

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Escola de Design

Programa de Pós-Graduação em *Design* – PPGD

**POTENCIALIDADES DA TERMOGRAFIA
INFRAVERMELHA APLICADA AO *DESIGN* DO
CONFORTO TÉRMICO DE ALVENARIA ESTRUTURAL**

SOLANGE ANDERE PEDRA

**Belo Horizonte
2011**



UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE MINAS GERAIS



ESCOLA DE DESIGN

Programa de Pós-graduação em Design (PPGD)
MESTRADO EM DESIGN

**POTENCIALIDADES DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA
APLICADA AO *DESIGN* DO CONFORTO TÉRMICO DE
ALVENARIA ESTRUTURAL**

SOLANGE ANDERE PEDRA

**POTENCIALIDADES DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA
APLICADA AO *DESIGN* DO CONFORTO TÉRMICO DE
ALVENARIA ESTRUTURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em *Design* da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) como requisito parcial para a obtenção de grau de Mestre em *Design*, na área de concentração em *Design*, Inovação e Sustentabilidade.

Linha de pesquisa: *Design*, Materiais e Processos.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rosemary do Bom Conselho Sales
Universidade do Estado de Minas Gerais.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Sebastiana Luiza Bragança Lana
Universidade do Estado de Minas Gerais.

Belo Horizonte

Universidade do Estado de Minas Gerais UEMG

2011

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,
por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa,
desde que citada a fonte.

P371p Pedra, Solange Andere
Potencialidades da termografia infravermelha aplicada ao
design do conforto térmico de alvenaria estrutural [manuscrito]: /
Solange Andere Pedra. – 2011.
100f. : il.

Orientadora: Rosemary do Bom Conselho Sales
Coorientadora: Sebastiana Luiza Bragança Lana
Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Minas
Gerais, Programa de Pós-Graduação em Design.

Bibliografia: f.94-100

1. Alvenaria -- Termografia -- Teses. 2. Construção civil –
conforto humano -- Teses. 3. Desenho industrial -- Teses. I.
Sales, Rosemary do Bom Conselho. II. Lana, Sebastiana Luiza
Bragança. III. Universidade do Estado de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação. IV. Título.

CDD: 693



UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE MINAS GERAIS



ESCOLA DE DESIGN

Programa de Pós-graduação em Design (PPGD)
MESTRADO EM DESIGN

POTENCIALIDADES DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA APLICADA AO DESIGN DO CONFORTO TÉRMICO DE ALVENARIA ESTRUTURAL

Autor: SOLANGE ANDERE PEDRA

Esta dissertação foi julgada e aprovada em sua forma final para a obtenção do título de Mestre em Design no Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 11 de novembro de 2011.

Profª Sebastiana Luiza Bragança Lana, PhD.
Coordenadora do PPGD

BANCA EXAMINADORA

Profª. Rosemary Bom Conselho Sales, Drª
Orientadora
Universidade do Estado de Minas Gerais

Profª. Sebastiana Luiza Bragança Lana, Drª
Coorientadora
Universidade do Estado de Minas Gerais

Profª. Rita Aparecida da Conceição Ribeiro, Drª.
Universidade do Estado de Minas Gerais

Profª. Maria Teresa Paulino Aguilar, Drª.
Universidade Federal de Minas Gerais

Profª. Roberta Vieira Gonçalves de Souza, Drª.
Universidade Federal de Minas Gerais

“Devemos ser a mudança que queremos ver no mundo”.

Mahatma Gandhi.

Aos meus filhos Francisco, Anália e Isabela.

AGRADECIMENTOS

À Prof^ª. Dr^ª. Rosemary do Bom Conselho Sales, pela orientação, motivação e incentivo na busca do conhecimento e da qualidade, pela dedicação e capacidade de compartilhar e, de modo especial, pelo exemplo de seriedade com o trabalho, competência e amizade.

À Prof^ª. Dr^ª. Sebastiana Luiza Bragança Lana, pela coorientação deste trabalho, pela motivação, pelo carinho, apoio e pelo exemplo de dinamismo e experiência.

À Universidade do Estado de Minas Gerais e à Escola de *Design*, pela ampliação das possibilidades de crescimento acadêmico com a implantação do mestrado em *Design* e pelo apoio institucional aos alunos deste mestrado.

