

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

**MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO
TÉRMICO DE EDIFÍCIOS COMERCIAIS E
RESIDENCIAIS EM *LIGHT STEEL FRAMING***

Ouro Preto, novembro de 2012

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

**MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO
TÉRMICO DE EDIFÍCIOS COMERCIAIS E
RESIDENCIAIS EM *LIGHT STEEL FRAMING***

AUTOR: ADRIANO PINTO GOMES

ORIENTADOR: Prof. Dr. Henor Artur de Souza

Tese 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 Doutor em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica.

Ouro Preto, novembro de 2012

G633m Gomes, Adriano Pinto.
Método de avaliação do desempenho térmico de edifícios comerciais e residenciais em *Light Steel Framing* [manuscrito] / Adriano Pinto Gomes - 2012.

xix, 147f.: il. color.; graf.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Henor Artur de Souza.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
Área de concentração: Construção Metálica.

1. Estruturas metálicas - Estrutura de aço leve - Teses. 2. Modelos matemáticos - Teses. 3. Arquitetura e clima - Teses. 4. Conforto térmico - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 624.014.2:72.01

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

**MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
EDIFÍCIOS COMERCIAIS E RESIDENCIAIS EM *LIGHT STEEL
FRAMING***

AUTOR: ADRIANO PINTO GOMES

Esta tese foi apresentada em sessão pública e aprovada em 17 de agosto de 2012,
pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Henor Artur de Souza (Orientador / UFOP)



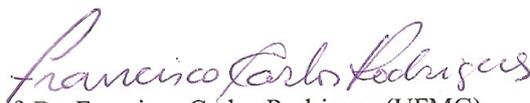
Prof. Dr. Alexandre Abrahão Cury (UFOP)



Prof.ª. Dra. Arlene Maria Sarmanho Freitas (UFOP)



Prof. Dr. Arlindo Tribess (USP)



Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues (UFMG)

Aos meus pais:
Jordanes e Ercília

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Ouro Preto, que proporcionou a realização deste trabalho;

Ao professor Henor Artur de Souza, pela orientação e amizade;

Ao professor Arlindo Tribess, da Universidade de São Paulo (USP) e ao professor Ricardo Azoubel da Mota Silveira da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) pelas sugestões durante o exame de qualificação;

Ao professor Prechaya Mahattanatawe da Universidade de Silpakorn em Bangkok, pela orientação no desenvolvimento do método;

Aos arquitetos Alexandre Kokke Santiago e Márcio Sequeira de Oliveira, pela orientação nas visitas técnicas;

Aos colegas do Laboratório NUPECON da Universidade Federal de Ouro Preto;

À Carmem Miranda Lage, pelo apoio e compreensão no desenvolvimento do trabalho;

Aos amigos da república Alfa 27, pela amizade;

E a Rovadavia, pela ajuda no curso e amizade.

RESUMO

O sistema *Light Steel Framing* (LSF) foi introduzido no Brasil no final da década de 90, quando algumas construtoras começaram a importar kits pré-fabricados dos EUA para montagem de casas residenciais. O sistema LSF 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. A avaliação do desempenho térmico de edificações em LSF no programa *EnergyPlus* pode ser realizada considerando métodos que incluem ou não a estrutura de aço na simulação numérica. Dependendo do método adotado, os resultados das cargas térmicas e da temperatura interna dos ambientes podem superestimar o desempenho térmico da edificação. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método específico para avaliar o desempenho térmico de edificações em LSF, naturalmente ventiladas ou condicionadas artificialmente, considerando os efeitos das pontes térmicas em uma análise global. O método das Propriedades Térmicas Combinadas foi utilizado como base para considerar os efeitos dos perfis de aço em simulações numéricas no programa *EnergyPlus*. Foram realizados estudos de caso para exemplificar a aplicação do método e discutir parâmetros importantes na simulação de edificações. Observou-se que nas edificações residenciais naturalmente ventiladas não houve diferenças significativas entre os resultados da simulação considerando ou não os efeitos das pontes térmicas. No entanto, a aplicação do método em estudos de caso de edificações condicionadas artificialmente mostrou que, ao se aumentar a diferença de temperatura entre o interior e exterior da edificação por meio do acionamento do sistema de condicionamento de ar, os efeitos das pontes térmicas foram mais significativos, chegando a representar uma variação no pico da carga térmica em cerca de 10%.

Palavras-chave: *Light Steel Framing*, simulação numérica, desempenho térmico.

ABSTRACT

The Light Steel Framing system (LSF) has been introduced in Brazil in the late 90s, when some builders started importing prefabricated kits for the assembly of residential houses in the U.S. The LSF system is undergoing a process of technical development and market acceptance of national construction, but there are still design deficiencies, when it comes to detailing and executing supplementary closing systems. The thermal performance evaluation of buildings in Light Steel Framing using *EnergyPlus* can be performed considering methods to include or not the light steel structure in numerical simulation. Depending the adopted method, the results of thermal loads and local internal temperature may overestimate the thermal performance in the building. The purpose of this research is to develop a specific method for thermal performance evaluating of buildings in LSF, naturally or artificially conditioned, considering the thermal bridges effects in a global analysis. The method of Combined Thermal Properties was used as a basis considering the metal profiles effects in numerical simulation program *EnergyPlus*. Some case studies are considered to illustrate the method application and discuss important parameters in the simulation program used in buildings. It was observed that in naturally ventilated residential buildings there were no significant differences between the simulation results considering whether or not the effects of thermal bridges. However, considering in case studies of artificially ventilated buildings, the method showed that when the temperature difference between inside and outside the building using the air-conditioning system increases, the thermal bridges effects were more significant, coming to a variation in the thermal load around 10%.

Keywords: Light Steel Framing, numerical simulation, thermal performance.

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – *American Iron and Steel Institute*

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

ART – Método Apenas a Resistência Térmica

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers*

BCA - Centro Brasileiro da Construção em Aço

CAIXA - Caixa Econômica Federal

CLF – *Cooling Load Factor*

CLTD – *Cooling Load Temperature Difference*

COP - Coeficiente de performance

CP – Coeficiente de pressão do vento

CSM – Método Com e Sem Montantes

CSSBI - *Canadian Sheet Steel Building Institute*

CT – Carga térmica

CTF - *Conduction Transfer Function*

DPM - *Damp Proof Membrane*

EIFS - External Insulation and Finishing System

ENCE - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EPS - Poliestireno Expandido

ETICS - *External Thermal Insulation Composite Systems*

HVAC - *Heating, Ventilation and Air Conditioning*

IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia

IISI – *International Iron and Steel Institute*

ILD – Densidade de Carga Interna

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

ISO - *International Organization for Standardization*

LSF – *Light Steel Framing*

MCH – Método das Camadas Homogêneas

MCP – Método dos Caminhos Paralelos

MEF - Método dos Elementos Finitos

MPI – Método dos Planos Isotérmicos

MZM – Método das Zonas Modificado

NASH – *National Association of Steel-framed Housing*

OSB - *Oriented Strand Board*

PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem

PBQP-H - Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat

PE – Método das Paredes Equivalentes

PFF - Perfis Formados a Frio

PTC – Método das propriedades Térmicas Combinadas

RTS – *Radiant Time Series Method*

SCL – *Solar Cooling Load*

SFA – *Steel Framing Alliance*

SHR - taxa de calor sensível

SNH - Secretaria Nacional de Habitação

SIDUSCON-SP - Sindicato da Construção Civil de São Paulo

SINAT - Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de produtos inovadores

SP – Método Sem Perfis

TFM – *Transfer Function Method*

TRY - *Test Reference Year*

VCL - *Vapour Control Layer*

XPS - Poliestireno Extrudado

WF – *Weighting Factors*

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS	IX
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE TABELAS	XVIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação do problema	1
1.2 Objetivos	6
1.3 Motivação	7
1.4 Estrutura do trabalho	8
2 O SISTEMA LSF E O DESEMPENHO TÉRMICO	9
2.1 Considerações iniciais	9
2.2 Referencial teórico	9
2.3 Transferência de calor no sistema LSF	19
2.3.1 Perfis com fendas nas almas	21
2.3.2 Perfis com mesas modificadas	23
2.3.3 Perfis revestidos com isolantes rígidos	24
2.3.4 Aplicação de uma camada isolante externa	25
2.3.5 Aplicação de reboco térmico	26
2.4 Considerações acerca do Capítulo II	28
3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES	29
3.1 Considerações iniciais	29
3.2 Etapas da avaliação do desempenho térmico de edificações	30
3.2.1 Critérios de avaliação para ambientes naturalmente ventilados (não condicionados)	32

3.2.2 Critérios de avaliação para ambientes condicionados artificialmente	35
3.2.3 Etapas de avaliação no programa <i>EnergyPlus</i>	36
3.3 O programa <i>EnergyPlus</i>	38
3.3.1 Considerações iniciais	38
3.3.2 Método de balanço de energia	39
3.3.2.1 Superfícies externas	41
3.3.2.2 Superfícies internas	44
3.3.3 Ventilação natural	45
3.3.3.1 Ventilação simplificada	45
3.3.3.2 Ventilação no módulo <i>AirflowNetwork</i>	48
3.3.4 Carga térmica	52
3.3.4.1 Cálculo da carga térmica	53
3.3.5 Ar condicionado	55
3.3.5.1 Aparelhos de expansão direta	56
3.4 Considerações acerca do Capítulo III	59
4 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO	61
4.1 Considerações iniciais	61
4.2 Determinação da resistência térmica de painéis em LSF	65
4.2.1 Representação da estrutura nos cálculos da resistência térmica	67
4.2.2 Método dos Caminhos Paralelos	68
4.2.3 Método dos Planos Isotérmicos	68
4.2.4 Método da ISO 6946:2007 (regra 50/50)	69
4.2.5 Método MNEC (Canadá)	69
4.2.6 Método das zonas modificado (ASHRAE/ORNL/NAHB)	71
4.3 Determinação da resistência térmica de painéis com camadas homogêneas	73
4.4 Ajuste das propriedades térmicas da camada composta	74
4.5 Definição do método de representação da estrutura metálica nas simulações numéricas	76
4.6 Método de avaliação de edificações em LSF	77
4.5 Considerações acerca do Capítulo IV	78
5 APLICAÇÕES DO MÉTODO	80
5.1 Caso 1	80
5.1.1 Parâmetros gerais	80

5.1.2 Condições climáticas	80
5.1.3 Materiais e fechamentos	82
5.1.4 Zonas térmicas e geometria da edificação	86
5.1.5 Rotinas de uso e ocupação e cargas internas	87
5.1.6 Sistema de condicionamento	87
5.1.7 Relatórios de saída	87
5.1.8 Resultados	88
5.2 Caso 2	91
5.3 Caso 3	94
5.4 Caso 4	97
5.5 Caso 5	103
5.6 Caso 6	105
5.7 Considerações acerca do Capítulo V	107
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	109
6.1 Análise dos resultados	109
6.2 Conclusões	111
6.3 Sugestões para futuras pesquisas	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
ANEXO A	123
ANEXO B	131
ANEXO C	142

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

FIGURA 1.1	Residência em LSF	1
FIGURA 1.2	Painel externo em LSF	2

CAPÍTULO II

FIGURA 2.1	Junta de movimentação em paredes simples	10
FIGURA 2.2	Junta de movimentação em paredes duplas	10
FIGURA 2.3	Sistema em LSF adaptado pela CAIXA	11
FIGURA 2.4	Fechamentos analisados	12
FIGURA 2.5	Perfis enrijecidos com enrijecedores intermediários na alma	13
FIGURA 2.6	Uso de malhas nos projetos de arquitetura	14
FIGURA 2.7	Tipologias analisadas	15
FIGURA 2.8	Métodos de montagem	15
FIGURA 2.9	Painel vertical	16
FIGURA 2.10	Modelo de habitação popular	17
FIGURA 2.11	Condensação e poeira sobre os montantes	20
FIGURA 2.12	Marcas das estruturas nos painéis internos	21
FIGURA 2.13	Trajeto do fluxo de calor através das almas dos montantes	21
FIGURA 2.14	Tipos de aberturas nas almas dos perfis	22
FIGURA 2.15	Perfurações em forma circular	22
FIGURA 2.16	Perfurações em forma de fendas	22
FIGURA 2.17	Perfil com mesa dobrada Thermachannel	23
FIGURA 2.18	Camadas de ar entre o perfil e a chapa	23
FIGURA 2.19	Perfil com saliências nas mesas	23
FIGURA 2.20	Isolante rígido para ser aplicado nos montantes	24
FIGURA 2.21	Isolante rígido da CEMINTEL	24
FIGURA 2.22	Aplicação de espuma contornando o montante	25
FIGURA 2.23	Painel externo com camada isolante	25
FIGURA 2.24	Painel com isolamento rígido	26
FIGURA 2.25	Criação de uma camada de ar utilizando uma camada isolante rígida e um espaçador	26
FIGURA 2.26	Constituição do sistema EIFS	27
FIGURA 2.27	Painel isolante	27

CAPÍTULO III

FIGURA 3.1	Fluxograma do processo de simulação do desempenho de uma edificação	30
FIGURA 3.2	Etapas do processo de avaliação do desempenho térmico de edificações	31
FIGURA 3.3	Fluxograma dos procedimentos de avaliação por simulação numérica	33
FIGURA 3.4	Etapas da modelagem no <i>EnergyPlus</i>	36
FIGURA 3.5	Módulos do <i>EnergyPlus</i>	39
FIGURA 3.6	Balanco térmico na superfície externa	41
FIGURA 3.7	Balanco térmico na superfície interna	44
FIGURA 3.8	Evolução temporal da temperatura considerando diferentes taxas de ren/h para um ambiente	47
FIGURA 3.9	Taxas de ren/h dos ambientes em função da direção do vento predominante	47
FIGURA 3.10	Esquema de uma rede de nós de pressão	48
FIGURA 3.11	Fatores geométricos associados à abertura	51
FIGURA 3.12	Diferença entre a taxa de ren/h constante e a encontrada com o modulo <i>AirflowNetwok</i>	51
FIGURA 3.13	Evolução temporal da temperatura de uma zona térmica	55
FIGURA 3.14	Interações entre os circuitos do sistema de condicionamento de ar do <i>EnergyPlus</i>	56
FIGURA 3.15	Esquema de um aparelho de janela	57
FIGURA 3.16	Evolução mensal do consumo de energia elétrica por uso final	59
FIGURA 3.17	Localização das cidades com dados climáticos em formato EPW no Brasil	60

CAPÍTULO IV

FIGURA 4.1	Porcentagem das cargas térmicas calculadas pelos cinco métodos para painéis com estrutura em madeira e aço	64
FIGURA 4.2	Análise de um painel em LSF pelo programa THERM 5.2	65
FIGURA 4.3	ORNL BTC <i>hotbox</i>	66
FIGURA 4.4	Elementos estruturais desconsiderados no cálculo da resistência térmica dos painéis	67
FIGURA 4.5	Transferência de calor no método dos caminhos paralelos	68
FIGURA 4.6	Transferência de calor no método dos planos isotérmicos	69
FIGURA 4.7	Parâmetros para o cálculo da resistência térmica no método das zonas modificadas	71
FIGURA 4.8	Carta do Fator de zona Z_f	72
FIGURA 4.9	Fluxo de calor perpendicular às camadas homogêneas	74

FIGURA 4.10	Criação de um material com propriedades térmicas ajustadas	75
FIGURA 4.11	Fechamentos onde ocorrem as pontes térmicas	76
FIGURA 4.12	Método PTCa	77
FIGURA 4.13	Método de avaliação proposto	78
CAPÍTULO V		
FIGURA 5.1	Evolução temporal da temperatura e umidade para o dia com TBS máxima e mínima	81
FIGURA 5.2	Evolução temporal da temperatura e umidade para o dia 06/01 e 12/05	82
FIGURA 5.3	Tipologia 1 – Painel externo	83
FIGURA 5.4	Tipologia 1 – Painel interno	84
FIGURA 5.5	Tipologia 1 – Fundação	84
FIGURA 5.6	Tipologia 1 – Forro	85
FIGURA 5.7	Tipologia 1 – Cobertura	85
FIGURA 5.8	Geometria da Tipologia 1	87
FIGURA 5.9	Evolução temporal da temperatura na Zona 1 (ESTAR) no inverno (12/05)	90
FIGURA 5.10	Geometria da Tipologia 2	92
FIGURA 5.11	Evolução temporal da temperatura na Zona 1 (ESTAR) no verão (06/01)	93
FIGURA 5.12	Evolução temporal da temperatura do ambiente externo e temperatura de referência do solo para verão e inverno	94
FIGURA 5.13	Geometria da Tipologia 3	95
FIGURA 5.14	Evolução temporal da temperatura na Zona 1 no dia de projeto de verão	96
FIGURA 5.15	Volume de infiltração da Zona 1 em função da direção do vento	97
FIGURA 5.16	Geometria da Tipologia 4	98
FIGURA 5.17	Pico mensal da carga térmica para resfriamento (W)	101
FIGURA 5.18	Evolução temporal da temperatura da Sala 4 no dia de pico da carga térmica para resfriamento (03/03)	102
FIGURA 5.19	Geometria da Tipologia 5	103
FIGURA 5.20	Geometria da Tipologia 6	105
FIGURA 5.21	Esquema da laje úmida do sistema LSF	105
FIGURA 5.22	Parâmetros analisados	106
FIGURA 5.23	Painel externo com 90 e 140 mm de alma dos perfis	107

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO III

TABELA 3.1	Critério de avaliação para as condições de VERÃO	35
TABELA 3.2	Critério de avaliação para as condições de INVERNO	35
TABELA 3.3	Infiltração de ar	54

CAPÍTULO IV

TABELA 4.1	Composição dos painéis em LSF	63
TABELA 4.2	Fatores de ponderação do método MNEC	70
TABELA 4.3	Resistência térmica superficial interna e externa	74

CAPÍTULO V

TABELA 5.1	Dados de Belo Horizonte / MG	81
TABELA 5.2	Propriedades termofísicas dos componentes de fechamento	82
TABELA 5.3	Resistência e transmitância térmica dos painéis verticais considerando os métodos MZM e MCH	86
TABELA 5.4	Propriedades térmicas da camada composta de painéis verticais	86
TABELA 5.5	Temperaturas internas considerando os efeitos das pontes térmicas (PTCa)	88
TABELA 5.6	Temperaturas internas desconsiderando os efeitos das pontes térmicas (SP)	88
TABELA 5.7	Comparação LSF x alvenaria maciça	89
TABELA 5.8	Propriedades térmicas da camada composta de painéis verticais externos	90
TABELA 5.9	Comparação LSF x LSF com placa de EPS (25 mm)	90
TABELA 5.10	Temperaturas do solo de Belo Horizonte / MG	92
TABELA 5.11	Temperaturas dos ambientes Estar/Jantar (E/J) e quarto 1 (Q)	92
TABELA 5.12	Temperaturas máxima das zonas Z1 e Z2 p/ o dia de projeto de verão	96
TABELA 5.13	Composição dos fechamentos	99
TABELA 5.14	Resistência e transmitância térmica dos painéis verticais considerando os métodos MZM e MCH	100
TABELA 5.15	Propriedades térmicas da camada composta de painéis verticais	100
TABELA 5.16	Resistência e transmitância térmica dos painéis verticais considerando os métodos MZM e MCH	101
TABELA 5.17	Propriedades térmicas da camada composta de painéis verticais	101

TABELA 5.18	Pico anual da carga térmica	101
TABELA 5.19	Consumo anual – Caso 5	104
TABELA 5.20	Consumo anual – LSF x Concreto	104
TABELA 5.21	Consumo anual – Caso 6	106

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do problema

O sistema construtivo *Light Steel Framing* (LSF)¹ 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 (FREITAS e CRASTO, 2006; 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 em LSF.
Fonte: BEVILAQUA, 2005, p. 14.

Os sistemas de montagem mais usuais de LSF utilizam combinações de perfis com seções transversais U_e (lê-se “U” enrijecido) e U simples. Os painéis estruturais são formados por perfis galvanizados de seção U, constituindo guias na base e no topo dos painéis, e por perfis U_e , denominados “montantes”, que são espaçados regularmente entre si de acordo com a modulação definida no cálculo estrutural - 400 ou 600 mm.

¹ Também conhecido internacionalmente por *Residential Cold-Formed Steel Framing* ou *Light Steel Framing Housing*.

As placas fixadas na estrutura formam os fechamentos internos ou externos (Figura 1.2). 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.

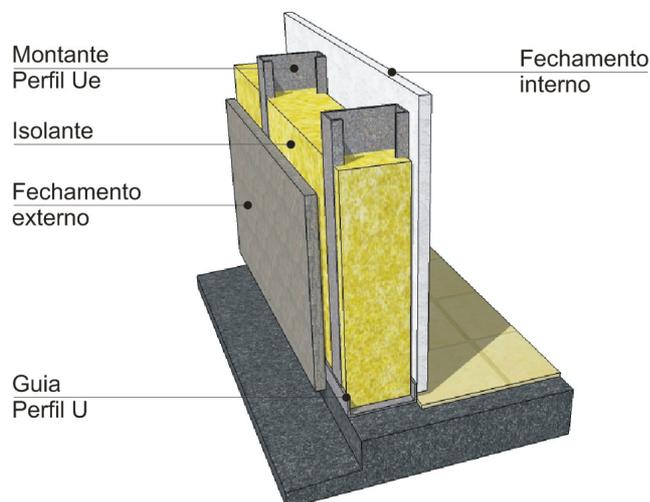


Figura 1.2 - Painel externo em LSF.

O sistema LSF é de uso difundido 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 (quatro pavimentos), edifícios comerciais, escolas, hospitais e como *retrofit* de edificações existentes (SANTIAGO, 2008).

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.

No entanto, por suas características industrializadas, a produção do sistema exige um detalhamento maior de todos os projetos desde os estágios iniciais da construção. 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).

Conforme afirma Santiago (2008), toda tecnologia construtiva nova passa por processos de adequação e avaliação de sua pertinência. O sistema LSF está passando por um processo de desenvolvimento técnico e de aceitação no mercado da construção civil nacional. Ainda existem deficiências no projeto, no detalhamento e na execução dos sistemas complementares de fechamento (FREITAS e CRASTO, 2006). 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), Freitas e Crasto (2006), Rodrigues (2006), Gomes (2007), Santiago (2008), Lima (2008), Penna (2009), Campos (2010), Vivan (2011), e Carminatti Júnior (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, 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.

Porém, não podem ser utilizados métodos genéricos para esta avaliação. Em todas as construções metálicas, é importante considerar os efeitos da transmissão de calor na estrutura em análises do desempenho térmico. 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 de programas computacionais pode contribuir na busca por edificações eficientes energeticamente, auxiliando na análise do comportamento térmico. A simulação computacional permite uma análise rápida de diferentes propostas projetuais contribuindo como uma ferramenta de projeto. No entanto, é necessário o conhecimento avançado do programa a ser utilizado e dos fatores envolvidos na simulação.

No Brasil, um programa que tem se destacado pela precisão e detalhamento na entrada de dados na simulação numérica é o *EnergyPlus* (LBNL, 2011a). Este programa

possibilita grande flexibilidade nas simulações e precisão na modelagem de ambientes condicionados naturalmente e artificialmente (PEREIRA e GHISI, 2011). A modelagem matemática empregada no *EnergyPlus* utiliza o menor número de hipóteses simplificadoras dentre todos os programas da área disponíveis, implicando na melhor representação física das trocas térmicas no interior dos ambientes em modelos de simulação detalhada (LBNL, 2011b).

Todavia, a utilização da simulação numérica no *EnergyPlus* para avaliar o desempenho térmico de edificações em LSF deve se apoiar em um método específico para esse tipo de sistema construtivo. O problema é que no Brasil, as normas disponíveis relacionadas a este sistema são específicas para desempenho estrutural e há poucas referências a métodos para a avaliação do desempenho térmico de edificações em LSF.

Como ponto de partida para a definição de uma metodologia específica para avaliar o desempenho térmico de edificações em LSF, pode-se citar os trabalhos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e o trabalho de Akutsu (1998), nos quais as pesquisas e avaliações desenvolvidas pelo Laboratório de Conforto Ambiental (LABCON) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) se apoiaram. Os trabalhos desenvolvidos pela Divisão de Edificações do IPT tem em comum a preocupação com a proposição de uma metodologia para a avaliação do desempenho térmico de edificações no Brasil. Dentre eles, destacam-se IPT (1981), IPT (1987), AKUTSU e VITTORINO (1991), AKUTSU e VITTORINO (1993), AKUTSU, VITTORINO e YOSHIMOTO (1995), AKUTSU et al (1995) e IPT (1998). Os trabalhos desenvolvidos pelo IPT geraram a definição de um zoneamento climático brasileiro e níveis de desempenho que contribuíram com a formulação da norma brasileira: “Desempenho térmico de edificações” - NBR 15220 (ABNT, 2005).

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. Nos EUA, por exemplo, a norma ASHRAE 90.2:2004 estabelece as exigências

mínimas de eficiência energética para o projeto de novas edificações baseadas no método prescritivo para estabelecer exigências mínimas. Sua aplicação abrange a envoltória da edificação, sistemas e equipamentos de ar condicionado e aquecimento de água. Conforme Akutsu (1998) relata, este método é adequado para avaliações em condições de inverno, em que o objetivo está limitado às perdas de energia utilizada no aquecimento dos ambientes.

Como no Brasil as condições predominantes são aquelas em que o conforto térmico deve ser equacionado para as condições de verão, não é correto utilizar como critério de desempenho somente os indicadores. É necessário considerar também as trocas térmicas que ocorrem nos ambientes por meio de uma abordagem dinâmica ao longo do dia, considerando as possibilidades de perda de energia pelo ambiente por meio da ventilação ou condução/convecção por alguns elementos da edificação.

1.2 Objetivos

Neste trabalho pretende-se desenvolver um método específico para avaliar o desempenho térmico de edificações comerciais e residenciais em LSF no Brasil por meio de simulação numérica horária. A pesquisa proposta tem por base o método de avaliação do desempenho térmico de edificações desenvolvido por Akutsu (1998). O avanço no método desenvolvido pela autora é alcançado por meio de sua adaptação para edificações em LSF. O desenvolvimento do trabalho tem por objetivos específicos:

- a) Desenvolver um método que considere os efeitos da estrutura metálica em simulações numéricas horárias;
- b) Avaliar o desempenho térmico de edificações residenciais e comerciais considerando configurações de painéis mais utilizados na região de interesse;
- c) Fazer a simulação numérica no programa *EnergyPlus*, considerando edificações naturalmente ventiladas e condicionadas artificialmente;
- d) Analisar o modelo matemático necessário para o tratamento numérico;
- e) Simular os edifícios utilizando o recurso *AirflowNetwork* do *EnergyPlus*_ modelo de redes da ventilação natural;

- f) Verificar o efeito da transmissão excessiva de calor nos painéis de fechamento externos – pontes térmicas.

1.3 Motivação

No laboratório LABCON da UFOP, os estudos relativos à simulação numérica do desempenho térmico de edificações em LSF demonstraram a eficiência deste sistema ao analisar painéis configurados de acordo com a região climática de implantação do projeto. Na dissertação de mestrado de Gomes (2007) intitulada “Avaliação do desempenho térmico de edificações unifamiliares em *Light Steel Framing*”, foi realizada a análise de duas edificações residenciais ventiladas naturalmente por meio do programa *EnergyPlus*, realizando um estudo das temperaturas internas dos ambientes. Foi considerada a resposta global da edificação e verificado o cumprimento das exigências de conforto térmico dos usuários. Analisou-se as configurações de painéis com atraso térmico indicado pela norma NBR 15220 (ABNT, 2005) para Curitiba, Belo Horizonte, Brasília, Goiânia, Teresina e Belém. Verificou-se o cumprimento das exigências de conforto térmico quando as condições ambientais internas eram atendidas com estratégias passivas de projeto.

No entanto, a avaliação foi realizada somente em edificações naturalmente ventiladas, utilizando uma forma simplificada de simular as trocas de ar nos ambientes. O método de avaliação foi baseado nos critérios mínimos de desempenho para habitações térreas de interesse social (IPT, 1998) e não se considerou os efeitos da estrutura na análise do desempenho térmico das edificações. Durante a pesquisa, foi constatada a necessidade de um método específico para avaliar as construções em LSF e analisar os efeitos dos perfis metálicos em simulações numéricas horárias.

Diante destas questões, a presente pesquisa, relacionada ao desenvolvimento de um método para avaliação do desempenho térmico de edificações comerciais e residenciais em LSF no Brasil, tem o intuito de aprofundar os estudos sobre o sistema para a sua ampliação, adaptação e consolidação no contexto brasileiro.

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 tese é constituída por mais cinco capítulos.

No CAPÍTULO II faz-se uma revisão bibliográfica sobre o sistema LSF focando nos trabalhos e publicações da área que embasaram esta pesquisa. Também realiza-se um estudo das pontes térmicas e possíveis formas de se amenizar os efeitos negativos da estrutura no desempenho térmico global das edificações.

As etapas da avaliação do desempenho térmico de edificações e os critérios de avaliação para ambientes naturalmente ventilados e condicionados artificialmente são apresentados no CAPÍTULO III. Também é apresentado o programa *EnergyPlus* e sua formulação básica.

No CAPÍTULO IV faz-se uma revisão bibliográfica sobre os métodos de avaliação específicos para incluir a estrutura metálica nas simulações numéricas e apresenta-se o desenvolvimento da metodologia adotada. São apresentados todos os parâmetros necessários à simulação numérica do desempenho térmico de edificações pelo método proposto.

As simulações dos estudos de caso são abordadas no CAPÍTULO V. O método proposto é aplicado a seis estudos de caso, considerando edificações residenciais e edifícios comerciais, naturalmente ventilados e condicionados artificialmente.

No CAPÍTULO VI são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para desenvolvimento de pesquisas futuras em temas relacionados ao método de avaliação do desempenho térmico de edificações em LSF.

A tese é finalizada com as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa e com os Anexos A, B e C.

2 O SISTEMA LSF E O DESEMPENHO TÉRMICO

2.1 Considerações iniciais

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 na década de 90 e 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).

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica dos recentes estudos sobre o LSF no Brasil, focando no projeto, na estrutura e no desempenho térmico do sistema. Os trabalhos foram selecionados de forma a embasar o desenvolvimento da presente pesquisa. Faz-se também uma abordagem sobre os problemas gerados pelas pontes térmicas através da estrutura e são apresentadas as soluções mais comuns para amenizar a transmissão excessiva de calor através dos painéis.

2.2 Referencial teórico

No Brasil, a primeira referência relacionada ao desempenho de um painel que emprega perfis formados a frio, foi a Referência Técnica nº 017 do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 2002), que era destinada aos Sistemas Lafarge Gypsum para a execução de paredes internas não estruturais de edifícios residenciais e comerciais. Os painéis, constituídos por chapas de gesso acartonado ($e = 12,5$ mm) parafusadas em estrutura metálica leve, foram submetidos a impactos de corpo mole, a solicitações transmitidas por peças suspensas, à especificação do índice de isolamento sonoro e resistência ao fogo, à ação da umidade, à ação do calor e outros critérios, apresentando resultados satisfatórios. Nestes estudos, não foram realizados testes relacionados ao desempenho térmico do sistema.

No relatório do IPT (2002) é destacada a importância da adoção de juntas de movimentação das placas para evitar problemas de fissuração por movimentações higrotérmicas. Nas paredes com uma camada de chapa de gesso em cada face, recomenda-se uma junta de movimentação a cada 50 m² (Figura 2.1). No caso de paredes com duas camadas de chapas de gesso em cada face, recomenda-se uma junta a cada 70 m², sendo a distância máxima entre juntas de 15 m (Figura 2.2). Nesse relatório, também é detalhado a montagem do Sistema Lafarge Gypsum. Na montagem dos fechamentos é recomendado que as juntas entre chapas em uma face da parede devam ser desencontradas em relação às da outra face. Nas paredes com chapas duplas, as juntas da segunda camada devem ser defasadas da primeira.

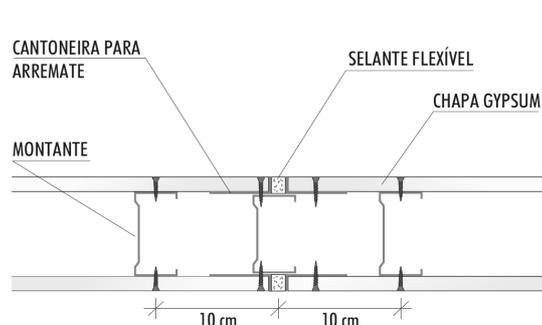


Figura 2.1 – Junta de movimentação em paredes simples.

Fonte: Adaptado de IPT, 2002.

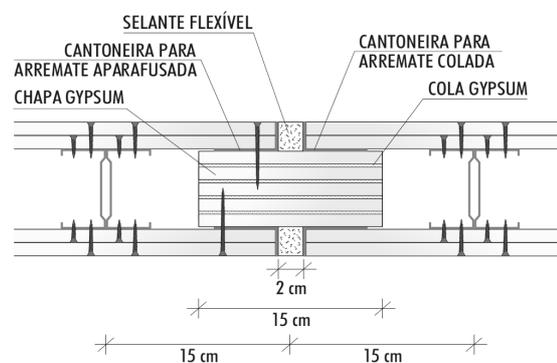


Figura 2.2 – Junta de movimentação em paredes duplas.

Fonte: Adaptado de IPT, 2002.

O Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), com o apoio do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), em parceria com a Caixa Econômica Federal (CAIXA) e o Sindicato da Construção Civil de São Paulo (SIDUSCON-SP), elaborou um manual para estabelecer os critérios de análise de solicitação de financiamento para a construção de edificações com o sistema LSF (CAIXA, 2003). A CAIXA optou pelo estabelecimento de critérios e requisitos mais próximos aos processos de construção tradicionais. A ideia central era combinar os produtos em aço resistente à corrosão com os materiais de construção disponíveis no mercado nacional. Permitia-se a construção de edificações de até quatro pavimentos com acabamento dos painéis em argamassa projetada e pisos dos pavimentos superiores e cobertura em concreto aplicado sobre a forma-laje incorporada de aço (*steel deck*). No telhado, eram permitidas somente telhas

convencionais (cerâmicas, de concreto, metálicas e de cimento). Na Figura 2.3, apresenta-se um esquema da tipologia que o manual da CEF (2003) aprovava.

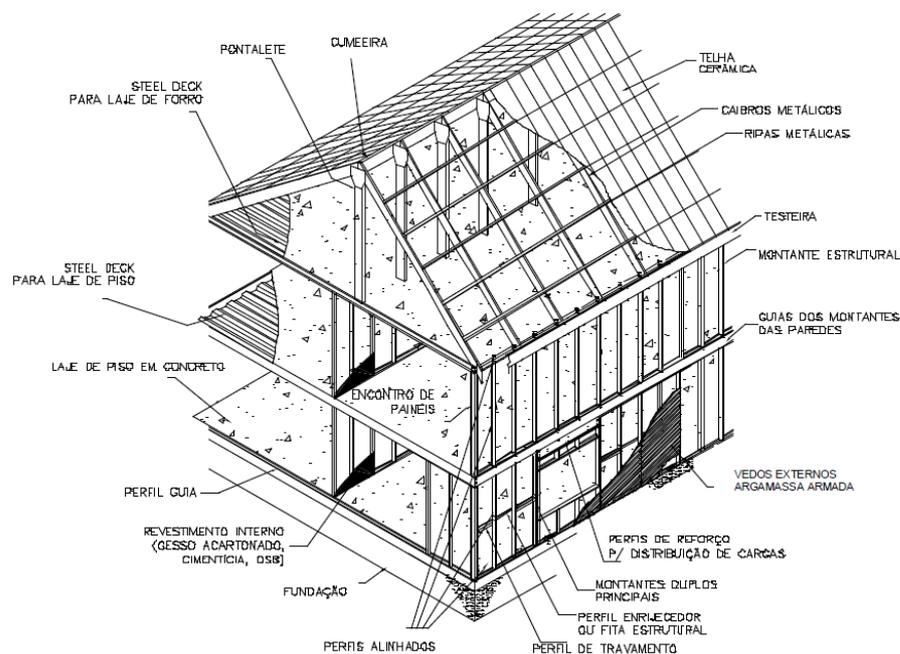


Figura 2.3 – Sistema em LSF adaptado pela CAIXA.
Fonte: CEF, 2003.

O critério de desempenho para conforto térmico apresentado especificava que a edificação deveria atender aos requisitos exigidos pelo documento “Critérios mínimos de desempenho para habitações térreas de interesse social” (IPT, 1998), ou às normas brasileiras existentes sobre o tema, que, à época, não existiam.

Pereira Júnior (2004) apresentou uma análise de pequenas edificações em aço contraventadas por paredes estruturais constituídas por perfis formados a frio (PFF). O autor buscava comprovar a eficácia estrutural do sistema em edificações residenciais e/ou comerciais de cinco pavimentos e concluiu que, adotando o LSF como um sistema de paredes diafragmas com a função de contraventar a estrutura principal, há um ganho de industrialização e tecnologia aplicada à construção de edifícios residenciais. Segundo Pereira Júnior (2004), o emprego do sistema LSF reduz o cronograma de execução da obra em 20% se comparado à utilização de paredes de alvenaria como diafragma.

Em relação ao desempenho térmico do sistema LSF, Pereira Júnior (2004) fez o cálculo da resistência térmica de dois fechamentos: um tradicional em alvenaria e outro em LSF para comprovar a eficácia do sistema estruturado em aço (Figura 2.4). O autor concluiu que, se consideradas as mesmas dimensões geométricas de um fechamento em alvenaria, o painel em LSF possui desempenho térmico muito superior. Vale ressaltar que o autor utilizou somente a resistência térmica dos painéis como critério de avaliação de desempenho.

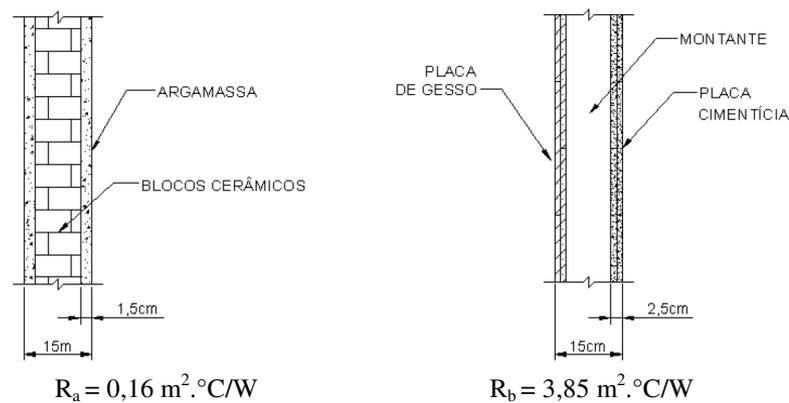


Figura 2.4 – Fechamentos analisados.

Fonte: PEREIRA JÚNIOR, 2004.

Bevilaqua (2005) analisou via método dos elementos finitos (MEF) edifícios residenciais de quatro e de sete pavimentos estruturados no sistema LSF, considerando 13 diferentes proposições arquitetônicas e três concepções estruturais não usuais: a) viga contínuo apoiado sobre painéis estruturais; b) painéis mais altos para eliminar as vigas de acabamento sobre os painéis paralelos ao viga e c) vigas apoiando lateralmente nos montantes. Bevilaqua (2005) verificou que a tecnologia é perfeitamente aplicável a prédios com até sete pavimentos, incluindo os de baixo custo, levando-se em conta o dimensionamento dos perfis realizados segundo os preceitos da NBR 14762 (ABNT, 2001).

Bevilaqua (2005) fez referências aos trabalhos publicados do IPT para comprovar a eficiência térmica do sistema. A autora cita que uma parede de alvenaria somente teria o mesmo desempenho de uma parede em LSF de 90 mm de espessura se possuísse isolamento em lã de vidro e 150 mm de espessura.

Em seu trabalho, Souza (2005) apresentou um estudo sobre o comportamento dos perfis de paredes esbeltas expostos a fenômenos de instabilidade. Por meio do MEF, o autor analisou o comportamento de montantes de LSF enrijecidos com enrijecedores intermediários na alma, submetidos à compressão axial. Segundo o autor, o uso desses enrijecedores melhora a eficiência estrutural da seção, aumentando sua capacidade de carga (Figura 2.5). Os resultados das análises foram comparados com ensaios experimentais, numéricos e analíticos. Foram observados ganhos consideráveis de rigidez quando foram acrescentados os enrijecedores na alma dos montantes.

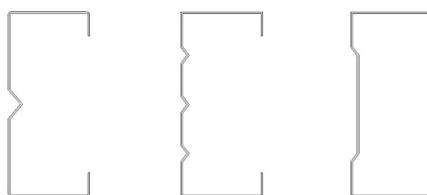


Figura 2.5 – Perfis enrijecidos com enrijecedores intermediários na alma.
Fonte: SOUZA, 2005.

