma redução de sua rigidez. Esse modo de falha é ilustrado na Figura 20.

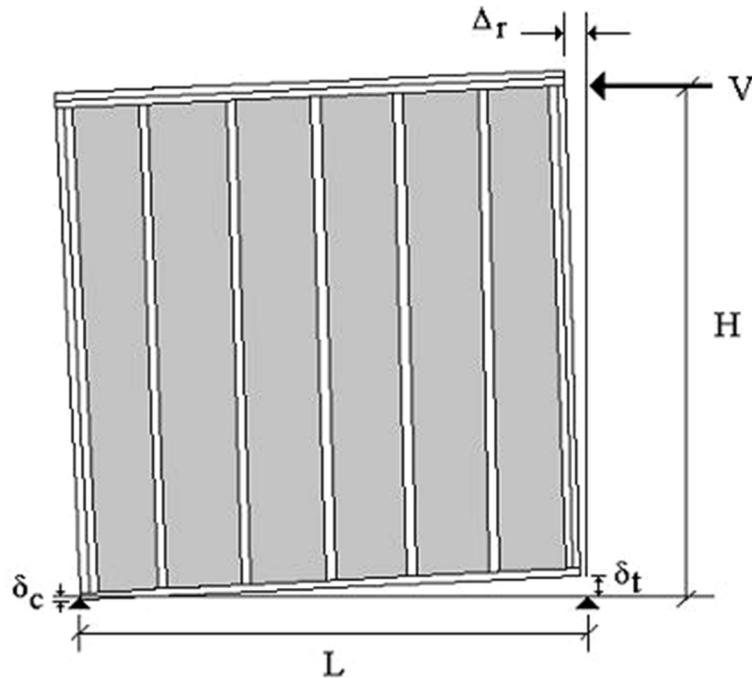


Figura 20. Tombamento do painel (AISI, 1997).

Por meio de estudos em painéis com aberturas realizados por Sugiyama e Yasumura (1984) e Sugiyama e Matsumoto (1994), AISI (1997) também sugeriu uma nova formulação para a força cisalhante em painéis com aberturas.

Sugiyama e Yasumura (1984) realizaram testes em painéis com abertura através de um protótipo numa escala de 1/3. Esse trabalho analisou a influência da abertura no painel *Shear Wall* quando submetido à força de cisalhamento. A influência da abertura “r” no painel *Shear Wall* quando submetido à força de cisalhamento é definida de acordo com a Equação (1).

$$r = \frac{1}{1 + \frac{A_0}{H \sum L_i}} \quad (1)$$

onde:

r = influência da abertura;

A_0 = área total da abertura;

H = altura total do painel;

L_i = comprimento total do painel.

Sugiyama e Matsumoto (1994) determinaram empiricamente a equação capaz de associar a força cisalhante com a influência da abertura “r” no painel *Shear Wall*. A força cisalhante é definida conforme a Equação (2).

$$F = \frac{r}{(3 - 2.r)} \quad (2)$$

onde:

F = força de cisalhamento aplicada no painel (em libras-força);

r = influência da abertura no painel.

O *American Iron and Steel Institute* AISI (1997) sugeriu uma nova formulação, a Equação (3), que se relaciona com maior precisão aos dados dos ensaios realizados. Esta equação apresenta valores da força cisalhante apenas para painéis com aberturas.

$$F = \frac{r}{(2 - r)} \quad (3)$$

onde:

F = Força de cisalhamento aplicada no painel (em libra);

r = influência da abertura no painel.

Por meio das equações propostas por Sugiyama e Matsumoto (1994) e o *American Iron and Steel Institute* AISI (1997), foi desenvolvido um gráfico com o intuito de relacionar a força de cisalhamento aplicada no painel (em libras-força) com a influência da abertura (ver Figura 21).

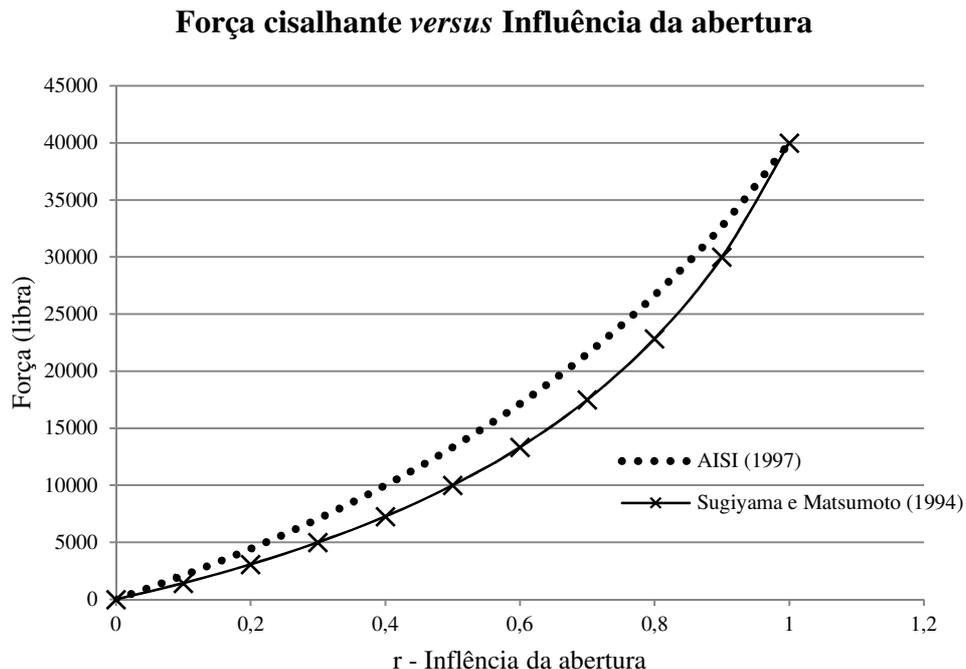


Figura 21. Gráfico de força cisalhante *versus* influência abertura (AISI, 1997).

AISI (1997) concluiu que o OSB resiste satisfatoriamente a força de cisalhamento imposta nos painéis analisados, e que de acordo com as curvas de força *versus* deslocamento mostradas na Figura 19, o *hold-down* é um elemento estrutural de extrema importância em painéis de cisalhamento, pois, além de aumentar a rigidez do painel impede o tombamento do mesmo. O cálculo da força de cisalhamento utilizando a equação empírica desenvolvida por Sugiyama e Matsumoto (1994) é válido, porém conservador comparado com os resultados obtidos por AISI (1997).

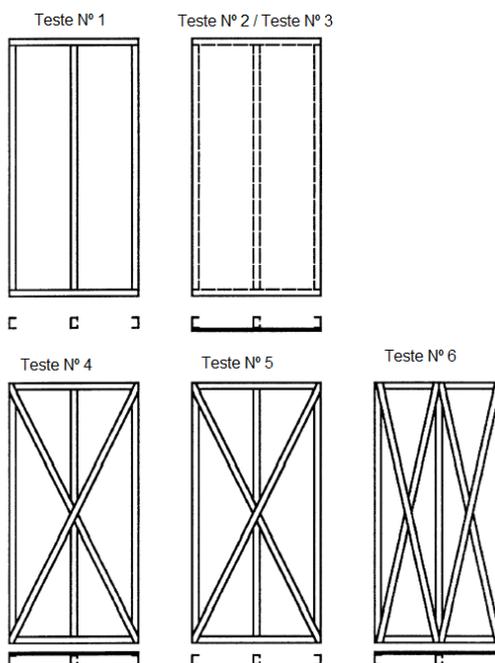
2.2.2 Tian *et al.* (2004)

Tian *et al.* (2004) realizaram ensaios experimentais com intuito de avaliar a rigidez de painéis de cisalhamento do sistema LSF. Foram avaliados seis tipos diferentes de painéis (ver Tabela 5).

Tabela 5. Painéis analisados (Tian *et al.*, 2004).

| Modelo | Descrição |
|--------|---|
| 1 | Sem contraventamento e sem placa. |
| 2 | Com OSB em apenas uma face. |
| 3 | Com placa cimentícia em apenas uma face. |
| 4 | Com contraventamento em X nas duas faces. |
| 5 | Com contraventamento em X em apenas uma face. |
| 6 | Duplo contraventamento em XX nas duas faces. |

Cada painel possuía 1,20 m de comprimento por 2,40 m de altura (ver Figura 22). A carga foi aplicada por meio de um atuador hidráulico na guia superior, e um transdutor de deslocamento foi posicionado na outra extremidade da guia superior para registrar os respectivos deslocamentos. Os perfis que constituem o reticulado metálico foram fabricados como aço ZAR350, possuindo o módulo de elasticidade igual a 200 GPa e 350 MPa de resistência ao escoamento. Os montantes foram espaçados de 60 cm e as placas de OSB (posicionadas na vertical) possuíam 13 mm de espessura, 1,20 m de largura e 2,40 m de comprimento. A fita utilizada no contraventamento possui 60 mm de largura e 1,25 mm de espessura. As placas foram fixadas ao reticulado metálico por meio de parafusos espaçados de 30 cm na horizontal (guias) e na vertical (montantes).

Figura 22. Painéis submetidos ao ensaio experimental (Tian *et al.*, 2004).

A seção transversal referente ao montante e a guia (ambos com 1,25 mm de espessura) é representada na Tabela 6:

Tabela 6. Seção transversal (Tian *et al.*, 2004).

| | Montante (mm) | Guia (mm) |
|----------------------------|---------------|-----------|
| Largura da alma (b_w) | 90,0 | 93,0 |
| Largura da mesa (b_f) | 60,0 | 67,0 |
| Largura do enrijecedor (D) | 12,0 | - |

Os painéis de cisalhamento foram ensaiados na posição horizontal. Um atuador hidráulico aplicou o carregamento no canto superior direito. Uma viga de madeira de 93 mm x 93 mm foi acoplada na parte superior do reticulado metálico para que o carregamento fosse distribuído igualmente na guia superior (ver Figura 23). Transdutores de deslocamentos foram posicionados na outra extremidade para registrar os respectivos deslocamentos gerados pelo atuador hidráulico. Dois rolos foram posicionados na face superior da viga de madeira para impedir o deslocamento vertical do painel.

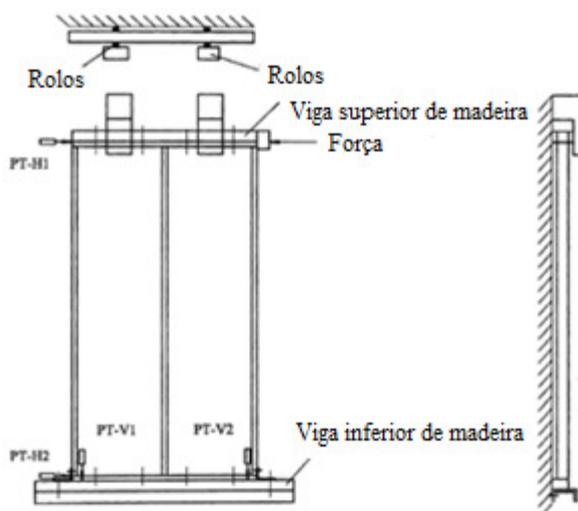


Figura 23. Painéis analisados experimentalmente (Tian *et al.*, 2004).

O atuador hidráulico e os transdutores de deslocamento foram conectados ao sistema de aquisição de dados, e este acoplado ao computador para análise de dados. Foram realizadas duas análises experimentais para o modelo dois (OSB em apenas uma face).

Durante a realização da primeira análise experimental referente ao modelo dois, a borda inferior da placa de OSB encostou na viga de madeira que era acoplada na guia inferior do reticulado metálico. Como o resultado ficou alterado devido ao contato da placa com a viga, foi necessária a realização da segunda análise.

A Figura 24 apresenta a curva de força *versus* deslocamento referente a segunda análise experimental, onde o ensaio ocorreu de forma adequada, sem a descaracterização do resultado.

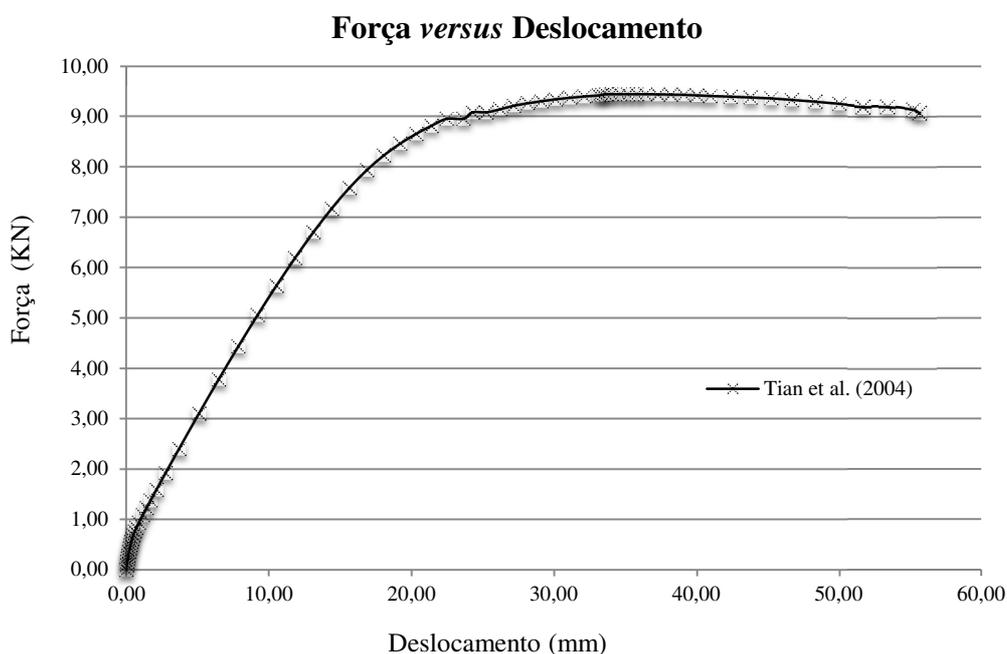


Figura 24. Força *versus* deslocamento do segundo modelo (Tian *et al.*, 2004).

Quando a carga do atuador hidráulico aproximou de 5,0 kN, ocorreu uma flambagem local na parte superior do montante esquerdo, localizado no lado oposto ao atuador hidráulico. Também foi observada uma flambagem local na parte inferior do montante direito, que estava localizado no mesmo lado do atuador hidráulico. Ao atingir a força de 9,0 kN, foi observado o rasgamento da placa de OSB em torno dos parafusos que estavam localizados no canto superior esquerdo, entre o montante e a guia (ver Figura 25).



Figura 25. Região de rasgamento do OSB (Tian *et al.*, 2004).

Tian *et al.* (2004) concluíram que quando o deslocamento lateral dos painéis de cisalhamento contraventados atingiu aproximadamente 30 mm, exceto o modelo 5, a força máxima cisalhante obtida foi aproximadamente de 9,5 kN. Realizando uma comparação com o modelo 1, painel composto apenas pelo reticulado metálico sem placas estruturais e sem fita de aço como contraventamento, para a mesma deflexão lateral de 30 mm, a força máxima cisalhante foi aproximadamente de 0,4 kN. Logo, apenas reticulado metálico contribuiu cerca de 4% para a rigidez total do painel analisado.

Nos painéis contraventados com placas de OSB e cimentícias, os modos de falhas ocorreram no rasgamento e na fissuração das placas respectivamente. Logo, se utilizar placas com maiores espessuras e/ou reduzir o espaçamento entre os parafusos que fixam a placa ao reticulado metálico, é possível obter maiores valores da força máxima cisalhante.

De acordo com os resultados experimentais (ver Tabela 7) obtidos nesse trabalho, Tian *et al.* (2004) concluíram que os painéis contraventados com placas de OSB ou cimentícias (modelos 2 e 3), resistem aproximadamente a mesma força cisalhante comparada com os painéis que possuem a fita de aço como contraventamento (modelos 4 e 6).

Tabela 7. Resultados experimentais (Tian *et al.*, 2004).

| Modelo | Descrição | Força máxima cisalhante (kN) |
|--------|---|------------------------------|
| 1 | Sem contraventamento e sem placa. | 0,4 |
| 2 | Com OSB em apenas uma face. | 9,5 |
| 3 | Com placa cimentícia em apenas uma face. | 9,9 |
| 4 | Com contraventamento em X nas duas faces. | 10,3 |
| 5 | Com contraventamento em X em apenas uma face. | 5,2 |
| 6 | Duplo contraventamento em XX nas duas faces. | 10,1 |

2.2.3 AISI (2005)

O *American Iron and Steel Institute* AISI (2005) realizou uma análise experimental em painéis de cisalhamento do sistema LSF, foram ensaiados 4 painéis com 2,40 m de comprimento por 2,40 m de altura. A carga foi aplicada por meio de um atuador hidráulico na guia superior. Um transdutor de deslocamento foi posicionado na outra extremidade da guia superior para registrar os respectivos deslocamentos (ver Figura 26).



Figura 26. Painel analisado por (AISI, 2005).

Os perfis que constituem o reticulado metálico são fabricados com aço ZAR230, possuindo o módulo de elasticidade igual a 200 GPa e 230 MPa de resistência ao escoamento. Os montantes são espaçados de 60 cm e cada placa de *Medium Density Fiberboard* (MDF) em apenas uma face (posicionada na vertical) possui 12 mm de espessura, 1,20 m de largura e 2,40 m de comprimento. Uma viga de madeira de 93 mm x 93 mm foi acoplada na parte superior do reticulado metálico para que o carregamento fosse distribuído igualmente na guia superior.

Conforme a Figura 27 é possível visualizar que foram utilizados montantes duplos nas extremidades do painel. Também foi utilizado *Hold-down* com o objetivo de aumentar a rigidez e impedir o tombamento do painel.



Figura 27. Montante duplo e *hold-down* utilizados nos ensaios do (AISI, 2005).

A seção transversal referente ao montante e a guia (ambos com 0,80 mm de espessura) é representada na Tabela 8:

Tabela 8. Seção transversal (AISI, 2005).

| | Montante (mm) | Guia (mm) |
|----------------------------|---------------|-----------|
| Largura da alma (b_w) | 92,0 | 93,0 |
| Largura da mesa (b_f) | 42,0 | 32,0 |
| Largura do enrijecedor (D) | 12,7 | - |

Esse trabalho avaliou a influência do espaçamento entre parafusos que fixavam as placas ao reticulado metálico. Nas guias superiores e inferiores foram utilizados espaçamentos de 5,0 e 7,5 cm, e nos montantes o espaçamento dos parafusos foi de 15,0 cm.

AISI (2005) observou que o modo de falha apresentado nas análises experimentais foram provenientes do *pull-over* dos parafusos que fixavam a placa de MDF ao montante central (ver Figura 28).

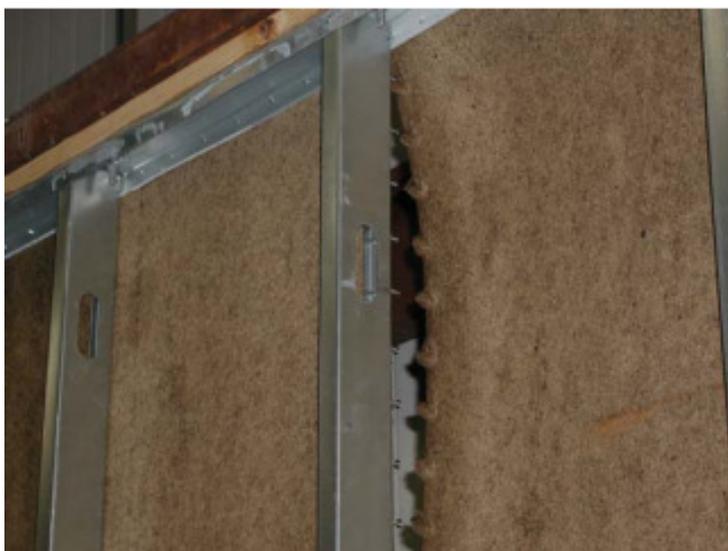


Figura 28. Modo de falha por *pull-over* (AISI, 2005).

AISI (2005) concluiu através da Tabela 9 que os painéis que possuem parafusos espaçados a cada 5,0 cm nas guias possuem maior resistência quando comparados com os painéis que possuem espaçamento de 7,5 cm.

Tabela 9. Resultados experimentais (AISI, 2005).

| Ensaio | Espaçamento entre parafusos (cm) | Carga Última (kN) | Média (kN) |
|--------|----------------------------------|-------------------|------------|
| 1 | 7,5 | 22,67 | 21,95 |
| 2 | 7,5 | 21,24 | |
| 3 | 5,0 | 24,37 | 23,88 |
| 4 | 5,0 | 23,40 | |

2.3 Bastos (2009)

Bastos (2009) determinou por meio de análise experimental algumas propriedades mecânicas e físicas do OSB, tais como: densidade, módulo de elasticidade, módulo de ruptura, dureza pelo método de Janka e tensão de cisalhamento à compressão. Como o Brasil ainda não possui norma específica, foram utilizadas as normas canadense, européias e americanas para a realização da análise experimental.

Foram utilizadas cinco amostras para determinar a densidade do OSB. As amostras foram moldadas conforme a EN-326-1 (1994) e acondicionadas a uma temperatura de $20\pm 2^\circ\text{C}$. Após 24 horas as amostras foram pesadas em uma balança digital de alta precisão.

Para determinar o módulo de elasticidade longitudinal (M_{OE}) e o módulo de ruptura (M_{OR}), 11 corpos de provas foram submetidos a ensaio de flexão (ver Figura 29). Para a realização deste ensaio, foi utilizada a norma EN-326-1 (1994).



Figura 29. Determinação do M_{OE} e M_{OR} (Bastos, 2009).

As forças aplicadas através da máquina universal de teste foram registradas com as respectivas deflexões no ponto central do vão. Logo, o M_{OE} foi obtido conforme a Equação (4).

$$M_{0E} = \frac{L_a^3 \cdot (F_2 - F_1)}{4 \cdot b \cdot e^3 \cdot (S_2 - S_1)} \quad (4)$$

onde:

M_{0E} = módulo de elasticidade;

L_a = distância entre os centros dos apoios (vão);

e = espessura do corpo de prova;

b = largura do corpo de prova;

$F_2 - F_1$ = incremento de força, no trecho reto da curva força-deflexão, onde F_1 é 10% e F_2 40% da carga de ruptura (ver Figura 30);

$S_2 - S_1$ = incremento de deflexão, no ponto central do vão correspondente a $F_2 - F_1$ (ver Figura 30).

