

Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico: um estudo de caso de um projeto residencial em *light steel framing*

Influence of soil thermal inertia and natural air-cooling on thermal performance: a case study of a light steel framing residential project

Henor Artur de Souza
Lucas Roquete Amparo
Adriano Pinto Gomes

Resumo

N tecnologia *light steel framing*, por ser importada dos Estados Unidos, requer algumas adaptações nos projetos para adequar seu desempenho térmico no Brasil. Neste trabalho avalia-se o desempenho térmico de uma edificação unifamiliar projetada em *light steel framing*, considerando-se algumas estratégias de ventilação natural e a influência da inércia térmica do solo em Belo Horizonte, MG. Na determinação do comportamento térmico do modelo utiliza-se o programa computacional EnergyPlus, seguindo as seguintes etapas: caracterização da edificação, das condições típicas de exposição ao clima, do perfil de ocupação, das exigências humanas, configuração do sistema de fechamento e avaliação das condições de conforto térmico nos ambientes em concordância com as normas específicas. Observou-se que a estratégia de ventilação natural, quando adequadamente utilizada, em função das condições climáticas locais, proporciona uma melhora significativa no desempenho térmico da edificação. Da mesma forma, em função da topografia do terreno e da característica do projeto, observou-se que a influência da inércia térmica do solo somente se torna positiva quando associada às estratégias de ventilação natural e de sombreamento.

Palavras-chave: *Light Steel Framing*. Massa térmica. Simulação numérica. Desempenho térmico.

Abstract

The light steel framing technology requires some design adaptations in order to have an adequate thermal performance in Brazil, since it was imported from the USA. In this study, the thermal performance of a light steel frame single-family house, in Belo Horizonte, state of Minas Gerais, was evaluated considering some natural ventilation strategies and the influence of soil inertia. To determine the model's thermal behaviour, the EnergyPlus simulation program was used. The following stages were carried out: characterization of the structure, its typical exposure to the weather; occupants' profile and their demands; configuration of closing system; and the evaluation of the building's thermal comfort conditions and to what extent they meet existing standards. The conclusion was made that a suitably ventilation system could significantly improve the building's thermal performance, if the local climatic conditions are duly taken into account. Likewise, depending on the land plot topography and the design characteristics, the influence of the soil thermal inertia, when associated to suitable ventilation and shading strategies, could be helpful to improve the design thermal performance.

Keywords: *Light Steel Framing*. Thermal mass. Numerical simulation. Thermal performance.

Henor Artur de Souza
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Escola de Minas
Universidade Federal de Ouro Preto
Morro do Cruzeiro, s/n
Ouro Preto - MG - Brasil
CEP 35400-000
Tel.: (31) 35591533
E-mail: henor@em.ufop.br

Lucas Roquete Amparo
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Escola de Minas
Universidade Federal de Ouro Preto
Morro do Cruzeiro, s/n
Ouro Preto - MG - Brasil
CEP 35400-000
Tel.: (31) 93067134
E-mail: lucasroquete@gmail.com

Adriano Pinto Gomes
Área de Desenho e Projeto
Instituto Federal de Minas Gerais
Campus Ouro Preto
Rua Pandiá Calógeras, 898, Bauxita
Ouro Preto - MG - Brasil
CEP 35400-000
Tel.: (31) 3559 2277
Ouro Preto - MG - Brasil
E-mail: agomes_arq@yahoo.com.br

Recebido em 14/04/11
Aceito em 27/10/11

Introdução

No Brasil a utilização na construção civil de estruturas metálicas compostas de perfis de aço galvanizado formados a frio está em fase de rápido crescimento, devido às vantagens que esse sistema oferece. Uma das soluções construtivas que empregam esses perfis é o sistema *Light Steel Framing* (LSF). Trata-se de um sistema que reproduz os princípios da industrialização da construção civil, como a racionalização, padronização, coordenação modular e transformação do canteiro de obras em linha de montagem, além de apresentar relativa redução de custos.

Esse sistema surge como uma importante alternativa, devido à facilidade de execução e obtenção de seus elementos constituintes, e também por representar uma tecnologia limpa, minimizando o uso de recursos naturais e de entulho, e permitindo uma construção a seco, unindo diversos sistemas ou produtos industrializados compatíveis entre si. Função disso, essa nova tecnologia tem-se mostrado uma alternativa para construções habitacionais de médio e alto padrões, que demandam pouca carga e pequenos vãos.

Nas últimas décadas a conscientização pelo uso sustentável da energia vem crescendo, e como boa parte dessa energia é consumida para o aquecimento e/ou resfriamento de edificações, a indústria da construção tem sido afetada. Nesse contexto um dos fatores mais importantes é a adequação do sistema de fechamento da construção às condições do clima onde ela se inserirá, bem como a concepção de projeto adaptada à realidade local. O consumo energético de uma edificação está diretamente ligado às características da construção, uma vez que o envelope (forma e tipo de fechamento) desempenha um papel de grande influência nas condições ambientais internas, sendo fator determinante no desempenho térmico da edificação (JANSSEN; CARMELIET; HENS, 2004).

Diversos recursos de projeto podem ser utilizados para manter condições de conforto adequadas aos ocupantes. A disponibilidade de diferentes tipos de fechamento, a utilização de dispositivos de proteção solar, de estratégias arquitetônicas que facilitem os mecanismos de ventilação natural, de características topográficas do local onde a edificação está inserida, o uso de massa térmica podem ser analisados para garantir um bom desempenho térmico da construção. No entanto, o uso de fechamento com massa térmica elevada pode não ser adequado se não estiver associado

com outras estratégias, conforme será mostrado no presente trabalho.

Nesse sentido, a análise e a avaliação do desempenho térmico da edificação ainda na fase de projeto são fatores dos mais importantes, pois permitem verificar se as condições internas estão adequadas aos parâmetros de conforto térmico desejáveis ou aceitáveis. Em caso negativo, o projeto pode sofrer ajustes, para apresentar um desempenho térmico satisfatório.

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, detalhamento e execução dos sistemas complementares de fechamento. Para a melhoria do desempenho do sistema LSF no Brasil é necessário ajustá-lo à realidade e clima brasileiros, de forma a atender às expectativas de viabilidade de custos. Diante dessas questões, esta pesquisa teve o intuito de aprofundar os estudos sobre o desempenho do sistema de fechamento utilizado com o LSF para sua ampliação e consolidação no contexto brasileiro, como alternativa aos sistemas construtivos convencionais.