Ao CNPq e ao Centro de Estudos em Design e Tecnologia (CEDtec) da Escola de Design da Universidade do Estado de Minas Gerais, pela disponibilização do equipamento para os ensaios de termografia infravermelha.

Aos Professores Eduardo, José Eustáquio e Marco Aurélio, do Laboratório Integrado de Modelagem, Prototipagem e Ensaio Universais (LEMP) da Escola de *Design* da Universidade do Estado de Minas Gerais, pelo apoio, sugestões e suporte técnico.

Aos professores e colegas do mestrado, pelo convívio, aprendizado, ampliação de horizontes e gentileza.

Aos professores e colegas da Escola de *Design*, pelos conselhos, apoio e incentivo.

Aos familiares, que compreenderam a minha ausência e rezaram pelo meu sucesso, em especial ao meu marido que, para me apoiar, até assumiu tarefas domésticas.

Aos meus filhos, Anália, Isabela e Francisco, por torcerem por mim, carregarem blocos pesados e, acima de tudo, pelo companheirismo e participação nas horas e horas de reflexão sobre este trabalho.

RESUMO

PEDRA, S. A. **Potencialidades da termografia infravermelha aplicada ao *design* do conforto térmico de alvenaria estrutural.** Dissertação (Mestrado) - Escola de *Design*, Programa de Pós-Graduação em *Design* da Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

No contexto do desenvolvimento sustentável, a avaliação das condições de desempenho térmico de uma edificação é uma necessidade que engloba as respostas arquitetônicas em relação às trocas térmicas entre o ambiente construído e o ambiente externo. Atualmente, o design tem influente papel nesse cenário, uma vez que a ele são permitidas análises quanto aos materiais e processos de acabamento, buscando o melhor conforto na relação homem-ambiente. No Brasil, a alvenaria estrutural é uma tipologia construtiva bastante utilizada, principalmente para construções de pequeno porte. No entanto, considerando apenas o sistema construtivo, ela pode não oferecer conforto ambiental satisfatório do ponto de vista térmico, levando o usuário, muitas vezes, ao uso excessivo de sistemas artificiais de refrigeração e, conseqüentemente, a um consumo maior de energia elétrica. O poliestireno expandido (EPS) proveniente de embalagens do setor industrial é um produto de lenta degradação que ocupa grande volume nos aterros sanitários. Materiais alternativos desenvolvidos a partir do EPS poderiam ser uma solução interessante do ponto de vista térmico e sustentável. A termografia infravermelha como técnica de ensaio não destrutivo (END) tem evoluído consideravelmente nas últimas décadas devido a suas características de inspeção não destrutiva e não invasiva do campo de temperatura das superfícies, através da imagem gerada pela radiação térmica, emitida pela superfície de todos os tipos de materiais. Na literatura, os trabalhos relacionados ao uso da termografia no ambiente construído se limitam a utilizar a termografia para a inspeção de falhas e localização de infiltrações em estruturas prontas. O presente trabalho de pesquisa avalia as potencialidades da termografia infravermelha para o estudo do design do conforto térmico, utilizando um modelo de alvenaria estrutural de concreto/cerâmica, empregando o EPS como material isolante adicional ao sistema. Os resultados mostraram que a termografia tem potencial para monitoramento de alvenarias, podendo contribuir de forma eficiente para o estudo do design do conforto térmico, e que o conjunto bloco de concreto/cerâmica e EPS pode ser uma boa estratégia para obtenção de alvenarias estruturais mais isolantes.

Palavras-chave: Design do conforto. Termografia infravermelha. Alvenaria estrutural. Poliestireno expandido.