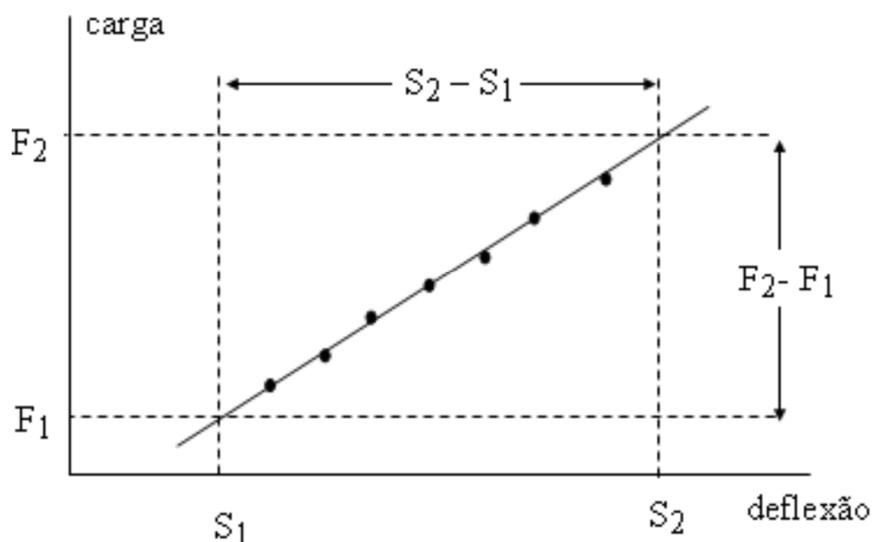


Figura 30. Gráfico para determinação das forças e deflexões (Bastos, 2009).

O módulo de ruptura foi calculado conforme a Equação (5).

$$M_{OR} = \frac{3.F_{RUP}.L_a}{2.b.e^2} \quad (5)$$

onde:

M_{OR} = módulo de ruptura à flexão;

F_{rup} = força de ruptura;

L_a = distância entre os centros dos apoios (vão);

e = espessura do corpo-de-prova;

b = largura do corpo-de-prova.

A determinação da dureza pelo método de Janka foi realizada por meio da máquina universal de ensaios (ver Figura 31). Esse ensaio consiste em verificar a força máxima necessária para que a esfera que é acoplada ao equipamento penetre 5,65 mm na amostra.



Figura 31. Máquina universal de ensaio, método de Janka (Bastos, 2009).

A determinação da resistência ao cisalhamento na compressão do OSB foi realizada por meio da máquina de teste (ver Figura 32). Esse método analisa a qualidade da ligação entre as lâminas de madeira que constituem o OSB.



Figura 32. Máquina de teste à compressão (Bastos, 2009).

Os valores médios encontrados por Bastos (2009) para a densidade, módulo de elasticidade, módulo de ruptura, dureza pelo método de Janka e tensão de cisalhamento à compressão são:

- Densidade = $0,678 \text{ g/cm}^3$;
- Módulo de elasticidade = $5,612 \text{ GPa}$;
- Módulo de ruptura = $35,042 \text{ MPa}$;
- Dureza Janka = $3683,5 \text{ N e}$
- Resistência ao cisalhamento = $24,68 \text{ MPa}$.

2.4 Bevilaqua (2005)

Bevilaqua (2005) realizou um estudo numérico comparativo do desempenho estrutural em PFF, sendo uma estrutura aporticada e a outra em LSF em edifícios residenciais com quatro e sete pavimentos. Através do *software* SAP2000 foram analisados os projetos de habitação popular desenvolvidos pelo convênio estabelecido entre a UFMG, USIMINAS e a COHAB-MG (ver Figura 33).

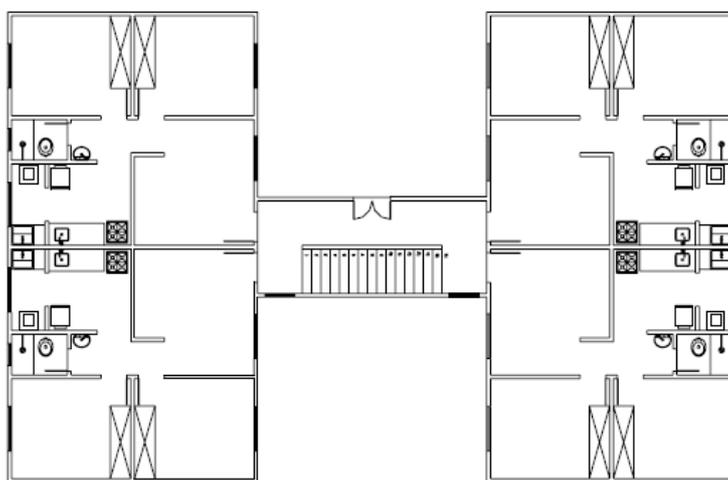


Figura 33. Projeto arquitetônico de habitação popular (Bevilaqua, 2005).

Com o intuito de facilitar a modelagem numérica, Bevilaqua (2005) representou os painéis de cisalhamento considerando apenas as placas de OSB. Segundo Tian *et al.* (2004), a contribuição dos perfis metálicos na resistência do painel de cisalhamento corresponde aproximadamente a 4% da resistência total do conjunto. Isto é, as placas de OSB são responsáveis por 96% da resistência dos painéis *Shear Wall*. Logo, foram desconsiderados os perfis metálicos e as análises foram realizadas apenas com a contribuição do OSB (ver Figura 34).

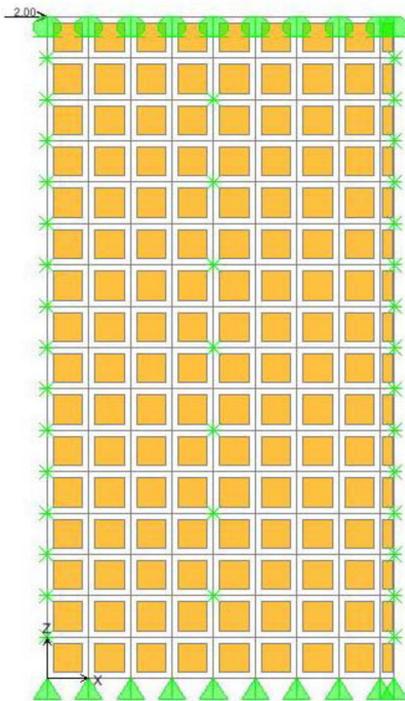


Figura 34. Modelo numérico do painel elaborado por (Bevilaqua, 2005).

Para representar os parafusos estruturais que fixavam a placa de OSB ao reticulado metálico, as rotações foram restringidas em torno do eixo X e Z, o deslocamento no eixo Y também foi impedido. Os parafusos estruturais eram espaçados de 150 mm no perímetro das placas e 300 mm ao longo dos montantes intermediários.

Bevilaqua (2005) concluiu que o sistema LSF tem um ótimo desempenho estrutural, resistiu a todos os esforços solicitantes verticais e horizontais, e os respectivos deslocamentos foram inferiores comparados com o sistema aporticado. Averiguou também que o sistema LSF apresenta um consumo de aço ligeiramente superior ao sistema aporticado, entretanto o sistema LSF apresenta agilidade na montagem e menor peso próprio, aliviando assim carga na fundação.

2.5 Zhang et al. (2005)

Zhang *et al.* (2005) analisaram numericamente a influência da variabilidade da densidade nas propriedades mecânicas do OSB. O processo de fabricação do OSB consiste na utilização de partículas de madeira distribuídas aleatoriamente em três camadas (ver Figura 9). As camadas são unidas por resina e prensadas sob altas temperaturas. Logo, a densidade varia de acordo com o volume de espaços vazios encontrados no processo de prensagem, que podem influenciar nas propriedades mecânicas do OSB.

Por meio do *software* ABAQUS, uma placa quadrada de 30 cm de lado e um centímetro de espessura foi submetida à tração uniaxial e cisalhamento nas duas direções principais. Foram utilizados elementos cúbicos com oito nós, cada elemento possui um centímetro cúbico, resultando assim em 900 elementos. Os carregamentos e as condições de contorno estão representados nas Figuras 35 e 36.

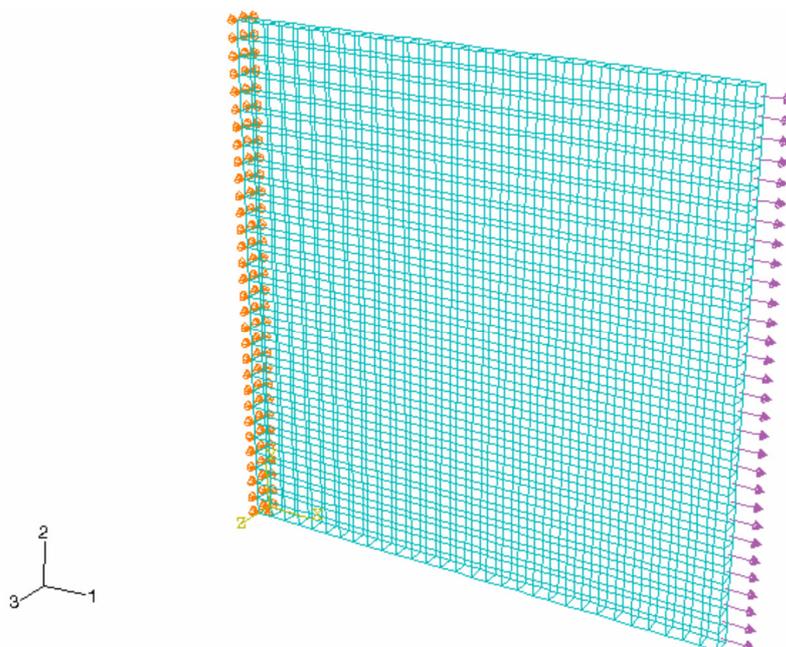


Figura 35. Carregamento uniaxial (Zhang *et al.*, 2005).

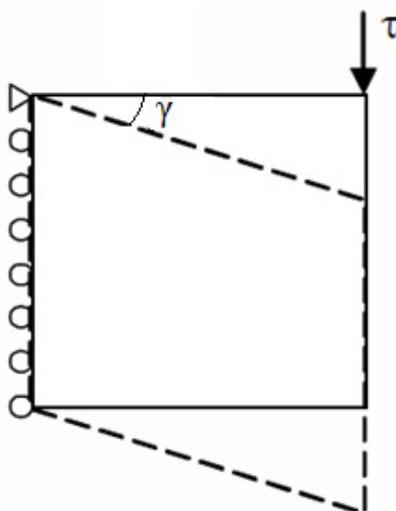


Figura 36. Carregamento cisalhante (Zhang *et al.*, 2005).

As propriedades mecânicas do OSB (Tabela 10) utilizadas por Zhang *et al.* (2005), foram adotadas conforme a análise experimental desenvolvida por Wu (1999) *apud* Lee e Wu (2003). Wu (1999) também mensurou a densidade média do OSB, que foi de $0,7 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 10. Resultados experimentais (Wu, 1999).

| Propriedades do OSB | Valor (GPa) |
|---------------------|-------------|
| E1 | 5,839 |
| E2 | 5,827 |
| E3 | 0,13 |
| G12 | 2,33 |
| G13 | 0,26 |
| G23 | 0,12 |
| ν_{12} | 0,219 |
| ν_{13} | 1,70 |
| ν_{23} | 1,02 |

A variação da densidade do OSB aplicada ao modelo numérico, foi adotada conforme a curva normal de distribuição (Figura 37). Os parâmetros de entradas para o modelo numérico foram inseridos por meio da linguagem de programação FORTRAN e automaticamente atribuídos ao modelo no *software* ABAQUS.

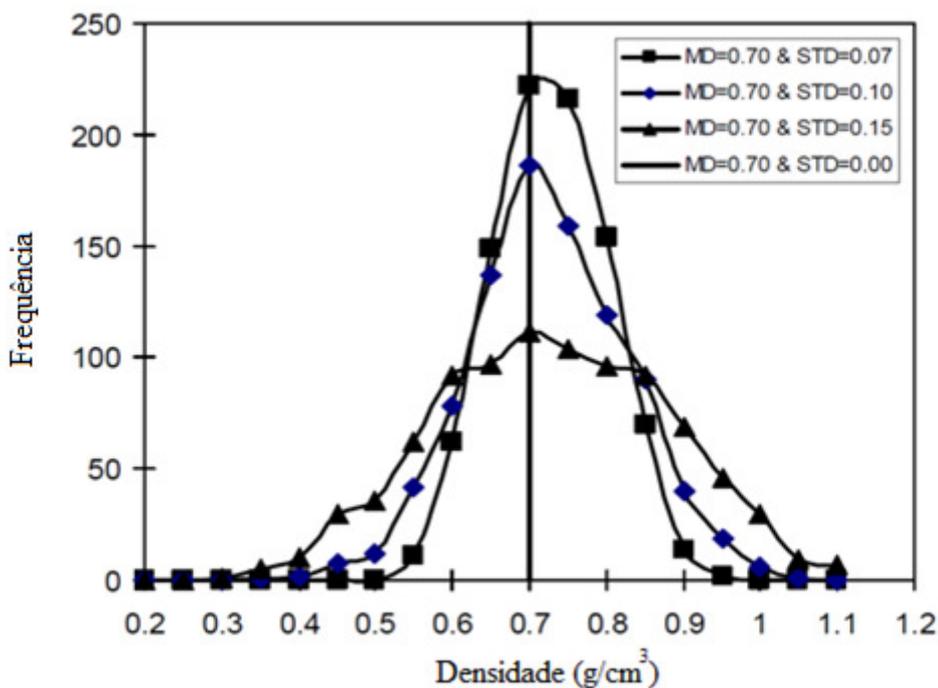


Figura 37. Curva normal de distribuição (Adaptado de Zhang *et al.*, 2005).

Os valores de *Mean Density* (MD) que estão apresentados na legenda da Figura 39 representam a densidade média dos elementos, que segundo Wu (1999) é de $0,7 \text{ g/cm}^3$. Os valores de *Standard Deviations* (STD) representam o desvio padrão, a Tabela 11 apresenta a variação do desvio padrão com a respectiva variabilidade da densidade.

Tabela 11. Desvio padrão e variabilidade da densidade (Zhang *et al.*, 2005).

| Desvio padrão | Variabilidade da densidade |
|---------------|---|
| STD = 0,00 | 100% dos elementos possuem densidade de $0,7 \text{ g/cm}^3$. |
| STD = 0,07 | 68,26% dos elementos possuem densidade entre $0,63$ e $0,77 \text{ g/cm}^3$. |
| STD = 0,10 | 68,26% dos elementos possuem densidade entre $0,60$ e $0,80 \text{ g/cm}^3$. |
| STD = 0,15 | 68,26% dos elementos possuem densidade entre $0,55$ e $0,85 \text{ g/cm}^3$. |

A influência da variabilidade da densidade nas propriedades mecânicas do OSB analisadas numericamente por Zhang *et al.* (2005) estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12. Resultados numéricos (Zhang *et al.*, 2005).

| STD | E1 (GPa) | E2 (GPa) | v12 | v21 | G12 (GPa) | G21 (GPa) |
|------|----------|----------|------|------|-----------|-----------|
| 0,00 | 5,84 | 5,83 | 0,22 | 0,22 | 0,21 | 0,23 |
| 0,07 | 5,83 | 5,82 | 0,22 | 0,22 | 0,20 | 0,22 |
| 0,10 | 5,77 | 5,76 | 0,22 | 0,22 | 0,21 | 0,23 |
| 0,15 | 5,75 | 5,72 | 0,22 | 0,22 | 0,20 | 0,21 |

Zhang *et al.* (2005) concluiu que a variabilidade da densidade influenciou significativamente na concentração de tensão da placa (ver Figura 38). A letra (a) representa um painel com desvio padrão igual a zero, a letra (b) representa um painel com desvio padrão igual a 0,07, a letra (c) representa um painel com desvio padrão igual a 0,10 e a letra (d) representa um painel com desvio padrão igual a 0,15.

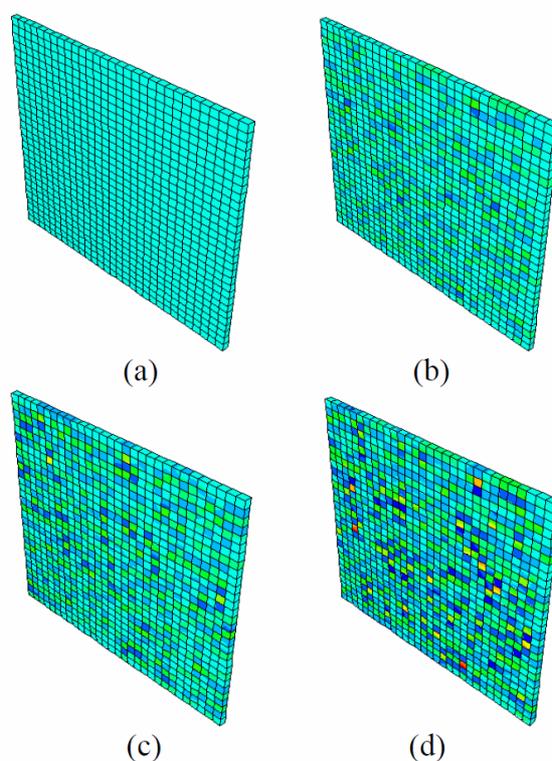


Figura 38. Concentração de tensão (Zhang *et al.*, 2005).

2.6 Smith (1966, 1967a)

Smith (1966) realizou ensaios experimentais em pórticos de aço preenchidos com alvenaria com o objetivo de determinar a largura de uma diagonal equivalente comprimida.

O comprimento de contato “ α ” entre o painel de vedação e o pórtico quando esse conjunto é solicitado por uma força cisalhante no plano é representado na Figura 39.

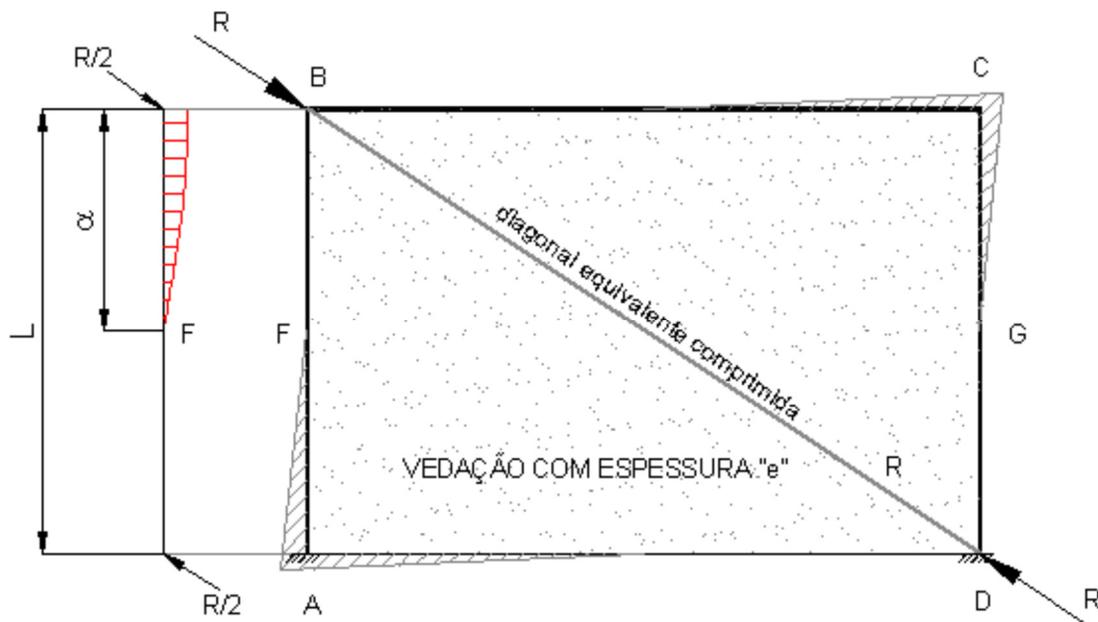


Figura 39. Comprimento de contato “ α ” (Smith, 1966).

Por meio das Equações (6) e (7) sugeridas por Smith (1966), é possível obter o comprimento de contato entre o painel de vedação e o pórtico. Essas equações são utilizadas particularmente para vedação em alvenaria, onde apenas parte da altura da vedação permanece em contato com o pórtico após a aplicação da força cisalhante.

No sistema estrutural LSF, o comprimento de contato é igual à altura do painel, devido aos parafusos que fixam as placas estruturais ao reticulado metálico serem instalados ao longo de toda a altura dos montantes, incluindo aqueles do perímetro do painel, por meio de parafusos auto atarraxantes.

$$\alpha = \frac{\pi}{2.\lambda} \quad (6)$$

onde:

α = comprimento de contato;

λ = adimensional;

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_a \cdot e \cdot \text{sen}(2\theta)}{4 \cdot E_p \cdot I_p \cdot h}} \quad (7)$$

onde:

λ = adimensional;

E_a = módulo de elasticidade da vedação;

e = espessura da vedação;

θ = inclinação da diagonal;

E_p = módulo de elasticidade do pórtico;

I_p = momento de inércia do pórtico;

h = altura da parede de alvenaria.

Smith (1967a) propôs uma equação para o cálculo da largura da diagonal equivalente comprimida ver Equação (8).

$$w = \frac{R.l}{t.E_a.\Delta d} \quad (8)$$

onde:

w = largura da diagonal equivalente;

R = força na direção da diagonal equivalente;

l = comprimento da diagonal equivalente;

t = espessura da alvenaria;

E_a = módulo de elasticidade da alvenaria;

Δd = deslocamento na direção da diagonal.

2.7 Princípio dos trabalhos virtuais

O Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV) é uma alternativa que pode agilizar a análise de diversas estruturas, principalmente em estruturas hiperestáticas, onde o número de reações é superior ao de equações da estática, logo, as equações são insuficientes para a determinação das reações.

O grau de hiperestaticidade de uma estrutura é determinado pelo número de reações excedentes àquelas necessárias para o seu equilíbrio. As reações que atuam nestas estruturas são geralmente calculadas pelo método das forças ou pelo método dos deslocamentos. No método das forças, as variáveis são os esforços e no método dos deslocamentos as deformações, Soriano (2003).