Crasto (2005) apresentou todo o processo construtivo do sistema LSF, focando no histórico e na evolução do sistema, nas características e detalhes de construção, nos procedimentos de execução e nos subsídios para a elaboração de projetos de arquitetura que utilizam esse sistema. Trata-se de uma fonte de informação de qualidade direcionada aos projetistas que querem conhecer as potencialidades e limitações da tecnologia. Segundo a autora, uma diretriz importante para a elaboração de projetos é o uso de malhas ou reticulados da modulação estrutural como base no dimensionamento de ambientes em LSF (Figura 2.6). A modulação dos montantes serve tanto para a estrutura metálica quanto para os outros subsistemas, permitindo um melhor aproveitamento dos materiais e reduzindo os cortes e desperdício.

A autora alerta que o sistema LSF não se encontra plenamente resolvido para implantação no Brasil, pois necessita de alguns estudos, como soluções para melhoria do desempenho do sistema de fechamento vertical externo e comportamento térmico das edificações. De acordo com Crasto (2005), o desempenho térmico de edificações em LSF merece uma atenção especial, pois os efeitos das pontes térmicas nos painéis externos ainda não foram estudados no Brasil. Para a autora, a investigação do sistema

de construção, identificando suas vantagens, desvantagens e aspectos que ainda necessitam ser estudados, é uma forma de buscar a consolidação do LSF no País como uma opção aos sistemas construtivos vigentes.

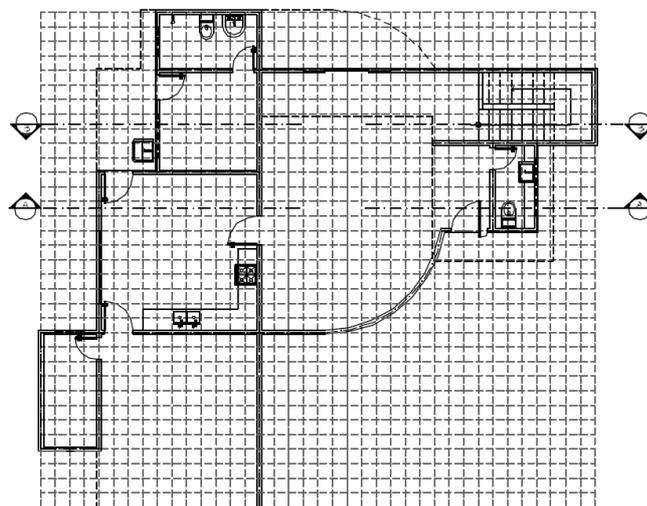
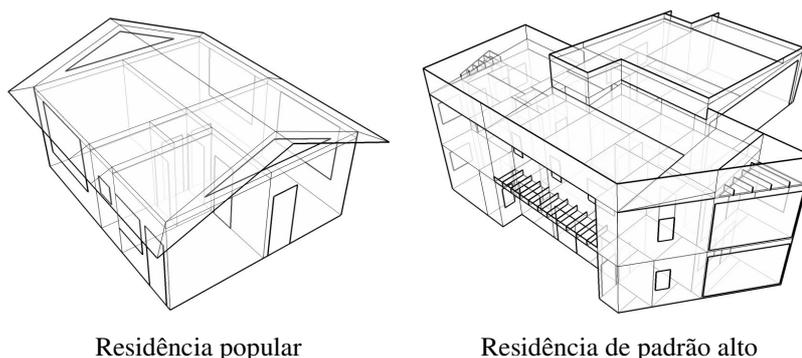


Figura 2.6 – Uso de malhas nos projetos de arquitetura.
Fonte: CRASTO, 2005.

A pesquisa de Crasto contribuiu para a publicação do manual de construção em aço do IBS/CBCA: “Steel Framing: Arquitetura” (FREITAS e CRASTO, 2006). O manual apresenta aspectos de projeto e montagem para edificações com o sistema de construção LSF. Rodrigues (2006) também desenvolveu um manual pelo IBS/CBCA, intitulado: “Steel Framing: Engenharia”. Este manual contém os principais conceitos relativos aos perfis formados a frio e o seu dimensionamento. O autor apresenta tabelas para o pré-dimensionamento das barras estruturais (montantes, vigas e elementos das tesouras do telhado) dos subsistemas de paredes, pisos e de cobertura para edifícios residenciais com até dois pavimentos. De todos os autores, talvez Freitas e Crasto (2006) e Rodrigues (2006) foram os que contribuíram de maneira mais significativa na divulgação do sistema no País.

O desempenho térmico de duas edificações em LSF foi avaliado por Gomes (2007). As tipologias analisadas representavam uma habitação popular e uma residência de alto padrão (Figura 2.7). Utilizou-se o programa *EnergyPlus* para simular a resposta global da edificação, considerando diferentes composições de painéis de fechamentos

adequados ao clima das regiões de interesse (Curitiba, Belo Horizonte, Brasília, Goiânia, Teresina e Belém). Observou-se neste estudo que é possível reproduzir quaisquer comportamentos térmicos de painéis de acordo com as exigências do projeto, uma vez que o sistema de fechamento no LSF é baseado no conceito de isolamento multicamada, que consiste em combinar placas leves de fechamento e material isolante.



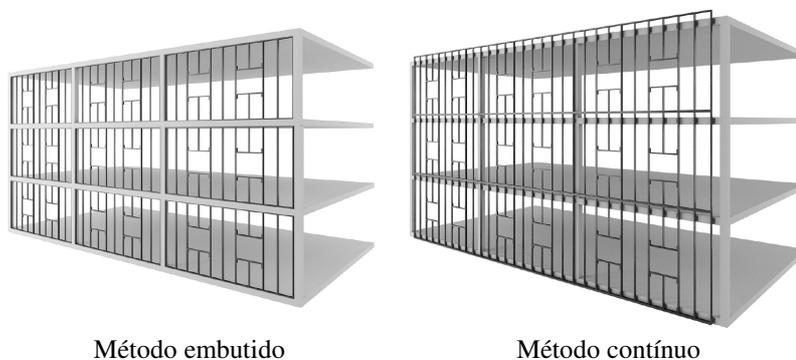
Residência popular

Residência de padrão alto

Figura 2.7 – Tipologias analisadas.

Fonte: GOMES, 2007.

Santiago (2008) estudou a utilização do sistema LSF no fechamento vertical externo não-estrutural de edifícios em associação a outros sistemas construtivos. Segundo o autor, este tipo de associação implica em uma maior rapidez de execução da obra, menor emprego de mão-de-obra e em uma redução considerável no peso próprio, se comparado a sistemas convencionais. O autor apresentou diversos métodos de montagem, detalhes para execução dos fechamentos e recomendações de projeto. Na Figura 2.8, apresenta-se dois métodos de montagem dos painéis dentre os apresentados pelo autor.



Método embutido

Método contínuo

Figura 2.8 – Métodos de montagem.

Fonte: SANTIAGO, 2008.

De acordo com Santiago (2008), os materiais mais utilizados na composição da face externa dos fechamentos são: painéis de OSB - *Oriented Strand Board* (com acabamento em *siding*, argamassa ou EIFS - *External Insulation and Finishing System*) e placas cimentícias; e na face interna, gesso acartonado, placas cimentícias e painéis metálicos. O isolamento dos painéis em LSF deve ser definido na fase de projeto atendendo às análises de custo/benefício, além das demandas de conforto térmico. Segundo o autor, o desempenho satisfatório do fechamento de fachadas em LSF é garantido pela combinação do correto planejamento estrutural com o bom detalhamento das interfaces dos acabamentos.

Lima (2008) analisou a construção de edificações utilizando módulos pré-fabricados em LSF, focando a viabilidade de desenvolvimento desta tecnologia na região do Espírito Santo. O autor faz uma revisão bibliográfica das composições dos fechamentos e da construção modular em LSF e apresenta como opção de fechamento vertical um painel sem isolante térmico na cavidade (Figura 2.9). Além disso, apresentou um ensaio projetual de uma escola municipal utilizando o sistema modular. Lima (2008) apontou os caminhos e os obstáculos para o desenvolvimento da construção modular em LSF no Brasil.

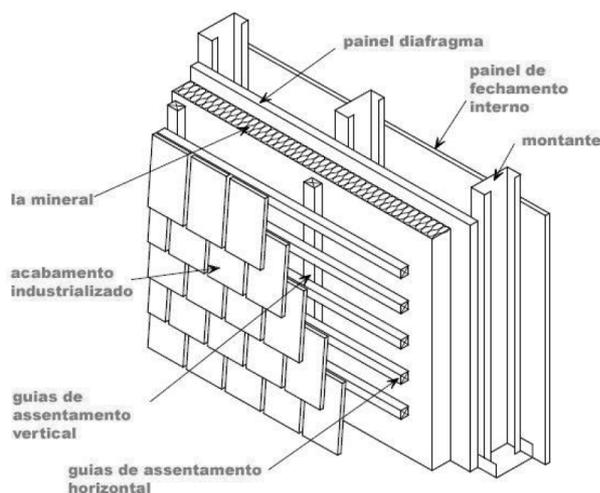


Figura 2.9 – Painel vertical.
Fonte: LIMA, 2008.

A análise de viabilidade econômica do sistema LSF na execução de habitações de interesse social foi realizada por Penna (2009). O autor avaliou a influência de aspectos do projeto (arquitetônico e estrutural) e da escolha dos materiais de fechamento nos

custos de construção de edificações que utilizam o sistema LSF. Foi montado um protótipo de área igual a 34,02 m² que atendesse ao programa “Minha casa, minha vida” do Governo Federal para a análise. Constatou-se a viabilidade econômica do modelo de habitação de interesse social utilizando o sistema LSF nos parâmetros do programa do governo (Figura 2.10). Segundo o autor, o protótipo finalizado ficou em R\$ 22.500,00; sendo R\$ 591,78 o metro quadrado da construção. Penna (2009) salientou a importância da integração da concepção do projeto arquitetônico com o estrutural na redução dos custos finais da obra.



Planta humanizada



Vista do protótipo

Figura 2.10 – Modelo de habitação popular.

Fonte: PENNA, 2009.

Campos (2010) apresentou uma avaliação da percepção e absorção do sistema construtivo LSF por parte do usuário, tendo por critério, seu nível de consciência em relação ao sistema e de vivência no uso e manutenção da tecnologia. Campos (2010) fez cinco estudos de caso incluindo escolas e residências. Segundo a autora, o contato direto com os usuários e o espaço edificado proporcionou uma reflexão global sobre o sistema construtivo. De acordo com Campos (2010), os usuários indicaram a falta de mão de obra especializada e a dificuldade de encontrar no mercado alguns componentes como desvantagens do sistema. No entanto, concluiu-se que a maioria das reclamações e patologias encontradas pode ser diretamente relacionada à má resolução dos projetos de detalhamento.

Campos (2010) também apresentou algumas recomendações práticas a fim de se evitar patologias nas edificações em LSF. A autora destacou a importância do projeto de

isolamento térmico, que deve ser adequado ao tipo de clima das regiões brasileiras, às funções de cada ambiente e à orientação solar. Segundo a autora, alguns problemas relatados pelos moradores podem estar relacionados às pontes térmicas através da estrutura metálica e ao uso de determinados materiais, como telhas asfálticas.

Um estudo numérico da transferência de calor em modelos de painéis no sistema LSF foi apresentado por Souza (2010). O autor analisou via MEF a transferência de calor através da espessura dos painéis quando submetidos a elevadas temperaturas, a variação e a distribuição da temperatura e a proteção térmica dos painéis. Foram utilizadas diferentes configurações de placas de fechamento. Souza (2010) constatou que o acréscimo de uma segunda chapa de gesso proporciona uma redução significativa na elevação da temperatura ao longo da espessura do painel. Além disso, foi observado que, próximo ao lado de exposição ao incêndio, o uso do isolamento no preenchimento da cavidade leva a valores maiores de temperatura nos perfis metálicos.

Vivan (2011), em seu trabalho intitulado “Projetos para produção de residências unifamiliares em *Light Steel Framing*”, apresentou diretrizes para a elaboração de projetos com o objetivo de proporcionar maior controle sobre a produção e clareza na disposição das informações necessárias à execução da obra. Segundo Vivan (2011), no Brasil, usualmente a construção de edificações habitacionais unifamiliares é desenvolvida com baixíssimos índices de controle da produção, trabalhando apenas com o projeto de arquitetura para o controle da construção. O autor destaca a importância de se respeitar as informações técnicas do projeto durante a execução da obra, a organização de um caderno de montagem e padrões relacionados a detalhes gráficos. Em sua pesquisa, Vivan (2011) apresenta alguns exemplos de pranchas com o detalhamento das montagens dos painéis de forma bem didática. O autor sugere que a construção de edificações em LSF deveria ser desenvolvida tendo como base os projetos para produção.

Quanto à normalização, existem atualmente no Brasil as normas referentes aos PFF: NBR 6355 – “Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização” (ABNT, 2003); NBR 15253 – “Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis

reticulados em edificações - Requisitos gerais” (ABNT, 2005) e NBR 14762 – “Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio” (ABNT, 2010).

Em relação a uma norma específica para o sistema construtivo LSF, a única referência é a Diretriz SINAT 003 (2010) “Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo *Light Steel Framing*)”. Esse documento, resultado de um esforço conjunto do MINISTÉRIO DAS CIDADES – Secretaria Nacional de Habitação (SNH), do Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) e do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de Produtos Inovadores (SINAT), fornece requisitos, critérios de desempenho e métodos de avaliação para edificações em LSF. Em relação ao desempenho térmico de edificações em LSF, a Diretriz SINAT 003 (2010) determina que a edificação deva reunir características que atendam às exigências de desempenho térmico estabelecidas na norma NBR 15575 (ABNT, 2008) e às características bioclimáticas definidas na NBR 15220 (ABNT, 2005).

Os recentes trabalhos, estudos e normas sobre o uso de perfis formados a frio tem em comum a busca por qualidade na construção civil brasileira. Constatou-se nesses trabalhos um desejo comum de se aumentar a eficiência do sistema LSF e adaptá-lo às condições econômicas, culturais e climáticas do Brasil. No entanto, os estudos relativos ao desempenho térmico do sistema LSF ainda são poucos, o que reforça o desenvolvimento deste estudo.

2.3 Transferência de calor no sistema LSF

Quando um material de alta condutividade térmica como o aço é colocado em paralelo com um material isolante, a maior parte da transferência de calor ocorre através do metal, por condução, caracterizando um efeito conhecido por ponte térmica através do perfil em aço, ou *thermal bridge* (AISII, 2006). A ponte térmica reduz a resistência térmica do painel e aumenta os gastos energéticos para aquecimento ou resfriamento do ambiente.

Em climas temperados, a transferência de calor através das pontes térmicas pode se manifestar em marcas escuras que aparecem sobre os montantes nos fechamentos internos dos painéis externos (Figura 2.11).

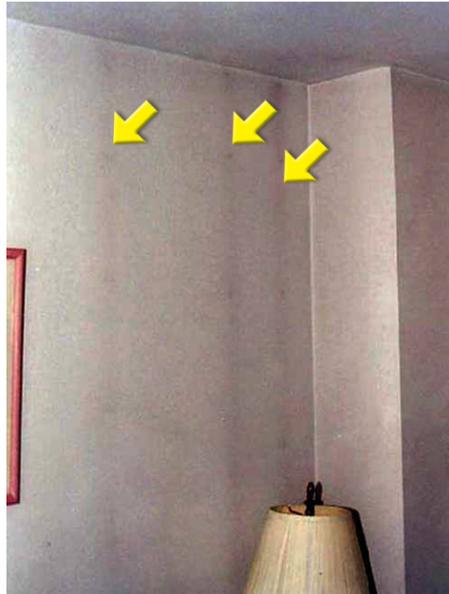


Figura 2.11 – Condensação e poeira sobre os montantes.
Fonte: O'BRIEN, 2010.

Esse fenômeno conhecido por *ghost marking* ou *ghosting* ocorre quando as baixas temperaturas localizadas nos perfis levam à condensação e/ou deposição de partículas de poeira do ar interior na superfície da parede. Essas marcas escuras podem ocorrer quando a temperatura da superfície no fechamento variar mais de 1,8 °C (IISI, 2001).

Em climas quentes e úmidos, um fenômeno semelhante pode acontecer nas superfícies das paredes. Em ambientes climatizados com altas temperaturas exteriores, podem ser formadas zonas frias sobre os montantes nas superfícies das paredes devido ao efeito das pontes térmicas. Essas marcas da estrutura nos painéis foram observadas por Campos (2010) em algumas edificações do condomínio residencial Jardim das Paineiras, em Cotia, São Paulo (Figura 2.12).



Figura 2.12 – Marcas das estruturas nos painéis internos.
Fonte: CAMPOS, 2010.

Na maioria dos climas é necessário criar uma ruptura térmica (*thermal break*) entre os perfis de aço e o lado frio do fechamento. A melhoria da eficiência térmica dos painéis em LSF pode ser obtida por meio da modificação dos montantes, do isolamento da estrutura, da inserção de um revestimento isolante ou de uma camada de ar estagnada. A seguir, são apresentadas algumas estratégias de ruptura para melhorar o desempenho térmico dos painéis em LSF.

2.3.1 Perfis com fendas nas almas

Uma forma de diminuir a condução de calor pelos perfis de aço e reduzir o efeito das pontes térmicas foi encontrada perfurando as almas dos montantes (*Slotted Studs*). As perfurações na alma dos montantes aumentam o comprimento do trajeto do fluxo de calor (Figura 2.13) e, conseqüentemente, aumentam a resistência térmica a este fluxo. As perfurações nas almas dos montantes resultam em uma melhoria de 45% na resistência térmica dos perfis (MEO et al., 1998).



Figura 2.13 – Trajeto do fluxo de calor através das almas dos montantes.
Fonte: Adaptado de MEO et al., 1998.

O desempenho desses perfis depende da forma, área de redução e dimensões dos furos (Figuras 2.14 e 2.15). Grandes perfurações proporcionam um melhor desempenho térmico, mas comprometem o desempenho estrutural. O uso de fendas reduz a resistência do perfil, principalmente ao cisalhamento (VELJKOVIC e JOHANSSON, 2006).

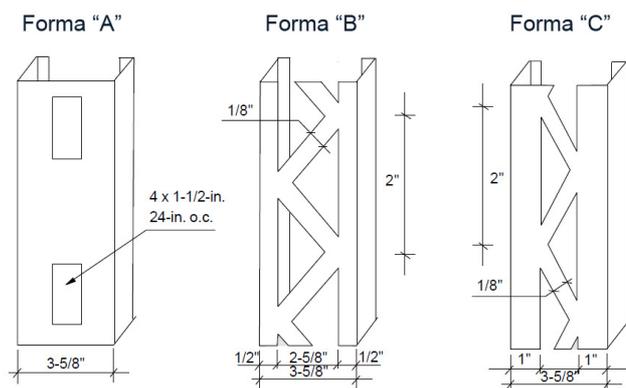


Figura 2.14 – Tipos de aberturas nas almas dos perfis.
Fonte: KOSNY; CHRISTIAN; DESJARLAIS, 2010.

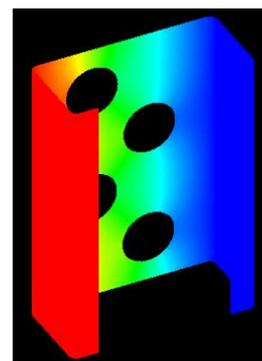


Figura 2.15 – Perfurações em forma circular.
Fonte: AISI, 2006.

Devido ao clima bastante frio e a preocupação com a eficiência energética, na Suécia e na Finlândia o efeito das pontes térmicas é reduzido pelo uso dos perfis com fendas nas almas (Figura 2.16). Nos painéis externos também é aplicada a lã mineral preenchendo o espaço entre os montantes e uma camada adicional externa de isolante térmico.

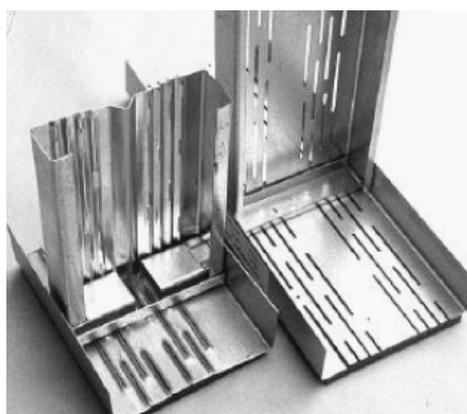


Figura 2.16 – Perfurações em forma de fendas.
Fonte: VELJKOVIC e JOHANSSON, 2006.

2.3.2 Perfis com mesas modificadas

Modificando o formato das mesas dos montantes por meio da inclusão de sulcos (*Vertical Ridges*), pode-se aumentar a resistência de contato (Figura 2.17). Perfis com mesas dobradas (ou com sulcos) diminuem o contato da estrutura com os painéis por meio da inserção de uma camada de ar (Figura 2.18). Utilizando um perfil com recuo de 6 mm em cada mesa, aumenta-se em 16% a resistência térmica do fechamento. Esta solução é recomendada pelo Departamento de Energia dos EUA (THERMACHANNEL, 2010).



Figura 2.17 - Perfil com mesa dobrada
Thermachannel.
Fonte: THERMACHANNEL, 2010.

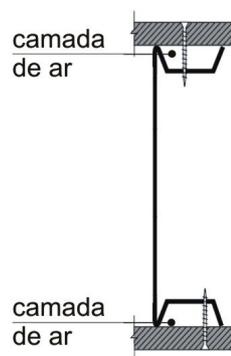


Figura 2.18 - Camadas de ar entre o perfil e a chapa.
Fonte: Adaptado de THERMACHANNEL, 2010.

A criação de saliências (*Dimples*) nas mesas é outra opção para reduzir o contato com as placas de fechamento (Figura 2.19). As saliências podem reduzir a área de contato em até 89% (IISI, 2001).

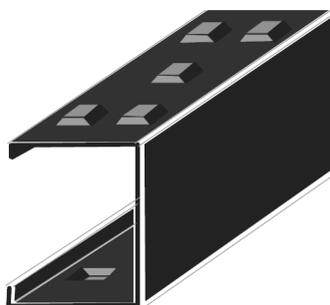


Figura 2.19 – Perfil com saliências nas mesas.
Fonte: KOSNY; CHRISTIAN; DESJARLAIS, 2010.

2.3.3 Perfis revestidos com isolantes rígidos

Outra forma de reduzir o efeito negativo dos perfis de aço no desempenho global do sistema é por meio do encaixe de isolantes rígidos nos elementos estruturais (*Thermal Break Strips* - Figura 2.20). O uso de seções finas nas mesas dos montantes, como fitas de poliestireno extrudado (XPS) ou expandido (EPS), fornece um rompimento térmico entre o perfil e o fechamento interno do painel. O material mais utilizado como revestimento é o EPS, mas pode-se utilizar outros materiais como fibrocimento. A empresa australiana *CEMINTEL* fabrica um revestimento específico para LSF em fibrocimento que possui a resistência térmica de 0,21 (m².K)/W. Uma das vantagens apresentadas pelo sistema é o baixo custo se comparado a outras formas de se aumentar a resistência térmica do painel (Figura 2.21).

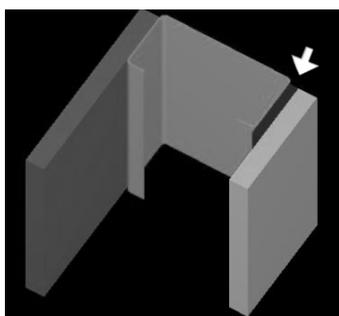


Figura 2.20 - Isolante rígido para ser aplicado nos montantes.
Fonte: AISI, 2006.



Figura 2.21 – Isolante rígido da CEMINTEL.
Fonte: CEMINTEL, 2010.

Pode-se também proteger todo o montante com 25 mm de EPS (*Local foam insulation*). Utilizando esse sistema com lã de vidro entre montantes, o comportamento térmico do painel em LSF fica bem próximo do painel em *Wood Framing* (painéis estruturados com madeira maciça - antecessor do *Steel Framing*). Essa forma de ruptura térmica é de baixo custo e apresenta bom desempenho (Figura 2.22).



Figura 2.22 – Aplicação de espuma contornando o montante.
 Fonte: Fonte: KOSNY, CHRISTIAN e DESJARLAIS, 2010.

2.3.4 Aplicação de uma camada isolante externa

De acordo com Veljkovic e Johansson (2006), introduzindo algum tipo de revestimento isolante rígido (*Insulating Sheathing*), como 13 mm de compensado, 25 a 50 mm de placa de EPS ou 25 a 65 mm de espuma de uretano do lado de fora da estrutura de aço, pode-se reduzir os efeitos das pontes térmicas de forma mais eficiente (Figura 2.23). Essa medida maximiza o desempenho térmico do painel e garante que qualquer condensação seja mantida longe da estrutura. Porém, trata-se de uma solução de custo elevado.

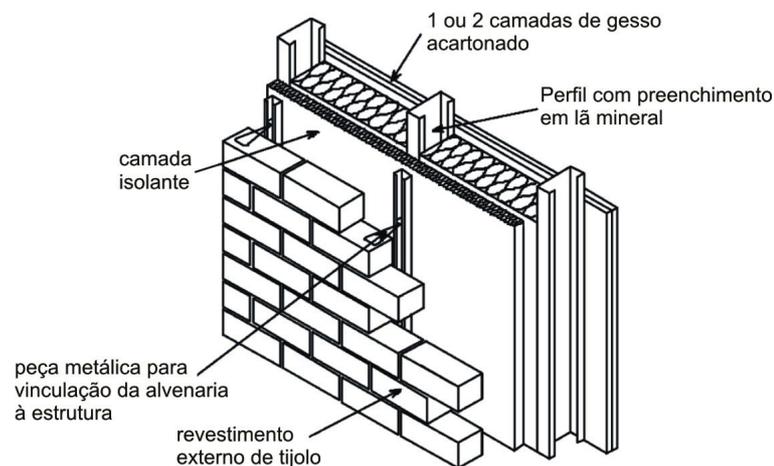


Figura 2.23 - Painel externo com camada isolante.
 Fonte: Adaptado de VELJKOVIC e JOHANSSON, 2006.

O isolamento externo pode substituir o isolamento dos painéis com a inserção de lã de vidro (ou de rocha) entre os montantes. Segundo estudo realizado por Kosny, Christian

e Desjarlais (2010), considerando o clima temperado, o painel mais eficiente dentre os que possuem revestimento isolante foi obtido utilizando-se duas camadas de EPS sem lã de vidro na cavidade do painel (Figura 2.24).

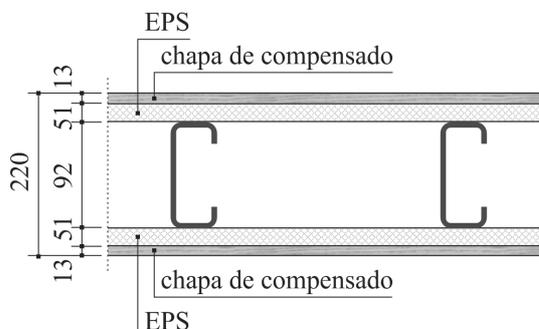


Figura 2.24 – Painel com isolamento rígido.

Os revestimentos isolantes rígidos também podem ser fixados na estrutura para formar uma “cavidade térmica”. Com a inserção de um espaçador de madeira ou aço é adicionada uma camada de ar não ventilada, que aumenta a resistência térmica do fechamento, melhorando o desempenho térmico do sistema (Figura 2.25) (NASH, 2009).

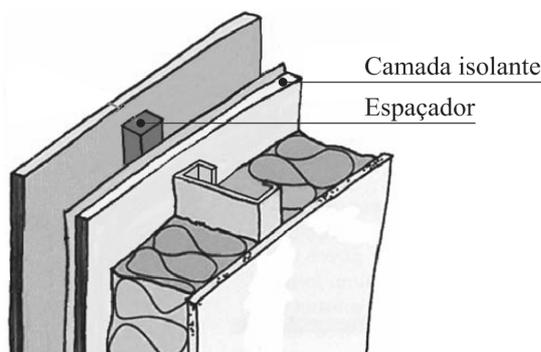


Figura 2.25 – Criação de uma camada de ar utilizando uma camada isolante rígida e um espaçador.
Fonte: Adaptado de NASH, 2009.

2.3.5 Aplicação de reboco térmico

O reboco térmico aplicado no exterior dos painéis, conhecido nos Estados Unidos da América como EIFS, é outra solução utilizada para reduzir os efeitos das pontes térmicas. Trata-se de um sistema para reduzir os gastos com energia por meio do

isolamento dos edifícios a partir do exterior. Possui aparência final semelhante aos sistemas construtivos tradicionais e sua constituição é apresentada na Figura 2.26.

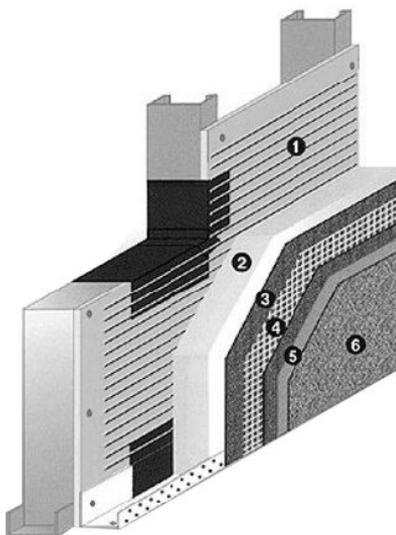


Figura 2.26 – Constituição do sistema EIFS.
 1- substrato; 2- placa de isolamento;
 3- revestimento de base; 4- tela de reforço;
 5- regulador de fundo; 6- revestimento final.
 Fonte: PAINEL EIFS, 2010.

Segundo Santiago (2008), uma solução parecida com o sistema EIFS aplicada no Brasil é composta por substrato de OSB (espessura 15 mm), membrana de polietileno, EPS e argamassa elastomérica (Figura 2.27).

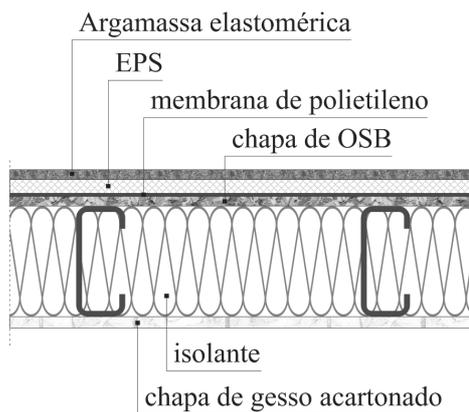


Figura 2.27 – Painel isolante.

2.4 Considerações acerca do Capítulo II

As empresas que trabalham com LSF na região de Belo Horizonte/MG, para condições climáticas que julgam mais severas, aplicam uma manta de borracha de 2 mm sobre os montantes ou utilizam banda acústica para isolar termicamente os perfis. Deve-se salientar que essas soluções não são encontradas na literatura especializada e se trata de improvisações. A banda acústica é uma manta à base de resina autoadesiva que é colocada entre a fundação e o painel para regularizar a superfície e impedir o contato das placas com a umidade; não é um material para criar uma ruptura térmica.

Em climas temperados, a redução da área de contato entre os montantes de aço e os fechamentos só é eficaz se for acompanhada por isolamento externo. A utilização de revestimentos isolantes é uma maneira tradicional e eficiente de reduzir as perdas de calor causadas pelos componentes de aço nos painéis. Porém, segundo Kosny, Christian e Desjarlais (2010), o uso de EPS protegendo os montantes pode ser a forma mais simples (e mais barata que a utilização de revestimentos isolantes) de melhorar drasticamente o desempenho térmico dos painéis.

Outras formas de aumentar a eficiência térmica do sistema LSF são: aumentar a espessura do material de ruptura térmica, aumentar a alma dos montantes ou diminuir a largura das mesas. Mas, vale lembrar que o desempenho térmico da edificação também está associado à qualidade do projeto de isolamento térmico dos fechamentos.

Na revisão de literatura não foram encontradas recomendações para o projeto de isolamento térmico de edificações em LSF. Em algumas condições climáticas do Brasil, mesmo com um bom projeto de isolamento, ainda é necessário o aquecimento artificial dos ambientes, como na Zona Bioclimática 1 (NBR 15220:2005). Por isso, são apresentadas no Anexo A algumas diretrizes para o isolamento térmico de edificações em LSF. O objetivo é apresentar boas práticas que constam em códigos de energia internacionais e recomendações para que o comportamento térmico da edificação seja adequado às condições climáticas mais rígidas do Brasil.

3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

3.1 Considerações iniciais

A simulação do desempenho térmico de uma edificação pode ser utilizada para demonstrar a conformidade de um projeto com uma norma de desempenho ou como uma previsão do comportamento da edificação. Pode-se estudar a influência das decisões de projeto (escolha dos componentes construtivos, sistemas de iluminação e estratégias de condicionamento ativo ou passivo) no comportamento térmico dos ambientes e estimar o consumo de energia.

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.

Toda simulação do desempenho térmico apresenta incertezas, que são inseridas a partir de diversas fontes. As incertezas podem ser causadas pela falta de informação, quando no momento da simulação geralmente o projeto não está totalmente resolvido, por meio de simplificações realizadas na modelagem dos fenômenos físicos e pelo fato de as edificações não serem construídas exatamente como especificadas no projeto. Na Figura 3.1, apresenta-se o processo de simulação de uma edificação e os locais onde as incertezas são inseridas.

A falta de confiança nos resultados fornecidos pela simulação numérica pode ser reduzida por meio da calibração e análise de incertezas sobre o modelo da edificação. Segundo Westphal (2007), no processo de calibração do modelo de edificações em fase

projetual, geralmente utilizam-se indicadores de desempenho de edificações semelhantes, como o histórico do consumo de energia elétrica.

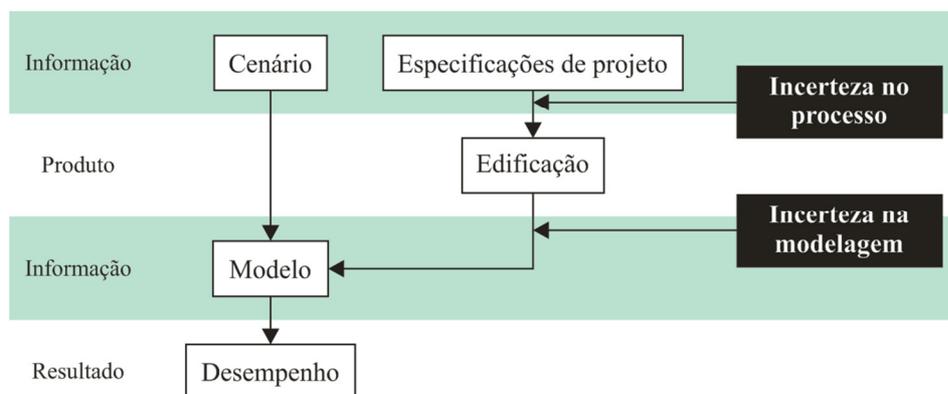


Figura 3.1 – Fluxograma do processo de simulação do desempenho de uma edificação.
Fonte: Adaptado de WIT (1997).

A caracterização de um modelo no *EnergyPlus* implica no conhecimento de um grande número de variáveis. A diversidade dos dados de entrada aumenta a precisão nos resultados, mas também pode gerar dúvidas e levar a resultados errôneos. A precisão dos resultados está relacionada a um profundo entendimento do programa utilizado e do comportamento da edificação a ser simulada.

Neste capítulo, faz-se uma breve revisão bibliográfica sobre o processo de avaliação do desempenho térmico por meio de simulação numérica, apresentado as etapas e diretrizes que serão consideradas no desenvolvimento do método. Apresenta-se também a ferramenta computacional *EnergyPlus*, focando nos parâmetros de entrada da simulação numérica considerando edificações condicionadas e não condicionadas.

3.2 Etapas da avaliação do desempenho térmico de edificações

Segundo Akutsu (1998), no processo de avaliação do desempenho térmico por simulação numérica são contempladas as etapas conforme apresentadas na Figura 3.2.

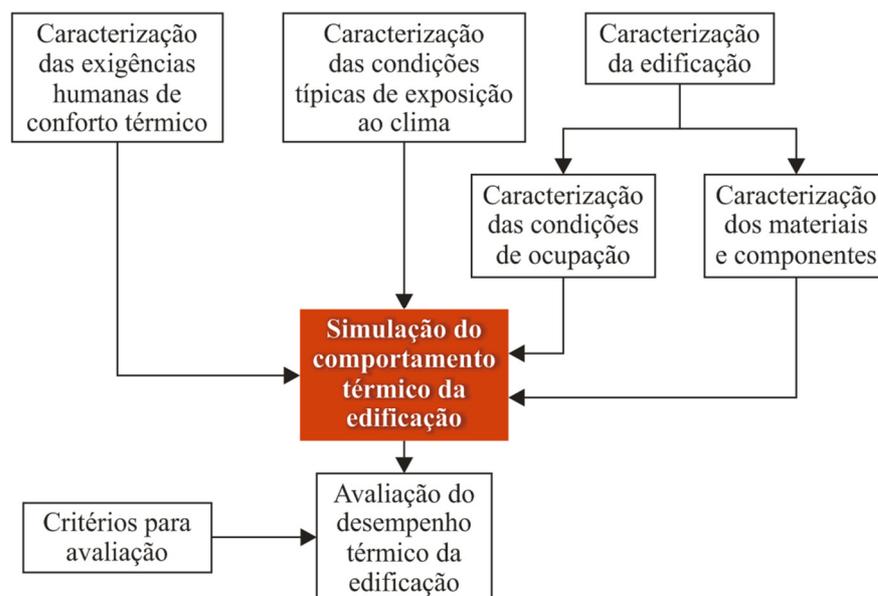


Figura 3.2 – Etapas do processo de avaliação do desempenho térmico de edificações.

Fonte: Adaptado de Akutsu (1998).

As exigências humanas de conforto térmico são caracterizadas por valores, ou intervalos de valores inter-relacionados da temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e temperatura radiante média do ambiente. Esses valores são fixados em função da taxa metabólica e do índice de resistência térmica da vestimenta dos ocupantes (ISO 7730: 2007). O método desenvolvido por Akutsu (1998) adota as exigências de conforto térmico das Normas ISO.

As informações climáticas podem ser inseridas na simulação numérica por meio de diferentes tipos de arquivos climáticos, sendo os mais utilizados no Brasil: o ano climático de referência – TRY (*Test Reference Year*) e os dias típicos de projeto para verão e inverno. O arquivo TRY é obtido pela eliminação de anos que contenham temperaturas médias mensais extremas. É o ano real que mais se aproxima da normal climatológica. Este tipo de arquivo é utilizado para o estudo do comportamento de uma edificação ao longo de um ano e apresenta boa precisão no cálculo da demanda média de energia (OLIVEIRA, 2006). Os dias típicos (ou de projeto) são caracterizados por sua frequência de ocorrência e representam as condições mais significativas ao longo do período de verão e de inverno (AKUTSU, 1998). A utilização desses dados possibilita uma simulação numérica mais rápida, mas pode subestimar ou superestimar o

dimensionamento de sistemas, caso não se faça um tratamento adequado dos dados climáticos para a obtenção dos dias típicos.

As variáveis de projeto são as características da edificação e seu entorno a serem modeladas. Essas variáveis referem-se às propriedades termofísicas dos componentes e materiais, configuração da planta, orientação solar, tipo de adensamento do entorno, sombreamento causado por edificações vizinhas e outros. As variáveis de uso e ocupação correspondem à caracterização de um ambiente em função das atividades para as quais foi destinado. Considera-se a densidade de ocupação e cargas térmicas internas, além das rotinas de operação do ambiente, como abertura de portas e janelas.

A simulação numérica do comportamento térmico da edificação deve ser feita por programas que considerem o caráter dinâmico dos fenômenos de trocas de energia e massa entre a edificação e o ambiente externo.

3.2.1 Critérios de avaliação para ambientes naturalmente ventilados (não condicionados)

Atualmente, o critério mais utilizado na avaliação do desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas é a temperatura interna do ar. A análise dos resultados pode-se apoiar em uma análise gráfica da distribuição da temperatura ou na quantidade de graus-hora de desconforto, que representa a contagem em graus da diferença entre a temperatura de referência e a temperatura interna encontrada.

A norma brasileira NBR 15575 (ABNT, 2008) é utilizada pela CEF como critério de análise na aprovação de financiamentos de edificações com novos sistemas construtivos. Esta norma está baseada em um sistema de classificação do desempenho térmico de edificações e apresenta algumas diretrizes para a avaliação.