ABSTRACT

PEDRA, S. A. **Potentialities of infrared thermography applied to the design of the thermal comfort of structural masonry.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Design, Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

In the context of sustainable development, the assessment of the thermal performance conditions of a building is a necessity which includes the architectural responses in relation to the thermal exchanges between the built and the external environment. Nowadays, design has an influential role in this scenario, once it allows the analysis of materials and finishing processes, seeking the best comfort in the relation human-environment. In Brazil, structural masonry is a widely used constructive typology, mainly in small buildings. However, considering only the constructive system, it cannot offer satisfactory environmental comfort from a thermal perspective, often leading to an excessive use of artificial cooling systems and, consequently, to a higher consumption of electric power. The expanded polystyrene (EPS) found in packaging from industry is a product of slow degradation which occupies great volumes in landfills. Alternative materials developed from EPS could be an interesting solution from a thermal and sustainable point of view. The infrared thermography as a non-destructive testing technique (NDT) has evolved considerably in the last decades due to its characteristics of non-destructive and non-invasive inspection of surface temperature field, through an image generated by thermal radiation, emitted by the surface of every type of materials. In literature, papers related to the use of thermography in a built environment are limited to using thermography on the inspection of flaws and finding leaks in finished structures. This research evaluates the potentialities of infrared thermography to the study of the design of the thermal comfort, using a concrete/ceramic structural masonry model, and applying EPS as an insulating material added to the system. The results showed that thermography has potential for the monitoring of masonry, and may contribute efficiently to the study of the thermal comfort design, and that the concrete/ceramic block and EPS set can be a good strategy for obtaining more insulated masonry structures.

Keywords: Design for comfort. Infrared thermography. Structural masonry. Expanded polystyrene.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figuras

FIGURA 1 – Pirâmide de Maslow	22
FIGURA 2 - Trocas de calor através de paredes opacas	25
FIGURA 3 - Trocas térmicas.....	28
FIGURA 4 - Dimensões da sustentabilidade.....	30
FIGURA 5 - Resíduo de EPS	32
FIGURA 6 - Vista da fachada original e detalhe interno do Coliseu (construção entre 70 e 90 d.C.).....	33
FIGURA 7 - Construção em alvenaria estrutural (bloco de concreto) - regional leste de Belo Horizonte.....	35
FIGURA 8 - Blocos de concreto para alvenaria estrutural.....	36
FIGURA 9 - Blocos de cerâmica para alvenaria estrutural	36
FIGURA 10 - Onda eletromagnética	39
FIGURA 11 – Espectro eletromagnético.....	40
FIGURA 12 – Transferência de calor.....	40
FIGURA 13 - Modo de transferência de calor por condução.....	41
FIGURA 14 - Trocas de calor por condução.....	42
FIGURA 15 – Convecção de uma superfície para um fluido em movimento.....	43
FIGURA 16 - Variação do coeficiente de convecção hc	44
FIGURA 17 - Troca de calor por radiação entre duas superfícies.....	45
FIGURA 18 - Radiação solar em superfícies opacas	49
FIGURA 19 - Imagem térmica da alvenaria.....	50
FIGURA 20 - Câmera de infravermelho	51
FIGURA 21 - Termogramas de fachadas mostram descolamento	53
FIGURA 22 - Termograma mostra perda de calor em fachada.....	55
FIGURA 23 - Termogramas da sola dos pés submetida a diferentes tipos de piso.....	57
FIGURA 24 - Materiais utilizados na fabricação das amostras e do modelo de alvenaria.....	59
FIGURA 25 - Representação esquemática da plataforma móvel.....	59
FIGURA 26 - Seções de um componente com camadas homogêneas e não homogêneas..	61