O objetivo deste trabalho é avaliar, via simulação numérica, o desempenho térmico de uma edificação em *Light Steel Framing*, utilizando estratégias de ventilação natural, sombreamento e inércia térmica do solo, para Belo Horizonte, MG.

Revisão bibliográfica

Inércia Térmica

O desenvolvimento sustentável exige cada vez mais projetos energeticamente eficientes e a utilização de materiais e técnicas modernas com menor impacto ambiental. Nesse sentido, a indústria da construção tem concentrado esforços no desenvolvimento de sistemas de fechamento, paredes e cobertura com melhor desempenho térmico. Em função das variações diárias da temperatura do ambiente, a capacidade térmica da envoltória pode ser parâmetro importante no controle de ganho e perda de calor da edificação. O uso da inércia térmica contribui para a diminuição dos picos diários de temperatura e favorece o atraso da condução do calor através da envoltória.

Com a utilização de sistemas de fechamento, empregando material com inércia térmica elevada, consegue-se diminuição na amplitude da temperatura do ar interior em relação à temperatura exterior, ou seja, os picos de temperatura observados externamente serão

percebidos de forma mais amena internamente e com atraso. Por outro lado, a temperatura interna de uma edificação que utiliza envoltória com baixa inércia térmica sofre grande influência das condições climáticas externas, ao contrário de uma edificação com elevada inércia térmica (FERNÁNDEZ; GÁNDARA; CHARGOY, 2005).

A utilização de elementos construtivos com elevada capacidade térmica é indicada para locais em que predomina clima quente e seco, onde a temperatura atinge valores altos durante o dia e baixos à noite. Nesses casos, a capacidade térmica do material possibilita o atraso da onda de calor, e fechamentos externos com alta inércia proporcionam menor aquecimento no ambiente (PAPST, 1999; DORNELLES; RORIZ, 2004; OROSA; CARPENTE, 2009).

Em locais onde a amplitude térmica não excede 10 °C e a temperatura externa máxima fica em torno de 31 °C, o uso da inércia térmica pode ser efetivo quando conjugado com ventilação noturna. De um modo geral, para climas quentes e úmidos, o uso de massa térmica associado a uma correta orientação, sombreamento e ventilação natural pode apresentar um desempenho térmico adequado (GIVONI, 1994; SZOKOLAY, 1996; GOULART, 2004).

No caso de edificações com ocupação predominante diurna e condições climáticas com amplitudes térmicas diárias maiores que 10 oC, é recomendado o uso de fechamentos com elevada massa térmica, pois amenizam os picos diários de temperatura, armazenando o calor durante o dia e liberando-o durante a noite (BRITO *et al.*, 2010).

Outra propriedade importante a ser considerada é a inércia térmica do solo, que será analisada, num

estudo de caso, neste trabalho. A inércia térmica do solo pode ter um papel importante no balanço térmico da edificação. O contato com o solo pode servir como uma estratégia de inércia térmica para resfriamento (Figura 1) e/ou aquecimento. As variações da temperatura do solo com o tempo diminuem com a profundidade e dependem do conteúdo de umidade do solo. O solo, com sua alta capacidade térmica, mantém sua temperatura, a certa profundidade, consideravelmente inferior à temperatura do ar ambiente durante o verão e superior à temperatura do ar ambiente durante o inverno (ZAKI; AL-MUSAED; KHALIL, 2005).

Ventilação natural

A ventilação natural pode também ser utilizada como uma importante estratégia de resfriamento passivo de ambientes. A renovação adequada do ar num ambiente pode melhorar a qualidade do ar interno e o bem-estar dos ocupantes, mantendo as concentrações de contaminantes em níveis seguros. A velocidade do fluxo de ar é o fator mais importante na avaliação da sensação térmica durante a ventilação, uma vez que pode proporcionar sensação de calor e frio mesmo quando a temperatura do ar permanece constante. A entrada natural de ar contribui com as interações térmicas entre o corpo e o ambiente. No verão a finalidade principal da ventilação natural é aumentar a dissipação do calor humano, por convecção e evaporação, para se atingir a sensação de conforto. No inverno a função principal da ventilação natural é proporcionar a ventilação higiênica e proporcionar conforto térmico, respeitando as taxas de renovação em função da temperatura externa (ALLOCCA; CHEN; GLICKSMAN, 2003).

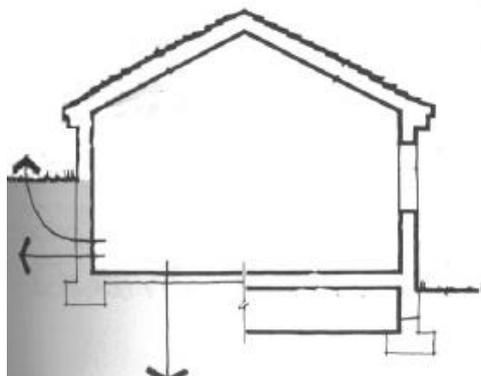


Figura 1 - Solo como uma estratégia de inércia térmica para resfriamento

Fonte: Lamberts *et al.* (2005).

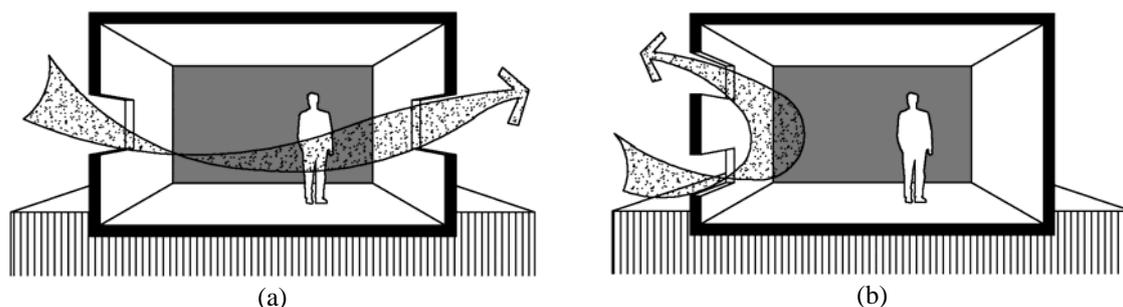


Figura 2 - Ventilação natural: (a) cruzada e (b) unilateral

Alguns parâmetros importantes para melhorar a eficiência térmica da ventilação natural são: a forma e a orientação da edificação; a previsão de espaços internos para facilitar o fluxo vertical do ar; e a utilização de elementos arquitetônicos para direcionamento do fluxo de ar para o interior com aproveitamento máximo dos ventos dominantes no local. Outros fatores variáveis são importantes para melhorar o fluxo de ar no interior dos ambientes, tais como: direção, velocidade e frequência dos ventos; e diferenças de temperatura entre o ar interior e o exterior (PAPAKONSTANTINO; KIRANOUDIS; MARKATOS, 2000).