Na parte 1 da norma, “Requisitos gerais”, apresenta-se os procedimentos de carácter informativo para a avaliação da adequação de habitações por meio de simulação

computacional. As etapas sugeridas consideram a resposta global da edificação e são ilustradas na Figura 3.3

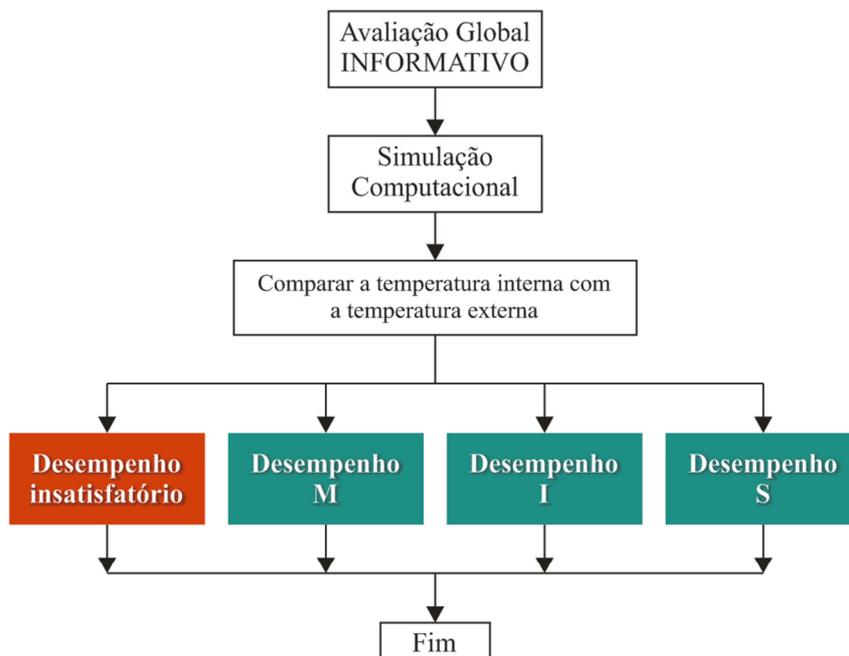


Figura 3.3 – Fluxograma dos procedimentos de avaliação por simulação numérica.
Fonte: Adaptado da NBR 15575 (ABNT, 2008), pg 19.

As seguintes diretrizes são sugeridas pela norma para padronização das simulações computacionais de edificações em fase de projeto:

- 1) A avaliação deve ser feita para um dia típico de projeto, de verão e de inverno. Os dados climáticos da cidade onde será localizada a edificação podem ser extraídos das tabelas da norma. Caso a cidade não conste nessas tabelas, utilizar os dados climáticos da cidade mais próxima, dentro da mesma zona bioclimática, com altitude de mesma ordem de grandeza.
- 2) Para unidades habitacionais isoladas, simular todos os recintos considerando as trocas térmicas entre os seus ambientes e avaliar os resultados dos recintos dormitórios e salas.
- 3) Para edifícios multipiso, selecionar uma unidade do último andar com cobertura exposta.

- 4) Considerar na entrada de dados que os recintos adjacentes de outras edificações separados por paredes de geminação ou entrepisos, apresentem a mesma condição térmica do ambiente que está sendo simulado.
- 5) A unidade habitacional escolhida para a simulação deve ter pelo menos um dormitório ou sala com duas paredes expostas, sendo que, preferencialmente: no verão, a janela do dormitório ou sala deve estar voltada para *oeste* e a outra parede exposta voltada para *norte*; no inverno, a janela do dormitório ou sala deve estar voltada para *sul* e a outra parede exposta voltada para *leste*.
- 6) Considerar que as paredes expostas e as janelas estão desobstruídas – sem a presença de edificações ou vegetação nas proximidades que modifiquem a incidência de sol e/ou vento.
- 7) Adotar uma taxa de ventilação do ambiente de 1 ren/h.
- 8) A absorvância à radiação solar das superfícies expostas deve ser definida conforme a cor e as características das superfícies externas da cobertura e das paredes expostas. Para as paredes recomenda-se: cor clara: $\alpha = 0,3$; cor média: $\alpha = 0,5$ e cor escura: $\alpha = 0,7$.
- 9) O edifício que não atender aos critérios estabelecidos para o verão, deve apresentar obrigatoriamente modificações no projeto para aumentar o sombreamento das janelas e/ou a taxa de ventilação dos ambientes. As novas condições são limitadas a uma taxa de ventilação do ambiente de 5 ren/h e um dispositivo de proteção solar que reduza no máximo 50% da radiação solar direta.

De acordo com o Anexo A da norma NBR 15575 (ABNT, 2008), na avaliação global devem-se considerar as características bioclimáticas da região de implantação da obra, definidas na norma NBR 15220 (ABNT, 2005), e a verificação do atendimento aos requisitos e critérios estabelecidos, cujo nível mínimo para a aceitação é o “M” (denominado mínimo).

Para as condições do dia típico de verão, o valor máximo diário da temperatura do ar interior nos recintos de longa permanência (dormitórios e salas) deve ser sempre menor ou igual ao valor máximo diário da temperatura do ar exterior. Na avaliação, deve-se

desconsiderar as fontes internas de calor. Na Tabela 3.1, apresenta-se os critérios de avaliação para as condições de verão.

Tabela 3.1 – Critério de avaliação para as condições de VERÃO

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
<i>M</i>	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
<i>I</i>	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2 \text{ °C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1 \text{ °C})$
<i>S</i>	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4 \text{ °C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2 \text{ °C})$ e $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1 \text{ °C})$

$T_{i,max}$ = é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em °C;
 $T_{e,max}$ = é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C;
 $T_{i,min}$ = é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em °C;
 $T_{e,min}$ = é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C;
M = nível mínimo; *I* = nível intermediário; *S* = nível superior.

Fonte: Adaptado da NBR 15575 (ABNT, 2008), pg 49.

Para as condições do dia típico de inverno, o valor mínimo diário da temperatura do ar interior nos recintos de longa permanência deve ser sempre maior ou igual à temperatura mínima externa acrescida de 3 °C. Na Tabela 3.2, apresenta-se os critérios de avaliação para as condições de inverno.

Tabela 3.2 – Critério de avaliação para as condições de INVERNO

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 5	Zonas 6, 7 e 8
<i>M</i>	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3 \text{ °C})$	Nestas zonas, este critério não precisa ser verificado
<i>I</i>	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 5 \text{ °C})$	
<i>S</i>	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 7 \text{ °C})$	

$T_{i,min}$ = é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em °C;
 $T_{e,min}$ = é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C;
M = nível mínimo; *I* = nível intermediário; *S* = nível superior.

Fonte: Adaptado da NBR 15575 (ABNT, 2008), pg 50.

3.2.2 Critérios de avaliação para ambientes condicionados artificialmente

A escolha dos critérios de avaliação do desempenho térmico de edificações deve levar em conta não só o conforto térmico dos usuários, mas também a forma como a energia será utilizada. Por isso, as pesquisas que utilizam ferramentas de simulação numérica busca-se adotar o consumo de energia da edificação como critério. Neste caso, as cargas térmicas para resfriamento ou aquecimento dos ambientes influenciam muito nos

resultados. A vantagem desse critério é o reduzido número de variáveis a serem manipuladas, como o consumo de energia mensal ou final e a carga térmica para resfriamento.

Atualmente, os estudos na área baseiam-se principalmente em análises comparativas de alternativas de projeto, avaliando-se as alterações arquitetônicas no impacto no sistema de condicionamento de ar.

3.2.3 Etapas da avaliação no programa *EnergyPlus*

Na Figura 3.4, apresenta-se as etapas da modelagem de uma edificação no *EnergyPlus*.

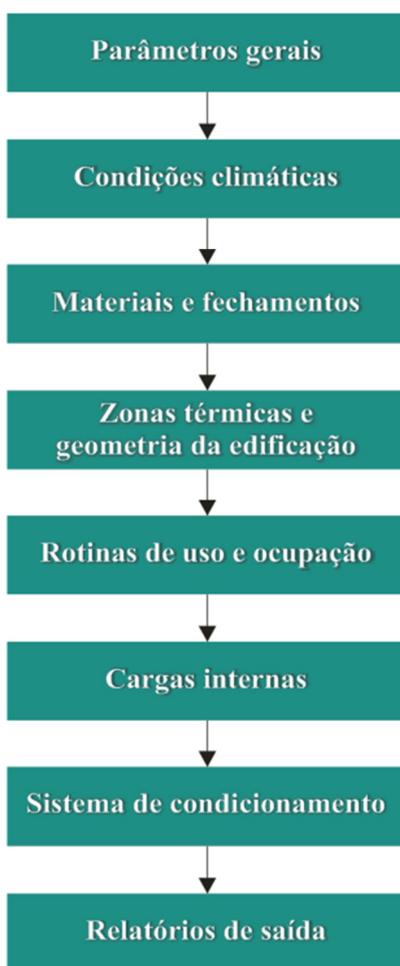


Figura 3.4 – Etapas da modelagem no *EnergyPlus*.

A primeira etapa é a definição dos parâmetros gerais de simulação numérica. Nesta etapa inicial é definido o modelo de cálculo de transferência de calor e umidade que será utilizado pelo programa, o intervalo de tempo entre cada simulação e o tipo de condicionamento ambiental: natural ou artificial. Determinam-se parâmetros que influenciam nos cálculos da carga térmica, ventilação e sombreamento, além dos dados gerais da edificação e seu entorno, como orientação solar e tipo de terreno.

Na segunda etapa, faz-se a caracterização das condições climáticas. As variáveis climáticas que podem ser consideradas são: temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento, pressão barométrica, radiação solar, temperatura do solo, índice de limpidez do céu e indicadores de chuva. Em uma simulação numérica anual é importante observar as datas dos feriados e rotinas diferenciadas para o período de férias ou do horário de verão. Porém, em uma simulação numérica com condicionamento artificial, os dias típicos também devem ser inseridos, pois eles são utilizados para estimar as cargas térmicas iniciais.

Na descrição do arquivo de simulação numérica é necessário especificar os materiais e a composição dos fechamentos internos e externos. No *EnergyPlus*, os materiais podem ser caracterizados por suas propriedades termofísicas (condutividade térmica, massa específica e calor específico), espessura, absorvidade e rugosidade ou pela resistência térmica ($m^2.K/W$). Os materiais descritos são utilizados para compor os fechamentos (ou painéis) em camadas.

Na fase seguinte, define-se as zonas térmicas para a modelagem da geometria da edificação. Cada zona térmica corresponde a um volume de ar de temperatura uniforme. O projeto arquitetônico pode ser simplificado em uma análise preliminar, unindo-se zonas adjacentes. Cada zona é formada por superfícies que constituem os fechamentos da edificação: paredes, piso, teto, cobertura, portas e janelas. Estes fechamentos são relacionados aos materiais e condições de ventilação e iluminação. Nesta etapa, também são desenhados os dispositivos de proteção solar (internos ou externos) ou superfícies externas que sombreiem o edifício.

Uma etapa importante na entrada de dados da simulação numérica é a definição das rotinas de uso e ocupação. Deve-se criar uma rotina diária, semanal ou anual para a abertura e fechamento de portas e janelas, períodos de acionamento do sistema de ar condicionado, densidade de ocupação e cargas térmicas internas.

A próxima etapa é a caracterização das cargas térmicas internas. As cargas mais comuns são: pessoas, iluminação e equipamentos elétricos. Dentre os parâmetros principais na entrada das cargas internas, é importante caracterizar a atividade realizada pelos ocupantes e a respectiva taxa de calor liberada e as taxas e fração radiante da iluminação e equipamentos elétricos.

A última etapa consiste na descrição da ventilação natural ou do sistema de condicionamento de ar e definição dos relatórios de saída.

3.3 O programa *EnergyPlus*

3.3.1 Considerações iniciais

O *EnergyPlus* (atualmente na versão: 7.0) é um programa computacional gratuito e foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e é baseado nas ferramentas BLAST e DOE-2, que foram criadas no final dos anos 70 para simulação numérica de desempenho energético e dimensionamento de sistemas de climatização. Como os programas antecessores, o *EnergyPlus* calcula as cargas de resfriamento ou aquecimento para manter as condições ambientais dentro da faixa de controle e o consumo de energia dos sistemas principal e secundário de condicionamento de ar e de outros equipamentos.

Ao contrário dos programas computacionais BLAST e DOE-2, que possuem simulação seqüencial, no *EnergyPlus* todos os elementos são integrados e controlados pelo Gerenciador de Solução Integrado. A realização dos módulos integrados torna a simulação mais dinâmica e os resultados mais realísticos. O gerente geral de simulação integra três gerenciadores principais (Figura 3.5).

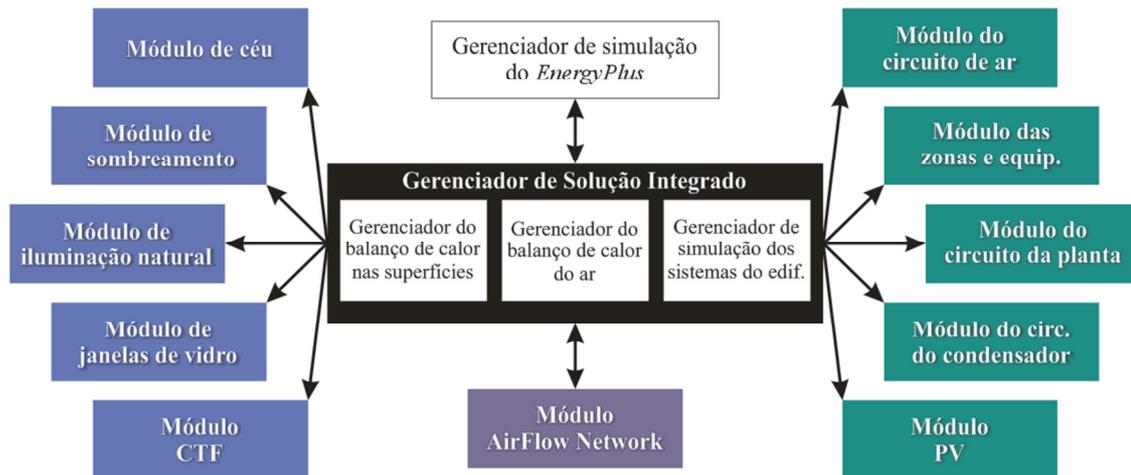


Figura 3.5 – Módulos do *EnergyPlus*.
 Fonte: Adaptado de LBNL, 2011a.

O Gerenciador do balanço de calor nas superfícies simula o balanço térmico no interior e exterior das superfícies e trabalha em conjunto com os módulos de céu, sombreamento, iluminação natural, janelas de vidro e com o cálculo das funções de transferência por condução (CTF). O Gerenciador do balanço de calor do ar trata dos fluxos de massa como ventilação, exaustão e infiltração de ar e está integrado ao módulo de ventilação natural (*AirFlow Network*). Após o gerenciador de simulação do *EnergyPlus* resolver o balanço térmico nas superfícies e no ar, é requisitado o Gerenciador de simulação dos sistemas do edifício, que controla a simulação do HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) equipamentos e componentes e sistemas elétricos.

3.3.2 Método de balanço de energia

O método de cálculo utilizado nas zonas térmicas pelo *EnergyPlus* é o balanço de calor. O balanço de energia em cada elemento da edificação envolve os processos de condução, convecção, radiação e transferência de massa, que ocorrem nas superfícies externas e internas. Segundo Crawley et al. (2001), no *EnergyPlus*, o ar da zona térmica é modelado com temperatura uniforme e são assumidas as seguintes hipóteses para o balanço de calor nas superfícies (paredes, janelas, tetos e pisos):

- temperaturas das superfícies uniformes;
- radiação de onda longa e curta uniformes;
- troca de radiação entre superfícies; e
- condução de calor unidimensional.

O balanço de calor na zona térmica é calculado pela equação 3.1, que considera a capacitância e a variação da energia armazenada pelo ar da zona.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (3.1)$$

onde:

$C_z \frac{dT_z}{dt}$ = taxa de energia armazenada no ar da zona térmica (W);

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ = somatório das cargas internas (W);

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ = transferência de calor por convecção proveniente das superfícies (W);

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ = transferência de calor devido à mistura do ar entre as zonas térmicas (W);

$\dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_z)$ = transferência de calor devido à infiltração do ar externo (W);

\dot{Q}_{sys} = taxa de troca de calor com o sistema de climatização (W).

Se a capacitância do ar (C_z) for desprezada, o balanço de calor na zona térmica será representado pela equação 3.2:

$$-\dot{Q}_{sys} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_z) \quad (3.2)$$

Sendo que a energia trocada com o sistema de ar condicionado, carga térmica do ambiente, é definida pela equação 3.3.

$$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (3.3)$$

onde:

\dot{m}_{sys} = taxa de massa de ar resfriada ou aquecida pelo sistema (kg/s);

C_p = calor específico (J/kg.K);

T_{sup} = temperatura da superfície (K);

T_z = temperatura da zona térmica (K).

3.3.2.1 Superfícies externas

O balanço térmico na superfície externa, conforme mostrado na Figura 3.6, é calculado pela equação 3.4.

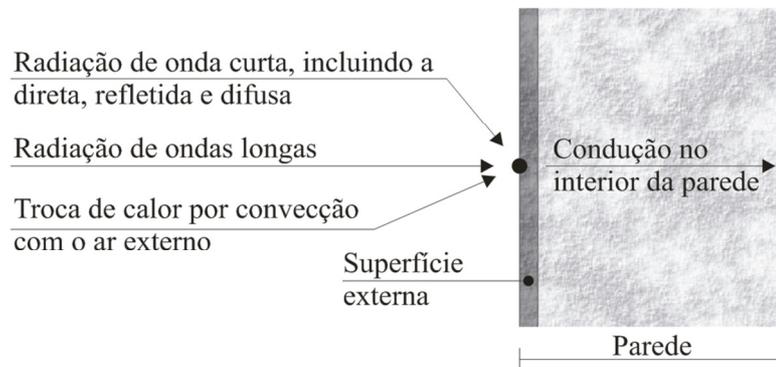


Figura 3.6 – Balanço térmico na superfície externa.
Fonte: Adaptado de LBNL, 2011b.

$$q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (3.4)$$

onde:

$q''_{\alpha sol}$ = fluxo de calor da radiação solar difusa e direta absorvida (W/m^2);

q''_{LWR} = fluxo de radiação de onda longa trocada com o ar e o entorno (W/m^2);

q''_{conv} = fluxo de calor trocado por convecção com o ar externo (W/m^2);

q''_{ko} = fluxo de calor por condução através da parede (W/m^2).

O componente $q''_{\alpha sol}$ é influenciado pela localização, ângulo de incidência, inclinação da superfície, propriedades do material da superfície externa e condições climáticas. O fluxo de calor por radiação é calculado a partir da absortividade e temperatura da

superfície, da temperatura externa e do solo e dos fatores de forma. O fluxo q''_{LWR} devido à troca de radiação com o solo, céu e ar é definido pela equação 3.5.

$$q''_{LWR} = \varepsilon\sigma F_{gnd}(T_{gnd}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon\sigma F_{sky}(T_{sky}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon\sigma F_{air}(T_{air}^4 - T_{surf}^4) \quad (3.5)$$

onde:

ε = emissividade de ondas longas da superfície (adimensional);

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$);

F_{gnd} = fator de forma da parede em relação à temperatura da superfície do solo (adimensional);

F_{sky} = fator de forma da parede em relação à temperatura do céu (adimensional);

F_{air} = fator de forma da parede em relação à temperatura do ar (adimensional);

T_{surf} = temperatura da superfície externa (K);

T_{gnd} = temperatura da superfície do solo (K);

T_{sky} = temperatura do céu (K);

T_{air} = temperatura do ar (K).

A transferência de calor por convecção na superfície exterior é calculada utilizando a formulação clássica (equação 3.6).

$$q''_{conv} = h_{c,ext}A(T_{surf} - T_{air}) \quad (3.6)$$

onde:

$h_{c,ext}$ = coeficiente de convecção externo ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$);

A = área de superfície (m^2);

T_{surf} = temperatura da superfície (K);

T_{air} = temperatura do ar externo (K).

Para os cálculos de condução através das paredes, o *EnergyPlus* utiliza o método das Funções de Transferência por Condução (*Conduction Transfer Function - CTF*), que

considera apenas o calor sensível, desconsiderando o armazenamento ou a difusão da umidade pelos elementos da construção. A forma básica de uma solução pelo método CTF é mostrada na equação 3.7 para o fluxo de calor interno.

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (3.7)$$

Para o fluxo de calor externo, o programa utiliza a equação 3.8.

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (3.8)$$

onde:

q''_{ki} = Fluxo de calor por condução na face interna (W/m^2);

q''_{ko} = Fluxo de calor por condução na face externa (W/m^2);

X_j = Coeficiente CTF externo, $j=0,1,\dots,nz$;

Y_j = Coeficiente CTF transversal, $j=0,1,\dots,nz$;

Z_j = Coeficiente CTF interno, $j=0,1,\dots,nz$;

ϕ_φ = Coeficiente CTF de fluxo, $j=1,2,\dots,nq$;

T_i = temperatura da face interna (K);

T_o = temperatura da face externa (K).

O termo subscrito após a vírgula (por ex., $t-j\delta$) indica o período de tempo t menos j vezes o intervalo de tempo δ . Essas equações indicam que o fluxo de calor em ambos os lados de uma superfície de um elemento de construção genérico está linearmente relacionado com a temperatura atual e com algumas das temperaturas anteriores das superfícies internas e externas, assim como valores do fluxo anteriores na superfície interna (AKUTSU, 1983; SOUZA, 1985).

3.3.2.2 Superfícies internas

O balanço térmico na superfície interna, conforme mostrado na Figura 3.7, é calculado pela equação 3.9.

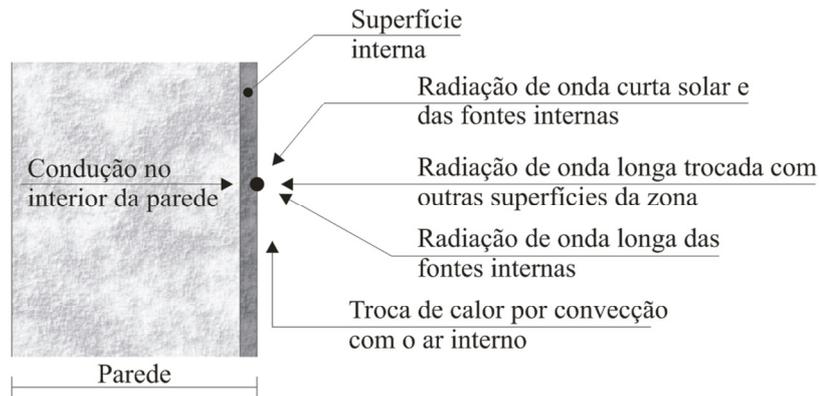


Figura 3.7 – Balanço térmico na superfície interna.
Fonte: Adaptado de LBNL, 2011b.

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (3.9)$$

onde:

q''_{LWX} = fluxo de radiação de onda longa trocado entre superfícies da zona (W/m^2);

q''_{SW} = fluxo de radiação de onda curta da iluminação para a superfície da parede (W/m^2);

q''_{LWS} = fluxo de radiação de onda longa proveniente dos equipamentos (W/m^2);

q''_{ki} = fluxo de calor por condução através da parede (W/m^2);

q''_{sol} = fluxo de radiação solar absorvida e transmitida pela parede (W/m^2);

q''_{conv} = fluxo de calor trocado por convecção com o ar da zona (W/m^2).

A radiação de ondas curtas é proveniente da incidência da radiação solar nas janelas e da emissão das fontes internas como iluminação. A radiação de onda longa inclui emissão e absorção de fontes radiantes de baixa temperatura como as superfícies da zona, equipamentos e pessoas.

A convecção na superfície pode ser modelada como sendo natural, mista ou forçada. Os coeficientes de convecção do termo q''_{conv} são determinados conforme a modelagem do processo de convecção considerado pelo usuário.

3.3.3 Ventilação natural

No clima quente e úmido, a estratégia de ventilação natural proporciona conforto térmico aos ocupantes. O aumento da velocidade do ar pode proporcionar a sensação de resfriamento por meio do acréscimo da taxa de evaporação do suor na superfície da pele e por meio do aumento das trocas convectivas entre a corrente de ar e o corpo humano (MATOS, 2007).

Além disso, os fluxos de ar nas edificações podem ter um impacto significativo no dimensionamento das cargas térmicas e no consumo de energia (GU, 2007). Em um edifício de escritórios com ocupação diurna, desde que a temperatura externa seja menor que a interna, a ventilação noturna esfriará a estrutura da edificação, exigindo menos do sistema de ar condicionado e conseqüentemente, diminuindo o pico das cargas térmicas.

No *EnergyPlus*, a ventilação natural pode ser simulada de forma simplificada, definindo-se uma vazão nominal de ar e um *schedule* (padrão de uso e operação da edificação e seus sistemas) para ser aplicado sobre essa vazão, ou por meio do módulo *AirflowNetwork* – modelo de rede.

3.3.3.1 Ventilação simplificada

No *EnergyPlus*, a diferença entre infiltração e ventilação é definida pela intenção da penetração de ar exterior nas zonas térmicas. A infiltração é caracterizada como um fluxo não intencional de ar do ambiente externo para o interno e a ventilação como um fluxo proposital. Para ambas as definições, o fluxo de ar pode ser modificado pela diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo e pela velocidade do vento

(LBNL, 2011a). A equação básica utilizada pelo programa para caracterizar a ventilação é:

$$\text{Ventilação} = (I_{\text{design}})(F_{\text{schedule}})[A + B|T_{\text{zone}} - T_{\text{odb}}| + C(WS) + D(WS^2)] \quad (3.10)$$

onde:

I_{design} = vazão máxima de projeto (m^3/s);

F_{schedule} = rotina da vazão (adimensional);

T_{zone} = temperatura na zona térmica (K);

T_{odb} = temperatura externa (*outdoor dry-bulb temperature*) (K);

WS = velocidade do vento (m/s); e

A , B , C e D = coeficientes empíricos (adimensional).

A velocidade dos ventos pode ser obtida no arquivo climático utilizado na simulação. Os coeficientes empíricos são padronizados no *EnergyPlus* com os valores 1,0,0,0, proporcionando um fluxo de infiltração constante, modificado apenas pela rotina (F_{schedule}). No entanto, esses coeficientes podem ser determinados utilizando-se métodos contidos no *ASHRAE Handbook: Fundamentals* (2001).

Na simulação da ventilação, de forma simplificada, é necessário definir o número de renovações de ar por hora (ren/h) para cada ambiente e uma rotina horária para esta vazão. Para que a simulação fique próxima de uma situação real, deve-se estipular um limite para esse número de renovações. Taxas de renovações de ar estipuladas sem critério podem levar a interpretações errôneas do comportamento térmico da edificação, uma vez que esse parâmetro exerce grande influência nos resultados. Na Figura 3.8, mostram-se os diferentes perfis da temperatura interna de um ambiente em função da adoção de valores diversos da taxa de renovações de ar por hora.

Quanto maior o número de renovações, mais o perfil da temperatura interna (ZONA 1) se aproxima do perfil do ambiente externo (COSTA, 2005).

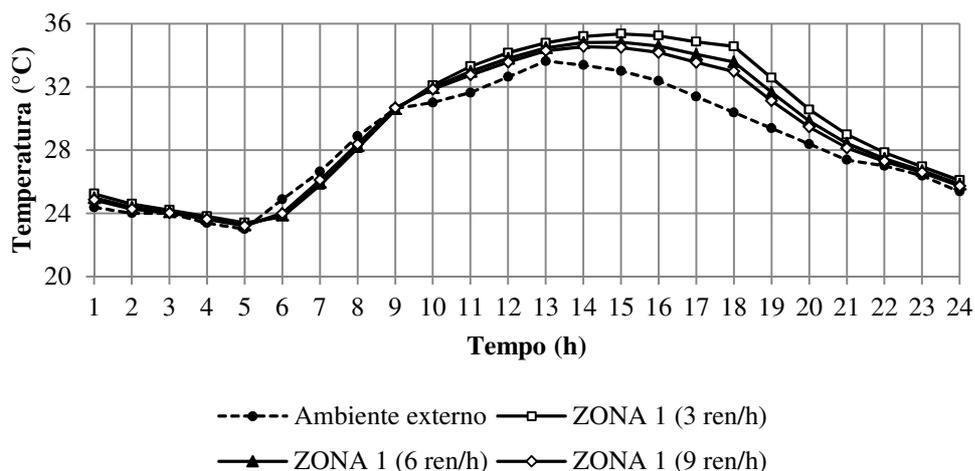


Figura 3.8 - Evolução temporal da temperatura considerando diferentes taxas de ren/h para um ambiente.

Neste tipo de simulação, todos os ambientes da edificação apresentam a mesma taxa de renovação do ar, independente de qualquer variável, como geometria do ambiente ou parâmetros da ventilação. Na Figura 3.9, apresenta-se as taxas de ren/h obtidas variando-se a direção do vento. Nota-se que, independente da direção do vento predominante, o número de renovações nas zonas térmicas permanece o mesmo.

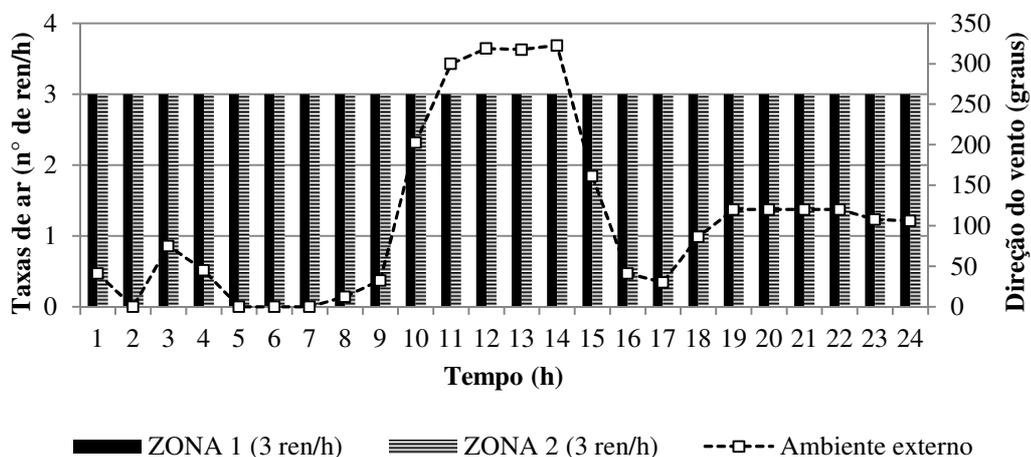


Figura 3.9 - Taxas de ren/h dos ambientes em função da direção do vento predominante.

3.3.3.2 Ventilação no módulo *AirflowNetwork*

O módulo *AirflowNetwork* simula o desempenho de um sistema de distribuição de ar e calcula o fluxo de ar entre zonas térmicas devido à ação do vento ou à distribuição forçada (LBNL, 2011a). No *EnergyPlus*, a simulação da ventilação natural é realizada simultaneamente com a simulação térmica da edificação. O modelo de cálculo do fluxo de ar do *AirflowNetwork* inclui partes do programa COMIS (FEUSTEL; RAYNOR-HOSEN, 1990) e do AIRNET (WALTON, 1989).

Nesse módulo, a edificação é descrita como uma rede de zonas interconectadas por aberturas (*links*). Cada nó de pressão representa uma zona e a interconexão desses nós corresponde aos impedimentos ao fluxo de ar. Na Figura 3.10, apresenta-se uma possível rede de fluxo de ar para duas zonas térmicas com aberturas nas fachadas sul e leste. Os nós de pressão, representados por pontos, são volumes com ar misturado de forma homogênea e com pressão estacionária.

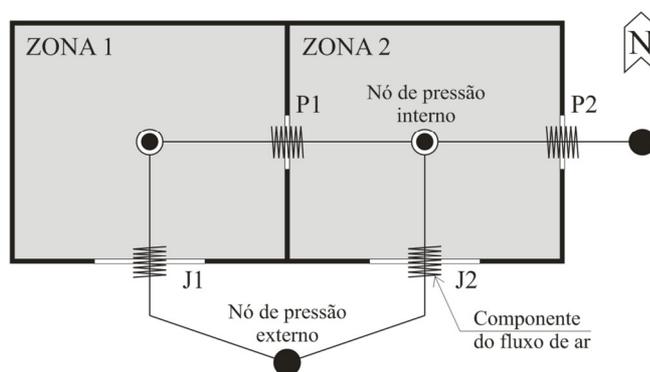


Figura 3.10 – Esquema de uma rede de nós de pressão.

Na entrada de dados do *AirflowNetwork* é necessário definir as características do entorno da edificação, incluindo a orientação solar e os coeficientes de pressão do vento; as zonas em que estará disponível a ventilação natural; os *links* do fluxo de ar (portas, janelas e frestas); os padrões de controle da disponibilidade da ventilação; os parâmetros do fluxo de ar pelas frestas e as condições de abertura das portas e janelas.

No programa estão disponíveis quatro tipos de controle das portas e janelas de uma zona térmica: Sem ventilação - todas as portas e janelas estarão fechadas durante toda a simulação; Temperatura (T) - todas as portas e janelas estarão abertas, se $T_{\text{zona}} > T_{\text{externa}}$ e $T_{\text{zona}} > T_{\text{definida}}$; Entalpia (H) - todas as portas e janelas estarão abertas, se $H_{\text{zona}} > H_{\text{externa}}$ e $T_{\text{zona}} > T_{\text{definida}}$; e Constante - se o *Schedule* permitir a ventilação, todas as portas e janelas estarão abertas, independente das condições do ambiente interno ou externo. Se o tipo de controle for temperatura ou entalpia, deve-se programar uma rotina para controlar a abertura das portas e janelas na zona térmica para assegurar a ventilação natural.

Os coeficientes de pressão do vento podem ser inseridos pelo usuário ou calculados pelo programa, desde que a edificação possua planta retangular. Os coeficientes determinados pelo *EnergyPlus* (C_p) são calculados para as quatro fachadas e cobertura, com base nos dados fornecidos pelo usuário como: relações entre altura, largura e comprimento da edificação; orientação solar e razão entre o menor e o maior comprimento do edifício. Para edifícios altos, o *EnergyPlus* considera os coeficientes de pressão do vento apresentados no *ASHRAE Handbook: Fundamentals* - Fig.7: “*Surface Averaged Wall Pressure Coefficients for Tall Buildings*” (2005). Para edificações de pequeno porte, o programa utiliza a equação de Swami e Chandra (1988) para calcular os valores dos coeficientes:

$$C_{p,n} = 0.6 \times \ln \left[\begin{array}{l} 1.248 - 0.703\sin(\alpha/2) - 1.175\sin^2(\alpha) \\ +0.131\sin^3(2\alpha G) + 0.769\cos(\alpha/2) \\ +0.07G^2\sin^2(\alpha/2) + 0.717\cos^2(\alpha/2) \end{array} \right] \quad (3.11)$$

onde:

$C_{p,n}$ = coeficiente de pressão do vento com um determinado ângulo entre a sua direção e a normal exterior a superfície considerada (adimensional);

α = ângulo entre a direção do vento e a normal a superfície (graus); e

G = logaritmo natural da razão entre a largura da parede considerada e a largura da parede adjacente (adimensional).

Segundo Melo et al. (2008), uma opção confiável para o cálculo dos coeficientes de pressão do vento é o programa *Cp Generator* (2011), desenvolvido pela *TNO Webapplications*. Trata-se de um aplicativo online com os arquivos de entrada em formato de texto.

Os *links* associados à ventilação das zonas podem ser representados por frestas ou rachaduras (*cracks*) nas superfícies de transferência de calor (como paredes e cobertura) ou pelas aberturas de portas e janelas (interiores ou exteriores). Para o cálculo do fluxo de ar através das frestas, o *EnergyPlus* utiliza a seguinte equação:

$$Q = C_f \times C_T \times C_Q (\Delta P)^n \quad (3.12)$$

onde:

Q = fluxo da massa de ar (kg/s);

C_f = (*Crack Factor*) fator de multiplicação do fluxo inserido pelo usuário (adimensional);

C_T = fator de correção da temperatura (adimensional);

C_Q = coeficiente do fluxo da massa de ar (kg/s.Paⁿ);

ΔP = diferença de pressão através da fissura (Pa); e

n = expoente do fluxo de ar (adimensional).

Para definir as diferentes condições de abertura das portas e janelas, o programa utiliza os fatores de abertura (*Opening Factor*). Este parâmetro especifica as propriedades do fluxo de ar através de portas e janelas quando estão fechadas ou abertas. Para cada fator de abertura (mínimo: 2 e máximo: 4) são definidos os fatores: Fator de largura, Fator de altura e Fator inicial de altura (Figura 3.11).

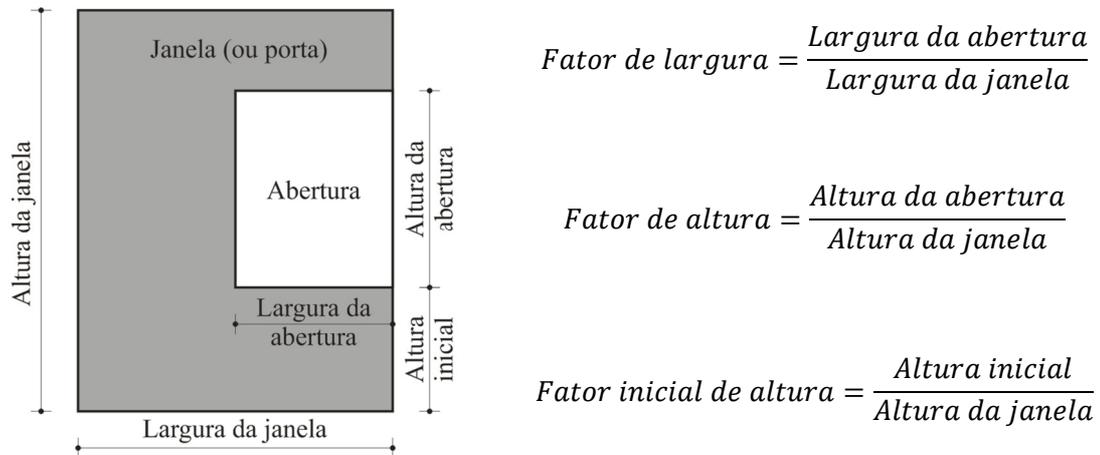


Figura 3.11 – Fatores geométricos associados à abertura.

A simulação de uma edificação naturalmente ventilada gera como principais dados de saída: velocidade do vento (não corrigida); direção do vento; volume de infiltração em cada zona; taxas de renovações de ar por hora e valores de fluxo de ar através de cada janela, porta ou fresta. Como pode ser observado na Figura 3.12, a simulação pelo *AirflowNetwork* permite a visualização das diferentes taxas de ren/h calculadas para um dia de projeto.

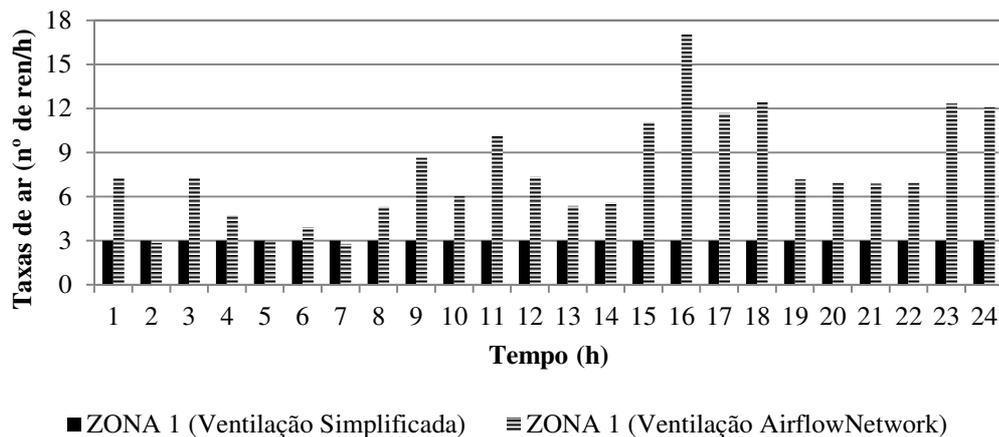


Figura 3.12 – Diferença entre a taxa de ren/h constante e a encontrada com o módulo *AirflowNetwork*.

3.3.4 Carga térmica

Para manter no ambiente condicionado um determinado nível de conforto, faz-se necessária a correta estimativa da capacidade dos diversos componentes do sistema a partir do cálculo da carga térmica. A carga térmica é uma taxa de calor que deve ser removida (resfriamento) ou adicionada (aquecimento) a um determinado ambiente para se manter a temperatura e umidade em condições desejáveis (ASHRAE, 2009).

Existem diferentes métodos de cálculo da carga térmica. Em qualquer um deles, é necessário caracterizar o ambiente de forma criteriosa, para que a carga térmica total gerada seja representativa, implicando no emprego de um sistema que atenda de forma eficiente a climatização do ambiente.

A Norma NBR 16401 (ABNT, 2008) especifica que os cálculos das cargas térmicas de resfriamento e desumidificação devem ser realizados para todas as horas do dia de projeto que forem necessárias para determinar a carga máxima de cada zona, considerando-se o efeito dinâmico da massa da edificação sobre a carga térmica. Devido à complexidade no regime dinâmico do efeito do armazenamento térmico e das trocas de calor, o cálculo da transferência de calor em regime transiente através dos fechamentos é inviável de ser resolvido sem o auxílio de um *software*. A Norma de Instalações de Ar Condicionado recomenda que os programas de computador devam ser baseados nos métodos da norma *ASHRAE (TFM – Transfer Function Method* ou *RTS – Radiant Time Series Method*).

