

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

**Métodos de avaliação da resistência e transmitância  
térmicas do sistema de fechamento em *Light Steel*  
*Framing***

Ouro Preto, 2014

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

## **Métodos de avaliação da resistência e transmitância térmicas do sistema de fechamento em *Light Steel Framing***

**AUTORA: THASSIANA ARMOND MUZZI**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Henor Artur de Souza

COORIENTADOR: Prof. Dr. Adriano Pinto Gomes

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

Ouro Preto 2014

M994m Muzzi, Thassiana Armond .  
Métodos de avaliação da resistência e transmitância térmicas do sistema de fechamento em Light Steel Framing [manuscrito] / Thassiana Armond Muzzi. - 2014.  
110f.: il.: color; graf; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Henor Artur de Souza.  
Coorientador: Prof. Dr. Adriano Pinto Gomes.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.  
Área de Concentração: Construção Metálica.

I. Simulação numérica. 2. Resistência térmica. 3. Transmitância térmica. I. Souza, Henor Artur de. II. Gomes, Adriano Pinto. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 621.3.036

Catálogo: [www.sisbin.ufop.br](http://www.sisbin.ufop.br)

**MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA E TRANSMITÂNCIA  
TÉRMICAS DO SISTEMA DE FECHAMENTO EM *LIGHT STEEL*  
*FRAMING***

**AUTORA: THASSIANA ARMOND MUZZI**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 12 de dezembro de 2014, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Henor Artur de Souza, D.Sc. – UFOP (Presidente)



Prof. Adriano Pinto Gomes, D.Sc. – IFMG



Prof. Eliana Ferreira Rodrigues, D.Sc. – UFOP



Prof. Arlindo Tribess, D.Sc – USP

*Dedico este trabalho aos meus pais  
e as minhas irmãs.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente a Deus por me dar oportunidades e força para alcançar meus objetivos.

À minha família por sempre estar ao meu lado me apoiando em todos os momentos e sempre torcendo pelo meu sucesso.

Ao Daniel pelo companheirismo e paciência.

Ao meu orientador Prof. Dr. Henor Artur de Souza pela amizade, ensinamentos, apoio e confiança em mim depositados, concedendo-me a oportunidade da realização deste trabalho.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Adriano Pinto Gomes pela amizade e dividir comigo seus estudos e ensinamentos, sendo sempre solícito.

À Prof. Dr. Eliana Ferreira Rodrigues pela gentileza e disponibilidade nas aulas do Ansys.

À Prof. Dr. Rovadavia Ribas pela amizade e auxílio no estágio.

Aos professores do PROPEC pela seriedade e ensinamentos.

A Universidade Federal de Ouro Preto e a CAPES pelo estímulo aos estudos.

Enfim, a todos que de forma direta e indireta fizeram parte da concretização deste trabalho.

## RESUMO

Diante do crescimento populacional e dos avanços tecnológicos, a indústria da construção civil no mundo tem buscado sistemas mais eficientes de construção com o objetivo de aumentar a produtividade, diminuir o desperdício e atender a uma demanda crescente. Nesse aspecto, o uso do aço na construção civil aparece como uma das alternativas para mudar o panorama desse setor. O sistema *Light Steel Framing* (LSF) introduzido no Brasil no final da década de 1990 está passando por um processo de desenvolvimento técnico e de aceitação no mercado da construção civil nacional, mas ainda existem deficiências no projeto, no detalhamento e na execução dos sistemas complementares de fechamento e também no seu desempenho térmico. Tendo em vista esses aspectos, neste trabalho faz-se um estudo dos métodos de cálculo da resistência térmica e transmitância térmica equivalentes para fechamentos em LSF. Esse estudo abrange uma abordagem analítica na qual são apresentados os métodos simplificados de cálculo da resistência e transmitância térmicas e uma abordagem numérica, utilizando o programa computacional ANSYS (versão 15), para a verificação e comparação desses métodos. Pelos resultados obtidos observa-se que dos métodos simplificados de cálculo da resistência e transmitância térmicas apresentados, os métodos dos Planos Isotérmicos e Zona Modificada são aqueles que apresentam a menor diferença no valor, via análise numérica comparada à análise analítica, para os tipos de fechamentos aqui utilizados, ou seja, 9,31 % e 4,20%, respectivamente.

Palavras-chave: Light Steel Framing, Resistência Térmica, Transmitância térmica, Análise analítica, Simulação numérica.

## ABSTRACT

Given the population growth and technological development, the construction industry in the world has sought more efficient building systems in order to increase productivity, reduce waste and meet a growing demand. In this respect, the use of steel in construction appears as an alternative to change the landscape of this sector. The Light Steel Framing system (LSF), introduced in Brazil in the late 1990, is going through a technical development and acceptance process in the domestic construction market, but there are still shortcomings in the design, detailing and implementation of complementary systems of closing and also in their thermal performance. Considering these aspects, this paper makes a study of the thermal resistance and thermal transmittance calculation methods equivalent to closings in LSF. This study covers an analytical approach in which the simplified methods of calculating thermal resistance and transmittance and a numerical simulation are given using the computer program ANSYS (version 15), for the checking and comparison of these methods. From the results it is observed that among the simplified methods of calculating the thermal resistance and transmittance presented, the methods of Isothermal Plans and Modified Zone are those with the smallest difference in value, via numerical analysis compared the analytical analysis, for the types of closings used herein, namely 9.31% and 4.20%, respectively.

**Keywords:** Light Steel Framing, Thermal resistance, Thermal transmittance, Analytical analysis, Numerical simulation.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	III
<b>ABSTRACT</b>	IV
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	VIII
<b>LISTA DE TABELAS</b>	XI
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	1
1.1 Apresentação do Problema	4
1.2 Objetivos	5
1.3 Motivação	5
1.4 Estrutura do Trabalho	6
<b>2 O SISTEMA <i>LIGHT STEEL FRAMING</i></b>	7
2.1 O Sistema Construtivo <i>Light Steel Framing</i>	8
2.1.1 Tipos de perfis utilizados	9
2.1.2 Painéis	11
2.1.3 Lajes	13
2.1.4 Coberturas	15
2.1.5 Fundação	16
2.2 O Fechamento Vertical no Sistema <i>Light Steel Framing</i>	17
2.2.1 Características gerais	17
2.2.2 Painéis de OSB	18
2.2.3 Placas cimentícias	21
2.2.4 Chapas de Gesso Acartonado	22
2.2.5 Sistema <i>Drywall</i>	23
	IX

2.2.6 Alvenaria	23
2.2.7 Isolamento térmico	24
<b>3 MÉTODOS DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DO FECHAMENTO NO SISTEMA <i>LIGHT STEEL FRAMING</i></b>	<b>26</b>
3.1 Métodos de cálculos simplificados	27
3.1.1 Método do Caminho Paralelo	27
3.1.2 Método dos Planos Isotérmicos	28
3.2 Modelos de cálculo simplificados para <i>Light Steel Framing</i>	30
3.2.1 Média dos métodos do Caminho Paralelo e Planos Isotérmicos	30
3.2.2 Norma Dinamarquesa DS418	31
3.2.3 Método do Código Canadense de Energia	32
3.2.4 O Método dos Planos Isotérmicos Modificado	34
3.2.5 Método de Zona Modificado	36
3.5 Resistências de Contato	40
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>43</b>
4.1 Análise analítica	44
4.2 Análise numérica	45
4.2.1 O Programa ANSYS	45
4.2.2 Escolha do tipo de elemento	46
4.2.3 Determinação dos materiais usados para o fechamento	47
4.2.4 Determinação do refinamento da malha	48
4.2.5 Condições de contorno	48
4.3 Calibração da análise numérica adotada	49

<b>5 RESULTADOS</b>	53
5.1 Resultados a partir da análise analítica	53
5.2 Resultados a partir da análise numérica	54
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	60
6.1 Conclusões	60
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	60
<b>REFERÊNCIAS</b>	62
<b>APÊNDICE A</b>	66
<b>APÊNDICE B</b>	84

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

FIGURA 1.1 - Residência sendo construída em <i>Light Steel Framing</i>	2
--	---

### CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1 - Esquema de uma residência em LSF	9
FIGURA 2.2 - Desenho esquemático de painel típico em LSF e seus componentes	11
FIGURA 2.3 - Painel com contraventamento	12
FIGURA 2.4 - Desenho esquemático de painel em LSF com abertura	12
FIGURA 2.5 - Vigas de piso e contrapiso em OSB	13
FIGURA 2.6 - Esquema de uma laje úmida	14
FIGURA 2.7 - Esquema de uma laje seca	14
FIGURA 2.8 - Estrutura do telhado de uma residência em LSF	15
FIGURA 2.9 - Estrutura do telhado com placas de OSB como substrato de apoio	16
FIGURA 2.10 - Esquema geral da ancoragem química com barra roscada	17
FIGURA 2.11 - Fachada com fechamento externo em OSB e placas de OSB impermeabilizadas	18
FIGURA 2.12- Embasamento elevado para evitar contato das placas e painéis com a umidade	20
FIGURA 2.13 - Residência com acabamento em <i>Siding</i> vinílico	20
FIGURA 2.14 - Revestimento das placas de OSB com argamassa aplicada sobre tela de galinheiro	21
FIGURA 2.15 - Desenho esquemático de fechamento de alvenaria de painéis em LSF	24
FIGURA 2.16 - Esquema de fechamento em LSF	24

### **CAPÍTULO 3**

FIGURA 3.1 - Método do Caminho Paralelo	28
FIGURA 3.2 - Método dos Planos Isotérmicos	29
FIGURA 3.3 - Transformação de perfis C ou caixão em um retângulo sólido ideal equivalente	35
FIGURA 3.4 - Comparação dos valores medidos e calculados da resistência usando o Método do Plano Isotérmico Modificado Fonte: adaptado da IISI, 2001	36
FIGURA 3.5 - Parâmetros para o cálculo da resistência térmica no método MZM	37
FIGURA 3.6 - Carta do Fator de zona $Z_f$	39
FIGURA 3.7 - Variação da resistência de contato (apenas em uma face)	41

### **CAPÍTULO 4**

FIGURA 4.1 - Esquema das células dos fechamentos em <i>Light Steel Framing</i>	43
FIGURA 4.2 - Esquema das áreas para o modelo do primeiro fechamento em LSF	47
FIGURA 4.3 - Detalhamento do refinamento da malha no perfil	48
FIGURA 4.4 - Condições de contorno para o fechamento	49
FIGURA 4.5 - Esquema dos fechamentos usados para a calibração do modelo dos elementos finitos	50
FIGURA 4.6 - Representação da área e dos vetores do fluxo de temperatura para o 1° modelo	51
FIGURA 4.7 - Representação da área e dos vetores do fluxo de temperatura para o 2° modelo	51

### **CAPÍTULO 5**

FIGURA 5.1 – Estratificação da temperatura para o fechamento com isolante e ar	54
FIGURA 5.2 – Distribuição do fluxo de calor para fechamento com isolante e ar	55

FIGURA 5.3 – Distribuição do fluxo de calor para fechamento com isolante e ar - detalhe A	56
FIGURA 5.4–Distribuição do fluxo de calor para fechamento com isolante e ar - detalhe B	56
FIGURA 5.5–Estratificação da temperatura para fechamento somente com isolante	57
FIGURA 5.6–Distribuição do fluxo de calor para o fechamento somente com isolante	58
FIGURA 5.7–Distribuição do fluxo de calor para o fechamento somente com isolante – detalhe A	58
FIGURA 5.8–Distribuição do fluxo de calor para o fechamento somente com isolante – detalhe B	58

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2

TABELA 2.1 - Designações dos perfis de aço formados a frio para uso em <i>Light Steel Framing</i> e suas respectivas aplicações	10
TABELA 2.2 - Dimensões nominais usuais de perfis de aço para <i>Light Steel Framing</i>	10
TABELA 2.3 - Espessura mínima das placas de OSB de acordo com espaçamento entre montantes e tipo de revestimento	19
TABELA 2.4 - Relação entre a espessura da placa cimentícia e a aplicação	22

### CAPÍTULO 3

TABELA 3.1 - Resistência térmica superficial interna e externa	29
TABELA 3.2 - Comparação de valores de R medidos com resultados de alguns métodos de cálculo	33
TABELA 3.3 - Fatores de ponderação utilizados no Método do Código Canadense de Energia	34
TABELA 3.4 - Comparação do teste da resistência térmica simulada com e sem resistências de contato incluídas	42

### CAPÍTULO 4

TABELA 4.1 - Espessuras das camadas do fechamento utilizado	44
TABELA 4.3 - Propriedades usadas para a análise térmica para os fechamentos em <i>Light Steel Framing</i>	47

### CAPÍTULO 5

TABELA 5.1 – Resistência térmica, transmitância e fluxo de calor para o fechamento intermediado por material isolante e camada de ar (Figura 4.1)	53
---	----

TABELA 5.2 – Resistência térmica, transmitância e fluxo de calor para o fechamento intermediado somente por material isolante (Figura 4.1)	53
TABELA 5.3 – Erro no valor da resistência térmica equivalente análise analítica versus análise numérica.	59

## 1. INTRODUÇÃO

Diante do crescimento populacional e dos avanços tecnológicos, a indústria da construção civil no mundo tem buscado sistemas de construção mais eficientes com o objetivo de aumentar a produtividade, diminuir o desperdício e atender a uma demanda crescente de déficit habitacional. No Brasil, a construção civil ainda é predominantemente artesanal, caracterizada pela baixa produtividade e principalmente pelo grande desperdício. Porém, o mercado tem sinalizado que essa situação está sendo alterada e que o uso de novas tecnologias é a melhor forma de permitir a industrialização e a racionalização dos processos construtivos. Nesse aspecto, o uso do aço na construção civil apresenta-se como uma das alternativas para mudar o panorama do setor (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012).

O sistema *Light Steel Framing* (LSF) é utilizado intensamente nos Estados Unidos da América (EUA), Inglaterra, Austrália, Japão e Canadá há mais de trinta anos, mas somente no final da década de 90 este sistema foi introduzido no Brasil, quando algumas construtoras começaram a importar kits pré-fabricados dos EUA para montagem de casas residenciais (RODRIGUES, 2006). Com a divulgação e desenvolvimento técnico do sistema pelos setores envolvidos na geração da infraestrutura, o sistema passou a ser empregado em várias tipologias, como habitações de pequeno e grande porte, edifícios de apartamentos, edifícios comerciais, escolas, hospitais e como *retrofit* de edificações existentes (SANTIAGO, 2008).

O sistema construtivo LSF caracteriza-se por perfis de aço galvanizado formados a frio, que constituem um esqueleto estrutural capaz de resistir às cargas que solicitam a edificação e por vários componentes e subsistemas inter-relacionados que possibilitam uma construção industrializada (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012; RODRIGUES, 2006). Os perfis de aço galvanizado são utilizados para compor painéis estruturais ou não-estruturais, vigas de piso, vigas secundárias, tesouras de telhado e demais componentes. Na Figura 1.1, ilustra-se uma edificação residencial sendo construída com esse sistema.

FIGURA 1.1 – Residência sendo construída em *Light Steel Framing*.



Fonte: CRASTO, 2005, p. 8.

Os painéis estruturais são formados por perfis galvanizados de seção U, constituindo guias na base e no topo dos painéis, e por perfis Ue (“U” enrijecido), denominados “montantes”, que são espaçados regularmente entre si de 400 ou 600mm de acordo com a modulação definida no cálculo estrutural. As placas fixadas na estrutura formam os fechamentos internos ou externos. Os demais componentes do LSF são elementos leves e compatíveis com o conceito do sistema, que é a formação de um conjunto com baixo peso próprio.

A utilização do sistema LSF implica em um ganho de tecnologia na construção civil, permitindo o controle rígido dos processos. Por ser um sistema racionalizado, é adequado para produção industrial, contribuindo no projeto de edifícios mais eficientes sob vários aspectos, como em uma construção sustentável, devido à possibilidade de reciclagem dos materiais e racionalização nas perdas de material (CRASTO, 2005; CAMPOS, 2010).

A utilização de sistemas construtivos industrializados também contribui para a concretização dos diversos programas governamentais que buscam suprir o constante crescimento do déficit habitacional. Por meio da produção em larga escala, a utilização do sistema LSF pode atender aos prazos estipulados pelo governo, viabilizando a execução dos projetos (CRASTO, 2005).

A racionalização, industrialização e rapidez de execução, características tão apreciadas na construção em LSF, só são possíveis quando há um planejamento integral da obra, que implica em um projeto amplamente detalhado. O detalhamento dos projetos, tanto de arquitetura, como estrutural ou complementares, são essenciais para o melhor desempenho do sistema e para se evitar patologias (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012). A desarticulação entre projeto e produção é um de seus maiores problemas. A concepção de edificações em LSF demanda uma atenção maior nas interfaces e especificidades de cada projeto para garantir o fornecimento de todos os subsídios necessários à produção, evitando erros e desperdícios (CAMPOS, 2010).

No entanto, ainda existem deficiências no projeto, no detalhamento e na execução dos sistemas complementares de fechamento (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012). Para a melhoria do desempenho do sistema LSF no Brasil é necessário ajustá-lo à cultura e ao clima brasileiro, de forma a atender também as expectativas de viabilidade de custos. Reduzir os custos e aumentar a eficiência do sistema é uma preocupação de todos os países que o utilizam. Segundo Bevilaqua (2005), os esforços para o desenvolvimento do LSF estão divididos em cinco grandes áreas: i) Redução de custos; ii) Treinamento de profissionais; iii) Elaboração de normas específicas para o dimensionamento e desempenho do LSF; iv) Publicações de literaturas técnicas e v) Organizações de entidades de classe voltadas para o LSF.

Este processo de adequação do LSF às condições brasileiras pode ser evidenciado no número crescente de trabalhos recentes como os de Crasto (2005), Bevilaqua (2005), Rodrigues (2006), Gomes (2007), Santiago (2008), Lima (2008), Penna (2009), Campos (2010), Vivan (2011), Santiago, Freitas e Crasto (2012) e Carminatti Júnior (2012) e Gomes (2012) que enfocam na eficiência do sistema, tendo por meta sua melhor utilização no País.

A solução dos problemas decorrentes da racionalização dos processos construtivos no País engloba as avaliações de desempenho. Segundo Von Krüger (2000), os critérios de desempenho expressam as condições quantitativas às quais a edificação, quando submetida a determinadas condições de exposição, deve atender a fim de satisfazer às exigências dos usuários. Nesse sentido, a avaliação do desempenho térmico de edificações em LSF pode contribuir para o aumento da eficiência deste sistema no

Brasil. Por meio de medições *in loco*, avaliações pós-ocupação (APO) e simulações numéricas e analíticas, pode-se determinar quais são os tipos de fechamento mais adequados às condições climáticas do Brasil, diminuindo-se o consumo energético para condicionamento dos ambientes e melhorando as condições de conforto térmico (GOMES, 2012).

## **1.1 – Apresentação do Problema**

Nas construções em LSF, os elementos estruturais podem gerar problemas como transmissão excessiva de calor entre o meio externo e o interno e condensação de umidade na face interna dos painéis de fechamento externo. No sistema LSF o conjunto das almas dos perfis em aço corresponde a menos que 0,5% da área do fechamento. Porém, como a condutividade térmica do aço pode ser 1500 vezes maior que a do material isolante, em condições climáticas rígidas, ignorar os perfis em análises do desempenho térmico de edificações pode levar a uma superestimação da resistência térmica da construção em até 50% (GORGOLEWSKI, 2007).

Nesse sentido, o uso dos métodos simplificados para o cálculo da resistência térmica equivalente dos fechamentos no sistema *Light Steel Framing* (IISI, 2001) e os programas computacionais podem contribuir na busca por edificações eficientes energeticamente, auxiliando na análise do comportamento térmico. Tanto os métodos simplificados e a simulação computacional permitem uma análise de diferentes propostas projetuais, contribuindo como uma ferramenta de projeto.

Segundo Akutsu (1998), os métodos internacionais de avaliação do desempenho térmico de edificações são apoiados em indicadores como a resistência térmica ou condutância térmica dos elementos da edificação. Estes indicadores servem de valores limites, definidos em função do tipo de uso da edificação e das características do clima local. No entanto, como no Brasil as condições predominantes são aquelas em que o conforto térmico deve ser equacionado com as condições de verão, não é correto utilizar como critério de desempenho somente esses indicadores. É necessário considerar as trocas térmicas que ocorrem nos ambientes por meio de uma abordagem dinâmica ao longo do dia.

## 1.2 – Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é estudar os métodos simplificados de cálculo da resistência e da transmitância térmica e fazer uma simulação numérica no programa computacional ANSYS (versão 15) de determinadas células de fechamentos em *Light Steel Framing*. Além disso, o desenvolvimento deste trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Obter os resultados da resistência térmica, transmitância térmica e fluxo de calor por meio da análise analítica para células de fechamentos em LSF;
- b) Obter os resultados da resistência térmica, transmitância térmica e fluxo de calor por meio da análise numérica, pelo software ANSYS 15, para células de fechamentos em LSF;
- c) Analisar os resultados da análise analítica e numérica e compará-los.

## 1.2 – Motivação

O sistema LSF está passando por um processo de desenvolvimento técnico e de aceitação no mercado da construção civil nacional, embora tenha sido implantado no país há mais de 20 anos. Existem deficiências no projeto, no detalhamento e na execução dos sistemas complementares de fechamento.

Além disso, no Brasil, os estudos de desempenho térmico de edificações em LSF ainda são recentes. Não há ainda um consenso quanto à melhor forma de avaliação, método de cálculo para a resistência térmica, transmitância térmica ou para o fluxo de calor.

Diante destas questões, o presente trabalho relaciona uma análise analítica, de acordo com o Instituto Internacional de Ferro e Aço (IISI – *Thermal Performance of Light Steel Frame Housing*) e uma análise numérica usando o programa computacional ANSYS (versão 15), ambos simulando um fechamento típico das construções em LSF no Brasil, com o intuito de compará-los e obter a melhor análise analítica que se adapta às análises de desempenho térmico.

## **1.4 – Estrutura do Trabalho**

Além do presente capítulo, que introduz os temas relacionados ao trabalho e descreve o objetivo e as justificativas para a sua realização, esta dissertação é constituída por mais cinco capítulos.

No Capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica sobre o sistema LSF focando nos trabalhos e publicações da área que embasaram esta pesquisa.

Os métodos simplificados de cálculo para a resistência e transmitância térmica são apresentados no Capítulo 3.

No Capítulo 4 são apresentadas as metodologias adotadas, como a análise analítica e a análise numérica.

Os resultados das análises, analítica e numérica, são apresentadas no Capítulo 5.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para desenvolvimento de pesquisas futuras.

A dissertação é finalizada com as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa e com os Apêndices A e B.

## **2. O SISTEMA *LIGHT STEEL FRAMING***

Historicamente, o *Light Steel Framing* (LSF) possui sua origem nas habitações em madeira construídas pelos colonizadores em território americano no início do século XIX. Na construção dessas habitações foram empregados conceitos da revolução industrial como praticidade, produtividade e velocidade, para atender ao crescimento rápido da população americana (GOMES, 2007).

O método construtivo desenvolvido, denominado *Balloon Framing*, consistia em uma estrutura composta de peças em madeira serrada, de pequena seção transversal, espaçadas regularmente. Posteriormente, as construções em madeira ficaram conhecidas por *Wood Frame*, e tornaram-se a tipologia construtiva residencial mais comum nos Estados Unidos. As estruturas em madeira foram sendo substituídas lenta e gradualmente pelos perfis de aço, impulsionadas pelo grande desenvolvimento da indústria desse setor nos Estados Unidos (SANTIAGO, 2008).

O sistema LSF é difundido internacionalmente por sua qualidade e racionalidade em todo o processo construtivo. Este sistema possibilita uma construção com o mínimo de desperdício de material e com grande rapidez de execução. O sistema LSF começou a ser utilizado no Brasil no final da década de 90, onde as construtoras interessadas no método construtivo começaram a importar kits pré-fabricados dos Estados Unidos para a montagem de residências. Hoje, o mercado nacional é capaz de fornecer todos os insumos necessários para a sua construção (SANTIAGO et al., 2008). A escolha desse sistema por parte dos clientes deve-se, principalmente, à rapidez na execução da obra, ao menor impacto ambiental e à qualidade de execução (CAMPOS, 2010).

De acordo com Santiago, Freitas e Crasto (2012), os principais benefícios e vantagens no uso do sistema LSF em edificações são os seguintes:

- Os produtos que constituem o sistema são padronizados de tecnologia avançada, em que os elementos construtivos são produzidos industrialmente, onde a matéria prima utilizada, os processos de fabricação, suas características técnicas e acabamento passam por rigorosos controles de qualidade;

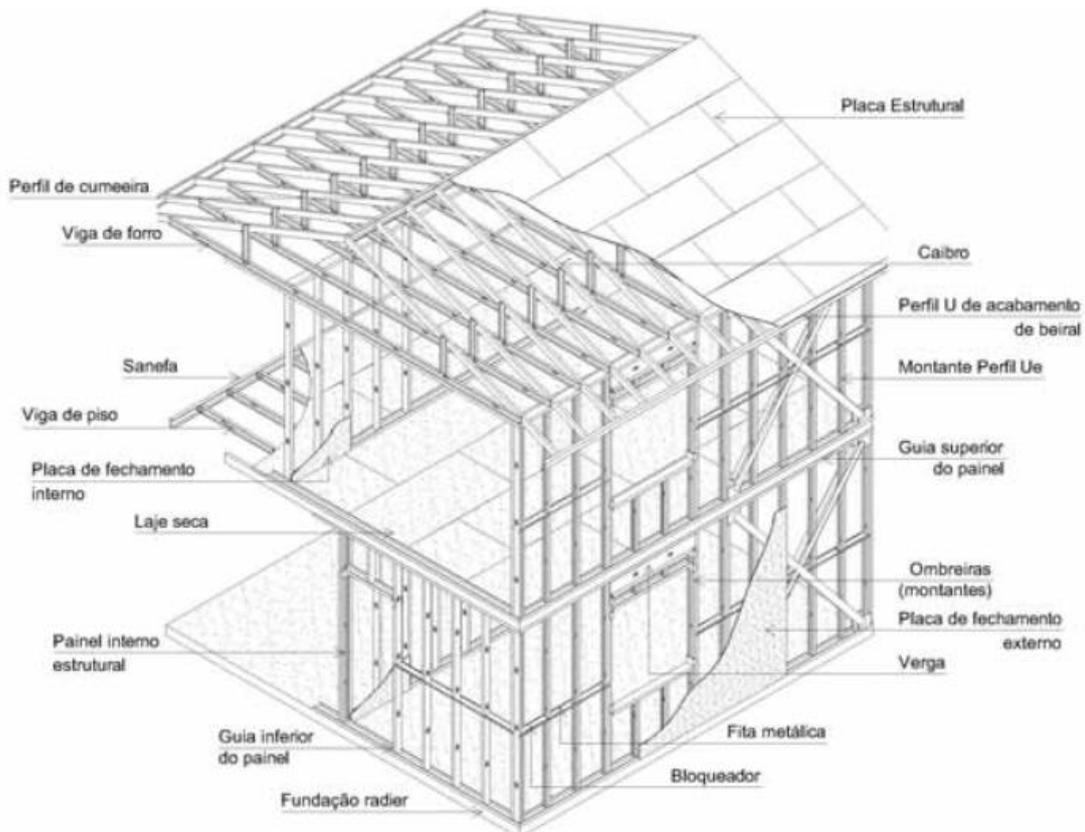
- Facilidade de obtenção dos perfis formados a frio, uma vez que são largamente utilizados pela indústria;
- O aço é um material de comprovada resistência e o alto controle de qualidade, tanto na produção da matéria-prima quanto de seus produtos, permite maior precisão dimensional e melhor desempenho da estrutura;
- Facilidade de montagem, manuseio e transporte devido à leveza dos elementos;
- Durabilidade e longevidade da estrutura, proporcionada pelo processo de galvanização das chapas de fabricação dos perfis;
- Construção a seco, o que minimiza o uso de recursos naturais e o desperdício;
- Os perfis perfurados previamente e a utilização dos painéis de gesso acartonado facilitam as instalações elétricas e hidráulicas;
- Facilidade na execução das ligações;
- Rapidez de construção;
- O aço é um material incombustível e reciclável;
- Grande flexibilidade no projeto arquitetônico.