O fluxo de ar depende dos gradientes térmicos nos diferentes ambientes da edificação e, na ausência de vento, esses gradientes térmicos são as únicas forças que proporcionam a movimentação do ar no interior da edificação. Entre as soluções comumente utilizadas, a ventilação cruzada é uma alternativa eficiente, pois é proporcionada por aberturas em paredes opostas (ou diferentes) sob a ação do vento. A ventilação cruzada pode proporcionar uma taxa de renovação de ar mais elevada do que na ventilação unilateral, que é caracterizada por aberturas numa mesma fachada (EMMERICH; DOLS; AXLEX, 2001) (Figura 2).

Exigências de conforto térmico

As respostas humanas às condições térmicas em ambientes ventilados naturalmente dependem, além das condições climáticas externas, da aclimação com o ambiente, da adaptação na vestimenta, da disponibilidade de controle de entrada de ar e de mudanças nas expectativas dos ocupantes. A norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2004) apresenta um método adaptativo para os espaços ventilados naturalmente, ou seja, aqueles onde as condições térmicas do ambiente podem ser controladas basicamente pelos ocupantes por meio da ação de abrir e fechar janelas, ou seja, regulando a velocidade do ar no interior dos ambientes. Trata-se de um método para determinar a aceitabilidade às condições térmicas de conforto nesses espaços, considerando que os usuários

possam regular o fluxo de ar no interior do ambiente por meio do ajuste da abertura das janelas.

As exigências humanas quanto ao 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. A satisfação do usuário em relação ao ambiente construído está diretamente ligada à qualidade de desempenho térmico da edificação (VAN DER LINDEN *et al.*, 2006).

O clima influencia a percepção térmica e provavelmente há um efeito psicológico, particularmente em edifícios naturalmente ventilados, nos quais há uma relação direta entre as temperaturas internas e externas (DE DEAR; BRAGER, 2001, 2002).

O sistema construtivo *Light Steel Framing*

A origem do sistema *Light Steel Framing* (LSF) remonta ao início do século XIX, com as habitações em madeira construídas pelos colonizadores em território norte-americano. Para atender ao crescimento da população foi necessário empregar métodos mais rápidos e produtivos na construção de habitações, utilizando os materiais disponíveis na região, no caso a madeira. Esse método consistia em uma estrutura composta de peças em madeira serrada de pequena seção transversal conhecida por *balloon framing*. A partir daí, as construções em madeira conhecidas por *woodframe* tornaram-se a tipologia residencial mais comum nos Estados Unidos. Aproximadamente cem anos depois, em 1933, com o grande desenvolvimento da indústria do aço, foi lançado na Feira Mundial de Chicago o protótipo de uma residência em *steel framing*, que utilizava perfis de aço em substituição à estrutura de madeira (FRECHETTE, 1999).

Nos últimos anos a construção estruturada em aço vem sendo empregada também na construção civil brasileira, com a tecnologia do sistema em LSF,

que foi introduzida no país no final da década de 1990. Esse sistema construtivo, estruturado em perfis de aço galvanizado formados a frio, vem despertando grande interesse no mercado nacional, sendo empregado em várias tipologias, em habitações tanto de pequeno quanto de grande porte, como também em edifícios de apartamentos (quatro pavimentos), edifícios comerciais, escolas, hospitais e *retrofit* de edificações existentes.

Paralelamente à utilização do sistema, vários trabalhos estão sendo desenvolvidos. Crasto (2005) apresentou o processo construtivo do sistema LSF enfocando o histórico e a evolução do sistema, as características e detalhes construtivos, os procedimentos de execução e os subsídios para a elaboração de projetos de arquitetura que utilizam esse sistema. Para a autora, a investigação do sistema construtivo, 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. A pesquisa de Crasto contribuiu para a publicação do manual de construção em aço do IBS/CBCA *Steel Framing: Arquitetura* (FREITAS; CRASTO, 2006), que apresenta aspectos de projeto e montagem para edificações com o sistema construtivo LSF.

Também Rodrigues (2006) desenvolveu um manual pelo IBS/CBCA, intitulado *Steel Framing: Engenharia*. Este manual contém os principais conceitos relativos aos perfis formados a frio e 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.

O desempenho térmico de duas habitações unifamiliares em *Light Steel Framing* foi avaliado por Gomes (2007). O autor utilizou o programa *EnergyPlus* para simular a resposta global da edificação considerando diferentes composições de painéis adequados ao clima das regiões de interesse (Curitiba, Belo Horizonte, Brasília, Goiânia, Teresina e Belém). Observou-se 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.

Santiago (2008) estudou a utilização do sistema LSF no fechamento vertical externo não estrutural de edifícios em associação a outros sistemas construtivos. O autor apresentou diversos métodos de montagem e detalhes construtivos para fechamentos de fachadas em LSF.

Campos (2010) apresentou uma avaliação da percepção e absorção do sistema construtivo *Light Steel Framing* por parte do usuário, tendo por critério seu nível de consciência em relação ao sistema e de vivência no uso e manutenção da tecnologia. Segundo a autora, o contato direto com os usuários e o espaço edificado proporcionaram uma reflexão global sobre o sistema construtivo. O autor concluiu que a maioria das reclamações e patologias encontradas pode ser diretamente relacionada à má resolução dos projetos de detalhamento.

Quanto à normalização dos perfis formados a frio, existem atualmente no Brasil as normas 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, 2005a); e NBR 14762: dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio (ABNT, 2010).

O esqueleto estrutural do sistema LSF é projetado para suportar as cargas da edificação e trabalhar em conjunto com outros subsistemas industrializados, o que permite rapidez na execução. 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. Para não alterar o conceito da estrutura, os componentes dos fechamentos da edificação no sistema LSF que envolvem externamente a estrutura devem ser elementos leves, de forma a proporcionar baixo peso à edificação como um todo (Figura 3a).

Os produtos mais utilizados no mercado nacional, como fechamento de construções em LSF, são o OSB (*Oriented Strand Board*), a placa cimentícia e o gesso acartonado em aplicações internas. O isolamento térmico dos fechamentos baseia-se no conceito de isolamento multicamada, que consiste em combinar placas leves de fechamento, deixando um espaço a ser preenchido com material isolante – lã mineral (Figura 3b).