Porém, nenhum dos métodos indicados pela Norma brasileira representa com precisão o processo completo de transferência de calor, sendo as cargas estimadas. O método TFM é adotado pelo *EnergyPlus* e apresenta resultados com precisão satisfatória (WESTPHAL; LAMBERTS; CUNHA, 2002) . No método TFM é possível estimar as cargas térmicas de hora em hora, simular o gasto anual de energia de edificações, prever o comportamento do ambiente interno para vários tipos de sistema, tipos de controle e rotinas; sendo adequado para a aplicação computacional. O método TFM foi introduzido primeiramente em 1972 no Manual de Fundamentos da ASHRAE. O TFM

foi adotado pela ASHRAE como método básico para cálculo de carga térmica em edificações até o ano de 2001, sendo substituído posteriormente pelo método do Balanço Térmico. O método TFM se constitui, inicialmente, com a determinação do ganho de calor a partir de todas as fontes e, posteriormente, com a conversão deste ganho em carga térmica.

3.3.4.1 Cálculo da carga térmica

No *EnergyPlus*, o objeto *IDEAL LOADS AIR SYSTEM* fornece um sistema ideal (sistema 100% eficiente) para suprimento de ar condicionado para a zona; sendo utilizado para o cálculo da carga térmica necessária para atingir as temperaturas de controle, que são específicas no termostato. O termostato é um tipo de controle com um duplo *setpoint* (temperaturas de controle). Esse objeto permite a especificação dos valores de referência, que podem ser considerados como uma constante durante toda a simulação ou especificados como rotinas (valores horários). Múltiplas zonas podem fazer referência a um único termostato (LBNL, 2011b).

Também é necessário modelar as infiltrações nos ambientes condicionados. Segundo a norma NBR 16401 (ABNT, 2008), a carga térmica de infiltração ocorre em função da entrada do fluxo de ar externo para dentro da edificação através de frestas e outras aberturas não intencionais, e através do uso normal de portas localizadas na fachada. Quando não controlada, a infiltração gera uma taxa adicional de ar exterior e consequente carga térmica para o sistema.

A vazão de ar devida à infiltração varia com a qualidade construtiva da edificação, com a direção e velocidade do vento, com a diferença das temperaturas interna e externa e, com a pressão interna do edifício. Métodos para estimar as vazões máximas de ar infiltrado (m^3/s) podem ser obtidos no *ASHRAE Handbook: Fundamentals* (2005), Cap. 27 – *Ventilation and infiltration*. Porém, alguns autores ainda utilizam as tabelas simplificadas apresentadas na norma brasileira de ar condicionado NBR6401:1980, que não estão presentes em sua nova versão (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Infiltração de ar

Pelas frestas		
Tipo de abertura	Observação	m ³ /h por metro de fresta ^(A)
Janelas		
- comum		3,0
- basculante		3,0
- guilhotina com caixilho de madeira	Mal ajustada	6,5
	Bem ajustada	2,0
- guilhotina com caixilho metálico	Sem vedação	4,5
	Com vedação	1,8
Portas		
	Mal ajustada	13,0
	Bem ajustada	6,5
Pelas portas		
Local	m ³ /h por pessoa	
	Porta giratória (1,80 m)	Porta de vai-e-vem (0,90 m)
Bancos	11	14
Barbearias	7	9
Drogarias e Farmácias	10	12
Escritórios de corretagem	9	9
Escritórios privados	-	4
Escritórios em geral	-	7
Lojas em geral	12	14
Restaurantes	3	4
Lanchonetes	7	9
Pelas portas abertas		
Porta até 90 cm		1 350 m ³ /h
Porta de 90 cm até 180 cm		2 000 m ³ /h

^(A) Largura da fresta considerada de 4,5 mm.

Notas:

a) Os valores das infiltrações pelas frestas são baseados na velocidade de 15 km/h para o vento.

b) Os valores das infiltrações pelas portas são baseados em:

- infiltrações de 2,2 m³/h e 3,4 m³/h, por pessoa que transpõe, respectivamente, porta giratória e porta vai-e-vem;

- velocidade de vento nula; a infiltração, devida ao vento, pode ser desprezada no caso do resfriamento do ar, mas deve ser considerada no caso do aquecimento;

- porta ou portas vai-e-vem situadas em única parede externa.

c) Os valores das infiltrações pelas portas abertas são baseados em:

- ausência de ventos;

- somente uma porta aberta em uma parede externa.

d) No caso de resfriamento, deve-se considerar com o valor mínimo da infiltração 1,5 renovações por hora de ar nos ambientes condicionados; entretanto, para grandes volumes com pequena ocupação em ambientes praticamente estanques, este limite pode ser reduzido a 1,5 para 1.

Fonte: adaptado de NBR 6401 (ABNT, 1980).

Como resultado, pode-se obter o pico da carga térmica em uma simulação anual para o dimensionamento do aparelho.

Utilizando-se o objeto *IDEAL LOADS AIR SYSTEM*, considera-se o ar condicionado ligado 24 horas por dia, durante todo o ano. Para considerar o equipamento ligado somente em um determinado período do dia, deve-se explorar o arquivo gerado pelo aplicativo *ExpandObjects.exe* do *EnergyPlus*.

Na Figura 3.13, apresenta-se a variação da temperatura interna de uma zona térmica em função das rotinas de funcionamento do ar condicionado. Observa-se a importância na definição das rotinas do ar condicionado, que pode implicar no aumento das temperaturas internas, gerando desconforto térmico.

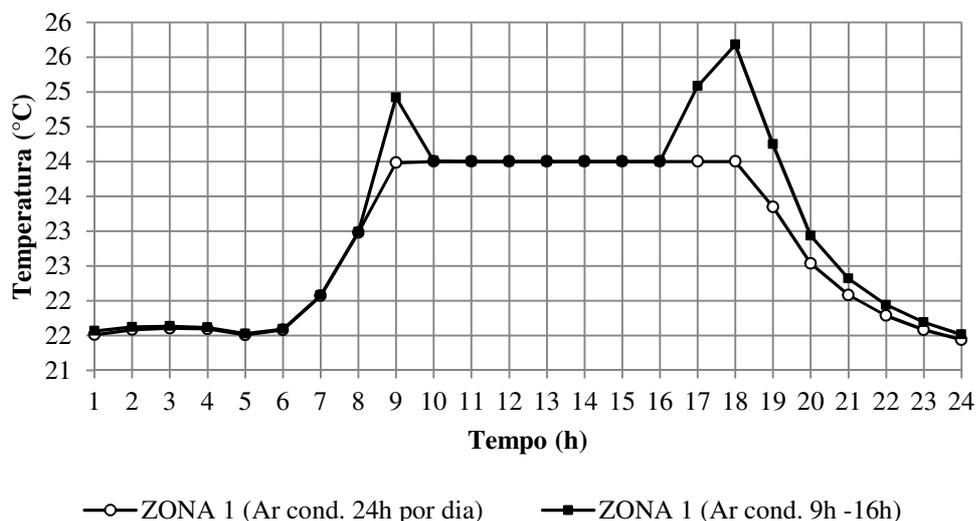


Figura 3.13 – Evolução temporal da temperatura de uma zona térmica.

3.3.5 Ar condicionado

O sistema de climatização é responsável por grande parte do consumo energético das edificações. Vários fatores influenciam a eficiência energética dos sistemas de ar condicionado, como modo de operação, clima local, projeto da edificação, materiais, cargas internas (perfil de ocupação) e outros. Por isso, a simulação numérica de uma edificação com sistema de ar condicionado deve ser feita de forma criteriosa, devido a sua complexidade e influência no consumo de energia final.

A simulação numérica de um sistema HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) no *EnergyPlus* é realizada a partir de três circuitos principais: ar, planta e condensador (Figura 3.14). Cada circuito principal é dividido ao meio, constituindo pares combinados. O Circuito de ar relaciona o condicionamento do ar antes de ser distribuído com os equipamentos específicos de cada zona térmica (unidade de distribuição), o Circuito da planta relaciona a demanda e o suprimento do fluido refrigerado para propiciar resfriamento para as zonas térmicas e o Circuito do condensador conjuga a demanda e o suprimento do fluido para o condensador (LBNL, 2011a; INATOMI, 2008).

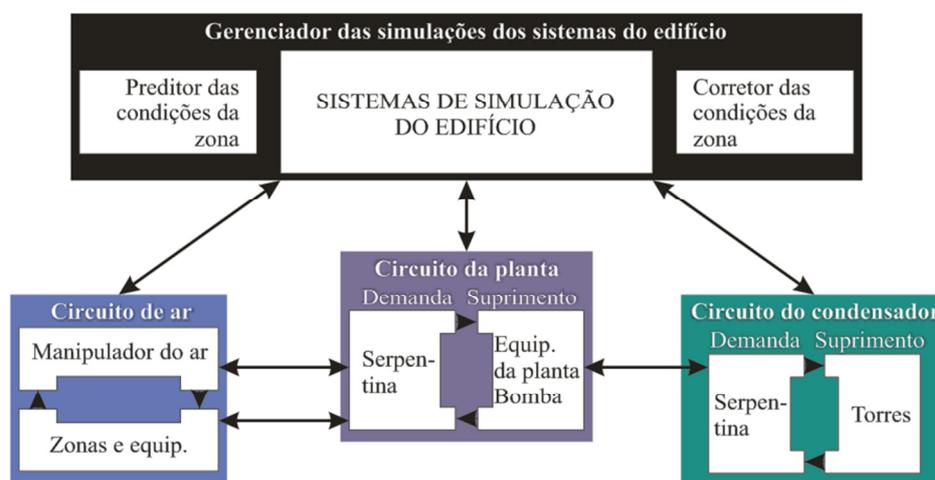


Figura 3.14 – Interações entre os circuitos do sistema de condicionamento de ar do *EnergyPlus*.
Fonte: Adaptado de LBNL, 2011a.

3.3.5.1 Aparelhos de expansão direta

O *EnergyPlus* possui várias opções para simulação de sistemas de ar condicionado. Porém, neste trabalho será considerado um aparelho de expansão direta, onde o ar é diretamente resfriado pelo fluido refrigerante, como em aparelhos de condicionamento de janela ou *Splits* (Figura 3.15). Este tipo de sistema de condicionamento foi escolhido devido a sua utilização tanto em residências quanto em edificações comerciais de multipisos, que são os objetos de estudo deste trabalho.

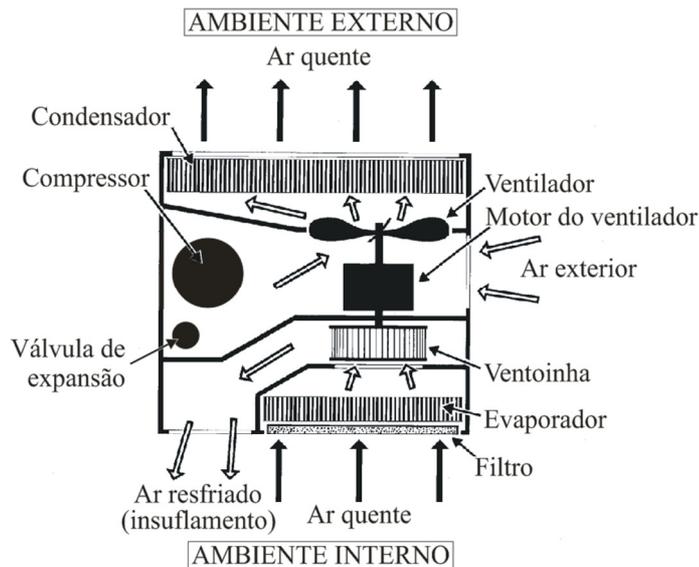


Figura 3.15 – Esquema de um aparelho de ar condicionado de janela.
Fonte: Adaptado de ASHRAE, 2005.

Dentre os dados de entrada para simular esse sistema é necessário estimar a vazão de ar exterior por segundo por pessoa para renovar o ar do ambiente. Segundo a Resolução RE/ANVISA nº 176 (ANVISA, 2000), a taxa de renovação do ar adequada de ambientes climatizados deve ser no mínimo de $27 \text{ m}^3/\text{h.pessoa}$ (que equivale a $0,0075 \text{ m}^3/\text{s.pessoa}$).

Outros parâmetros referem-se ao ventilador: rotina horária de funcionamento, vazão máxima de ar (m^3/s), eficiência total, pressão devida à resistência do ar (Pa), eficiência do motor e fração do calor do motor que é adicionado ao fluxo de ar; e à serpentina de resfriamento: rotina, capacidade (W), taxa de calor sensível – SHR e coeficiente de performance – COP.

O COP¹ é a razão entre a carga térmica total a ser retirada ou adicionada pelo sistema e o consumo de energia elétrica solicitada pelo aparelho. Esse parâmetro tem impacto significativo no desempenho energético das edificações. Segundo Westphal (2007), dentre os parâmetros que exercem grande impacto no consumo anual de energia elétrica

¹ Também conhecido pela sigla EER (*Energy Efficiency Ratio*) com unidade em Btu/h.W.

do sistema de climatização de edificações comerciais (COP, densidade de carga interna e padrões de uso), o COP é o terceiro de maior influência no consumo.

Os valores de COP podem ser obtidos na página do INMETRO (2011). Os produtos aprovados no Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) são apresentados em tabelas com as características de consumo de energia e/ou de eficiência energética. Dentre as informações contidas nestas tabelas, são colocadas à disposição dos consumidores os coeficientes de performance dos aparelhos de condicionamento de ar. Esses aparelhos são classificados em função dos valores de COP estipulados pela Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), sendo a Classe A mais eficiente energeticamente.

Um valor de $COP \geq 3,02$ (W/W) representa a “Classe A” dos aparelhos da “Categoria 2” (9.001 a 13.999 BTU/h) avaliados pelo INMETRO (2011). Segundo Melo, Westphal e Lamberts (2006), um aparelho de condicionamento de ar do tipo janela com eficiência “A” reduz o consumo energético de uma edificação comercial em até 11% por ano, quando comparado com um sistema de classe “E”.

Alguns parâmetros da simulação numérica podem ser determinados automaticamente pelo programa, entrando com o termo: *autosize*. A vazão máxima de ar insuflado (m^3/s) e a capacidade total da serpentina (W) pode ser determinada para a zona térmica baseada nas cargas geradas em um dia de projeto de verão e de inverno (*design day*) e nos valores estabelecidos para o termostato.

Pode-se também entrar com os dados da serpentina de aquecimento para considerar um aparelho com ciclo reverso para aquecimento, ou seja, com o condensador operando como evaporador no período de inverno. Os resultados principais incluem a capacidade total do sistema (W), o SHR e o consumo de energia elétrica do sistema de climatização (kWh). Ao final da simulação tem-se o uso final de energia da edificação (Figura 3.16).

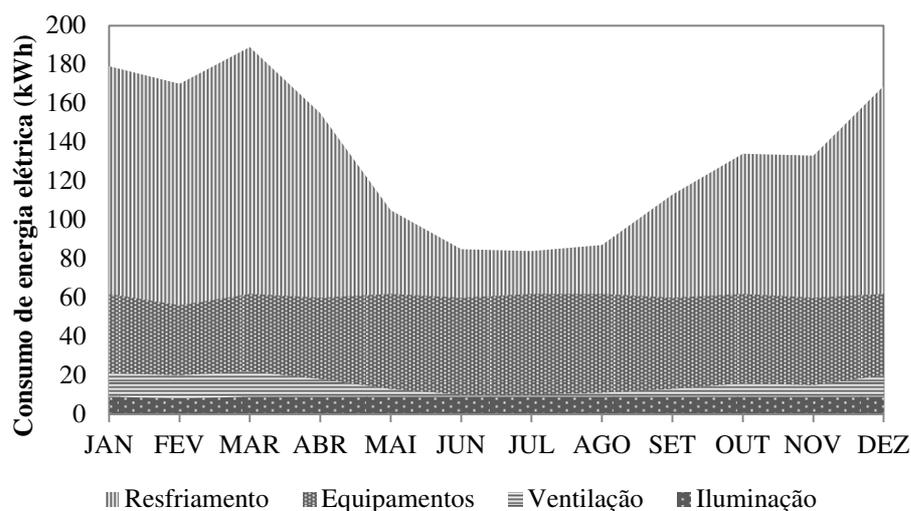


Figura 3.16 – Evolução mensal do consumo de energia elétrica por uso final.

3.4 Considerações acerca do Capítulo III

Neste capítulo foram apresentados alguns parâmetros relativos à simulação computacional do desempenho térmico. Os métodos apresentados são genéricos e não fazem distinção entre os tipos de sistemas construtivos. Uma das principais dificuldades na simulação numérica de edificações no Brasil era a aquisição de dados climáticos confiáveis. No País, os dados climáticos eram escassos e, muitas vezes, defasados na representação das mudanças climáticas, pois os dados medidos disponibilizados eram de décadas passadas.

Porém, no ano de 2012, o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (LABEEE) disponibilizou *online* vários arquivos climáticos no formato EPW_ que é a extensão utilizada pelo programa *EnergyPlus*. Este conjunto de arquivos foi elaborado pelo Prof. Maurício Roriz (DECiv - UFSCar, São Carlos, SP) a partir de dados horários registrados em 411 estações climatológicas do INMET (Figura 3.17), entre os anos de 2000 e 2010. Este estudo é parte das atividades do grupo constituído no âmbito da ANTAC para estudar a revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro (NBR 15220: 2005).



Figura 3.17 – Localização das cidades com dados climáticos em formato EPW no Brasil.
Fonte: LABEEE, 2012.

Também foi mostrado neste capítulo um panorama geral do programa *EnergyPlus* com as equações básicas para o entendimento dos dados de entrada. Foram discutidos os parâmetros de entrada e os relatórios principais de saída da ventilação natural, carga térmica e ar condicionado.

4 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

4.1 Considerações iniciais

Na maioria das publicações internacionais relacionadas ao desempenho térmico de edificações são apresentadas diversas composições de fechamento e respectivos valores da resistência térmica de painéis verticais, que servem como parâmetro de eficiência da edificação para determinado tipo de clima (AISI, 1995). Nas condições climáticas em que predominam as condições de verão, como no Brasil, não se pode aplicar os métodos tradicionais de avaliação do desempenho térmico de edificações, que adotam como indicador a resistência térmica dos fechamentos. Deve-se avaliar simultaneamente todas as trocas térmicas que ocorrem nos ambientes em regime dinâmico, incluindo as perdas ou ganhos de energia por meio da ventilação natural ou através dos elementos constituintes da edificação (AKUTSU, 1998).

A avaliação do desempenho térmico de edificações em LSF no *EnergyPlus* pode ser realizada considerando métodos que incluem ou não a estrutura leve de aço na simulação numérica global. Conforme o método adotado, os resultados das cargas térmicas e da temperatura interna dos ambientes podem superestimar ou subestimar o desempenho térmico da edificação. Os cinco principais métodos atualmente em pauta são:

- i) Sem perfis (SP): Os painéis são representados apenas por suas placas de fechamento e material isolante, desconsiderando os perfis em aço. Esta é a forma mais comum de se representar uma edificação em simulações numéricas de desempenho. Neste caso, considera-se que em uma simulação numérica global a interferência da estrutura no desempenho térmico da edificação seja mínima, portanto, de modelagem desnecessária.
- ii) Apenas a resistência térmica (ART): Neste método, os painéis são representados apenas pelo valor de sua resistência térmica (*R-value*). No *EnergyPlus*, a representação dos painéis por este método implica na perda da capacidade térmica dos elementos construtivos (*Material:NoMass*). Somente com a entrada das propriedades térmicas dos

materiais é possível simular considerando os efeitos da condução transiente. No entanto, como observado por Batista, Lamberts e Westphal (2005), as diferenças nos resultados da simulação no *EnergyPlus*, considerando-se ou não a capacidade térmica dos materiais, são pequenas para fechamentos com baixa resistência térmica. Como no sistema LSF um dos condicionantes de projeto é o uso de painéis leves, as diferenças entre as duas formas na entrada de dados podem não ser significativas. Somente para painéis de elevada resistência, a hipótese da condução de calor em estado estacionário não é indicada (BRITO, AKUTSU e TRIBESS, 2011).

iii) Com e sem os montantes (CSM): Os painéis são representados por duas superfícies: a primeira representa as placas e material isolante, modelada como uma base (*Surface:HeatTransfer* no *EnergyPlus*); e a segunda representa os montantes e é modelada como uma superfície que sobrepõe a base (*Surface:HeatTransfer:Sub* como *Door*). A área total da sub-superfície (perfis) é calculada considerando o tamanho e o espaçamento entre os montantes. Segundo os autores do método (Mahattanatawe, Puvanant e Mongkolsawat, 2006), a vantagem de se modelar os montantes como uma sub-superfície é o fato de que as dimensões dos perfis podem ser modificadas sem interferir na superfície base.

iv) Propriedades térmicas combinadas (PTC): Este método é adaptado de Purdy e Beausoleil-Morrison (2001) e foi baseado nas recomendações do código de energia do Canadá (CCBFC, 1997). Consiste em calcular o valor da resistência térmica do painel considerando os efeitos da estrutura e ajustar a condutividade térmica da camada que contém os montantes para que a resistência térmica total do painel sem perfis seja a mesma da calculada anteriormente. A densidade e o calor específico desta camada também devem ser ajustados para combinar a massa térmica dos perfis com o isolamento. Neste caso, os efeitos dos perfis na resistência térmica e a massa térmica são considerados, embora não representem o comportamento real do painel.

v) Paredes equivalentes (PE): Este método implica na criação de um painel fictício multicamadas sem perfis, mas com propriedades térmicas que possibilitam a mesma resposta dinâmica às condições transientes que um painel real com estrutura

(ENERMODAL, 2001). No estudo apresentado por ENERMODAL (2001) foram analisadas seis composições de painéis em *wood framing*, nove em LSF e cinco em concreto. De todos os métodos apresentados, este é o mais preciso e complexo, pois demanda muitos dados de entrada e a utilização ou desenvolvimento de um programa específico para os cálculos.

No banco de dados do *EnergyPlus* há um arquivo com composições de fechamento e materiais associados de painéis equivalentes gerados por esse método (*CompositeWallConstructions.idf*). Os materiais contidos neste arquivo são fictícios e na composição dos painéis os isolantes são caracterizados com espessuras menores e com valores maiores de condutividade térmica para representar os efeitos das pontes térmicas (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Composição dos painéis em LSF

Painel	Componentes
Composição de parede n° 10* (edifícios residenciais e comerciais pequenos)	Siding de madeira 12,7 mm
	Placa de OSB 12,7 mm
	Montante 101,6x50,8x12 @ 600 mm
	Lã de vidro 88,9 mm
	Gesso acartonado 12,7 mm
Composição de parede n° 15 (edifícios residenciais)	Tijolo cerâmico 82,5 mm
	Placa de EPS 25,4 mm
	Placa de OSB 12,7 mm
	Montante 101,6x50,8x12 @ 600 mm
	Lã de vidro 88,9 mm
Composição de parede n° 16 (edifícios residenciais e comerciais pequenos)	Gesso acartonado 12,7 mm
	Siding de madeira 12,7 mm
	Placa de OSB 12,7 mm
	Montante 152,4x50,8x12 @ 600 mm
	Lã de vidro 88,9 mm
Composição de parede n° 17 (edifícios comerciais)	Gesso acartonado 12,7 mm
	Reboco de cimento 19,0 mm
	Placa de EPS 25,4 mm
	Placa de OSB 12,7 mm
	Montante 152,4x50,8x12 @ 600 mm
Composição de parede n° 18 (edifícios residenciais)	Lã de vidro 139,7 mm
	Gesso acartonado 12,7 mm
	Tijolo cerâmico 82,5 mm
	Placa de EPS 25,4 mm
	Placa de OSB 12,7 mm
Composição de parede n° 18 (edifícios residenciais)	Montante 152,4x50,8x12 @ 600 mm
	Lã de vidro 139,7 mm
	Gesso acartonado 12,7 mm
	Placa de OSB 12,7 mm
	Placa de EPS 25,4 mm

* Para a composição de paredes n° 10, também são disponibilizadas as camadas equivalentes de alguns detalhes como: encontro de painéis em um canto; painel acima de uma janela; encontro do painel com o piso e encontro do painel com a cobertura isolada. Fonte: ENERMODAL, 2001.

Como pode ser observado na Tabela 4.1, o problema em se utilizar os materiais equivalentes disponíveis no programa (que são os mesmos contidos no relatório de ENERMODAL, 2001) é o fato de não haver a possibilidade de se projetar um painel específico, fazendo com que o projeto fique limitado às opções de composição e materiais disponíveis.

Mahattanatawe, Puvanant e Mongkolsawat (2006) fizeram um estudo comparativo dos cinco métodos apresentados. Para as condições climáticas de Bangkok, considerando a estrutura leve de aço, a carga térmica de resfriamento obtida pelo método PTC é próxima daquela encontrada com o método PE – com diferença de 0,44%. Os outros métodos apresentaram diferenças maiores (CSM = 1,41%, SP = 1,11%), sendo que o método ART apresentou as diferenças maiores: 18,37% - isto considerando o método PE como base para a comparação (Figura 4.1).

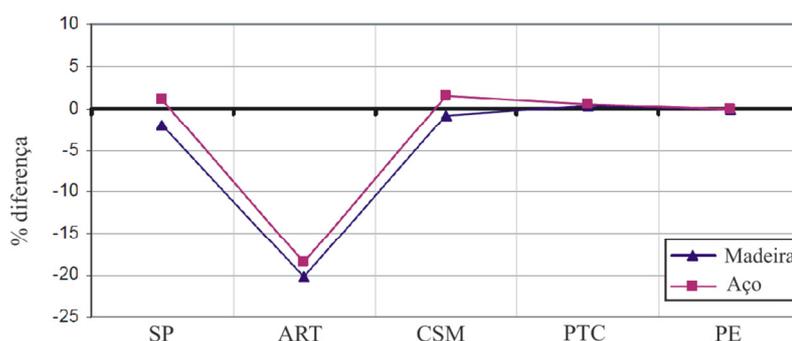


Figura 4.1 – Percentagem das cargas térmicas calculadas pelos cinco métodos para painéis com estrutura em madeira e aço.

Fonte: Adaptado de Mahattanatawe, Puvanant e Mongkolsawat (2006)

Devido à maior praticidade e resultados com precisão admissível, o método de simulação adotado neste trabalho para representar os efeitos da estrutura metálica na simulação horária é o PTC. Mas, como este método foi desenvolvido para aplicação em *wood framing*, é necessário sua adaptação às estruturas leves de aço. Neste trabalho, a adaptação do método PTC será constituída por três etapas, a saber:

- 1ª Etapa: definição do modelo de cálculo da resistência térmica dos painéis em LSF incluindo a estrutura metálica;

2ª Etapa: definição do modelo de cálculo da resistência térmica dos painéis em LSF desconsiderando a estrutura metálica;

3ª Etapa: definição do modelo de ajuste das propriedades termofísicas da camada composta dos painéis em LSF.

Neste capítulo, apresenta-se o desenvolvimento do método para incluir na simulação numérica os efeitos da estrutura leve de aço e a definição do método de avaliação do desempenho térmico de edificações em LSF.

4.2 Determinação da resistência térmica de painéis em LSF

Uma série de procedimentos de cálculo foi realizada por países como a Dinamarca, Canadá, EUA e Nova Zelândia para avaliar os valores da resistência térmica e da transmitância térmica de fechamentos com estruturas leves de aço. O cálculo da resistência térmica é utilizado para demonstrar a conformidade do sistema de fechamento com as exigências das normas técnicas e para representar o efeito negativo da transmissão excessiva de calor pelos perfis. A determinação da resistência térmica dos fechamentos em LSF pode ser feita por simulação numérica, análise experimental em caixa quente (*Hotbox*) ou por meio de cálculos simplificados.

Na simulação numérica, utiliza-se programas capazes de calcular a resistência térmica baseados no MEF, considerando a transferência de calor bi-dimensional. No programa THERM 5.2 (LBNL, 2006), além do valor da resistência térmica do painel, é possível obter de forma gráfica a distribuição da temperatura no interior dos fechamentos e os locais onde ocorre a maior intensidade do fluxo de calor através dos componentes (Figura 4.2).

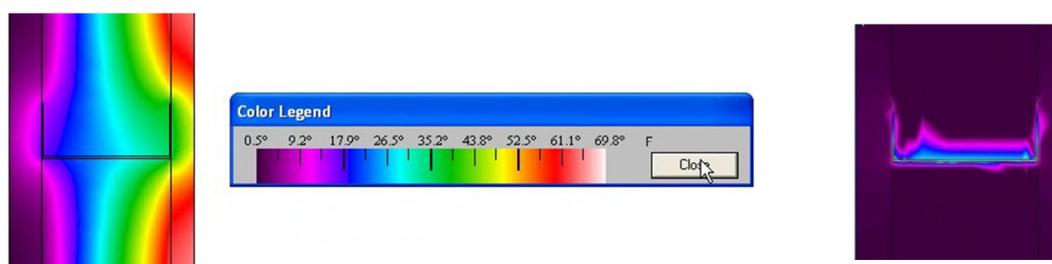


Figura 4.2 – Análise de um painel em LSF pelo programa THERM 5.2.
Fonte: LBNL (2006).

Na análise experimental, constrói-se um painel em escala real para análise do comportamento térmico em caixa quente (Figura 4.3). O painel para análise é inserido entre duas câmaras com temperaturas diferentes para o estudo do fluxo de calor entre as duas zonas.



Figura 4.3 - ORNL BTC *hotbox*.
Fonte: Kosny, Christian e Desjarlais (2010).

O cálculo da resistência térmica de painéis em LSF por métodos simplificados apresenta dificuldades na representação devido à contemplação dos efeitos de camadas não homogêneas e das pontes térmicas. Mas, trata-se de um procedimento rápido, de fácil aplicação e precisão admissível.

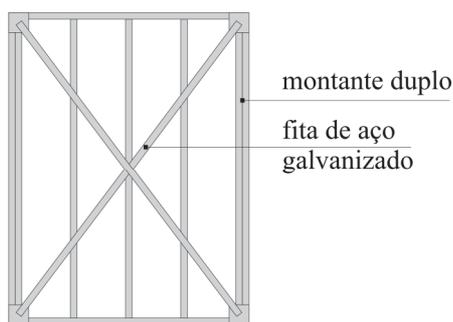
Assim, como a determinação do valor da resistência térmica pelo método experimental seria inviável, devido à falta de acesso a uma caixa quente, e o método numérico pelo programa THERM implicaria em uma maior complexidade no processo de avaliação, desestimulando sua aplicação por parte dos profissionais e estudantes da área, este trabalho adota o método de cálculo simplificado da resistência térmica de painéis incluindo os efeitos das pontes térmicas.

A seguir são apresentados os principais métodos de cálculo simplificados da resistência térmica de painéis com camadas compostas Método dos caminhos paralelos, Método dos planos isotérmicos e os métodos específicos para fechamentos verticais em LSF, sendo eles: Método da norma ISO 6946 (ISO, 2007) (regra 50/50), Método MNEC (Canadá) e Método das zonas modificado (ASHRAE/ORNL/NAHB).

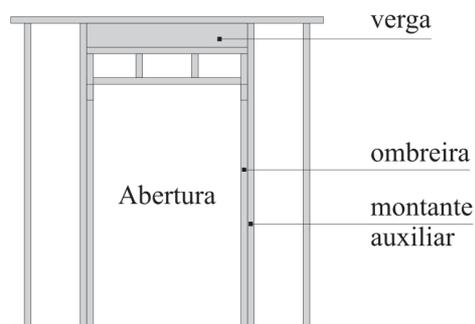
4.2.1 Representação da estrutura nos cálculos da resistência térmica

Embora os detalhes construtivos e as interfaces entre os painéis e pisos ou lajes tenham impacto sobre o desempenho térmico da edificação, conforme observado por Kosny e Desjarlais (1994), no cálculo das resistências térmicas dos painéis é considerado como elemento estrutural somente o montante. Os outros elementos metálicos são descartados dos cálculos devido à dificuldade de sua representação. Desconsidera-se nos cálculos da resistência térmica de painéis em LSF (Figura 4.4):

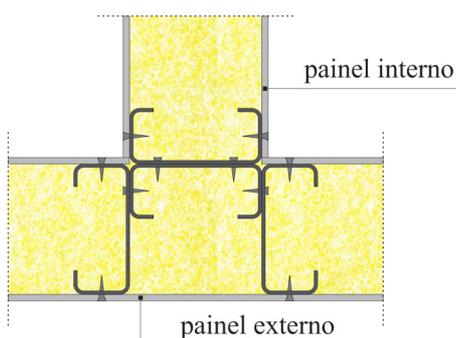
- 1) elementos utilizados para a estabilização dos painéis e vigas, como fitas de aço galvanizado fixadas na face dos painéis;
- 2) elementos utilizados em vãos de painéis estruturais, como vergas e ombreiras;
- 3) montantes adicionais utilizados nos encontros dos painéis para aumentar a rigidez do conjunto;
- 4) vigas de piso compostas para vencer grandes vãos.



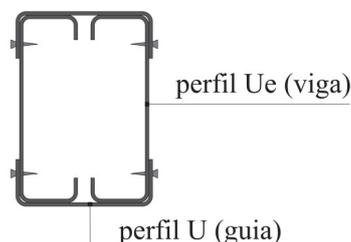
Contraventamento com fita metálica



Abertura nos painéis.



Ligação dos painéis tipo "T".



Viga de piso composta.

Figura 4.4 – Elementos estruturais desconsiderados no cálculo da resistência térmica dos painéis.

Fonte: Adaptado de Freitas e Crasto, 2006.

4.2.2 Método dos Caminhos Paralelos

O Método dos Caminhos Paralelos – MCP (*Parallel Path Method*) considera um fluxo de calor unidimensional perpendicular à face dos elementos, ou seja, o fluxo de calor (q'') através da ponte térmica é paralelo ao fluxo de calor através dos componentes de fechamento e não há distribuição lateral de calor entre os materiais (Figura 4.5). A resistência total pode ser obtida por meio da equação 4.1.

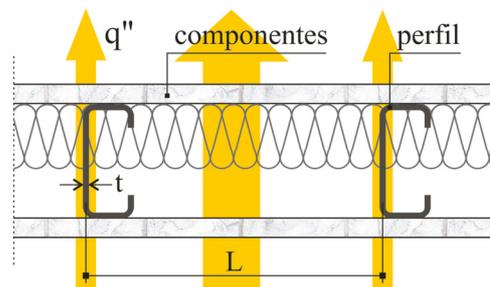


Figura 4.5 – Transferência de calor no método dos caminhos paralelos.

$$R_{\text{máx}} = 1 / [(F_1/R_1) + (F_2/R_2)] \quad (4.1)$$

onde:

$R_{\text{máx}}$ = resistência total calculada pelo método dos caminhos paralelos [(m².K)/W];

F_1 e F_2 = frações das áreas das duas seções (componentes de fechamento e estrutura); e

R_1 e R_2 = resistências totais das duas seções [(m².K)/W].

4.2.3 Método dos Planos Isotérmicos

O Método dos Planos Isotérmicos – MPI (*Isothermal Planes Method*) considera que a temperatura é uniforme em cada plano paralelo à face dos elementos, ou seja, o fluxo de calor (q'') através do fechamento é completamente redistribuído em cada camada (plano isotérmico) e não há resistência ao fluxo de calor lateral (Figura 4.6) (ASHRAE, 1997). Neste caso, a resistência total pode ser obtida considerando-se um único caminho para o fluxo de calor, mas com a camada não-homogênea calculada em paralelo (equação 4.2).

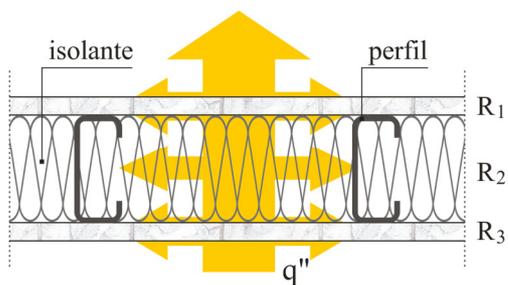


Figura 4.6 - Transferência de calor no método dos planos isotérmicos.

$$R_{\text{camada composta}} = 1 / [(F_{\text{isol}}/R_{\text{isol}}) + (F_{\text{perfil}}/R_{\text{perfil}})] \quad (4.2)$$

onde:

$R_{\text{camada composta}}$ = resistência da camada não-homogênea (R_2) [(m².K)/W];

F_{isol} e F_{perfil} = frações das áreas das duas seções (isolamento e perfis); e

R_{isol} e R_{perfil} = resistências totais das seções de isolamento e estrutura, respectivamente [(m².K)/W].

4.2.4 Método da norma ISO 6946 (ISO, 2007) - regra 50/50

A norma internacional ISO 6946 (ISO, 2007) apresenta uma metodologia de cálculo da resistência térmica que utiliza uma média entre os dois procedimentos apresentados: MCP e MPI. Essa abordagem de cálculo representa uma combinação do limite superior e inferior para resistência térmica ($R_{\text{máx}}$ e $R_{\text{mín}}$) e o valor correto é esperado para estar entre esses extremos.

No texto da norma ISO 6946 (ISO, 2007) não é recomendado esse método para utilização em fechamentos estruturados com perfil de aço dobrado a frio. Mesmo assim, a média dos limites para resistência térmica tem sido utilizada em LSF, sendo recomendada em alguns países como procedimento normativo (IISI, 2001).

4.2.5 Método MNEC (Canadá)

No Código Nacional de Energia do Canadá (CCBFC, 1997) são apresentados alguns requisitos para o desempenho térmico de edificações e metodologias para o cálculo da resistência térmica. Para painéis em *wood framing*, o código do Canadá recomenda o método dos caminhos paralelos contido na norma ISO 6946 (ISO, 2007). Como ainda não há um consenso sobre uma metodologia única para a determinação da resistência térmica de painéis de edificações em LSF, o código canadense apresenta um método baseado em análises experimentais. Construíram painéis em LSF (escala 1:1) e analisaram o seu comportamento por meio do método experimental em caixa quente, comparando os resultados obtidos com cálculos realizados a partir das propriedades termo-físicas dos materiais.

A partir desses estudos, o modelo canadense propôs a combinação dos dois métodos de cálculo contidos na ISO 6946 (ISO, 2007), ponderados por coeficientes que foram determinados empiricamente - Método MNEC¹. Esses coeficientes variam de acordo com a configuração dos fechamentos. Neste modelo, a resistência térmica total de um fechamento em LSF pode ser obtida por meio da equação 4.3.

$$R_T = (K_1 \times R_{\text{máx}}) + (K_2 \times R_{\text{mín}}) \quad (4.3)$$

onde:

R_T = resistência térmica total [(m².K)/W];

$R_{\text{máx}}$ = resistência térmica do fechamento calculada pelo método dos caminhos paralelos [(m².K)/W]; e

$R_{\text{mín}}$ = resistência térmica do fechamento calculada pelo método dos planos isotérmicos [(m².K)/W].

As constantes K_1 e K_2 podem ser obtidas conforme mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Fatores de ponderação do método MNEC

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

Fonte: adaptado de IISI (2001).

¹ No Anexo C é apresentado um roteiro de cálculo do Método MNEC.

4.2.6 Método das zonas modificado (ASHRAE/ORNL/NAHB)

O método das zonas modificado (MZM) é baseado no método das zonas apresentado pela ASHRAE (1997), sendo de uso exclusivo para painéis com estruturas de aço e material isolante entre os montantes. O método MZM considera uma zona de anomalias térmicas próximas aos perfis, que depende da relação entre a resistividade [K.m/W] (inverso da condutividade térmica) do fechamento externo e do material isolante, do tamanho (profundidade) dos perfis e da espessura dos componentes de fechamento externo.

Nesta abordagem de cálculo, 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 (*sheathing, siding*); B: fechamento interno (*wallboard*) e seções I e II: isolante e perfil (Figura 4.7).

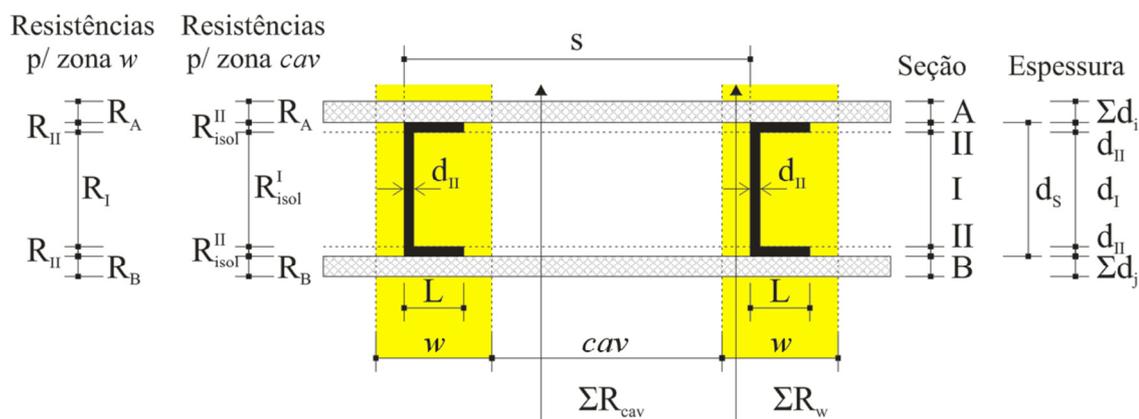


Figura 4.7 – Parâmetros para o cálculo da resistência térmica no método MZM.