## **2.1- O Sistema Construtivo *Light Steel Framing***

O sistema construtivo *Light Steel Framing* possui concepção racionalizada e caracteriza-se por perfis de aço galvanizado, formados a frio, constituindo um esqueleto estrutural capaz de resistir às cargas que solicitam a edificação e por vários componentes e subsistemas inter-relacionados que possibilitam uma construção industrializada, com grande rapidez de execução e a seco. Os perfis de aço galvanizado são utilizados para compor painéis estruturais ou não-estruturais, vigas de piso, vigas secundárias, tesouras de telhado e demais componentes (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012).

O LSF, também denominado por sistema autoportante em aço de construção a seco, possui sua estrutura composta de paredes, pisos e cobertura; possibilitando a integridade estrutural da edificação. Na Figura 2.1 apresenta-se o esquema de uma residência em *Light Steel Framing*.

Figura 2.1 – Esquema de uma residência em LSF.



Fonte: SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012, p.14.

### 2.1.1- Tipos de perfis utilizados

Os perfis mais comuns para uso em *Light Steel Framing* possuem seções em formato de “C” ou “U” enrijecido (Ue) para montantes e vigas, “U” como guia da base e no topo de painéis e “Cartola” como ripas (Tabela 2.1).

As dimensões comercializadas no Brasil da alma (bw) dos perfis Ue são 90, 140 e 200 mm. As mesas (bf) podem variar de 35 a 40 mm, dependendo do fabricante e do tipo de perfil (Tabela 2.2). A espessura da chapa varia entre 0,80 até 3,0 mm (NBR 15253: 2005).

TABELA 2.1- Designações dos perfis de aço formados a frio para uso em *Light Steel Framing* e suas respectivas aplicações.

SEÇÃO TRANSVERSAL	SÉRIE Designação NBR 6355:2003	Utilização
	U simples $U\ b_w \times b_f \times t_n$	Guia Ripa Bloqueador Sanefa
	U enrijecido $Ue\ b_w \times b_f \times D \times t_n$	Bloqueador Enrijecedor de alma Montante Verga Viga
	Cartola $Cr\ b_w \times b_f \times D \times t_n$	Ripa
	Cantoneira de abas desiguais $L\ b_{f1} \times b_{f2} \times t_n$	Cantoneira

Fonte: SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012, p.23.

TABELA 2.2 – Dimensões nominais usuais de perfis de aço para *Light Steel Framing*.

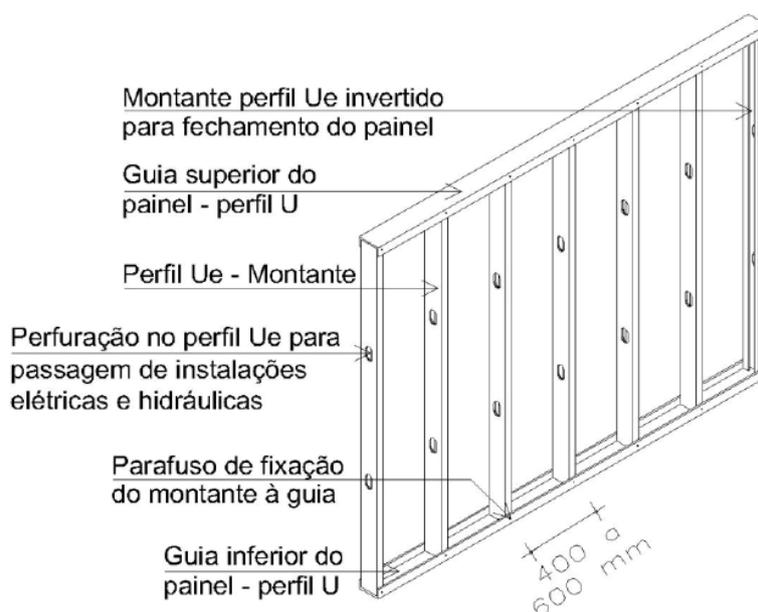
Dimensões (mm)	Designação	Largura da alma $b_w$ (mm)	Largura da mesa $b_f$ (mm)	Largura do enrijecedor de borda D (mm)
Ue 90x40	Montante	90	40	12
Ue 140x40	Montante	140	40	12
Ue 200x40	Montante	200	40	12
Ue 250x40	Montante	250	40	12
Ue 300x40	Montante	300	40	12
U 90x40	Guia	92	38	-
U 140x40	Guia	142	38	-
U 200x40	Guia	202	38	-
U 250x40	Guia	252	38	-
U 300x40	Guia	302	38	-
L 150x40	Cantoneira de abas desiguais	150	40	-
L 200x40	Cantoneira de abas desiguais	200	40	-
L 250x40	Cantoneira de abas desiguais	250	40	-
C 20x30	Cartola	30	20	12

Fonte: SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012, p.24.

### 2.1.2 – Painéis

Os painéis estruturais ou não estruturais têm a função de absorver e distribuir uniformemente as cargas, transmitindo-as à fundação. Esses painéis são constituídos por vários perfis galvanizados, de seções transversais Ue, denominados *montantes*, espaçados regularmente entre si de acordo com a modulação definida no cálculo estrutural, variando entre 400 e 600 mm (Figura 2.2). Essa modulação visa otimizar os custos e mão-de-obra. Os materiais complementares industrializados são enquadrados na modulação, permitindo o controle de utilização e a minimização de desperdício dos fechamentos (JARDIM; CAMPOS, 2005).

Figura 2.2 - Desenho esquemático de painel típico em LSF e seus componentes.



Fonte: SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012, p.33.

Os montantes que compõem os painéis transferem as cargas verticais por contato direto através de suas almas, estando suas seções em coincidência de um nível a outro, dando origem ao conceito de estrutura alinhada. Eles são unidos em seus extremos inferiores e superiores pelas *guias* (seção transversal tipo U simples), constituindo um quadro estrutural (CRASTO, 2005).

Para resistir aos esforços horizontais que solicitam a estrutura, os montantes devem ser estabilizados por meio do *contraventamento* em “X” ou por meio de placas estruturais de fechamento funcionando como diafragma rígido (Figura 2.3). Os painéis que

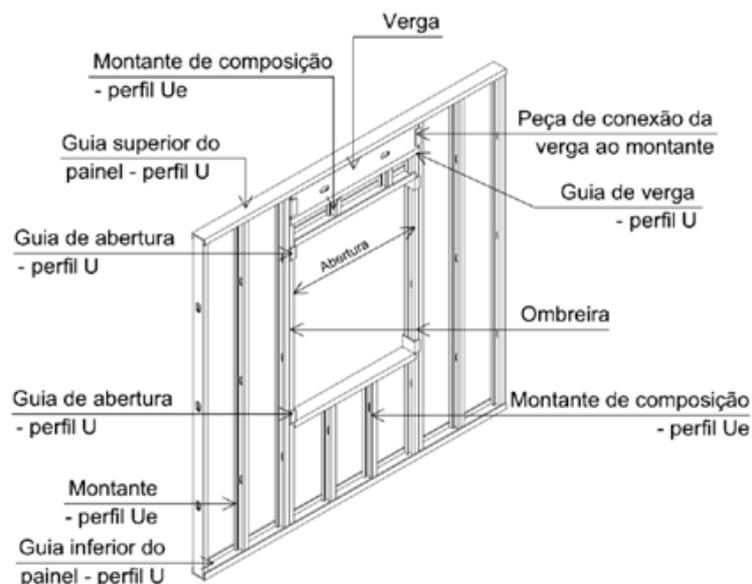
possuem aberturas como portas e janelas necessitam de reforços estruturais como vergas para redistribuir o carregamento dos montantes interrompidos aos montantes que delimitam lateralmente o vão (Figura 2.4). Esses painéis podem executados em fábricas, garantindo boa produtividade, qualidade e melhores condições de trabalho. Mas, pode-se também executar os painéis no canteiro de obras (GOMES, 2007).

Figura 2.3 – Painel com contraventamento.



Fonte: CRASTO, 2005, p.49.

Figura 2.4 - Desenho esquemático de painel em LSF com abertura.

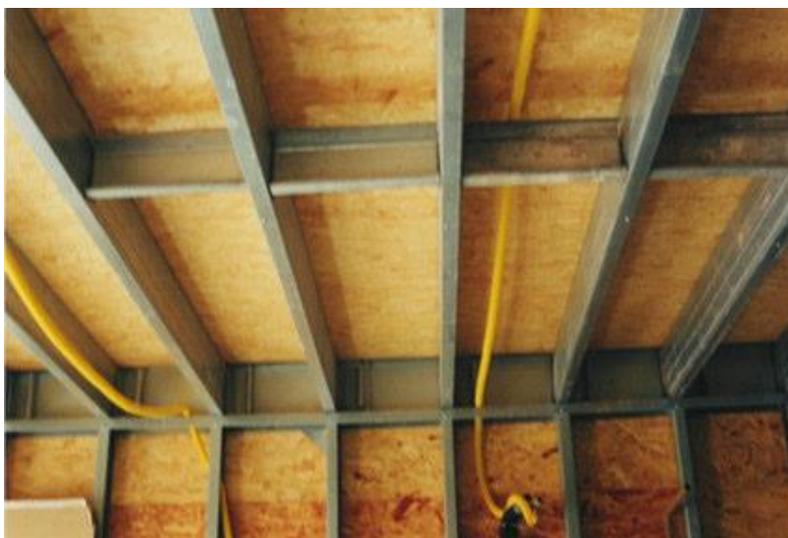


Fonte: SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012, p.37.

### 2.1.3 – Lajes

A estrutura de piso em *Light Steel Framing* possui a mesma modulação e princípios estruturais dos painéis. Os perfis galvanizados, denominados *vigas de piso*, possuem seções transversais Ue e são dispostos na horizontal, servindo de apoio a superfície do contrapiso (Figura 2.5). Dentro do conceito de estrutura alinhada, as almas das vigas de piso são apoiadas em coincidência com as almas dos montantes, garantido o predomínio de esforços axiais nos elementos da estrutura (SANTIAGO, FREITAS E CRASTO, 2012).

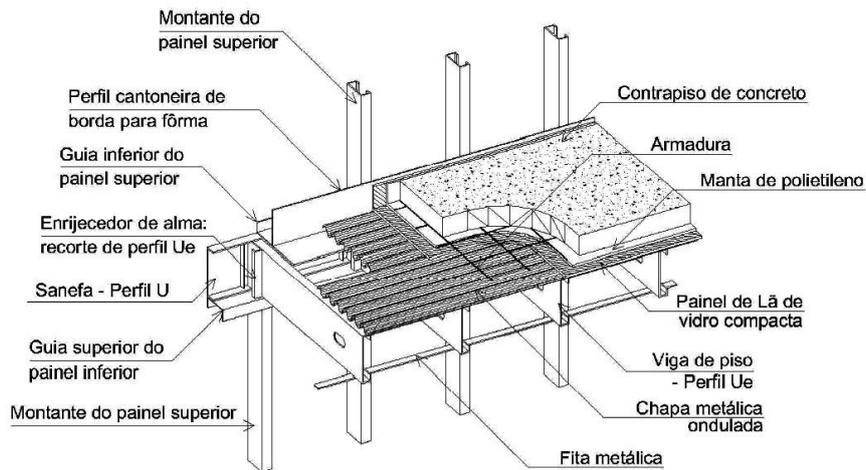
Figura 2.5 – Vigas de piso e contrapiso em OSB.



Fonte: CRASTO, 2005, p. 14.

De acordo com a natureza do contrapiso, a laje pode ser do tipo úmida, ou do tipo seca. A laje úmida é composta basicamente por uma chapa ondulada de aço que serve de fôrma para o concreto e é aparafusada às vigas de piso, e uma camada de 4 a 6 cm de concreto simples que formará a superfície do contrapiso. Entre a fôrma metálica e o concreto, emprega-se um material de isolamento acústico como painéis de lã de vidro compacta protegido por um filme de polietileno, uma vez que o concreto não está plenamente aderido à fôrma metálica, podendo produzir ruídos na utilização normal do piso. Na Figura 2.6 apresenta-se o esquema de uma laje úmida.

Figura 2.6 – Esquema de uma laje úmida.

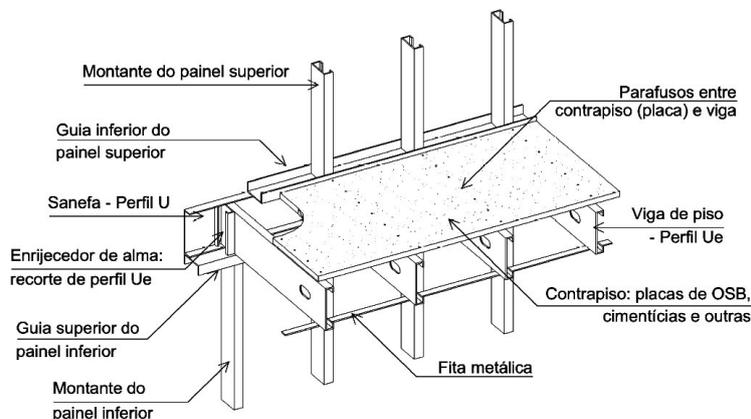


Fonte: SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012, p.55.

A laje seca é composta por placas rígidas de OSB (*Oriented StrandBoard*) ou placas cimentícias aparafusadas a estrutura do piso, servindo como contrapiso. A placa de OSB mais utilizada é a de 18 mm, podendo desempenhar a função de diafragma horizontal. Em áreas molhadas como banheiros, cozinhas, áreas de serviço e outras, o uso da placa cimentícia é mais recomendado por sua resistência à umidade.

Para se reduzir o nível de ruído entre um pavimento e outro, que pode ser gerado na utilização normal do piso, emprega-se lã de vidro entre as vigas e manta de polietileno expandido entre o contrapiso e a estrutura. Dentre as vantagens no uso da laje seca, destaca-se a menor carga por peso próprio e a construção a seco, sem a necessidade da água na obra. Na Figura 2.7 apresenta-se o esquema de uma laje seca.

Figura 2.7 – Esquema de uma laje seca.



Fonte: SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012, p.56.

Normalmente para o vigeamento de piso em aplicações residenciais os vãos recomendados são de até 4,0 m, para o uso de perfis Ue com altura da alma de 200 mm, mesa de 40 mm e espessura de 0,95 mm. Para vãos maiores, pode-se utilizar uma viga principal, que é feita a partir da combinação de dois ou mais perfis (SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012).

#### 2.1.4 – Coberturas

Como ocorre nas construções convencionais, o sistema *Light Steel Framing* possibilita a realização dos mais variados projetos de cobertura. Para coberturas inclinadas, a estrutura em LSF segue o mesmo princípio estrutural dos telhados convencionais em madeira, podendo portanto, ser calculada para suportar telhas cerâmicas, metálicas, de cimento reforçado por fios sintéticos ou de concreto. Apresenta-se na Figura 2.8 a estrutura do telhado de uma residência em LSF.

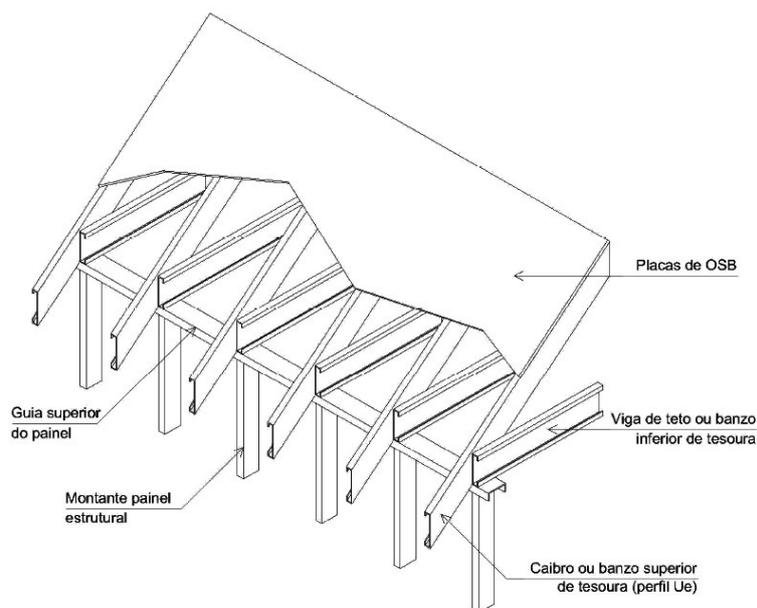
Figura 2.8 - Estrutura do telhado de uma residência em LSF.



Fonte: CRASTO, 2005, p. 15.

Para os telhados inclinados em *Light Steel Framing* com telhas cerâmicas é necessário o uso do OSB (protegido com uma manta de impermeabilização) como substrato de apoio (Figura 2.9). Sobre o OSB, são colocados os perfis tipo cartola paralelos aos caibros para possibilitar o escoamento da água, e sobre estes são fixadas as ripas para o encaixe das telhas (GOMES, 2007).

Figura 2.9 - Estrutura do telhado com placas de OSB como substrato de apoio.



Fonte: SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012, p.65.

De acordo com Jardim e Campos (2005), quando o projeto arquitetônico permitir, devem-se dividir as sobrecargas da cobertura em uma direção e as do piso abaixo em outra para não concentrar o carregamento em apenas uma das paredes. A solução ideal é conduzir as cargas da cobertura diretamente até a fundação utilizando os montantes.

### 2.1.5 – Fundação

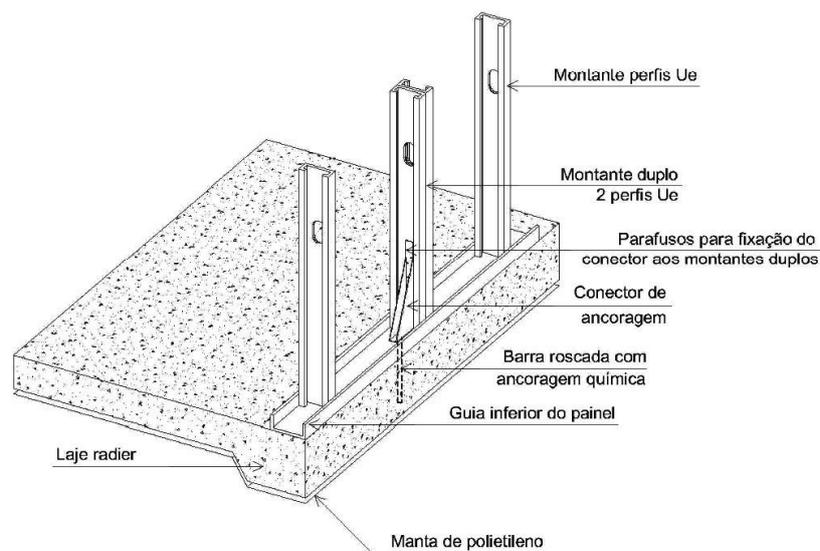
Estruturas de *Light Steel Framing* e os componentes de fechamento, por serem muito leves, exigem bem menos da fundação do que outras construções. Uma vez que a estrutura distribui as cargas uniformemente ao longo dos painéis estruturais, a fundação deverá ser contínua suportando os painéis em toda a sua extensão.

A escolha do tipo de fundação depende da topografia, do tipo de solo, do nível do lençol freático e da profundidade de solo firme. Essas informações são obtidas por meio da sondagem do terreno. As fundações são efetuadas segundo o processo da construção convencional e como em qualquer outra construção deve-se observar o isolamento contra a umidade e também deve ser bem projetada e executada para possibilitar maior precisão na montagem da estrutura e dos demais componentes do sistema.

Sempre que o tipo de terreno permitir a fundação mais comumente utilizada para construções em *Light Steel framing* é a laje *radier*, que consiste em uma fundação rasa que funciona como uma laje, transmitindo as cargas da estrutura para o terreno. O *radier* é composto basicamente pela laje contínua de concreto e as vigas no perímetro da laje sob as paredes estruturais ou colunas, e onde mais for necessário fornecer rigidez no plano da fundação.

Por meio do cálculo estrutural define-se o tipo de ancoragem de um fechamento estrutural à laje *radier*, suas dimensões e os espaçamentos. A ancoragem química com barra rosca é a mais comum, sendo colocada depois da concretagem da fundação. A fixação à estrutura se dá por meio de uma peça em aço que é conectada à barra rosca e à guia e aparafusada ao montante geralmente duplo. Na Figura 2.10 apresenta-se a fixação do painel à fundação.

Figura 2.10 – Esquema geral da ancoragem química com barra rosca.



Fonte: SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012, p.28.

## 2.2- O Fechamento Vertical no Sistema *Light Steel Framing*

### 2.2.1 Características gerais

No sistema LSF, os fechamentos verticais externos e internos são formados pelos perfis estruturais de aço galvanizado associados a componentes, geralmente em placas posicionadas externamente a estrutura. Os componentes de fechamento, compatíveis

com o conceito estrutural do sistema, devem ser constituídos por elementos leves, formando um conjunto de baixo peso próprio. Os fechamentos verticais empregados devem, preferencialmente, ser parte de um sistema racionalizado que propicie uma construção rápida e a seco. Os componentes usados devem atender aos critérios de adaptabilidade ao uso, segurança estrutural, resistência e reação ao fogo, estanqueidade à água, conforto termoacústico, durabilidade, estética, higiene e economia.

No Brasil, os produtos disponíveis para o fechamento de construções em *Light Steel Framing* são fornecidos em placas ou chapas, com várias espessuras e os mais utilizados são o OSB (Oriented Strand Board), a placa cimentícia e o gesso acartonado, este último, só deve ser usado em aplicações internas.

### 2.2.2 Painéis de OSB

As placas de OSB são constituídas por tiras de madeira de reflorestamento orientadas em três camadas perpendiculares, que aumentam sua resistência mecânica e rigidez, unidas com resinas e prensadas sob alta temperatura (MASISA, 2003). As placas de OSB podem ser usadas como fechamento da face interna e externa dos painéis, em forros, pisos e como substrato para cobertura do telhado. O OSB é mais utilizado como fechamento externo com acabamento impermeável devido a suas características (Figura 2.11).

Figura 2.11 - Fachada com fechamento externo em OSB e placas de OSB impermeabilizadas.



Fonte: CRASTO, 2005, p. 127 e 128.

As chapas de OSB são comercializadas nas dimensões de 1,22 m x 2,44 m com espessuras que variam entre 9, 12, 15 e 18 mm. A espessura das chapas é determinada

pelo tipo de acabamento (argamassa ou *siding*), espaçamento entre montantes e função estrutural (se trabalha como diafragma rígido) (Tabela 2.3). As placas podem ser transportadas manualmente e são fixadas por meio de parafusos autobrocantes e autoatarraxantes específicos aos perfis galvanizados, de forma semelhante ao método de fixação do gesso acartonado no sistema *drywall* (GOMES, 2007).

Tabela 2.3 – Espessura mínima das placas de OSB de acordo com espaçamento entre montantes e tipo de revestimento.

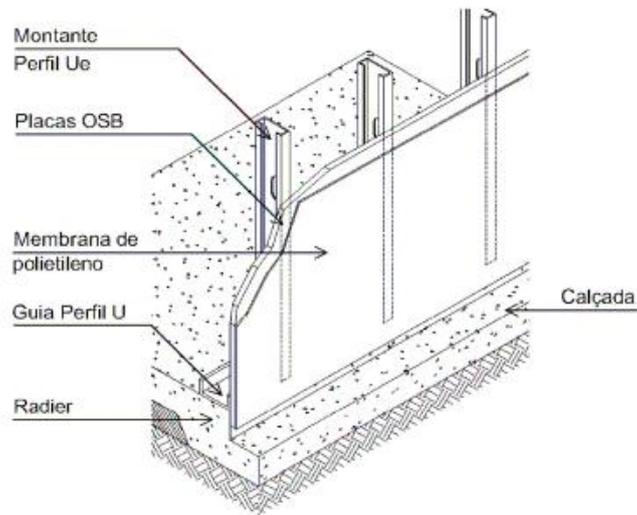
<b>OSB com revestimento leve tipo Siding vinílico</b>		
<b>Aplicação</b>	<b>Espaçamento máximo entre montantes</b>	<b>Espessura mínima</b>
Horizontal	400 mm	9 mm
	600 mm	9 mm
Vertical	400 mm	12 mm
	600 mm	12 mm
<b>OSB com revestimento tipo argamassa</b>		
<b>Aplicação</b>	<b>Espaçamento máximo entre montantes</b>	<b>Espessura mínima</b>
Horizontal	400 mm	12 mm
	600 mm	12 mm
Vertical	400 mm	12 mm
	600 mm	15 mm

Fonte: CRASTO, 2005, p. 126.

Segundo Santiago, Freitas e Crasto (2012) deve-se prever juntas de dilatação entre as placas de fechamento externo e proteção contra a umidade e a água por meio de uma manta ou membrana de polietileno de alta densidade (*Tyvek*), que reveste toda a área externa das placas. Esta manta garante a estanqueidade das paredes e evita a condensação no interior dos painéis, permitindo a passagem da umidade da parte interna do fechamento para o exterior.

Os painéis internos e externos não devem estar em contato direto com a fundação ou solo. Na base dos painéis antes da montagem deve ser fixada uma fita seladora e deve ser feito um embasamento elevado para evitar o contato das placas com a umidade, como se mostra na figura a 2.12.

Figura 2.12- Embasamento elevado para evitar contato das placas e painéis com a umidade.



Fonte: SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012, p.80.

Para a fachada final pode ser adotado o *siding*, que é composto de placas paralelas, podendo ser de vinílico (feito de PVC), de madeira ou cimentício. O *siding* vinílico possui o melhor desempenho e concepção de execução mais industrializada, sendo de fácil aplicação e não necessita de muitos cuidados de manutenção, pode ser pintado e sua limpeza pode ser feita com água e sabão. Esse revestimento é fornecido no mercado em painéis compostos por régua duplas com 5,0m de comprimento e 25,0 cm de largura, com texturas que imitam a madeira e na cor branca (Figura 2.13).

Figura 2.13 – Residência com acabamento em *Siding* vinílico.



Fonte: CASTRO, 2006, p. 77.

O método mais indicado para o uso da argamassa revestindo as placas de OSB consiste em aplicar a argamassa sobre a tela de galinheiro ou tela plástica resistente à alcalinidade. Para garantir a aderência da argamassa e evitar patologias, a tela deve estar disposta em duas camadas e fixada com grampos sobre a superfície do OSB impermeabilizada com a membrana de polietileno. A argamassa deve ser aplicada uniformemente, cobrindo toda a tela (CRASTO, 2005). Na Figura 2.14 apresenta-se o revestimento das placas de OSB com argamassa aplicada sobre tela de galinheiro.

Figura 2.14 - Revestimento das placas de OSB com argamassa aplicada sobre tela de galinheiro.



Fonte: CRASTO, 2005, p. 135.

### 2.2.3 Placas cimentícias

As placas cimentícias são utilizadas como fechamento externo ou interno dos painéis, principalmente em áreas molhadas ou expostas a intempéries. Essas placas são compostas basicamente por uma mistura de cimento *Portland*, fibras de celulose ou sintéticas e agregados. Para uso em pisos é necessário um substrato de apoio para proporcionar às placas cimentícias resistência à flexão.

As principais características da placa cimentícia, são a grande resistência a impactos que possibilita seu uso em fechamentos externos, a resistência à umidade, incombustíveis, podem ser curvadas depois de saturadas, tem baixo peso próprio, compatível com a maioria dos acabamentos ou revestimentos, são cortadas com facilidade com ferramentas com superfície de ataque de metal duro e a rapidez de execução.

No *Light Steel Framing*, as chapas utilizadas são comercializadas nas dimensões que possuem largura fixa de 1,20 m e comprimentos que variam de 2,00 m, 2,40 m e 3,00 m; com espessuras de 6, 8 e 10 mm. A espessura das chapas é determinada conforme a aplicação. Na Tabela 2.4 apresenta-se a relação entre a espessura da placa cimentícia e a aplicação.

Tabela 2.4 - Relação entre a espessura da placa cimentícia e a aplicação.

Espessura	Comprimento	Largura	Peso da Placa	Peso p/ m <sup>2</sup>	Aplicações
6 mm	2,00 m	1,20 m	24,4 kg	10,2 kg	Divisórias leves, forros, dutos de ar-condicionado.
	2,40 m	1,20 m	29,4 kg	10,2 kg	
	3,00 m	1,20 m	36,7 kg	10,2 kg	
8mm	2,00 m	1,20 m	32,6 kg	13,6 kg	Paredes internas em áreas secas e úmidas, revestimentos de paredes comuns ou em subsolos.
	2,40 m	1,20 m	39,2 kg	13,6 kg	
	3,00 m	1,20 m	49,0 kg	13,6 kg	
10 mm	2,00 m	1,20 m	40,8 kg	17,0 kg	Utilizadas para áreas secas e úmidas, internas e externas. Ideais no fechamento externo em sistemas steel ou wood framing e isolamentos termoacústicos.
	2,40 m	1,20 m	49,0 kg	17,0 kg	
	3,00 m	1,20 m	61,2 kg	17,0 kg	

Fonte: BRASILIT, 2014.