De acordo com Campanari (1985), a teoria do princípio dos trabalhos virtuais se fundamenta na conservação da energia, ou seja, o trabalho das forças internas é equivalente ao trabalho das forças externas Equação (9).

$$W_{externo} = W_{interno} \quad (9)$$

O trabalho virtual das forças externas para deslocar uma partícula do ponto A para o ponto A' (ver Figura 40) é representado na Equação (10).

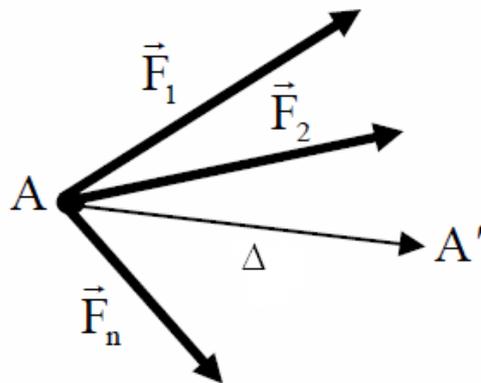


Figura 40. Trabalho das forças externas (Campanari, 1985).

$$W_{externo} = \vec{F}_1 \cdot \vec{\Delta} + \vec{F}_2 \cdot \vec{\Delta} + \vec{F}_n \cdot \vec{\Delta} \quad (10 a)$$

$$W_{externo} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \cdot \vec{\Delta} \quad (10 b)$$

Em corpos deformáveis, as forças externas e internas realizam trabalho. No caso das estruturas de comportamento elástico linear, o trabalho interno representa a energia de deformação total que é igual ao trabalho realizado pelas forças externas durante o processo de deformação da estrutura Martha (2010). Todo o trabalho realizado pelo carregamento real é armazenado como energia de deformação e pode ser restaurado se o carregamento for removido.

De acordo com Martha (2010), a equação para o caso de estruturas reticuladas utilizando o princípio dos trabalhos virtuais é mostrada na Equação (11).

$$W_{\text{externo}} = W_{\text{interno}} \quad (11 \text{ a})$$

$$P' \cdot \Delta = \left[\int \frac{N' \cdot N}{E \cdot A} dx + \int \frac{M' \cdot M}{E \cdot I} dx + \int \chi \frac{Q' \cdot Q}{G \cdot A} dx \right] \quad (11 \text{ b})$$

onde:

Δ = deslocamento genérico a ser calculado no sistema real;

P' = carga virtual genérica associada ao deslocamento a ser calculado;

N' = esforço normal no sistema virtual provocado por P' ;

N = esforço normal no sistema real provocado pelo carregamento externo;

M' = momento fletor no sistema virtual provocado por P' ;

M = momento fletor no sistema real provocado pelo carregamento externo;

Q' = esforço cortante no sistema virtual provocado por P' ;

Q = esforço cortante no sistema real provocado pelo carregamento externo;

EA = módulo de rigidez à deformação axial;

EI = módulo de rigidez à flexão;

GA = módulo de rigidez ao cisalhamento;

χ = fator de forma que define a área efetiva para cisalhamento.

O Método da Carga Unitária (MCU) é uma particularização do princípio dos trabalhos virtuais. Este método consiste em atribuir o valor unitário para a carga virtual genérica associada ao deslocamento (P'). Assim, utilizando o princípio dos trabalhos virtuais, o deslocamento proveniente dos carregamentos externos é calculado conforme a Equação (12), Martha (2010).

$$\Delta = \left[\int \frac{N'.N}{E.A} dx + \int \frac{M'.M}{E.I} dx + \int \chi \frac{Q'.Q}{G.A} dx \right] \quad (12)$$

2.8 Regressão linear e não linear

Segundo Chiu e Tavella (2008), a análise de regressão tem como objetivo verificar a possível relação entre uma variável dependente com uma ou mais variáveis independente. As regressões lineares simples envolvem apenas duas variáveis (ver Equação (13)).

$$Y = \beta + \alpha.X \quad (13)$$

onde:

α e β = coeficientes da regressão;

Y = variável dependente;

X = variável independente.

O modelo de uma regressão linear multivariada (Equação (14)) envolve três ou mais variáveis, sendo uma única variável dependente e duas ou mais variáveis independentes, Han e Kamber (2001).

$$Y = \beta + \alpha_1.X_1 + \alpha_2.X_2 + \alpha_3.X_3 + \alpha_4.X_4 + \dots + \alpha_i.X_i \quad (14)$$

onde:

α_i e β = coeficientes da regressão;

Y = variável dependente;

X_i = variáveis independentes.

De acordo com Cunha (2008), o modelo de regressão não linear multivariada consiste em relacionar um conjunto de variáveis com uma única variável resposta. O modelo é considerado como não linear quando há interação entre as variáveis ou se alguma variável esteja elevada a expoente que não seja unitário (ver Equações (15) e (16)).

$$Y = \beta + \alpha_1.X_1^n + \alpha_2.X_2 + \alpha_3.X_3 + \alpha_4.X_4 + \dots + \alpha_i.X_i \quad (15)$$

$$Y = \beta + \alpha_1.X_1.X_2 + \alpha_2.X_3 + \dots + \alpha_i.X_i \quad (16)$$

onde:

α_i e β = coeficientes da regressão;

Y = variável dependente;

X_i = variáveis independentes.

n = números reais diferentes de zero e um.

O modelo de uma regressão não linear multivariada pode ser representado por uma regressão linear multivariada. As variáveis independentes que estão se relacionando ou que estão elevadas ao expoente, devem ser substituídas por um termo cruzado “ X_c ”, Han e Kamber (2001).

Assim, se as variáveis independentes X_1^n e $X_1.X_2$ das Equações (15) e (16) forem substituídas por X_c , o modelo de uma regressão não linear multivariada se torna linear (ver Equação (17) e (18)).

$$Y = \beta + \alpha_1.X_c + \alpha_2.X_2 + \alpha_3.X_3 + \alpha_4.X_4 + \dots + \alpha_i.X_i \quad (17)$$

$$Y = \beta + \alpha_1.X_c + \alpha_2.X_3 + \dots + \alpha_i.X_i \quad (18)$$

onde:

α_i e β = *coeficientes da regressão;*

Y = *variável dependente;*

X_i = *variáveis independentes.*

X_c = *termo cruzado.*

CAPÍTULO 3 – MODELO NUMÉRICO

3.1 Aferição dos modelos numéricos

O modelo numérico é uma ferramenta fundamental para análise de estruturas, e é aplicado geralmente quando os modelos analíticos e/ou experimentais são inviáveis para ser realizados.

A aferição dos modelos concebidos para a análise numérica foi realizada utilizando o *software* ABAQUS (*Simulia Corp.*, 2010) por meio de comparações com os resultados experimentais obtidos pelo AISI (1997) e por Tian *et al.* (2004).

3.1.1 Elementos finitos e propriedades dos materiais utilizados

Foi utilizado o elemento finito do tipo *Shell* S4R para discretizar o reticulado metálico e as placas de OSB. Este elemento possui quatro nós e seis graus de liberdade por nó (ver Figura 41). De acordo com o manual do ABAQUS (*Simulia Corp.*, 2010), S4R é um elemento de integração reduzida, com um único ponto de integração no centro do elemento. O comportamento da seção transversal deste elemento de casca homogênea é

calculado utilizando a regra de *Simpson*, com cinco pontos de integração através da espessura do elemento.

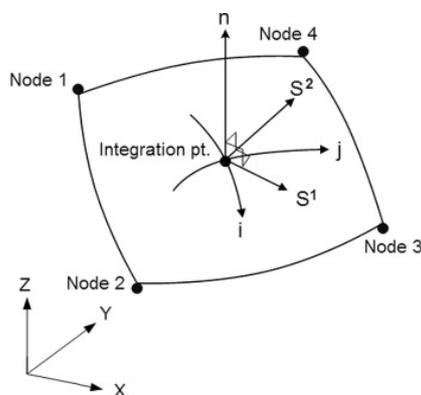


Figura 41. Elemento finito *Shell S4R*.

Para discretizar a viga que nos ensaios experimentais era acoplada na parte superior do reticulado metálico para que o carregamento fosse distribuído igualmente na guia superior (ver Figura 18), foi utilizado o elemento sólido C3D8R, que possui oito nós e três graus de liberdade por nó (ver Figura 42).

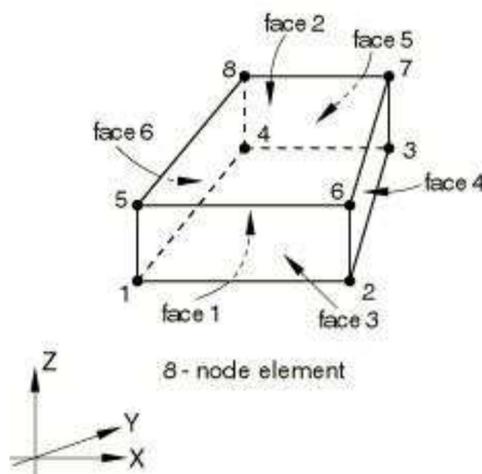


Figura 42. Elemento finito C3D8R.

Neste trabalho foi realizada a análise numérica não linear utilizando o método de *Riks* modificado por meio da plataforma estrutural do *software* ABAQUS. De acordo com Lameiras (2008) o método de *Riks* modificado é utilizado quando se faz necessário obter soluções de equilíbrio estático não linear em problemas instáveis, onde o incremento de força pode diminuir enquanto deslocamento aumenta. O método de *Riks* também é utilizado onde se deseja obter informações sobre o colapso de uma estrutura.

Nos trabalhos experimentais desenvolvidos pelo AISI (1997) e Tian *et al.* (2004), não foram fornecidas as propriedades mecânicas do OSB. Para a elaboração dos modelos numéricos as propriedades do OSB foram então adotadas conforme análises experimentais desenvolvidas por Wu (1999) (ver Tabela 13).

Tabela 13. Propriedades do OSB (Wu, 1999).

| Propriedades do OSB | Valor (GPa) |
|---------------------|-------------|
| E1 | 5,839 |
| E2 | 5,827 |
| E3 | 0,130 |
| G12 | 2,330 |
| G13 | 0,260 |
| G23 | 0,120 |
| v12 | 0,219 |
| v13 | 1,700 |
| v23 | 1,020 |

Por meio da relação de tensão *versus* deformação, na Figura 43 é possível visualizar o comportamento elastoplástico empregado para OSB na direção paralelo às fibras. Foi adotada a resistência à ruptura f_u do OSB igual a 35,042 MPa, este valor foi fornecido por meio de análises experimentais desenvolvidas por Bastos (2009).

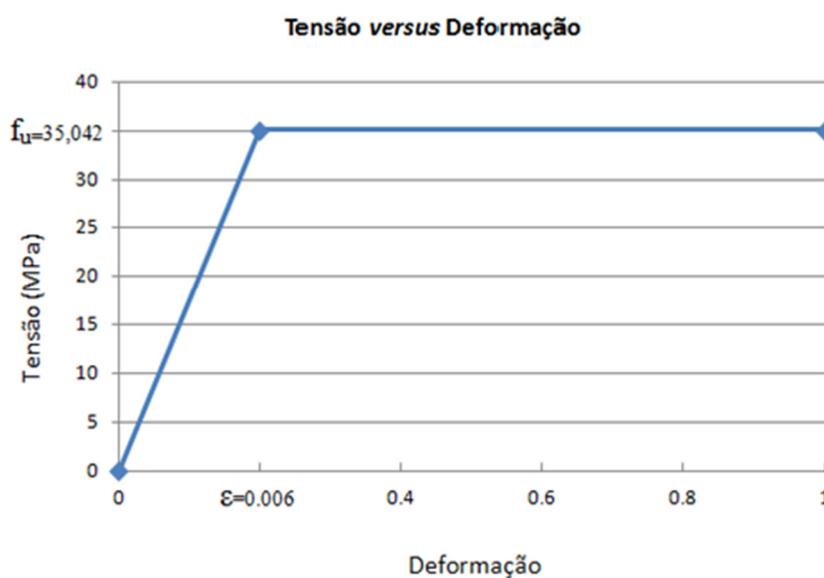


Figura 43. Diagrama de tensão *versus* deformação do OSB (modelo numérico).

AISI (1997) e Tian *et al.* (2004) forneceram os valores nominais da resistência ao escoamento dos perfis que constituem o reticulado metálico, sendo 360 MPa e 350 MPa respectivamente. Para a realização da análise numérica foi adotado o comportamento elastoplástico perfeito, e a curva de tensão *versus* deformação para o modelo do AISI (1997) e Tian *et al.* (2004) estão representados nas Figuras 44 e 45 respectivamente. Ambos com o módulo de elasticidade igual a 200 GPa e coeficiente de *Poisson* igual a 0,3.

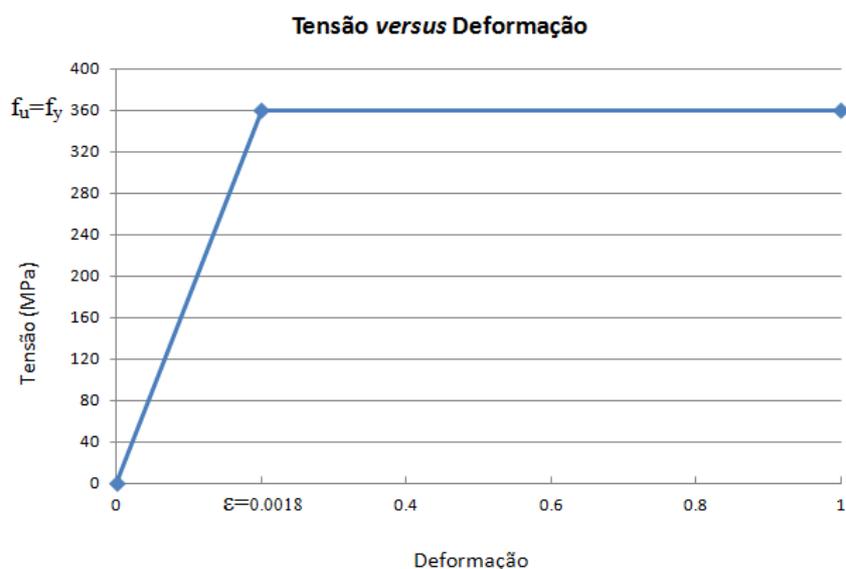


Figura 44. Diagrama de tensão *versus* deformação dos perfis (AISI, 1997).

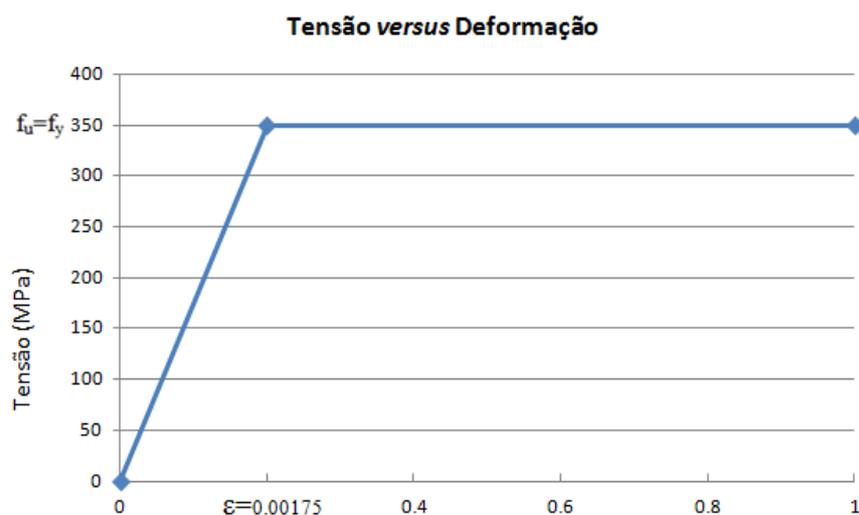


Figura 45. Diagrama de tensão *versus* deformação dos perfis (Tian *et al.*, 2004).

3.1.2 AISI (1997)

Conforme o item 2.2.1, O AISI (1997) realizou quatro ensaios experimentais em painéis de cisalhamento. O ensaio 1 corresponde a um painel em LSF sem abertura, os ensaios 2A, 2B e 4 correspondem a painéis com aberturas (ver Figura 46).

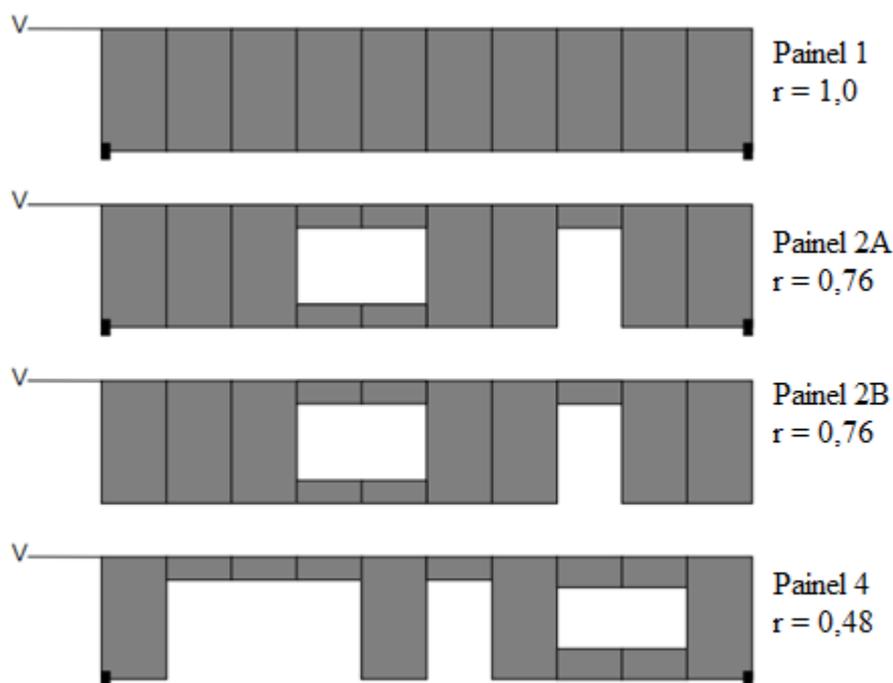


Figura 46. Painéis submetidos ao ensaio experimental (Adaptado de AISI, 1997).

O estudo de validação do modelo numérico foi realizado por meio de comparações com o resultado obtido referente ao primeiro ensaio experimental, que corresponde a um painel de LSF sem abertura.

O painel possui 12 m de comprimento por 2,40 m de altura. Os montantes são espaçados de 60 cm e cada placa de OSB, posicionada na vertical em apenas uma face do painel, possui 13 mm de espessura, 1,20 m de largura e 2,40 m de comprimento (ver Figura 47). Os parafusos estruturais que fixam as placas de OSB ao reticulado metálico

e entre os perfis que constituem o reticulado metálico possuem diâmetro de 4,2 mm e 4,8 mm, respectivamente.

As placas de gesso acartonado utilizadas no ensaio experimental não foram consideradas neste trabalho, pois não influencia na capacidade resistente e na rigidez do painel. A guia inferior possui todos os graus de liberdades impedidos (ver Figura 47).

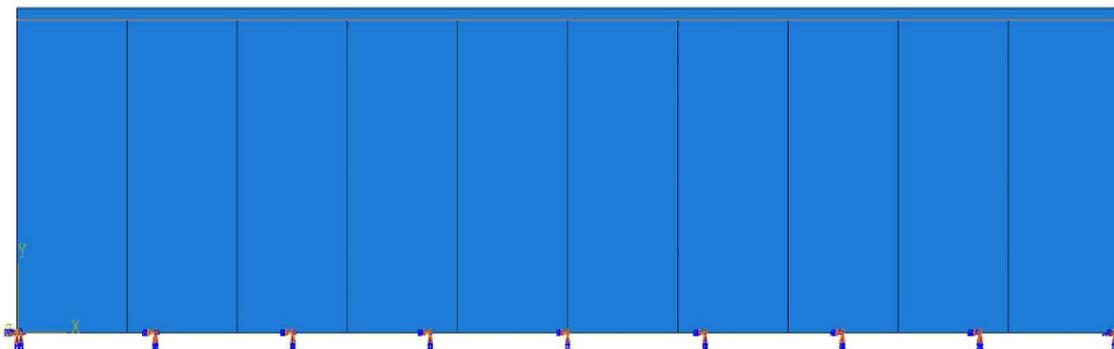


Figura 47. Modelo numérico (AISI, 1997).

Foi utilizada a restrição tipo *tie* para representar os contatos dos parafusos estruturais. De acordo com Bacelar (2003), a restrição do tipo *tie* atribui que todos os graus de liberdade de dois nós distintos em cada superfície sejam iguais. As superfícies são definidas como mestre e escrava, cada nó da superfície escrava se aproxima do nó mais próximo da superfície mestre (ver Figura 48). Geralmente a superfície mais rígida é considerada como mestre.

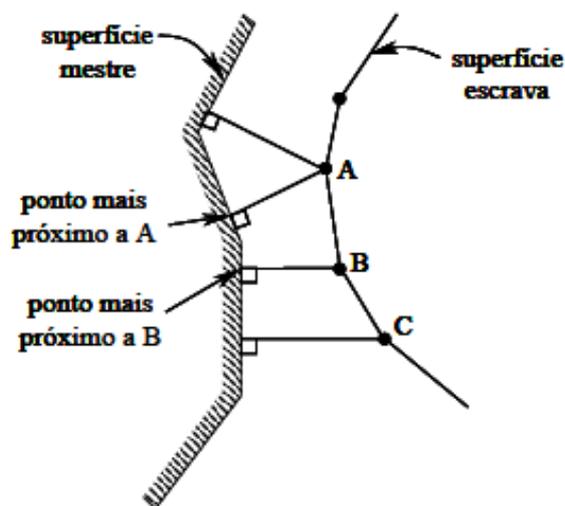


Figura 48. Superfícies mestre e escrava (Bacelar, 2003).

Foram realizados círculos com 4,2 mm de diâmetro nos montantes e nas guias para representar a área de contato entre o reticulado metálico e o OSB, e círculos com 4,8 mm de diâmetro nos montantes como área de contato entre o montante e a guia. De acordo com a Figura 49 é possível visualizar que o OSB foi considerado como a superfície mestre (região em vermelho) e os círculos nos montantes e guias como superfícies escravas (região rosada).