Fonte: Adaptado de ASHRAE, 1997.

Para que o método das zonas da norma ASHRAE apresentasse resultados mais precisos, o laboratório *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) e a associação *National Association of Housebuilders* (NAHB) 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 $\pm 15\%$ para 2% (AISI, 1995). A largura da zona de anomalias térmicas (w) pode ser obtida por meio da equação 4.4.

$$w = L + Z_f \sum_{i=1}^n d_i \quad (4.4)$$

onde:

w = largura da zona de influência do perfil (m);

L = largura da mesa do perfil (m);

d_i = espessura total dos materiais da seção A (m);

Z_f = fator de zona (*zone fator*), sendo:

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

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

Para $\sum d_i > 16 \text{ mm}$, encontrar o valor de Z_f conforme apresentado na

Figura 4.8.

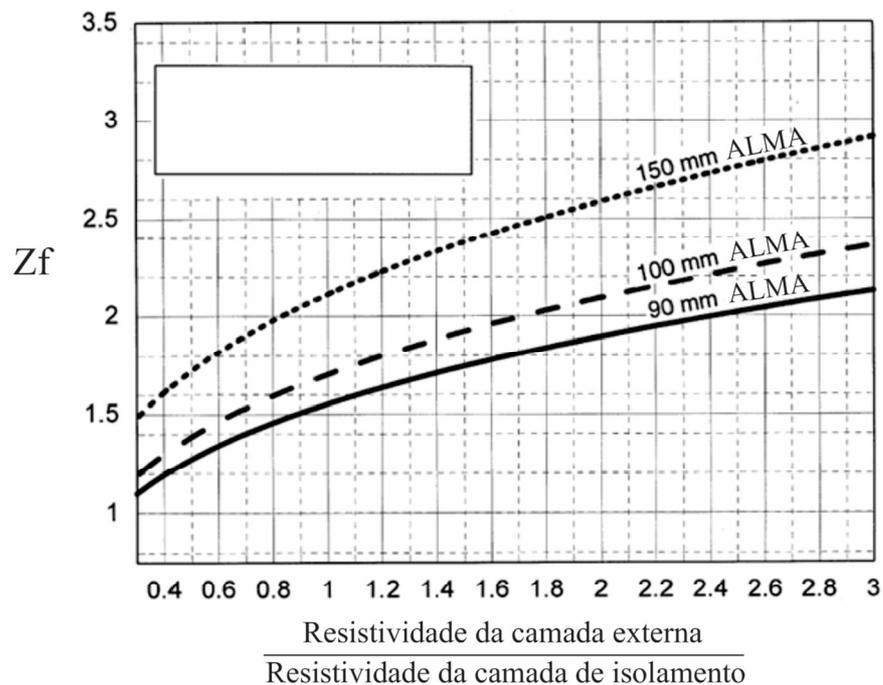


Figura 4.8 – Carta do Fator de zona Z_f .
Fonte: ASHRAE, 1997.

A resistência térmica total (de superfície a superfície) pode ser determinada pela equação 4.5.

$$R_t = \frac{\Sigma R_w \cdot \Sigma R_{cav} \cdot s}{w \cdot (\Sigma R_{cav} - \Sigma R_w) + s \cdot \Sigma R_w} \quad (4.5)$$

onde:

R_t = resistência térmica total (de superfície a superfície) [(m².K)/W];

s = distância entre montantes (m);

w = largura da zona de influência do perfil (m);

$$\Sigma R_w = R_A + R_B + R_I + 2 \cdot R_{II} \quad (4.6)$$

$$\Sigma R_{cav} = R_A + R_B + R_{isol}^I + 2 \cdot R_{isol}^{II} \quad (4.7)$$

sendo:

R_A = resistência térmica da seção A [(m².K)/W];

R_B = resistência térmica da seção B [(m².K)/W];

R_I = resistência térmica da seção I [(m².K)/W];

R_{II} = resistência térmica da seção II [(m².K)/W];

R_{isol}^I = resistência térmica da seção R_{isol}^I [(m².K)/W];

R_{isol}^{II} = resistência térmica da seção R_{isol}^{II} [(m².K)/W].

No Anexo C apresenta-se um roteiro para o cálculo de resistências de painéis em LSF pelo método MZM.

4.3 Determinação da resistência térmica de painéis com camadas homogêneas

A resistência térmica depende do número e da composição das camadas que constituem o painel. Segundo a norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2005), quando o fechamento de uma edificação é constituído por camadas homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor (Figura 4.9), a resistência térmica total (de ambiente a ambiente) pode ser determinada pela equação 4.8.

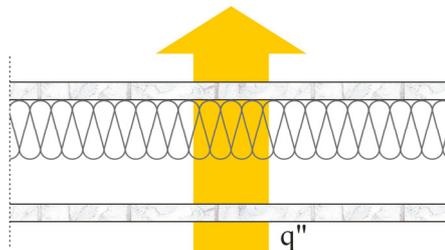


Figura 4.9 - Fluxo de calor perpendicular às camadas homogêneas.

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (4.8)$$

onde:

R_T = resistência térmica total de ambiente a ambiente [(m².K)/W];

R_t = resistência de superfície a superfície [(m².K)/W]; e

R_{se} e R_{si} = resistências superficiais externa e interna (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – 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).

4.4 Ajuste das demais propriedades térmicas da camada composta

Como no método PTC a camada composta (isolamento e perfis) é representada por apenas um material, faz-se necessário o ajuste das demais propriedades térmicas. O procedimento é uma simplificação e consiste em criar um novo material com propriedades térmicas modificadas² (Figura 4.10).

² No ANEXO C apresenta-se um roteiro para o ajuste da massa específica e calor específico de painéis em LSF.

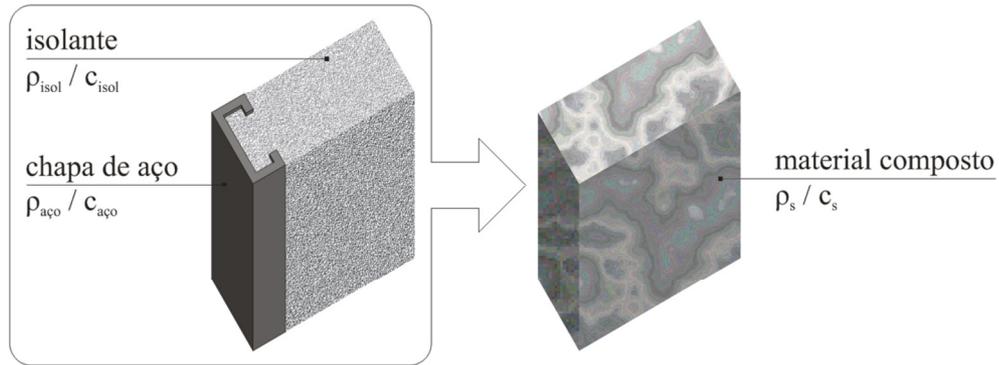


Figura 4.10 – Criação de um material com propriedades térmicas ajustadas.

Em sólidos compostos, com frações volumétricas distintas de materiais com diferentes massas específicas ρ_i , a massa específica ρ_s é calculada pela equação a seguir:

$$\rho_s = \sum_{i=1}^n C_i \rho_i \quad (4.9)$$

onde:

ρ_s = massa específica do sólido composto (kg/m^3);

C_i é a fração volumétrica do material i ,

$$C_i = \frac{V_i}{V_s} \quad (4.10)$$

ρ_i = massa específica do material i (kg/m^3);

O calor específico do sólido composto c_s pode ser determinado pela equação a seguir:

$$\sum_{i=1}^n V_i \rho_i c_i = V_s \rho_s c_s \quad (4.11)$$

onde: V_i = volume do material i (m^3);

ρ_i = massa específica do material i (kg/m^3);

c_i = calor específico do material i [$\text{kJ}/(\text{kg.K})$];

V_s = volume do sólido composto (m^3);

ρ_s = massa específica do sólido composto (kg/m^3);

c_s = calor específico do sólido composto [$\text{kJ}/(\text{kg.K})$].

4.5 Definição do método de representação da estrutura metálica nas simulações numéricas

Segundo a norma ASHRAE (1997), o método MZM é a forma mais precisa de se estimar a resistência térmica de painéis verticais em LSF. O *American Iron And Steel Institute* (AISI, 1995) e o *Steel Framing Alliance* (SFA, 2008) também recomendam este método como referência de cálculo. Logo, no cálculo da resistência térmica de painéis verticais com a cavidade totalmente preenchida por material isolante será utilizado o método MZM (ASHRAE/ORNL/NAHB) para representar a inclusão da estrutura de perfis em aço na análise global do desempenho térmico de edificações. Vale ressaltar que o método MZM se aplica somente a painéis verticais com montantes, isolante preenchendo toda a cavidade e placas de fechamento não metálicas.

No entanto, os efeitos das pontes térmicas não ocorrem somente nos painéis verticais (paredes internas e externas). Mesmo que seja com intensidade diferente, esses efeitos também acontecem na laje de teto e entre pisos (Figura 4.11).

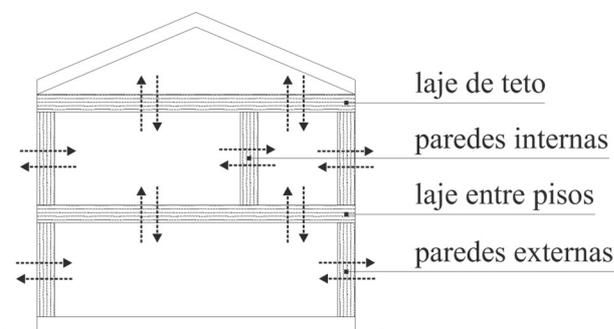


Figura 4.11 – Fechamentos onde ocorrem as pontes térmicas.

Na norma ASHRAE (1997), para o cálculo da resistência térmica de lajes e coberturas em *wood framing* são recomendados os métodos MCP e MPI. Nesta norma não é apresentado um método específico para o cálculo da resistência térmica de lajes e coberturas em edificações de LSF (mesmo nas edições mais recentes). Para evitar a aplicação de métodos diferentes de determinação da resistência térmica de painéis em LSF na mesma simulação numérica de um modelo e, como nas condições climáticas da região de interesse é utilizado pouco material isolante nos fechamentos horizontais,

neste trabalho não serão considerados os efeitos das pontes térmicas nas lajes de teto ou entre pisos. Entretanto, em fechamentos horizontais com o isolamento térmico espesso, recomenda-se representar os efeitos das pontes térmicas utilizando um mesmo método para o cálculo da resistência térmica de todos os painéis.

Assim, o método proposto para considerar os efeitos das pontes térmicas na simulação numérica horária no *EnergyPlus*, neste estudo nomeado de: Método das Propriedades Térmicas Combinadas Adaptado (PTCa), é apresentado na Figura 4.12.

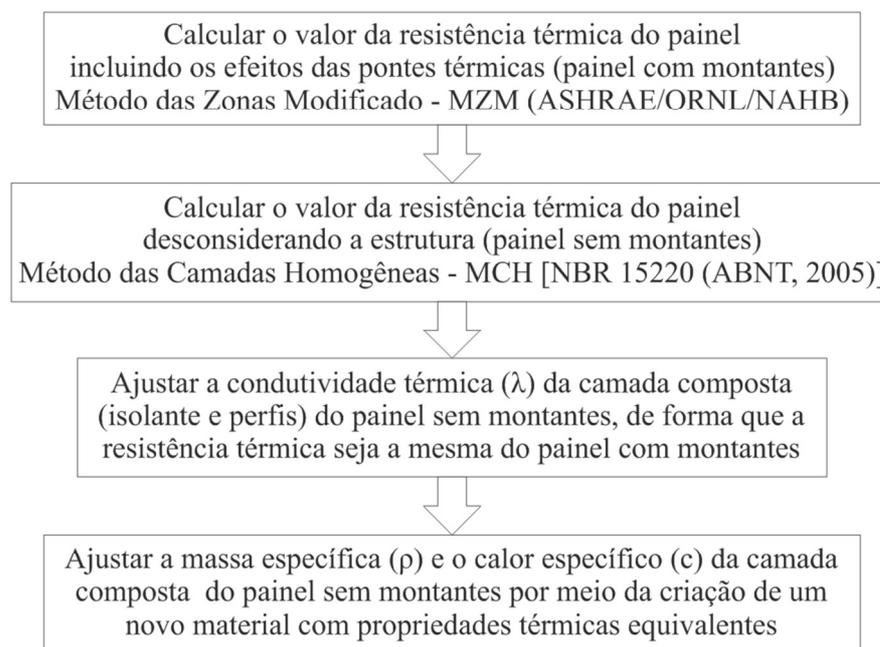


Figura 4.12 – Método PTCa.

4.6 Método de avaliação de edificações em LSF

O método desenvolvido neste trabalho para a avaliação do desempenho térmico de edificações em LSF é baseado nos estudos de Akutsu (1998). As diferenças principais no método proposto incluem:

- i) a utilização do método PTCa para representar a estrutura metálica em simulações numéricas horárias na etapa de caracterização dos materiais e componentes;

- ii) a adoção de critérios de avaliação contidos na norma NBR 15575 (ABNT, 2008) para edificações naturalmente ventiladas e análises comparativas da demanda das cargas térmicas ou consumo de energia para edificações condicionadas artificialmente;
- iii) e a adoção de uma camada de ruptura térmica nos painéis externos caso o desempenho térmico da edificação avaliada não seja adequado.

Na Figura 4.13, apresenta-se o fluxograma do método proposto, que sintetiza o procedimento desenvolvido neste trabalho.

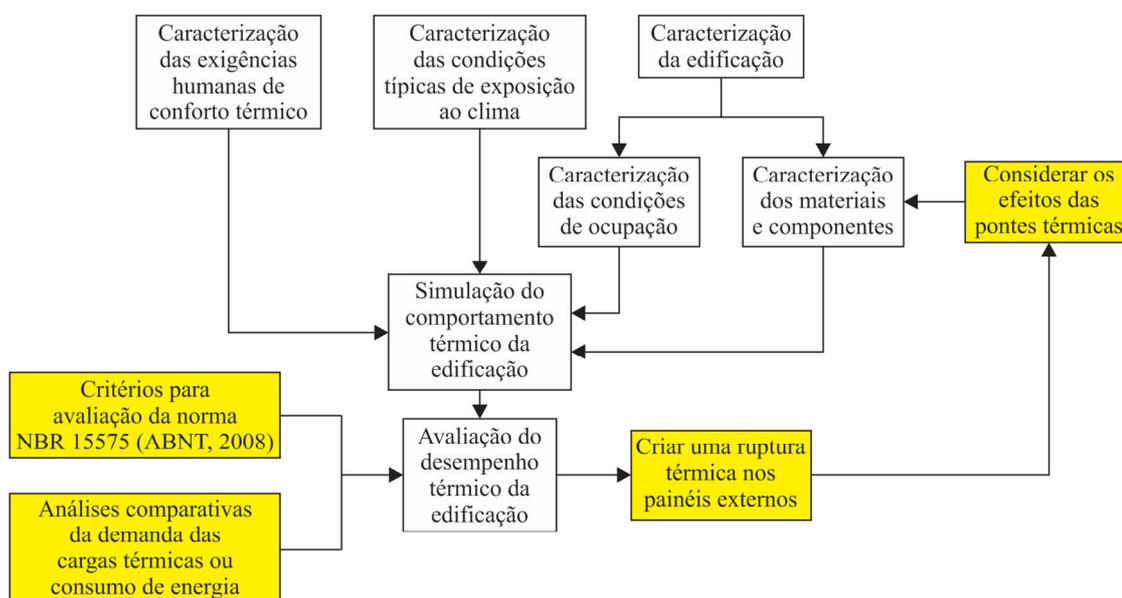


Figura 4.13 – Método de avaliação proposto.
Fonte: Adaptado de Akutsu (1998).

4.7 Considerações acerca do Capítulo IV

O principal avanço no processo de avaliação de edificações em LSF em simulações numéricas horárias apresentado neste trabalho é a inclusão da estrutura de perfis metálicos leves na análise, por meio da consideração dos efeitos das pontes térmicas dos painéis na etapa de caracterização dos materiais e componentes. Neste capítulo foram apresentados os cálculos necessários à aplicação do método proposto. O Anexo C complementa as informações dadas por meio das rotinas apresentadas.

O método possui limitações como a impossibilidade de se representar algumas formas de rupturas térmicas, como modificações locais nos montantes. Neste caso, seria mais conveniente uma análise via MEF.

Por outro lado, o método apresentado permite a avaliação de qualquer composição de fechamento vertical a ser analisado considerando as condições climáticas do Brasil com precisão admissível nos resultados.

5 APLICAÇÕES DO MÉTODO

Este capítulo tem por finalidade exemplificar a aplicação do método de avaliação do desempenho térmico de edificações em LSF desenvolvido neste trabalho e discutir alguns parâmetros importantes relacionados à simulação numérica. Foram avaliados os desempenhos térmicos de seis tipologias, incluindo edifícios naturalmente ventilados e condicionados artificialmente. Em todos os casos, os resultados obtidos com o método de representação das pontes térmicas PTCa foram comparados com os resultados gerados com o método SP, por ser o mais utilizado em simulações numéricas horárias de edificações. Nos estudos apresentados, também é avaliada a influência de algumas diretrizes do método proposto no desempenho térmico global da edificação, como a representação das rupturas térmicas nos fechamentos externos.

5.1 Caso 1

O objetivo desta simulação numérica é estudar a influência da representação das pontes térmicas na avaliação do desempenho térmico de uma edificação residencial naturalmente ventilada. Também é realizada uma comparação entre o sistema construtivo tradicional em alvenaria maciça e o sistema LSF para se obter uma referência na análise dos resultados. No presente estudo, os dados de entrada das etapas da elaboração do arquivo são bem detalhados, para que nos próximos estudos de caso, a descrição dos parâmetros possa ser simplificada.

5.1.1 Parâmetros gerais

A simulação numérica é realizada com o programa *EnergyPlus* (versão 7.0) e o algoritmo de solução adotado para o balanço de calor foi o CTF, que considera apenas o calor sensível. Os algoritmos adotados de convecção interna e externa foram os indicados pela norma ASHRAE e o intervalo de tempo entre cada simulação foi de 15 min. A edificação foi considerada no município de Belo Horizonte/MG.

5.1.2 Condições climáticas

Para a simulação numérica horária do caso 1, são utilizados os dados climáticos da cidade de Belo Horizonte/MG do tipo TRY, disponíveis no site do programa *EnergyPlus* (DOE, 2011). A cidade de Belo Horizonte foi escolhida devido ao constante crescimento de construções em LSF na região e pela disponibilidade de dados climáticos confiáveis. Na Tabela 5.1, apresenta-se os dados de Belo Horizonte na região da Pampulha.

Cidade	Coordenadas geográficas		
	Latitude	Longitude	Altitude
Belo Horizonte (Pampulha)	19° 51' S	43° 57' W	785 m

Na Figura 5.1, apresenta-se a evolução horária da temperatura de bulbo seco máxima (14/01), mínima (20/05) e umidade relativa dos dois dias extremos do arquivo anual. No verão, a temperatura máxima de bulbo seco é de 34 °C, enquanto que no inverno a mínima é de 7,7 °C.

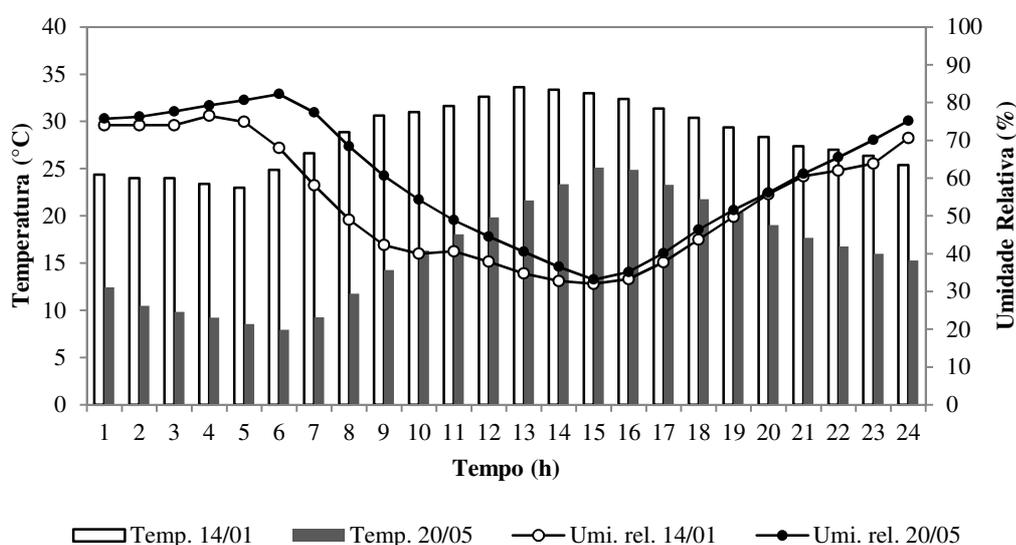


Figura 5.1 – Evolução temporal da temperatura e umidade para o dia com TBS máxima e mínima.

Identificados os períodos críticos (meses com temperaturas médias extremas), realiza-se a análise do desempenho térmico considerando os dias estáveis (amplitudes térmicas próximas) dos meses de janeiro e maio, conforme método de avaliação apresentado por Marcondes et al (2010). Os dias 06/01 e 12/05 foram escolhidos como representantes do

período de verão e inverno, respectivamente (Figura 5.2). No verão, a temperatura máxima de bulbo seco é de 29,7 °C, enquanto que no inverno a mínima é de 18,3 °C.

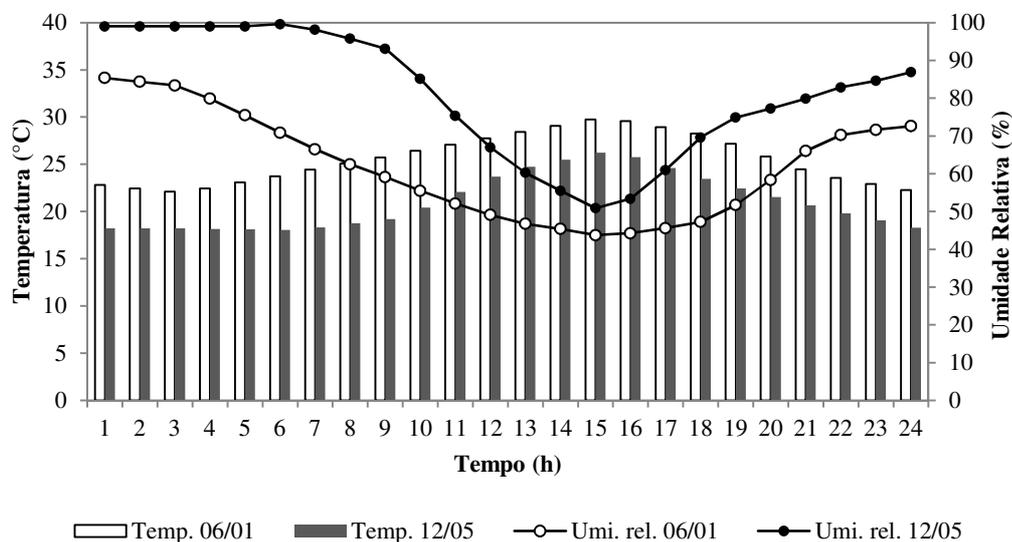


Figura 5.2 – Evolução temporal da temperatura e umidade para o dia 06/01 e 12/05.

Além dos dados climáticos disponibilizados pelo arquivo, foi considerada a refletância do solo de 0,2 para representar um entorno gramado.

5.1.3 Materiais e fechamentos

A laje de piso, o forro e a cobertura foram representados pelas propriedades termofísicas dos componentes, espessura e absorvância ($\alpha = 0,3; 0,5$ e $0,7$). As propriedades dos componentes de fechamento são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Propriedades termofísicas dos componentes de fechamento

Material	Espessura e (m)	Massa específica ρ (kg/m ³)	Condutividade térmica λ [W/(m.K)]	Calor Específico c [kJ/(kg.K)]
Aço	0,00095	7800	55	0,46
Placa cimentícia	0,01	1800	0,65	0,84
Gesso acartonado	0,0125	750	0,35	0,84
OSB	0,0111	450	0,12	2,30
Lã de vidro	0,05	30	0,045	0,70
Lã de vidro	0,09	30	0,045	0,70
Telhas <i>Shingle</i>	0,003	1000	0,17	1,46

Piso cerâmico	0,01	1600	0,9	0,92
Concreto	0,15	2200	1,75	1,00

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005)

A composição dos painéis foi determinada a partir de uma pesquisa de campo. Por meio de entrevistas a empresas e visitas técnicas, foi estabelecida a composição dos painéis em LSF de acordo com o uso difundido na região de Belo Horizonte/MG. A seguir, apresenta-se o arranjo dos painéis e detalhes de composição dos materiais utilizados neste estudo.

No modelo analisado, os painéis verticais externos são formados externamente por placa cimentícia e internamente por chapa de gesso acartonado (Figura 5.3). A placa cimentícia é constituída por uma mistura homogênea de cimento *Portland*, agregados naturais de celulose e reforçada com fios sintéticos de polipropileno, sem amianto (BRASILIT, 2007). A chapa de gesso acartonado é composta por gipsita natural e cartão duplex, sendo para uso exclusivamente interno (PLACO, 2009). Entre as placas e entre os montantes é aplicado um material para isolamento térmico constituído por lã de vidro aglomerada por resinas sintéticas. Nos fechamentos externos é utilizado um painel semi-rígido de lã revestido com papel *Kraft* (ISOVER, 2007).

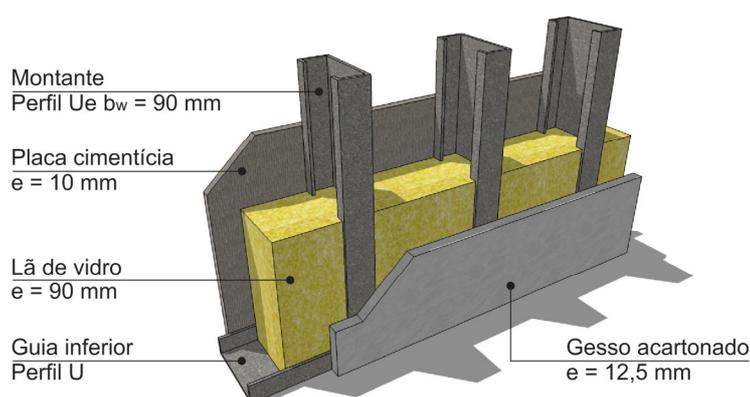


Figura 5.3 – Tipologia 1 – Painel externo.

Internamente, os fechamentos verticais constituem painéis não-estruturais que possuem a função de divisória interna. Esses fechamentos são formados por chapas de gesso acartonado, parafusadas em ambos os lados da estrutura de aço galvanizado (Figura 5.4). As chapas de gesso utilizadas nos fechamentos internos são as *Standard* (ST) para

áreas secas, com exceção das áreas úmidas onde são utilizadas chapas resistentes à umidade (RU).

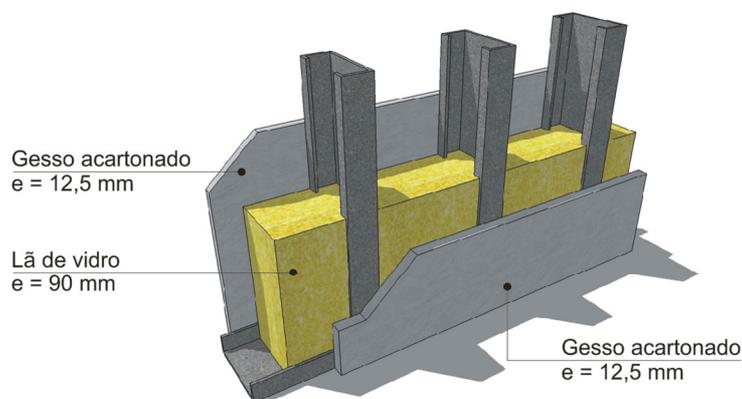


Figura 5.4 – Tipologia 1 – Painel interno.

A fundação é do tipo radier com enrijecimento, constituída por uma laje contínua de concreto armado com vigas de borda (Figura 5.5). O forro é formado por uma camada de gesso acartonado ($e = 12,5$ mm) e uma camada de lã de vidro ($e = 50,0$ mm), Figura 5.6. A cobertura é composta por placas de OSB (*Oriented Strand Board*) montadas sobre os caibros de aço, por uma subcobertura para garantir a estanqueidade do telhado e pelas telhas *Shingle* (Figura 5.7).

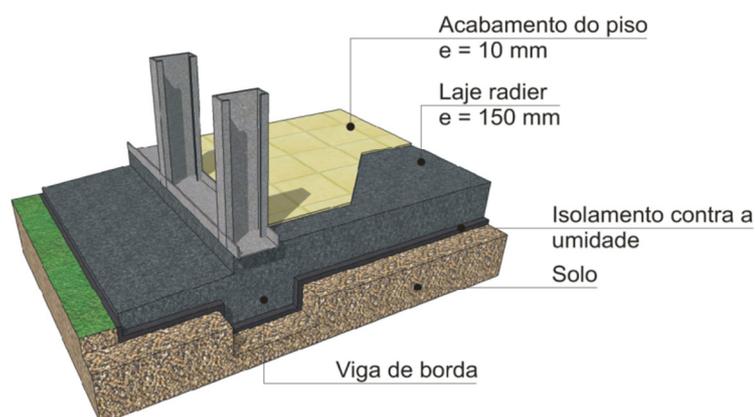


Figura 5.5 – Tipologia 1 – Fundação.

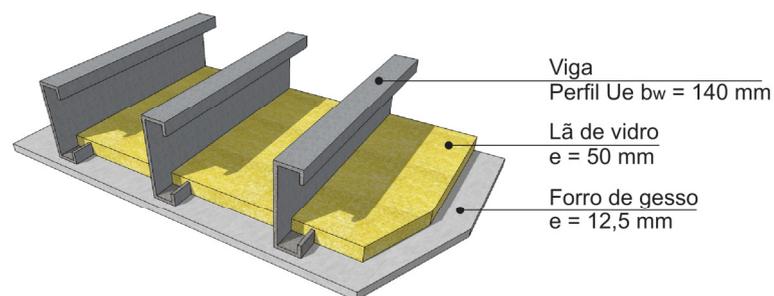


Figura 5.6 – Tipologia 1 – Forro.



Figura 5.7 – Tipologia 1 – Cobertura.

O painel de OSB é composto por tiras de madeira reflorestada (100% pinus) orientadas em três camadas cruzadas perpendicularmente. O OSB funciona como um diafragma rígido e serve de base para a fixação das telhas (LP BUILDING PRODUCTS, 2009). As telhas *Shingle* são compostas por uma base de manta asfáltica com grãos minerais revestidos por uma camada de cobre, que em contato com a água da chuva, reage, impedindo o crescimento de micro-organismos devido à presença de uma película de óxido de cobre (BRASILIT, 2010a).

Os painéis verticais foram caracterizados pelo método MZM e MCH. A resistência térmica dos painéis calculada por ambos os métodos é apresentada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resistência e transmitância térmica dos painéis verticais considerando os métodos MZM e MCH

		Resistência térmica R [(m ² .K)/W]	Transmitância térmica U [W/(m ² .K)]
Painel externo*	MZM	1,003	0,996
	MCH	2,051	0,487
Painel interno*	MZM	1,112	0,899
	MCH	2,071	0,482

* Distância entre montantes = 600 mm

Na Tabela 5.4, apresenta-se a camada isolante com os valores das propriedades térmicas ajustadas.

Tabela 5.4 – Propriedades térmicas da camada composta dos painéis verticais

Material composto equivalente	Condutividade térmica λ [W/(m.K)]	Massa específica ρ (kg/m ³)	Calor Específico c [kJ/(kg.K)]
ISOL. Painel externo*	0,094	56,511	0,587
ISOL. Painel interno*	0,086	56,511	0,587

* Distância entre montantes = 600 mm

5.1.4 Zonas térmicas e geometria da edificação

A Tipologia 1 adotada para análise corresponde a uma habitação de interesse social térrea, com área total de 56,16 m² (eixo a eixo das paredes) e pé-direito de 3,00 m. O projeto da edificação foi baseado na habitação desenvolvida por Penna (2009). Atendendo a uma das recomendações de Crasto (2005), os ambientes foram dimensionados por uma malha de 600 mm x 600 mm (Figura 5.8). A edificação foi dividida em seis zonas térmicas: quartos, estar/jantar, cozinha, instalações sanitárias (i.s.) e ático (espaço entre a laje de teto ou forro e o telhado). No verão, a edificação foi orientada de forma que a janela do Quarto 2 estivesse voltada para oeste e a outra parede exposta voltada para norte; e no inverno, a janela do Quarto 1 estivesse voltada para sul e a outra parede exposta voltada para leste.

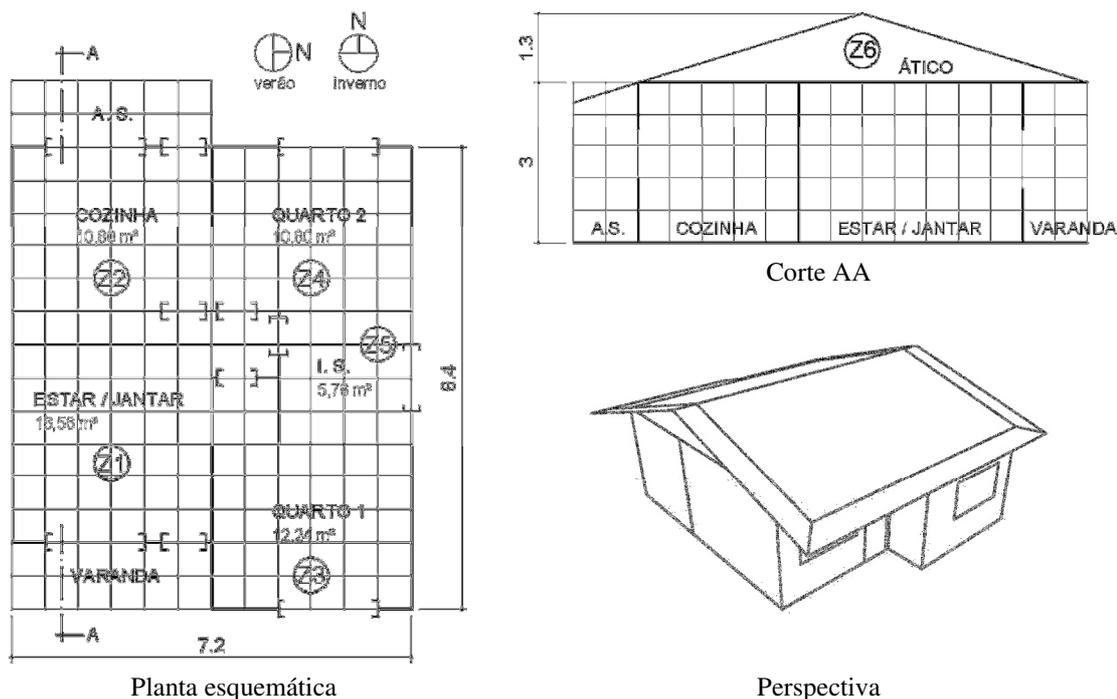


Figura 5.8 – Geometria da Tipologia 1.

5.1.5 Rotinas de uso e ocupação e cargas internas

Seguindo as diretrizes da norma NBR 15575 (ABNT, 2008), não foram consideradas cargas internas de calor e, conseqüentemente, padrões de uso.

5.1.6 Sistema de condicionamento

Neste estudo considerou-se uma taxa de renovação de ar constante, variando entre 1 e 5ren/h, correspondendo à infiltração e à ventilação natural. A área de abertura das janelas correspondeu à 1/6 da área do piso para os ambientes de longa permanência (quartos e salas) e à 1/8 para ambientes de baixa permanência (i.s.).

5.1.7 Relatórios de saída

Para a análise foi solicitado o perfil das temperaturas internas e do ambiente externo. Também foram solicitadas as taxas de renovação de ar de cada zona para conferência dos resultados da simulação.

5.1.8 Resultados

Foram realizadas duas séries de simulações: a primeira considerando o método proposto e a segunda desconsiderando os efeitos das pontes térmicas. Os valores das temperaturas internas dos ambientes: Estar/Jantar (E/J) e quarto 1 (Q) são apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Tabela 5.5 – Temperaturas internas considerando os efeitos das pontes térmicas (PTCa)

	1ren/h						5ren/h					
	$\alpha = 0,3$		$\alpha = 0,5$		$\alpha = 0,7$		$\alpha = 0,3$		$\alpha = 0,5$		$\alpha = 0,7$	
	E/J	Q										
T_{\max} (Verão)	30,2	30,8	30,6	31,4	31,0	31,9	29,8	30,3	30,0	30,6	30,3	30,8
T_{\min} (Inverno)	19,8	20,0	19,8	20,1	19,9	20,1	19,1	19,2	19,1	19,2	19,1	19,3
5ren/h e 50% sombreamento das janelas												
$\alpha = 0,3$												
$\alpha = 0,5$												
$\alpha = 0,7$												
	E/J	Q	E/J	Q	E/J	Q						
T_{\max} (Verão)	29,6	29,8	29,8	30,1	30,0	30,3						
T_{\min} (Inverno)	19,0	19,1	19,1	19,1	19,1	19,2						

Tabela 5.6 – Temperaturas internas desconsiderando os efeitos das pontes térmicas (SP)

	1ren/h						5ren/h					
	$\alpha = 0,3$		$\alpha = 0,5$		$\alpha = 0,7$		$\alpha = 0,3$		$\alpha = 0,5$		$\alpha = 0,7$	
	E/J	Q										
T_{\max} (Verão)	30,0	30,8	30,3	31,3	30,5	31,6	29,7	30,2	29,9	30,4	30,0	30,6
T_{\min} (Inverno)	19,9	20,2	19,9	20,3	20,0	20,3	19,1	19,3	19,1	19,3	19,1	19,3
5ren/h e 50% sombreamento das janelas												
$\alpha = 0,3$												
$\alpha = 0,5$												
$\alpha = 0,7$												
	E/J	Q	E/J	Q	E/J	Q						
T_{\max} (Verão)	29,4	29,7	29,6	29,9	29,7	30,1						
T_{\min} (Inverno)	19,1	19,2	19,1	19,2	19,1	19,2						

Observou-se que ao incluir os perfis em aço na simulação, os ambientes internos ficaram mais suscetíveis à variação da temperatura externa, aumentando os ganhos de calor no verão e aumentando as perdas no inverno. Mas, a diferença entre as temperaturas obtidas no verão e no inverno, considerando ou não os efeitos das pontes térmicas, foram muito pequenas: média de 0,55%. Para ambas as séries, as condições mais adequadas ao bom condicionamento dos ambientes foram: taxa de 5ren/h, 50% sombreamento das janelas e $\alpha = 0,3$ para verão e taxa de 1ren/h e $\alpha = 0,7$ para inverno.

Independente da taxa de renovação, cor dos painéis externos e sombreamento das janelas, verificou-se a necessidade de aquecimento solar passivo no período de inverno.

Para complementar esta análise, os resultados obtidos com o método proposto foram comparados com o sistema construtivo em alvenaria maciça. Comparando as condições mais adequadas para o verão e o inverno, entre o sistema LSF (considerando a estrutura metálica) e o sistema em alvenaria maciça (alvenaria com espessura de 90 mm e reboco em ambas as faces com espessura de 20 mm), observa-se que, neste caso, o LSF e a alvenaria possuem comportamento parecido em uma simulação numérica global.

No entanto, aplicando-se o critério da norma NBR 15575 (ABNT, 2008) para as condições de inverno, verifica-se que nenhum dos dois sistemas é capaz de obter o nível mínimo de desempenho no inverno, ou seja, temperaturas internas mínimas maiores que 21,03 °C (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 – Comparação LSF x alvenaria maciça

	T_{\max} (Verão) / 5ren/h e 50% symb.		T_{\min} (Inverno) / 1ren/h e $\alpha = 0,7$	
	E/J	Q	E/J	Q
LSF (PTCa)	29,6	29,8	19,9	20,1
Alvenaria	29,5	29,8	20,6	20,9

O sistema em alvenaria apresenta atraso térmico maior ($\phi = 3,3$ h) que o sistema construtivo em LSF ($\phi = 2,9$ h)¹. Como o atraso térmico está associado à inércia térmica, os ambientes internos com o sistema em alvenaria são um pouco menos influenciados pelas condições climáticas externas. Esta característica diminui a oscilação e o pico de temperatura durante o dia, contribuindo com o aumento das temperaturas internas no inverno e a redução das temperaturas no verão. Como pode ser observado na Figura 5.9, no sistema construtivo em alvenaria o perfil das temperaturas internas da zona térmica 1 favorece mais ao conforto ambiental no período noturno no inverno do que o sistema em LSF.