As patologias de maior ocorrência nas placas cimentícias são as fissurações no corpo da chapa e trincas em juntas e revestimentos. Assim, deve-se levar em consideração a variação dimensional das placas devido à temperatura e umidade do ambiente e a natureza dos acabamentos na especificação do tipo de junta. Em paredes externas, recomenda-se revestir a face exposta com uma demão de selador de base acrílica. Paredes das áreas de box, pias de cozinha e tanques também devem receber impermeabilização. O assentamento de peças cerâmicas pode ser feito com argamassa colante, porém flexível.

#### 2.2.4 Chapas de Gesso Acartonado

As chapas de gesso acartonado são aplicadas no sistema *Light Steel Framing* como fechamento vertical da face interna dos painéis estruturais e não-estruturais que constituem o invólucro da edificação, e também como fechamento das divisórias internas. Essas são fabricadas industrialmente e são compostas por uma mistura de água, gesso e aditivos, revestida em ambos os lados com lâmina de cartão dando ao gesso a resistência à tração e flexão. As chapas de gesso possuem espessuras de 9,5; 12,5 e 15 mm, largura de 1,20 m e comprimentos que variam de 1,8 a 3,6 m.

No Brasil são oferecidos três tipos de placas, a placa Standard (ST) para aplicação em paredes destinadas a áreas secas, a placa Resistente à Umidade (RU), também conhecida como placa verde, para paredes destinadas a ambientes sujeitos à ação da umidade, por tempo limitado de forma intermitente e a placa Resistente ao Fogo (RF), conhecida como placa rosa, para aplicação em áreas secas, em paredes com exigências especiais de resistência ao fogo.

Os painéis de gesso acartonado devem ser montados após a elaboração do projeto arquitetônico e complementar, pois como se trata de um sistema industrializado, não permite improvisação durante a obra (GOMES, 2007).

#### 2.2.5 Sistema *Drywall*

Quando as divisórias internas não são estruturais, pode-se empregar o *Drywall*. O sistema *Drywall* é constituído por perfis U e U enrijecido (Ue) de aço galvanizado de dimensões menores que os empregados no sistema Light Steel Framing, pois apenas suportam o peso dos fechamentos e revestimentos, e de peças fixadas em sua estrutura. Assim como nos painéis do sistema LSF, o espaçamento entre os montantes pode ser de 400 ou 600 mm de acordo com as solicitações exercidas pelas placas de fechamento, revestimentos e peças fixadas ao painel. De acordo com Jardim e Campos (2005), sobre as placas de gesso internas podem ser aplicados revestimentos usuais como cerâmica, pintura e textura; nas externas, materiais de acabamento usuais como pastilhas, pedras, reboco e pintura.

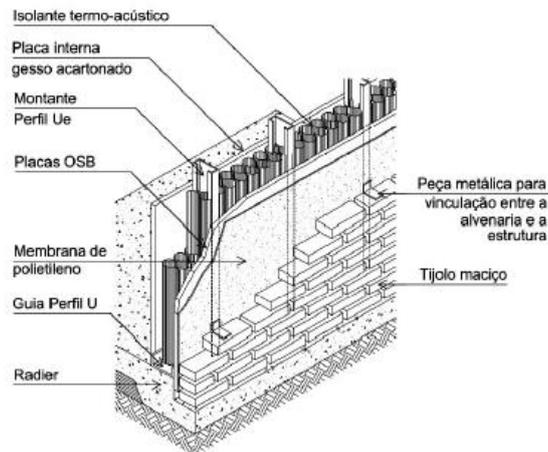
#### 2.2.6 Alvenaria

Quando utilizada nas construções em LSF, a alvenaria é um fechamento independente da estrutura, funcionando como um invólucro vinculado a ela por meio de conectores metálicos. As cargas verticais da parede de alvenaria são transferidas diretamente para as fundações.

Como ocorre com os outros materiais de fechamento, é necessária a impermeabilização da estrutura para garantir a estanqueidade dos painéis. Deve-se planejar a racionalização

na execução da parede de alvenaria, uma vez que se trata de um sistema artesanal, diferente do conceito do LSF. Na Figura 2.15 apresenta-se o desenho esquemático de fechamento de alvenaria de painéis em LSF.

Figura 2.15 - Desenho esquemático de fechamento de alvenaria de painéis em LSF.

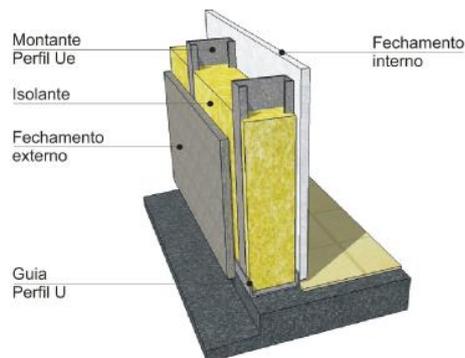


Fonte: SANTIAGO; FREITAS; CRASTO, 2012, p.84.

### 2.2.7 Isolamento térmico

O objetivo principal do isolamento térmico em um edifício é controlar as perdas de calor no inverno e os ganhos de calor no verão. Nas construções em *Light Steel Framing* o isolamento térmico baseia-se no conceito de *isolação multicamada*, que consiste em combinar placas leves de fechamento, deixando um espaço a ser preenchido com material isolante (lã de vidro ou lã mineral). Na figura 2.16 apresenta-se um esquema de fechamento em LSF.

Figura 2.16 - Esquema de fechamento em LSF.



Fonte: GOMES, 2012, p.2

Em um fechamento industrializado constituído por várias camadas, a resistência total do fechamento, desconsiderando a estrutura em aço, é igual à soma das resistências de cada uma de suas camadas. O isolamento térmico será maior, quanto mais materiais em forma de camada for agregada à espessura do fechamento. Assim, o poder de amortecimento da onda de calor também se intensifica, aumentando a capacidade térmica do conjunto. A eficiência do fechamento dependerá das propriedades termofísicas dos componentes (GOMES, 2007).

Para países de clima temperado, no isolamento térmico da edificação, é considerada a capacidade dos perfis estruturais (que são altamente condutores) de produzir *pontes térmicas* em determinadas condições de temperatura. Nesses países são pesquisados painéis de grande capacidade de isolamento térmico, como painéis de EIFS (*Exterior Insulation and Finish System*) que contém EPS (poliestireno expandido) em uma de suas camadas, além do isolamento dentro do painel.

Porém, no clima quente e úmido, como no do Brasil, o efeito das *pontes térmicas* não tem grande efeito nas edificações naturalmente ventiladas, quanto no clima temperado, sendo pequena a perda de calor pelos perfis estruturais no sistema construtivo em *Light Steel Framing*. Por outro lado, para edificações condicionadas artificialmente mostrou que, ao se aumentar a diferença de temperatura entre o interior e o exterior da edificação os efeitos das *pontes térmicas* nos painéis foram mais significativos (GOMES, 2012).

### 3. MÉTODOS DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DO FECHAMENTO NO SISTEMA *LIGHT STEEL FRAMING*

Neste capítulo são apresentados alguns métodos simplificados para o cálculo da resistência térmica equivalente dos fechamentos no sistema *Light Steel Framing* (IISI, 2001). Estes métodos são frequentemente usados para demonstrar a conformidade com as exigências das normas em países como Austrália, Canadá, EUA e Nova Zelândia.

A resistência ao fluxo de calor por condução de calor através da envoltória (fechamento externo) de um edifício é usualmente quantificada pela transmitância térmica (U) ou resistência térmica (R). Estes valores podem ser medidos experimentalmente, por meio do teste de caixa quente, para uma determinada configuração de construção; realizados em conformidade com as normas ISO 8990 (1994) ou ASTM C236 (1993). Entretanto, estes testes são demorados e de elevado custo. Como alternativa, podem ser feitas análises via simulação numérica usando programas de modelagem em diferenças finitas bi ou tridimensionais. Resultados obtidos a partir de medições e cálculos utilizando o teste da caixa quente e também usando modelagem numérica em diferenças finitas foram realizados simultaneamente e mostraram boa concordância entre os valores medidos e os valores simulados (IISI, 2001). Tais modelos computacionais estão se tornando cada vez mais disponíveis, mas requerem um conhecimento especializado do programa computacional e o treinamento para o seu uso é demorado.

Desse modo, foram desenvolvidos alguns métodos simplificados para o cálculo da transmitância térmica para fechamentos em *Light Steel Framing*. Os resultados desses métodos são frequentemente comparados com os resultados obtidos experimentalmente e, na maioria das vezes, apresentam boa precisão. Nos métodos simplificados, a resistência térmica de qualquer camada homogênea uniforme é calculada por:

$$\text{Resistência térmica da camada} = R_x = \frac{d}{k} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (3.1)$$

onde k é a condutividade térmica do material (W/m.K) e d é a espessura da camada (m).

Para fechamentos sem multicamadas, a resistência térmica é simplesmente determinada pela soma individual de todas as resistências de cada camada, como a seguir:

$$R_{\text{total}}=R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_{se} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (3.2)$$

A resistência térmica ao fluxo de calor das superfícies internas e externas,  $R_{si}$  e  $R_{se}$ , respectivamente, deve ser incluída para determinar a resistência total. A transmitância térmica total ( $U$ ), de ambiente a ambiente, é calculada pela equação (3.3).

$$U = \frac{1}{R_t} \quad (\text{W/m}^2\text{K}) \quad (3.3)$$

Este procedimento será preciso se o sistema de fechamento real for meramente um conjunto de camadas homogêneas. Entretanto, muitos fechamentos ou estruturas são mais complexos e muitas vezes contêm camadas que não consistem em um material homogêneo. Por exemplo, em estruturas de *Light Steel Framing*, os montantes são muitas vezes intercalados com isolamento preenchendo toda a cavidade. Outros exemplos incluem camadas de ar entre argamassa e blocos de construção de alvenaria.

No sistema *Light Steel Framing*, o espaço entre os elementos estruturais de aço são frequentemente preenchidos com material isolante. Juntos, estes elementos formam uma camada composta. Embora o esqueleto de aço normalmente corresponda menos que 0,5% da área do fechamento, o aço tem uma condutividade térmica a qual pode ser 1.500 vezes maior do que àquela do material isolante. Tem sido demonstrado que ignorar o efeito do aço dentro desta camada pode levar a uma superestimação da resistência térmica da construção em até 50%, dependendo dos detalhes construtivos (IISI, 2001).

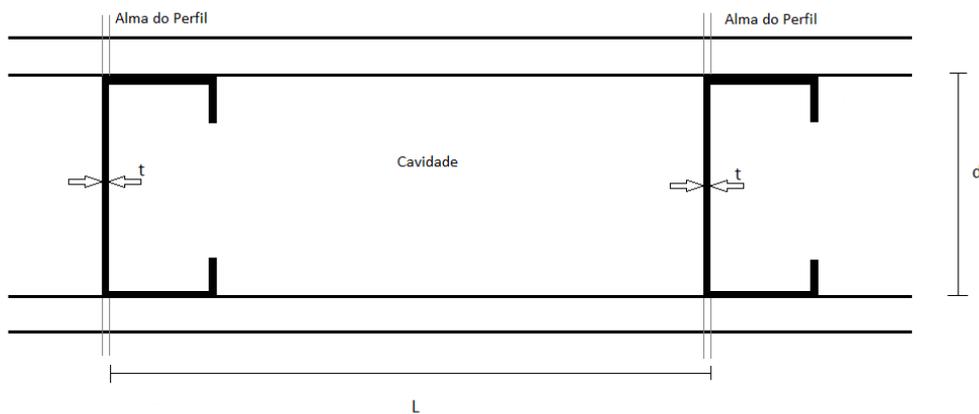
### 3.1. Métodos de cálculo simplificados

Várias discussões ocorreram sobre os métodos simplificados para que o cálculo da transmitância térmica e da resistência térmica possa levar em conta os efeitos das camadas não homogêneas e de pontes térmicas (IISI, 2001). Geralmente, dois métodos têm sido propostos, como mostrados a seguir:

### 3.1.1. Método do Caminho Paralelo

O método do caminho paralelo (ASHRAE, 2013) assume um fluxo de calor unidimensional perpendicular à face do elemento, ou seja, que o fluxo de calor através da ponte térmica é paralelo ao fluxo de calor através do material isolante e não ocorre distribuição de calor lateral entre o material estrutural e o material isolante (Figura 3.1). Assim, é calculada a resistência térmica através dos elementos estruturais e da cavidade. Estas resistências são então ponderadas em função das respectivas áreas em relação à área total, (Eq. 3.4), dependendo da proporção do material estrutural em relação a uma camada homogênea.

Figura 3.1- Método do Caminho Paralelo.



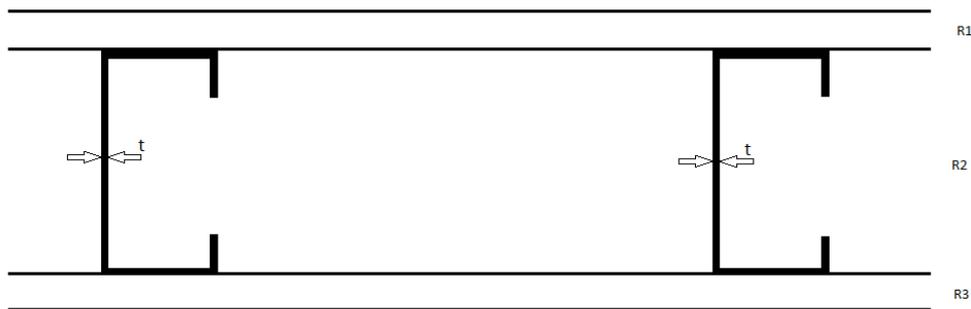
$$R_{\text{caminho paralelo}} = R_{pp} = \frac{1}{\left[\frac{A_{\text{aço}}}{R_{\text{aço}}}\right] + \left[\frac{A_{\text{isolante}}}{R_{\text{isolante}}}\right]} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (3.4)$$

onde  $R_{\text{aço}}$  é a resistência térmica calculada através do aço estrutural,  $R_{\text{isolante}}$  é a resistência térmica calculada através do material isolante do conjunto,  $A_{\text{aço}}$  é a fração da área da estrutura  $\frac{t}{L}$  e  $A_{\text{isolante}}$  é a fração da área do material isolante  $\left(1 - \frac{t}{L}\right)$ . Para estruturas leves de aço, a porcentagem da área estrutural é determinada usando a espessura da alma e não da largura da mesa. Isto geralmente dá uma porcentagem de área menor que 0,5% dependendo do espaçamento entre montantes (IISI, 2001).

### 3.1.2. Método dos Planos Isotérmicos

O método dos planos isotérmicos (ASHRAE, 2013) assume que a temperatura é uniforme em cada plano paralelo da face do elemento, ou seja, que o fluxo de calor através do fechamento é completamente redistribuído em cada camada (planos isotérmicos) e não há resistência ao fluxo de calor lateral, ou seja, fluxo de calor unidimensional. Este fenômeno ocorre apenas em fechamentos com camadas de elevado valor de condutividade térmica. Assim, uma ponderação em função da área (peso) é aplicada a cada camada individualmente, e a resistência térmica de todas as camadas é somada para se alcançar à resistência térmica total. Na figura 3.2, apresenta-se as variáveis que devem ser consideradas no método dos planos isotérmicos, enquanto que, na equação 3.5, apresenta-se a forma de cálculo da resistência.

Figura 3.2- Método dos Planos Isotérmicos.



$$R_{plano\ isotérmico} = R_{ip} = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se} \quad (m^2K/W) \quad (3.5)$$

onde  $R_1$  é a resistência térmica da camada 1 e  $R_2$  é a resistência da camada 2, e é calculada por meio da equação 3.6.

$$R_{através\ da\ camada\ de\ ponte} = R_2 = \frac{1}{\left[\left(\frac{A_{aço}}{R_{aço}}\right) + \left(\frac{A_{isolante}}{R_{isolante}}\right)\right]} \quad (m^2K/W) \quad (3.6)$$

$R_3$  é a resistência térmica da camada 3 e  $R_{si}$  e  $R_{se}$  estão de acordo com a tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resistência térmica superficial interna e externa.

$R_{si}$ (m <sup>2</sup> .K)/W			$R_{se}$ (m <sup>2</sup> .K)/W		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
⇒	⇄	⇄	⇒	⇄	⇄
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: adaptado da NBR 15220 (ABNT, 2005).

Algumas variações do método dos planos isotérmicos foram desenvolvidas, incluindo um método proposto pela Associação de Pesquisa da Construção da Nova Zelândia (BRANZ, 1998) apresentado na Seção 3.2.4.

A norma EN ISO 6949 (ISO, 2007) descreve o método do caminho paralelo como um método mais abrangente no cálculo da resistência térmica total, enquanto que o método do plano isotérmico é descrito como um método mais conservador. A norma ASHRAE (ASHRAE, 2009) sugere que os dois métodos fornecem um limite superior e inferior e o valor a ser utilizado será obtido apenas com uma análise experimental do fechamento. Quando se tem camadas mais condutoras e que potencializam a condução lateral, tal como ocorre em estruturas de aço, o método de planos isotérmicos pode ser mais apropriado. Deve-se notar que esses métodos são formas úteis de cálculo, mas não são necessariamente uma descrição correta do comportamento do fluxo de calor.

### 3.2- Métodos de cálculo simplificados para *Light Steel Framing*

O desempenho térmico dos conjuntos construtivos usados no sistema em *Light Steel Framing*, onde os componentes em aço formam pontes térmicas, pode não ser adequado para a avaliação usando os métodos simplificados citados anteriormente. A questão principal gira em torno de simplificações implícitas nos métodos e estes estarem em desacordo com a enorme diferença da condutividade térmica do aço e do material isolante. Diversas variáveis sobre os procedimentos de cálculo têm sido desenvolvidas para melhorar a precisão de dimensionamento de construções em *Light Steel Framing*.

#### 3.2.1- Média dos métodos do Caminho Paralelo e Planos Isotérmicos

A norma EN ISO 6946 (ISO, 2007) apresenta um método para calcular a resistência térmica e a transmitância térmica de elementos construtivos usando uma média do

método do Caminho Paralelo e do método dos Planos Isotérmicos (regra 50/50). Assim, a resistência térmica total seria calculada por meio da equação 3.7.

$$R_{total} = R_t = \frac{(R_{pp} + R_{ip})}{2} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (3.7)$$

onde  $R_{pp}$  é a resistência térmica total do elemento usando o método do Caminho Paralelo, e  $R_{ip}$  é a resistência térmica total do elemento usando o método dos Planos Isotérmicos.

Esta média (50%/50%) dos resultados obtidos por meio dos dois métodos (um mais abrangente e o outro mais conservador) resultou numa melhor aproximação com os resultados experimentais por meio do método da caixa quente protegida, para vários tipos de fechamentos. Testes realizados e dados calculados para conjuntos de estruturas de aço leve (BHP, 1885; DOFASCO, 1912) constataram a seguinte proporção:

$$R_{total} = R_t = 0,45R_{pp} + 0,51R_{ip} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (3.8)$$

Este valor é muito próximo à média da regra 50/50 e está dentro da precisão dos dados disponíveis. Segundo o Instituto Internacional de Ferro e Aço (IISI, 2001) a regra 50/50 resultou numa previsão dentro de 10% dos dados testados para maioria dos conjuntos, com uma maior imprecisão somente para paredes com perfis de 150 mm de espessura, sem revestimento térmico externo. Verificou-se que as imprecisões aumentaram de forma idêntica para madeira e nos conjuntos de aço estrutural.

Entretanto, no texto da norma ISO 6946 (ISO, 2007) faz-se uma exceção para o uso deste método quando “uma camada de isolamento é preenchida por um metal”. Mesmo assim, a regra 50/50 foi usada para sistemas em *light steel framing* e é recomendada para o uso em alguns países.

### 3.2.2- Norma Dinamarquesa DS418

Quando se utiliza a combinação dos métodos dos Planos Isotérmicos e do Caminho Paralelo, como sugerido na norma EN ISO 6946 (ISO, 2007), é possível ajustar

coeficientes para se adequar aos dados empíricos. Foi constatado que a proporção 1:1 representa melhor os coeficientes das estruturas de madeira e construções de alvenaria. Entretanto, uma proporção 2:1 dos coeficientes (plano isotérmico:caminho paralelo) tem sido sugerida por vários dados de teste para melhor representar o desempenho de sistemas em *light steel framing*. A norma DS418 (DS, 2010) usa este método para construções em *light steel framing*, sendo uma iniciativa proposta pelo Método do Código Canadense de Energia (NRC, 1997). Assim, a resistência térmica total seria calculada por meio da equação 3.9.

$$R_{total} = R_t = \frac{(R_{pp} + 2R_{ip})}{3} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (3.9)$$

Pesquisas do Laboratório Oak Ridge National Laboratory (ORNL, 1943) juntamente com a empresa de consultoria Enermodal Engineering (1980) mostraram que a regra 50/50, como recomendada na norma EN ISO 6946 (ISO, 1996), fornece maior precisão para conjuntos de *light steel framing* usados na América do Norte. Entretanto, a proporção 2:1 entre os coeficientes fornece maior consistência de resultados, com menor variação entre amostras.

### 3.2.3- Método do Código Canadense de Energia

O Método do Código Canadense de Energia (NRC, 1997) contém requisitos para o desempenho térmico da envoltória. Para elementos estruturais de madeira, é recomendado o uso do método de cálculo do Caminho Paralelo para calcular a resistência térmica. Para elementos leves de aço, foi desenvolvido um novo método, uma vez que, para este sistema, não havia nenhum método com aceitação generalizada.

Estas pesquisas do Código Canadense de Energia (NRC, 1997) consistiram em rever os dados medidos existentes e realizar mais testes da resistência térmica para dez amostras de fechamentos (2,44 m x 2,44 m) construídos com perfis de aço usando o método experimental da caixa quente protegida. Medições das propriedades térmicas dos materiais utilizados para construir as amostras foram realizadas em separado, de modo que estes valores pudessem ser utilizados, refinando assim o método de cálculo. Estes valores medidos e os resultados de cálculo foram então comparados e a precisão do

novo método foi investigada. O trabalho também avaliou os efeitos dos revestimentos alternativos, os espaçamentos dos perfis e as dimensões dos perfis.

De acordo com o Código Canadense de Energia, ao final desta pesquisa, foi proposta uma combinação entre o Método do Caminho Paralelo e o Método dos Planos Isotérmicos. A proporção dos valores das resistências foi determinada empiricamente usando dados do teste de caixa quente protegida. A análise deste teste sugeriu que a proporção poderia variar dependendo da configuração da construção. Inicialmente a proporção de 2:1 (plano isotérmico:caminho paralelo) foi investigada. Os resultados são mostrados na Tabela 3.1. Em geral, foi obtida boa concordância entre os dados calculados e medidos, com algumas exceções. O método demonstra consistência para avaliar a resistência térmica com perfis de aço espaçados de 610 mm do centro (3A, 4B e 4C na tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Comparação de valores de R medidos com resultados de alguns métodos de cálculo.

<b>Número</b>	<b>Medida (m<sup>2</sup>K/W)</b>	<b>Plano Isotérmico (m<sup>2</sup>K/W)</b>	<b>Caminho Paralelo (m<sup>2</sup>K/W)</b>	<b>Cálculo usando a proporção 2:1 (m<sup>2</sup>K/W)</b>	<b>Diferença entre as medidas %</b>	<b>Cálculo usando a proporção NRC (m<sup>2</sup>K/W)</b>	<b>Diferença entre as medidas %</b>
1A	1,50	0,77	2,81	1,45	-0,33	1,45	-3,3
1B	2,44	1,75	3,75	2,41	-1,0	2,42	-1,0
1C	3,24	2,69	4,67	3,35	3,4	3,35	3,4
2A	1,50	0,70	2,79	1,40	-6,9	1,4	-6,9
2B	2,39	1,67	3,74	2,36	-1,3	2,36	-1,3
2C	3,17	2,62	4,66	3,30	4,1	3,3	4,1
3A	1,75	0,88	2,82	1,52	-13,1	1,85	5,7
4B	2,54	1,72	3,63	2,35	-7,5	2,68	5,3
4C	3,36	2,66	4,54	3,29	-2,1	3,6	7,1
5B	2,36	1,62	3,62	2,29	-3,0	2,42	2,5

Fonte: adaptado de IISI (2001).

De acordo com o Método do Código Canadense de Energia foi constatado que os valores mais precisos calculados foram obtidos quando os coeficientes de proporções foram variados dependendo dos detalhes das construções. Assim, a proposta final é apresentada na seguinte equação:

$$R_t = (K_1 \cdot R_{pp}) + (K_2 \cdot R_{ip}) \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (3.10)$$

onde  $R_{pp}$  é a resistência térmica total do elemento usando o método do Caminho Paralelo ( $\text{m}^2\cdot\text{K/W}$ ), e  $R_{ip}$  é a resistência térmica total do elemento usando o método dos Planos Isotérmicos ( $\text{m}^2\cdot\text{K/W}$ ). As constantes  $K_1$  e  $K_2$  são apresentados na Tabela 3.3.

Na tabela 3.2 comparam-se as medições do teste de caixa quente com valores calculados usando o Método do Código Canadense de Energia com coeficientes adotados, conforme mostrados na Tabela 3.3. Estes coeficientes estão de acordo com mais ou menos 7,5% em todos os casos.

Tabela 3.3 Fatores de ponderação utilizados no Método do Código Canadense de Energia.

<b>Distância entre montantes</b>	<b><math>K_1</math></b>	<b><math>K_2</math></b>
< 500 mm sem camada isolante	1/3	2/3
< 500 mm com camada isolante	2/5	3/5
> 500 mm em todos os casos	1/2	1/2

Fonte: adaptado de IISI (2001).

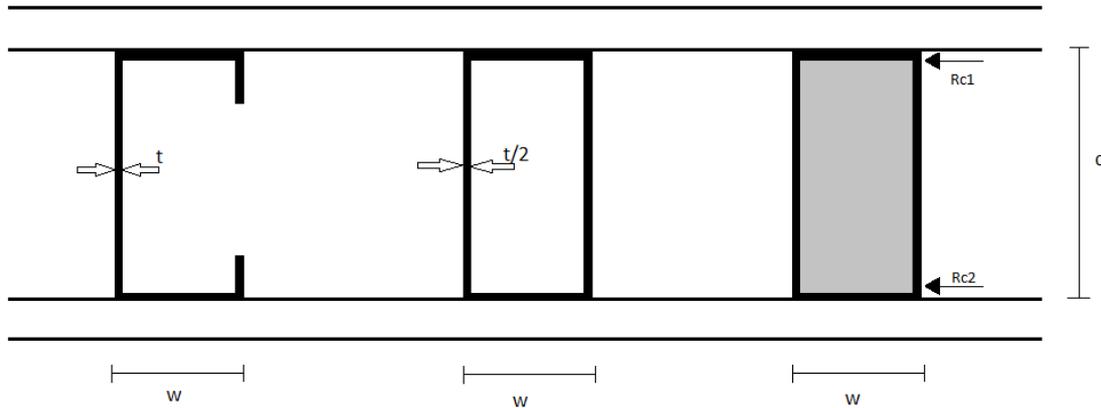
### 3.2.4- O Método dos Planos Isotérmicos Modificado

O método de cálculo proposto é uma modificação unidimensional do método dos planos isotérmicos, desenvolvidos pela Associação de Pesquisa da Construção da Nova Zelândia (BRANZ, 1998). Trata-se de um método para estruturas leves de aço, com resultados de medições utilizando o método experimental da caixa quente protegida.

Nesse método de cálculo, o perfil metálico é substituído por um retângulo ideal com a mesma largura e profundidade total (Figura 3.3) do perfil. Entretanto, a condutividade térmica usada no cálculo é a condutividade do aço multiplicada pela relação da espessura da alma pela largura da mesa (Figura 3.3). A justificativa para isso é que a condutividade térmica do aço é tão alta que mesmo uma seção transversal delgada oferece uma pequena resistência na transferência de calor. Uma profundidade de 50 mm de aço tem somente uma resistência térmica de  $0,001\text{m}^2\text{K/W}$ . Assim, em geral, estruturas em aço têm gradientes de temperatura muito pequenos ao longo da alma e um estado aproximadamente isotérmico. Assim, a temperatura no exterior da mesa é quase

a mesma da temperatura interna. Portanto, a forma dos componentes de aço, neste caso não é tão importante e pode ser substituída por um retângulo sólido ideal equivalente com uma condutividade térmica modificada.