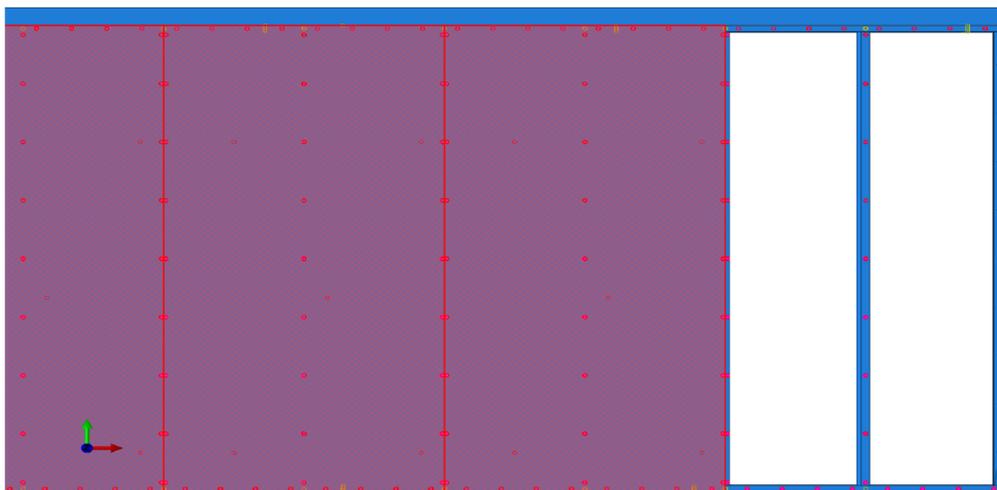


Figura 49. Definição das superfícies (modelo numérico).

Na região de contato foi utilizada uma malha com elementos de dimensão máxima igual a 1,0 mm, nos perfis que constituem o reticulado metálico e na placa de OSB a dimensão máxima de cada elemento foi de a 10 mm (ver Figura 50). Após varias alterações das dimensões dos elementos, chegou-se nesses valores, onde resultaram apenas 0,8% de avisos de potenciais ameaças à modelagem (*warnings*) e tempo médio de processamento em 17 horas.

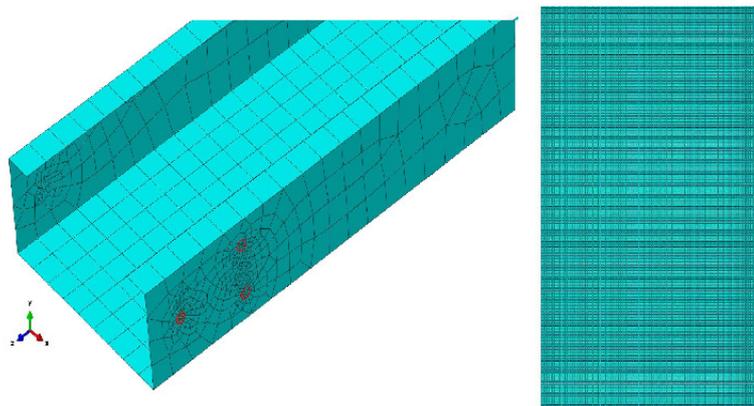


Figura 50. Malha elementos finitos (modelo numérico).

A seção transversal referente à guia e ao montante adotada no modelo numérico, foi idêntica ao modelo experimental. Na modelagem numérica foi adotada uma viga com seção transversal quadrada de 92 mm de lado e 12 m de comprimento, o carregamento foi aplicado nesta viga e os esforços foram transmitidos ao painel por meio do contato tipo *tie*. Assim, os nós que estão no contato da viga com a guia superior não se separam durante a análise, garantindo que toda a ação atuante na viga é transmitida ao painel.

3.1.3 Tian *et al.* (2004)

De acordo com o item 2.2.2, Tian *et al.* (2004) realizaram ensaios experimentais em seis tipos diferentes de painéis de cisalhamento do sistema LSF (ver Tabela 14).

Tabela 14. Painéis analisados experimentalmente (Tian *et al.*, 2004).

| Modelo | Descrição |
|--------|---|
| 1 | Sem contraventamento e sem placa. |
| 2 | Com OSB em apenas uma face. |
| 3 | Com placa cimentícia em apenas uma face. |
| 4 | Com contraventamento em X nas duas faces. |
| 5 | Com contraventamento em X em apenas uma face. |
| 6 | Duplo contraventamento em XX nas duas faces. |

O estudo de validação do modelo numérico foi realizado por meio de comparações com o resultado obtido referente ao segundo modelo, que corresponde a um painel de LSF com OSB em apenas uma face.

O painel possui 1,20 m de comprimento por 2,40 m de altura (ver Figura 51). Os montantes foram espaçados de 60 cm e a placa de OSB (posicionada na vertical) possui 13 mm de espessura, 1,20 m de largura e 2,40 m de comprimento. As guias são fixadas aos montantes por meio de dois parafusos de 5,0 mm de diâmetro, e a placa de OSB é fixada ao reticulado metálico por meio de parafusos de 5,0 mm de diâmetro espaçados de 30 cm na horizontal (guias) e na vertical (montantes).

Figura 51. Modelo numérico (Tian *et al.*, 2004).

Análogo ao estudo de validação do modelo numérico referente ao trabalho experimental realizado pelo AISI (1997), foi utilizado a restrição do tipo *tie* para representar os contatos dos parafusos estruturais.

A seção transversal referente à guia e ao montante adotada no modelo numérico, foi idêntica ao modelo experimental. Na modelagem numérica foi considerada uma viga com seção transversal quadrada de 93 mm de lado e 1,2 m de comprimento, o carregamento foi aplicado nesta viga e os esforços foram transmitidos ao painel por meio do contato tipo *tie*.

Na região de contato foi utilizada uma malha com elementos de dimensão máxima igual a 1,0 mm, nos perfis que constituem o reticulado metálico e na placa de OSB a dimensão máxima de cada elemento foi de a 10 mm (ver Figura 52). Foram realizados círculos com 5,0 mm de diâmetro nos montantes e nas guias para representar a área de contato entre o reticulado metálico e o OSB, e dois círculos de 5,0 mm de diâmetro nos montantes como área de contato entre o montante e a guia.

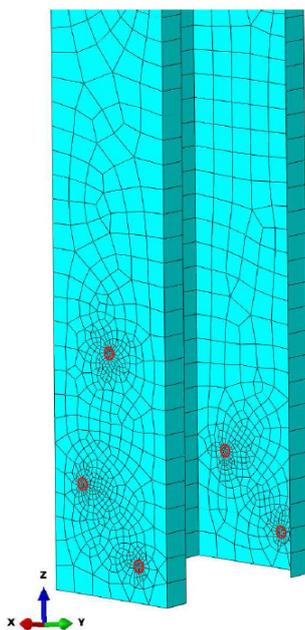


Figura 52. Malha elementos finitos (modelo numérico).

A guia inferior possui todos os graus de liberdades impedidos, e como o painel foi analisado experimentalmente na posição horizontal, a viga superior teve os deslocamentos nos eixos Y e Z restringidos (ver Figura 53).

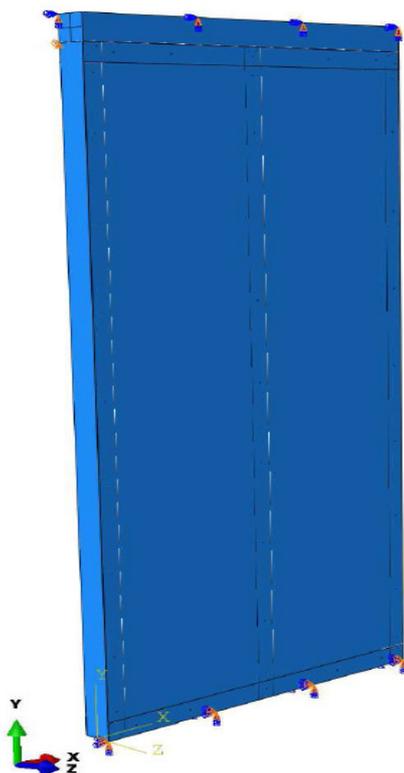


Figura 53. Condições de contorno (modelo numérico).

3.1.4 Análise dos resultados

Nas Figuras 54 e 55 pode-se observar a comparação dos resultados numéricos do presente trabalho com os valores experimentais obtidos pelo AISI (1997) e por Tian *et al.* (2004), respectivamente.

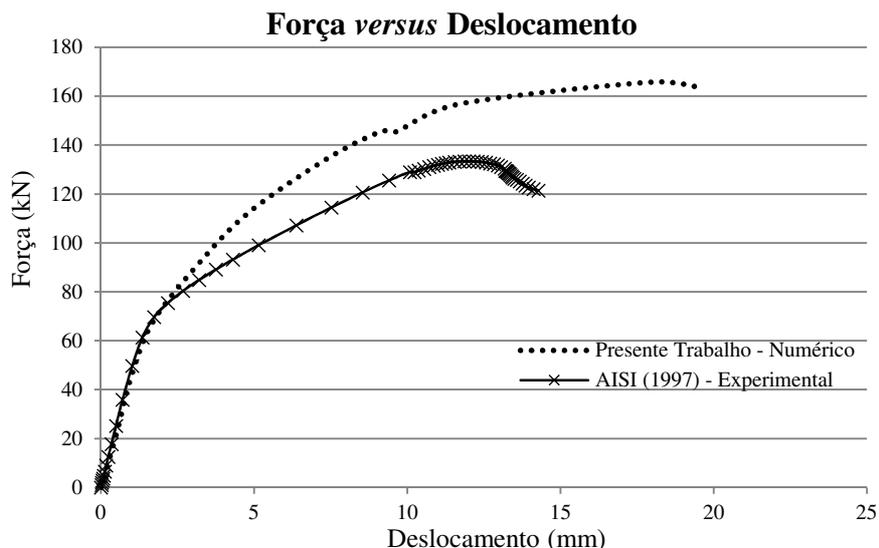


Figura 54. Resultados obtidos pelo AISI (1997) e no presente trabalho.

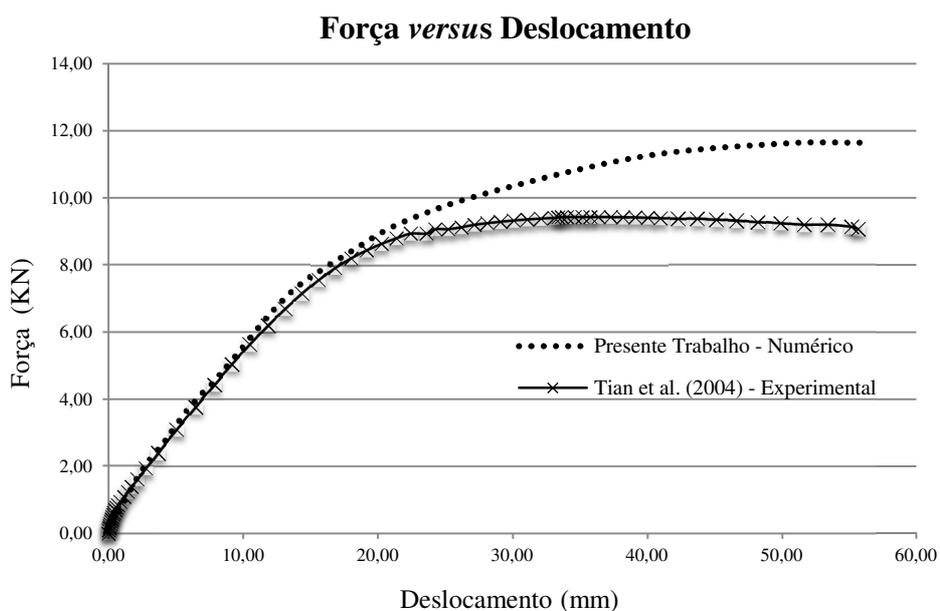


Figura 55. Resultados obtidos por Tian *et al.* (2004) e no presente trabalho.

Os resultados dos modelos numéricos utilizando o *software* ABAQUS (*Simulia Corp.*, 2010) mostraram-se bem próximos aos resultados experimentais na fase elástica. No entanto, na fase inelástica, os comportamentos obtidos numericamente não se mostraram com os abatimentos das respostas experimentais Força *versus* Deslocamento, devido provavelmente aos modos de colapso na união entre as placas de OSB e os perfis de aço, tal como o *pull-over* ocorrido nos ensaios experimentais do AISI (1997) e Tian *et al.* (2004), ocasionando assim uma diminuição da rigidez dos painéis ensaiados.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 Considerações Iniciais

Após a aferição do modelo numérico, foram desenvolvidos por meio do *software* ABAQUS (*Simulia Corp.*, 2010) novos modelos com as seguintes dimensões: 4,80 m de comprimento por 2,80 m de altura e 1,80 m de comprimento por 3,12 m de altura. Variou-se a espessura do OSB e os espaçamentos entre os montantes e entre os parafusos de fixação das placas no reticulado metálico, a fim de se obter a rigidez de cada modelo.

Por meio da rigidez de cada painel estudado, foi calculado o diâmetro da diagonal equivalente utilizando o Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV). Essa diagonal equivalente impõe ao reticulado metálico uma certa rigidez, sendo atribuído para essa diagonal o valor do módulo de elasticidade longitudinal do aço. O diâmetro da diagonal equivalente proposto pela teoria do PTV foi averiguado com o uso do *software* SAP2000 (2004).

Por fim, de posse das particularidades de cada painel analisado (comprimento do painel, altura do painel, espessura da placa de OSB, espaçamentos entre os montantes, espaçamentos entre os parafusos, força máxima cisalhante obtida por meio do *software* ABAQUS, deslocamento horizontal obtido por meio do *software* SAP2000 e o diâmetro da diagonal equivalente obtido pela teoria do PTV), e empregando o *software* MINITAB®, o presente trabalho apresenta uma proposta de equação para o cálculo da diagonal equivalente em painéis de cisalhamento.

4.2 Desenvolvimento de novos modelos (ABAQUS)

Foram desenvolvidos dois modelos de painéis com as seguintes dimensões:

Painel do tipo A - 1,80 m de comprimento por 3,12 m de altura e

Painel do tipo B - 4,80 m de comprimento por 2,80 m de altura.

Os painéis do tipo A e B foram adotados para que o ângulo formado entre a diagonal equivalente fictícia e a guia inferior do painel fosse aproximadamente de 60° e de 30° respectivamente, considerando a altura do painel correspondente com o pé direito de uma edificação residencial convencional.

Para a elaboração dos novos modelos numéricos, as propriedades do OSB foram adotadas segundo os resultados das análises experimentais desenvolvidas por Wu (1999) e Bastos (2009).

De acordo com a Figura 57, foi adotado o comportamento elastoplástico para os perfis que constituem o reticulado metálico, possuindo 230 MPa de resistência ao escoamento, com o módulo de elasticidade igual a 200 GPa e coeficiente de *Poisson* igual a 0,3.

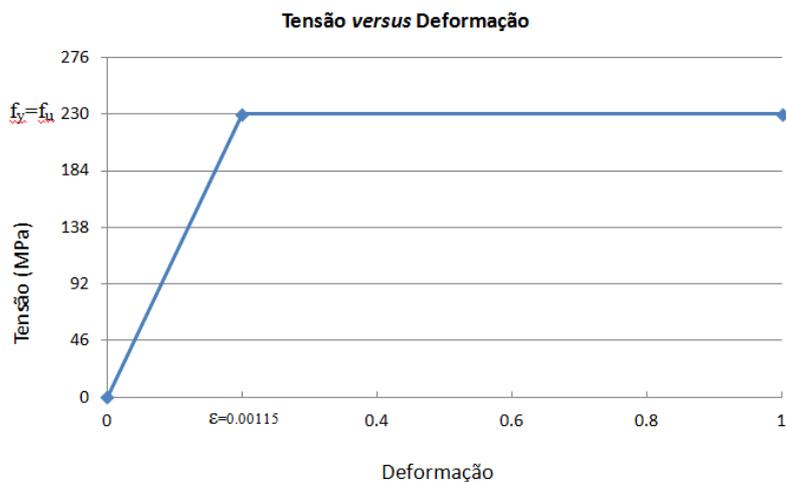


Figura 57. Diagrama de tensão *versus* deformação dos perfis (modelo numérico).

Foram realizados círculos com 4,2 mm de diâmetro nos montantes e nas guias para representar a área de contato entre o reticulado metálico e o OSB, e círculos de 5,0 mm de diâmetro nos montantes como área de contato entre o montante e a guia.

Na região de contato foi utilizada uma malha com elementos de dimensão máxima igual a 1,0 mm. Nos perfis que constituem o reticulado metálico e na placa de OSB a dimensão máxima de cada elemento foi de a 10 mm. Análogo ao estudo de validação dos modelos numéricos, foi utilizado a restrição tipo *tie* para representar os contatos dos parafusos estruturais.

A guia inferior possui todos os graus de liberdades impedidos, e as propriedades geométricas referentes ao montante e a guia, ambos com 0,8 mm de espessura estão representados na Tabela 15.

Tabela 15. Seção transversal (modelo numérico ABAQUS).

| | Montante (mm) | Guia (mm) |
|----------------------------|---------------|-----------|
| Largura da alma (b_w) | 90,0 | 92,0 |
| Largura da mesa (b_f) | 40,0 | 40,0 |
| Largura do enrijecedor (D) | 12,0 | - |

4.2.1 Painel do tipo A

Cada painel do tipo A possui 1,8 m de comprimento por 3,12 m de altura, essas dimensões foram adotadas para que o ângulo formado entre a diagonal fictícia e a guia inferior fosse aproximadamente de 60°, resultando assim em um painel menos rígido quando comparado com o painel do tipo B.

Cada placa de OSB possui 1,2 m de largura por 2,4 m de comprimento. Como as placas de OSB foram fixadas ao reticulado metálico posicionadas na vertical, foi necessário utilizar uma placa e meia na direção do eixo “X” e uma placa mais 0,82 m de outra placa na direção do eixo “Y” para que o painel ficasse totalmente contraventado (ver Figura 58). Neste trabalho não foram consideradas as interações entre as placas de OSB.

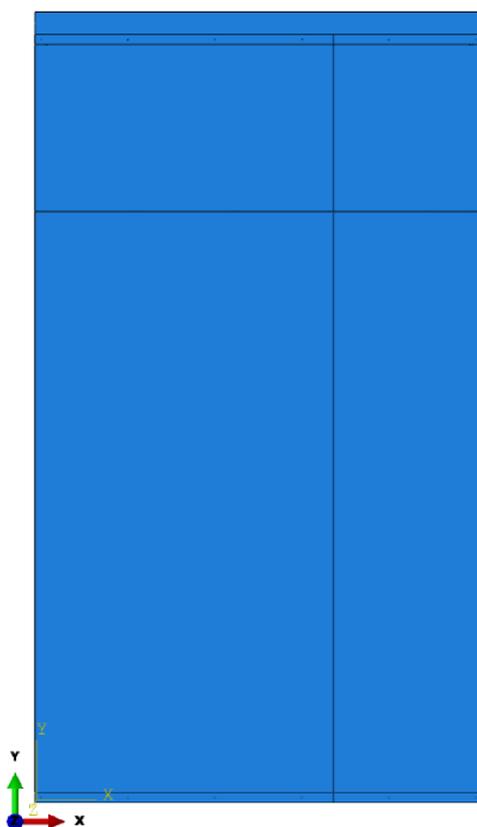


Figura 58. Modelo numérico do painel tipo A.

Analogamente aos modelos experimentais, o painel do tipo A foi submetido a uma força cisalhante na viga que é acoplada na guia superior, e os respectivos deslocamentos foram mensurados no lado oposto do carregamento.

Os montantes foram espaçados de 40 cm e 60 cm, os parafusos foram espaçados de 25 cm, 30 cm e 35 cm e variou-se a espessura do OSB em 11 mm, 15 mm e 18 mm, por meio de combinações com essas três variáveis (espaçamentos entre os montantes, espaçamentos entre os parafusos e espessura da placa de OSB) foram desenvolvidos 18 modelos.

Os 18 modelos foram analisados numericamente por meio do *software* ABAQUS (*Simulia Corp.*, 2010). A Tabela 16 apresenta a configuração de cada modelo, assim como a força máxima cisalhante que cada painel suporta no regime elástico e o respectivo deslocamento horizontal da guia superior. As curvas de força *versus* deslocamento estão apresentadas no apêndice deste trabalho.

Tabela 16. Painéis do tipo A analisados numericamente.

| Modelos | Espaçamento do Montante (cm) | Espaçamento do Parafuso (cm) | Espessura do OSB (mm) | Força máxima cisalhante (ABAQUS) (kN) | Deslocamento horizontal (ABAQUS) (mm) | Rigidez (kN/mm) |
|-----------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| Modelo 01 | 40,0 | 25,0 | 11,0 | 12,53 | 7,28 | 1,72 |
| Modelo 02 | 40,0 | 25,0 | 15,0 | 14,74 | 7,19 | 2,05 |
| Modelo 03 | 40,0 | 25,0 | 18,0 | 15,53 | 6,33 | 2,45 |
| Modelo 04 | 40,0 | 30,0 | 11,0 | 11,21 | 7,42 | 1,51 |
| Modelo 05 | 40,0 | 30,0 | 15,0 | 13,80 | 7,03 | 1,96 |
| Modelo 06 | 40,0 | 30,0 | 18,0 | 14,69 | 6,75 | 2,18 |
| Modelo 07 | 40,0 | 35,0 | 11,0 | 9,69 | 8,12 | 1,19 |
| Modelo 08 | 40,0 | 35,0 | 15,0 | 12,57 | 7,49 | 1,68 |
| Modelo 09 | 40,0 | 35,0 | 18,0 | 14,22 | 7,01 | 2,03 |
| Modelo 10 | 60,0 | 25,0 | 11,0 | 6,47 | 12,21 | 0,53 |
| Modelo 11 | 60,0 | 25,0 | 15,0 | 9,06 | 11,23 | 0,81 |
| Modelo 12 | 60,0 | 25,0 | 18,0 | 11,14 | 8,47 | 1,32 |
| Modelo 13 | 60,0 | 30,0 | 11,0 | 6,42 | 12,28 | 0,52 |
| Modelo 14 | 60,0 | 30,0 | 15,0 | 8,78 | 11,13 | 0,79 |
| Modelo 15 | 60,0 | 30,0 | 18,0 | 9,96 | 8,15 | 1,22 |
| Modelo 16 | 60,0 | 35,0 | 11,0 | 6,14 | 14,43 | 0,43 |
| Modelo 17 | 60,0 | 35,0 | 15,0 | 7,72 | 11,14 | 0,69 |
| Modelo 18 | 60,0 | 35,0 | 18,0 | 8,57 | 10,68 | 0,80 |

4.2.2 Painel do tipo B

Cada painel do tipo B possui 4,80 m de comprimento por 2,80 m de altura, essas dimensões foram adotadas para que o ângulo formado entre a diagonal fictícia e a guia inferior fosse aproximadamente de 30°.