FIGURA 27 - Representação esquemática das etapas de trabalho.....	65
FIGURA 28 - Amostras de EPS utilizando aglutinante de amido de milho e cola branca.....	66
FIGURA 29 - Amostras preenchidas com EPS e prontas para teste.....	67
FIGURA 30 - (a) Amostras de cerâmicas com e sem EPS; (b) Vista de topo amostra pronta para teste.....	67
FIGURA 31 - (c) Amostras de concreto com e sem EPS; (d) Vista de topo amostra pronta para teste.....	67
FIGURA 32 - Aquecedor elétrico.....	68
FIGURA 33 – Esquema de aquecimento das amostras.....	68
FIGURA 34 - Câmera termográfica infravermelho: <i>Flir</i> modelo P640.....	69
FIGURA 35 - Representação esquemática do modelo de alvenaria estrutural composto de blocos de concreto, de cerâmica, vazios e com preenchimento de EPS.....	70
FIGURA 36 - Sequência da construção do modelo de alvenaria.....	70
FIGURA 37- Representação esquemática da proteção de EPS da lateral.....	71
FIGURA 38 - Posicionamento da câmera para realizar as medições.....	72
FIGURA 39 - Insolação do modelo.....	72
FIGURA 40 - Modelo preparado para teste: fundo escuro.....	73
FIGURA 41 - Teste para verificar a temperatura aparente refletida.....	73
FIGURA 42 – Dimensões dos blocos de concreto.....	74
FIGURA 43 – Dimensões dos blocos de cerâmica.....	75
FIGURA 44 - Relatório dos dados da imagem termográfica.....	77
FIGURA 45 - (a) Blocos de alvenaria estrutural; (b) termogramadas amostras de concreto e cerâmica.....	78
FIGURA 46- Termograma de amostras de cerâmica antes do aquecimento: (a) vista frontal (b) vista de topo.....	78
FIGURA 47 - Termograma de amostras de cerâmica após o aquecimento: (a) vista frontal (b) vista de topo.....	79
FIGURA 48 - Termograma de amostras de concreto antes do aquecimento: (a) vista frontal (b) vista de topo.....	80
FIGURA 49 - Termograma de amostras de cerâmica após o aquecimento: (a) vista frontal (b) vista de topo.....	80
FIGURA 50 - Termograma da superfície que receberá insolação (10 horas).....	81
FIGURA 51 - Termograma da superfície oposta à que receberá insolação (10 horas)..	83

FIGURA 52 - Termograma da superfície após insolação de quatro horas.....	84
FIGURA 53 - Termograma da superfície oposta após insolação de quatro horas.....	85
FIGURA 54- Termograma da superfície após receber insolação de seis horas.....	87
FIGURA 55- Termograma da superfície oposta após receber insolação de seis horas..	88
FIGURA 56- Linhas de perfil vertical.....	89

Gráficos

GRÁFICO 1 - Linhas de perfil da superfície que receberá insolação (10 horas).....	82
GRÁFICO 2 - Linhas de perfil da superfície oposta à que receberá insolação (10 horas).....	83
GRÁFICO 3 - Linhas de perfil da superfície após quatro horas de insolação.....	85
GRÁFICO 4 - Linhas de perfil da superfície oposta após quatro horas de insolação. ...	86
GRÁFICO 5 - Linhas de perfil da superfície após seis horas de insolação.....	87
GRÁFICO 6 - Linhas de perfil da superfície oposta após seis horas de insolação.	89
GRÁFICO 7 - Temperaturas da superfície oposta após 4 e 6 horas de insolação.....	91
GRÁFICO 8 - Variação de temperatura da superfície oposta após 6 horas de insolação.....	91

Tabelas

TABELA 1 - Condutividade térmica (λ) de materiais de construção.....	43
TABELA 2 - Resistência térmica superficial interna e externa.....	61
TABELA 3 - Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiações a temperatura comum (ondas longas).....	62
TABELA 4 - Resistência térmica de camadas de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura.....	62
TABELA 5 - Propriedades dos materiais determinadas em laboratórios e dadas pela NBR15220-2 (2005).....	74
TABELA 6 - Características dos blocos.....	75
TABELA 7 - Resistência térmica, Capacidade térmica, Transmitância térmica, Atraso térmico e Fator de ganho solar	76
TABELA 8 - Variação da temperatura das seções verticais.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ΔT	Variação de temperatura
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
c	Calor específico do material
C_T	Capacidade térmica total do componente
C_{Text}	Capacidade térmica externa do componente
CCD	<i>Charged Coupled Device</i>
CEDtec	Centro de Estudos em <i>Design</i> e Tecnologia
cm	Centímetro
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
e	Espessura da parede
EPS	Polietireno expandido
END	Ensaio não destrutivo
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto
FS_o	Fator solar
h_c	Coefficiente de trocas térmicas por convecção
hr	Coefficiente de trocas térmicas por radiação
ITC	<i>Infrared Training Center</i>
LEMP	Laboratório Integrado de Modelagem, Prototipagem e Ensaio Universais
LFC	<i>Buildings Physics Laboratory</i>
m	Metro
ms	Milissegundo
NBR	Norma Brasileira de Referência
ONU	Organização das Nações Unidas
PS	Poliestireno
PVC	Cloreto de polivinila
q	Intensidade do fluxo térmico
q_{cd}	Intensidade do fluxo térmico por condução
q_{conv}	Intensidade do fluxo térmico por convecção
q_{rad}	Intensidade do fluxo térmico por radiação
r	Resistência térmica específica