Figura 3.3 - Transformação de perfis C ou caixão em um retângulo sólido ideal equivalente.



Além disso, a partir de medições com caixas quentes, o Método BRANZ (1998) constatou que é importante levar em conta a resistência térmica de contato entre a mesa dos perfis e materiais de fechamento. A resistência de contato é particularmente relevante para estruturas de aços leves, devido à baixa resistência térmica do aço. Materiais de construção, quando aplicados, nunca se encaixam perfeitamente e uma resistência térmica de contato existe entre eles. Valores típicos para materiais de construção ocorrem entre 0,02 e 0,06 m<sup>2</sup>K/W, e isto contribui somente com 0,1% para uma resistência típica, sendo de pouca significância na maioria das construções. Entretanto, quando as resistências de contato de 0,03 m<sup>2</sup>K/W ocorrem em série em cada face dos componentes de aço, no qual podem ter uma resistência de apenas 0,04 m<sup>2</sup>K/W, as resistências de contato se tornam uma parte significativa da resistência total de 0,1 m<sup>2</sup>K/W. Assim, para calcular a resistência térmica através de componentes de aços estruturais, o Método BRANZ (1998) adiciona as resistências de contato  $R_{c1}$  e  $R_{c2}$  na resistência térmica do aço, do seguinte modo:

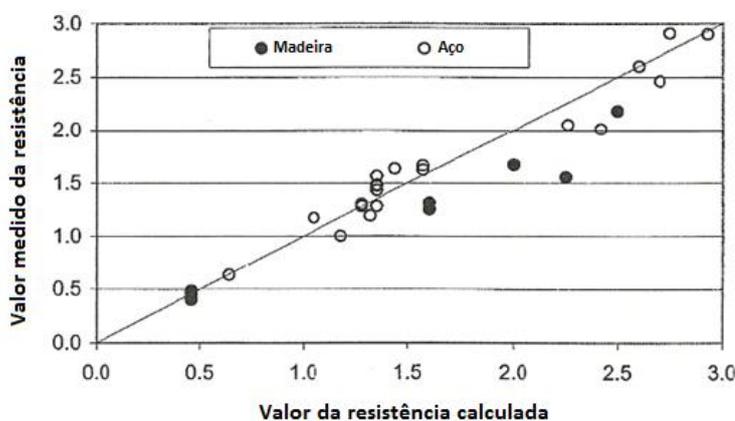
$$R_{aço} = \left[ \left( \frac{d}{K} \right) \cdot \left( \frac{w}{t} \right) \right] + R_{c1} + R_{c2} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (3.11)$$

O valor de  $R_{aço}$  é então aplicado no cálculo do plano isotérmico normal descrito anteriormente.

Nota-se que a transformação em um retângulo sólido equivalente não é muito significativa no valor da resistência  $R_{aço}$ . Segundo a Associação de Pesquisa da Construção da Nova Zelândia (BRANZ, 1998) a variação situa-se em torno de 3%.

Na Figura 3.4 apresenta-se a comparação dos valores medidos via análise experimental da caixa quente protegida com valores obtidos usando o método BRANZ do plano isotérmico modificado. O fechamento teste foi revestido com tijolo e a estrutura alterada de madeira para aço e isolada com mantas de fibra de vidro, ou poliestireno expandido, ou combinações dos três tipos. Os valores calculados no caso das construções em *light steel framing* estão em torno de  $0,2\text{m}^2\text{K/W}$  se comparados aos valores medidos, em 87% dos casos.

Figura 3.4 - Comparação dos valores medidos e calculados da resistência usando o Método do Plano Isotérmico Modificado Fonte: adaptado da IISI, 2001.



Fonte: adaptado de IISI (2001).

### 3.2.5 - Método de Zona Modificado

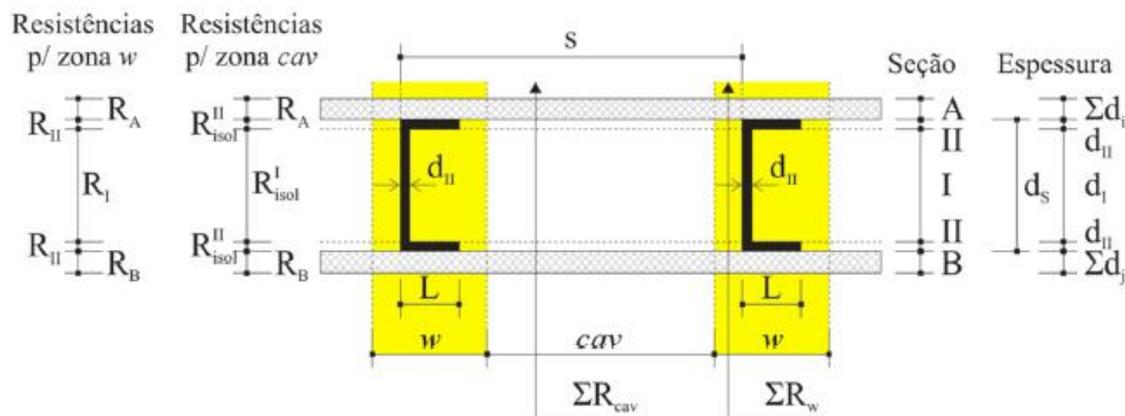
O Método de Zona Modificado (MZM) é baseado no método do caminho paralelo e no Método de Zona (ASHRAE, 2009). A única diferença entre os três métodos é a maneira na qual a área do fechamento afetado pela ponte térmica é levado em consideração. O método do caminho paralelo assume que a zona afetada pela ponte térmica é somente a área geométrica real do perfil. O método de zona considera o fato de a ponte térmica atuar sobre uma área maior do que a dimensão da mesa. Isto leva em consideração as

dimensões geométricas da mesa do perfil e camadas de material adjacentes aos montantes para calcular uma zona de influência maior. Isto melhora a precisão de cálculo, porém, deve-se considerar os seguintes fatores:

- Relação entre a resistividade térmica do material de revestimento e da cavidade isolamento;
- Espessura do material de revestimento;
- Profundidade do perfil;
- Tamanho da mesa do perfil;
- Espessura do perfil.

De acordo com o Método de Zona Modificado, a seção transversal do painel é dividida em duas zonas: a zona de anomalias térmicas ao redor dos perfis ( $w$ ) e a zona da cavidade ( $cav$ ). Os componentes do painel são agrupados nas seções A: fechamento externo; B: fechamento interno e seções I e II: isolante e perfil (Figura 3.5) (GOMES, 2012).

Figura 3.5-Parâmetros para o cálculo da resistência térmica no método MZM.



Fonte: Adaptado de ASHRAE, 1997 (Gomes, 2012).

Para que o método das zonas da norma ASHRAE, 2013 apresentasse resultados mais precisos, o laboratório Oak Ridge National Laboratory (ORNL, 1943) e a Associação Nacional de Construtores de Casas dos Estados Unidos da América (National

Association of House Builders (NAHB, 1940) introduziram o fator de zona ( $Z_f$ ) para ajustar a zona de influência do perfil. A utilização do fator de zona aumenta a precisão do Método das zonas da ASHRAE de +15% para 2% (AISI, 1995). A largura da zona de anomalias térmicas ( $w$ ) pode ser obtida por meio da equação 3.13 (Gomes, 2012).

Assumindo que as camadas ou camada da seção A é mais grossa que a seção B, como mostra a Figura 3.5, assim:

$$\sum_{i=1}^n d_i \geq \sum_{j=1}^m d_j \quad (3.12)$$

onde:

$n$  = espessura da seção A

$m$  = espessura da seção B

Em seguida, a largura da zona térmica de todo o perfil metálico ( $w$ ) pode ser estimada por:

$$w = L + Z_f \sum_{i=1}^n d_i \quad (3.13)$$

onde:

$L$  = tamanho do flange do perfil

$d_i$  = espessura da camada mais espessa, ou seja, da seção A

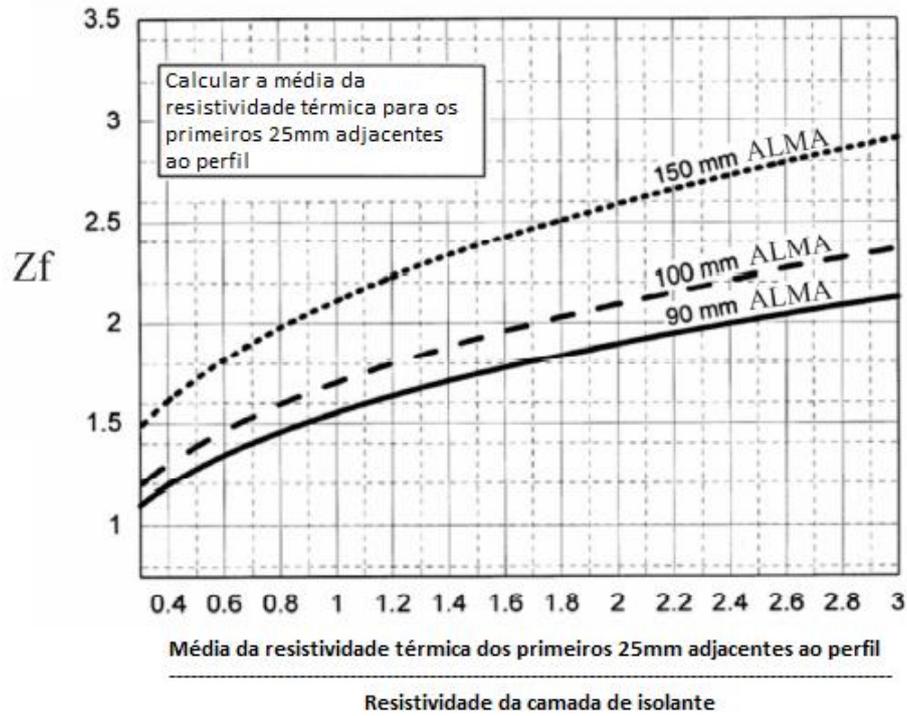
$Z_f$  = fator de zona, o qual é mostrado na Figura 2 ( $Z_f = 2$  para o método de zona).

$Z_f = -0,5$  (se  $\sum d_i$  e  $\sum d_j \leq 16mm$  e resistividade do fechamento  $\leq 10,4$  m.K/W);

$Z_f = 0,5$  (se  $\sum d_i$  e  $\sum d_j \leq 16mm$  e resistividade do fechamento  $> 10,4$  m.K/W);

Para  $\sum d_i$  ou  $\sum d_j > 16mm$ , encontra-se o valor de  $Z_f$  no gráfico apresentado na figura 3.6.

Figura 3.6 – Carta do Fator de zona Zf.



Fonte: adaptado de ASHRAE, 1997.

A resistência térmica total (de superfície a superfície) pode ser determinada pela equação 3.14.

$$R_t = \frac{\sum R_w \cdot \sum R_{cav} \cdot S}{w \cdot (\sum R_{cav} - \sum R_w) + S \cdot \sum R_w} \quad (3.14)$$

onde  $R_t$  é a resistência térmica total (de superfície a superfície) [(m<sup>2</sup>.K)/W];  $s$  é a distância entre montantes (m); e  $w$  é a largura da zona de influência do perfil (m);

$$\sum R_w = R_A + R_B + R_I + 2R_{II} \quad (3.15)$$

$$\sum R_{cav} = R_A + R_B + R_{isol}^I + 2R_{isol}^{II} \quad (3.16)$$

$$R_A = \sum (r_i \cdot d_i) \quad (3.17)$$

$$R_B = \sum (r_j \cdot d_j) \quad (3.18)$$

$$R_{isol}^I = r_{isol} \cdot d_I \quad (3.19)$$

$$R_{isol}^{II} = r_{isol} \cdot d_{II} \quad (3.20)$$

$$R_{met}^I = r_{met} \cdot d_I \quad (3.21)$$

$$R_{met}^{II} = r_{met} \cdot d_{II} \quad (3.22)$$

$$R_I = \frac{R_{met}^I \cdot R_{isol}^I \cdot w}{d_{II} \cdot (R_{isol}^I - R_{met}^I) + w \cdot R_{met}^I} \quad (3.23)$$

$$R_{II} = \frac{R_{met}^{II} \cdot R_{isol}^{II} \cdot w}{L \cdot (R_{isol}^{II} - R_{met}^{II}) + w \cdot R_{met}^{II}} \quad (3.24)$$

onde  $R_A$  é a resistência térmica da seção A [(m<sup>2</sup>.K/W)];  $R_B$  é a resistência térmica da seção B [(m<sup>2</sup>.K/W)];  $R_I$  é a resistência térmica da seção I [(m<sup>2</sup>.K/W)];  $R_{II}$  é a resistência térmica da seção II [(m<sup>2</sup>.K/W)];  $R_{isol}^I$  é a resistência térmica da seção  $R_{isol}^I$  [(m<sup>2</sup>.K/W)];  $R_{isol}^{II}$  é a resistência térmica da seção  $R_{isol}^{II}$  [(m<sup>2</sup>.K/W)];  $R_{met}^I$  é a resistência térmica da seção  $R_{met}^I$  [(m<sup>2</sup>.K/W)];  $R_{met}^{II}$  é a resistência térmica da seção  $R_{met}^{II}$  [(m<sup>2</sup>.K/W)].

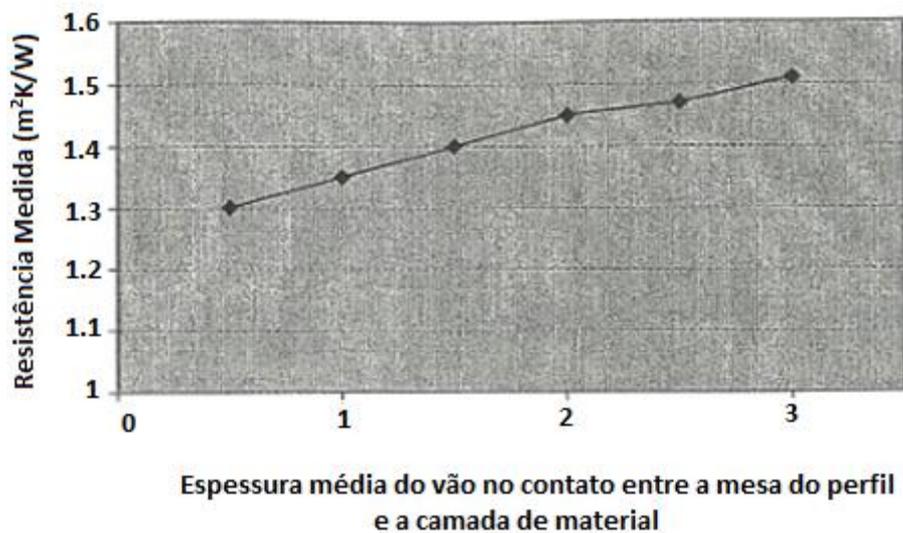
### 3.5-Resistências de Contato

Em geral, materiais de construção, quando agregados, não se encaixam perfeitamente, criando uma resistência térmica de contato entre eles. Um valor típico desta resistência para materiais de construção se encontra na faixa de 0,02 a 0,06 m<sup>2</sup>K/W. A resistência de contato contribui somente com 0,1% na resistência térmica dos fechamentos e é pouco significativa na maioria dos conjuntos construtivos. No entanto, a norma ASHRAE sugere que a resistência de contato pode ser importante, quando são usados materiais altamente condutores e propõe uma faixa de valores entre 0,01 a 0,1 m<sup>2</sup>K/W e um valor típico de 0,035 m<sup>2</sup>K/W. Quando resistências de contato de 0,035 m<sup>2</sup>K/W ocorrem em série a cada face do componente de aço, o qual tem uma resistência de somente 0,04 m<sup>2</sup>K/W, a resistência de contato torna-se uma parcela relevante no valor total da resistência equivalente que é de 0,11 m<sup>2</sup>K/W.

A Associação de Pesquisa da Construção da Nova Zelândia (BRANZ, 1998) realizou uma investigação do efeito da resistência de contato. No estudo foi realizado um

fechamento com  $1,9\text{m}^2$  de área, construído em um conjunto simples com montante de 80 mm de profundidade, foi utilizado uma placa de gesso na face interna, placas de compensado do lado externo e intermediadas com lã mineral. O vão entre a placa de gesso e a mesa do perfil de aço foi variado de 0,5 mm a 3,0 mm. Os testes com caixas quentes constataram que a resistência de contato varia entre  $0,02\text{ m}^2\text{K/W}$  para um vão de 0,5 mm e  $0,1\text{ m}^2\text{K/W}$  para um vão de 3,0 mm, como mostrado na figura 3,7. Assim, a resistência total da camada varia de  $1,3\text{ m}^2\text{K/W}$  a  $1,51\text{ m}^2\text{K/W}$ , dependendo do vão entre a mesa do perfil e a placa de gesso. Esta é uma variação de 16%.

Figura 3.7 Variação da resistência de contato (apenas em uma face).



Fonte: adaptado de IISI (2001).

Isto é o mais relevante para os sistemas em *Light Steel Framing*, onde pode não existir uma camada de isolante na face externa. Nos casos em que são utilizados isolante, a resistência térmica através do perfil e do revestimento é maior e, portanto a resistência de contato inferior.

A variação na resistência, dependendo da resistência de contato, pode explicar por que razão os fechamentos idênticos mostraram variações significativas na resistência térmica medida. Um estudo realizado por Enermodal Engenharia (1980) concluiu que ao realizar simulação de diferença finita, a inclusão de resistência de contato típica de  $0,035\text{ m}^2\text{K/W}$ , pode melhorar a precisão das previsões. Na Tabela 3.4 mostra-se que,

para seis conjuntos, a diferença média entre os resultados simulados e testados foi reduzida de -4,7% para +0,8% quando se incluem resistências de contato. No geral, incluindo as resistências de contato no processo de cálculo, a resistência aumenta entre 3% e 9%.

Tabela 3.4 Comparação do teste da resistência térmica simulada com e sem resistências de contato incluídas.

Ref.	Resistência Térmica Testada	Resistência Térmica Simulada (m <sup>2</sup> K/W)			
		Sem Resistência de Contato	% diferença de teste	Com Resistência de Contato	% diferença de teste
<b>A1</b>	1,38	1,23	-10,20%	1,35	-1,70%
<b>A2</b>	2,24	2,06	-6,30%	2,15	-2,70%
<b>A3</b>	2,44	2,36	-3,00%	2,44	0,10%
<b>B1</b>	1,68	1,56	-7,40%	1,72	1,90%
<b>B2</b>	2,49	2,45	-1,30%	2,59	3,30%
<b>B3</b>	2,77	2,77	0%	2,88	4%

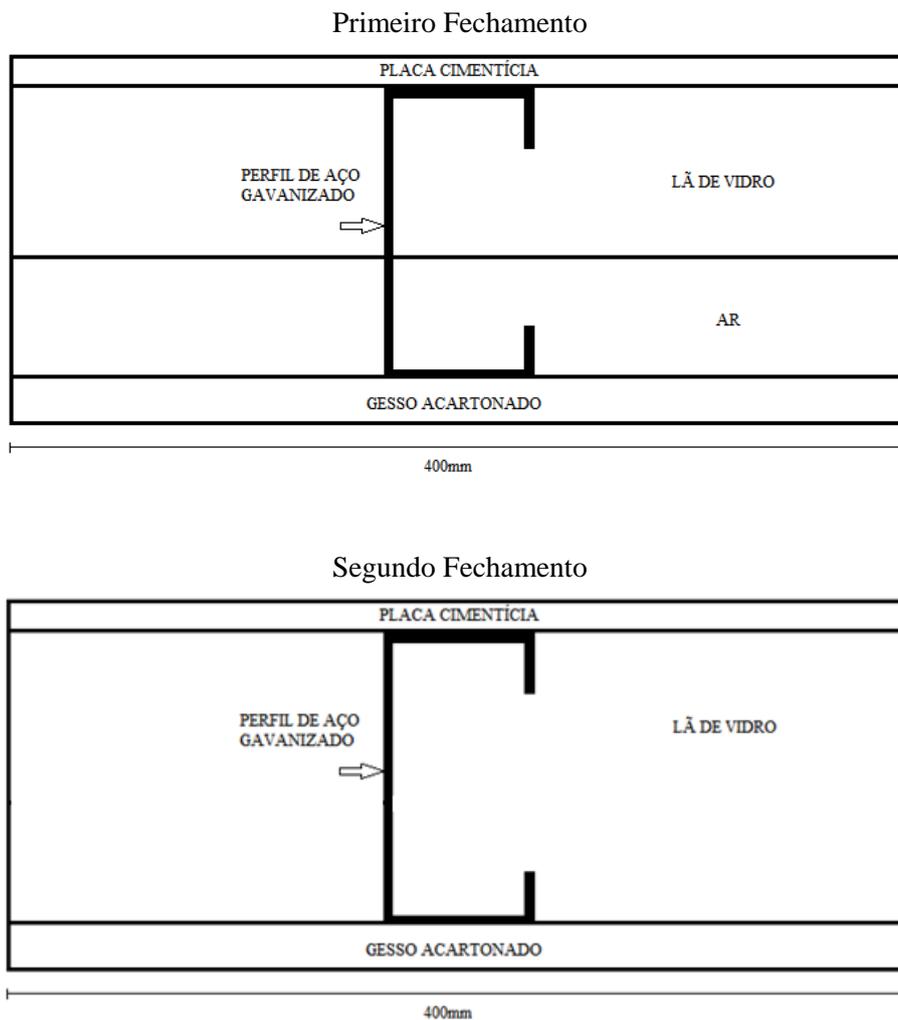
Fonte: adaptado de IISI (2001).

Na maioria dos cálculos e simulações da transmitância térmica, resistências de contato não são consideradas. Isto pode ser responsável por algumas das diferenças entre as resistências testadas, simuladas e calculadas. No entanto, no método dos planos isotérmicos modificado, exige-se que as resistências de contato sejam incluídas no cálculo.

#### 4. METODOLOGIA

No presente trabalho são adotadas duas abordagens para obter a resistência térmica e transmitância térmica equivalentes para fechamentos em *Light Steel Framing*: a análise analítica e a análise numérica. Em ambos os casos utilizam-se os dois tipos de fechamentos, cuja área é limitada em  $0,045\text{m}^2$  para configurar as células de simulação, conforme ilustrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Esquema das células dos fechamentos em *Light Steel Framing*.



A composição do Primeiro Fechamento utilizada é aquela comumente empregada em edificações residenciais no Brasil, sendo composto na camada externa por placa cimentícia e na camada interna por gesso acartonado, intermediadas por lâã de vidro e uma camada de ar e por fim o perfil montante em U enrijecido (90x40) de aço galvanizado, com 0,95mm de espessura. No Segundo Fechamento a única diferença é

que a cavidade é totalmente preenchida com isolante térmico não possuindo a camada de ar. As espessuras das camadas encontram-se presentes na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Espessuras das camadas do fechamento utilizado.

<b>Material</b>	<b>Espessura (mm)</b>
Placa Cimentícia	10
Gesso Acartonado	12,5
Lã de Vidro	50
Ar	40
Perfil	0,95

Na concepção original do sistema construtivo em estruturas leves de aço, a cavidade é totalmente preenchida por isolante térmico (lã de vidro). Porém, no Brasil, o processo de construção em *Light Steel Framing* feito pelas empresas considera uma espessura de isolante menor que a profundidade da cavidade entre montantes. Assim, cria-se uma camada de ar estagnada dentro do fechamento, para reduzir os custos com a construção.

#### **4.1- Análise Analítica**

A análise analítica baseia-se nos métodos de cálculos da resistência térmica de fechamentos para o sistema *Light Steel Framing* (IISI, 2001), conforme apresentados no Capítulo 3. Utiliza-se os métodos:

- Método do Caminho Paralelo – assume um fluxo de calor unidimensional perpendicular à face do elemento e a resistência térmica é calculada através dos elementos estruturais e através da cavidade;
- Método dos Planos Isotérmicos – assume que a temperatura é uniforme em cada plano paralelo da face do elemento a resistência térmica de todas as camadas é somada para se alcançar a resistência térmica total;
- Média dos Métodos do Caminho Paralelo e Planos Isotérmicos – calcula a resistência térmica e a transmitância térmica de elementos construtivos usando uma média dos métodos do Caminho Paralelo e Planos Isotérmicos;

- Norma Dinamarquesa – utiliza a combinação dos métodos dos Planos Isotérmicos e do Caminho Paralelo, através de uma proporção de 2:1 respectivamente;
- Norma Canadense - combinação entre o Método do Caminho Paralelo e o Método dos Planos Isotérmicos, ponderando os dois de forma apropriada. Os fatores de ponderação,  $K_1$  e  $K_2$ , são tabelados de acordo com a Norma Canadense e estão relacionados com a espessura da camada de isolante;
- Método dos Planos Isotérmicos Modificado - é uma modificação unidimensional do método dos planos isotérmicos. Nesse método de cálculo, o perfil metálico é substituído por um retângulo ideal com a mesma largura e profundidade total do perfil.
- Método de Zona Modificado - é baseado no método do caminho paralelo e no Método de Zona. A única diferença entre os três métodos é a maneira na qual a área do fechamento afetado pela ponte térmica é levado em consideração.

## **4.2 – Análise Numérica**

A análise numérica baseia-se no método dos Elementos Finitos (MEF) utilizando o software ANSYS.

### 4.2.1 - O Programa ANSYS

O desenvolvimento de ferramentas computacionais abre caminho para a avaliação do comportamento térmico por análises numéricas, e sua utilização para fins de projeto e dimensionamento. Atualmente existem diversos programas computacionais, baseados nas normas vigentes, que são usados para a análise térmica em edificações (HENSEN; LAMBERTS, 2011).

No Brasil, o uso de ferramentas computacionais para a análise do desempenho térmico e energético de edificações iniciou-se na década de 80. Os profissionais que utilizam os programas de simulação numérica concentram-se em instituições de ensino, sendo pouco aplicado nos escritórios de projeto (MENDES et al., 2005). Isto se deve à complexidade das ferramentas existentes, falta de programas nacionais e ao tempo

necessário à caracterização do modelo virtual da edificação, que pode gerar diversas dúvidas na caracterização dos dados de entrada (GOMES, 2012).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) baseia-se na discretização do fechamento em elementos, gerando assim uma malha de elementos e de nós. Por meio de funções de interpolação convenientes, este sistema discreto simula o comportamento do sistema contínuo original. A vantagem do método dos elementos finitos é a amplitude de possibilidades de utilização, uma vez que os elementos finitos se adaptam à geometria do elemento. Sua desvantagem é um alto custo computacional, pois gera um elevado número de nós, o que leva a sistemas com muitas variáveis que demandam elevado tempo de processamento (ANSYS, 2013).

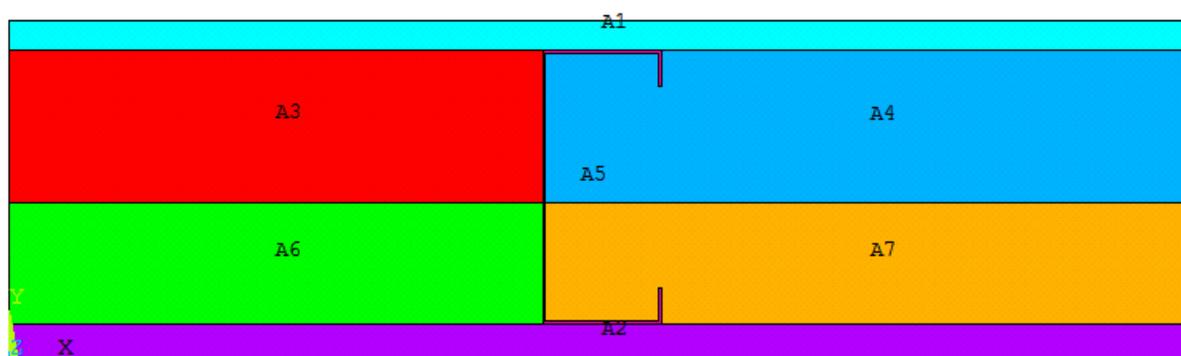
O ANSYS (atualmente na versão 15) é um programa computacional desenvolvido nos Estados Unidos, Pensilvânia, 1970, que foi criado para a simulação numérica para engenharia. Várias são as análises obtidas pelo ANSYS, dentre elas, a análise estrutural, térmica e dos fluídos. Na simulação térmica, calcula-se o fluxo de calor através do fechamento em *Light Steel Framing*, podendo-se calcular a resistência térmica do painel.