Método

O método empregado consiste em simulações computacionais utilizando o programa *EnergyPlus* (versão 3.1), desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos com base nas ferramentas BLAST e DOE-2, que foram criadas no final dos anos 1970 para simulação de desempenho energético e dimensionamento de sistemas de climatização.

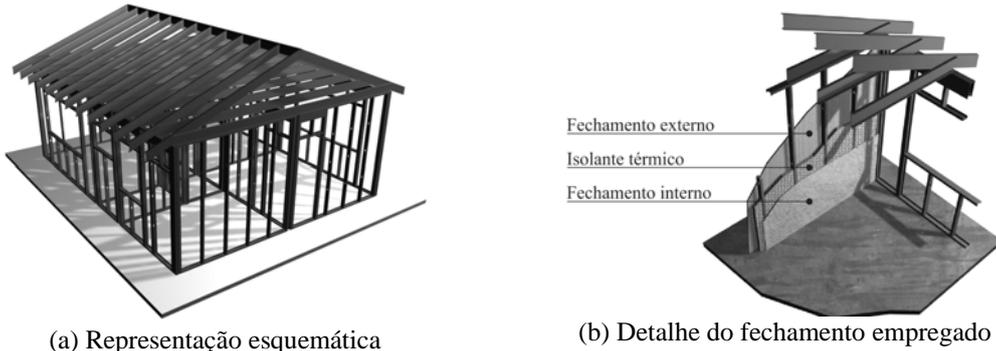


Figura 3 - Residência em *Light Steel Framing*

Fonte: Gomes e Souza (2008).

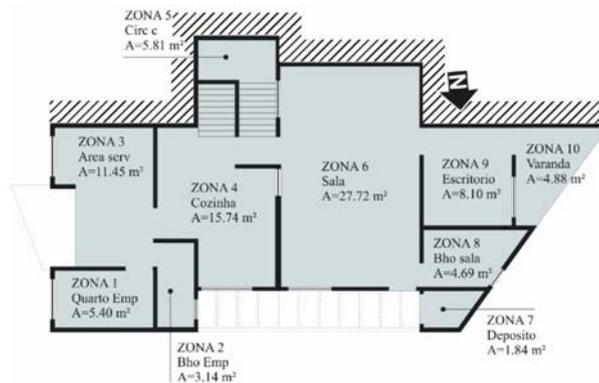


Figura 4 - Planta baixa do 1º pavimento



Figura 5 - Planta baixa do 2º pavimento

Na simulação considera-se a resposta global da edificação em relação às interações térmicas existentes entre o ambiente externo e o ambiente construído. Para a análise, os resultados das temperaturas internas dos ambientes são confrontados com a temperatura operativa interna máxima para o clima da cidade de Belo Horizonte.

Geometria do caso-base

O caso-base é o projeto de uma edificação residencial unifamiliar em LSF a ser construída em Belo Horizonte. Cada ambiente do projeto representa uma zona térmica no *EnergyPlus*, a fim de se obterem resultados mais precisos. A edificação possui 223,69 m² e pé-direito de 2,70 m. Os ambientes estão dispostos de forma que a fachada principal possua a orientação norte (Figuras 4 e 5). Como elemento de sombreamento

parcial foi utilizado brise horizontal acima das aberturas localizadas no primeiro pavimento. Os ambientes da fachada sul no primeiro pavimento estão em contato com o solo (Figura 6).

Sistema de fechamento empregado

O sistema de fechamento empregado na edificação em análise é apresentado nos Quadros 1 e 2.

Os painéis verticais da fachada sul do primeiro pavimento estão em contato com o solo. A interface entre os painéis e o solo é feita por meio de um muro de arrimo em concreto com espessura de 20 cm.

Propriedades termofísicas dos materiais

As características e as propriedades termofísicas dos materiais utilizados na composição dos painéis de fechamento são apresentadas nas Tabelas 1 e 2. A maior parte dos dados foi retirada da norma NBR 15220 (ABNT, 2005b). Dados específicos de entrada no *EnergyPlus* foram retirados do programa E2-AC, que é uma interface simplificada do *EnergyPlus* desenvolvido pelo LabEEE (UNIVERSIDADE..., 2006).

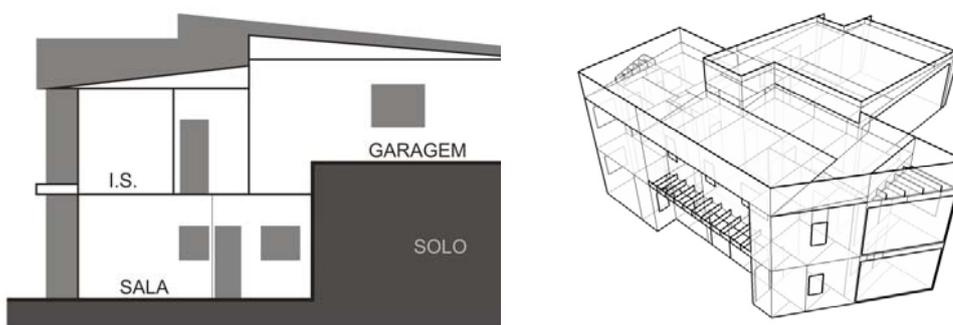


Figura 6 - Corte e perspectiva do caso-base

Quadro 1 - Composições dos fechamentos verticais

Fechamento Interno	Esquema
<p>Atraso térmico: 3,23 h</p> <p>Amortecimento: 57%</p>	
Fechamento Externo	Esquema
<p>Atraso térmico: 3,20 h</p> <p>Amortecimento: 57%</p>	

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005b).

Quadro 2 - Composições dos fechamentos horizontais e cobertura

Laje e Cobertura	Esquema
<p>Atraso térmico: 4,28 h</p> <p>Amortecimento: 67%</p>	
Piso	Esquema
<p>Atraso térmico: 2,59 h</p>	

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005b).

Tabela 1 - Elementos de construção das superfícies

Material	Rugosidade	Espessura (m)	Condutividade térmica (W/m.K)	Massa específica (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Coeficiente de absorção térmica
Placa de OSB	rugosidade média	0,012; 0,015; 0,018	0,12	550	2.300	0,9
Placa cimentícia	rugosidade média	0,01	0,95	2.200	840	0,9
Gesso acartonado	suave	0,0125; 0,015	0,35	1.000	840	0,9
Lã de vidro	rugoso	0,015; 0,025; 0,05; 0,075	0,045	100	700	0,9
Argamassa comum	rugoso	0,01	1,15	2.100	1.000	0,9
Concreto/Muro de arrimo	rugoso	0,1; 0,04	1,75	2.400	1.000	0,9
Piso cerâmico	rugosidade média	0,01	0,9	1.600	920	0,9
Telha cerâmica	rugoso	0,01	1,05	2.000	920	0,9
Chapa metálica	suave	0,0035	55	7.800	460	0,9

Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2005b), CLARKE (1985) e UFSC (2006).