R_t	Resistência térmica
R_{text}	Resistência térmica da face externa
t	Temperatura do ar
t_i	Tempo de insolação
T	Temperatura
T_∞	Temperatura do fluido
T_s	Temperatura da superfície
UEMG	Universidade do Estado de Minas Gerais
W	<i>Watt</i> (unidade de potência - equivalente a um joule por segundo)
α	Fração da radiação absorvida – absorbância
ε	Coefficiente de emissividade
λ	Coefficiente de condutividade térmica
ρ	Fração da radiação refletida – refletância
τ	Fração da radiação transmitida – transmitância
θ	Temperatura da superfície do sólido
θ_e	Temperatura da superfície externa
θ_i	Temperatura da superfície interna
θ_r	Temperatura radiante relativa às demais superfícies

SUMÁRIO¹

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Considerações iniciais.....	17
1.2	Objetivos.....	20
1.3	Justificativa	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Design do conforto e conforto ambiental.....	21
2.2	Conforto térmico	23
2.2.1	Considerações sobre a resposta humana à condição térmica.....	27
2.3	Desenvolvimento sustentável.....	28
2.4	Poliestireno expandido (EPS)	31
2.5	Alvenaria estrutural.....	32
2.5.1	Definição da alvenaria estrutural	34
2.5.2	Blocos de alvenaria estrutural	35
2.6	Ensaio não destrutivo.....	37
2.7	Conceitos básicos.....	38
2.7.1	Radiação infravermelha	38
2.7.2	Fundamentos da transferência de calor	40
2.7.2.1	Condução.....	41
2.7.2.2	Convecção.....	43
2.7.2.3	Radiação	45
2.7.2.4	Trocas de energia por radiação.....	46
2.7.2.5	Poder emissivo: emissividade	47
2.7.2.6	Trocas de calor através de paredes opacas	48
2.8	Termografia infravermelha	49
2.8.1	Descrição do método.....	50

¹ Este trabalho foi revisado de acordo com as novas regras ortográficas aprovadas pelo Acordo Ortográfico assinado entre os países que integram a Comunidade de Países de Língua Portuguesa (CPLP), em vigor no Brasil desde 2009. E foi formatado de acordo com a ABNT NBR 14724 de 17.04.2011.

2.8.2	Técnicas de estimulação para a captação da imagem	52
2.8.2.1	Técnica de termografia passiva	52
2.8.2.2	Técnica de termografia ativa	53
2.8.3	Aplicações da termografia infravermelha	54
2.8.4	Termografia aplicada ao conforto	56
3	MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1	Materiais.....	58
3.1.1	Caracterização dos blocos de concreto e de cerâmica.....	60
3.1.2	Avaliação do desempenho térmico	60
3.2	Métodos.....	64
3.2.1	Ensaio preliminares	66
3.2.2	Modelo de alvenaria.....	69
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	74
4.1	Caracterização dos materiais.....	74
4.2	Avaliação do desempenho térmico	75
4.3	Análise dos resultados de termografia.....	76
4.3.1	Ensaio preliminares	77
4.3.2	Respostas térmicas da alvenaria antes da insolação.....	81
4.3.3	Respostas térmicas da alvenaria após insolação	84
5	CONCLUSÕES	92
6	SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS.....	93
	REFERÊNCIAS.....	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A poluição ambiental é um problema mundial e está fortemente relacionada ao crescimento populacional e à urbanização do planeta (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Segundo o *Census Bureau* (2011), a população mundial atinge, hoje, 6,9 bilhões de habitantes, fator que exige grande demanda de produtos e serviços. A construção civil é um dos setores da economia que afetam consideravelmente o meio ambiente, tanto pelo consumo de recursos naturais, quanto pela produção de resíduos. De acordo com John, Oliveira e Lima (2007), estima-se que a construção civil utilize cerca de 20 a 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade. O dispêndio de água e energia nos processos construtivos, na produção dos materiais e na climatização dos ambientes construídos cria um ciclo que contribui para acelerar a exaustão gradativa dos recursos naturais. Em consequência, surgem problemas que preocupam a sociedade como um todo e motivam o desenvolvimento de ações que visem à preservação do meio ambiente, à construções mais sustentáveis e à diminuição de consumo energético.