#### 4.2.2 - Escolha do tipo de elemento

O ANSYS possui uma biblioteca de variados elementos de acordo com o tipo de análise requerida. Para esta análise térmica foi usado o elemento PLANE55, que é um elemento cuja característica é a temperatura em quatro nós com um único grau de liberdade. Esse elemento é aplicável para análise térmica 2-D, tanto para o estado permanente como para condição transiente.

A partir da escolha do elemento pode-se então criar a geometria dos fechamentos a serem analisado. Como no exemplo do primeiro modelo, onde foi dividido em áreas, de acordo com o esquema mostrado na Figura 4.2, pois cada uma delas é de um material específico.

Figura 4.2 – Esquema das áreas para o modelo do primeiro fechamento em LSF.



No método proposto, A1 é a área da placa cimentícia, A2 é a área do gesso acartonado, as áreas A3 e A4 representam a lã de vidro, a área A5 representa o perfil de aço e as áreas A6 e A7 representam a camada de ar.

#### 4.2.3 - Determinação dos materiais usados para o fechamento

Como os modelos analisados possuem vários tipos de materiais, então para diferenciá-los dentro do programa computacional ANSYS, é necessária a determinação das propriedades dos materiais. Para a análise térmica, além da espessura, foram inseridas três propriedades termofísicas no programa para se obter o resultado requerido. Estas propriedades estão apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.2 – Propriedades usadas para a análise térmica para os fechamentos em *Light Steel Framing*.

Material	Espessura (m)	Condutividade Térmica (W/mK)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico (J/KgK)
Placa Cimentícia	0,01	0,95	2200	840
Gesso Acartonado	0,0125	0,35	1000	840
Lã de Vidro	0,05	0,042	100	700
Perfil de Aço	0,00095	55	7800	460
Ar	0,04	0,0263	1,1614	1007

Fonte: NBR 15220-2; CLARKE, 1985; UFSC, 2006; RODRIGUES, 2006; INCROPERA, 2008.

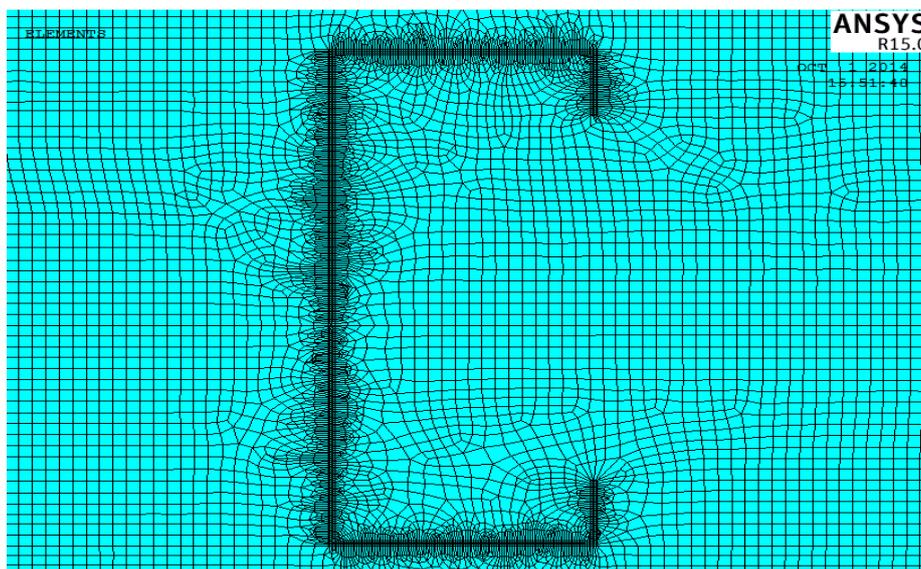
Nos modelos propostos a resistência de contato, entre a mesa do perfil e as camadas adjacentes, não foi considerada, pois dentre todos os métodos de cálculo da resistência térmica de fechamentos no sistema *Light Steel Framing*, apresentados no Capítulo 3, apenas o método dos planos isotérmicos modificados faz o uso da resistência de

contato. Assim, a análise térmica pela análise numérica vai ao encontro dos demais métodos apresentados anteriormente.

#### 4.2.4 - Determinação do refinamento da malha

Após determinar o tipo de elemento finito mais adequado para a análise e inserir as propriedades dos materiais, torna-se necessária à determinação de um nível de refinamento da malha que conduza a bons resultados sem excessivo custo computacional. O refinamento da malha foi relacionado de acordo com a espessura do perfil de aço, de 0,95mm. Foram testados níveis de refinamento, buscando com que a malha ficasse mais bem refinada na área do perfil Ue. E dentre os testes, chegou-se ao elemento com, aproximadamente, 32% da espessura do perfil (área A5). Para as demais áreas o refinamento da malha foi de aproximadamente de 4% em relação à área do fechamento de 0,045m<sup>2</sup>. Na Figura 4.3, apresenta-se o elemento com o nível de refinamento adotado.

Figura 4.3 – Detalhamento do refinamento da malha no perfil.

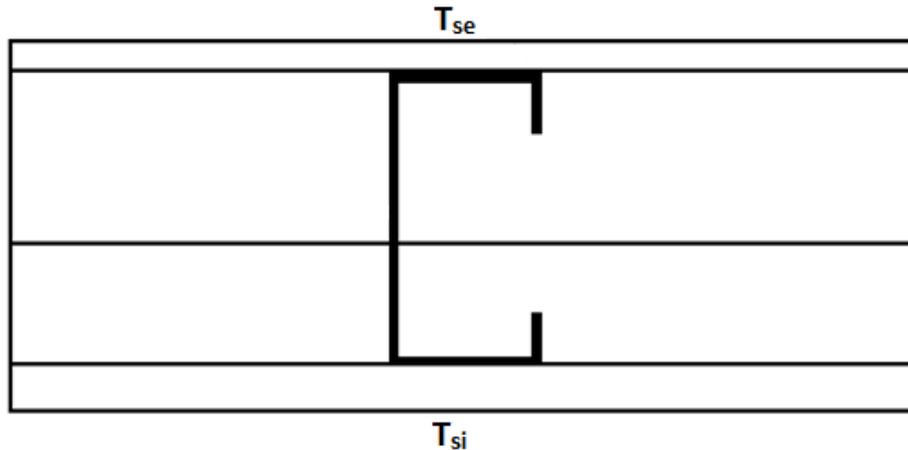


#### 4.2.5 Condições de contorno

As condições de contorno utilizadas são definidas de acordo com a análise a ser feita pelo ANSYS. Assim, para uma análise térmica em regime permanente usou-se para a

face externa do fechamento a temperatura de 40°C (313K) e na face interna 30°C (303K), obtendo um gradiente de temperatura de 10. As condições adotadas representam um comportamento térmico típico de um fechamento isolante aplicado em construções do clima tropical no Brasil. Apresenta-se na Figura 4.4 o esquema das condições de contorno impostas para ambos os modelos.

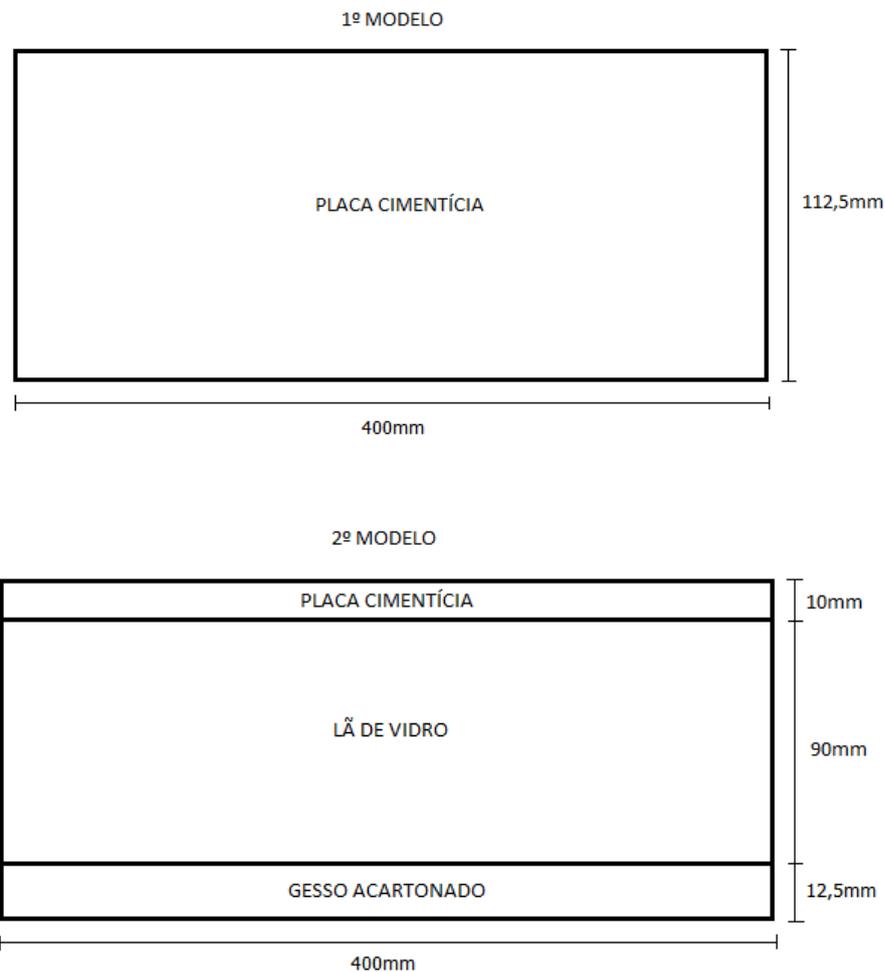
Figura 4.4 – Condições de contorno para o fechamento.



### 4.3 - Calibração na análise numérica adotada

Sabe-se que os modelos de elementos finitos têm seus resultados bastante sensíveis às condições de contorno, ao refinamento da malha e ainda ao tipo de elemento empregado na análise (ANSYS, 2013). A falta de confiança nos resultados fornecidos pela simulação numérica pode ser reduzida por meio da calibração do modelo proposto. Esta etapa da análise numérica visa à obtenção de um procedimento de modelagem que leve a um modelo com resultados coerentes com aqueles obtidos na análise analítica. Assim, foram construídos modelos de elementos finitos no ANSYS para fechamentos simples, com 0,045m<sup>2</sup> de área, de acordo com os esquemas mostrados na Figura 4.5 e analisados os fluxos de calor para cada caso.

Figura 4.5 – Esquema dos fechamentos usados para a calibração do modelo dos elementos finitos.



Para análise térmica permanente desses fechamentos foi utilizado, o mesmo elemento (PLANE55), as mesmas propriedades dos materiais e as mesmas condições de contorno, assim como para o fechamento em *Light Steel Framing* mostrado anteriormente. O refinamento da malha foi de 22% do valor da área do fechamento que é de  $0,045\text{m}^2$ . Para ambos os modelos foram feitos os cálculos via análise analítica e numérica.

Na análise numérica, também utilizando o programa ANSYS, os resultados obtidos para o fluxo de temperatura no 1º e 2º modelos estão apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7.

Figura 4.6 – Representação da área e dos vetores do fluxo de temperatura para o 1º modelo.

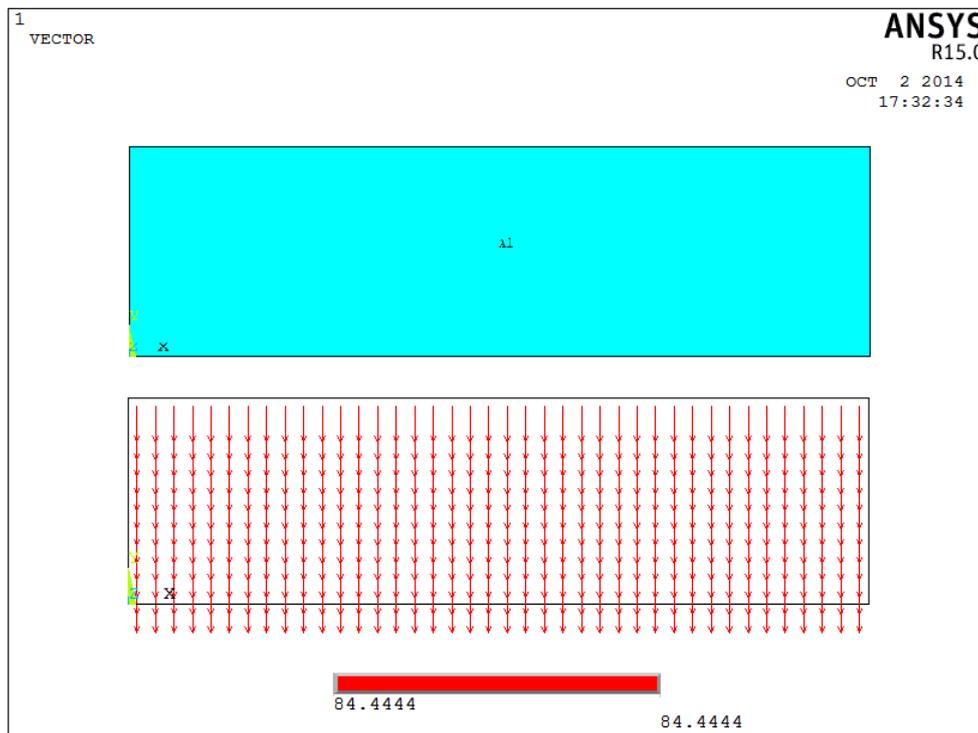
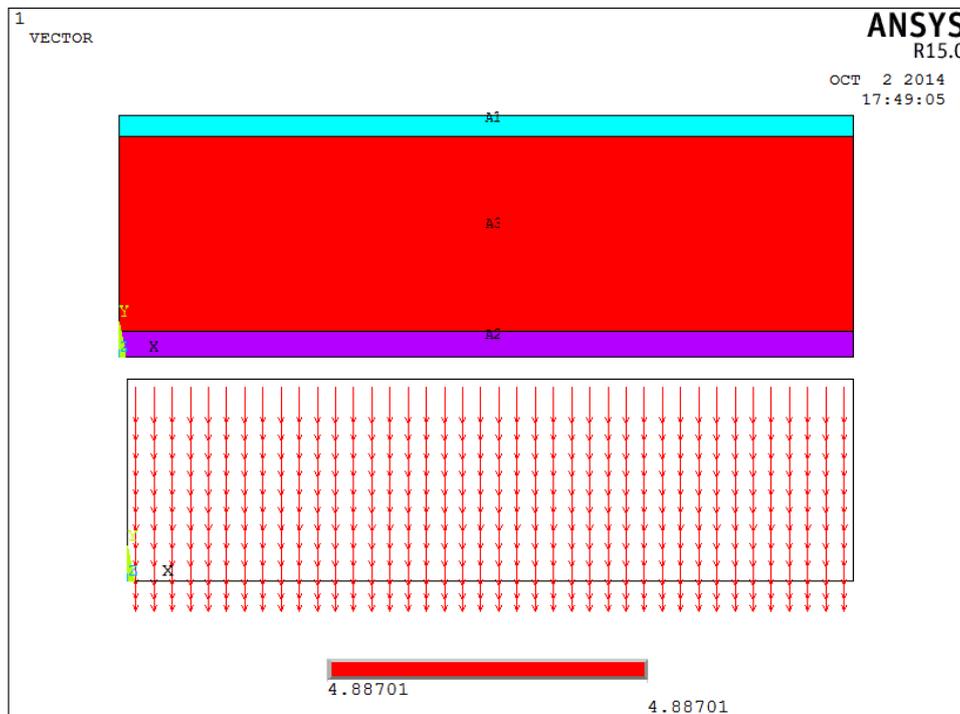


Figura 4.7 – Representação da área e dos vetores do fluxo de temperatura para o 2º modelo



Com os resultados via ANSYS observa-se o valor do fluxo de calor para os modelos apresentados. No 1º modelo, composto apenas de placa cimentícia o fluxo é de 84,44 W/m<sup>2</sup> e no 2º modelo é de 4,88 W/m<sup>2</sup>.

Comparando com os resultados da análise analítica, os valores para os modelos também foram de 84,44 W/m<sup>2</sup> e 4,88 W/m<sup>2</sup>, para o 1º e 2º modelo respectivamente. Esses resultados foram obtidos por meio das equações 4.1 e 4.2.

$$q = \frac{\Delta t}{R_{eq}} \quad (4.1)$$

$$R_{eq} = \frac{d}{k} \quad (4.2)$$

onde o gradiente de temperatura é 10, d é a espessura das camadas do fechamento e k é a condutividade térmica dos materiais usados.

## 5-RESULTADOS

Conforme apresentado no Capítulo 4 a obtenção da resistência térmica e transmitância térmica do fechamento em *Light Steel Framing* é realizada por meio de duas abordagens: (a) Análise analítica englobando os métodos: Caminho Paralelo, Planos Isotérmicos, Regra 50/50, Norma Dinamarquesa, Código Canadense de Energia, Planos Isotérmicos Modificado e Zona Modificada, e (b) Análise numérica via MEF utilizando o programa computacional ANSYS (versão 15).

### 5.1 Resultados a partir da análise analítica

Os cálculos são feitos para todas as análises analíticas mostradas no Capítulo 3. Estes cálculos encontram-se de forma detalhada no APÊNDICE A, para as células de fechamentos, intermediados somente por material isolante e por material isolante e camada de ar, conforme esquemas apresentados na Figura 4.1. Nas Tabelas 5.1 e 5.2, apresentam-se os resultados dos cálculos da resistência térmica, transmitância térmica e do fluxo de calor para esses fechamentos.

Tabela 5.1 – Resistência térmica, transmitância e fluxo de calor para o fechamento intermediado por material isolante e camada de ar (Figura 4.1).

<b>Métodos</b>	<b>Resistência Térmica (m<sup>2</sup>K/W)</b>	<b>Transmitância Térmica (W/m<sup>2</sup>K)</b>	<b>Fluxo de Calor (W/m<sup>2</sup>)</b>
Caminho Paralelo	2,4327	0,4111	4,1107
Planos Isotérmicos	0,7668	1,3041	13,0412
Regra 50/50	1,5997	0,6251	6,2510
Norma Dinamarquesa	1,3221	0,7564	7,5637
Código Canadense de Energia	1,4332	0,6977	6,9776
Planos Isotérmicos Modificados	2,8121	0,3556	3,5561
Zona Modificada	-----	-----	-----

Tabela 5.2 – Resistência térmica, transmitância e fluxo de calor para o fechamento intermediado somente por material isolante (Figura 4.1).

<b>Métodos</b>	<b>Resistência Térmica (m<sup>2</sup>K/W)</b>	<b>Transmitância Térmica (W/m<sup>2</sup>K)</b>	<b>Fluxo de Calor (W/m<sup>2</sup>)</b>
Caminho Paralelo	1,1678	0,8563	8,5631
Planos Isotérmicos	0,6535	1,5302	15,3022
Regra 50/50	0,9106	1,0982	10,9818
Norma Dinamarquesa	0,8249	1,2123	12,1227
Código Canadense de Energia	0,8596	1,1633	11,6333
Planos Isotérmicos Modificados	1,3852	0,7219	7,2192
Zona Modificada	0,8010	1,2484	12,4839

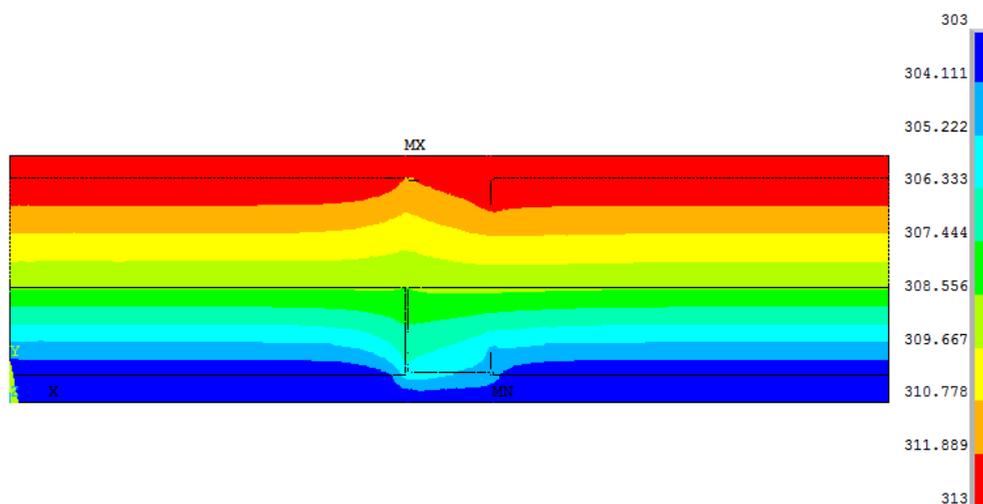
Verifica-se que a solução analítica via o método dos Planos Isotérmicos, para os dois esquemas de fechamentos, apresenta o menor valor de resistência térmica e desse modo a maior transmitância térmica. Os métodos da Regra 50/50, Norma Dinamarquesa e Código Canadense de Energia apresentam valores próximos para a resistência e transmitância térmicas para o fechamento que apresentam uma camada de ar. Para o fechamento que apresenta somente material isolante como camada intermediária os métodos da Norma Dinamarquesa, Código Canadense de Energia e Zona Modificada apresentam resultados bem próximos.

## 5.2 Resultados a partir da análise numérica

A análise numérica, conforme apresentada no Capítulo 4, é utilizada para os fechamentos, conforme esquemas mostrados na Figura 4.1. Faz-se uma análise térmica em regime permanente, condução de calor unidimensional, considerando temperatura superficial conhecida e aplicando ao fechamento um gradiente temperatura de  $10^{\circ}\text{C}$ , que representa um comportamento térmico típico de um fechamento aplicado em construções do clima tropical no Brasil. No APÊNDICE B apresenta-se outros resultados considerando fechamentos com elemento em aço na forma de barra, perfil I, perfil Ue com espessura de 2,46mm e também fechamento com camadas de reboco e placa OSB. No APÊNDICE C apresenta-se os resultados considerando a cavidade do fechamento (Figura 4.1) totalmente preenchida apenas por ar.

Na Figura 5.1 apresenta-se a estratificação da temperatura para o fechamento que apresenta isolante e camada de ar como camadas intermediárias.

Figura 5.1 – Estratificação da temperatura para o fechamento com isolante e ar.



A condutividade térmica do perfil de aço, presente em um fechamento em multicamadas do sistema *Light Steel Framing* composta com camadas de outros materiais não metálicos e/ou camada de ar, excede ao valor da condutividade térmica destas camadas em torno de 50 vezes em ordem de grandeza.

Como pode ser observado na Figura 5.1 há uma diferença na distribuição de temperatura na região do perfil, em aço, em relação à região afastada deste elemento. Uma vez que a condutividade térmica do aço é bem superior àquela dos demais materiais torna-se evidente nesta região que o mecanismo de condução de calor é bidimensional (Figura 5.2 a 5.4). O fluxo de calor nesta região resulta em torno 11 vezes maior do que o fluxo de condução numa parede sem a presença do perfil em aço.

Para o fechamento, mostrado na Figura 5.1, a resistência térmica equivalente resultou em  $R_t = 0,8382\text{m}^2\text{K/W}$  e o fluxo de calor em  $11,9299\text{W/m}^2$ . Este valor do fluxo de calor equivale a um valor em torno de 54% maior que valor do fluxo de calor para um fechamento sem presença do perfil em aço.

Figura 5.2–Distribuição do fluxo de calor para fechamento com isolante e ar.

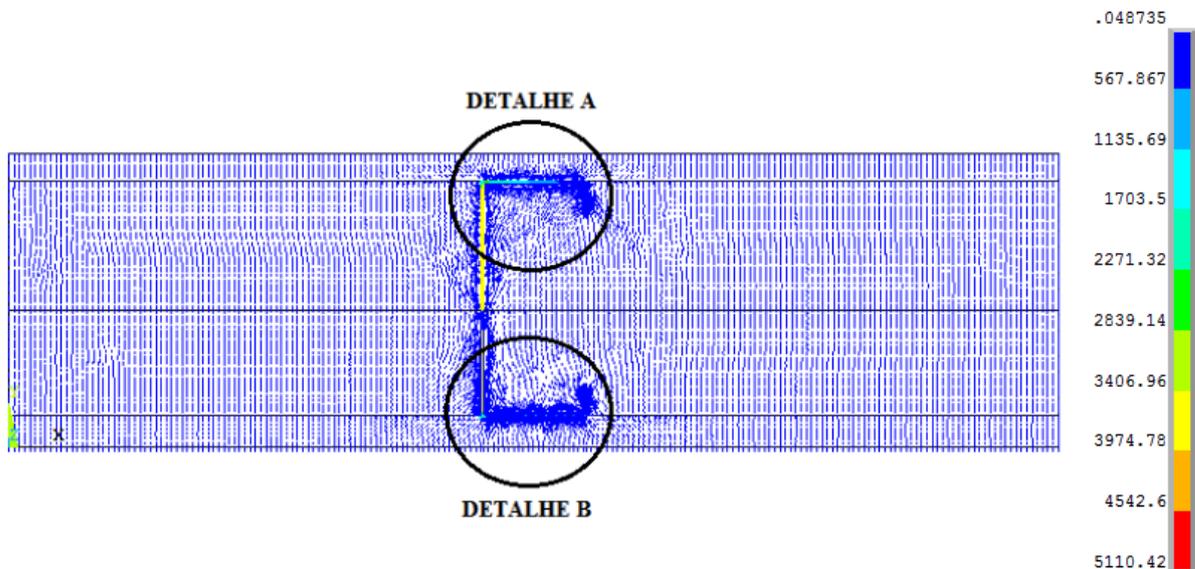


Figura 5.3–Distribuição do fluxo de calor para fechamento com isolante e ar - detalhe A.