Tabela 2 - Resistência das câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura

Natureza da superfície da câmara de ar	Espessura “e” da câmara de ar (cm)	Resistência térmica R_{ar} (m ² .K/W)		
		Direção do fluxo de calor		
		Horizontal	Ascendente	Descendente
Superfície de alta emissividade ($\epsilon > 0,8$)	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14	0,13	0,15
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5,0$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade ($\epsilon < 0,2$)	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29	0,23	0,29
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5,0$	0,34	0,27	0,61

Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2005b).

Parâmetros da simulação numérica

No programa *EnergyPlus*, a simulação pode ser realizada para um dia (*Design Day*) ou para um período de dias (*Run Period*). Neste trabalho optou-se por simular para o dia extremo de verão do arquivo climático do tipo TRY. O objetivo é analisar o comportamento da edificação considerando-se a condição mais crítica de temperatura no verão.

Todos os ambientes foram simulados adotando-se a condição de ventilação natural com 4 renovações de ar por hora (4 ren/h). A adoção da taxa de ventilação fixa deu-se em função de diretrizes contidas na norma NBR 15575 (ABNT, 2008) para simulação, que limita a ventilação do ambiente em, no máximo, 5 ren/h.

Consideraram-se 4 pessoas utilizando roupas com resistência térmica de 0,6 clo, taxa de liberação de calor de 131 W por pessoa, com uma ocupação de 100% no período da noite e de 50% no período diurno. Como outras fontes internas de calor incluíram-se ainda a iluminação artificial, no período das 18h às 22h, com uma potência dissipada de 10 W/m², e ganhos de outros equipamentos, somando mais 410 W, com uma média de utilização diária de 60 min. As temperaturas do solo para a cidade de Belo Horizonte foram obtidas no trabalho de Loura (2006).

Para a avaliação da interferência do solo no desempenho térmico dos ambientes, os resultados da simulação numérica são apresentados para as zonas térmicas localizadas no primeiro pavimento que estão em contato com o muro de arrimo: zonas 4, 6 e 9 (Figura 4). Entre os ambientes que constituem o primeiro pavimento, as zonas escolhidas são aquelas que apresentam maior permanência dos usuários.

Análise do conforto térmico

Para a análise das condições de conforto no interior da edificação aplica-se então o conceito de conforto adaptativo, adotando-se os intervalos confortáveis de temperatura estabelecidos na norma AHRAE 55 (ASHRAE, 2004). A temperatura operativa interna ideal ou de neutralidade térmica pode ser relacionada com a média mensal da temperatura externa pela expressão

$$T_o = 0,31\bar{T}_e + 17,8 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

\bar{T}_e é a temperatura média externa mensal;

T_o é a temperatura operativa interna ideal, quando \bar{T}_e varia na faixa de 10 °C a 35 °C.

Em torno da temperatura operativa interna ideal, a norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2004) estabelece um intervalo de temperaturas confortáveis, com limites de tolerância de 80% e/ou 90% de satisfação. Neste trabalho considera-se a temperatura do ar interno igual à temperatura radiante média e admite-se um limite de aceitabilidade de 80% em relação às condições térmicas de conforto, ou seja, um índice de 20% de insatisfeitos. Obtém-se para o caso de Belo Horizonte uma temperatura operativa interna máxima de 29,8 °C, calculada em função da temperatura média mensal para um ano climático típico.

Apresentação e análise dos resultados

Da análise dos resultados de simulação numérica verifica-se que a interferência do solo ocorre para alguns ambientes localizados no primeiro pavimento, principalmente aqueles voltados para a fachada sul. Os resultados obtidos para um dia

típico de verão, considerando-se as configurações de fechamentos propostas no Quadro 1, são apresentados na Figura 7 para a zona 6, localizada no primeiro pavimento.

Na Figura 7 apresenta-se o valor da temperatura superficial interna da parede (zona 6) em contato com o solo, considerando-se o ambiente ventilado com uma taxa constante de 4 ren/h e também o não ventilado, conforme preconizado na NBR 15575 (ABNT, 2008). Observa-se que as temperaturas superficiais são mais baixas quando ocorre o contato com o solo, em média 1 °C, alcançando uma diferença máxima de 1,5 °C no período vespertino. Uma taxa de ventilação de 4 ren/h representou, nesse caso, uma redução média na temperatura interna de 3,5 °C.

Os níveis de desconforto térmico interno são quantificados em função do número de graus-hora (°Ch) necessários para o resfriamento do ambiente. Cada grau-hora corresponde ao desconforto provocado pela temperatura do ar interno quando ela ultrapassa a temperatura operativa interna ideal. Calcula-se o nível diário (somatório dos níveis ocorridos ao longo do dia) de graus-hora necessários para o resfriamento do ambiente, que representa a diferença da temperatura resultante com a temperatura operativa interna ideal estabelecida pela equação (1). Nas Figuras 8 e 9 apresenta-se o valor da temperatura interna e o período no qual ela fica acima da temperatura operativa interna máxima, e os graus-hora resultantes necessários para o resfriamento do ambiente em cada configuração, ou seja, não ventilado ou ventilado com 4 renovações por hora.

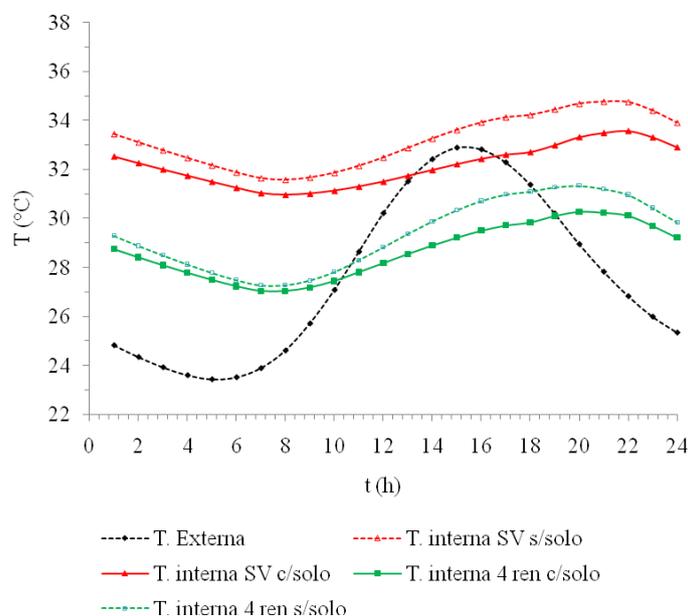


Figura 7 - Evolução temporal da temperatura da superfície localizada na face (zona 6) em contato com o terreno