A preocupação com o conforto térmico nas construções em geral tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. As pessoas estão mais exigentes com o seu conforto e conscientes das questões ambientais. Ao mesmo tempo, as edificações devem oferecer condições térmicas compatíveis com o conforto ambiental no interior dos edifícios, sejam quais forem as condições climáticas externas. A intervenção humana expressa no ato de construir pode alterar as condições climáticas, das quais depende a resposta térmica no interior das construções.

Com o surgimento de novos materiais, a forma de execução e os processos de construção de edificações têm evoluído acentuadamente nos últimos tempos, requerendo cada vez mais conhecimentos multidisciplinares por parte dos profissionais que atuam na construção. Ao avaliar a qualidade dos projetos desde o seu planejamento até a execução final, nota-se que, em muitos casos, uma mesma tipologia arquitetônica é adotada para as diversas cidades, desconsiderando-se as diversidades socioeconômica, cultural, climática e tecnológica, que são distintas nas diversas regiões.

Segundo Akutsu, Sato e Pedroso (1987), por força de normas e leis regulamentadoras do desempenho térmico das edificações, os limites máximos para troca de calor de um ambiente são restringidos diretamente aos campos de ação dos projetistas. Observa-se que os agentes responsáveis por esses projetos, sejam eles arquitetos, engenheiros ou *designers*, necessitam, cada vez mais, de mais conscientização ambiental e mais esclarecimentos das condições físico-climáticas e das propriedades térmicas e comportamentais dos materiais, para adequar as construções ao âmbito no qual vão atuar. Essas diretrizes, contudo, representam contínuo avanço no campo do aprimoramento das condições favoráveis à realização de pesquisa de caráter inovador.

A delimitação de uma zona de conforto térmico para aplicação nos ambientes construídos deve considerar aspectos básicos de trocas térmicas homem-ambiente, permitindo ao ser humano manter constante a temperatura do seu corpo sem acionar, de forma perceptível, seus mecanismos de defesa contra o calor ou contra o frio (FROTA; SCHIFFER, 2007). No Brasil, a formulação de um método para compreender o desempenho térmico de edificações a partir das necessidades locais e segundo as exigências dos usuários tem sido a preocupação de pesquisadores e de profissionais da área. Compreender o comportamento térmico dos elementos que compõem o ambiente construído auxilia os profissionais a dimensionar e especificar corretamente os materiais e acabamentos, possibilitando ambientes termicamente mais confortáveis (KRÜGER, 1999; KRÜGER; ROSSI, 2011; RIBEIRO; SOUZA, 2009; SOUZA; PEREIRA, 2004).

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo que utiliza blocos de dimensões variadas, muito empregado no Brasil, principalmente nas construções de baixa renda. No entanto, considerando apenas o sistema construtivo, ela não oferece conforto do ponto de vista térmico, levando o usuário, muitas vezes, ao uso excessivo de sistemas artificiais de refrigeração e, conseqüentemente, a um consumo maior de energia elétrica. A alvenaria estrutural de blocos de concreto é a mais utilizada em construções de pequeno porte. A partir da Norma Brasileira de Referência (NBR) 15270-2/2005 (ABNT, 2005a), que define os termos e fixa os requisitos dimensionais, físicos e mecânicos exigíveis para blocos cerâmicos de alvenaria estrutural, a tendência é que parte desse sistema utilize blocos de cerâmica em substituição ao bloco de concreto.

O resíduo de poliestireno expandido (EPS) é um produto de lenta degradação, que ocupa grandes espaços no aterro sanitário. Sua destinação tem preocupado tanto o poder público quanto a sociedade, que busca soluções para minimizar os reflexos negativos de sua destinação inadequada (RIBAS, 2007). Materiais alternativos desenvolvidos a partir do EPS como elemento adicional em blocos de alvenaria estrutural (concreto/cerâmica) poderia ser uma solução interessante do ponto de vista do conforto térmico e uma possibilidade de construções mais sustentáveis.