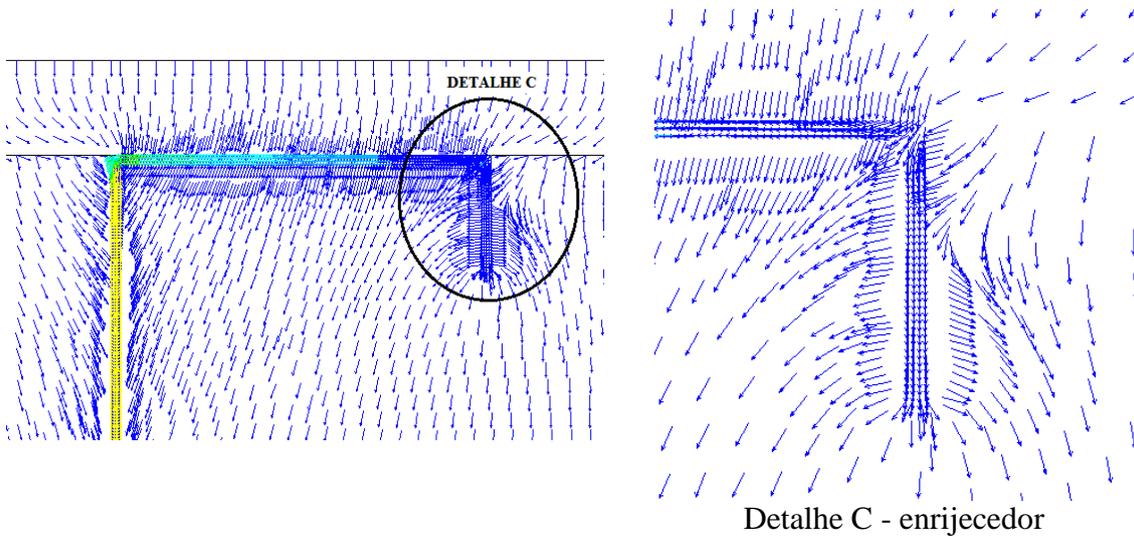
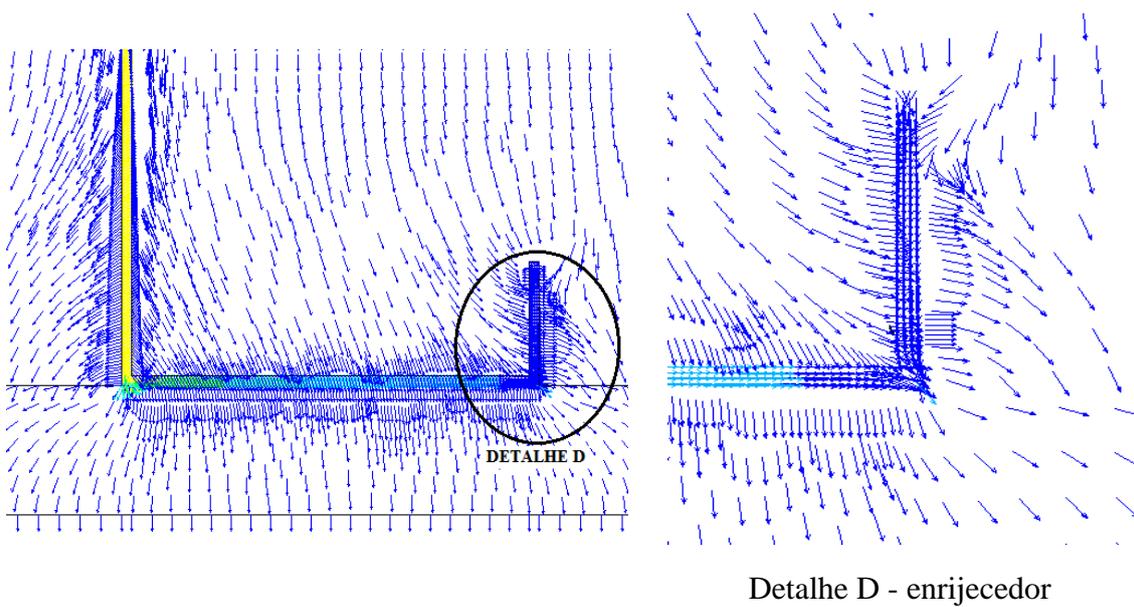


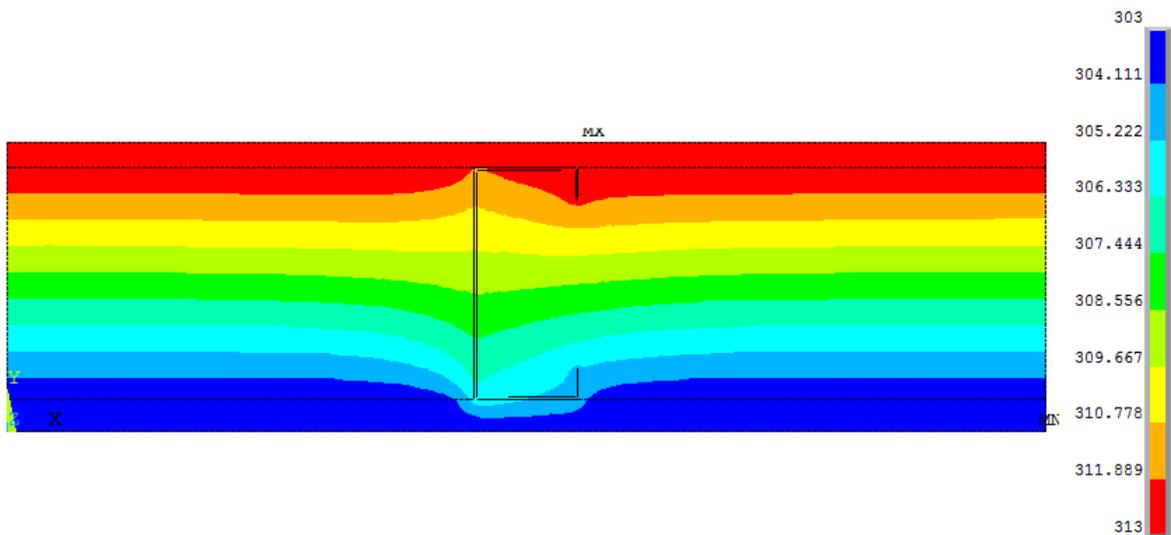
Figura 5.4–Distribuição do fluxo de calor para fechamento com isolante e ar - detalhe B.



Quando comparando o valor da resistência equivalente, obtida via simulação numérica, com os valores de resistência obtidos a partir das análises analíticas observa-se que o método dos Planos Isotérmicos resulta um valor mais próximo, proporcionando uma diferença em torno de 9,31% (Tabela 5.3).

Na Figura 5.5 apresenta-se a estratificação da temperatura para o fechamento que apresenta somente material isolante como camada intermediária.

Figura 5.5–Estratificação da temperatura para fechamento somente com isolante.



De modo similar ao que ocorreu com o fechamento mostrado na Figura 5.1 pode ser observado na Figura 5.5 que há uma diferença na distribuição de temperatura na região do perfil, em aço, em relação à região afastada deste elemento, ou seja, tem-se uma região na qual o fluxo de calor por condução é bidimensional ao invés de unidimensional (Figura 5.6 a 5.8). O fluxo de calor nesta região resulta, neste caso, em torno 9 vezes maior do que o fluxo de condução numa parede sem a presença do perfil em aço.

Para o fechamento, mostrado na Figura 5.5, a resistência térmica equivalente resultou em  $R_t = 0,7673\text{m}^2\text{K/W}$  e o fluxo de calor em  $13,0332\text{W/m}^2$ . Este valor do fluxo de calor equivale a um valor em torno de 49% maior que valor do fluxo de calor para um fechamento sem presença do perfil em aço.

Figura 5.6–Distribuição do fluxo de calor para o fechamento somente com isolante.

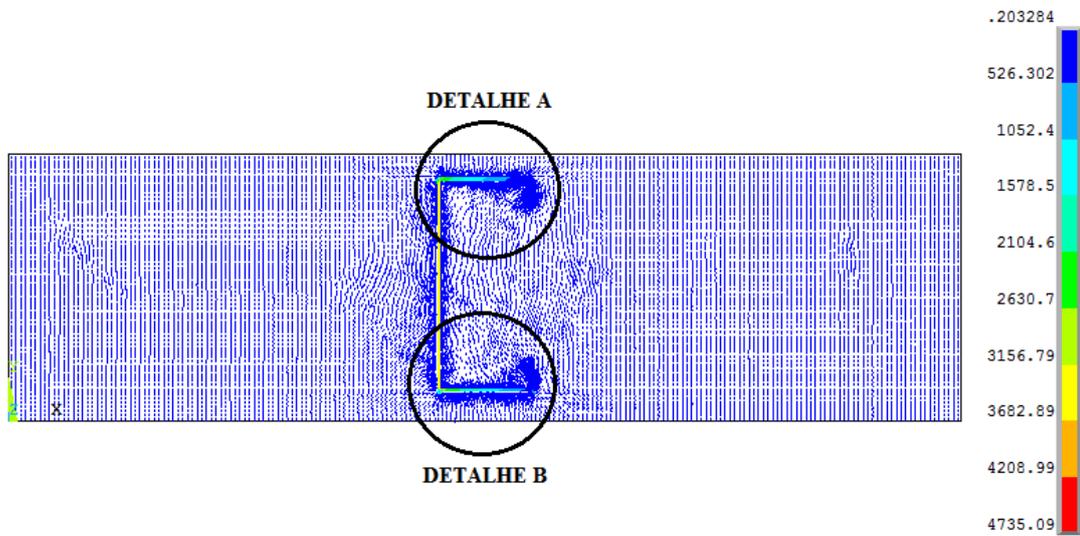


Figura 5.7–Distribuição do fluxo de calor para o fechamento somente com isolante – detalhe A.

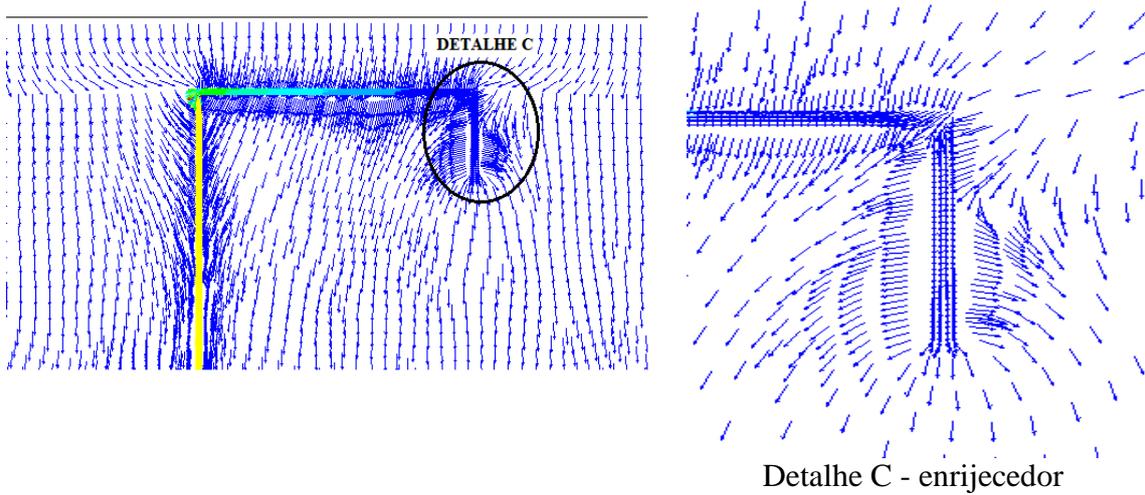
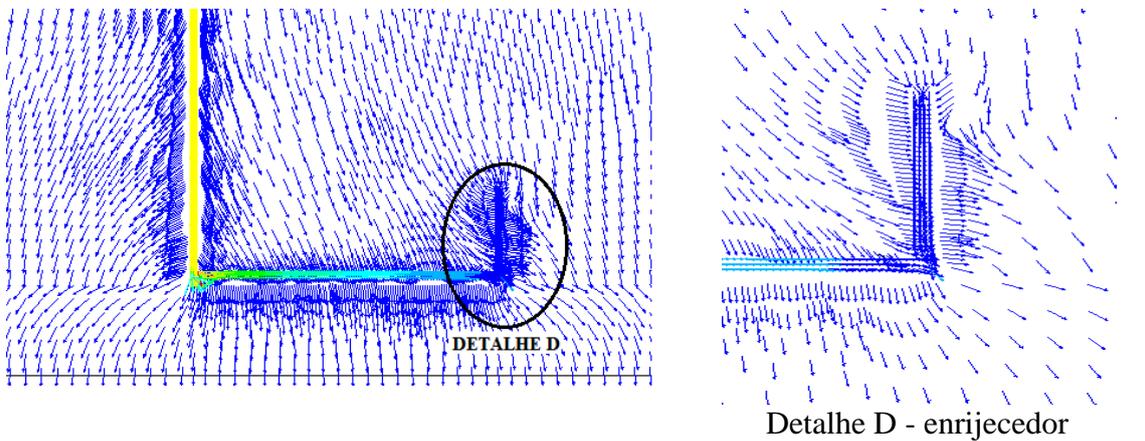


Figura 5.8–Distribuição do fluxo de calor para o fechamento somente com isolante – detalhe B.



Quando comparando o valor da resistência equivalente, obtida via simulação numérica, com os valores de resistência obtidos a partir das análises analíticas observa-se que o método da Zona Modificada resulta um valor mais próximo, proporcionando uma diferença em torno de 4,20% (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 – Diferença no valor da resistência térmica equivalente análise analítica versus análise numérica.

<b>Métodos</b>	<b>Isolante e Ar</b>	<b>Isolante</b>
	<b>Diferença (%)</b>	<b>Diferença (%)</b>
Caminho Paralelo	65,54	34,29
Planos Isotérmicos	9,31	17,41
Regra 50/50	47,6	15,74
Norma Dinamarquesa	36,6	6,98
Código Canadense de Energia	41,51	10,74
Planos Isotérmicos Modificados	70,19	44,61
Zona Modificada	-----	4,20

Considerando que no Brasil o sistema construtivo em LSF inclui como camadas intermediárias, uma camada de isolante térmico e uma camada de ar, têm-se que o método dos Planos Isotérmicos é o mais adequado no cálculo da resistência térmica equivalente do fechamento (Tabelas 5.1 e 5.3).

No entanto, se o fechamento incluir somente como camada interna com material isolante, têm-se que o método da Zona Modificada é o mais adequado no cálculo da resistência térmica equivalente do fechamento (Tabelas 5.2 e 5.3).

## **6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

Nos fechamentos em LSF a presença de perfis em aço pode gerar problemas como condução excessiva de calor entre o meio externo. Embora a área de troca de calor correspondente à alma do perfil em aço corresponda a menos que 0,5% da área do fechamento, o aço tem uma condutividade térmica em torno de 50 vezes maior que a dos materiais utilizados nas camadas, o que pode superestimar o fluxo de calor por condução através do fechamento.

Nesse contexto é relevante a discussão e estudo dos métodos simplificados para o cálculo da resistência térmica e transmitância térmica equivalentes dos fechamentos no sistema *Light Steel Framing*.

### **6.1 Conclusões**

Para todos os métodos simplificados dos cálculos da resistência térmica e transmitância térmica apresentados para a célula de fechamento típico no Brasil, sendo as camadas intermediárias uma camada de isolante térmico e uma camada de ar, o método dos Planos Isotérmicos é o que apresenta melhor resultado comparado ao resultado obtido via simulação numérica. Esse método de cálculo assume que a temperatura é uniforme em cada plano paralelo da face do elemento. O fluxo de calor através do fechamento é completamente redistribuído em cada camada (planos isotérmicos) e não há resistência ao fluxo de calor lateral, ou seja, fluxo de calor unidimensional.

Para a célula de fechamento onde a cavidade é totalmente preenchida com isolante térmico observa-se que os métodos tanto da Zona Modificada como dos Planos Isotérmicos são aqueles que apresentam resultados mais adequados comparados ao valor obtido via simulação numérica.

### **6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se:

- Análise térmica transiente do processo de condução de calor através do fechamento;

- Considerar condições de contorno de fluxo de calor convectivo, tanto na superfície interna quanto na superfície externa do fechamento;
- Simular outras condições de contorno afim de criar uma norma de avaliação de desempenho térmico em fechamentos em *Light Steel Framing*.

## REFERÊNCIAS

ARCELORMITAL DOFASCO. 1912. Disponível em <<http://dofasco.arcelormittal.com/>> Acesso em: 03 nov. 2014.

AKUTSU, M. **Método para avaliação do desempenho térmico de edificações no Brasil**. 1998. 156 f. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C236**: Standard test method for steady-state thermal performance of building assemblies by means of a guarded hot box, 1993. 11p.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (AISI). **Thermal design guide for exterior walls**. Washington: American Iron and Steel Institute, 1995. (Technical data).

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **ASHRAE Handbook: Fundamentals**. Atlanta, ASHRAE, 1997.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **ASHRAE Handbook: Fundamentals**. Atlanta, ASHRAE, 2013.

ANSYS (2013). **User`s Manual for Revision 15**. Swanson Analysis Systems Inc. Inc., Houston, PA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO DE PESQUISA DA CONSTRUÇÃO DA NOVA ZELÂNDIA (BRANZ, 1998). Disponível em: < [http://www.branz.co.nz/cms\\_display.php](http://www.branz.co.nz/cms_display.php) > Acesso em: 03 nov. 2014.

BEVILAQUA, R. **Estudo comparativo do desempenho de prédios estruturados em perfis formados a frio segundo os sistemas aporticado e Light Steel Framing**. 2005. 247 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

BHP - BROKEN HILL PROPRIETARY'S. 1885. Disponível em: <<http://www.bhpbilliton.com/home/Pages/default.aspx>> Acesso em: 03 nov. 2014.

BRASILIT. **BrasiPlac Plus**: Placa cimentícia impermeabilizada: catálogo. São Paulo, 2010.

CAMPOS, H. C. **Avaliação pós-ocupação de edificações construídas no sistema Light Steel Framing**. 2010. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PPGDEC, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

CARMINATTI JÚNIOR, R. **Análise do ciclo de vida energético de projeto de habitação de interesse social concebido em Light Steel Framing**. 2012. 162 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

CRASTO, R. C. M. **Arquitetura e tecnologia em sistemas construtivos industrializados: light steel framing**. 2005. 231 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

DANSK STANDARD. **DS 418**: Beregninger af Bygningers Varmetab, 2010. 123p.

ENERMODAL Engineering Limited, Oak Ridge National Labs, and Polish Academy of Sciences. 2001. **Modeling Two- and Three-Dimensional Heat Transfer Through Composite Wall and Roof Assemblies in Hourly Energy Simulation Programs (1145-TRP), Part I: Final Report**. Report prepared for ASHRAE, Atlanta, GA.

HENSEN, J.L.M.; LAMBERTS, R. (Editores). **Building Performance Simulation for Desing and Operation**, Spon Press, New York, 507p., 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6946**: Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method. British Standards Institution, London, 2007.

\_\_\_\_\_. **ISO 8990**: Thermal insulation – Determination of steady-state thermal transmission properties – Calibrated and guarded hot box, 1994.

GOMES, A. P. **Avaliação do desempenho térmico de edificações unifamiliares em Light Steel Framing**. 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

GOMES, A. P. **Método De Avaliação Do Desempenho Térmico De Edifícios Comerciais E Residenciais Em Light Steel Framing**. 2012. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

GORGOLEWSKI, M. Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing. **Building and Environment**, 2007. v. 42 p. 230–236.

INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE (IISI). **Thermal performance of Light Steel Frame Housing**. Brussels: International Iron and Steel Institute, 2001.

JARDIM, G. T. C.; CAMPOS, A. S. **Light Steel Framing**: uma aposta do setor siderúrgico no desenvolvimento tecnológico da construção civil. In: MARTINS, P. ET al. Inovação em construção civil: monografias. São Paulo: Instituto UNIEMP, 2005. p. 27-45.

LIMA, A. L. A. **Análise da construção de edificações em módulos pré-fabricados em LSF – Light Steel Framing**: ensaio projetual. 2008. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

MASISA. **Painel estrutural OSB Masisa**: recomendações práticas. Catálogo. Ponta Grossa: Masisa, 2003.

MODEL NATIONAL ENERGY CODE OF CANADA FOR BUILDINGS. NRC National Research Council of Canada, Ottawa, 1997.

NAHB - ASSOCIATION OF HOUSE BUILDERS. 1940. Disponível em: <<http://www.nahb.org/default.aspx>>. Acesso em: 03 nov. 2014.

ORNL - OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. Advanced Wall Systems. 1943. Disponível em: < <http://web.ornl.gov/sci/roofs+walls/AWT/Ref/Home.htm>>. Acesso em: 10 ago. 2014.

PENNA, F. C. F. **Análise de viabilidade econômica do sistema Light Steel Framing na execução de habitações de interesse social**: uma abordagem pragmática. 2009. 92 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – PPGCC, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

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

SANTIAGO, A. K. **O uso do sistema light steel framing associado a outros sistemas construtivos como fechamento vertical externo não-estrutural**. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

SANTIAGO, A. K.; FREITAS, A. M. S.; CRASTO, R. C. M. **Steel Framing: Arquitetura**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2012. (Série Manual de Construção em Aço).

VIVAN, A. L. **Projetos para produção de residências unifamiliares em Light Steel Framing.** 2011. 226 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – PPGCC, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

VON KRÜGER, P. G. **Análise de painéis de vedação nas edificações em estrutura metálica.** 2000. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2000.

## APÊNDICE A

### RESTÊNCIA TÉRMICA E TRANSMITÂNCIA TÉRMICA

No Apêndice A apresentam-se os cálculos da resistência térmica, transmitância térmica e fluxo de calor para todos os métodos apresentados no Capítulo 3 e usando um gradiente de temperatura de 10. Na Figura A.1 apresentam-se os esquemas das células dos fechamentos em *Light Steel Framing* usados para fazer esses cálculos e na Tabela A.1 as propriedades usadas para a análise.

Figura A.1- Esquemas das células dos fechamentos em *Light Steel Framing*

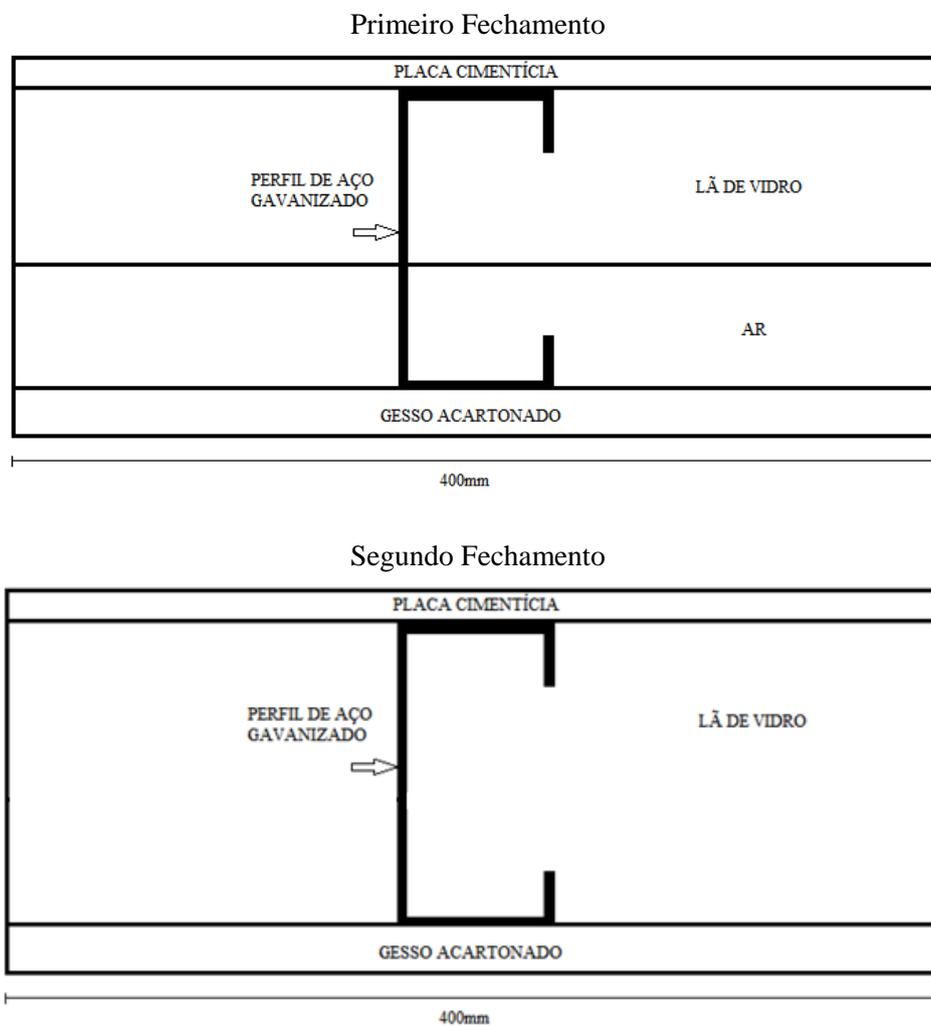


Tabela A.1 – Propriedades usadas para a análise térmica para o fechamento em *Light Steel Framing*.

Material	Espessura d (m)	Condutividade Térmica (W/mK)
Placa Cimentícia (PC)	0,01	0,95
Gesso Acartonado (GA)	0,0125	0,35
Lã de Vidro (iso)	0,05	0,045
Perfil de Aço	0,00095	55
Ar	0,04	0,0263

Fonte: NBR 15220-2; CLARKE, 1985; UFSC, 2006; RODRIGUES, 2006, INCROPERA, 2008.

### A.1 – Método do Caminho Paralelo

#### - Primeiro Fechamento

$$R_{pp} = \frac{1}{\left[\left(\frac{A_{aço}}{R_{aço}}\right) + \left(\frac{A_{isolante}}{R_{isolante}}\right)\right]} \quad (A.1)$$

$$A_{aço} = \frac{t}{L} = \frac{0,00095}{0,4} = 0,002375m^2 \quad (A.2)$$

$$A_{iso} = 1 - \frac{t}{l} = 1 - \frac{0,00095}{0,4} = 0,997625m^2 \quad (A.3)$$

$$R_{aço} = \frac{d_{aço}}{k_{aço}} + \frac{d_{PC}}{k_{PC}} + \frac{d_{GA}}{k_{GA}} = \frac{0,09}{55} + \frac{0,01}{0,95} + \frac{0,0125}{0,35}$$

$$R_{aço} = 0,04787 \frac{m^2K}{W} \quad (A.4)$$

$$R_{iso} = \frac{d_{iso}}{k_{iso}} + \frac{d_{PC}}{k_{PC}} + \frac{d_{GA}}{k_{GA}} + \frac{d_{ar}}{k_{ar}} = \frac{0,05}{0,042} + \frac{0,01}{0,95} + \frac{0,0125}{0,35} + \frac{0,04}{0,0263}$$

$$R_{iso} = 2,76 \frac{m^2K}{W} \quad (A.5)$$

Substituindo as equações A.2, A.3, A.4 e A.5 na equação A.1 têm-se a resistência térmica total:

$$R_{pp} = \frac{1}{\left[\left(\frac{0,002375}{0,04787}\right) + \left(\frac{0,997625}{2,76}\right)\right]} = 2,4327 \frac{m^2K}{W} \quad (A.6)$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_{pp}} = \frac{1}{2,4327} = 0,41111 \frac{W}{m^2K} \quad (A.7)$$

Fluxo de Calor:

$$q = \frac{\Delta t}{R_{pp}} = \frac{10}{2,4327} = 4,1107 \frac{W}{m^2} \quad (A.8)$$

- Segundo Fechamento

$$R_{pp} = \frac{1}{\left[\left(\frac{A_{aço}}{R_{aço}}\right) + \left(\frac{A_{isolante}}{R_{isolante}}\right)\right]} \quad (A.9)$$

$$A_{aço} = \frac{t}{L} = \frac{0,00095}{0,4} = 0,002375m^2 \quad (A.10)$$

$$A_{iso} = 1 - \frac{t}{l} = 1 - \frac{0,00095}{0,4} = 0,997625m^2 \quad (A.11)$$

$$R_{aço} = \frac{d_{aço}}{k_{aço}} + \frac{d_{PC}}{k_{PC}} + \frac{d_{GA}}{k_{GA}} = \frac{0,09}{55} + \frac{0,01}{0,95} + \frac{0,0125}{0,35}$$

$$R_{aço} = 0,04787 \frac{m^2K}{W} \quad (A.12)$$

$$R_{iso} = \frac{d_{iso}}{k_{iso}} + \frac{d_{PC}}{k_{PC}} + \frac{d_{GA}}{k_{GA}} = \frac{0,05}{0,042} + \frac{0,01}{0,95} + \frac{0,0125}{0,35}$$

$$R_{iso} = 1,2367 \frac{m^2K}{W} \quad (A.13)$$

Substituindo as equações A.10, A.11, A.12 e A.13 na equação A.9 têm-se a resistência térmica total:

$$R_{pp} = \frac{1}{\left[ \left( \frac{0,002375}{0,04787} \right) + \left( \frac{0,997625}{1,2367} \right) \right]} = 1,1678 \frac{m^2K}{W} \quad (A.14)$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_{pp}} = \frac{1}{1,1678} = 0,8563 \frac{W}{m^2K} \quad (A.15)$$

Fluxo de Calor:

$$q = \frac{\Delta t}{R_{pp}} = \frac{10}{1,1678} = 8,5631 \frac{W}{m^2} \quad (A.16)$$

## A.2 – Método dos Planos Isotérmicos

$$R_{ip} = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se} \quad (A.17)$$

Onde  $R_{se}$  e  $R_{si}$  estão de acordo com a Tabela A.2.

Tabela A.2 – Resistência térmica superficial interna e externa.

$R_{si} (m^2.K)/W$			$R_{se} (m^2.K)/W$		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
⇒	⇐	⇓	⇒	⇐	⇓
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: adaptado da NBR 15220 (ABNT, 2005).