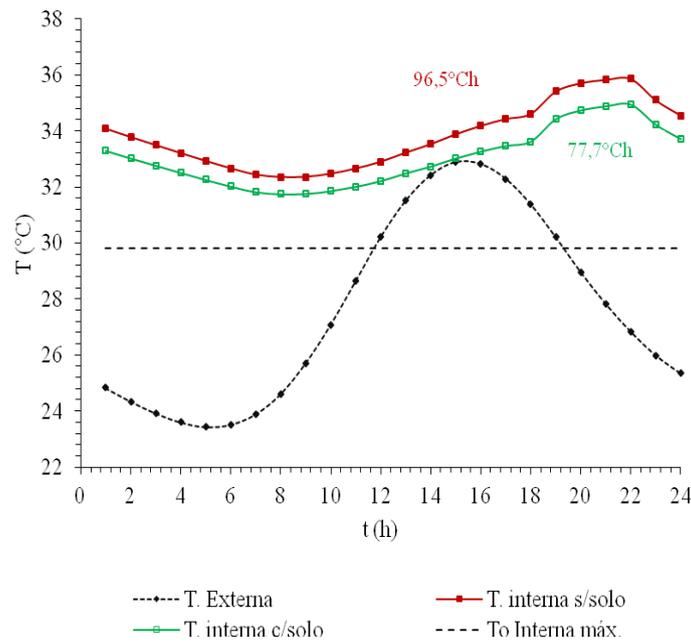


Figura 8 - Evolução temporal da temperatura de bulbo seco interna, zona 6, ambiente não ventilado

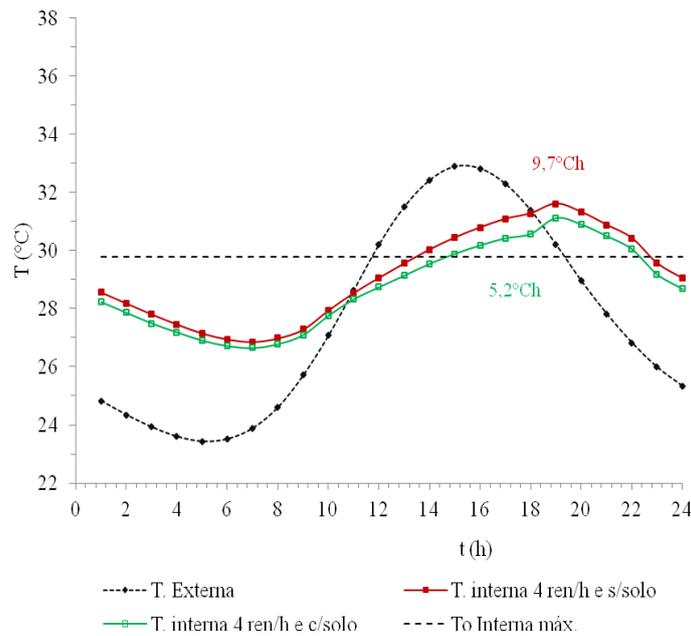


Figura 9 - Evolução temporal da temperatura de bulbo seco interna, zona 6, para 4 ren/h

Observando-se os resultados apresentados nas Figuras 8 e 9, para a zona térmica 6, têm-se as temperaturas internas mais baixas na situação combinando ventilação a uma taxa de 4 ren/h e inércia do solo, acumulando o menor somatório de

graus-hora de calor ao longo do dia. Nas Figuras 10 e 11 são apresentados os resultados para outras duas zonas térmicas (zonas 4 e 9, Figura 4) situadas no primeiro pavimento, considerando-se também uma taxa de ventilação de 4 ren/h.

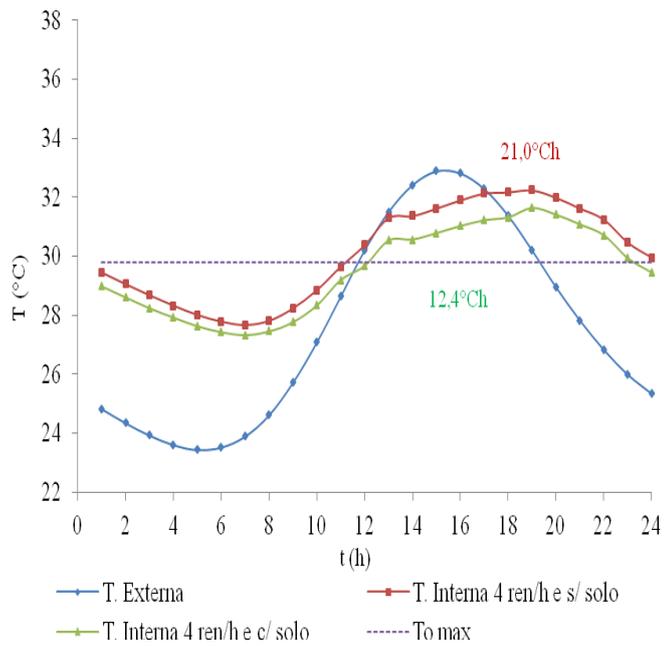


Figura 10 - Evolução temporal da temperatura de bulbo seco interna, zona 4, para 4 ren/h

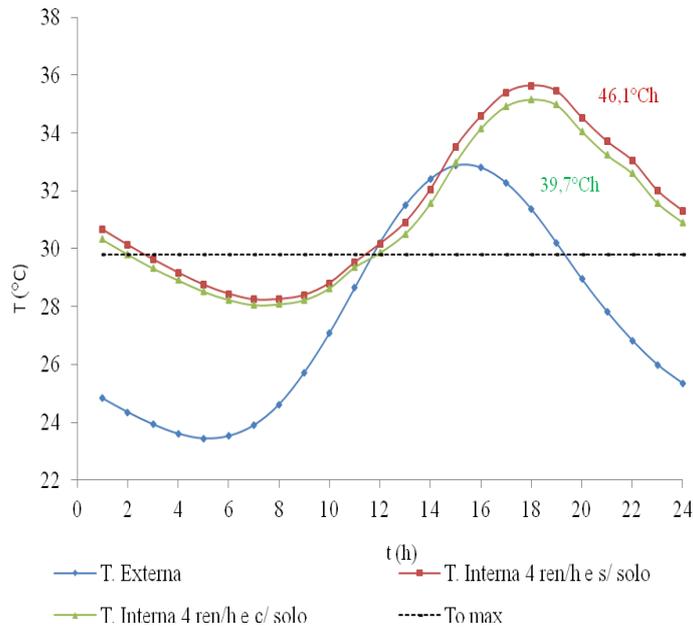


Figura 11 - Evolução temporal da temperatura de bulbo seco interna, zona 9, para 4 ren/h

Nas Figuras 12, 13 e 14 apresentam-se o valor da temperatura interna e os graus-hora resultantes necessários para o resfriamento do ambiente, considerando sombreamento nas fachadas norte e noroeste.