¹ No Anexo B, apresenta-se uma revisão sobre inércia térmica e procedimento de cálculo do atraso térmico.

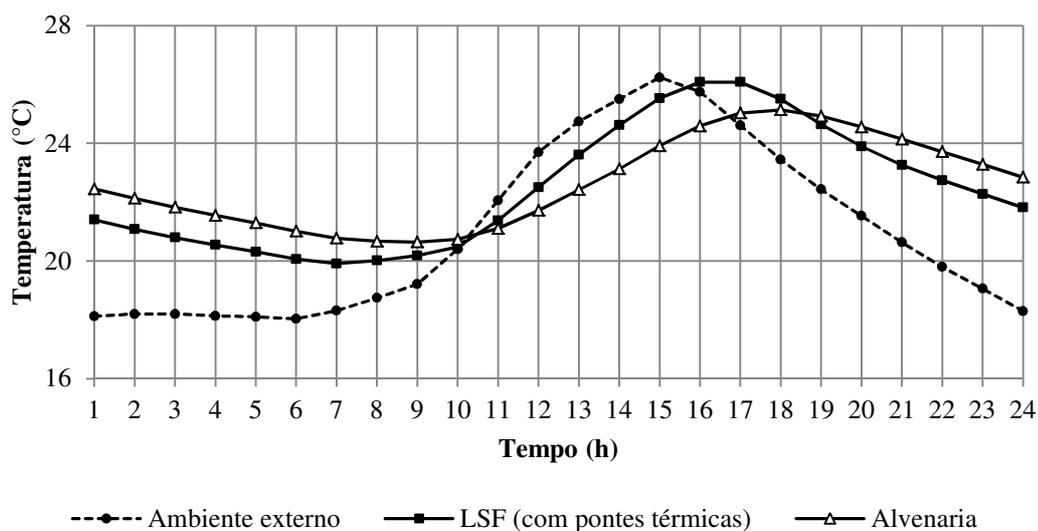


Figura 5.9 – Evolução temporal da temperatura na Zona 1 (ESTAR) no inverno (12/05).

Como o desempenho térmico da edificação não se mostrou adequado, deve-se aplicar nos painéis externos uma camada de ruptura térmica a fim de amenizar o problema. Aplicando-se uma placa de EPS (25 mm) nos painéis externos e modificando-se as propriedades da camada de isolamento (Tabela 5.8), têm-se as temperaturas apresentadas na Tabela 5.9.

Tabela 5.8 – Propriedades térmicas da camada composta de painéis verticais externos

Material composto equivalente	Condutividade térmica λ [W/(m.K)]	Massa específica ρ (kg/m ³)	Calor Específico c [kJ/(kg.K)]
ISOL. Painel externo (c/ EPS) *	0,069	56,511	0,587

* Distância entre montantes = 600 mm

Tabela 5.9 – Comparação LSF x LSF com placa de EPS (25 mm)

	T_{\max} (Verão) / 5ren/h e 50% somb.		T_{\min} (Inverno) / 1ren/h e $\alpha = 0,7$	
	E/J	Q	E/J	Q
LSF (PTCa)	29,6	29,8	19,9	20,1
LSF (PTCa + EPS 25 mm)	29,4	29,7	20,0	20,0

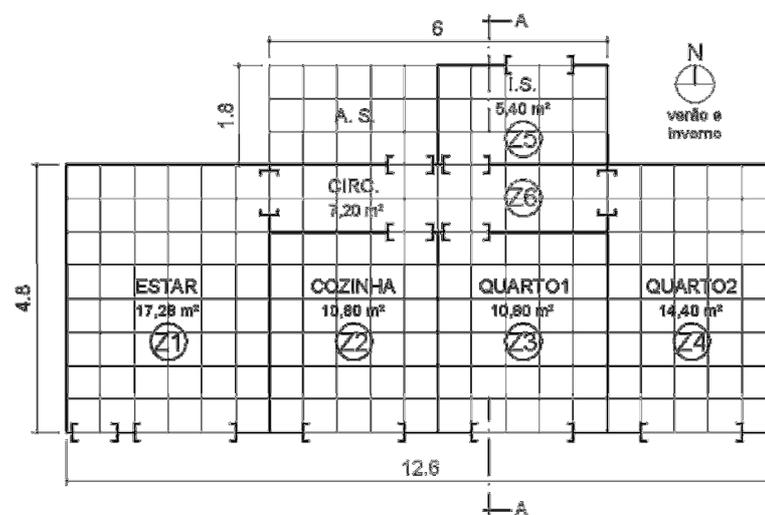
A aplicação da placa de EPS nos painéis externos reduziu um pouco as temperaturas internas no período de verão, mas as temperaturas internas mínimas não foram maiores que 21,03 °C no inverno. Segundo os critérios de avaliação da norma NBR 15575 (ABNT, 2008), a edificação analisada não seria classificada em nenhuma categoria de

desempenho. Um projeto mais adaptado às condições climáticas do local poderia implicar em um comportamento térmico adequado da edificação.

5.2 Caso 2

No Caso 2, o projeto arquitetônico foi concebido para se adaptar às condições climáticas da cidade de Belo Horizonte/MG. O objetivo desta simulação numérica é avaliar a influência do projeto arquitetônico no desempenho térmico da edificação. Também foi estudada a influência das temperaturas superficiais do solo no comportamento da edificação. Os painéis utilizados e os parâmetros de simulação são os mesmos do Caso 1. A diferença fundamental está na geometria da edificação.

A Tipologia 2 também é uma residência unifamiliar térrea, mas idealizada a partir das recomendações de projeto da NBR 15220 (ABNT, 2005). Segundo as diretrizes contidas nesta norma, para a zona bioclimática 3, onde se enquadra a cidade de Belo Horizonte/MG, as aberturas para ventilação devem ser médias ($A_{\text{janela}} = 15\%$ a 25% de A_{pisso}) e deve-se prever no inverno o aquecimento solar da edificação. A orientação solar definida foi a mesma para o verão e o inverno, com as janelas dos quartos e sala recebendo a radiação solar direta no início e no fim do dia. A edificação possui área total de $65,88 \text{ m}^2$ (eixo a eixo das paredes), pé-direito de $3,00 \text{ m}$ e dimensões moduladas por uma malha de $600 \times 600 \text{ mm}$ (Figura 5.10).



Planta esquemática

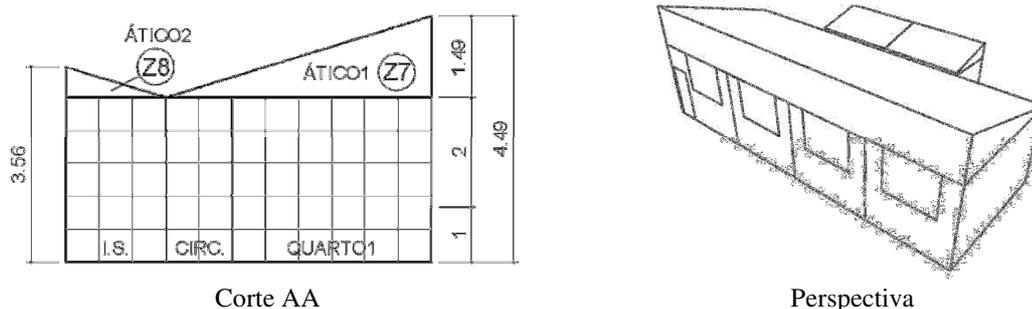


Figura 5.10 – Geometria da Tipologia 2.

O telhado tipo borboleta evita o mascaramento das janelas e paredes voltadas para o sul. Não foram modelados os beirais ou outros tipos de sombreamento no período do inverno. No verão, foi considerado o mascaramento de 50% das janelas e o uso de persianas internas nas aberturas da fachada sul.

As temperaturas do solo de Belo Horizonte utilizadas neste caso são aquelas utilizadas por Louira (2006). No *EnergyPlus*, estas temperaturas são utilizadas por todas as superfícies que possuem interface com o parâmetro “*Ground*”. Entra-se com a temperatura do solo média de cada mês (Tabela 5.10).

Tabela 5.10 – Temperaturas do solo de Belo Horizonte/MG

Mês	Temp. do solo (°C)	Mês	Temp. do solo (°C)
JAN	22,5	JUL	20,6
FEV	23,1	AGO	20,0
MAR	23,3	SET	19,8
ABR	23,1	OUT	20,1
MAI	22,3	NOV	20,8
JUN	21,4	DEZ	21,7

Fonte: LOURA, 2006.

Na Tabela 5.11 e Figura 5.11, apresenta-se os resultados considerando o método PTCa, SP e acrescentando as temperaturas do solo (PTCa + Temp. solo).

Tabela 5.11 – Temperaturas dos ambientes Estar/Jantar (E/J) e quarto 1 (Q)

	T_{\max} (Verão) / 5ren/h e 50% somb.		T_{\min} (Inverno) / 1ren/h e $\alpha = 0,7$	
	E/J	Q	E/J	Q
LSF (PTCa)	29,6	29,4	21,4	21,7
LSF (SP)	29,3	28,9	21,6	21,9
LSF (PTCa + Temp. solo)	28,8	28,5	20,4	20,4

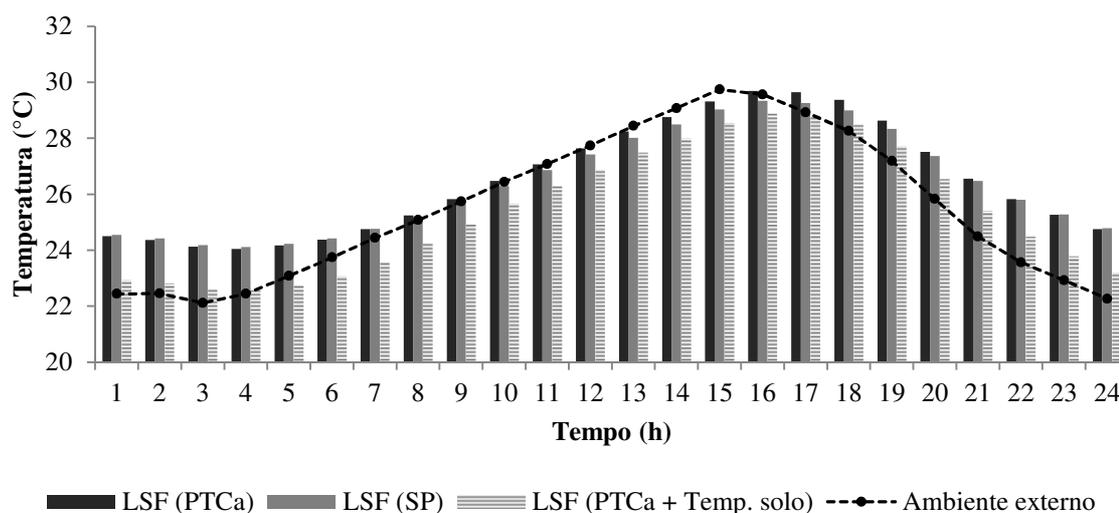


Figura 5.11 – Evolução temporal da temperatura na Zona 1 (ESTAR) no verão (06/01).

Considerando as temperaturas de referência para verão ($T_{\text{máx}} = 29,74 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e inverno ($T_{\text{mín}} = 21,03 \text{ }^{\circ}\text{C}$), os resultados indicam que o desempenho do sistema está intimamente ligado à qualidade do projeto. O projeto arquitetônico exerce grande influência no desempenho térmico da edificação. Os resultados mostraram-se sensíveis às estratégias de condicionamento térmico passivo, como orientação solar das janelas, disposição da planta e tamanho das aberturas. Tanto no verão, quanto no inverno, a edificação obteve desempenho satisfatório utilizando o mesmo sistema de painéis do Caso 1, que não obteve o mesmo comportamento. Novamente, a diferença entre as temperaturas obtidas no verão e inverno para a edificação naturalmente ventilada, considerando ou não os efeitos das pontes térmicas, foi pequena: média de 1,22%.

As temperaturas do solo influenciam muito no desempenho térmico da edificação. Elas podem ser responsáveis pela falha ou sucesso de um sistema construtivo. No Caso 2, durante o período do verão, como as temperaturas do ambiente externo são maiores que a temperatura média do solo em quase a totalidade do dia, a inclusão desta variável melhora o comportamento térmico dos ambientes, diminuindo as temperaturas internas (Figura 5.12). No período de inverno, a inclusão das temperaturas do solo também diminui o pico das temperaturas e, conseqüentemente, as temperaturas internas no período noturno.

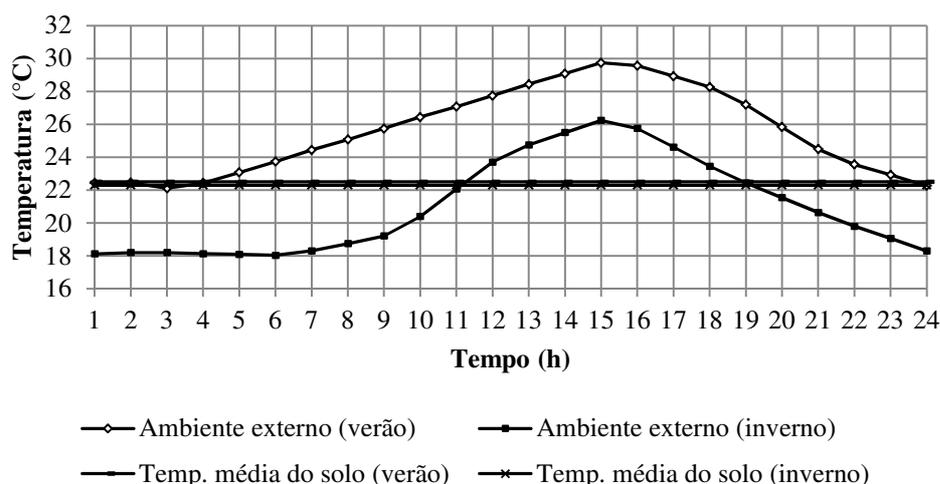


Figura 5.12 – Evolução temporal da temperatura do ambiente externo e temperatura de referência do solo para verão e inverno.

Recomenda-se que ao utilizar as temperaturas do solo em uma simulação numérica horária, esta informação deva ser claramente explicitada no relatório. Dependendo das condições ambientais, a simulação com as temperaturas do solo podem induzir a conclusões errôneas do comportamento térmico da edificação.

5.3 Caso 3

O objetivo deste estudo é investigar o desempenho térmico da edificação associado ao método proposto e a diferentes tipos de ventilação. Será avaliada a utilização do módulo *AirflowNetwork* no método. O objeto de estudo do Caso 3 representa uma edificação térrea em LSF, modulada por uma malha de 600 x 600 mm. A edificação possui área interna de 25,92 m² (eixo a eixo das paredes), pé direito de 3,0 m e é constituída por três zonas térmicas: dois ambientes e um ático. Como se trata de uma edificação muito simples, cada ambiente foi definido como uma zona térmica. Na Figura 5.13, apresenta-se a planta baixa esquemática das duas zonas térmicas que constituem os ambientes de análise. As aberturas para ventilação possuem esquadrias com folhas pivotantes e estão situadas na fachada sul, com dispositivo de proteção solar que bloqueia parcialmente a entrada da radiação solar direta. As aberturas das janelas correspondem a 22% da área do piso na Zona 1 e a 18% na Zona 2. Os parâmetros gerais da simulação numérica são os mesmos do Caso 1.

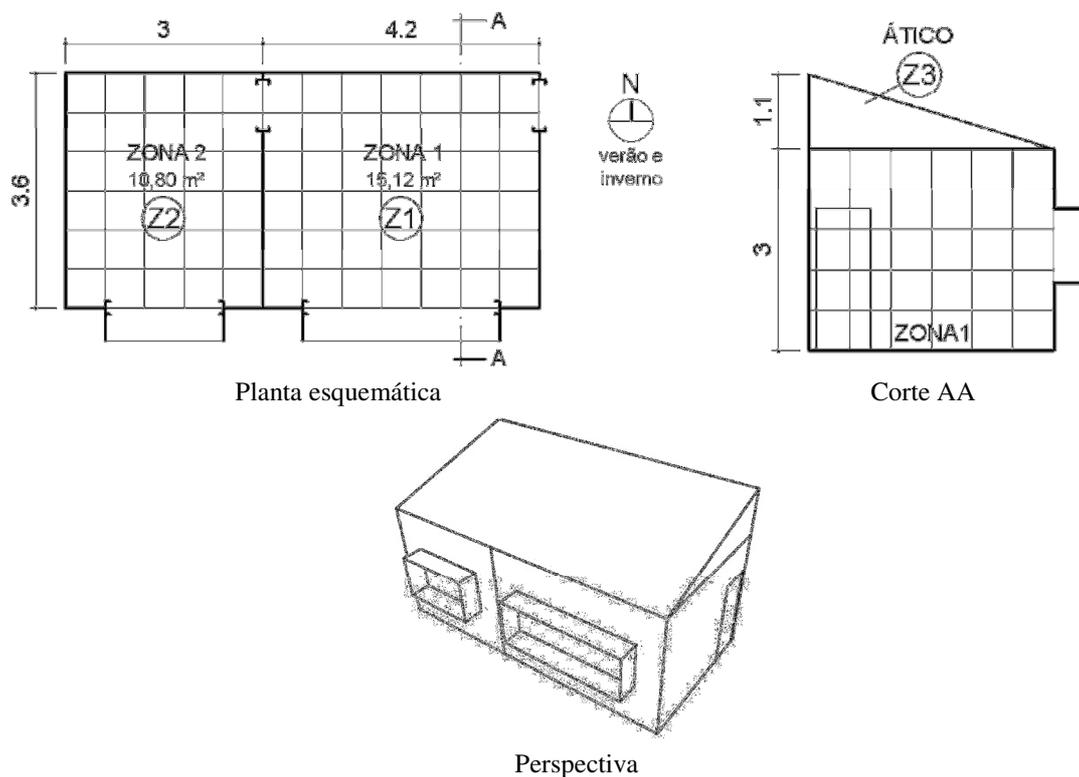


Figura 5.13 – Geometria da Tipologia 3.

Para a análise do desempenho foram escolhidas duas formas de ventilação: taxa de renovação constante (ren/h) e variável (*AirflowNetwork*). No módulo *AirflowNetwork*, determinou-se o período de disponibilidade da ventilação natural entre 7h e 22h. Tanto as portas quanto as janelas permanecem abertas durante esse período. Como se trata de um edifício com planta retangular, os coeficientes de pressão do vento puderam ser calculados pelo programa. Não se considerou ventilação ou infiltração de ar no ático.

Na Figura 5.14 apresenta-se as temperaturas internas da Zona 1 considerando o dia representativo de verão. Os resultados apresentados nesta figura representam os perfis de temperatura interna considerando o módulo *AirflowNetwork* pelos métodos PTCa e SP, e taxa de renovação constante (5 ren/h). Observa-se na Figura 5.14 a semelhança entre os perfis de temperatura considerando-se ou não os efeitos das pontes térmicas no módulo *AirflowNetwork*. Como observado nos casos anteriores, a inclusão da estrutura metálica na simulação horária do desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas, mesmo no módulo *AirflowNetwork*, não interferiu consideravelmente nos resultados.

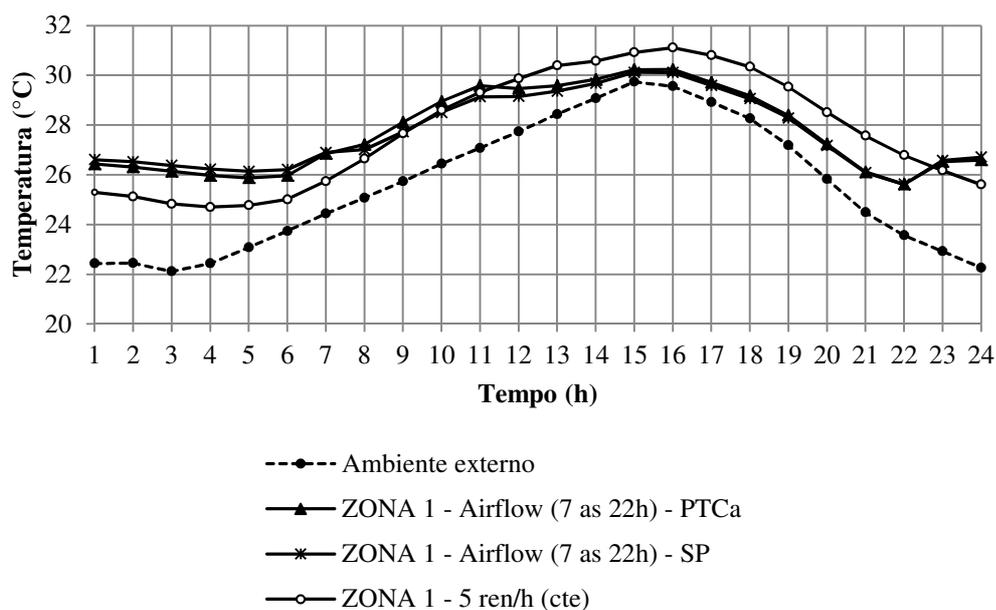


Figura 5.14 – Evolução temporal da temperatura na Zona 1 no dia de projeto de verão.

Como pode ser observado na Tabela 5.12, a diferença percentual máxima entre os métodos de simulação com o módulo *AirflowNetwork* foi de 1,62% na zona térmica 2 para as condições climáticas do verão.

Tabela 5.12 – Temperaturas máxima das zonas Z1 e Z2 p/ o dia de projeto de verão

	T _{max} -Verão (°C)		Diferença (%)	
	Z1	Z2	Z1	Z2
LSF (Airflow - PTCa)	30,2	31,8	---	---
LSF (Airflow - SP)	30,1	31,2	0,39	1,62
LSF (5 ren/h - PTCa)	31,1	31,2	2,91	1,82

Neste caso, os valores extremos dos resultados obtidos no verão com a simulação considerando uma taxa de ventilação constante apresentaram uma diferença maior se comparadas à simulação com o módulo *AirflowNetwork*. A adoção de uma taxa fixa para ventilação dos ambientes exclui a possibilidade da abertura e fechamento das janelas. O horário de abertura dos *links* pode promover conforto ambiental, seja pelo fechamento para retenção de calor no interior da edificação ou pela abertura para aumentar as perdas de calor.

Como observado por Matos et al (2006), a ventilação natural simulada por um algoritmo multizona integrado a um programa de simulação horária fornece resultados mais precisos do que considerar taxas de renovação do ar constantes. Utilizando-se o módulo *AirflowNetwork*, pode-se analisar diversos parâmetros que interferem no comportamento dos ambientes. O perfil do volume de infiltração de ar, por exemplo, que é função de diversas variáveis, pode ser analisado em função da velocidade e direção do vento, que podem ser obtidos no relatório de saída do programa (Figura 5.15).

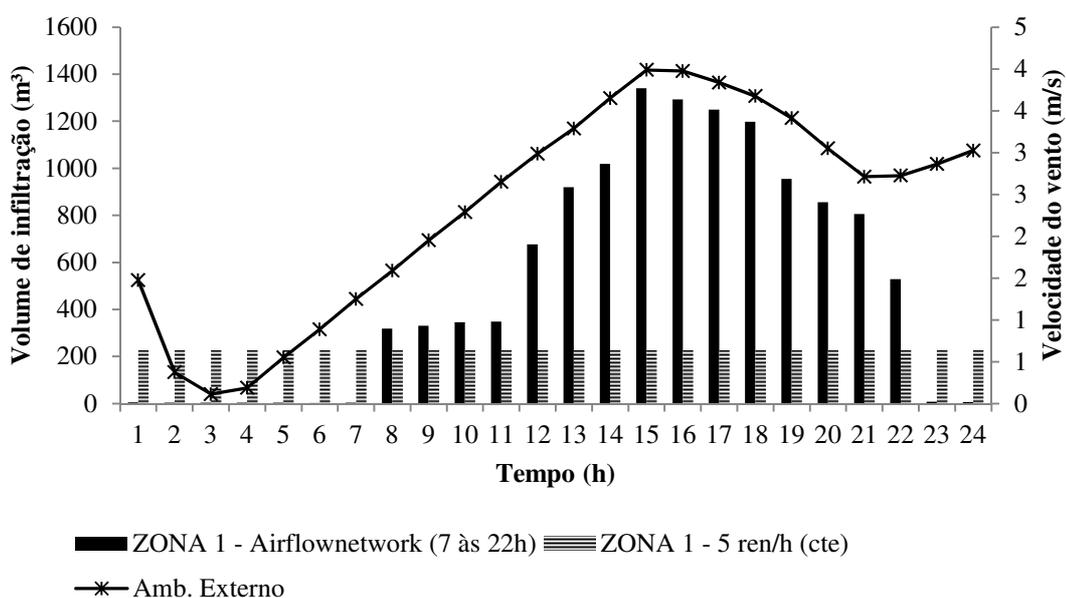


Figura 5.15 – Volume de infiltração da Zona 1 em função da direção do vento.

Sempre que não for estritamente necessário adotar todas as diretrizes da norma brasileira NBR 15575 (ABNT, 2008), deve-se adotar o módulo *AirflowNetwork* para simular a ventilação dos ambientes, por ser mais preciso e permitir uma análise mais refinada do comportamento térmico dos ambientes.

5.4 Caso 4

No Caso 4, o objetivo é investigar a influência da aplicação do método no dimensionamento das cargas térmicas de um edifício. O modelo utilizado no Caso 4 corresponde a uma pequena edificação comercial de dois pavimentos. Cada pavimento

possui quatro salas e área total de $117,12 \text{ m}^2$ (eixo a eixo das paredes), pé-direito de $3,50 \text{ m}$ e planta modulada por uma malha de $400 \times 400 \text{ mm}$ (Figura 5.16). O edifício foi modelado com 15 zonas térmicas e a geometria de alguns ambientes foi simplificada. As instalações sanitárias presentes nas fachadas leste e oeste foram agrupadas de forma que o painel que divide os ambientes geminados não foi modelado. Na área de circulação não se modelou a escada. Foram instalados dispositivos que bloqueiam parcialmente a radiação solar direta na fachada leste e oeste.

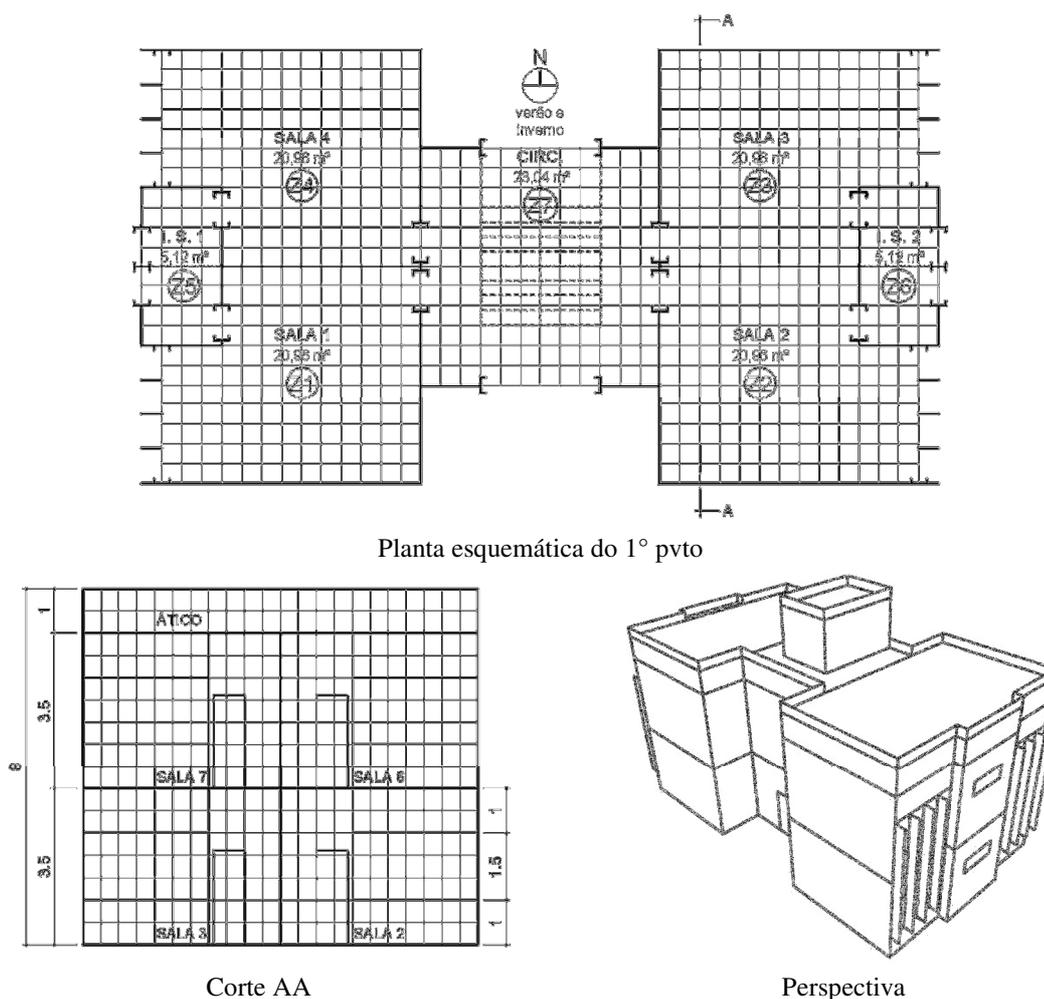


Figura 5.16 – Geometria da Tipologia 4.

Nas salas de escritórios considerou-se as pessoas utilizando roupas com resistência de $0,5 \text{ CLO}$ (roupas leves) e realizando atividades que liberam uma taxa de calor de 130 W

por pessoa, com fração radiante de 0,3 (NBR 16401, 2008). Adotou-se a taxa de ILD^2 de 20 W/m^2 , sendo: pessoas iguais a 6 W/m^2 , iluminação igual a 8 W/m^2 e equipamentos, 6 W/m^2 . Nos ambientes não condicionados (i.s. e circulação) adotou-se somente a taxa de iluminação (8 W/m^2).

O padrão de uso (PU) para as fontes internas foi considerado apenas nos dias úteis. O início das atividades no edifício foi estimado às 8h, com intervalo ao meio dia e reinício às 14h, e com término às 18h. Considerou-se o aparelho ligado 24h por dia, o ano inteiro. Definiu-se a temperatura constante limite para resfriamento em 24°C e considerou-se uma taxa de renovação por hora como infiltração (1 ren/h).

As lajes entre pisos e a cobertura foram modeladas pelas propriedades termofísicas dos componentes. A composição dos painéis é apresentada na Tabela 5.13. A principal diferença na composição dos painéis entre o edifício comercial e o residencial é a aplicação da placa *Masterboard*, que é constituída por duas camadas de placas cimentícias com recheio de OSB (BRASILIT, 2010b).

Tabela 5.13 – Composição dos fechamentos

Painel	Componentes
Externo	Placa cimentícia 10 mm
	Montante 90x40x12 @ 400 mm
	Lã de vidro 90 mm
	Gesso acartonado 12,5 mm
Interno	Gesso acartonado 12,5 mm
	Montante 90x40x12 @ 400 mm
	Lã de vidro 90 mm
	Gesso acartonado 12,5 mm
Interno (circulação)	Gesso acartonado 12,5 mm
	Montante 90x40x12 @ 400 mm
	Lã de vidro 90 mm
	Gesso acartonado 12,5 mm
Laje entre pisos	Gesso acartonado 12,5 mm
	Piso cerâmico 10 mm
	<i>Masterboard</i> 23 mm
	Camada de ar 90 mm
	Lã de vidro 50 mm
	Gesso acartonado 12,5 mm

² A densidade de carga interna (ILD) representa a soma das três principais fontes internas de calor: pessoas, iluminação e equipamentos elétricos.

Laje de piso	Piso cerâmico 10 mm Concreto 150 mm
Cobertura	Telhas <i>shingle</i> 3mm Placa de OSB 11,1 mm

A resistência térmica dos painéis calculada pelo método MZM e MCH é apresentada na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Resistência e transmitância térmica dos painéis verticais considerando os métodos MZM e MCH

		Resistência térmica	Transmitância térmica
		R [(m ² .K)/W]	U [W/(m ² .K)]
Painel externo*	MZM	0,799	1,251
	MCH	2,051	0,487
Painel interno*	MZM	0,903	1,107
	MCH	2,071	0,482
Painel interno (circulação)*	MZM	1,120	0,892
	MCH	2,107	0,474

* Distância entre montantes = 400 mm

Na Tabela 5.15, apresenta-se a camada isolante com os valores das propriedades térmicas ajustadas.

Tabela 5.15 – Propriedades térmicas da camada composta de painéis verticais

Material composto equivalente	Condutividade térmica	Massa específica	Calor Específico
	λ [W/(m.K)]	ρ (kg/m ³)	c [kJ/(kg.K)]
ISOL. Painel externo*	0,120	69,7780	0,5626
ISOL. Painel interno*	0,108	69,7780	0,5626
ISOL. Painel interno (circulação)*	0,088	69,7780	0,5626

* Distância entre montantes = 400 mm

Na Figura 5.17, apresenta-se o pico da carga térmica mensal comparando os métodos PTCa e SP. Constatou-se uma variação mínima de 7,13% e máxima de 22,94% entre os dois métodos.

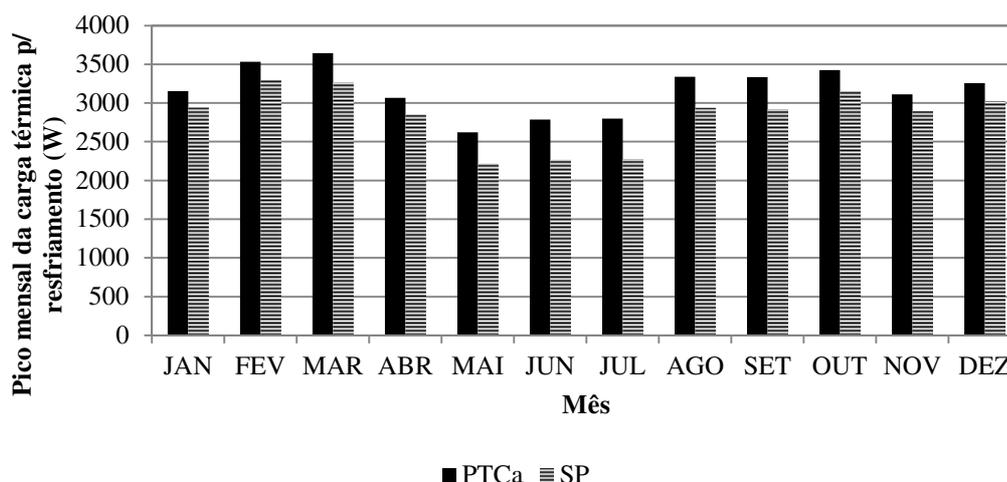


Figura 5.17 – Pico mensal da carga térmica para resfriamento (W).

Aplicando-se uma placa de EPS (25 mm) nos painéis externos para complementar a análise (Tabela 5.16) e modificando-se as propriedades da camada de isolamento (Tabela 5.17), têm-se os picos anuais das cargas térmicas apresentados na Tabela 5.18.

Tabela 5.16 – Resistência e transmitância térmica dos painéis verticais considerando os métodos MZM e MCH

		Resistência térmica R [(m ² .K)/W]	Transmitância térmica U [W/(m ² .K)]
Painel externo* (c/ EPS)	MZM	1,735	0,576
	MCH	2,676	0,373

* Distância entre montantes = 400 mm

Tabela 5.17 – Propriedades térmicas da camada composta de painéis verticais

Material composto equivalente	Condutividade térmica λ [W/(m.K)]	Massa específica ρ (kg/m ³)	Calor Específico c [kJ/(kg.K)]
ISOL. Painel externo (c/ EPS) *	0,085	69,778	0,562

* Distância entre montantes = 400 mm

Tabela 5.18 – Pico anual da carga térmica

	Pico anual da carga térmica p/ resfriamento (W)	Diferença (%)
PTCa	3643	----
CH	3298	-10,40
PTCa + EPS (25 mm)	3303	-10,29

A orientação solar das fachadas com área menor de fechamentos opacos e mascaramento dos elementos translúcidos voltados para o oeste favoreceu a redução das cargas térmicas. Além disso, como o sistema foi considerado ligado durante as 24 h do dia, não há cargas remanescentes, implicando em valores baixos de picos da carga térmica.

A diferença entre se modelar com ou sem os efeitos das pontes térmicas no dimensionamento das cargas térmicas foi da ordem de 10%. O incremento na diferença dos resultados deve-se, principalmente, ao aumento das trocas de calor no envelope como consequência da diferença das temperaturas interna e externa. Como pode ser observado nas curvas mostradas na Figura 5.18, no dia de pico da carga térmica para resfriamento a diferença de temperatura entre o interior e o exterior ultrapassou 7 °C.

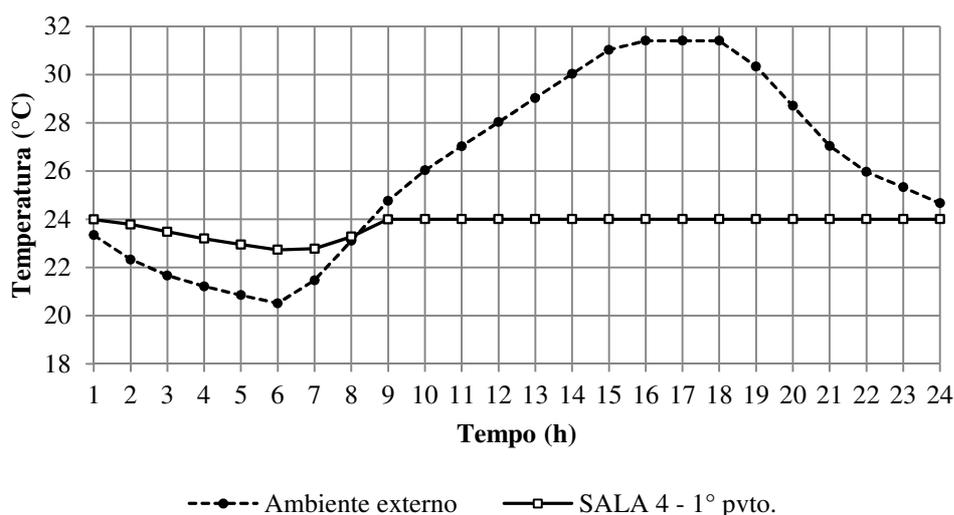


Figura 5.18 – Evolução temporal da temperatura da Sala 4 no dia de pico da carga térmica para resfriamento (03/03).

A aplicação de uma camada de EPS de 25 mm nos painéis externos reduz quase por completo a diferença percentual entre a simulação considerando ou não os efeitos da estrutura metálica. Porém, a diferença entre os valores obtidos não é capaz de implicar em diferentes dimensionamentos do sistema de ar condicionado.

5.5 Caso 5

O objetivo do Caso 5 é analisar o comportamento térmico do pavimento tipo de um edifício de escritórios com o sistema LSF. Neste caso, o sistema LSF apresenta papel secundário, apenas como elemento de fechamento vertical nas fachadas de um edifício com estrutura convencional de concreto³. Também é realizada uma comparação entre os resultados obtidos considerando a utilização de painéis pré-fabricados em concreto.

O pavimento tipo possui área total de 345,20 m² (eixo a eixo das paredes), pé-direito de 3,00 m e foi dividido em cinco zonas (Figura 5.19). As zonas 1 a 4 correspondem às salas de escritório que são condicionadas artificialmente, enquanto que a zona 5 compreende as caixas de escada e elevadores (core), e não é condicionada. As divisões internas e a laje entre pisos foram consideradas em concreto maciço, com espessuras de 10 cm e 15 cm, respectivamente. A composição dos painéis externos é a mesma do Caso 4, ou seja: placa cimentícia (10 mm), montantes em aço (90x40x12 - @ 400 mm), lã de vidro (90 mm) e gesso acartonado (12,5 mm).