### - Primeiro Fechamento

$$R_1 = \frac{d_{PC}}{k_{PC}} = \frac{0,01}{0,95} = 0,0105 \frac{m^2 K}{W} \quad (A.18)$$

$$R_3 = \frac{d_{GA}}{k_{GA}} = \frac{0,0125}{0,35} = 0,0357 \frac{m^2 K}{W} \quad (A.19)$$

$$R_{iso} = \frac{d_{iso}}{k_{iso}} + \frac{d_{ar}}{k_{ar}} = \frac{0,05}{0,042} + \frac{0,04}{0,0263} = 2,71 \frac{m^2 K}{W} \quad (A.20)$$

$$R_{aço} = \frac{d_{aço}}{k_{aço}} = \frac{0,09}{55} = 0,00164 \frac{m^2 K}{W} \quad (A. 21)$$

$$R_2 = \frac{1}{\left[ \left( \frac{A_{aço}}{R_{aço}} \right) + \left( \frac{A_{isolante}}{R_{isolante}} \right) \right]} = \frac{1}{\left[ \left( \frac{0,002375}{0,00164} \right) + \left( \frac{0,997625}{2,71} \right) \right]} \\ = 0,5506 \frac{m^2 K}{W} \quad (A. 22)$$

Substituindo as equações A.18, A.19 e A.22 na equação A.17 têm-se a resistência térmica total:

$$R_{ip} = 0,13 + 0,0105 + 0,5506 + 0,0357 + 0,04 = 0,7668 \frac{m^2 K}{W} \quad (A. 23)$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_{ip}} = \frac{1}{0,7668} = 1,3041 \frac{W}{m^2 K} \quad (A. 24)$$

Fluxo de Calor:

$$q = \frac{\Delta t}{R_{ip}} = \frac{10}{0,7668} = 13,0412 \frac{W}{m^2} \quad (A. 25)$$

- Segundo Fechamento

$$R_1 = \frac{d_{PC}}{k_{PC}} = \frac{0,01}{0,95} = 0,0105 \frac{m^2 K}{W} \quad (A. 26)$$

$$R_3 = \frac{d_{GA}}{k_{GA}} = \frac{0,0125}{0,35} = 0,0357 \frac{m^2K}{W} \quad (A.27)$$

$$R_{iso} = \frac{d_{iso}}{k_{iso}} = \frac{0,05}{0,042} = 1,19 \frac{m^2K}{W} \quad (A.28)$$

$$R_{aço} = \frac{d_{aço}}{k_{aço}} = \frac{0,09}{55} = 0,00164 \frac{m^2K}{W} \quad (A.29)$$

$$R_2 = \frac{1}{\left[ \left( \frac{A_{aço}}{R_{aço}} \right) + \left( \frac{A_{isolante}}{R_{isolante}} \right) \right]} = \frac{1}{\left[ \left( \frac{0,002375}{0,00164} \right) + \left( \frac{0,997625}{1,19} \right) \right]} \\ = 0,4373 \frac{m^2K}{W} \quad (A.30)$$

Substituindo as equações A.26, A.27 e A.30 na equação A.17 têm-se a resistência térmica total:

$$R_{ip} = 0,13 + 0,0105 + 0,4373 + 0,0357 + 0,04 = 0,6535 \frac{m^2K}{W} \quad (A.31)$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_{ip}} = \frac{1}{0,6535} = 1,5302 \frac{W}{m^2K} \quad (A.32)$$

Fluxo de Calor:

$$q = \frac{\Delta t}{R_{ip}} = \frac{10}{0,6535} = 15,3022 \frac{W}{m^2} \quad (A.33)$$

### A.3 - Média dos métodos do Caminho Paralelo e Planos Isotérmicos

#### - Primeiro Fechamento

$$R_t = \frac{R_{pp} + R_{ip}}{2} = \frac{2,4327 + 0,7668}{2} = 1,5997 \frac{m^2 K}{W} \quad (A.34)$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{1,5997} = 0,6251 \frac{W}{m^2 K} \quad (A.35)$$

Fluxo de Calor:

$$q = \frac{\Delta t}{R_t} = \frac{10}{1,5997} = 6,2510 \frac{W}{m^2} \quad (A.36)$$

#### - Segundo Fechamento

$$R_t = \frac{R_{pp} + R_{ip}}{2} = \frac{1,1678 + 0,6535}{2} = 0,9106 \frac{m^2 K}{W} \quad (A.37)$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{0,9106} = 1,0982 \frac{W}{m^2 K} \quad (A.38)$$

Fluxo de Calor:

$$q = \frac{\Delta t}{R_t} = \frac{10}{0,9106} = 10,9818 \frac{W}{m^2} \quad (A.39)$$

#### A.4 – Norma Dinamarquesa

##### - Primeiro Fechamento

$$R_t = \frac{R_{pp} + 2 \cdot R_{ip}}{3} = \frac{2,4327 + 2 \cdot 0,7668}{3} = 1,3221 \frac{m^2 K}{W} \quad (A.40)$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{1,3221} = 0,7564 \frac{W}{m^2 K} \quad (A.41)$$

Fluxo de Calor:

$$q = \frac{\Delta t}{R_t} = \frac{10}{1,3221} = 7,5637 \frac{W}{m^2} \quad (A.42)$$

##### - Segundo Fechamento

$$R_t = \frac{R_{pp} + 2 \cdot R_{ip}}{3} = \frac{1,1678 + 2 \cdot 0,6535}{3} = 0,8249 \frac{m^2 K}{W} \quad (A.43)$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{0,8249} = 1,2123 \frac{W}{m^2 K} \quad (A.44)$$

Fluxo de Calor:

$$q = \frac{\Delta t}{R_t} = \frac{10}{0,8249} = 12,1227 \frac{W}{m^2} \quad (A.45)$$

## A.5 – Norma Canadense

Na Tabela A.3 mostra-se os fatores de ponderação utilizados para o cálculo do Método Canadense de Energia.

Tabela A.3 Fatores de ponderação utilizados no Método MNEC do Código Canadense de Energia.

Distância entre montantes	$K_1$	$K_2$
< 500 mm sem camada isolante	1/3	2/3
< 500 mm com camada isolante	2/5	3/5
> 500 mm em todos os casos	1/2	1/2

FONTE: adaptado de IISI (2001).

Sendo a distância entre montantes menor que 500 mm e camada com isolante, assim  $K_1$  é 2/5 e  $K_2$  é 3/5.

### - Primeiro Fechamento

$$\begin{aligned} R_t &= (K_1 \cdot R_{pp}) + (K_2 \cdot R_{ip}) = \left(\frac{2}{5} \cdot 2,4327\right) + \left(\frac{3}{5} \cdot 0,7668\right) \\ &= 1,4332 \frac{m^2 K}{W} \end{aligned} \quad (A.46)$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{1,4332} = 0,6977 \frac{W}{m^2 K} \quad (A.47)$$

Fluxo de Calor:

$$q = \frac{\Delta t}{R_t} = \frac{10}{1,4332} = 6,9776 \frac{W}{m^2} \quad (A.48)$$

- Segundo Fechamento

$$\begin{aligned} R_t &= (K_1 \cdot R_{pp}) + (K_2 \cdot R_{ip}) = \left(\frac{2}{5} \cdot 1,1678\right) + \left(\frac{3}{5} \cdot 0,6535\right) \\ &= 0,8596 \frac{m^2 K}{W} \end{aligned} \quad (A.49)$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{0,8596} = 1,1633 \frac{W}{m^2 K} \quad (A.50)$$

Fluxo de Calor:

$$q = \frac{\Delta t}{R_t} = \frac{10}{0,8596} = 11,6333 \frac{W}{m^2} \quad (A.51)$$

#### **A.6 – Método dos Planos Isotérmicos Modificado**

$$R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se} \quad (A.52)$$

- Primeiro Fechamento

$$R_1 = \frac{d_{PC}}{k_{PC}} = \frac{0,01}{0,95} = 0,0105 \frac{m^2 K}{W} \quad (A.53)$$

$$R_3 = \frac{d_{GA}}{k_{GA}} = \frac{0,0125}{0,35} = 0,0357 \frac{m^2 K}{W} \quad (A.54)$$

$$R_{aço} = \left[ \left( \frac{d_{aço}}{k_{aço}} \right) \cdot \left( \frac{W}{t} \right) \right] + R_{c1} + R_{c2} \quad (A.55)$$

De acordo com IISI (2001) um valor típico para a resistência de contato é de  $0,035 \text{m}^2\text{K/W}$ , assim substituindo em A.55 tem:

$$R_{aço} = \left[ \left( \frac{0,09}{55} \right) \cdot \left( \frac{0,04}{0,00095} \right) \right] + 0,035 + 0,035 = 0,1389 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \quad (A.56)$$

$$R_2 = \frac{1}{\left[ \left( \frac{A_{aço}}{R_{aço}} \right) + \left( \frac{A_{isolante}}{R_{isolante}} \right) \right]} = \frac{1}{\left[ \left( \frac{0,002375}{0,1389} \right) + \left( \frac{0,997625}{2,71} \right) \right]}$$

$$= 2,5959 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \quad (A.57)$$

Substituindo as equações A.53, A.54 e A.57 na equação A.52 têm-se a resistência térmica total:

$$R_t = 0,13 + 0,0105 + 2,5959 + 0,0357 + 0,04 = 2,8121 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \quad (A.58)$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{2,8121} = 0,3556 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (A.59)$$

Fluxo de Calor:

$$q = \frac{\Delta t}{R_t} = \frac{10}{2,8121} = 3,5561 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (A.60)$$

- Segundo Fechamento

$$R_1 = \frac{d_{PC}}{k_{PC}} = \frac{0,01}{0,95} = 0,0105 \frac{m^2K}{W} \quad (A.61)$$

$$R_3 = \frac{d_{GA}}{k_{GA}} = \frac{0,0125}{0,35} = 0,0357 \frac{m^2K}{W} \quad (A.62)$$

$$R_{aço} = \left[ \left( \frac{d_{aço}}{k_{aço}} \right) \cdot \left( \frac{W}{t} \right) \right] + R_{c1} + R_{c2} \quad (A.63)$$

De acordo com IISI (2001) um valor típico para a resistência de contato é de 0,035m<sup>2</sup>K/W, assim substituindo em A.63 tem:

$$R_{aço} = \left[ \left( \frac{0,09}{55} \right) \cdot \left( \frac{0,04}{0,00095} \right) \right] + 0,035 + 0,035 = 0,1389 \frac{m^2K}{W} \quad (A.64)$$

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{1}{\left[ \left( \frac{A_{aço}}{R_{aço}} \right) + \left( \frac{A_{isolante}}{R_{isolante}} \right) \right]} = \frac{1}{\left[ \left( \frac{0,002375}{0,1389} \right) + \left( \frac{0,997625}{1,19} \right) \right]} \\ &= 1,1690 \frac{m^2K}{W} \end{aligned} \quad (A.65)$$

Substituindo as equações A.61, A.62 e A.65 na equação A.52 têm-se a resistência térmica total:

$$R_t = 0,13 + 0,0105 + 1,1690 + 0,0357 + 0,04 = 1,3852 \frac{m^2K}{W} \quad (A.66)$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{1,3852} = 0,7219 \frac{W}{m^2K} \quad (A. 67)$$

Fluxo de Calor:

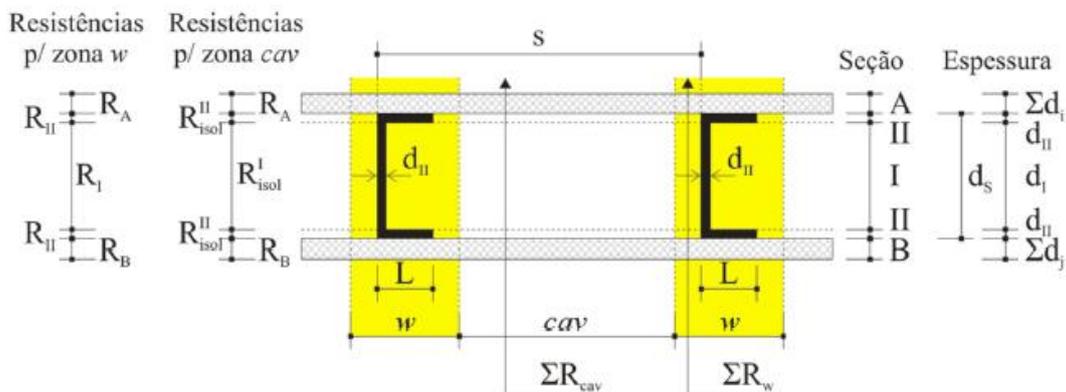
$$q = \frac{\Delta t}{R_t} = \frac{10}{1,3852} = 7,2192 \frac{W}{m^2} \quad (A. 68)$$

### A.7 – Método de Zona Modificado

No Método de Zona Modificado toda a cavidade do fechamento é preenchida com isolante térmico, assim o cálculo é feito apenas para o Segundo Fechamento. Na Figura A.2 apresenta os parâmetros para o cálculo da resistência térmica.

$$R_t = \frac{R_w \cdot R_{cav} \cdot S}{w \cdot (R_{cav} - R_w) + S \cdot R_w} \quad (A. 69)$$

Figura A.2 - Parâmetros para o cálculo da resistência térmica no método MZM.



Fonte: Adaptado de ASHRAE, 1997 (Gomes, 2012).

## Resistividades

- A (Placa Cimentícia)

$$r_A = \frac{1}{k} = \frac{1}{0,95} = 1,0526 \frac{mK}{W} \quad (A.70)$$

- II (Perfil)

$$r_{aço} = \frac{1}{k} = \frac{1}{55} = 0,0182 \frac{mK}{W} \quad (A.71)$$

- I e II (Isolante)

$$r_{iso} = \frac{1}{k} = \frac{1}{0,042} = 23,8095 \frac{mK}{W} \quad (A.72)$$

- B (Gesso Acartonado)

$$r_B = \frac{1}{k} = \frac{1}{0,35} = 2,8571 \frac{mK}{W} \quad (A.73)$$

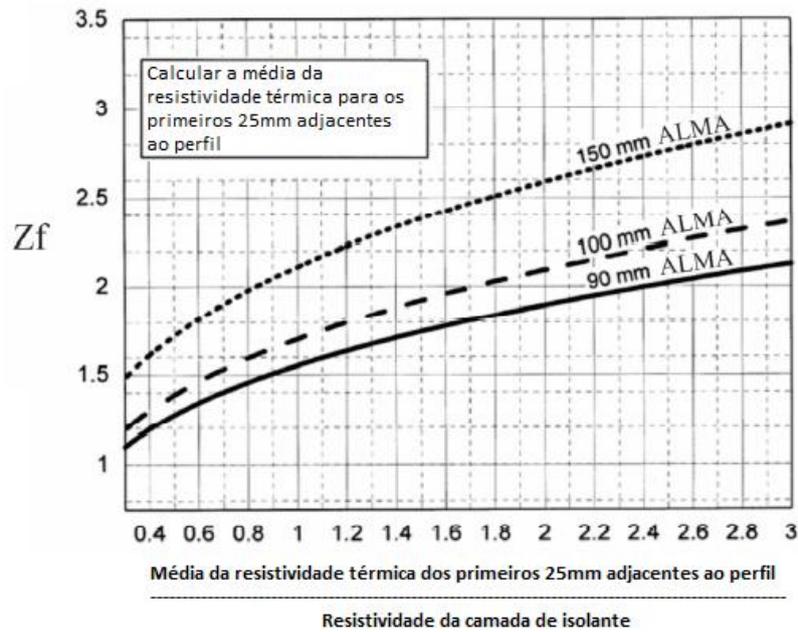
## Fator de Zona ( $Z_f$ )

$Z_f = -0,5$  (se  $\sum d_i$  e  $\sum d_j \leq 16mm$  e resistividade do fechamento  $\leq 10,4$  m.K/W);

$Z_f = 0,5$  (se  $\sum d_i$  e  $\sum d_j \leq 16mm$  e resistividade do fechamento  $> 10,4$  m.K/W);

Para  $\sum d_i$  ou  $\sum d_j > 16mm$ , encontra-se o valor de  $Z_f$  no gráfico apresentado na Figura A.3.

Figura A.3 – Carta do Fator de zona  $Z_f$ .



Fonte: adaptado de ASHRAE, 1997.

Sendo  $\sum d_i$  e  $\sum d_j \leq 16mm$  e resistividade do fechamento  $\leq 10,4$  m.K/W, assim

$Z_f = -0,5$ . E sendo  $\sum d_i < \sum d_j$  usa-se o  $\sum d_j$ .

$$w = L + Z_f \cdot \sum d_j = 0,04 + (-0,5) \cdot 0,0125m \quad (A.74)$$

$$R_A = r_A \cdot d_i = 1,0526 \cdot 0,01 = 0,0105 \frac{m^2K}{W} \quad (A.75)$$

$$R_B = r_B \cdot d_j = 2,8571 \cdot 0,0125 = 0,0357 \frac{m^2K}{W} \quad (A.76)$$

$$R_{iso}^I = r_{iso} \cdot d_I = 23,8095 \cdot 0,0881 = 2,0976 \frac{m^2K}{W} \quad (A.77)$$

$$R_{iso}^{II} = r_{iso} \cdot d_{II} = 23,8095 \cdot 0,00095 = 0,0226 \frac{m^2K}{W} \quad (A.78)$$

$$R_{aço}^I = r_{aço} \cdot d_I = 0,0182 \cdot 0,0881 = 0,0016 \frac{m^2K}{W} \quad (A.79)$$

$$R_{aço}^{II} = r_{aço} \cdot d_{II} = 0,0182 \cdot 0,00095 = 0,00001729 \frac{m^2 K}{W} \quad (A.80)$$

$$\begin{aligned} R_I &= \frac{R_{aço}^I \cdot R_{iso}^I \cdot w}{d_{II} \cdot (R_{iso}^I - R_{aço}^I) + w \cdot R_{aço}^I} \\ &= \frac{0,0016 \cdot 2,0976 \cdot 0,0337}{0,00095 \cdot (2,0976 - 0,0016) + 0,0337 \cdot 0,0016} \\ &= 0,0553 \frac{m^2 K}{W} \end{aligned} \quad (A.81)$$

$$\begin{aligned} R_{II} &= \frac{R_{aço}^{II} \cdot R_{iso}^{II} \cdot w}{L \cdot (R_{iso}^{II} - R_{aço}^{II}) + w \cdot R_{aço}^{II}} \\ &= \frac{0,00001729 \cdot 0,0226 \cdot 0,0337}{0,04 \cdot (0,0226 - 0,00001729) + 0,0337 \cdot 0,00001729} \\ &= 1,4568 \cdot 10^{-5} \frac{m^2 K}{W} \end{aligned} \quad (A.82)$$

$$\begin{aligned} R_{cav} &= R_A + R_B + R_{iso}^I + 2 \cdot R_{iso}^{II} \\ &= 0,0105 + 0,0357 + 2,0976 + 2 \cdot 0,0226 \\ &= 2,1890 \frac{m^2 K}{W} \end{aligned} \quad (A.83)$$

$$\begin{aligned} R_w &= R_A + R_B + R_I + 2 \cdot R_{II} \\ &= 0,0105 + 0,0357 + 0,0553 + 2 \cdot (1,4568 \cdot 10^{-5}) \\ &= 0,1015 \frac{m^2 K}{W} \end{aligned} \quad (A.84)$$

Substituindo as equações A.74, A.83 e A.84 na equação A.69 têm-se a resistência térmica total:

$$R_t = \frac{R_w \cdot R_{cav} \cdot S}{w \cdot (R_{cav} - R_w) + S \cdot R_w} = \frac{0,1015 \cdot 2,1890 \cdot 0,4}{0,0337 \cdot (2,1890 - 0,1015) + 0,4 \cdot 0,1015}$$

$$= 0,8010 \frac{m^2 K}{W} \quad (A. 85)$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{0,8010} = 1,2484 \frac{W}{m^2 K} \quad (A. 86)$$

Fluxo de Calor:

$$q = \frac{\Delta t}{R_t} = \frac{10}{0,8010} = 12,4839 \frac{W}{m^2} \quad (A. 87)$$

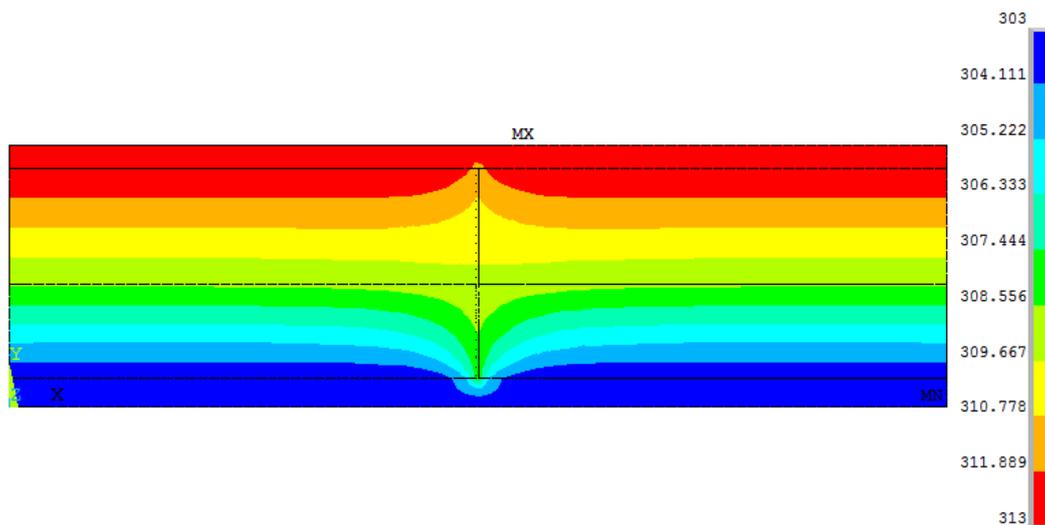
## APÊNDICE B

### FECHAMENTOS COM OUTROS PERFIS EM AÇO

Neste apêndice apresentam-se os resultados dos cálculos, via simulação numérica, da resistência térmica, transmitância térmica e do fluxo de calor, considerando-se fechamentos com perfis em aço, com outras seções e espessuras.

Na Figura B.1 apresenta-se a estratificação da temperatura para o fechamento que apresenta isolante e camada de ar como camadas intermediárias e o perfil em aço em forma de barra.

Figura B.1 – Estratificação da temperatura para o fechamento com isolante e ar como camadas intermediárias e o perfil em aço como uma barra de 0,95mm.



Observa-se pelas curvas mostradas na Figura B.1 uma simetria em relação à barra em aço. Ocorre também uma diferença na distribuição de temperatura na região da barra, em aço, em relação à região afastada deste elemento. Isso ocorre uma vez que a condutividade térmica do aço é bem superior àquela dos demais materiais e desse modo torna-se evidente nesta região um mecanismo de condução de calor bidimensional (Figura B.2 e B.3). O fluxo de calor nesta região resulta em torno 11 vezes maior do que o fluxo de condução numa parede sem a presença da barra em aço.

Figura B.2—Distribuição do fluxo de calor para o fechamento com isolante e ar como camadas intermediárias e o perfil em aço como uma barra de 0,95mm.

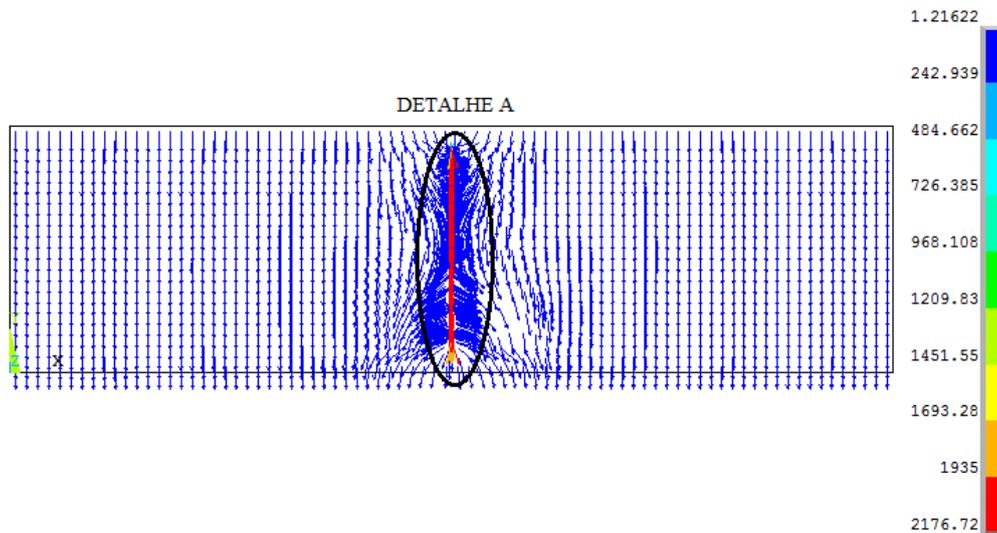
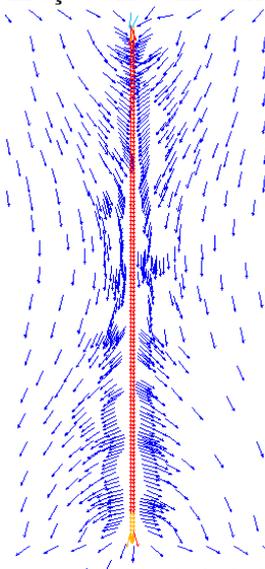


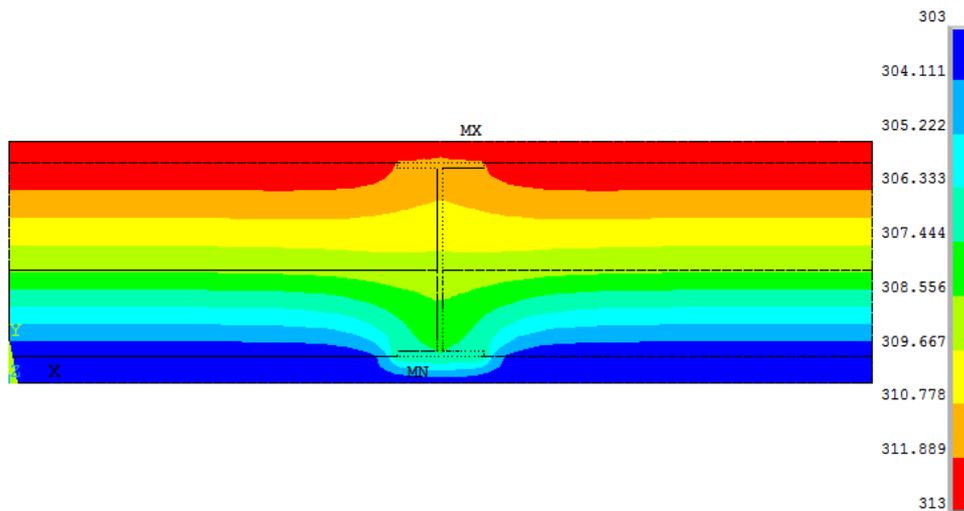
Figura B.3—Distribuição do fluxo de calor para o fechamento com isolante e ar como camadas intermediárias e o perfil em aço como uma barra de 0,95mm - detalhe A.



Para o fechamento, mostrado na Figura B.1, a resistência térmica equivalente resultou em  $R_t = 1,1974\text{m}^2\text{K/W}$  e o fluxo de calor em  $8,3515\text{W/m}^2$ . Este valor do fluxo de calor equivale a um valor em torno de 46% maior que valor do fluxo de calor para um fechamento sem presença da barra em aço.

Na Figura B.4 apresenta-se a estratificação da temperatura para o fechamento que apresenta isolante e camada de ar como camadas intermediárias e o perfil I em aço com espessura de 2,46mm.

Figura B.4– Estratificação da temperatura para o fechamento com isolante e ar como camadas intermediárias e o perfil I em aço com espessura de 2,46mm.



Observa-se pelas curvas mostradas na Figura B.4 uma simetria em relação ao perfil I em aço. Ocorre também uma diferença na distribuição de temperatura na região do perfil I, em aço, em relação à região afastada deste elemento, caracterizando um mecanismo de condução de calor bidimensional (Figura B.5 e B.6), em função da condutividade térmica do aço ser superior àquela dos demais materiais. O fluxo de calor nesta região resulta em torno 18 vezes maior do que o fluxo de condução numa parede sem a presença do perfil I.

Figura B.5–Distribuição do fluxo de calor para fechamento com isolante e ar e perfil I em aço.