A termografia infravermelha é considerada uma técnica de inspeção não destrutiva e não invasiva do campo de temperatura de uma superfície, a partir da imagem gerada pela radiação térmica no infravermelho, emitida pela superfície de diferentes tipos de materiais (CASTANEDO, 2005; MALDAGUE, 2001, TAVARES; 2006). De modo geral, na construção civil, as aplicações da termografia têm sido utilizadas basicamente em manutenção e em situações que, normalmente, geram calor (MEOLA; CARLOMAGNO, 2004; MEOLA *et al.*, 2005; PELIZZARI, 2006; SALES, 2008). Com os avanços dessa tecnologia, novos detectores de imagem visual integrada e *softwares* estão sendo desenvolvidos. Esses avanços têm proporcionado significativos ganhos na utilização da termografia na construção, uma vez que ela permite novas soluções para diagnósticos, com mais produtividade e segurança.

Nesta pesquisa utiliza-se a termografia infravermelha para o estudo do desempenho térmico de um modelo de alvenaria estrutural de concreto/cerâmica, aplicando poliestireno expandido como material adicional ao sistema. Para tanto, foram desenvolvidos estudos em escala laboratorial para delimitação das diretrizes desta pesquisa. Buscou-se avaliar as condições de perdas e/ou passagens de calor em amostras de blocos de concreto e cerâmica comparados a amostras cujo espaço interno dos blocos foi preenchido com poliestireno expandido. Também foi construído um modelo de alvenaria estrutural de blocos de concreto/cerâmica de modo a obter-se uma alvenaria o mais próximo possível da realidade da construção convencional.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é investigar as potencialidades da termografia infravermelha como técnica para avaliação das condições de conforto térmico em alvenaria estrutural de concreto e de cerâmica, com e sem o uso de poliestireno expandido como material adicional ao sistema.

São objetivos específicos deste trabalho:

- Avaliar o comportamento térmico dos materiais estudados (blocos de concreto, de cerâmica e EPS) após aquecimento artificial;
- construir um modelo de alvenaria estrutural de concreto/cerâmica utilizando blocos com e sem EPS e submetê-lo a insolação natural;
- monitorar o modelo de alvenaria estrutural por termografia infravermelha, em situações a que normalmente são expostas (insolação natural);
- avaliar a eficiência do EPS como material isolante no sistema;
- avaliar se a termografia é capaz de distinguir os materiais estudados.

1.3 Justificativa

A industrialização atual aponta um crescimento na degradação do meio ambiente, resultado do aumento populacional, consumo de matéria prima e da deposição indiscriminada de rejeitos diretamente na natureza. A construção civil, responsável por grande parte do consumo de recursos naturais e produção de rejeitos, é um setor potencialmente indicado para o aproveitamento de resíduos, uma vez que suas diversas áreas trabalham com diferentes materiais. Isto torna indispensável o desenvolvimento de materiais e/ou tecnologias alternativas. A utilização de resíduos como o EPS, pode trazer benefícios a este processo, representando redução de material descartado na natureza, possibilidade de conseguir ambientes termicamente mais confortáveis e uma conseqüente diminuição de gastos de energia elétrica com climatização. Soma-se a isso a utilização de uma tecnologia de inspeção não destrutiva pouco utilizada no Brasil que é a termografia infravermelha. Neste sentido, esta pesquisa se justifica pelo seu caráter tecnológico e social quando busca soluções ambientais e ao mesmo tempo econômicas do ponto de vista de aproveitamento de um material resultante de um processo industrial de grande abrangência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os temas mais relevantes do levantamento bibliográfico realizado. São eles temas como conforto térmico, sustentabilidade, poliestireno expandido, alvenaria estrutural e termografia infravermelha.

2.1 *Design do conforto e conforto ambiental*

Sentir-se confortável é, talvez, a primeira sensação procurada pelo ser humano. Desde sempre o homem buscou o conforto e a satisfação do bem-estar físico. Para atender às suas exigências de sobrevivência, ele construiu abrigos contra os rigores climáticos, buscou aconchego em suas vestimentas, procurou a proximidade da água, aprendeu a aproveitar a ventilação natural, entre outros. Desta forma, percebe-se que as exigências humanas de conforto, de modo geral, sempre estiveram relacionadas ao funcionamento do organismo (FROTA; SCHIFFER, 2007; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997).