Observa-se pelos resultados mostrados que o sombreamento das aberturas das zonas térmicas 4,

6 e 9 proporcionou uma pequena variação na temperatura interna, inferior àquela obtida com o uso da inércia do solo. Isso ocorreu porque os brises não foram dimensionados corretamente para sombreamento dessas aberturas, sendo dispostas conforme modulação da estrutura (600 mm x 600 mm).

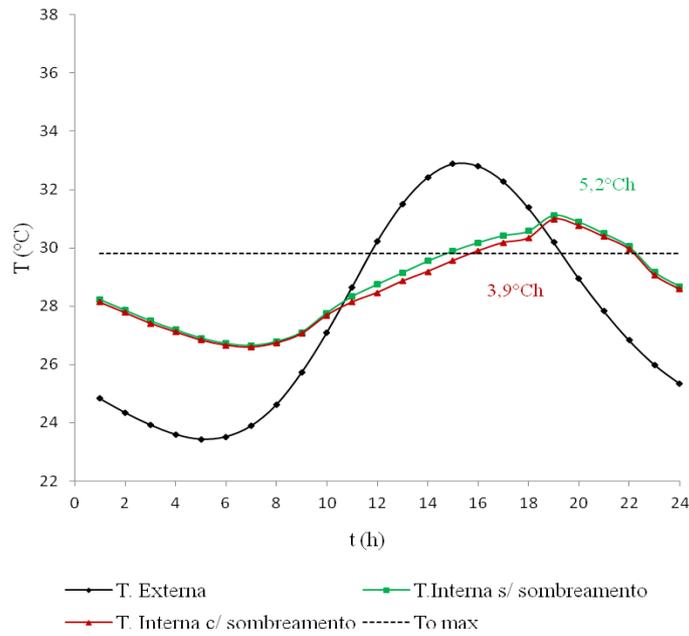


Figura 12 - Evolução temporal da temperatura de bulbo seco interna, zona 6, para 4 ren/h

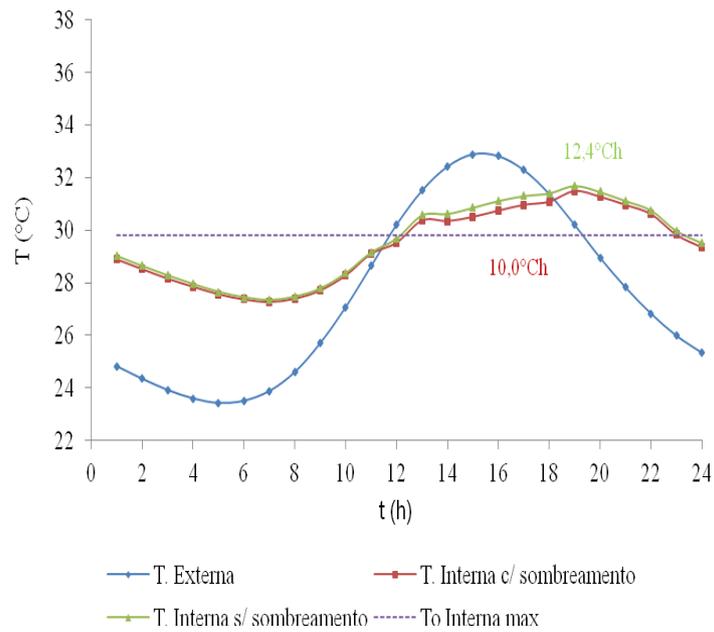


Figura 13 - Evolução temporal da temperatura de bulbo seco interna, zona 4, para 4 ren/h

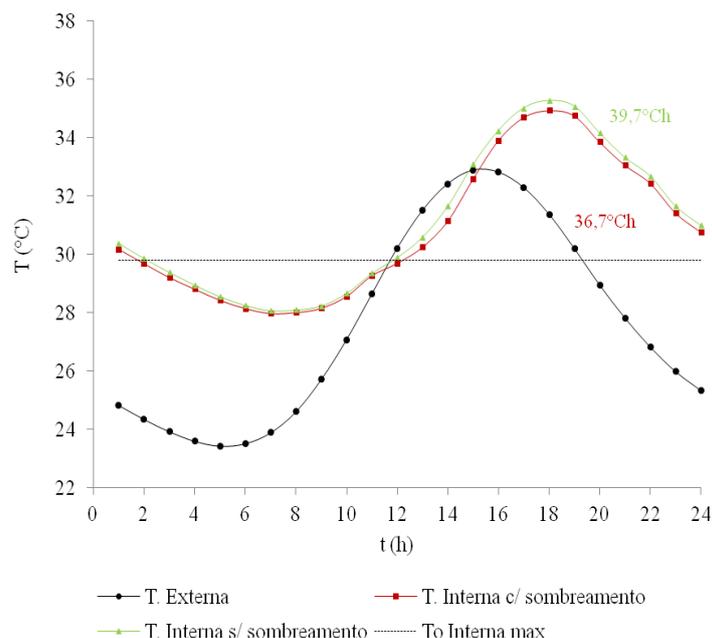


Figura 14 - Evolução temporal da temperatura de bulbo seco interna, zona 9, para 4 ren/h

Considerações finais

Neste trabalho avaliou-se o desempenho térmico do sistema de fechamento em multicamadas com elevada capacidade térmica para o caso do projeto de uma edificação unifamiliar em *Light Steel Framing* para Belo Horizonte, MG. Neste estudo de caso analisou-se a influência da inércia térmica do solo, para resfriamento, associada às estratégias de ventilação natural e de sombreamento parcial, obtendo-se resultados que mostram temperaturas internas mais baixas e, desse modo, diminuição nos níveis de desconforto provocados pela interação térmica com o meio externo.