Cada placa de OSB possui 1,2 m de largura por 2,4 m de comprimento, como as placas de OSB foram fixadas ao reticulado metálico posicionadas na vertical, foi necessário utilizar quatro placas na direção do eixo “X” e uma placa mais 0,40 m de outra placa na direção do eixo “Y” para que o painel ficasse totalmente contraventado (ver Figura 59).

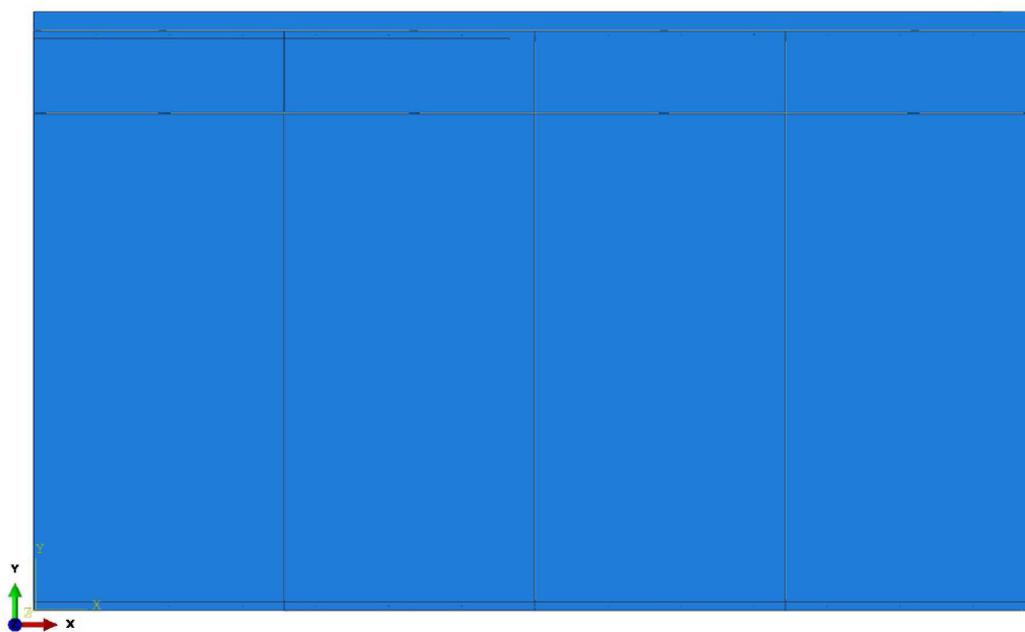


Figura 59. Modelo numérico do painel tipo B.

Analogamente aos modelos experimentais, o painel do tipo B foi submetido a uma força cisalhante na viga que é acoplada na guia superior, e os respectivos deslocamentos foram mensurados no lado oposto do carregamento.

Os montantes foram espaçados de 40 cm e 60 cm, os parafusos foram espaçados de 25 cm, 30 cm e 35 cm e variou-se a espessura do OSB em 11 mm, 15 mm e 18 mm, por meio de combinações com essas três variáveis (espaçamentos entre os montantes,

espaçamentos entre os parafuso e espessura da placa de OSB) foram desenvolvidos 18 modelos.

Os 18 modelos foram analisados numericamente por meio do *software* ABAQUS (*Simulia Corp.*, 2010). A Tabela 17 apresenta a configuração de cada modelo, assim como a força máxima cisalhante que cada painel suporta no regime elástico e o respectivo deslocamento horizontal da guia superior. As curvas de força *versus* deslocamento estão apresentadas no apêndice deste trabalho.

Tabela 17. Painéis do tipo B analisados numericamente.

| Modelos | Espaçamento do Montante (cm) | Espaçamento do Parafuso (cm) | Espessura do OSB (mm) | Força máxima cisalhante (ABAQUS) (kN) | Deslocamento horizontal (ABAQUS) (mm) | Rigidez (kN/mm) |
|-----------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| Modelo 01 | 40,0 | 25,0 | 11,0 | 19,98 | 3,94 | 5,07 |
| Modelo 02 | 40,0 | 25,0 | 15,0 | 25,02 | 3,47 | 7,21 |
| Modelo 03 | 40,0 | 25,0 | 18,0 | 28,23 | 3,14 | 8,99 |
| Modelo 04 | 40,0 | 30,0 | 11,0 | 19,84 | 3,97 | 5,00 |
| Modelo 05 | 40,0 | 30,0 | 15,0 | 23,76 | 3,35 | 7,09 |
| Modelo 06 | 40,0 | 30,0 | 18,0 | 27,25 | 3,33 | 8,18 |
| Modelo 07 | 40,0 | 35,0 | 11,0 | 18,66 | 4,21 | 4,43 |
| Modelo 08 | 40,0 | 35,0 | 15,0 | 23,46 | 3,92 | 5,98 |
| Modelo 09 | 40,0 | 35,0 | 18,0 | 26,57 | 3,44 | 7,72 |
| Modelo 10 | 60,0 | 25,0 | 11,0 | 18,45 | 4,31 | 4,28 |
| Modelo 11 | 60,0 | 25,0 | 15,0 | 22,98 | 4,02 | 5,72 |
| Modelo 12 | 60,0 | 25,0 | 18,0 | 25,23 | 3,33 | 7,58 |
| Modelo 13 | 60,0 | 30,0 | 11,0 | 17,46 | 4,76 | 3,67 |
| Modelo 14 | 60,0 | 30,0 | 15,0 | 22,86 | 4,16 | 5,50 |
| Modelo 15 | 60,0 | 30,0 | 18,0 | 24,64 | 3,53 | 6,98 |
| Modelo 16 | 60,0 | 35,0 | 11,0 | 13,17 | 4,95 | 2,66 |
| Modelo 17 | 60,0 | 35,0 | 15,0 | 19,30 | 4,08 | 4,73 |
| Modelo 18 | 60,0 | 35,0 | 18,0 | 23,03 | 3,82 | 6,03 |

4.3 Aplicação do Princípio dos Trabalhos Virtuais

Por meio das rigidezes dos 36 painéis analisados no item precedente, foi calculado o diâmetro da diagonal equivalente utilizando o Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV), ver Figura 60.

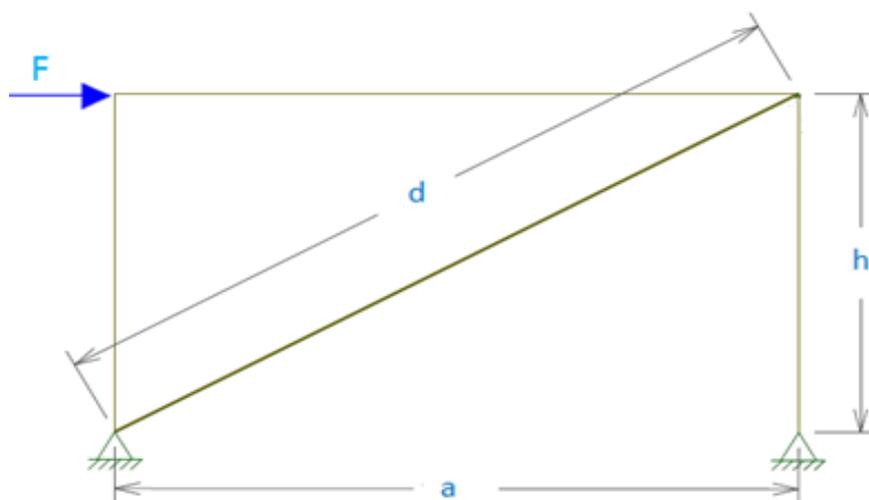


Figura 60. Diagonal equivalente (PTV).

A Figura 61 mostra o sistema estático equivalente do painel, onde o valor do deslocamento “ u ” está associado ao valor da força de cisalhamento “ F ”.

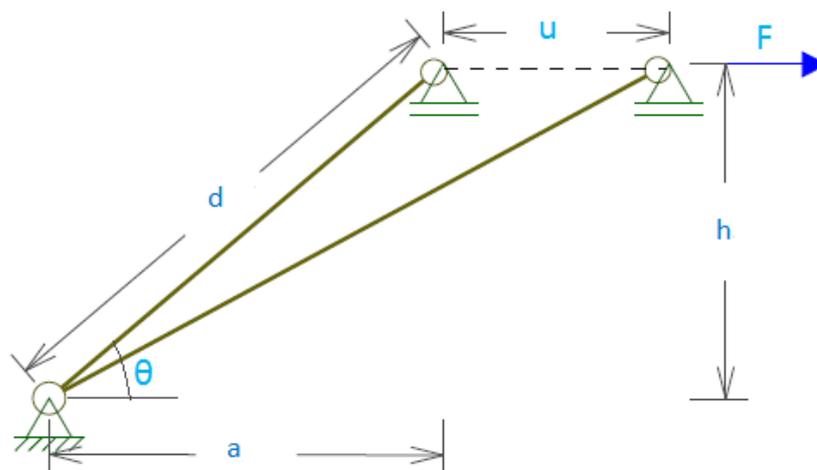


Figura 61. Sistema estático equivalente.

Aplicando as propriedades das relações trigonométricas (Equações (19) a (21)) no problema real equivalente (ver Figura 62), chegou-se ao valor da força normal de tração na diagonal equivalente (Equação (22)).

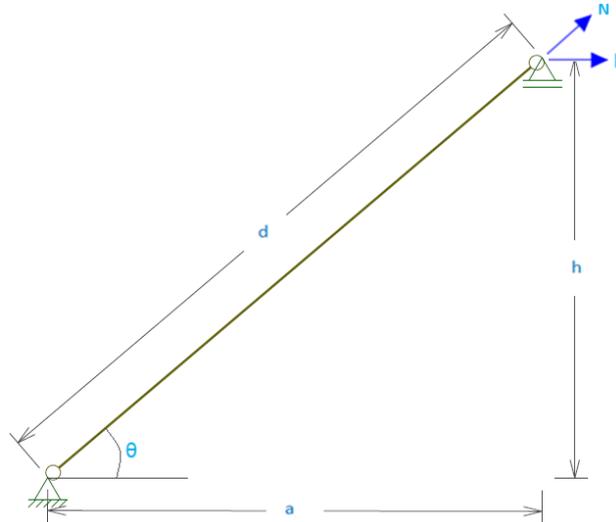


Figura 62. Problema real equivalente.

$$\cos(\theta) = \frac{a}{d} \quad (19)$$

$$\cos(\theta) = \frac{F}{N} \quad (20)$$

$$d = \sqrt{a^2 + h^2} \quad (21)$$

$$\frac{a}{d} = \frac{F}{N} \rightarrow N = F \cdot \frac{d}{a} \quad (22)$$

onde:

a = comprimento do painel;

h = altura do painel;

d = comprimento da diagonal equivalente;

$F =$ força cisalhante;

$N =$ força normal de tração na diagonal equivalente.

Devido à diagonal equivalente estar submetida apenas ao esforço de tração, a equação geral do princípio dos trabalhos virtuais foi reduzida, e chegou-se na Equação (23).

$$P' \cdot \Delta = \int_L \frac{N' \cdot N}{E \cdot A} dx \quad (23)$$

onde:

$\Delta =$ deslocamento genérico a ser calculado no sistema real;

$P' =$ carga virtual genérica associada ao deslocamento a ser calculado;

$N' =$ esforço normal no sistema virtual provocado por P' ;

$N =$ esforço normal no sistema real provocado pelo carregamento externo;

$EA =$ módulo de rigidez à deformação axial da barra de aço.

A Figura 63 mostra o problema virtual, onde foi aplicado o Método da Carga Unitária (MCU), que consiste em atribuir o valor unitário para a carga virtual genérica (P').

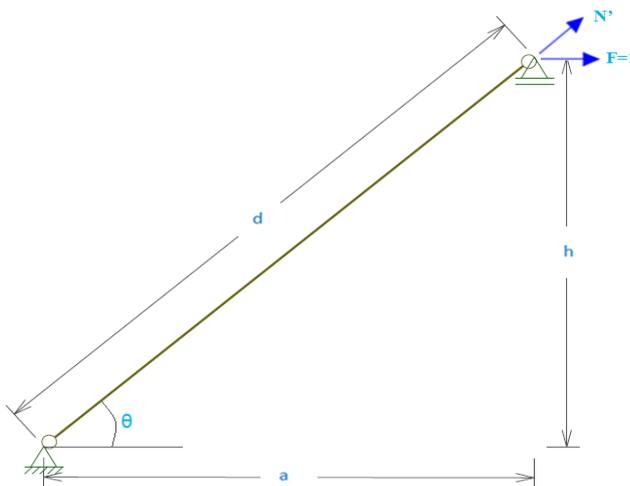


Figura 63. Problema virtual.

Logo, a área da seção transversal da diagonal equivalente pode ser calculada conforme a Equação (24).

$$1.\Delta = \int_L \frac{N'.N}{E.A} dx \quad (24 a)$$

$$u = \frac{d}{a} \cdot \frac{F.d}{a} \cdot \frac{1}{E.A} \cdot d \quad (24 b)$$

$$A = \frac{F}{u.E} \cdot \frac{(\sqrt{a^2 + h^2})^3}{a^2} \quad (24 c)$$

onde:

A = área da seção transversal da diagonal equivalente;

F = força cisalhante;

u = deslocamento horizontal da diagonal equivalente;

E = módulo de elasticidade longitudinal;

a = comprimento do painel;

h = altura do painel.

A diagonal equivalente no modelo numérico foi considerada como uma barra circular, portanto o diâmetro da diagonal equivalente pode ser calculado conforme a Equação (25).

$$\phi_{PTV} = \sqrt{\frac{4.A}{\pi}} \quad (25)$$

onde:

ϕ_{PTV} = diâmetro da diagonal equivalente;

A = área da seção transversal da diagonal equivalente.

Utilizando a Equação (25), a Tabela 18 apresenta o diâmetro da diagonal equivalente de cada modelo de painel utilizando o PTV.

Tabela 18. Diâmetro da diagonal equivalente utilizando o PTV (continua).

| Modelos | Força máxima cisalhante (ABAQUS) (kN) | Deslocamento horizontal (ABAQUS) (mm) | Diâmetro da diagonal equivalente (ϕ_{PTV}) (mm) |
|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|
| PAINÉIS DO TIPO A | | | |
| Modelo 01 | 12,53 | 7,28 | 12,57 |
| Modelo 02 | 14,74 | 7,19 | 13,72 |
| Modelo 03 | 15,53 | 6,33 | 15,01 |
| Modelo 04 | 11,21 | 7,42 | 11,78 |
| Modelo 05 | 13,80 | 7,03 | 13,43 |
| Modelo 06 | 14,69 | 6,75 | 14,14 |
| Modelo 07 | 9,69 | 8,12 | 10,47 |
| Modelo 08 | 12,57 | 7,49 | 12,41 |
| Modelo 09 | 14,22 | 7,01 | 13,65 |
| Modelo 10 | 6,47 | 12,21 | 6,98 |
| Modelo 11 | 9,06 | 11,23 | 8,61 |
| Modelo 12 | 11,14 | 8,47 | 10,99 |
| Modelo 13 | 6,42 | 12,28 | 6,93 |
| Modelo 14 | 8,78 | 11,13 | 8,51 |
| Modelo 15 | 9,96 | 8,15 | 10,59 |
| Modelo 16 | 6,14 | 14,43 | 6,25 |
| Modelo 17 | 7,72 | 11,14 | 7,98 |
| Modelo 18 | 8,57 | 10,68 | 8,58 |
| PAINÉIS DO TIPO B | | | |
| Modelo 01 | 19,98 | 3,94 | 15,51 |
| Modelo 02 | 25,02 | 3,47 | 18,49 |
| Modelo 03 | 28,23 | 3,14 | 20,65 |
| Modelo 04 | 19,84 | 3,97 | 15,39 |
| Modelo 05 | 23,76 | 3,35 | 18,34 |
| Modelo 06 | 27,25 | 3,33 | 19,70 |
| Modelo 07 | 18,66 | 4,21 | 14,50 |
| Modelo 08 | 23,46 | 3,92 | 16,85 |
| Modelo 09 | 26,57 | 3,44 | 19,14 |
| Modelo 10 | 18,45 | 4,31 | 14,25 |
| Modelo 11 | 22,98 | 4,02 | 16,46 |
| Modelo 12 | 25,23 | 3,33 | 18,95 |

Tabela 18. Diâmetro da diagonal equivalente utilizando o PTV (conclusão).

| Modelos | Força máxima cisalhante (ABAQUS) (kN) | Deslocamento horizontal (ABAQUS) (mm) | Diâmetro da diagonal equivalente (ϕ_{PTV}) (mm) |
|-----------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Modelo 13 | 17,46 | 4,76 | 13,19 |
| Modelo 14 | 22,86 | 4,16 | 16,14 |
| Modelo 15 | 24,64 | 3,53 | 18,19 |
| Modelo 16 | 13,17 | 4,95 | 11,23 |
| Modelo 17 | 19,30 | 4,08 | 14,98 |
| Modelo 18 | 23,03 | 3,82 | 16,91 |

4.4 Aferição dos novos modelos (SAP2000)

O diâmetro da diagonal equivalente proposto pela teoria do PTV foi averiguado com o uso do *software* SAP2000 (2004). De acordo com a Figura 64 e 65, foram desenvolvidos quatro modelos de painéis, sendo dois modelos do tipo A e dois do tipo B respectivamente, alternado os espaçamentos dos montantes em 40 cm e 60 cm.

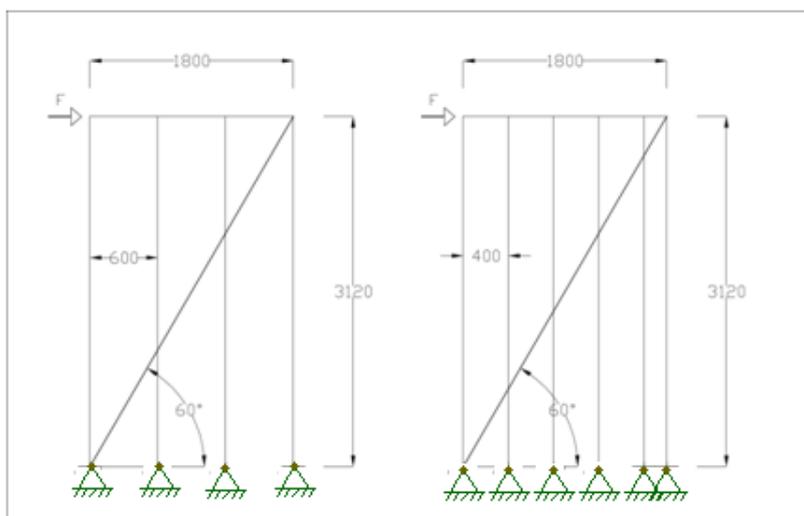


Figura 64. Modelos de painéis do tipo A.

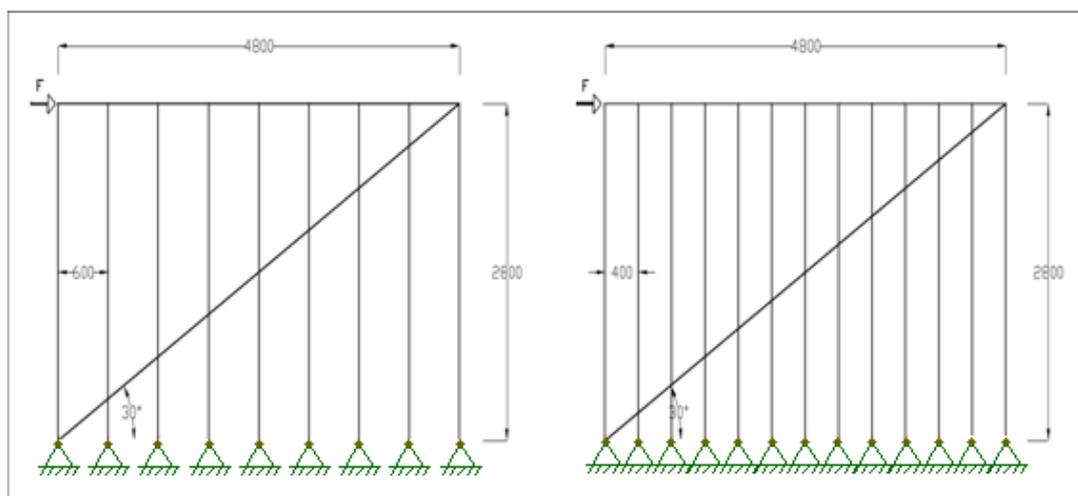


Figura 65. Modelos de painéis do tipo B.

Foi utilizado o elemento de barra denominado *FRAME* para modelar as guias, montantes e a diagonal equivalente. De acordo com o manual do *software* SAP2000 (2004), este elemento é utilizado para modelar barras de estruturas planas, pórticos planos e vigas. São consideradas neste elemento de barra as deformações axiais, de flexão, de torção e de cisalhamento. O elemento *FRAME* é representado por uma linha reta e um nó em cada extremidade, cada nó possui seis graus de liberdade (ver Figura 66). Como neste trabalho os painéis de cisalhamento são analisados numericamente no plano, as deformações perpendiculares ao plano do painel não são consideradas.

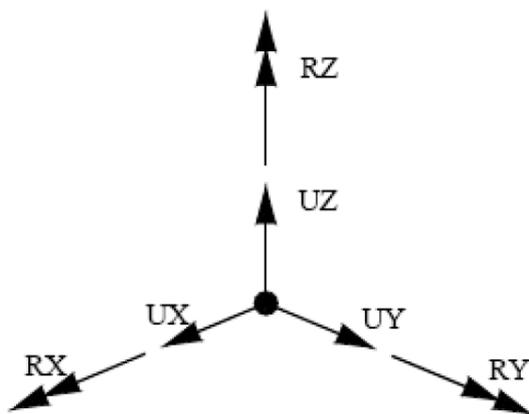


Figura 66. Graus de liberdade do nó de um elemento *FRAME*.