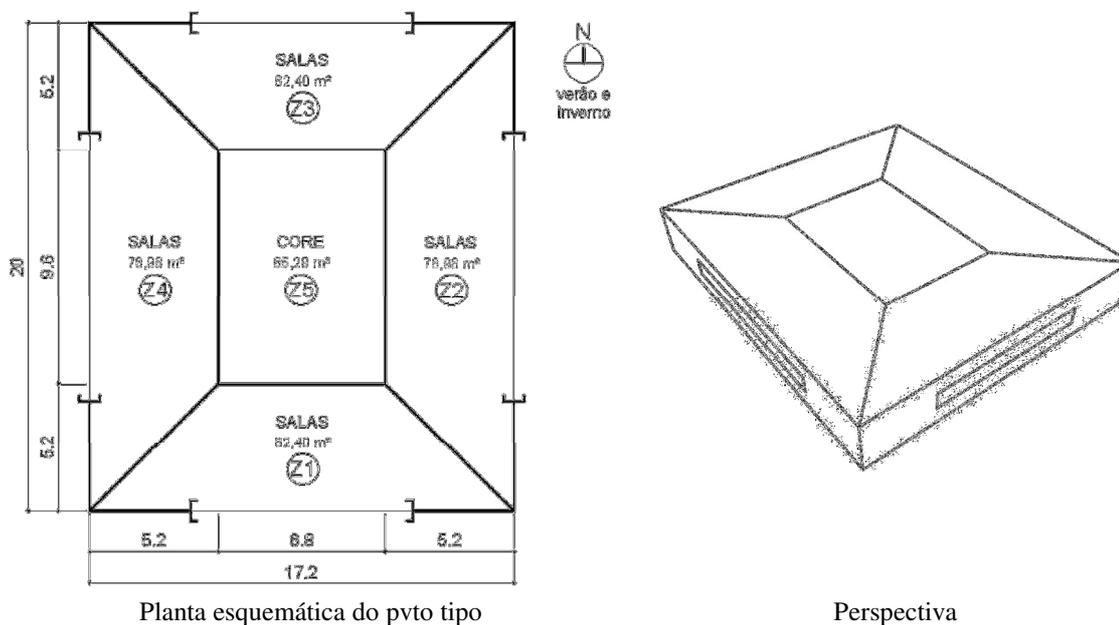


Figura 5.19 – Geometria da Tipologia 5.

³ Ver método embutido de montagem do sistema LSF em Santiago, 2008.

Considerou-se um sistema de expansão direta, do tipo *Split-system*, com COP igual a 3,19. A operação do sistema segue a mesma rotina de ocupação do edifício. A temperatura de controle adotada foi de 24°C para a função de resfriamento. A vazão máxima de cada zona foi determinada automaticamente pelo programa, baseada nas cargas geradas em um dia de projeto (*design day*) de verão e de inverno. A capacidade da serpentina de resfriamento também foi dimensionada automaticamente. Considerou-se a vazão de ar externo por pessoa (para renovar o ar do ambiente) de 0,0075 m³/s.pessoa. Adotou-se a mesma taxa de ILD (20 W/m²) e padrões de uso do Caso 4.

Na Tabela 5.19, apresenta-se o consumo anual em kWh comparando os resultados obtidos com o método das PTCa, SP e adicionando uma camada de EPS (25 mm) nos painéis externos.

Tabela 5.19 – Consumo anual – Caso 5

	Consumo anual AC (kWh)	Diferença (%)
PTCa	12731	----
SP	12143	-4,84
PTCa + EPS (25 mm)	12218	-4,19

O consumo de energia no setor comercial está diretamente relacionado às características arquitetônicas e padrões de uso da edificação. A diferença obtida com a representação das pontes térmicas foi significativa se considerado que somente os painéis externos foram modelados com o sistema LSF. No caso de o pavimento tipo possuir fechamento externo em concreto, o consumo anual de energia pode ser observado na Tabela 5.20. Com o uso dos painéis externos em concreto o consumo anual de energia é menor.

Tabela 5.20 – Consumo anual – LSF x Concreto

	Consumo anual AC (kWh)	Diferença (%)
LSF - PTCa	12731	----
Painéis em concreto	12352	-3,07

5.6 Caso 6

O presente caso tem como objetivo investigar a influência dos parâmetros dimensionais dos montantes no comportamento térmico de uma edificação em LSF. O modelo é constituído por um único ambiente para evitar a interferência de outros parâmetros na análise dos resultados. A zona térmica possui duas janelas orientadas para o norte e dimensões iguais a 7,2 x 6,0 m e pé-direito de 3,0 m (Figura 5.20).

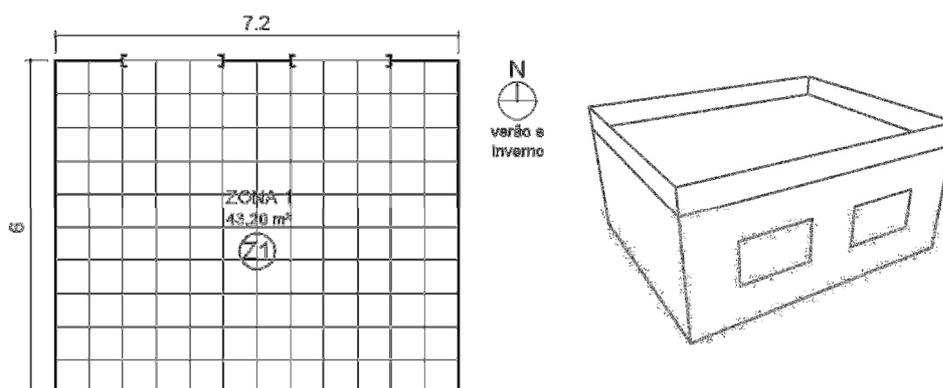


Figura 5.20 – Geometria da Tipologia 6

Não foram consideradas divisões internas. A composição dos painéis externos é a mesma do Caso 5, ou seja: placa cimentícia (10 mm); montantes em aço; lã de vidro (90 mm) e gesso acartonado (12,5 mm). Utilizou-se como fechamento horizontal a laje úmida do sistema LSF (Figura 5.21), que é formada por uma camada de concreto maciço (40 mm), painel de lã de vidro compacta - 15 mm, camada de ar ($R = 0,21$ ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)), lã de vidro (25 mm) e forro de gesso acartonado (15 mm).

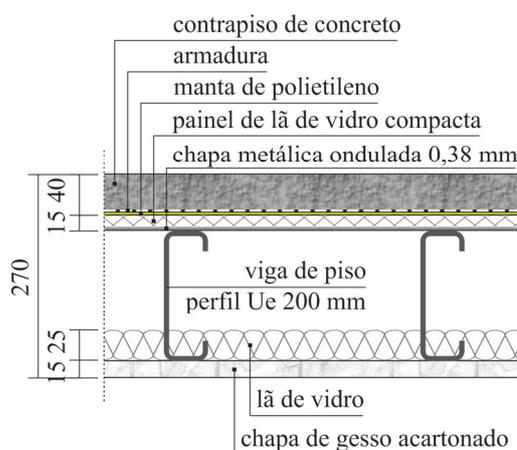


Figura 5.21 – Esquema da laje úmida do sistema LSF

Considerou-se os mesmos parâmetros do sistema de expansão direta, do tipo *Split-system*, do Caso 5. Não foi considerada a ocupação de pessoas, sendo estipulada uma carga interna fixa igual a 400 W durante as 24h do dia.

A análise foi realizada considerando: variações na espessura da chapa dos perfis em aço ($t = 0,8$ e $0,95$ mm), larguras das mesas ($b_f = 35$ e 40 mm), nas dimensões das almas dos perfis ($b_w = 90$ e 140 mm) e na distância entre montantes, $s = 400$ e 600 mm (Figura 5.22). Em todos os casos simulados considerou-se a aplicação do método PTCa para representar a estrutura metálica na simulação numérica.



Figura 5.22 – Parâmetros analisados

Na Tabela 5.21, apresenta-se o consumo anual em kWh para cada condição simulada.

Tabela 5.21 – Consumo anual – Caso 6

Parâmetro (mm)	Consumo anual AC (kWh)	Diferença (%)	
t	0,80	2409	-1,16
	0,95*	2437	---
b _f	35	2417	-0,82
	40*	2437	---
b _w	140	2286	-6,60
	90*	2437	---
s	600	2330	-4,59
	400*	2437	---

Valores utilizados como referência nas simulações numéricas

Conforme o esperado, aumentando-se o volume de aço nos painéis externos por meio do incremento na espessura da chapa e largura da mesa dos perfis em aço, aumenta-se os ganhos de calor através do envelope e conseqüente consumo final de energia maior. Vale ressaltar que este comportamento pode ser benéfico ao comportamento térmico da

edificação em determinadas condições climáticas, quando se deseja fechamentos externos leves com inércia térmica reduzida.

O aumento na dimensão da alma do montante acrescenta uma camada de ar estagnada que contribui no isolamento térmico do painel amenizando os efeitos provocados pelas pontes térmicas (Figura 5.23). A mudança de 90 para 140 mm na alma dos perfis implica em uma redução de 6,60 % no consumo de energia. No entanto, no Brasil não é comum o uso de painéis verticais com montantes de 140 mm de alma em edificações residenciais, sendo recomendada a aplicação de outra forma de ruptura térmica.

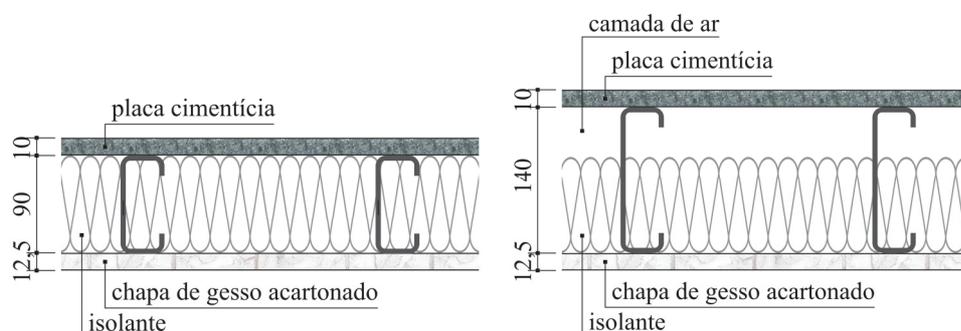


Figura 5.23 – Painel externo com 90 e 140 mm de alma dos perfis

Observa-se que, para as condições deste caso, a mudança na modulação implica em uma variação de 4,59% no consumo de energia final para resfriamento (kWh). A escolha entre a modulação de 400 ou 600 mm no projeto se deve principalmente às cargas que solicitam a estrutura. Mas, deve-se considerar, além das cargas e do consumo de aço, a variação no desempenho térmico da edificação, que pode implicar no desconforto dos usuários ou no aumento do consumo de energia.

5.7 Considerações acerca do Capítulo V

Neste capítulo foram apresentados os estudos de caso com a aplicação do método desenvolvido neste trabalho. Os efeitos das pontes térmicas nos painéis em LSF se mostraram mais sensíveis quando a edificação é condicionada artificialmente. A aplicação de uma camada externa de EPS rígido (25 mm) mostrou-se eficiente nestes casos, anulando quase por completo a transmissão excessiva de calor pelos perfis.

No Brasil, os painéis pré-moldados de concreto são os fechamentos externos pré-fabricados e industrializados mais comuns, mas apresentam desvantagens como alto custo e peso próprio. O fechamento em LSF, além de permitir uma maior organização e limpeza do canteiro de obras, diminui o prazo de execução da edificação. Assim, outros critérios também devem ser considerados na escolha de um sistema de fechamento vertical externo.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Análise dos resultados

Nas edificações residenciais naturalmente ventiladas, considerando uma taxa de renovação de ar constante para simular a ventilação dos ambientes, não houve diferenças significativas entre os resultados da simulação considerando ou não os efeitos das pontes térmicas. Nas simulações numéricas horárias, a utilização do módulo *AirflowNetwork* no método proposto implicou em um pequeno acréscimo na diferença entre os resultados, devido ao fato de neste módulo se considerar uma rotina para a abertura e fechamento das portas e janelas. Quando não for necessário utilizar todas as recomendações da norma NBR 15575 (ABNT, 2008), recomenda-se simular a ventilação dos ambientes pelo *AirflowNetwork*, por gerar resultados mais precisos.

A comparação entre o desempenho térmico da edificação utilizando o sistema em alvenaria maciça e o sistema LSF é utilizada na maioria das publicações nacionais para comprovar a eficiência térmica do sistema industrializado. Com o sistema LSF, pode-se reproduzir qualquer comportamento térmico de paredes em alvenaria por meio do aumento (ou troca) do isolamento térmico ou adicionando mais placas de fechamento. Como demonstrado no Caso 1, uma parede simples em LSF (com uma placa de fechamento de cada lado e isolamento térmico na cavidade) gera resultados próximos aos do sistema em alvenaria em simulações numéricas horárias. Portanto, na escolha entre esses dois sistemas, além dos aspectos de eficiência térmica, deve-se levar em conta outros fatores, como relação custo-benefício e capacidade de resistência ao fogo.

As temperaturas superficiais do solo em simulações numéricas devem ser consideradas com cuidado. Este parâmetro pode mascarar os resultados na análise do desempenho térmico. Dependendo das condições climáticas, as temperaturas do solo reduzem o pico da onda de calor, diminuindo o consumo de energia para resfriamento dos ambientes. Assim, recomenda-se que o levantamento e uso dessas temperaturas sejam realizados de forma mais criteriosa possível.

A aplicação do método em estudos de caso de edificações condicionadas artificialmente mostrou que, ao se aumentar a diferença de temperatura entre o interior e o exterior da edificação por meio do acionamento do sistema, os efeitos das pontes térmicas nos painéis foram mais significativos, conforme o esperado. Ao considerar os perfis em aço na simulação, o pico da carga térmica aumentou cerca de 10%. Mesmo quando utilizado somente como elemento de fechamento vertical nas fachadas em um edifício com estrutura convencional de concreto, o emprego do sistema LSF considerando a estrutura metálica na simulação numérica horária aumentou o consumo anual de energia em 5%. A aplicação de uma camada de ruptura térmica nos painéis externos só se mostrou eficiente quando o edifício era climatizado. Neste caso, a aplicação de uma camada de EPS de 25 mm mostrou-se bem eficiente, quase anulando os efeitos das pontes térmicas.

Observou-se no decorrer das simulações numéricas dos estudos de caso que em edificações pequenas, para que os resultados sejam precisos, recomenda-se que cada ambiente seja tratado como uma zona térmica e que não sejam feitas simplificações na geometria do envelope. Quanto menos simplificações forem feitas, mais os efeitos das pontes térmicas serão significativos. Caso seja necessário, deve-se sempre agrupar ambientes com mesma característica térmica e de ocupação.

Os painéis comumente utilizados em edificações residenciais e comerciais em Belo Horizonte /MG mostraram-se adequados ao conforto térmico em ambas as tipologias e condições de conforto ambiental. Vale lembrar que a qualidade do projeto arquitetônico exerce muita influência no desempenho térmico da edificação, sendo imprescindível a concepção do projeto aliada às condições climáticas locais. As recomendações de projeto para aumentar a eficiência energética da edificação da norma NBR 15220 (ABNT, 2005) mostraram-se eficientes nas condições climáticas de Belo Horizonte/MG.

O estudo considerou apenas a zona bioclimática 3. Os resultados não podem ser estendidos às outras zonas bioclimáticas, pois dependendo das condições ambientais do local, a influência das pontes térmicas no comportamento térmico da edificação pode ser maior ou menor.

O método tem como limitação considerar os efeitos das pontes térmicas apenas nos painéis verticais. Sabe-se que os painéis horizontais também influenciam no desempenho térmico global da edificação. O desempenho da cobertura, por exemplo, é influenciado pela composição do fechamento horizontal com perfis em aço. Em determinadas condições climáticas e estruturais será necessário considerar os efeitos das pontes térmicas nas lajes de teto e nas lajes entrepisos. Neste caso, a resistência térmica dos fechamentos poderá ser calculada por um dos métodos apresentados MCP, MPI ou MNEC. A utilização do algoritmo de solução adotado no *EnergyPlus* (CTF) também foi uma limitação, pois neste parâmetro não são consideradas as características higrotérmicas dos materiais.

6.2 Conclusões

No desenvolvimento do método foram levantados os meios contemporâneos de se representar a estrutura metálica nas simulações numéricas horárias. Optou-se pelo método PTC para representar os efeitos das pontes térmicas nas simulações. Este método é baseado no Código de Energia do Canadá que considera edificações em *wood framing* (CCBFC, 1997). Neste trabalho, o método citado foi adaptado (PTCa) considerando sua utilização em edificações em LSF e adotando o método MZM (ASHRAE/ORNL/NAHB) para calcular a resistência térmica dos painéis verticais incluindo a estrutura em aço.

O método de avaliação do desempenho térmico de edificações em LSF desenvolvido neste trabalho foi baseado nos estudos de Akutsu (1998). Adaptou-se o método defendido pela autora utilizando o método PTCa para representar a estrutura metálica em simulações numéricas horárias na etapa de caracterização dos materiais e componentes e adotando os critérios de avaliação contidos na norma NBR 15575 (ABNT, 2008) para edificações naturalmente ventiladas e análises comparativas da demanda das cargas térmicas ou consumo de energia para edificações condicionadas artificialmente. Sugeriu-se a adoção de uma camada de ruptura térmica nos painéis externos, caso o desempenho térmico da edificação avaliada não seja adequado.

Por meio da análise dos estudos de caso, constatou-se que o método desenvolvido neste trabalho deve ser aplicado em avaliações do desempenho térmico global de edificações com condicionamento artificial dos ambientes. Considerando a avaliação de edificações naturalmente ventiladas, a utilização do método apresentado seria indicada apenas para gerar resultados mais precisos, não sendo de uso obrigatório.

Como afirma Santiago (2008), a aceitação do sistema LSF se dará a partir das experiências bem sucedidas e da divulgação da tecnologia entre usuários e profissionais envolvidos. Espera-se que o desenvolvimento de um método de análise do desempenho térmico de edificações em LSF contribua para a solidificação do sistema como uma alternativa aos sistemas construtivos convencionais empregados no Brasil.

6.3 Sugestões para futuras pesquisas

- Utilizar o programa THERM (ou outro de elementos finitos) para o cálculo da resistência térmica dos painéis em LSF;
- Desenvolver uma rotina para gerar as paredes equivalentes;
- Considerar a transmissão de umidade nos efeitos das pontes térmicas;
- Considerar os outros elementos estruturais (além dos montantes) no cálculo da resistência térmica dos painéis;
- Simular considerando todas as zonas bioclimáticas (após a revisão da norma) com projetos arquitetônicos adequados aos climas das regiões de interesse.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução RE/ANVISA nº 176**, 2000.

AKUTSU, M.; SATO N. M.; PEDROSO, N. G. **Desempenho térmico de edificações habitacionais e escolares**: manual de procedimento para avaliação. São Paulo: IPT, 1987. 74p. (IPT Publicação n. 1732).

AKUTSU, M.; VITTORINO, F. Proposta de procedimento para avaliação do desempenho térmico de edificações condicionadas e não condicionadas. In: ENCONTRO NACIONAL DE NORMALIZAÇÃO LIGADA AO USO RACIONAL DE ENERGIA E AO CONFORTO AMBIENTAL EM EDIFICAÇÕES, 1. , 1991. Florianópolis. Anais ... Florianópolis: UFSC, 1991a. p.157-171.

_____. Critérios para a definição de níveis de desempenho térmico de edificações. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2., 1992, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Antac, 1993. p. 69-74.

AKUTSU, M.; VITTORINO, F.; YOSHIMOTO, M. Método expedito para avaliação do desempenho térmica de habitações. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 3, 1995, Gramado. **Anais...**Gramado: ANTAC, 1995. p. 299 – 304.

AKUTSU, M.; VITTORINO, F.; PEDROSO, N. G.; CARBALLEIRA, L. **Critérios mínimos de desempenho de habitações térreas unifamiliares**: Anexo 5: conforto térmico Relatório técnico nº 33.800. São Paulo: IPT, 1995.

AKUTSU, M. **Aplicação do Método dos Fatores de Resposta para a Determinação da Resposta Térmica de Edificações**. 1983. 105 f. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1983.

_____. **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 IRON AND STEEL INSTITUTE (AISI); STEEL FRAMING ALLIANCE (SFA). **Development of Cost-Effective, Energy Efficient Steel Framing: Thermal Performance of Slit-Web Steel Wall Studs**. Washington: American Iron and Steel Institute / Steel Framing Alliance, 2006. (Research Report RP02-9).

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.

_____. **ASHRAE Handbook: Fundamentals**. Atlanta, ASHRAE, 2005.

_____. **ASHRAE Standard 90.2-2004 – Energy Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings**. Atlanta, ASHRAE, 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6401: Instalações de ar-condicionado: sistemas centrais e unitários**. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 6355: Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15253: Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis reticulados em edificações - Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 16401: Instalações de ar-condicionado: sistemas centrais e unitários**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro, 2010.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; WESTPHAL, F. S. Avaliação de desempenho térmico de componentes construtivos utilizando o EnergyPlus. In: ENCAC-ELACAC 2005, Maceió. **Anais...** p. 145-154.

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

BRASILIT. **BrasiPlac Plus**: Placa cimentícia impermeabilizada: catálogo. São Paulo, 2007.

_____. **Masterboard**: A escolha ideal para pisos e divisórias: catálogo. São Paulo, 2010b.

_____. **Telha Shingle Brasilit**: catálogo. São Paulo, 2010a.

BRITO, A. C.; AKUTSU, M.; TRIBESS, A. Emprego do programa computacional *Energyplus* na análise de alternativas de projeto de habitação visando o conforto térmico do usuário. In: XXXII Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia. CD-Rom, 2011.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (CAIXA). **Sistema Construtivo utilizando perfis estruturais formados a frio de aços revestidos (steel framing): requisitos e condições mínimas para financiamento pela CAIXA**. São Paulo: CAIXA, 2003.

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.

CANADIAN COMMISSION ON BUILDINGS AND FIRE CODES (CCBFC). **National Research Council Canada**, 1997, Model National Energy Code for Houses.

CANADIAN SHEET STEEL BUILDING INSTITUTE (CSSBI). **The lightweight steel frame house construction handbook**. Canada: CSSBI, 2005.

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.

CEMINTEL. Thermal Break. Catálogo. Disponível em <<http://www.cemintel.com.au/>> Acesso em: mar. 2010.

COSTA, E. C. **Ventilação**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

Cp Generator - TNO Webapplications. Programa para cálculo do coeficiente da pressão do vento. Disponível em: <<http://cpgen.bouw.tno.nl/cp/>>. Acesso em: Jun, 2011.

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.

CRAWLEY, D. B. et al. EnergyPlus: Creating a New-Generation Building Energy Simulation Program. **Energy & Buildings**, v. 33, p. 319-331, abril, 2001.

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.

FEUSTEL, H. E.; RAYNOR-HOUSEN, A. (ed.). **Fundamentals of the Multizone Air Flow Model – COMIS**. Technical Note 29. Great Britain: AIVC, 1990.

FREITAS, A. M. S.; CRASTO, R. C. M. **Steel Framing: Arquitetura**. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2006. (Série Manual de Construção em Aço).

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.

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

GU, L., Airflow Network Modeling in EnergyPlus. In: 10TH INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION CONFERENCE AND EXHIBITION, 2007, Beijing. **Anais...** China: 2007.

HERNANDEZ NETO, A.; TRIBESS, A.; VITTORINO, F. Análise comparativa de cálculos de carga térmica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 1999, Águas de Lindóia, SP. **Anais...** Campinas: ABCM/UNICAMP, 1999.

INATOMI, T. A. H. **Análise da eficiência do sistema de condicionamento de ar com distribuição pelo piso em ambientes de escritório, na cidade de São Paulo, utilizando o modelo computacional EnergyPlus**. 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO (IPT). Divisão de Edificação. **Conforto higrotérmico**: avaliação de desempenho de habitações térreas unifamiliares. São Paulo, 1981. Trabalho desenvolvido para o BNH. (apostila mimeografada).

_____. **Critérios mínimos de desempenho para habitações térreas de interesse social**. São Paulo: Ed. Mandarin Ltda, 1998. 82 p. (Relatório Técnico nº 33.800).

_____. São Paulo, IPT, 2002. (Referência Técnica Nº 017).

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE)**: Tabelas de consumo/eficiência energética. Disponível em:
< <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>>. Acesso em: ago. 2011.

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) - **ISO 7730**: Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Geneva, 1994.

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

ISOVER. **Linha construção civil**: catálogo. São Paulo, 2007.

KNAUF. **Knauf insulation**: catálogo. Disponível em [http:// www.knaufinsulation.co.uk](http://www.knaufinsulation.co.uk) //> Acesso em: mai. 2012.

KOSNY, J.; DESJARLAIS, A. O. **Impacts of Architectural Details on the Whole Wall Thermal Performance in Residential Buildings**. Oak Ridge National Laboratory, 1994.

KOSNY, J.; CHRISTIAN, J. E.; DESJARLAIS, A. O. **Improving energy performance of steel stud walls, Steel Framing Can Perform As Well As Wood**. Oak Ridge National Laboratory, Buildings Technology Centre, USA. Disponível em < http://www.ornl.gov/sci/roofs+walls/research/detailed_papers/steel_frame/index.html //> Acesso em: mar. 2010.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LABEÉE). Dados climáticos brasileiros no formato EPW. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw//>> Acesso em: mar. 2012.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY (LBNL). **EnergyPlus Input Output Reference**: The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, 2011a.

_____. **EnergyPlus Engineering Reference**: The Reference to EnergyPlus Calculations, 2011b.

_____. **THERM 5.2/WINDOW 5.2**: NFRC Simulation Manual, 2006.

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.

LOURA, R. M. **Procedimento de identificação de variáveis e análise de sua pertinência em avaliações termo-energéticas de edificações**. 2006. 212 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

LP BUILDING PRODUCTS. **Painéis para a construção civil convencional**: catálogo. Curitiba, 2009.

MAHATTANATAWE, P.; PUVANANT, C.; MONGKOLSAWAT, D. The Energy performance of the cold-formed steel-frame and wood-frame houses developed for Thailand. In: Second National IBPSA-USA Conference – SIMBUILD, 2006. **Anais...** Cambridge, 2006.

MARCONDES, M. P.; et al. Conforto e desempenho térmico nas edificações no novo centro de pesquisas da Petrobrás no Rio de Janeiro. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 7-29, jan./mar. 2010.

MATOS, M.; WESTPHAL, F. S. et al. Análise do desempenho térmico de edificações residenciais através de simulação computacional no EnergyPlus baseada nos requisitos da norma NBR 15220. In: ENTAC, 2006. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ENTAC, 2006.

MATOS, M. **Simulação computacional do desempenho térmico de residências em Florianópolis utilizando a ventilação natural**. 2007. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MELO, A. P.; LAMBERTS, R.; VERSAGE, R.; SORGATO, M. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE), 2008.

MELO, A. P.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Análise comparativa da eficiência de sistemas de condicionamento de ar através de simulação computacional. In: V CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL – MERCOFRIO, 2006, -. **Anais...** -, 2006.

MENDES, N.; et al. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, out./dez. 2005.

MEO, L.; SOUZA, K.; VELLA, J.; RICE, J. Investigation of the Thermal Performance of Steel and Wood Framed Homes Using Infrared Thermography. In: Sustainable Steel Conference, Orlando, 1998. **Anais...**, 1998.

NATIONAL ASSOCIATION OF STEEL-FRAMED HOUSING (NASH). **Thermal break and cavity construction**. NASH, 2009. (Relatório Técnico).

O'BRIEN, S. M. **Thermal Bridging in the building envelope**. Disponível em <<http://www.carlisle-syntec.com/>> Acesso em: fev. 2010.

OLIVEIRA, A. G. **Proposta de método para avaliação do desempenho térmico de residências unifamiliares em clima quente e úmido**. 2006. 201 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – PPGAU, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

PAINEL EIFS. Disponível em: <<http://www.futureeng.com/eifs.htm/>> Acesso em: 9 nov. 2010.

PAPST, A. L. **Uso de Inércia térmica no clima subtropical. Estudo de caso em Florianópolis – SC**. Florianópolis, 1999. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

- 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.
- PEREIRA, C. D.; GHISI, E. The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. **Energy and Buildings**, v.43, n. 12, 2011, 3391-3399.
- PEREIRA JUNIOR, C. J. **Edifícios de Pequeno Porte Contraventados com perfis de Chapa Fina de Aço.** 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- PLACO. **Sistemas Placostil:** Manual de especificação e instalação: catálogo. São Paulo, 2009.
- PURDY, J.; BEAUSOLEIL-MORRISON, I. The Significant Factors in Modelling Residential Buildings. In: BUILDING SIMULATION, 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: International Building Performance Simulation Association., Brazil, 2001. p. 207-214.
- 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.
- SINAT 003. **Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Steel Framing”).** MINISTÉRIO DAS CIDADES – Secretaria Nacional de Habitação – SNH. Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat - PBQP-H. Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de produtos inovadores – SINAT. Diretrizes para Avaliação Técnica de Produtos – DIRETRIZ SINAT. Brasília. 2010.
- SOUZA, Djaniro Álvaro de. **Análise numérica de colunas com seções enrijecidas e não-enrijecidas em perfis formados a frio.** 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

SOUZA, H. A. **Transporte Simultâneo de Calor e Umidade em Meios Porosos: Método das Funções de Transferência**. 1985. Dissertação (Mestrado) Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, 1985.

_____. Notas de Aula da Disciplina Análise Térmica de Edificações do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção Metálica – Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP. 2006.

SOUZA, M. F. **Estudo numérico do isolamento térmico de painéis do sistema Light Steel Framing em situação de incêndio**. 2010. 173 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – PPGCC, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

STEEL FRAMING ALLIANCE (SFA). **Thermal design and code compliance for cold-formed steel walls**. Washington: Steel Framing Alliance, 2008. (Technical data).

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e ar condicionado**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.

SWAMI, M. V.; CHANDRA, S. Correlations for Pressure Distributions on Buildings and Calculation of Natural-Ventilation Airflow. **ASHRAE Transactions**, 1988. p. 243-266.

THERMACHANNEL. Catálogo. Disponível em <<http://www.thermachannel.com//>>
Acesso em: fev. 2010.

TRIBESS, A. Notas de Aula da Disciplina Conforto Térmico do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – São Paulo: Universidade do Estado de São Paulo- USP/SP. 2006.

VELJKOVIC, M.; JOHANSSON, B. Light steel framing for residential buildings. **ScienceDirect**, 2006.

VIERO. **CAPPOTTO - Sistema de isolamento térmico pelo exterior**: catálogo. Portugal, 2012.

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.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). Programas de simulação. Disponível em <http://www1.eere.energy.gov>. Acesso em: maio, 2011

WALTON, G. N. **AIRNET – A Computer Program for Building Airflow Network Modeling**. NIST 89-4072, National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg: Maryland, 1989.

WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, J. A. B. Estimativa do consumo de energia elétrica de edificações climatizadas não residenciais utilizando dados climáticos simplificados. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS – ENCIT 2002, Caxambu, MG. **Anais...** Caxambu, ENCIT, 2002.

WESTPHAL, F. S. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais**. 2007. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

WIT, S. Influence of modeling uncertainties on the simulation of building thermal comfort performance. In: IBPSA BUILDING SIMULATION CONFERENCE 1997. **IBPSA Conference Proceedings 1997**. Prague: International Building Performance Simulation Association, 1997.

ANEXO A

A. O ISOLAMENTO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES EM LSF

A.1 Considerações iniciais

O isolamento térmico nos fechamentos de uma edificação tem por função proporcionar conforto térmico aos usuários, diminuir o consumo de energia para condicionamento ambiental e proteger a edificação contra danos ocasionados pelo isolamento incorreto ou insuficiente. O isolamento térmico é um elemento essencial no controle do fluxo de calor que entra ou sai da edificação através de sua envoltória e deve ser escolhido sempre em função das condições climáticas da região de implantação do projeto. Uma edificação bem isolada termicamente implica na redução de gastos energéticos para aquecimento ou resfriamento dos ambientes. O isolamento térmico também pode contribuir para a reabilitação dos edifícios existentes, na medida em que permite a sua adaptação a novas exigências de conforto, conservando energia.

O princípio de isolamento térmico no sistema LSF baseia-se no conceito de isolamento multicamada, que consiste em combinar placas leves de fechamento com material isolante. Em clima frios, o isolamento térmico deve ser instalado em paredes, lajes e pisos que dividem ambientes aquecidos de não-aquecidos ou que estão em contato com o solo (Figura A.1). O tipo de isolamento varia conforme o ambiente e cargas internas de calor.

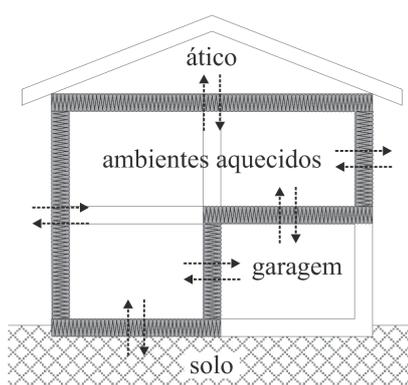


Figura A.1 – Fechamentos que requerem isolamento térmico.

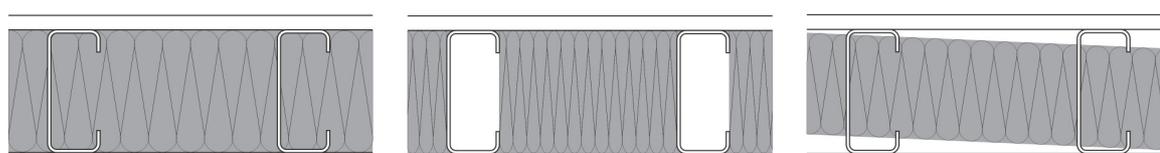
Neste anexo são apresentadas as soluções mais comuns para o isolamento térmico de edificações em LSF. Essas recomendações são de uso difundido em países de clima frio,

mas podem ser utilizadas em condições climáticas mais severas no Brasil, como na zona bioclimática 1 (NBR 15220: 2005). Os detalhes apresentados foram adaptados de catálogos e recomendações de projeto contidos em códigos de energia internacionais (KNAUF, 2012; CSSBI, 2005).

A.2 Isolamento dos painéis verticais

A.2.1 Isolamento da cavidade

O isolante da cavidade do painel vertical é instalado entre os perfis metálicos e é constituído por mantas minerais (lã de vidro ou de rocha). O material isolante deve preencher toda a cavidade de maneira uniforme (Figura A.2a), incluindo o espaço dentro do perfil de seção U_e . Deve-se evitar a compressão excessiva do isolante e formação de camadas de ar na cavidade dos perfis (Figura A.2b). Estas lacunas de ar diminuem a resistência térmica dos painéis e promovem a condensação nas superfícies internas dos montantes. Outra forma de preencher completamente o espaço do interior dos montantes é por meio da aplicação de espumas de poliuretano em *spray*. Entre as placas de fechamento e o material isolante também não podem haver lacunas de ar (Figura A.2c), que aumentam as trocas de calor no interior do painel, diminuindo a eficiência térmica do fechamento.



a) Toda a cavidade preenchida b) Ar aprisionado dentro do perfil c) Espaços de ar entre as placas

Figura A.2 – Instalação do isolante da cavidade.

Fonte: Adaptado de CSSBI, 2005.

Em locais inacessíveis, como no encontro de painéis (Figura A.3), o isolamento da cavidade deve ser incluído durante a montagem da estrutura metálica, para garantir um isolamento uniforme em todo o envelope da edificação. No encontro de dois painéis que formam um canto, os efeitos das pontes térmicas através dos perfis são maiores, portanto, de isolamento térmico prioritário.

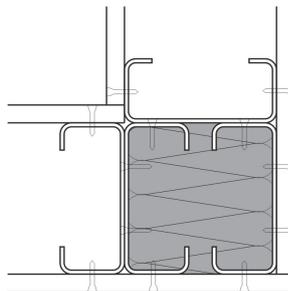


Figura A.3 – Encontro de painéis externos.

É importante impedir o acesso da água da chuva ao material isolante por meio do tratamento das juntas e/ou aplicação de uma camada impermeabilizante nos painéis externos, uma vez que o isolante, quando úmido, perde sua eficiência térmica.

A.2.2 Isolantes rígidos

Nos painéis externos, quando os efeitos das pontes térmicas através dos perfis são significativos, pode-se aplicar um revestimento isolante rígido para amenizar este problema. Esta é a prática mais comum em países de climas frios. As placas rígidas de XPS ou EPS devem ser fixadas na estrutura voltadas para o ambiente externo (KNAUF, 2012). Na Figura A.4, apresenta-se a localização da camada de EPS nas principais configurações de painéis com isolamento rígido em climas frios.

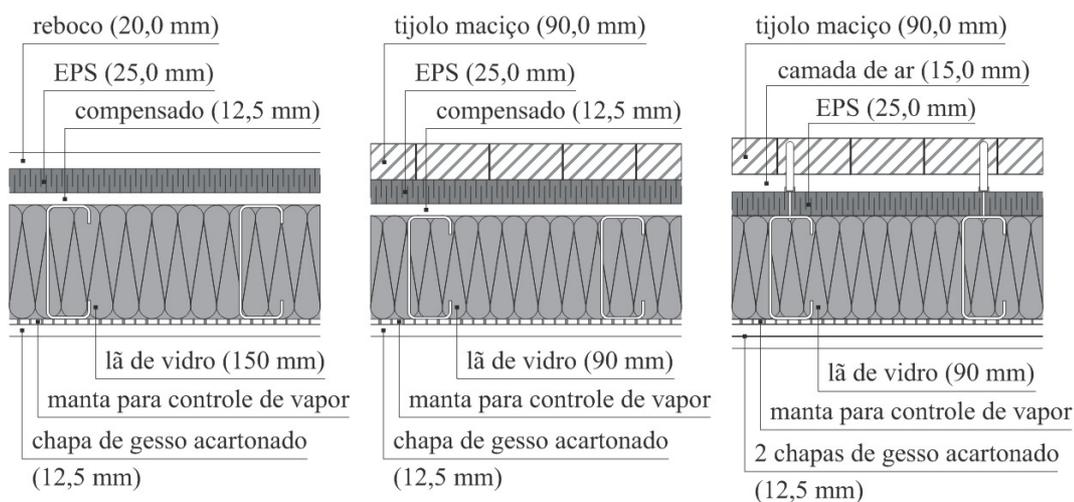


Figura A.4 – Composição de painéis externos.

Fonte: Adaptado de ENERMODAL, 2001.

O revestimento isolante deve cobrir toda a extensão dos painéis externos, principalmente, nos encontros dos painéis (Figura A.5). O isolante rígido pode ser fixado nas placas de fechamento ou diretamente nos montantes pelo lado exterior do painel por meio de parafuso rosqueado e disco de plástico (Figura A.6).

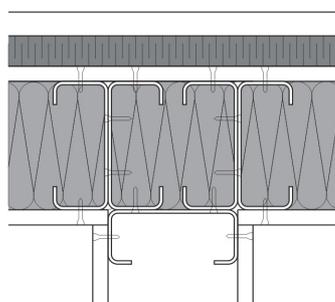


Figura A.5 – Encontro de painéis e placa rígida de EPS

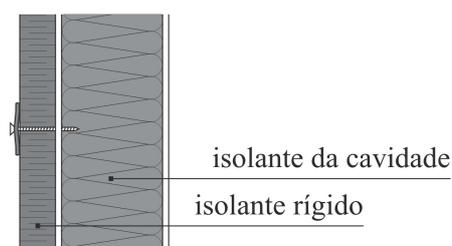


Figura A.6 – Fixação da placa rígida diretamente sobre o montante

A face externa do revestimento isolante pode ser acabada com reboco térmico. Em Portugal, uma solução comum nas edificações é o uso das placas rígidas de isolamento térmico cobertas e reforçadas com massa adesiva, armadas com rede de fibra de vidro e acabadas com revestimento final para proteger o sistema (Figura A.7). Segundo o fabricante, este sistema, também conhecido por *External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS)*, é eficiente contra os efeitos negativos das pontes térmicas através dos perfis e impede a infiltração da água da chuva.

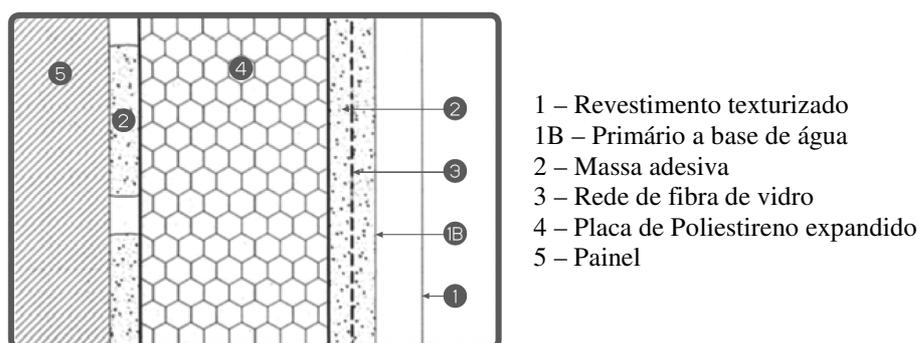


Figura A.7 – Revestimento térmico CAPPOTTO.
Fonte: VIERO, 2012.