O LSF é uma tecnologia construtiva recente praticada no Brasil. Mesmo assim, conciliando as vantagens da construção industrializada, como precisão e qualidade da obra, com os elementos da climatização natural, esse sistema de construção torna-se uma alternativa consistente aos sistemas vigentes no país.

Uma prática comum realizada por profissionais na área de projeto é a terraplanagem dos terrenos antes da execução da obra. Porém, o aproveitamento do declive do terreno na implantação da edificação possibilita a utilização de recursos passivos de condicionamento dos ambientes, como o uso da inércia térmica do solo.

No presente estudo foi utilizada uma taxa constante para a ventilação natural dos ambientes. Dependendo das condições externas do vento e utilizando um modelo complexo de ventilação, que

simula o fluxo de ar entre as zonas térmicas, pode-se obter variações maiores na temperatura interna.

Diante dos resultados obtidos neste estudo de caso, estudos mais abrangentes devem ser realizados considerando outros tipos de fechamentos, outras condições climáticas, com amplitudes diárias da temperatura do ar diferentes e proteção solar adequada, para se avaliar a eficiência de inércia do solo, ventilação e sombreamento.

Referências

- ALLOCA, C.; CHEN, Q.; GLICKSMAN, L. R. Design Analysis of Single-Sided Natural Ventilation. *Energy and Buildings*, London, v. 35, n. 8, p. 785-795, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. *ANSI/ASHRAE 55*: thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2004. 26 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355**: perfis estruturais de aço formados a frio: padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15253**: perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis reticulados em edificações: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: edifícios habitacionais de até cinco pavimentos: desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762**: dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.
- BRITO, A. C. *et al.* Sugestões Para Revisão da Norma ABNT NBR 15.575:2008, Referentes ao Desempenho Térmico. In: ENCONTRO NACIONAL DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13., Canela, 2010. **Anais...** Canela: ANTAC, 2010.
- CAMPOS, H. C. **Avaliação Pós-Ocupação de Edificações em Light Steel Framing**. 2010. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção Metálica, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- CLARKE, J. **Energy Simulation in Building Design**. Bristol, U. K: Adam Hilger Ltd, 1985. p. 387.
- CRASTO, R. C. M. **Arquitetura e Tecnologia em Sistemas Construtivos Industrializados: Light Steel Framing**. 2005. 231 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção Metálica, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
- DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. The Adaptive Model of Thermal Comfort and Energy Conservation in the Built Environment, **International Journal Biometeorology**, v. 45, n. 2, p. 100-108, 2001.
- DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. Elsevier Science. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 549-561, jul. 2002.
- DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Thermal Inertia, Comfort and Energy Consumption in Buildings: a case study in São Paulo state, Brazil. **International Journal for Housing Science and its Applications**. v. 28, n. 2, p. 153-162, 2004.
- EMMERICH, S. J.; DOLS, W. S.; AXLEY, J. W. **Natural Ventilation Review and Plan for Design and Analysis Tools**. Colorado. 2001. Disponível em: <<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build01/PDF/b01073.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2010.
- FERNÁNDEZ, J. L.; GÁNDARA, M. A. P.; CHARGOY, N. Rapid on-Site Evaluation of Thermal Comfort Through Heat Capacity in Buildings. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 2, p. 1205-1211, dez. 2005.
- FRECHETTE, L. A. **Building Smarter With Alternative Materials**. 1999. Disponível em: <<http://www.build-smarter.com>>. Acesso em: 15 out. 2004.
- FREITAS, A. M. S.; CRASTO, R. C. M. **Steel Framing**: arquitetura. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2006. (Série Manual da Construção em Aço).
- GIVONI, B. **Passive and Low Energy Cooling of Buildings**. Nova Iorque: Wiley, 1994.
- GOMES, A. P. **Avaliação do Desempenho Térmico de Edificações Unifamiliares em Light Steel Framing**. 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção Metálica, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.
- GOMES, A. P.; SOUZA, H. A. Edificações Residenciais em Light Steel Framing no Brasil. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, Santiago, Chile, 2008. **Anais...** Santiago-Chile: Universidad Central, 2008. p. 1-10.
- GOULART, S. V. G. **Thermal Inertia and Natural Ventilation**: o ptimisation of thermal storage as a cooling technique for residential buildings in Southern Brazil. 2004. 196 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Architectural Association School of Architecture Graduate School, London, 2004.
- JANSSEN, H.; CARMELIET, J.; HENS, H. The Influence of Soil Moisture Transfer on Building Heat Loss Via the Ground. **Building and Environment**, v. 39, n. 7, p. 825-836, 2004.
- LAMBERTS, R. *et al.* **Desempenho Térmico de Edificações**. Apostila LabEEE. 3. ed. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2005.
- 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) – Curso de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares – Engenharia de Energia, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- OROSA, J. A.; CARPENTE, T. Thermal Inertia Effect in Old Buildings. **European Journal of Scientific Research**, v. 27, n. 2, p. 228-233, 2009.

PAPAKONSTANTINO, K. A.; KIRANOUDIS, C. T.; MARKATOS, N. C. Numerical Simulation of Air Flow Field in Single-Sided Ventilated Buildings. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 1, p. 41-48, 2000.

PAPST, A. L. Uso de Inércia Térmica no Clima Subtropical. Estudo de caso em Florianópolis – SC. 1999. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1999.

RODRIGUES, F. C. **Steel Framing**: engenharia. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2006. (Série Manual da 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) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Construção Metálica, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

SZOKOLAY, S. V. Thermal Design of Houses for warm-humid climates. In: **BUILDING & URBAN RENEWAL. Proceedings...** Louvain-la-Neuve: PLEA, 1996. p. 337-342.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Programas**: analysis SOL-AR, Arqutrop, E2-AC, Sunpath. Disponível em <<http://www.labeee.ufsc.br/software/software>>. Acesso em: 05 abr. 2006.

VAN DER LINDEN, A. C. *et al.* Adaptive Temperature Limits: a new guideline in the Netherlands a new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 1, p. 8-17, 2006.

ZAKI, H.; AL-MUSAED, A. A.; KHALIL, A. Thermal Earth Inertia Such a Source of Energy for Bio-Sustainable House. In: **WORLD SUSTAINABLE BUILDING CONFERENCE**, 5., Tokyo, 2005. **Proceedings...** Tokyo, 2005.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio no financiamento do projeto.

Revista Ambiente Construído
Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
Fax: +55 (51) 3308-4054
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br