O nó inferior do elemento de barra *FRAME* que foi utilizado para representar o montante, teve as translações restringidas e a rotação livre, assim não se fez necessário a utilização do elemento que representaria a guia inferior (ver Figura 67). A guia superior

foi analisada como corpo rígido, que devido à sua alta rigidez todos os nós superiores dos montantes possuem deslocamentos horizontais iguais.



Figura 67. Elemento *FRAME* representando o montante.

A força cisalhante aplicada em cada painel foi correspondente aos valores máximos encontrados em cada modelo numérico utilizando o *software* ABAQUS (*Simulia Corp.*, 2010).

O diâmetro da diagonal equivalente em cada modelo de painel foi adotado de acordo com os valores encontrados pela teoria do PTV. As propriedades geométricas referentes ao montante e a guia, ambos com 0,8 mm de espessura estão representados na Tabela 19.

Tabela 19. Seção transversal (modelo numérico SAP2000).

| | Montante (mm) | Guia (mm) |
|----------------------------|---------------|-----------|
| Largura da alma (b_w) | 90,0 | 92,0 |
| Largura da mesa (b_f) | 40,0 | 40,0 |
| Largura do enrijecedor (D) | 12,0 | - |

Logo, a Tabela 20 apresenta os valores do deslocamento horizontal de cada modelo de painel utilizando o *software* SAP2000 (2004).

Tabela 20. Deslocamento horizontal utilizando o *software* SAP2000.

| Modelos | Força máxima cisalhante (ABAQUS) (kN) | Diâmetro da diagonal equivalente (ϕ_{PTV}) (mm) | Deslocamento horizontal (ABAQUS) (mm) | Deslocamento horizontal (SAP2000) (mm) |
|--------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|--|
| PAINÉIS DO TIPO A | | | | |
| Modelo 01 | 12,53 | 12,57 | 7,28 | 7,89 |
| Modelo 02 | 14,74 | 13,72 | 7,19 | 7,93 |
| Modelo 03 | 15,53 | 15,01 | 6,33 | 7,13 |
| Modelo 04 | 11,21 | 11,78 | 7,42 | 7,94 |
| Modelo 05 | 13,80 | 13,43 | 7,03 | 7,71 |
| Modelo 06 | 14,69 | 14,14 | 6,75 | 7,49 |
| Modelo 07 | 9,69 | 10,47 | 8,12 | 8,53 |
| Modelo 08 | 12,57 | 12,41 | 7,49 | 8,10 |
| Modelo 09 | 14,22 | 13,65 | 7,01 | 7,72 |
| Modelo 10 | 6,47 | 6,98 | 12,21 | 12,50 |
| Modelo 11 | 9,06 | 8,61 | 11,23 | 11,82 |
| Modelo 12 | 11,14 | 10,99 | 8,47 | 9,31 |
| Modelo 13 | 6,42 | 6,93 | 12,28 | 12,58 |
| Modelo 14 | 8,78 | 8,51 | 11,13 | 11,71 |
| Modelo 15 | 9,96 | 10,59 | 8,15 | 8,90 |
| Modelo 16 | 6,14 | 6,25 | 14,43 | 14,62 |
| Modelo 17 | 7,72 | 7,98 | 11,14 | 11,61 |
| Modelo 18 | 8,57 | 8,58 | 10,68 | 11,26 |
| PAINÉIS DO TIPO B | | | | |
| Modelo 01 | 19,98 | 15,51 | 3,94 | 4,08 |
| Modelo 02 | 25,02 | 18,49 | 3,47 | 3,67 |
| Modelo 03 | 28,23 | 20,65 | 3,14 | 3,37 |
| Modelo 04 | 19,84 | 15,39 | 3,97 | 4,11 |
| Modelo 05 | 23,76 | 18,34 | 3,35 | 3,54 |
| Modelo 06 | 27,25 | 19,70 | 3,33 | 3,55 |
| Modelo 07 | 18,66 | 14,50 | 4,21 | 4,33 |
| Modelo 08 | 23,46 | 16,85 | 3,92 | 4,09 |
| Modelo 09 | 26,57 | 19,14 | 3,44 | 3,65 |
| Modelo 10 | 18,45 | 14,25 | 4,31 | 4,50 |
| Modelo 11 | 22,98 | 16,46 | 4,02 | 4,28 |
| Modelo 12 | 25,23 | 18,95 | 3,33 | 3,63 |
| Modelo 13 | 17,46 | 13,19 | 4,76 | 4,93 |
| Modelo 14 | 22,86 | 16,14 | 4,16 | 4,42 |
| Modelo 15 | 24,64 | 18,19 | 3,53 | 3,82 |
| Modelo 16 | 13,17 | 11,23 | 4,95 | 5,05 |
| Modelo 17 | 19,30 | 14,98 | 4,08 | 4,28 |
| Modelo 18 | 23,03 | 16,91 | 3,82 | 4,08 |

Comparando-se os resultados numéricos obtidos pelos *softwares* ABAQUS e SAP2000 (2004), observa-se que os valores do deslocamento horizontal de cada modelo apresentam adequadamente próximos, apresentando erro relativo máximo igual a 12,64% e desvio padrão do erro igual a 2,79% (ver Tabela 21).

O cálculo do erro relativo é feito conforme a Equação (26), dado pela diferença entre os valores numéricos obtidos pelos *softwares* ABAQUS e SAP2000, dividido pelos valores numéricos obtidos pelo *software* ABAQUS.

$$ER = \left| \frac{DHA - DHS}{DHA} \right| \cdot 100 \quad (26)$$

onde:

ER = erro relativo (%);

DHA = deslocamento horizontal obtido por meio do *software* ABAQUS (mm);

DHS = deslocamento horizontal obtido por meio do *software* SAP2000 (mm).

Tabela 21. Erro relativo do deslocamento horizontal (continua).

| Modelos | Deslocamento horizontal (ABAQUS) (mm) | Deslocamento horizontal (SAP2000) (mm) | Erro relativo (%) |
|--------------------------|---------------------------------------|--|-------------------|
| PAINÉIS DO TIPO A | | | |
| Modelo 01 | 7,28 | 7,89 | 8,38 |
| Modelo 02 | 7,19 | 7,93 | 10,29 |
| Modelo 03 | 6,33 | 7,13 | 12,64 |
| Modelo 04 | 7,42 | 7,94 | 7,01 |
| Modelo 05 | 7,03 | 7,71 | 9,67 |
| Modelo 06 | 6,75 | 7,49 | 10,96 |
| Modelo 07 | 8,12 | 8,53 | 5,05 |
| Modelo 08 | 7,49 | 8,10 | 8,14 |
| Modelo 09 | 7,01 | 7,72 | 10,13 |
| Modelo 10 | 12,21 | 12,50 | 2,38 |
| Modelo 11 | 11,23 | 11,82 | 5,25 |
| Modelo 12 | 8,47 | 9,31 | 9,92 |

Tabela 21. Erro relativo do deslocamento horizontal (conclusão).

| Modelos | Deslocamento horizontal (ABAQUS) (mm) | Deslocamento horizontal (SAP2000) (mm) | Erro relativo (%) |
|--------------------------|---------------------------------------|--|-------------------|
| Modelo 13 | 12,28 | 12,58 | 2,44 |
| Modelo 14 | 11,13 | 11,71 | 5,21 |
| Modelo 15 | 8,15 | 8,90 | 9,20 |
| Modelo 16 | 14,43 | 14,62 | 1,32 |
| Modelo 17 | 11,14 | 11,61 | 4,22 |
| Modelo 18 | 10,68 | 11,26 | 5,43 |
| PAINÉIS DO TIPO B | | | |
| Modelo 01 | 3,94 | 4,08 | 3,55 |
| Modelo 02 | 3,47 | 3,67 | 5,76 |
| Modelo 03 | 3,14 | 3,37 | 7,32 |
| Modelo 04 | 3,97 | 4,11 | 3,53 |
| Modelo 05 | 3,35 | 3,54 | 5,67 |
| Modelo 06 | 3,33 | 3,55 | 6,61 |
| Modelo 07 | 4,21 | 4,33 | 2,85 |
| Modelo 08 | 3,92 | 4,09 | 4,34 |
| Modelo 09 | 3,44 | 3,65 | 6,10 |
| Modelo 10 | 4,31 | 4,50 | 4,41 |
| Modelo 11 | 4,02 | 4,28 | 6,47 |
| Modelo 12 | 3,33 | 3,63 | 9,01 |
| Modelo 13 | 4,76 | 4,93 | 3,57 |
| Modelo 14 | 4,16 | 4,42 | 6,25 |
| Modelo 15 | 3,53 | 3,82 | 8,22 |
| Modelo 16 | 4,95 | 5,05 | 2,02 |
| Modelo 17 | 4,08 | 4,28 | 4,90 |
| Modelo 18 | 3,82 | 4,08 | 6,81 |

4.5 Regressão não linear multivariada

Por meio do *software* MINITAB®, é proposto uma equação para o cálculo do diâmetro da diagonal equivalente em painéis de cisalhamento. Esta equação tem por base o método da regressão não linear multivariada. A Tabela 22 apresenta as particularidades dos 36 modelos de painéis em estudo.

Tabela 22. Particularidades dos 36 modelos de painéis em estudo (continua).

| Modelos | Comprimento do painel (m) | Altura do painel (m) | Espaçamento do Montante (mm) | Espaçamento do Parafuso (mm) | Espessura do OSB (mm) | Força máxima cisalhante (ABAQUS) (kN) | Deslocamento horizontal (SAP2000) (mm) | Diâmetro da diagonal equivalente (ϕ_{PTV}) (mm) |
|--------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|--|--|
| PAINÉIS DO TIPO A | | | | | | | | |
| Modelo 01 | 1,80 | 3,12 | 400,0 | 250,0 | 11,0 | 12,53 | 7,89 | 12,57 |
| Modelo 02 | 1,80 | 3,12 | 400,0 | 250,0 | 15,0 | 14,74 | 7,93 | 13,72 |
| Modelo 03 | 1,80 | 3,12 | 400,0 | 250,0 | 18,0 | 15,53 | 7,13 | 15,01 |
| Modelo 04 | 1,80 | 3,12 | 400,0 | 300,0 | 11,0 | 11,21 | 7,94 | 11,78 |
| Modelo 05 | 1,80 | 3,12 | 400,0 | 300,0 | 15,0 | 13,80 | 7,71 | 13,43 |
| Modelo 06 | 1,80 | 3,12 | 400,0 | 300,0 | 18,0 | 14,69 | 7,49 | 14,14 |
| Modelo 07 | 1,80 | 3,12 | 400,0 | 350,0 | 11,0 | 9,69 | 8,53 | 10,47 |
| Modelo 08 | 1,80 | 3,12 | 400,0 | 350,0 | 15,0 | 12,57 | 8,10 | 12,41 |
| Modelo 09 | 1,80 | 3,12 | 400,0 | 350,0 | 18,0 | 14,22 | 7,72 | 13,65 |
| Modelo 10 | 1,80 | 3,12 | 600,0 | 250,0 | 11,0 | 6,47 | 12,50 | 6,98 |
| Modelo 11 | 1,80 | 3,12 | 600,0 | 250,0 | 15,0 | 9,06 | 11,82 | 8,61 |
| Modelo 12 | 1,80 | 3,12 | 600,0 | 250,0 | 18,0 | 11,14 | 9,31 | 10,99 |
| Modelo 13 | 1,80 | 3,12 | 600,0 | 300,0 | 11,0 | 6,42 | 12,58 | 6,93 |
| Modelo 14 | 1,80 | 3,12 | 600,0 | 300,0 | 15,0 | 8,78 | 11,71 | 8,51 |
| Modelo 15 | 1,80 | 3,12 | 600,0 | 300,0 | 18,0 | 9,96 | 8,90 | 10,59 |
| Modelo 16 | 1,80 | 3,12 | 600,0 | 350,0 | 11,0 | 6,14 | 14,62 | 6,25 |
| Modelo 17 | 1,80 | 3,12 | 600,0 | 350,0 | 15,0 | 7,72 | 11,61 | 7,98 |
| Modelo 18 | 1,80 | 3,12 | 600,0 | 350,0 | 18,0 | 8,57 | 11,26 | 8,58 |

Tabela 22. Particularidades dos 36 modelos de painéis em estudo (conclusão).

| Modelos | Comprimento do painel (m) | Altura do painel (m) | Espaçamento do Montante (mm) | Espaçamento do Parafuso (mm) | Espessura do OSB (mm) | Força máxima cisalhante (ABAQUS) (kN) | Deslocamento horizontal (SAP2000) (mm) | Diâmetro da diagonal equivalente (ϕ_{PTV}) (mm) |
|--------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|--|--|
| PAINÉIS DO TIPO B | | | | | | | | |
| Modelo 01 | 4,80 | 2,80 | 400,0 | 250,0 | 11,0 | 19,98 | 4,08 | 15,51 |
| Modelo 02 | 4,80 | 2,80 | 400,0 | 250,0 | 15,0 | 25,02 | 3,67 | 18,49 |
| Modelo 03 | 4,80 | 2,80 | 400,0 | 250,0 | 18,0 | 28,23 | 3,37 | 20,65 |
| Modelo 04 | 4,80 | 2,80 | 400,0 | 300,0 | 11,0 | 19,84 | 4,11 | 15,39 |
| Modelo 05 | 4,80 | 2,80 | 400,0 | 300,0 | 15,0 | 23,76 | 3,54 | 18,34 |
| Modelo 06 | 4,80 | 2,80 | 400,0 | 300,0 | 18,0 | 27,25 | 3,55 | 19,70 |
| Modelo 07 | 4,80 | 2,80 | 400,0 | 350,0 | 11,0 | 18,66 | 4,33 | 14,50 |
| Modelo 08 | 4,80 | 2,80 | 400,0 | 350,0 | 15,0 | 23,46 | 4,09 | 16,85 |
| Modelo 09 | 4,80 | 2,80 | 400,0 | 350,0 | 18,0 | 26,57 | 3,65 | 19,14 |
| Modelo 10 | 4,80 | 2,80 | 600,0 | 250,0 | 11,0 | 18,45 | 4,50 | 14,25 |
| Modelo 11 | 4,80 | 2,80 | 600,0 | 250,0 | 15,0 | 22,98 | 4,28 | 16,46 |
| Modelo 12 | 4,80 | 2,80 | 600,0 | 250,0 | 18,0 | 25,23 | 3,63 | 18,95 |
| Modelo 13 | 4,80 | 2,80 | 600,0 | 300,0 | 11,0 | 17,46 | 4,93 | 13,19 |
| Modelo 14 | 4,80 | 2,80 | 600,0 | 300,0 | 15,0 | 22,86 | 4,42 | 16,14 |
| Modelo 15 | 4,80 | 2,80 | 600,0 | 300,0 | 18,0 | 24,64 | 3,82 | 18,19 |
| Modelo 16 | 4,80 | 2,80 | 600,0 | 350,0 | 11,0 | 13,17 | 5,05 | 11,23 |
| Modelo 17 | 4,80 | 2,80 | 600,0 | 350,0 | 15,0 | 19,30 | 4,28 | 14,98 |
| Modelo 18 | 4,80 | 2,80 | 600,0 | 350,0 | 18,0 | 23,03 | 4,08 | 16,91 |

De posse das particularidades de cada modelo de painel analisado numericamente (comprimento do painel, altura do painel, espessura da placa de OSB, espaçamentos entre os montantes, espaçamentos entre os parafusos, força máxima cisalhante obtida por meio do *software* ABAQUS, deslocamento horizontal obtido por meio do *software* SAP2000 e o diâmetro da diagonal equivalente obtido pela teoria do PTV), e empregando o *software* MINITAB®, o presente trabalho apresenta uma proposta de equação para o cálculo da diagonal equivalente em painéis de cisalhamento.

4.5.1 Equação para o painel do Tipo A

Após várias tentativas aleatórias de iterações entre as particularidades de cada modelo, chegou-se na Equação (27), onde é possível calcular o diâmetro da diagonal equivalente. Esta equação é válida apenas para painéis com 1,80 m de comprimento por 3,12 m de altura. Neste trabalho esta geometria foi denominada como “Painéis do tipo A”, onde o ângulo formado entre a diagonal equivalente fictícia e a guia inferior é de aproximadamente 60°.

$$\phi_{MINITAB} = \frac{3,602.E.F}{703644 + 1,80.(1476,78.EO + 2,6.EM - 55,89.EP)} + 0,358 \quad (27)$$

onde:

$\phi_{MINITAB}$ = diâmetro da diagonal equivalente (mm);

E = módulo de elasticidade longitudinal (200000 MPa);

F = força cisalhante (kN);

EO = espessura do OSB (mm);

EM = espaçamentos entre os montantes (mm);

EP = espaçamentos entre os parafusos (mm).

Comparando-se os resultados do diâmetro da diagonal equivalente obtidos pela teoria do PTV e pela Equação (27) proposta neste trabalho, observa-se que os valores do diâmetro da diagonal equivalente de cada modelo apresentaram um erro relativo máximo de 10,06% e desvio padrão do erro igual a 2,98% (ver Tabela 23).

O cálculo do erro relativo é feito conforme a Equação (28), dado pela diferença entre os valores obtidos pela teoria do PTV e MINITAB, dividido pelos valores obtidos pelo PTV.

$$ER = \left| \frac{\phi_{PTV} - \phi_{MINITAB}}{\phi_{PTV}} \right| \cdot 100 \quad (28)$$

onde:

ER = erro relativo (%);

ϕ_{PTV} = diâmetro da diagonal equivalente (mm);

$\phi_{MINITAB}$ = diâmetro da diagonal equivalente (mm).

Tabela 23. Erro relativo do diâmetro da diagonal equivalente – Painéis do tipo A.

| Modelos | Diâmetro da diagonal equivalente (ϕ_{PTV}) (mm) | Diâmetro da diagonal equivalente ($\phi_{MINITAB}$) (mm) | Erro relativo (%) |
|--------------------------|--|--|-------------------|
| PAINÉIS DO TIPO A | | | |
| Modelo 01 | 12,57 | 13,08 | 4,06 |
| Modelo 02 | 13,72 | 15,10 | 10,06 |
| Modelo 03 | 15,01 | 15,72 | 4,73 |
| Modelo 04 | 11,78 | 11,82 | 0,34 |
| Modelo 05 | 13,43 | 14,26 | 6,18 |
| Modelo 06 | 14,14 | 14,99 | 6,01 |
| Modelo 07 | 10,47 | 10,34 | 1,24 |
| Modelo 08 | 12,41 | 13,11 | 5,64 |
| Modelo 09 | 13,65 | 14,62 | 7,11 |
| Modelo 10 | 6,98 | 6,92 | 0,86 |
| Modelo 11 | 8,61 | 9,41 | 9,29 |
| Modelo 12 | 10,99 | 11,36 | 3,37 |
| Modelo 13 | 6,93 | 6,91 | 0,29 |
| Modelo 14 | 8,51 | 9,19 | 7,99 |
| Modelo 15 | 10,59 | 10,27 | 3,02 |
| Modelo 16 | 6,25 | 6,67 | 6,72 |
| Modelo 17 | 7,98 | 8,18 | 2,51 |
| Modelo 18 | 8,58 | 8,94 | 4,20 |

4.5.2 Equação para o painel do Tipo B

Por meio da Equação (29), é possível calcular o diâmetro da diagonal equivalente. Esta equação é válida apenas para painéis com 4,80 m de comprimento por 2,80 m de altura. Neste trabalho esta geometria foi denominada como “Painéis do tipo B”, onde o ângulo formado entre a diagonal equivalente fictícia e a guia inferior é de aproximadamente 30°.

$$\phi_{MINITAB} = \frac{5,557.E.F}{2023670 + 4,8.(80,74.EM + 218,378.EP - 6273,58.EO)} + 5,166 \quad (29)$$

onde:

$\phi_{MINITAB}$ = diâmetro da diagonal equivalente (mm);

E = módulo de elasticidade longitudinal (200000 MPa);

F = força cisalhante (kN);

EM = espaçamentos entre os montantes (mm);

EP = espaçamentos entre os parafusos (mm);

EO = espessura do OSB (mm).

Comparando-se os resultados do diâmetro da diagonal equivalente obtidos pela teoria do PTV e pela Equação (29) proposta neste trabalho, observa-se que os valores do diâmetro da diagonal equivalente de cada modelo apresentaram um erro relativo máximo de 6,44% e desvio padrão do erro igual a 2,01% (ver Tabela 24).

O cálculo do erro relativo é feito conforme a Equação (28), dado pela diferença entre os valores obtidos pela teoria do PTV e MINITAB, dividido pelos valores obtidos pelo PTV.

Tabela 24. Erro relativo do diâmetro da diagonal equivalente – Painéis do tipo B.

| Modelos | Diâmetro da diagonal equivalente (ϕ_{PTV}) (mm) | Diâmetro da diagonal equivalente ($\phi_{MINITAB}$) (mm) | Erro relativo (%) |
|--------------------------|--|--|-------------------|
| PAINÉIS DO TIPO B | | | |
| Modelo 01 | 15,51 | 15,69 | 1,16 |
| Modelo 02 | 18,49 | 19,15 | 3,57 |
| Modelo 03 | 20,65 | 21,69 | 5,04 |
| Modelo 04 | 15,39 | 15,37 | 0,13 |
| Modelo 05 | 18,34 | 18,10 | 1,31 |
| Modelo 06 | 19,70 | 20,69 | 5,03 |
| Modelo 07 | 14,50 | 14,53 | 0,21 |
| Modelo 08 | 16,85 | 17,62 | 4,57 |
| Modelo 09 | 19,14 | 19,90 | 3,97 |
| Modelo 10 | 14,25 | 14,54 | 2,04 |
| Modelo 11 | 16,46 | 17,52 | 6,44 |
| Modelo 12 | 18,95 | 19,36 | 2,16 |
| Modelo 13 | 13,19 | 13,83 | 4,85 |
| Modelo 14 | 16,14 | 17,16 | 6,32 |
| Modelo 15 | 18,19 | 18,67 | 2,64 |
| Modelo 16 | 11,23 | 11,55 | 2,85 |
| Modelo 17 | 14,98 | 15,04 | 0,40 |
| Modelo 18 | 16,91 | 17,47 | 3,31 |

4.5.3 Equações para os painéis dos Tipos A e B

Por meio das Equações (27) e (29) é possível calcular o diâmetro da diagonal equivalente referente aos modelos de painéis dos tipos A e B respectivamente. Com o objetivo de encontrar apenas uma única equação que representasse simultaneamente os dois modelos de painéis “Tipos A e B”, chegou-se na Equação (30).

$$\phi_{MINITAB} = \frac{E.F.\sqrt{a^2 + h^2}}{448309 + F.a.h.\sqrt{13238,8.EM + 29508,4.EP - 405703.EO}} - 1,071 \quad (30)$$

onde:

$\phi_{MINITAB}$ = diâmetro da diagonal equivalente (mm);

E = módulo de elasticidade longitudinal (200000 MPa);

F = força cisalhante (kN);

a = comprimento do painel (m);

h = altura do painel (m);

EO = espessura do OSB (mm);

EM = espaçamentos entre os montantes (mm);

EP = espaçamentos entre os parafusos (mm).