Para minimizar o risco de condensação na interface placas/isolante, deve-se aplicar uma membrana de polietileno de alta densidade para controlar a transmissão de vapor d'água através dos fechamentos (*vapour control layer – VCL*). Em painéis com revestimento

isolante rígido, a VCL (conhecida no Brasil por *Tyvec*) é aplicada na face externa das placas de fechamento interno (Figura A.8). Nos painéis sem placas isolantes de revestimento, a VLC deve ser aplicada em toda a área externa dos painéis externos (Figura A.9).

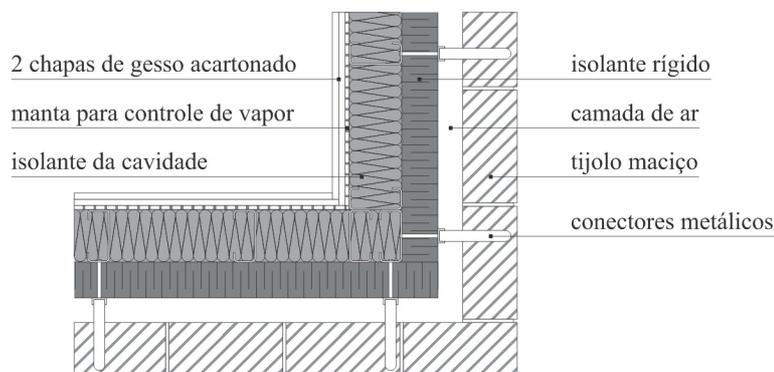


Figura A.8 – VCL localizada atrás das chapas de gesso.

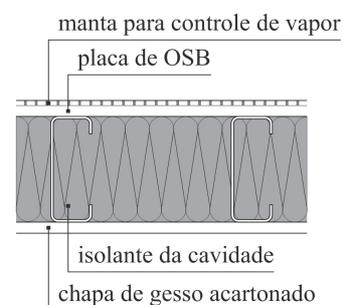


Figura A.9 – VCL localizada na face externa da placa.

A.3 Isolamento dos painéis horizontais

No isolamento térmico da cobertura é importante verificar se não há lacunas de ar entre as camadas de material isolante. Em áticos ventilados, deve-se observar se as mantas de isolamento térmico não impedem a passagem do ar, que necessita de um espaço mínimo de 25 mm. Uma camada de VCL deve ser aplicada sobre o forro de gesso acartonado para evitar a condensação nas mantas (Figura A.10).

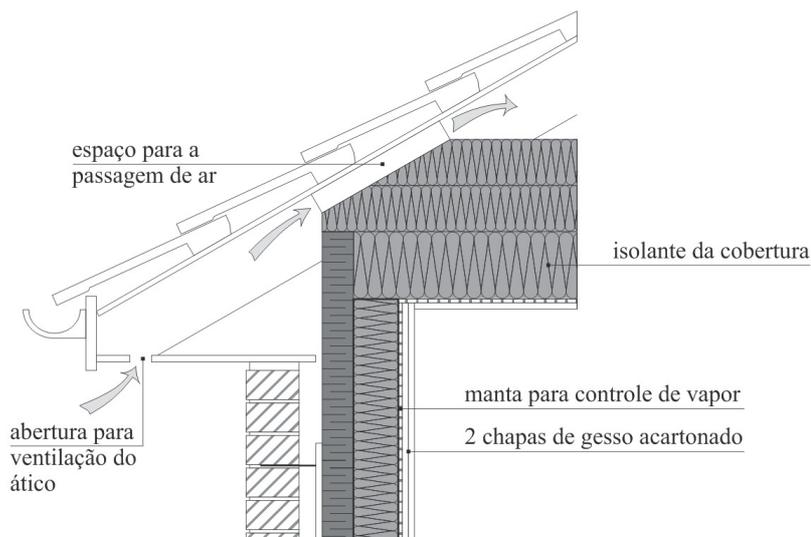


Figura A.10 – Isolamento térmico do teto.

O isolamento de piso mais comum em LSF é feito por meio da aplicação de uma camada de isolante rígido sobre a laje de concreto (Figura A.11). Mas também, pode-se aplicar o isolante sob a laje (Figura A.12). Uma membrana de impermeabilização (*Damp Proof Membrane – DPM*) deve ser aplicada entre o solo compactado e a laje de concreto maciço e, entre o acabamento do piso e o isolante, uma camada de VCL. As placas ou painéis não devem ficar em contato direto com o solo ou fundação.

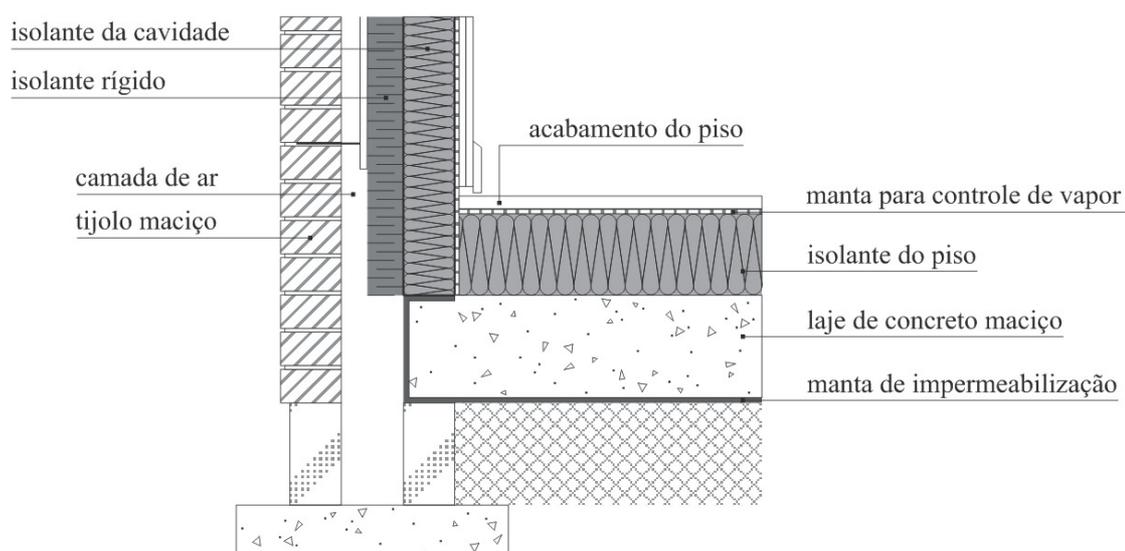


Figura A.11 – Isolamento térmico do piso – tipo 1.

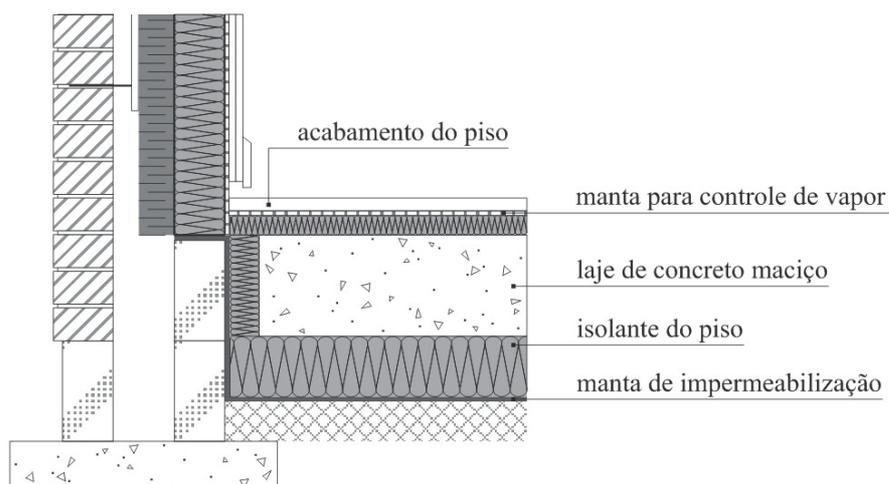


Figura A.12 – Isolamento térmico do piso – tipo 2.

A.4 Isolamento das esquadrias

Também é importante o projeto de isolamento das aberturas, como portas e janelas. O vidro simples não é indicado quando se deseja um isolamento maior do envelope. As janelas com vidro duplo são as mais adequadas e promovem também um bom isolamento acústico (Figura A.13).

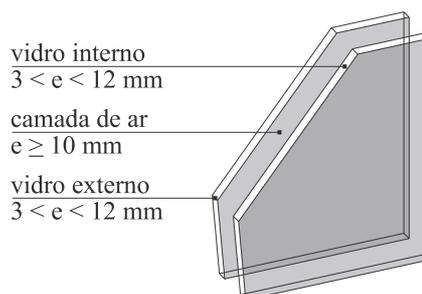


Figura A.13 – Espessura dos vidros e camada de ar.

A.5 Considerações acerca do Anexo A

O isolamento térmico é essencial para a eficiência do comportamento ambiental da edificação. Ele é mais importante em regiões frias e em pequenos edifícios exclusivamente residenciais, que possuem o comportamento térmico mais dependente da envolvente do que das cargas térmicas interiores. O projeto de isolamento térmico deve ser adequado às condições climáticas da região de implantação da obra, pois também pode gerar desconforto térmico aos usuários se for mal planejado. Além dos aspectos térmicos, o projeto de isolamento também deve contemplar a relação com o desempenho ao fogo e acústico.

ANEXO B

B ASPECTOS IMPORTANTES SOBRE A CARGA TÉRMICA^{1,2}

B.1 Considerações iniciais

A carga térmica (CT) pode ser classificada em carga térmica do ambiente e do equipamento, dependendo do local onde a carga é considerada. A carga térmica do ambiente (CT_{ambiente}) é a quantidade de calor a ser trocada pelo ar insuflado no recinto pelo equipamento de condicionamento de ar para manter a temperatura e umidade do ambiente nas condições desejadas. A carga térmica do equipamento ($CT_{\text{equipamento}}$) é a quantidade de calor processada no equipamento de ar condicionado para se obter o ar insuflado na sala em condições especificadas de temperatura e umidade.

As cargas térmicas do ambiente e do equipamento são também são divididas em: carga térmica sensível, que é a quantidade de calor que deverá ser trocada com o ar para se atingir uma temperatura pré-definida e carga térmica latente, que corresponde ao calor de evaporação (ou condensação) da água.

B.2 Carga térmica do ambiente

Os fatores que afetam a carga térmica do ambiente constituem-se pela transferência (ou absorção) de calor por meio dos fechamentos opacos, transferência de energia solar através de elementos semi-transparentes, calor no interior do recinto em função do seu perfil de ocupação/iluminação/equipamento e ganho (ou perda) de calor pela infiltração do ar externo no ambiente condicionado (Figura B.1).

¹ TRIBESS, A. Notas de Aula da Disciplina Conforto Térmico do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – São Paulo: Universidade do Estado de São Paulo- USP/SP. 2006.

² SOUZA, H. A. Notas de Aula da Disciplina Análise Térmica de Edificações do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção Metálica – Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP. 2006.

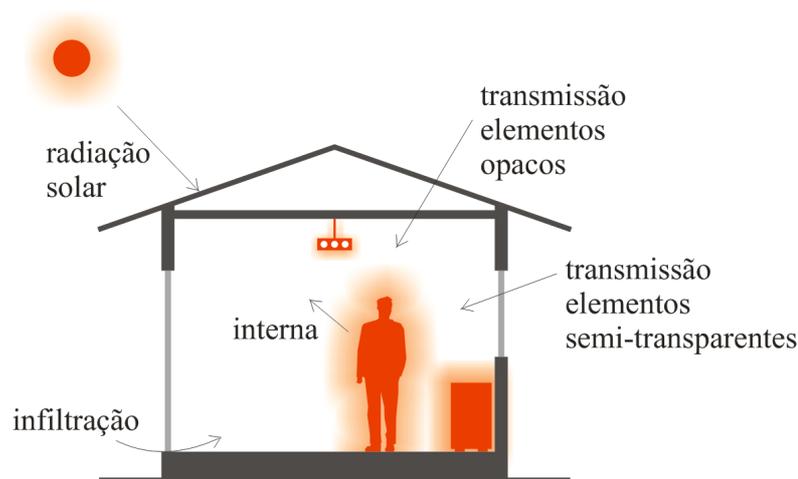


FIGURA B.1 – Fatores que afetam as cargas térmicas.

A carga térmica do ambiente pode ser subdividida em: calor que entra no ambiente através dos elementos de fechamento da envoltória (carga térmica da envoltória – $CT_{\text{envoltória}}$), e calor no interior do ambiente (carga térmica interna – CT_{interna}).

B.2.1 Carga térmica da envoltória

No cálculo da carga térmica, deve ser considerado o calor contribuído pela envoltória, que resulta da diferença de temperatura externa e interna somada à radiação solar incidente, direta e difusa. Neste caso, deve-se considerar: a orientação solar das fachadas, a transmissão de calor pelos fechamentos externos opacos (paredes e coberturas) e translúcidos (janelas e clarabóias), assim como as propriedades termofísicas dos elementos de fechamento.

Nas superfícies opacas, parte da energia solar é refletida e a restante absorvida pelo material, aumentando sua temperatura. O efeito desta absorção de energia pelo material influenciará a troca de calor por radiação e convecção entre o fechamento e os meios interno e externo (Figura B.2). Nos fechamentos opacos, o efeito de armazenamento térmico pode ser significativo. Como pode ser ilustrado na Figura B.3, no caso de dois fechamentos com massas diferentes, pode-se observar que o fluxo de calor máximo para

o fechamento de menor massa é maior, ocorrendo antes que o máximo do fechamento de maior massa (STOECKER; JONES, 1985).

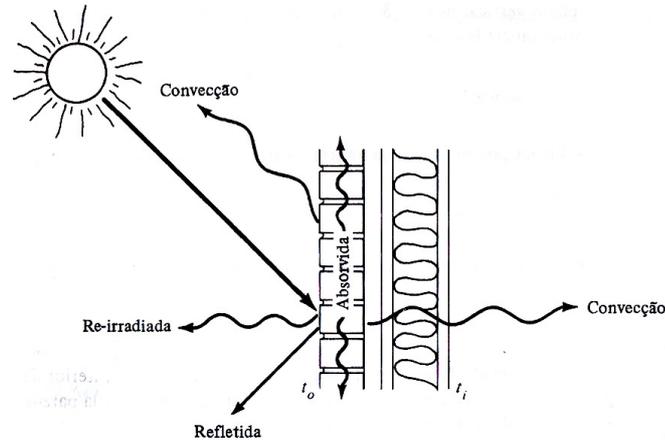


Figura B.2 – Transferência da energia solar para o recinto através de uma superfície opaca.
Fonte: STOECKER; JONES, 1985, p. 88.

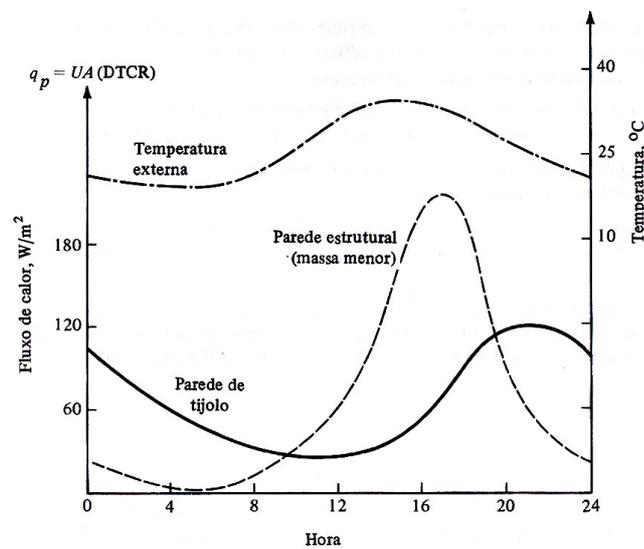


Figura B.3 – Fluxo de calor através de fechamentos de massas diferentes.
Fonte: STOECKER; JONES, 1985, p. 93.

Segundo a norma NBR 16401 (ABNT, 2008), o efeito de retardamento associado à inércia térmica também deve ser considerado nos cálculos da carga térmica. Devido à natureza transitória da condução de calor nos elementos opacos de fechamento, o calor incidente somente se tornará carga térmica quando a temperatura interna do envoltório se elevar acima da temperatura do ar e transmitir de forma convectiva para o recinto o

calor armazenado. Este atraso na liberação da carga térmica depende basicamente da inércia dos fechamentos. A inércia térmica também pode se constituir em carga remanescente, a ser dissipada no início de operação do sistema de ar condicionado no dia seguinte, devido ao fato de o calor armazenado nos fechamentos continuar a se dissipar no recinto mesmo quando cessada a carga incidente.

A inércia térmica está relacionada à capacidade de uma edificação em armazenar e liberar calor. O uso da inércia térmica diminui a oscilação e os picos de temperatura durante o dia, contribuindo no atraso da condução de calor através do sistema de fechamento. Uma edificação com baixa inércia térmica fica muito sensível à variação da temperatura do ar externo, e com uma inércia elevada, a temperatura interna estaria sujeita a uma influência muito pequena das condições climáticas externas (PAPST, 1999).

A razão entre a energia absorvida e a energia armazenada nos fechamentos da edificação depende da capacidade térmica dos materiais utilizados. Os parâmetros mais relevantes relacionados à inércia térmica são: atraso térmico e capacidade de amortecimento.

O retardo ou atraso térmico (φ) é o tempo que a propagação de calor através do fechamento leva para manifestar-se na superfície oposta. O atraso térmico depende dos parâmetros que intervêm no processo de transmissão de calor por condução em regime transitório: a condutividade térmica (λ), o calor específico (c), a massa específica (ρ), e a espessura do fechamento (e). O atraso térmico depende também da ordem em que as camadas estejam dispostas (NBR 15220:2005).

Para componentes formados por diferentes camadas paralelas e perpendiculares ao fluxo de calor, o atraso térmico é determinado pela expressão:

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2}$$

A.1

onde R_t é a resistência térmica de superfície a superfície do componente [(m².K)/W]; B_1 é dado pela equação A.2 e B_2 é dado pela equação A.3:

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R_t} \quad \text{A.2}$$

$$B_2 = 0,205 \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{R_t} \right) \left(R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10} \right) \quad \text{A.3}$$

onde B_0 é dado pela equação A.4, λ é a condutividade térmica [W/(m.K)], ρ é a massa específica (kg/m³) e c é o calor específico do material da camada externa [kJ/(m².K)]. Se $B_2 < 0$ então usar $B_2 = 0$.

$$B_0 = C_T - C_{T_{ext}} \quad \text{A.4}$$

onde C_T é a capacidade térmica total do componente [kJ/(m².K)] e $C_{T_{ext}}$ é a capacidade térmica da camada externa do componente [kJ/(m².K)].

A carga térmica de insolação através de superfícies semi-transparentes ou translúcidas depende das características físicas dessas superfícies. A energia solar que entra no recinto não é uma carga instantânea, sendo primeiramente absorvida pelas superfícies interiores. Em comparação com os fechamentos opacos, a intensidade do fluxo térmico que atravessa uma janela incorpora uma parcela que penetra por transmissão direta em função do coeficiente de transmissão, τ (Figura B.4).

Assim, o controle da radiação solar direta sobre elementos translúcidos representa um fator importante no projeto do ambiente térmico, porque diminuiu o ganho de calor devido à transparência, reduzindo a carga térmica por insolação.

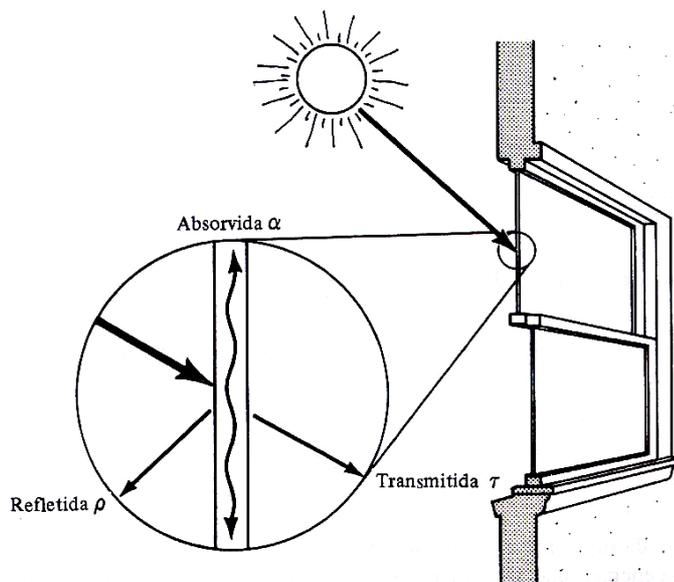


Figura B.4 – Transferência da energia solar para o recinto através de uma superfície transparente.
 Fonte: STOECKER; JONES, 1985, p. 82.

Além desses aspectos, no cálculo da carga térmica, deve-se levar em conta a transferência de calor devido à diferença de temperatura entre partes internas não condicionadas e o ambiente a ser condicionado. Essa interação é comum entre instalações sanitárias (não condicionadas) e outros ambientes (condicionados).

B.2.2 Carga térmica interna

Nas fontes internas de calor, as frações sensíveis e latentes de cada fonte devem ser avaliadas separadamente, considerando sua defasagem no tempo. As fontes internas mais comuns são as pessoas, a iluminação e os equipamentos.

A principal incerteza no cálculo da carga proveniente dos ocupantes consiste no número de pessoas. Caso seja desconhecido, o número máximo de pessoas deve ser definido a partir de tabelas. Deve-se também definir a rotina de ocupação, adotando valores de calor sensível e calor latente de acordo com o nível de atividade e valores de temperatura de bulbo seco do ambiente (NBR 16401:2008).

A energia radiante proveniente das lâmpadas não representa uma carga instantânea no sistema de ar condicionado. Primeiramente, os componentes internos do recinto que recebem essa energia elevam sua temperatura de acordo com sua massa. Quando a temperatura superficial aumenta, o calor trocado por convecção com o ar ambiente também é aumentado, constituindo uma carga térmica do sistema de ar condicionado. Além disso, na iluminação, o tipo, a potência, a forma de montagem das luminárias e a possibilidade de parte do calor das luminárias não ser dissipado no ambiente também devem ser considerados.

No caso dos equipamentos de operação interna como computadores e impressoras, além do período ou frequência de utilização, é importante considerar a dissipação efetiva de calor (carga térmica sensível para o ambiente), que pode ser obtida a partir de dados do fabricante ou a partir de valores típicos listados em normalizações (NBR 16401:2008).

B.2.3 Infiltrações

Segundo a norma NBR 16401 (ABNT, 2008), a carga térmica de infiltração ocorre em função da entrada do fluxo de ar externo para dentro da edificação através de frestas e outras aberturas não intencionais, e através do uso normal de portas localizadas na fachada. Quando não controlada, a infiltração gera uma taxa adicional de ar exterior e conseqüente carga térmica para o sistema.

A vazão de ar devida à infiltração varia com a qualidade construtiva da edificação, com a direção e velocidade do vento, com a diferença das temperaturas interna e externa e, com a pressão interna do edifício.

B.3 Carga térmica do equipamento

A carga térmica do equipamento pode ser subdividida em: carga térmica do ambiente (CT_{ambiente}), carga térmica associada à entrada de ar de renovação ($CT_{\text{renovação de ar}}$), e carga devido a ventiladores e outros componentes ($CT_{\text{ventilador}}$).

B.4 Métodos de cálculo

Existem diferentes métodos de cálculo da carga térmica. Em qualquer um deles, é necessário caracterizar o ambiente de forma criteriosa, para que a carga térmica total gerada seja representativa, implicando no emprego de um sistema que atenda de forma eficiente a climatização do ambiente.

B.4.1 Método simplificado

O Método Simplificado apresenta como características: cálculos em regime permanente, não separação das componentes radiante e convectiva dos ganhos de calor e determinação apenas do valor máximo diário da carga térmica, considerando apenas as condições mais rigorosas de exposição (temp. bulbo seco máxima).

No método simplificado, a carga térmica do equipamento é a soma da carga térmica do ambiente (CT_{ambiente}), da carga térmica associada à entrada de ar de renovação ($CT_{\text{renovação de ar}}$), e da carga devido a ventiladores e outros componentes ($CT_{\text{ventilador}}$), isto é:

$$CT_{\text{equipamento}} = CT_{\text{ambiente}} + CT_{\text{renovação de ar}} + CT_{\text{ventilador}} \quad \text{A.5}$$

onde a carga térmica do ambiente (CT_{ambiente}) é a soma das cargas térmicas devido às trocas de calor através da envoltória ($CT_{\text{envoltória}}$) e devido às cargas no interior do ambiente (CT_{interna}), isto é:

$$CT_{\text{ambiente}} = CT_{\text{envoltória}} + CT_{\text{interna}} \quad \text{A.6}$$

Já a carga térmica devido às trocas de calor através dos elementos da envoltória ($CT_{\text{envoltória}}$) é devido à condução de calor através dos elementos opacos e vidros ($CT_{\text{condução}}$), à radiação solar direta ($CT_{\text{solar direta}}$) e à infiltração de ar ($CT_{\text{infiltração}}$), isto é:

$$CT_{envoltória} = CT_{condução} + CT_{solar\ direta} + CT_{inf\ iltração}$$

A.7

O método simplificado foi bastante utilizado para dimensionar os sistemas de ar condicionado antes do surgimento das ferramentas numéricas. Sua principal desvantagem é o fato de não considerar os efeitos da inércia térmica nos fechamentos, considerando a transmissão de calor quase como um evento de natureza simultânea. Segundo Hernandez Neto, Tribess e Vittorino (1999), o método que considera o regime permanente, normalmente superdimensiona o perfil da carga térmica, se comparado com os valores obtidos no método detalhado (Figura B.5).

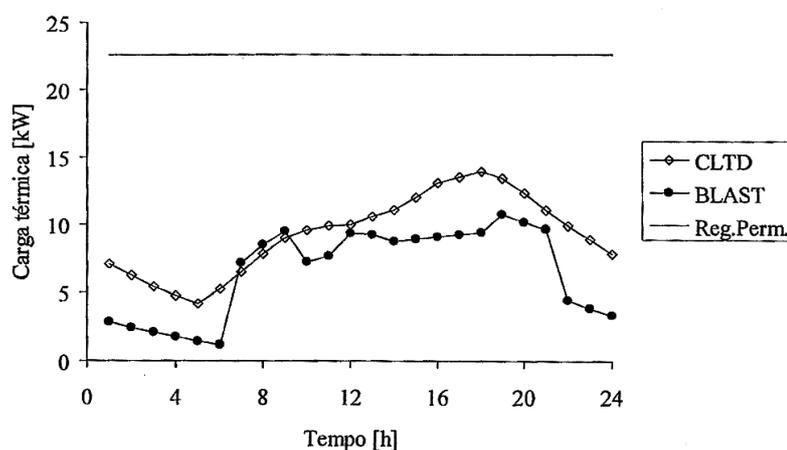


Figura B.5 – Perfil da carga térmica devido à envoltória.
Fonte: HERNANDEZ NETO; TRIBESS; VITTORINO, 1999.

Nos cálculos de carga térmica mostrados na Figura B.5, foram consideradas variações significativas ao longo do dia nas cargas internas, cuja influência da componente radiante de troca de calor foi corretamente avaliada pelo programa computacional BLAST (DOE, 2011), resultando em um perfil de carga térmica da envoltória com oscilações significativas ao longo do dia, bem diferente da carga térmica estimada em regime permanente.

B.4.2 Método CLTD/SCL/CLF

O método tabular CLTD/SCL/CLF é uma simplificação do método da função de transferência (*Transfer Function Method - TFM*), que permite o cálculo manual. Esse método trabalha com valores tabelados para situações específicas, o que o torna muito limitado. As siglas representam: CLTD – *Cooling Load Temperature Difference*, SCL – *Solar Cooling Load* e CLF – *Cooling Load Factor*.

A norma ASHRAE fez referência ao método CLTD/SCL/CLF somente em 1997, mas muitos profissionais que calculam a carga térmica de forma manual utilizam esse método. Na norma NBR 16401 (ABNT, 2008), o método CLTD/SCL/CLF é recomendado para sistemas com uma zona térmica ou para um pequeno número de zonas.

B.4.3 Método TFM

O método TFM é baseado em dois conceitos importantes: Funções de Transferência por Condução (*CTF - Conduction Transfer Functions*) e Fatores de Peso (*WF - Weighting Factors*). Os coeficientes CTF são utilizados para descrever o fluxo de calor por condução através de fechamentos opacos, combinando os efeitos da radiação e convecção nas superfícies interna e externa. Os fatores de peso relacionam a carga térmica devido a cada tipo de ganho de calor com os valores prévios daquele ganho e valores prévios da carga térmica gerada por aquele ganho. Os WFs procuram representar as variações no armazenamento térmico ao longo do tempo.

ANEXO C

**I) ROTEIRO PARA O CÁLCULO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DE
PAINÉIS EM *LIGHT STEEL FRAMING*
MÉTODO MNEC (CANADÁ)**

Na Figura C.1, apresenta-se o esquema de um painel vertical em LSF com a representação das duas seções (1 e 2) que deverão ser consideradas nos cálculos da resistência térmica pelo método MNEC. Na Tabela C.1, deve-se entrar com os dados referentes a cada camada do painel; na Tabela C.2, fazer os cálculos referentes às duas seções para determinar o limite superior da resistência térmica ($R_{máx}$); na Tabela C.3, calcular o limite inferior da resistência térmica ($R_{mín}$) e na Tabela C.4, calcular a resistência total do fechamento (R_T), consultando na Tabela C.5 os fatores de ponderação do método MNEC.

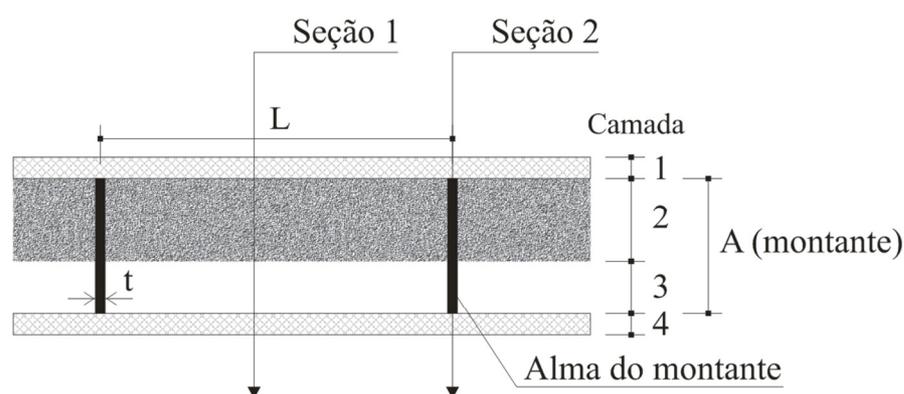


Figura C.1 –Esquema de um painel vertical em LSF – Método MNEC.

Tabela C.1 – Resistência térmica

Camada	Material	Espessura – e (m)	Condutividade térmica – λ [W/(m.K)]	Resistência térmica – R [(m ² .K)/W]
---	R_{se}	---	---	
1				
2				
3				
4				
A	Aço			
---	R_{si}	---	---	

Tabela C.2 – Limite superior da resistência térmica ($R_{m\acute{a}x}$)

Resistência através da seção 1		Resistência através da seção 2	
R_{se}		R_{se}	
R_{si}		R_{si}	
Total (R_1)		Total (R_2)	
Fração da área F_1 ($1 - t/L$)		Fração da área F_2 (t/L)	
$R_{m\acute{a}x} = 1 / [(F_1/R_1) + (F_2/R_2)]$			
$R_{m\acute{a}x} =$			($m^2.K$)/W

Tabela C.3 – Limite inferior da resistência térmica ($R_{m\acute{i}n}$)

R_{se}	
Resistência da camada composta $R_{camada\ composta} = 1 / [(F_{isol}/R_{isol}) + (F_{perfis}/R_{perfis})]$ $R_{camada\ composta} =$	
R_{si}	
Total ($R_{m\acute{i}n}$)	($m^2.K$)/W

Tabela C.4 – Resistência total do fechamento (R_T) - ambiente a ambiente

Distância entre montantes (L)	mm → Consultar Tabela B.5 (Fatores)		
K_1	K_2		
$R_T = (K_1 \times R_{m\acute{a}x}) + (K_2 \times R_{m\acute{i}n})$			($m^2.K$)/W

Tabela C.5 – Fatores de ponderação do método MNEC

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

Fonte: adaptado de IISI (2001).

**II) ROTEIRO PARA O CÁLCULO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DE PAINÉIS EM
LIGHT STEEL FRAMING**
MÉTODO DAS ZONAS MODIFICADO (ASHRAE/ORNL/NAHB)

Na Figura C.2, apresenta-se o esquema de um painel vertical em LSF com a representação das seções e zonas (*cav* e *w*) que deverão ser consideradas nos cálculos da resistência térmica pelo método MZM. Na Tabela C.6, deve-se entrar com os dados de cada seção calculando a resistividade e na Tabela C.7, calcular a resistência térmica do painel de superfície a superfície, consultando na Tabela C.8 e na Figura C.3 o fator de zona *Z_f*.

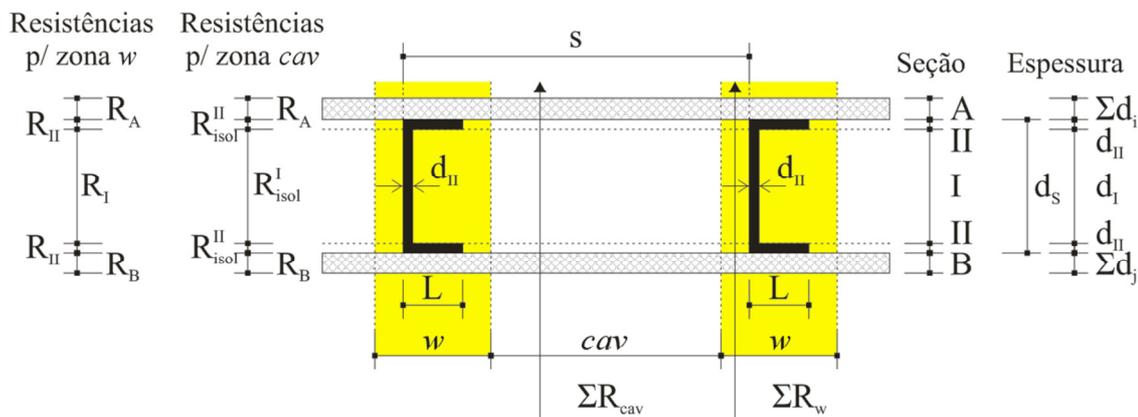


Figura C.2–Esquema de um painel vertical em LSF – Método MZM.

Tabela C.6 - Resistividade

Seção	Material	Espessura [m]		Resistividade [(m.K)/W]	
A		d_{i1}		r_{i1}	
		d_{i2}		r_{i2}	
		d_{i3}		r_{i3}	
B		d_{j1}		r_{j1}	
		d_{j2}		r_{j2}	
I e II	Metal	d_{II}		r_{met}	
I e II	Isolante	d_s		r_{isol}	

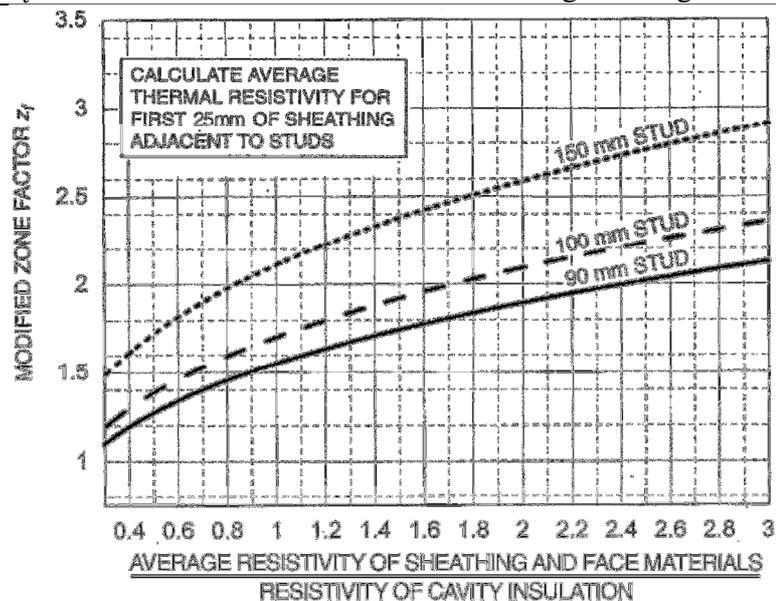
Tabela C.7 – Resistência térmica de superfície à superfície

s		$d_I = d_S - (2 \cdot d_{II})$	
resistividade da seção A			
resistividade do isolante (cavidade)			
L		Z_f (carta)	
$w = L + Z_f \cdot \sum d_i$			
$R_A = \sum (r_i \cdot d_i)$			
$R_B = \sum (r_j \cdot d_j)$			
$R_{isol}^I = r_{isol} \cdot d_I$			
$R_{isol}^{II} = r_{isol} \cdot d_{II}$			
$R_{met}^I = r_{met} \cdot d_I$			
$R_{met}^{II} = r_{met} \cdot d_{II}$			
$R_I = \frac{R_{met}^I \cdot R_{isol}^I \cdot w}{d_{II} \cdot (R_{isol}^I - R_{met}^I) + w \cdot R_{met}^I}$			
$R_{II} = \frac{R_{met}^{II} \cdot R_{isol}^{II} \cdot w}{L \cdot (R_{isol}^{II} - R_{met}^{II}) + w \cdot R_{met}^{II}}$			
$\sum R_{cav} = R_A + R_B + R_{isol}^I + 2 \cdot R_{isol}^{II}$			
$\sum R_w = R_A + R_B + R_I + 2 \cdot R_{II}$			
$R_t = \frac{\sum R_w \cdot \sum R_{cav} \cdot s}{w \cdot (\sum R_{cav} - \sum R_w) + s \cdot \sum R_w}$		$m^2 \cdot K/W$	

Tabela C.8 – Fator de zona (Z_f)

$Z_f = -0,5$	$\sum d_i \leq 16 \text{ mme}$ resistividade do fechamento externo $\leq 10,4$ m.K/W
$Z_f = +0,5$	$\sum d_i \leq 16 \text{ mme}$ resistividade do fechamento externo $> 10,4$ m.K/W

Para $\sum d_i > 16 \text{ mm}$, encontrar o valor de Z_f na figura a seguir:

Figura C.3 - Carta do Fator de zona Z_f .

Fonte: ASHRAE, 1997.

III) ROTEIRO PARA O AJUSTE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE PAINÉIS EM *LIGHT STEEL FRAMING*

MÉTODO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS COMBINADAS (ADAPTADO DE PURDY E BEAUSOLEIL-MORRISON, 2001)

Na Figura C.4, apresenta-se o esquema de um painel vertical em LSF com a representação dos materiais que deverão ser considerados na criação de um material fictício com as propriedades térmicas ajustadas. Na Tabela C.9, deve-se fazer o ajuste da massa específica por meio do cálculo das frações volumétricas dos materiais e na Tabela C.10, ajustar o calor específico considerando o valor encontrado anteriormente.

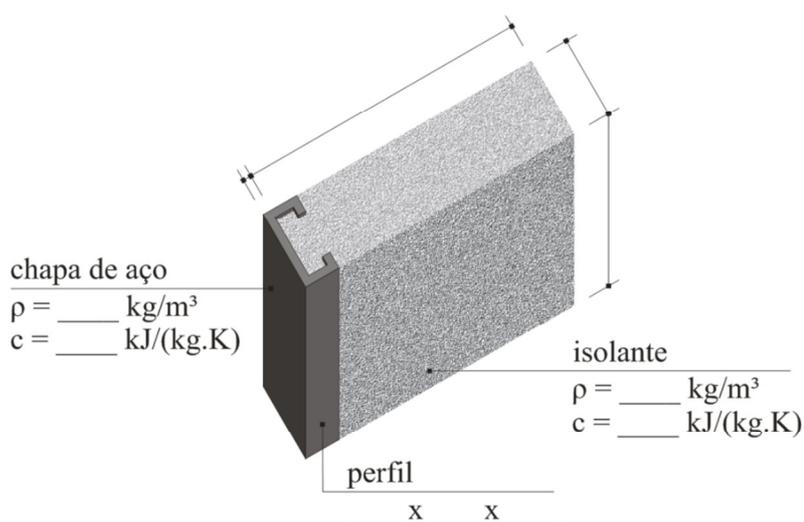


Figura C.4–Esquema de um painel vertical em LSF – Método PTCa.

Tabela C.9 – Ajuste da massa específica

$V_{aço}$		$V_{lã}$		V_s	
$C_{aço} = \frac{V_{aço}}{V_{tot}}$					
$C_{lã} = \frac{V_{lã}}{V_{tot}}$					
$\rho_s = C_{aço}\rho_{aço} + C_{lã}\rho_{lã}$		$\rho_s =$		kg/m³	

Tabela C.10 – Ajuste do calor específico

$(V_{aço}\rho_{aço}c_{aço}) + (V_{lã}\rho_{lã}c_{lã}) = V_s\rho_sc_s$	$c_s =$	kJ/(kg.K)
---	---------	------------------