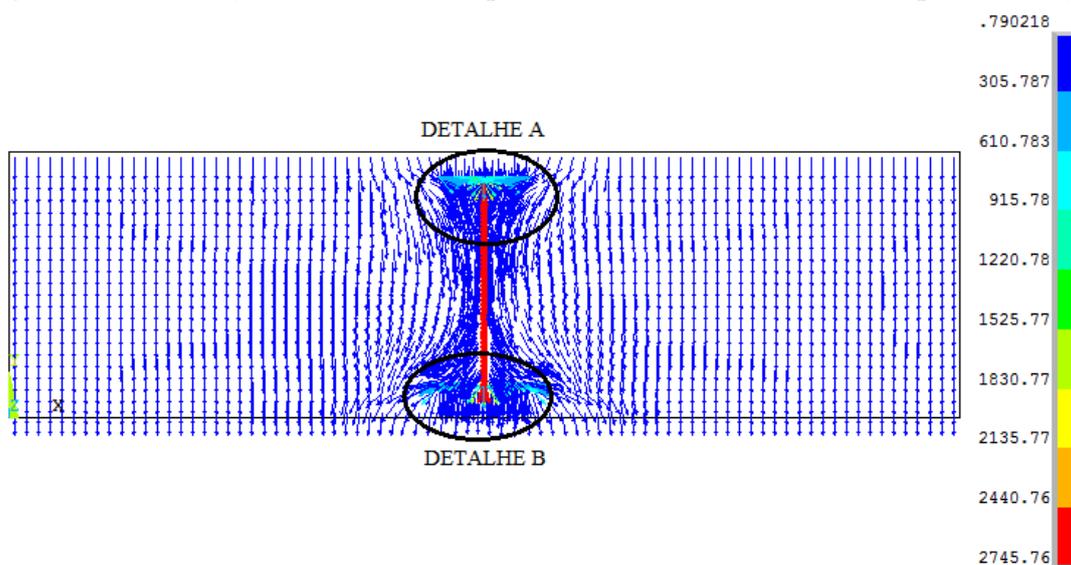
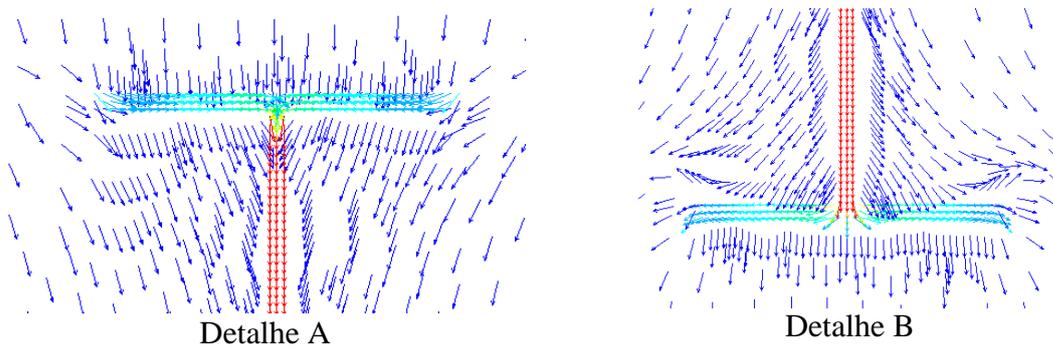


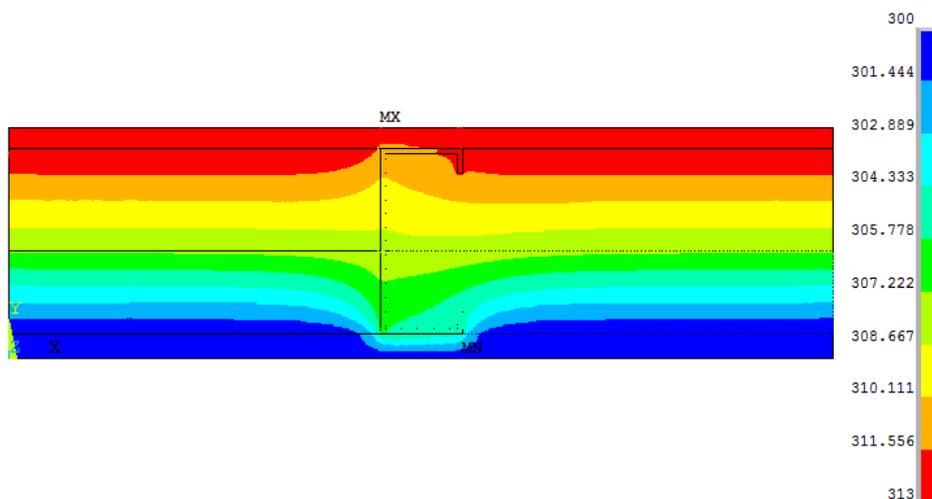
Figura B.6–Distribuição do fluxo de calor para fechamento com isolante e ar e perfil I em aço – detalhe A e B.



Para o fechamento, mostrado na Figura B.4, a resistência térmica equivalente resultou em  $R_t = 0,5270\text{m}^2\text{K/W}$  e o fluxo de calor em  $18,9758\text{W/m}^2$ . Este valor do fluxo de calor equivale a um valor em torno de 74% maior que valor do fluxo de calor para um fechamento sem presença do perfil.

Na Figura B.7 apresenta-se a estratificação da temperatura para o fechamento que apresenta isolante e camada de ar como camadas intermediárias e o perfil Ue (U enrijecido) com espessura de 2,46mm.

Figura B.7 – Estratificação da temperatura para o fechamento com isolante e ar como camadas intermediárias e o perfil Ue (U enrijecido) com espessura de 2,46mm.



Observa-se pelas curvas mostradas na Figura B.7 uma diferença na distribuição de temperatura na região do perfil, em aço, em relação à região afastada deste elemento,

caracterizando um mecanismo de condução de calor bidimensional (Figura B.8 a B.10), em função da condutividade térmica do aço ser superior àquela dos demais materiais. O fluxo de calor nesta região resulta em torno 16 vezes maior do que o fluxo de condução numa parede sem a presença do perfil.

Figura B.8–Distribuição do fluxo de calor para o fechamento com isolante e ar como camadas intermediárias e o perfil Ue (U enrijecido) – Detalhe A e B.

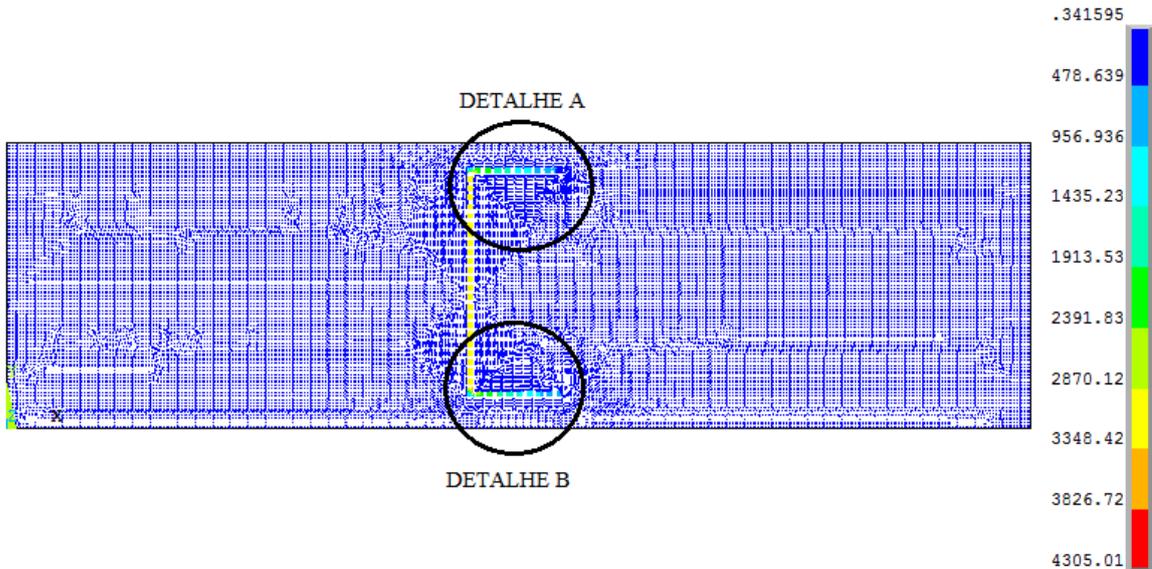


Figura B.9–Distribuição do fluxo de calor para o fechamento com isolante e ar como camadas intermediárias e o perfil Ue (U enrijecido) – Detalhe A.

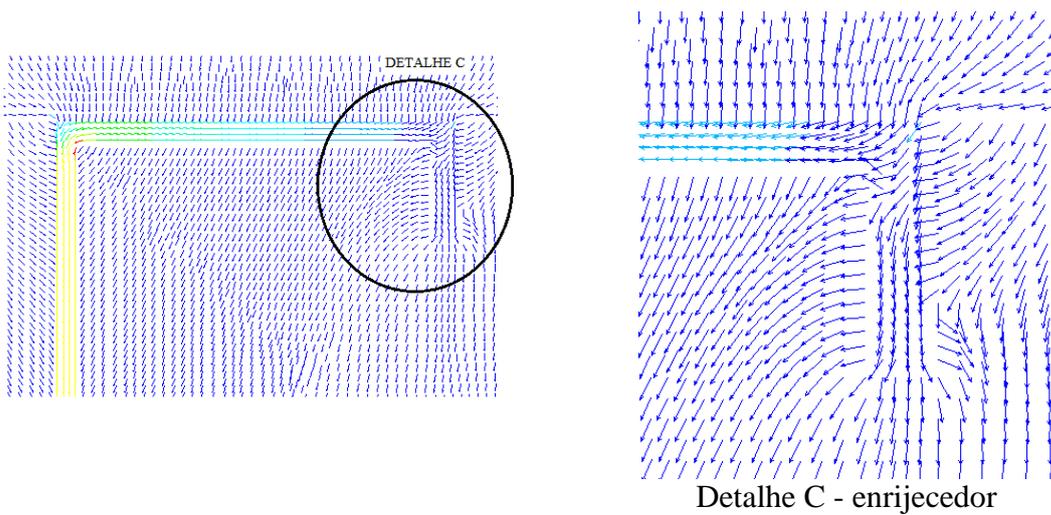
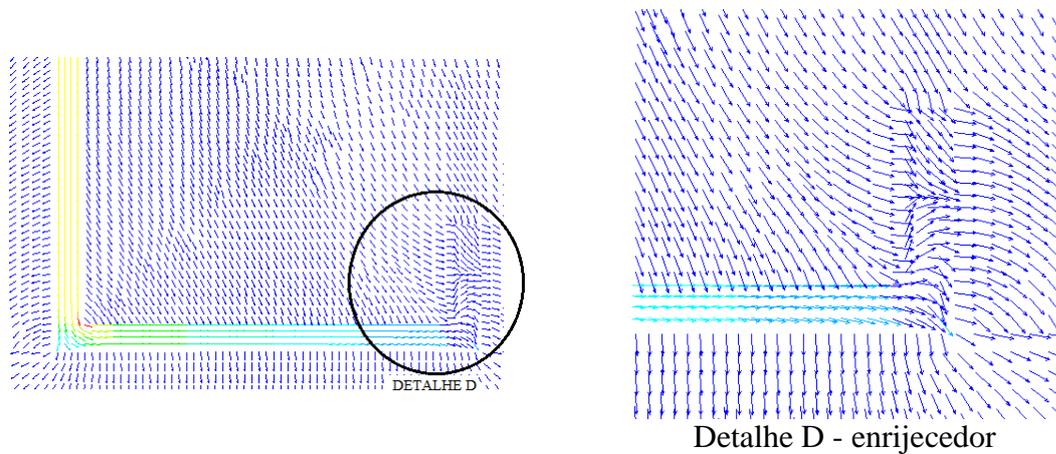


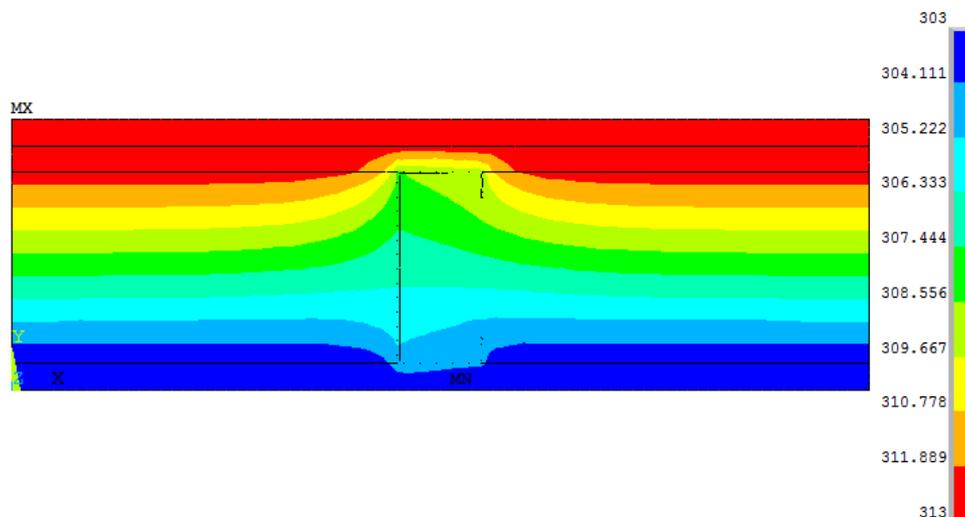
Figura B.10–Distribuição do fluxo de calor para o fechamento com isolante e ar como camadas intermediárias e o perfil Ue (U enrijecido) – Detalhe B.



Para o fechamento, mostrado na Figura B.7, a resistência térmica equivalente resultou em  $R_t = 0,3986\text{m}^2\text{K/W}$  e o fluxo de calor em  $25,0873\text{W/m}^2$ . Este valor do fluxo de calor equivale a um valor em torno de 76% maior que valor do fluxo de calor para um fechamento sem presença do perfil.

Na Figura B.11 apresenta-se a estratificação da temperatura para o fechamento (OSB + Reboco) somente com isolante como camada intermediária e o perfil Ue (U enrijecido) com espessura de 0,95mm.

Figura B.11 – Estratificação da temperatura para o fechamento (OSB + Reboco) somente com isolante como camada intermediária e o perfil Ue (U enrijecido) com espessura de 0,95mm.



Observa-se pelas curvas mostradas na Figura B.11 uma diferença na distribuição de temperatura na região do perfil em relação à região afastada deste elemento,

caracterizando um mecanismo de condução de calor bidimensional (Figura B.12e B.13), em função da condutividade térmica do aço ser superior àquela dos demais materiais. O fluxo de calor nesta região resulta em torno 7 vezes maior do que o fluxo de condução numa parede sem a presença do perfil.

Figura B.12–Distribuição do fluxo de calor para o fechamento (OSB + Reboco) somente com isolante como camada intermediária e o perfil Ue (U enrijecido) com espessura de 0,95mm – Detalhe A e B.

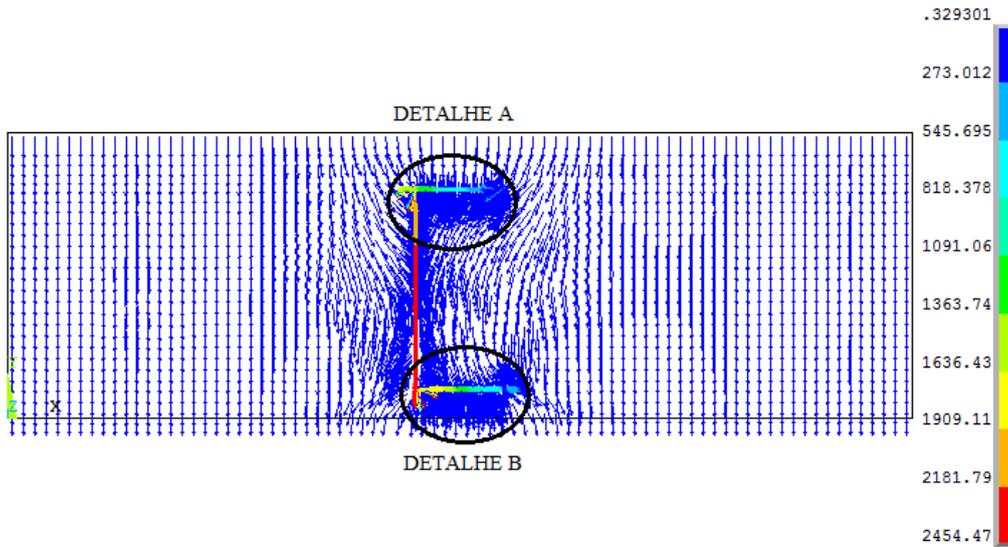


Figura B.13–Distribuição do fluxo de calor para o fechamento (OSB + Reboco) somente com isolante como camada intermediária e o perfil Ue (U enrijecido) com espessura de 0,95mm – Detalhe A.

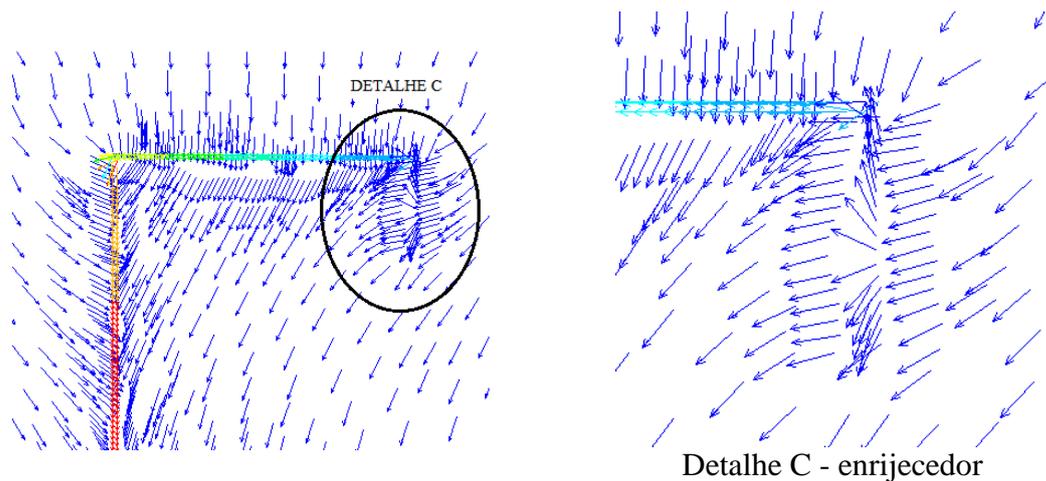
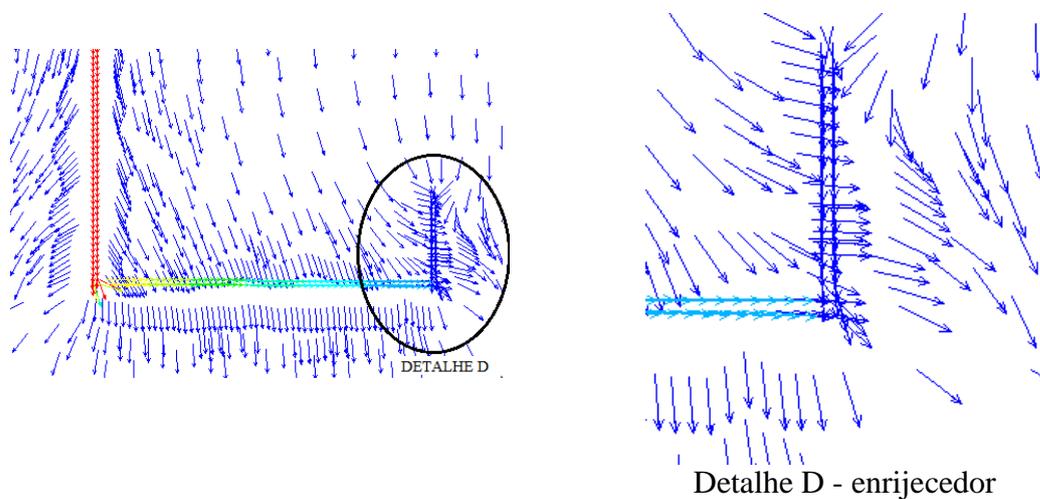


Figura B.14—Distribuição do fluxo de calor para o fechamento (OSB + Reboco) somente com isolante como camada intermediária e o perfil Ue (U enrijecido) com espessura de 0,95mm – Detalhe B.



Para o fechamento, mostrado na Figura B.11, a resistência térmica equivalente resultou em  $R_t = 1,0708\text{m}^2\text{K}/\text{W}$  e o fluxo de calor em  $9,3388\text{W}/\text{m}^2$ . Este valor do fluxo de calor equivale a um valor em torno de 50% maior que valor do fluxo de calor para um fechamento sem presença do perfil.

## APÊNDICE C

### FECHAMENTO COM PREENCHIMENTO SOMENTE EM AR

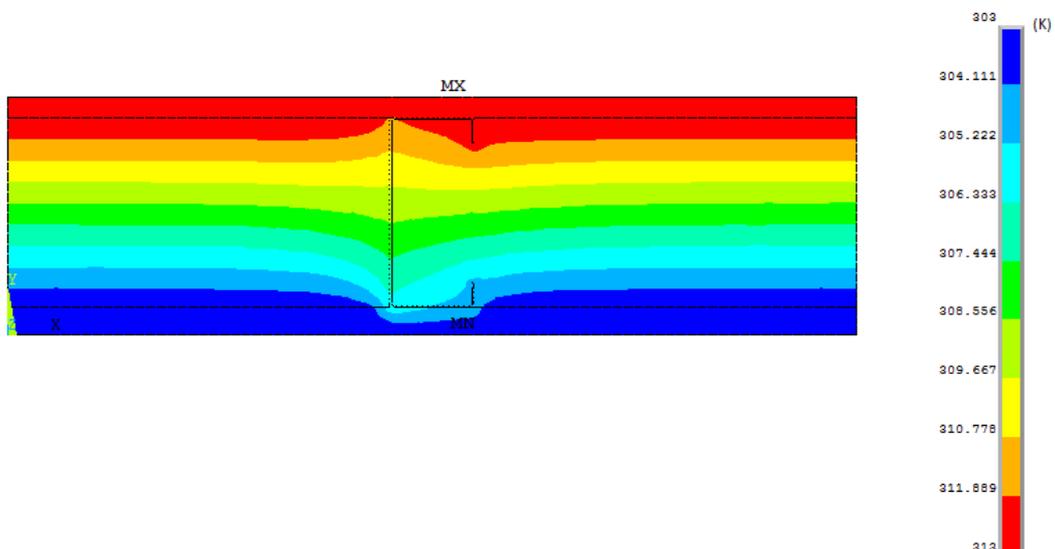
Neste apêndice apresentam-se os resultados dos cálculos, via simulação numérica, da resistência térmica, transmitância térmica e do fluxo de calor, considerando-se o fechamento, conforme o modelo apresentado na Figura 4.1, com cavidade somente em ar (Figura C.1).

Figura C.1- Esquema da célula do fechamento em *Light Steel Framing* com cavidade preenchida com ar



Na Figura C.2 apresenta-se a estratificação da temperatura para o fechamento que apresenta somente a camada de ar como camada intermediária, conforme mostrado na Figura C.1.

Figura C.2- Estratificação da temperatura para o fechamento com a cavidade preenchida com ar.



Como pode se observado na Figura C.2 há uma diferença na distribuição de temperatura na região do perfil, em aço, em relação à região afastada deste elemento, de modo similar ao comportamento mostrado na Figura 5.1, caracterizando um mecanismo de condução de calor bidimensional (Figuras C.3 a C.5). O fluxo de calor nesta região resulta em torno 12 vezes maior do que o fluxo de condução numa parede sem a presença do perfil em aço.

Figura C.3 - Distribuição do fluxo de calor para fechamento com a cavidade preenchida com ar.

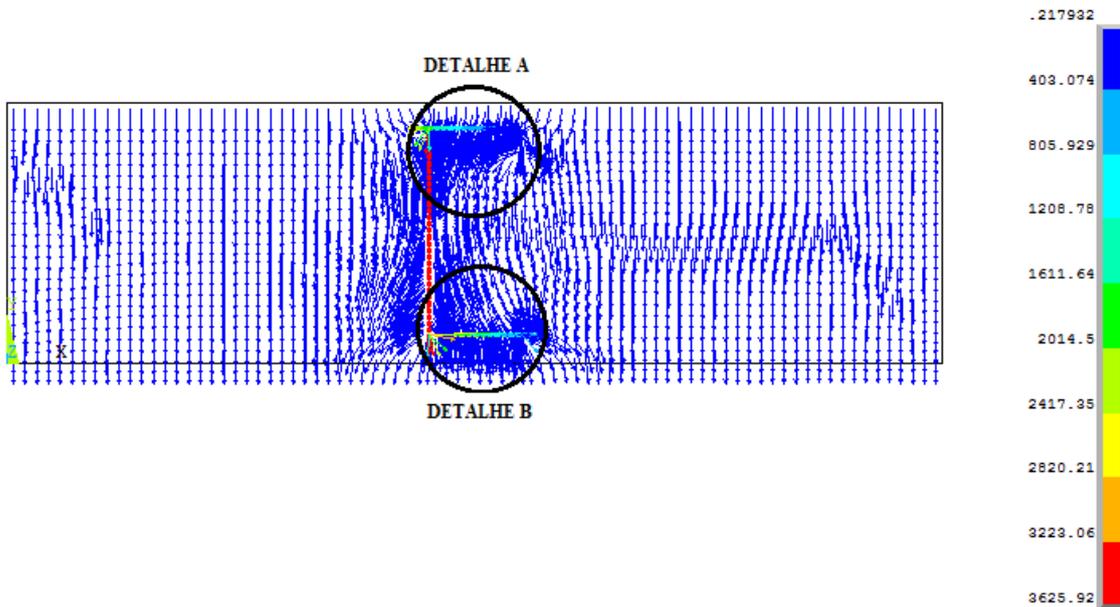
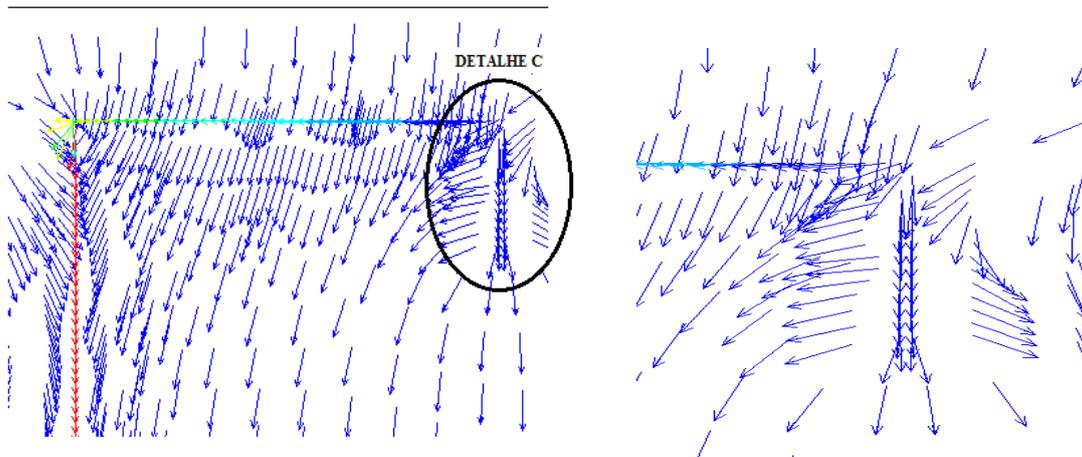
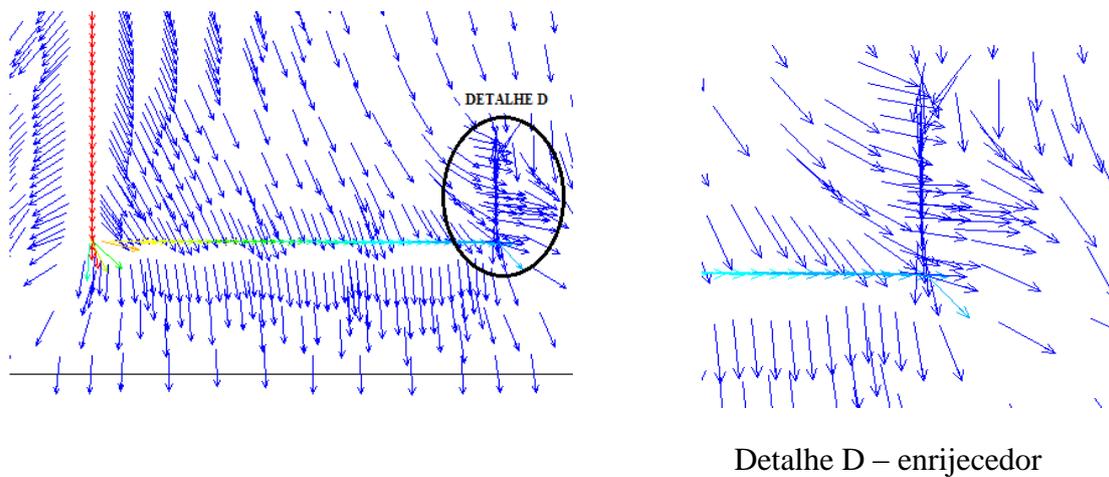


Figura C.4 - Distribuição do fluxo de calor para fechamento com a cavidade preenchida com ar – Detalhe A.



Detalhe C - enrijecedor

Figura C.4 - Distribuição do fluxo de calor para fechamento com a cavidade preenchida com ar – Detalhe B.



Para o fechamento, mostrado na Figura C.2, a resistência térmica equivalente resultou em  $R_t = 0,8781\text{m}^2\text{K/W}$  e o fluxo de calor em  $11,3877\text{W/m}^2$ . Este valor do fluxo de calor equivale a um valor em torno de 60% maior que valor do fluxo de calor para um fechamento sem presença do perfil em aço.