Comparando-se os resultados do diâmetro da diagonal equivalente obtidos pela teoria do PTV e pela Equação (30) proposta neste trabalho, observa-se que os valores do diâmetro da diagonal equivalente de cada modelo apresentaram um erro relativo máximo de 13,24% e desvio padrão do erro igual a 3,29% (ver Tabela 25).

O cálculo do erro relativo é feito conforme a Equação (28), dado pela diferença entre os valores obtidos pela teoria do PTV e MINITAB, dividido pelos valores obtidos pelo PTV.

Tabela 25. Erro relativo do diâmetro da diagonal equivalente – Painéis dos tipos A e B.

| Modelos | Diâmetro da diagonal equivalente (ϕ_{PTV}) (mm) | Diâmetro da diagonal equivalente ($\phi_{MINITAB}$) (mm) | Erro relativo (%) |
|--------------------------|--|--|-------------------|
| PAINÉIS DO TIPO A | | | |
| Modelo 01 | 12,57 | 12,82 | 1,99 |
| Modelo 02 | 13,72 | 15,00 | 9,33 |
| Modelo 03 | 15,01 | 16,13 | 7,46 |
| Modelo 04 | 11,78 | 11,46 | 2,72 |
| Modelo 05 | 13,43 | 13,80 | 2,76 |
| Modelo 06 | 14,14 | 14,86 | 5,09 |
| Modelo 07 | 10,47 | 10,01 | 4,39 |
| Modelo 08 | 12,41 | 12,52 | 0,89 |
| Modelo 09 | 13,65 | 14,02 | 2,71 |
| Modelo 10 | 6,98 | 7,13 | 2,15 |
| Modelo 11 | 8,61 | 9,75 | 13,24 |
| Modelo 12 | 10,99 | 11,76 | 7,01 |
| Modelo 13 | 6,93 | 6,97 | 0,58 |
| Modelo 14 | 8,51 | 9,30 | 9,28 |
| Modelo 15 | 10,59 | 10,49 | 0,94 |
| Modelo 16 | 6,25 | 6,60 | 5,60 |
| Modelo 17 | 7,98 | 8,20 | 2,76 |
| Modelo 18 | 8,58 | 9,09 | 5,94 |
| PAINÉIS DO TIPO B | | | |
| Modelo 01 | 15,51 | 17,16 | 10,64 |
| Modelo 02 | 18,49 | 20,13 | 8,87 |
| Modelo 03 | 20,65 | 22,56 | 9,25 |
| Modelo 04 | 15,39 | 16,18 | 5,13 |
| Modelo 05 | 18,34 | 18,42 | 0,44 |
| Modelo 06 | 19,70 | 20,46 | 3,86 |
| Modelo 07 | 14,50 | 15,05 | 3,79 |
| Modelo 08 | 16,85 | 17,26 | 2,43 |
| Modelo 09 | 19,14 | 18,90 | 1,25 |
| Modelo 10 | 14,25 | 15,13 | 6,18 |
| Modelo 11 | 16,46 | 17,34 | 5,35 |
| Modelo 12 | 18,95 | 18,84 | 0,58 |
| Modelo 13 | 13,19 | 14,18 | 7,51 |
| Modelo 14 | 16,14 | 16,41 | 1,67 |
| Modelo 15 | 18,19 | 17,58 | 3,35 |
| Modelo 16 | 11,23 | 12,16 | 8,28 |
| Modelo 17 | 14,98 | 14,77 | 1,40 |
| Modelo 18 | 16,91 | 16,30 | 3,61 |

Com o objetivo de encontrar uma equação em que o diâmetro da diagonal equivalente possa ser calculado independentemente do valor da força cisalhante, e que representasse simultaneamente os dois modelos de painéis “Tipos A e B”, empregando-se a mesma metodologia apresentada no item 4.5, propõe-se a Equação (31).

$$\phi_{MINITAB} = \frac{E \cdot \sqrt{(a + 5,77 \cdot h)^2}}{1,01 \cdot EM + EP - 34,72 \cdot EO + 9264,65} - 142,40 \quad (31)$$

onde:

$\phi_{MINITAB}$ = diâmetro da diagonal equivalente (mm);

E = módulo de elasticidade longitudinal (200000 MPa);

a = comprimento do painel (m);

h = altura do painel (m);

EO = espessura do OSB (mm);

EM = espaçamentos entre os montantes (mm);

EP = espaçamentos entre os parafusos (mm).

Comparando-se os resultados do diâmetro da diagonal equivalente obtidos pela teoria do PTV e pela Equação (31) proposta neste trabalho, observa-se que os valores do diâmetro da diagonal equivalente de cada modelo apresentaram um erro relativo máximo de 17,75% e desvio padrão do erro igual a 4,32% (ver Tabela 26).

O cálculo do erro relativo é feito conforme a Equação (28), dado pela diferença entre os valores obtidos pela teoria do PTV e pelo MINITAB, dividida pelos valores obtidos utilizando o PTV.

Tabela 26. Erro relativo do diâmetro da diagonal equivalente – Painéis dos tipos A e B.

| Modelos | Diâmetro da diagonal equivalente (ϕ_{PTV}) (mm) | Diâmetro da diagonal equivalente ($\phi_{MINITAB}$) (mm) | Erro relativo (%) |
|--------------------------|--|--|-------------------|
| PAINÉIS DO TIPO A | | | |
| Modelo 01 | 12,57 | 11,05 | 12,10 |
| Modelo 02 | 13,72 | 13,32 | 2,93 |
| Modelo 03 | 15,01 | 15,06 | 0,35 |
| Modelo 04 | 11,78 | 10,25 | 13,00 |
| Modelo 05 | 13,43 | 12,49 | 6,97 |
| Modelo 06 | 14,14 | 14,22 | 0,57 |
| Modelo 07 | 10,47 | 9,46 | 9,67 |
| Modelo 08 | 12,41 | 11,68 | 5,90 |
| Modelo 09 | 13,65 | 13,39 | 1,93 |
| Modelo 10 | 6,98 | 7,86 | 12,65 |
| Modelo 11 | 8,61 | 10,04 | 16,57 |
| Modelo 12 | 10,99 | 11,71 | 6,54 |
| Modelo 13 | 6,93 | 7,10 | 2,38 |
| Modelo 14 | 8,51 | 9,25 | 8,66 |
| Modelo 15 | 10,59 | 10,90 | 2,94 |
| Modelo 16 | 6,25 | 6,34 | 1,37 |
| Modelo 17 | 7,98 | 8,47 | 6,08 |
| Modelo 18 | 8,58 | 10,10 | 17,75 |
| PAINÉIS DO TIPO B | | | |
| Modelo 01 | 15,51 | 16,96 | 9,34 |
| Modelo 02 | 18,49 | 19,31 | 4,46 |
| Modelo 03 | 20,65 | 21,13 | 2,31 |
| Modelo 04 | 15,39 | 16,13 | 4,79 |
| Modelo 05 | 18,34 | 18,46 | 0,65 |
| Modelo 06 | 19,70 | 20,25 | 2,80 |
| Modelo 07 | 14,50 | 15,31 | 5,55 |
| Modelo 08 | 16,85 | 17,61 | 4,52 |
| Modelo 09 | 19,14 | 19,39 | 1,28 |
| Modelo 10 | 14,25 | 13,65 | 4,21 |
| Modelo 11 | 16,46 | 15,91 | 3,36 |
| Modelo 12 | 18,95 | 17,64 | 6,89 |
| Modelo 13 | 13,19 | 12,85 | 2,59 |
| Modelo 14 | 16,14 | 15,09 | 6,52 |
| Modelo 15 | 18,19 | 16,81 | 7,61 |
| Modelo 16 | 11,23 | 12,06 | 7,42 |
| Modelo 17 | 14,98 | 14,28 | 4,71 |
| Modelo 18 | 16,91 | 15,98 | 5,52 |

4.5.4 Aferição da regressão

O diâmetro da diagonal equivalente em cada modelo de painel proposto pelo método da regressão não linear multivariada foi averiguado com o uso do *software* SAP2000 (2004). A força cisalhante aplicada nos painéis corresponde aos valores máximos encontrados em cada modelo numérico utilizando o *software* ABAQUS (*Simulia Corp.*, 2010), e o diâmetro da diagonal equivalente em cada modelo de painel foi proposto pelas Equações (27), (29) e (30).

A Tabela 27 apresenta os valores do deslocamento horizontal e o erro relativo em cada modelo de painel do tipo A, onde o diâmetro da diagonal equivalente tem por base a Equação (27).

Comparando-se os resultados numéricos obtidos pelos *softwares* ABAQUS e SAP2000 (2004), observa-se que os valores do deslocamento horizontal de cada modelo apresentaram adequadamente próximos, proporcionando um erro relativo máximo igual a 11,53% e desvio padrão do erro igual a 3,72%.

O cálculo do erro relativo é feito conforme a Equação (26), dado pela diferença entre os deslocamentos horizontais obtidos pelos *softwares* ABAQUS e SAP2000, dividido pelos deslocamentos horizontais obtidos pelo *software* ABAQUS.

Tabela 27. Erro relativo do deslocamento horizontal – Painéis do tipo A.

| Modelos | Força máxima cisalhante (ABAQUS) (kN) | Diâmetro da diagonal equivalente ($\phi_{MINITAB}$) (mm) | Deslocamento horizontal (ABAQUS) (mm) | Deslocamento horizontal (SAP2000) (mm) | Erro relativo (%) |
|--------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|--|-------------------|
| PAINÉIS DO TIPO A | | | | | |
| Modelo 01 | 12,53 | 13,08 | 7,28 | 7,34 | 0,82 |
| Modelo 02 | 14,74 | 15,10 | 7,19 | 6,69 | 6,95 |
| Modelo 03 | 15,53 | 15,72 | 6,33 | 6,57 | 3,79 |
| Modelo 04 | 11,21 | 11,82 | 7,42 | 7,90 | 6,47 |
| Modelo 05 | 13,80 | 14,26 | 7,03 | 6,93 | 1,42 |
| Modelo 06 | 14,69 | 14,99 | 6,75 | 6,75 | 0,00 |
| Modelo 07 | 9,69 | 10,34 | 8,12 | 8,73 | 7,51 |
| Modelo 08 | 12,57 | 13,11 | 7,49 | 7,34 | 2,00 |
| Modelo 09 | 14,22 | 14,62 | 7,01 | 6,84 | 2,43 |
| Modelo 10 | 6,47 | 6,92 | 12,21 | 12,71 | 4,10 |
| Modelo 11 | 9,06 | 9,41 | 11,23 | 10,04 | 10,60 |
| Modelo 12 | 11,14 | 11,36 | 8,47 | 8,76 | 3,42 |
| Modelo 13 | 6,42 | 6,91 | 12,28 | 12,64 | 2,93 |
| Modelo 14 | 8,78 | 9,19 | 11,13 | 10,16 | 8,72 |
| Modelo 15 | 9,96 | 10,27 | 8,15 | 9,09 | 11,53 |
| Modelo 16 | 6,14 | 6,67 | 14,43 | 12,93 | 10,40 |
| Modelo 17 | 7,72 | 8,18 | 11,14 | 11,08 | 0,54 |
| Modelo 18 | 8,57 | 8,94 | 10,68 | 10,43 | 2,34 |

A Tabela 28 apresenta os valores do deslocamento horizontal e o erro relativo em cada modelo de painel do tipo B, onde o diâmetro da diagonal equivalente tem por base a Equação (29).

Comparando-se os resultados numéricos obtidos pelos *softwares* ABAQUS e SAP2000 (2004), observa-se que os valores do deslocamento horizontal de cada modelo apresentaram adequadamente próximos, proporcionando um erro relativo máximo igual a 8,06% e desvio padrão do erro igual a 2,04%.

O cálculo do erro relativo é feito conforme a Equação (26), dado pela diferença entre os deslocamentos horizontais obtidos pelos *softwares* ABAQUS e SAP2000, dividido pelos deslocamentos horizontais obtidos pelo *software* ABAQUS.

Tabela 28. Erro relativo do deslocamento horizontal – Painéis do tipo B.

| Modelos | Força máxima cisalhante (ABAQUS) (kN) | Diâmetro da diagonal equivalente ($\phi_{MINITAB}$) (mm) | Deslocamento horizontal (ABAQUS) (mm) | Deslocamento horizontal (SAP2000) (mm) | Erro relativo (%) |
|--------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|--|-------------------|
| PAINÉIS DO TIPO B | | | | | |
| Modelo 01 | 19,98 | 15,69 | 3,94 | 3,99 | 1,27 |
| Modelo 02 | 25,02 | 19,15 | 3,47 | 3,44 | 0,86 |
| Modelo 03 | 28,23 | 21,69 | 3,14 | 3,09 | 1,59 |
| Modelo 04 | 19,84 | 15,37 | 3,97 | 4,12 | 3,78 |
| Modelo 05 | 23,76 | 18,10 | 3,35 | 3,62 | 8,06 |
| Modelo 06 | 27,25 | 20,69 | 3,33 | 3,25 | 2,40 |
| Modelo 07 | 18,66 | 14,53 | 4,21 | 4,31 | 2,38 |
| Modelo 08 | 23,46 | 17,62 | 3,92 | 3,77 | 3,83 |
| Modelo 09 | 26,57 | 19,90 | 3,44 | 3,41 | 0,87 |
| Modelo 10 | 18,45 | 14,54 | 4,31 | 4,33 | 0,46 |
| Modelo 11 | 22,98 | 17,52 | 4,02 | 3,82 | 4,98 |
| Modelo 12 | 25,23 | 19,36 | 3,33 | 3,48 | 4,50 |
| Modelo 13 | 17,46 | 13,83 | 4,76 | 4,51 | 5,25 |
| Modelo 14 | 22,86 | 17,16 | 4,16 | 3,95 | 5,05 |
| Modelo 15 | 24,64 | 18,67 | 3,53 | 3,64 | 3,12 |
| Modelo 16 | 13,17 | 11,55 | 4,95 | 4,79 | 3,23 |
| Modelo 17 | 19,30 | 15,04 | 4,08 | 4,25 | 4,17 |
| Modelo 18 | 23,03 | 17,47 | 3,82 | 3,84 | 0,52 |

A Tabela 29 apresenta os valores do deslocamento horizontal e o erro relativo em cada modelo de painel do tipo A e B, onde o diâmetro da diagonal equivalente tem por base a Equação (30).

Comparando-se os resultados numéricos obtidos pelos *softwares* ABAQUS e SAP2000 (2004), observa-se que os valores do deslocamento horizontal de cada modelo apresentaram adequadamente próximos, proporcionando um erro relativo máximo igual a 16,21% e desvio padrão do erro igual a 4,73%.

O cálculo do erro relativo é feito conforme a Equação (26), dado pela diferença entre os deslocamentos horizontais obtidos pelos *softwares* ABAQUS e SAP2000, dividido pelos deslocamentos horizontais obtidos pelo *software* ABAQUS.

Tabela 29. Erro relativo do deslocamento horizontal – Painéis dos tipos A e B.

| Modelos | Força máxima cisalhante (ABAQUS) (kN) | Diâmetro da diagonal equivalente ($\phi_{MINITAB}$) (mm) | Deslocamento horizontal (ABAQUS) (mm) | Deslocamento horizontal (SAP2000) (mm) | Erro relativo (%) |
|--------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|--|-------------------|
| PAINÉIS DO TIPO A | | | | | |
| Modelo 01 | 12,53 | 12,82 | 7,28 | 7,61 | 4,53 |
| Modelo 02 | 14,74 | 15,00 | 7,19 | 6,77 | 5,84 |
| Modelo 03 | 15,53 | 16,13 | 6,33 | 6,29 | 0,63 |
| Modelo 04 | 11,21 | 11,46 | 7,42 | 8,36 | 12,67 |
| Modelo 05 | 13,80 | 13,80 | 7,03 | 7,35 | 4,55 |
| Modelo 06 | 14,69 | 14,86 | 6,75 | 6,86 | 1,63 |
| Modelo 07 | 9,69 | 10,01 | 8,12 | 9,28 | 14,29 |
| Modelo 08 | 12,57 | 12,52 | 7,49 | 7,97 | 6,41 |
| Modelo 09 | 14,22 | 14,02 | 7,01 | 7,36 | 4,99 |
| Modelo 10 | 6,47 | 7,13 | 12,21 | 12,02 | 1,56 |
| Modelo 11 | 9,06 | 9,75 | 11,23 | 9,41 | 16,21 |
| Modelo 12 | 11,14 | 11,76 | 8,47 | 8,26 | 2,48 |
| Modelo 13 | 6,42 | 6,97 | 12,28 | 12,43 | 1,22 |
| Modelo 14 | 8,78 | 9,30 | 11,13 | 9,94 | 10,69 |
| Modelo 15 | 9,96 | 10,49 | 8,15 | 9,05 | 11,04 |
| Modelo 16 | 6,14 | 6,60 | 14,43 | 13,19 | 8,59 |
| Modelo 17 | 7,72 | 8,20 | 11,14 | 11,03 | 0,99 |
| Modelo 18 | 8,57 | 9,09 | 10,68 | 10,12 | 5,24 |
| PAINÉIS DO TIPO B | | | | | |
| Modelo 01 | 19,98 | 17,16 | 3,94 | 3,37 | 14,47 |
| Modelo 02 | 25,02 | 20,13 | 3,47 | 3,14 | 9,51 |
| Modelo 03 | 28,23 | 22,56 | 3,14 | 2,87 | 8,60 |
| Modelo 04 | 19,84 | 16,18 | 3,97 | 3,75 | 5,54 |
| Modelo 05 | 23,76 | 18,42 | 3,35 | 3,51 | 4,78 |
| Modelo 06 | 27,25 | 20,46 | 3,33 | 3,32 | 0,30 |
| Modelo 07 | 18,66 | 15,05 | 4,21 | 4,04 | 4,04 |
| Modelo 08 | 23,46 | 17,26 | 3,92 | 3,92 | 0,00 |
| Modelo 09 | 26,57 | 18,90 | 3,44 | 3,74 | 8,72 |
| Modelo 10 | 18,45 | 15,13 | 4,31 | 4,03 | 6,50 |
| Modelo 11 | 22,98 | 17,34 | 4,02 | 3,89 | 3,23 |
| Modelo 12 | 25,23 | 18,84 | 3,33 | 3,66 | 9,91 |
| Modelo 13 | 17,46 | 14,18 | 4,76 | 4,31 | 9,45 |
| Modelo 14 | 22,86 | 16,41 | 4,16 | 4,28 | 2,88 |
| Modelo 15 | 24,64 | 17,58 | 3,53 | 4,06 | 15,01 |
| Modelo 16 | 13,17 | 12,16 | 4,95 | 4,35 | 12,12 |
| Modelo 17 | 19,30 | 14,77 | 4,08 | 4,40 | 7,84 |
| Modelo 18 | 23,03 | 16,30 | 3,82 | 4,37 | 14,40 |

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Este trabalho apresenta um estudo numérico sobre a estabilidade estrutural de painéis de cisalhamento do sistema *Light Steel Framing*, e o desenvolvimento de um modelo analítico para o método da diagonal equivalente baseada na regressão não linear multivariada.

A aferição dos modelos concebidos para a análise numérica foi realizada utilizando o *software* ABAQUS (*Simulia Corp.*, 2010) por meio de comparações com os resultados experimentais obtidos pelo AISI (1997) e por Tian *et al.* (2004). Os resultados dos modelos numéricos mostraram-se coerentes aos resultados experimentais na fase elástica. No entanto, na fase inelástica, os comportamentos obtidos numericamente não se mostraram com os abatimentos das respostas experimentais Força *versus* Deslocamento, devido provavelmente aos modos de colapso na união entre as placas de OSB e os perfis de aço, tal como o *pull-over* ocorrido nos ensaios experimentais, ocasionando assim uma diminuição da rigidez dos painéis ensaiados. Como neste trabalho a força máxima cisalhante e o respectivo deslocamento estão relacionados na fase linear, o comportamento desigual entre os modelos numéricos e experimentais na fase inelástica não influencia nos resultados obtidos neste trabalho.

Os valores obtidos para o diâmetro da diagonal equivalente utilizando a equação dos Princípios dos Trabalhos Virtuais (PTV) se mostraram adequados. Pode-se observar que o deslocamento horizontal do painel de cisalhamento obtido por meio do *software* SAP2000, onde o diâmetro da diagonal equivalente foi tomado de acordo com o PTV,

quando comparado com o resultado obtido pelo *software* ABAQUS, apresentou um erro relativo máximo igual a 12,64% e desvio padrão do erro igual a 2,79%.

Por meio do *software* MINITAB®, foram propostas três equações para o cálculo do diâmetro da diagonal equivalente em painéis de cisalhamento. Estas equações têm por base o método da regressão não linear multivariada.

Inicialmente foi proposta a Equação (27), onde é possível calcular o diâmetro da diagonal equivalente em painéis de cisalhamento com 1,80 m de comprimento por 3,12 m de altura, neste trabalho esta geometria foi denominada como “Painéis do tipo A”, onde o ângulo formado entre a diagonal equivalente fictícia e a guia inferior é de aproximadamente 60°. Os valores do diâmetro da diagonal equivalente propostos pela Equação (27) quando comparados com os valores obtidos utilizando a equação do PTV se mostraram próximos, apresentaram um erro relativo máximo de 10,06% e desvio padrão do erro igual a 2,98%. Analisando o deslocamento horizontal, pode-se observar que os valores obtidos por meio do *software* SAP2000, onde o diâmetro da diagonal equivalente foi tomado de acordo com a Equação (27), quando comparados com os resultados obtidos pelo *software* ABAQUS, apresentaram adequadamente próximos, proporcionando um erro relativo máximo igual a 11,53% e desvio padrão do erro igual a 3,72%.

A expressão analítica (29) proposta para o cálculo da diagonal equivalente em painéis de cisalhamento com 4,80 m de comprimento por 2,80 m de altura “Painéis do tipo B” mostrou-se adequada, apresentando resultados com pouca variação quando comparados com os resultados obtidos numericamente via *software* ABAQUS e pela teoria do PTV. Por meio do *software* SAP2000 foi realizada a aferição do deslocamento horizontal, onde foi observado que os valores do deslocamento horizontal de cada modelo apresentaram um erro relativo máximo igual a 8,06% e desvio padrão do erro igual a 2,04% quando comparados com os resultados obtidos numericamente via ABAQUS. Os valores do diâmetro da diagonal equivalente foram averiguados com os resultados obtidos pela teoria do PTV, onde apresentaram um erro relativo máximo de 6,44% e desvio padrão do erro igual a 2,01%.

Com o intuito de encontrar uma única equação que representasse simultaneamente o cálculo do diâmetro da diagonal equivalente em painéis dos tipos A e B, foi proposta a Equação (30). Comparando-se os resultados do diâmetro da diagonal equivalente obtidos pela teoria do PTV e pela equação proposta neste trabalho, observa-se que os valores do diâmetro da diagonal equivalente de cada modelo apresentaram um erro relativo máximo de 13,24% e desvio padrão do erro igual a 3,29%. Os valores do deslocamento horizontal de cada modelo apresentaram adequadamente próximos, proporcionando um erro relativo máximo igual a 16,21% e desvio padrão do erro igual a 4,73%.

Com o objetivo de encontrar uma equação em que o diâmetro da diagonal equivalente possa ser calculado independentemente do valor da força cisalhante, e que representasse simultaneamente os dois modelos de painéis “Tipos A e B”, foi proposta a Equação (31). Comparando-se os resultados do diâmetro da diagonal equivalente obtidos pela teoria do PTV e pela equação proposta neste trabalho, observa-se que os valores do diâmetro da diagonal equivalente de cada modelo apresentaram um erro relativo máximo de 17,75% e desvio padrão do erro igual a 4,32%. A equação ora proposta representa simultaneamente os dois modelos de painéis “Tipos A e B”, ou seja, os ângulos formados entre a diagonal equivalente como o plano horizontal deverão ser iguais a 30° e 60°.

Pode-se comprovar por meio deste trabalho que a rigidez de um painel *shear wall* está associada ao comprimento, à altura, à espessura da placa de OSB e aos espaçamentos entre os montantes e parafusos, e que a interação entre estas propriedades podem determinar uma equação que resulta no valor do diâmetro de uma diagonal equivalente, que é capaz de oferecer a rigidez ao painel quando contraventado pela placa de OSB.

Logo, as equações propostas neste trabalho podem ser utilizadas como referência em trabalhos futuros. Vale ressaltar que não houve um estudo de confiabilidade na elaboração dos modelos numéricos e da diagonal equivalente, e que a realização de um estudo mais refinado, por exemplo, incluindo análise experimental e estatística, pode determinar uma equação que resulta no valor do diâmetro de uma diagonal equivalente que impõe ao reticulado metálico a mesma rigidez quando contraventado pela placa de OSB.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A utilização do sistema estrutural denominado *light steel framing*, também conhecido como sistema autoportante de construção a seco em aço, vem se consolidando no mercado da construção civil. Portanto, as sugestões para trabalhos futuros estão relacionadas com pesquisas que possam avançar o estudo do comportamento de painéis de cisalhamento do sistema LSF, tornando-se assim este sistema estrutural cada vez mais viável e utilizado na construção civil brasileira.

Como sugestões para trabalhos futuros, tem-se:

- a) Utilizar placas de OSB e cimentícias em análises numéricas e experimentais como elementos de contraventamento em painéis de cisalhamento.
- b) Realizar ensaios experimentais para determinar as propriedades mecânicas das placas de OSB e cimentícias.
- c) Analisar o comportamento do painel de cisalhamento em situação de incêndio.
- d) Realizar ensaios experimentais e numéricos em diferentes tipos painéis de cisalhamento, alternando o comprimento e altura do painel, espaçamentos entre os montantes e parafusos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS Simula Corp. (2010). *Software ABAQUS/CAE*, versão 6.10. Dessault Systemes Simulia Corp., USA.

American Iron and Steel Institute (1997). *Monotonic Tests of Cold-Formed Steel Shear Walls With Openings*. American Iron Steel Institute (AISI), Malboro.

American Iron and Steel Institute (2005). *Cold Formed Steel Walls With Fiberboard Sheathing-Shear Wall Testing*. American Iron Steel Institute (AISI), Malboro.

ABNT NBR 14762:2001. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*. Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas Por Perfis Formados a Frio. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 6355:2003. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*. Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 15253:2005. *Associação Brasileira De Normas Técnicas*. Perfis de Aço Formados a Frio, Com Revestimento Metálico, Para Painéis Reticulados em Edificações. Rio de Janeiro.

Bacelar, C. J. R (2003). *Análises de Recalque em Radiers Estaqueados*. Tese de Doutorado, Programa de pós Graduação em Engenharia Civil, PUC, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.

Bastos, E. F. (2009). *Caracterização física e mecânica de painel de OSB do tipo form*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Capinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Estruturas, Campinas.

Bevilaqua, R. (2005). *Estudo Comparativo do Desempenho Estrutural de Prédios Estruturados em Perfis Formados a Frio Segundo os Sistemas Aporticado e Light Steel*

Framing. Dissertação de Mestrado, UFMG, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Bredel, D. H. (2003). *Performance Capabilities of Light-Frame Shear Walls Sheathed With Long OSB Panels*. Dissertação de Mestrado, Polytechnic Institute and State University, Virginia.

Caixa Econômica Federal (2003). *Sistema Construtivo Utilizando Perfis Estruturais Formados a Frio (Steel Framing) – Requisitos e Condições Mínimas de Financiamento Pela Caixa*. São Paulo.

Campanari, F. A. (1985). *Teoria das Estruturas, Vols. 1, 2, 3 e 4*. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro.

Chiu, S. and Tavella, D. (2008). *Data Mining and Market Intelligence For optimal Marketing Returns*. Butterworth-Heinemann, Oxford, Inglaterra.

Consulsteel (2002). *Construcción Con Acero Liviano: Manual de Procedimento*. Buenos Aires.

Crandell, P. E. (2004). *Promising Advancements In Shear Wall Design: Updated Shear Values, Aspect Ratio Effects And Drift Prediction*. NAHB Research Center Inc. 10p, Malboro.

Cunha, U. S. (2008). *Série Técnica Sobre Modelos de Regressão, Equações não Lineares*. Universidade Federal do Amazonas, Curso de Engenharia Florestal.

EN 326-1 (1994). *Wood Based Panels Sampling, Cutting and Inspection*. European Committee Standardization.

ETERNIT, Catálogo técnico (2007). *Painel wall Eternit*. Disponível em: <<http://www.eternit.com.br>>. Acesso em: 08 Março 2011.

Faherty, K. F., Williamson, T.G. (1997). *Wood Engineering and Construction Handbook*. 3rd Edition, McGraw-Hill, New York.

Han, J. e Kamber, M. (2001). *Data Mining Concepts and Techniques*. Academic Press, San Diego, USA.

Freitas, A. M. S. and Castro, R. C. M (2006). *Manual de Construção em Aço Steel Framing: Arquitetura*. CBCA, Rio de Janeiro.

Lameiras, C. R. L. (2008). *Estudo de Nós Soldados Tipo K de Treliças Planas Constituídas por Seções Tubulares Circulares de Aço*. Dissertação de Mestrado, UFMG, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Lee, J. N. and Wu Q. (2003). *Continuum Modeling of Engineering Constants of Oriented Strandboard*. School of Renewable Natural Resources. Baton Rouge, Louisiana, USA.

Martha, L. F. (2010). *Métodos básicos da Análise de Estruturas*. Notas de aula, Departamento de Engenharia Civil, PUC, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.

Mendes, L. M. *et al.* (2002). *Ciência Florestal: Pinnus Spp na Produção de Painéis de Oriented Strand Board (OSB)*. UFSM, Rio Grande do Sul.

MINITAB INC. (2006). *Conheça o MINITAB 15 para Windows®*. EUA.

NASFA (2000). *Prescriptive method for residential cold-formed steel framing*. North American Steel Framing Alliance. USA.

Rodrigues, F. C., Campos A. S., Jardim G. T. C., Machado J. C. (2004). *Sistema Steel Framing Manual de Projeto*. USIMINAS, Belo horizonte.

Rodrigues, F. C. (2006). *Manual de Construção em Aço Steel Framing: Engenharia*. CBCA, Rio de Janeiro.

SAP2000 (2004). *Structural Analysis Program Computers and Structures*. Version 11.0.8, University Ave, Berkeley.

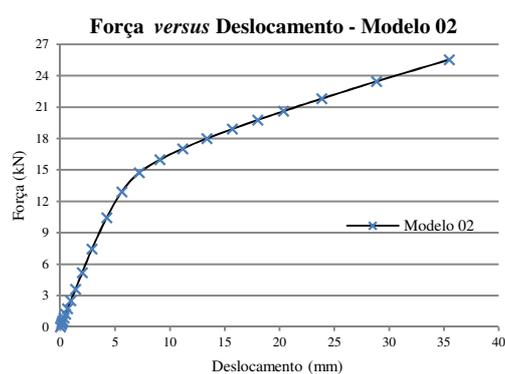
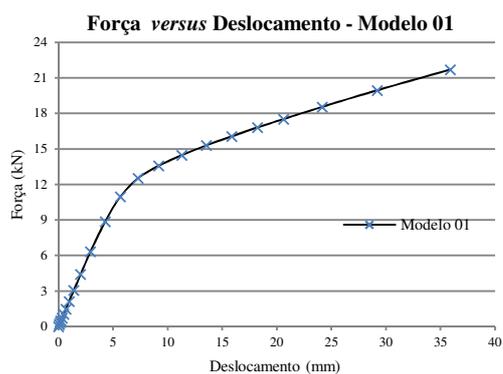
- Scharff, R. (1996). *Residential steel framing handbook*. McGraw Hill, New York.
- Smith, B. S. (1966, 1967a). *Behavior of Square Infilled Frames*. Journal of Structural Division – ASCE – ST1, pg. 381-403. February.
- Soriano, H. L. (2003). *Método de Elementos Finitos em Análise de Estrutura*. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Sugiyama, H. and Yasumura, M. (1984). *Shear Properties of Plywood Sheathed Wall Panels with Openings*, Trans of A.I.J. No. 338, April.
- Sugiyama, H. and Matsumoto, T. (1994). *Empirical Equations for the Estimation of Racking Strength of a Plywood-Sheathed Shear Wall with Openings*, Summaries of Technical Papers of Annual Meetings, Trans of A.I.J.
- Tian, Y. S., Wang, J., Lu T. J (2004). *Racking Strength and Stiffness of Cold-Formed Steel Wall Frames*. In. journal of Constructional Steel Research, 60, pp 1069-1093.
- Zhang, B., Wang, L., Wu, Q. and Han, G. (2005). *The Influence of In-Plane Density Variation on Engineering Properties of Oriented Strandboard: A Finite Element Simulation*. Conference on Mechanics and Materials, Baton Rouge, Louisiana, USA.
- Wu, Q. (1999). *In-Plane Dimensional Stability of Oriented Strand Panel: Effect of Processing Variables*. Wood Fiber Sci. 31(1):28-40.

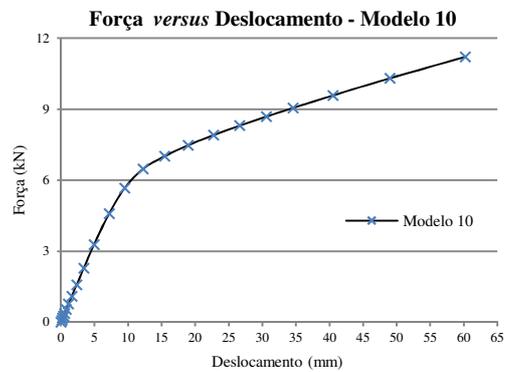
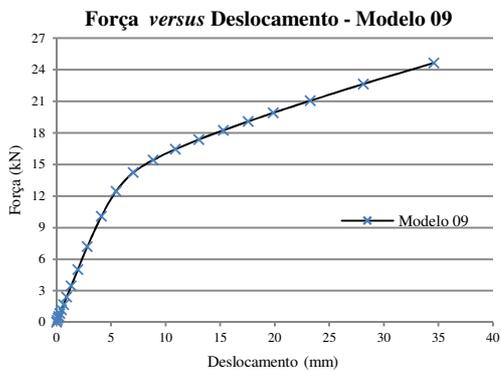
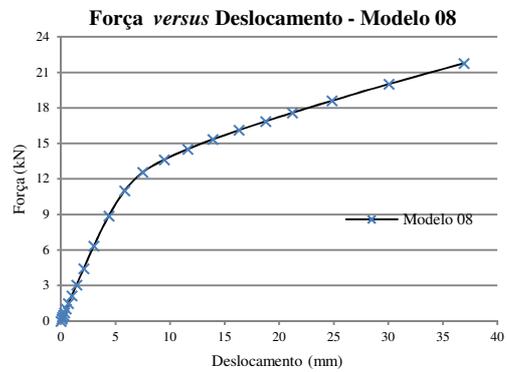
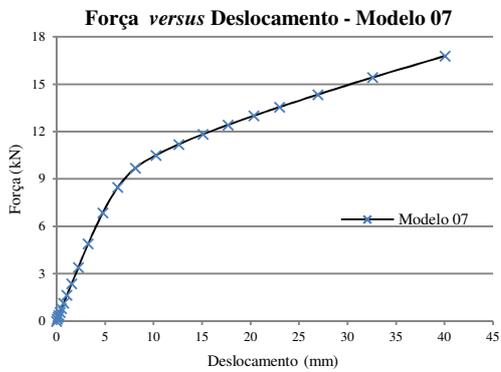
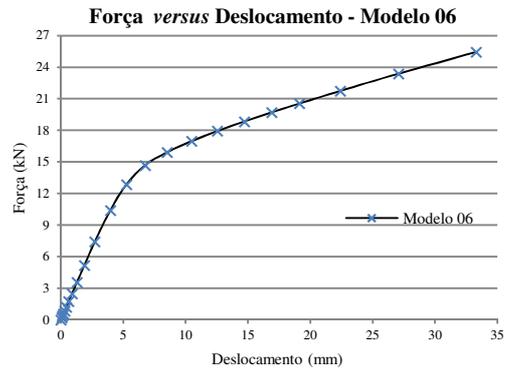
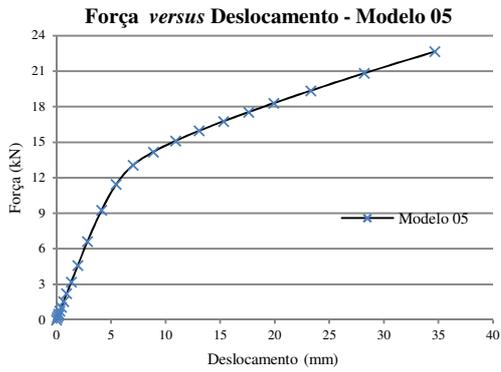
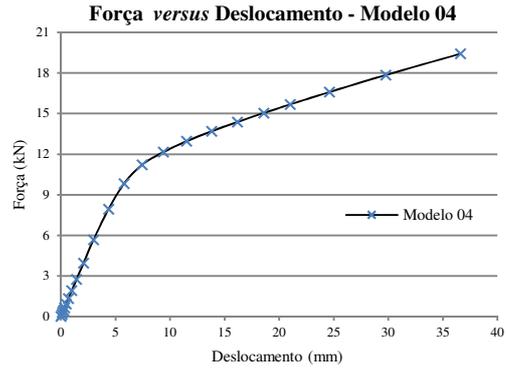
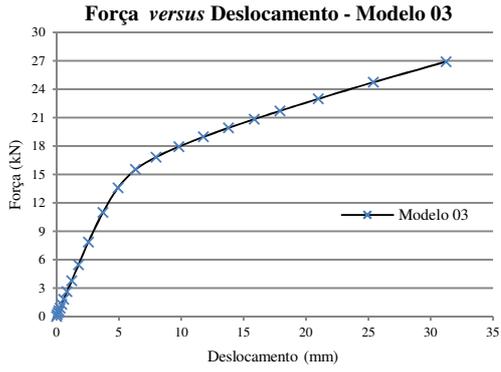
APÊNDICE

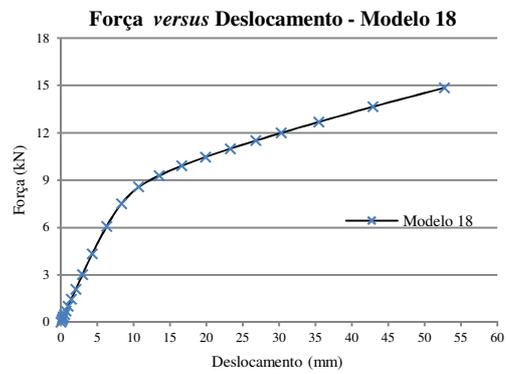
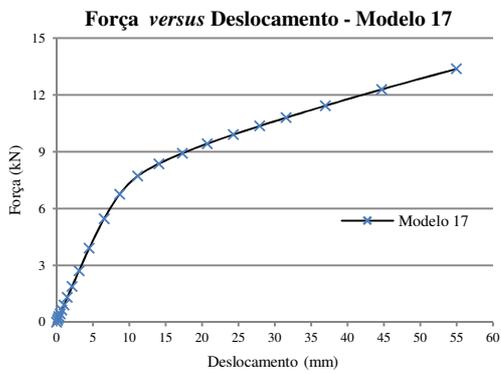
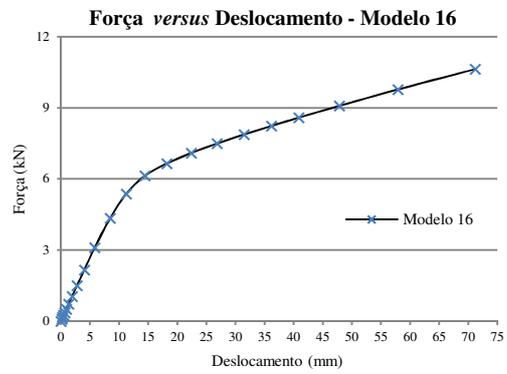
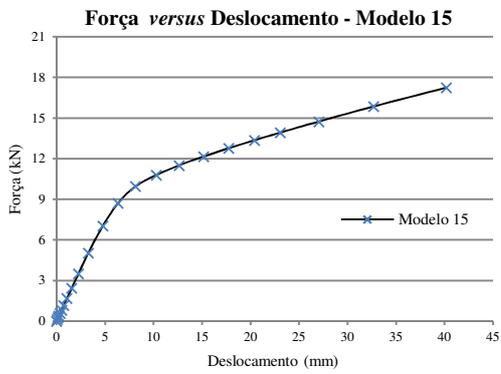
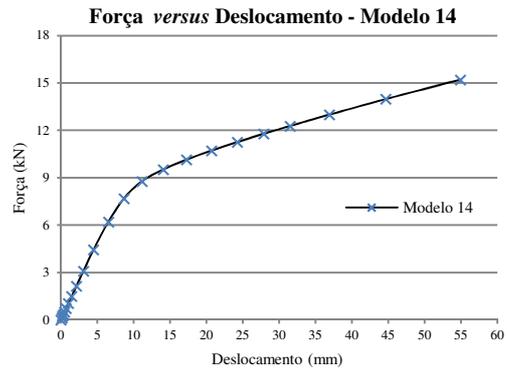
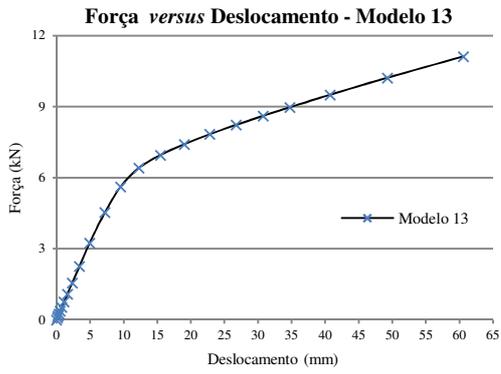
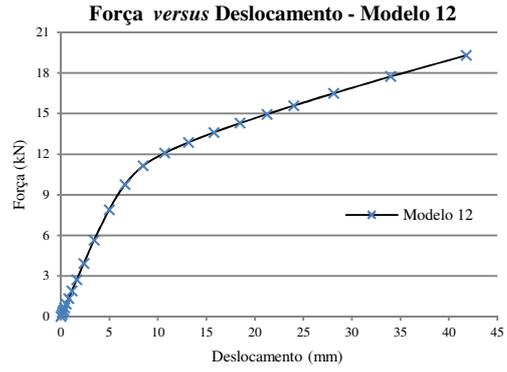
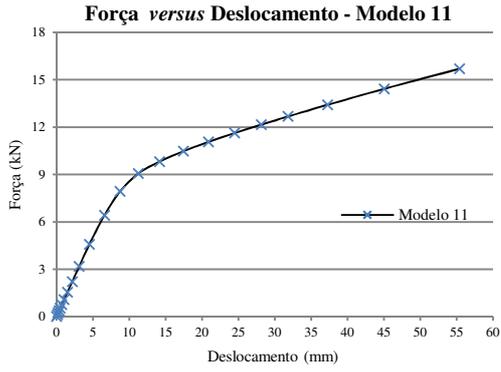
Introdução

Este apêndice apresenta as curvas de Força *versus* Deslocamento dos modelos numéricos analisados neste trabalho.

Painel do tipo A







Painel do tipo B