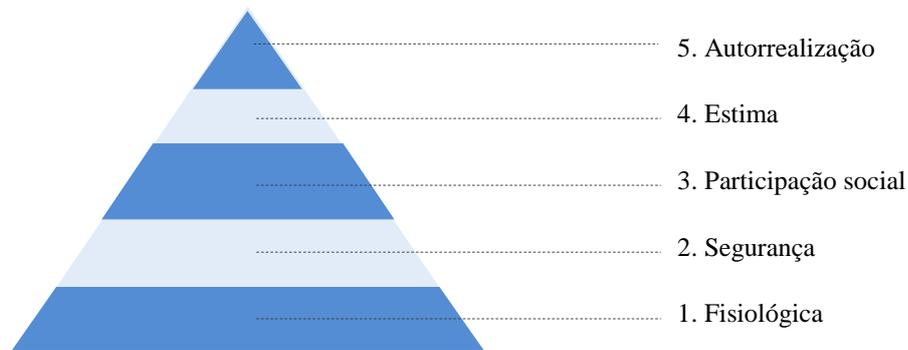
Design do conforto é um assunto bastante amplo e atual e que tem merecido, nos últimos anos, atenção especial de profissionais e de pesquisadores. O termo tem suas raízes no conforto humano, em que o *design* busca satisfazer de forma efetiva as condições da mente que expressa conforto/desconforto no lugar e/ou situação na qual o sujeito esteja inserido. As várias áreas do conhecimento, diretamente ligadas ao conforto humano, como Arquitetura, Engenharia e o *Design*, trabalham para melhorar o entorno das pessoas. Normalmente se busca um produto, em primeiro lugar, para resolver um problema funcional específico e hoje cada vez mais pelas suas qualidades estéticas, de identidade, de exclusividade e por proporcionar reconhecimento social e estima (DE MORAES, 2010).

Da mesma forma, o homem busca sentir-se bem quando está em um ambiente (moradia, trabalho, lazer, etc.) e quando utiliza um bem de consumo. Nesse sentido, o *design* do conforto busca compreender os fatores motivacionais e comportamentais relacionados a essas necessidades e desenvolver soluções inovadoras e criativas que possam atender aos seus desejos e proporcionar mais satisfação e melhor qualidade de vida para as pessoas (LANA; LAGE, 2007).

A hierarquia de necessidades da teoria de Abraham Maslow sugere que muito do comportamento humano pode ser explicado pelas suas necessidades e pelos seus desejos. Quando uma necessidade em particular se torna ativa, ela pode ser considerada um estímulo à ação e impulsionadora das atividades do indivíduo. Essa necessidade determina o que passa a ser importante para o sujeito e molda o seu comportamento como tal, que pode ser considerado uma ação a que o indivíduo se obriga para aliviar a tensão (agradável ou desagradável) gerada pela necessidade ou desejo. A ação é intencionalmente voltada para um objeto ou objetivo que aliviará a tensão interior.

Atualmente referência no *design* para busca de soluções, a escala de hierarquia das necessidades humanas, baseada na pirâmide de Maslow (FIG. 1), considera o comportamento humano a partir de cinco níveis de necessidades (DE MORAES, 2010). Na base da pirâmide, juntamente com as questões de saúde, segurança e moradia, está inserida a necessidade de conforto (em todos os sentidos). Esse conforto, quando proporcionado, cria condições para o desenvolvimento das outras faixas de aspirações humanas.

FIGURA 1 – Pirâmide de Maslow



Fonte: De Moraes (2010, p. 50).

Segundo Lana e Lage (2007), um ambiente que propicie conforto, satisfação e bem-estar é campo favorável para o desenvolvimento das potencialidades criativas e são elas que vão impulsionar o sujeito em direção ao vértice da pirâmide. As autoras consideram o conceito de conforto, anteriormente relacionado ao conforto ambiental ampliado, quando se leva em conta a evolução do ser humano, não só na base como em todos os níveis da pirâmide. O *Design*, pelo seu aspecto transversal, interdisciplinar e holístico, foca os seus esforços não

somente no ser humano, mas nas suas aspirações, nos valores tangíveis e intangíveis, tanto nos produtos e serviços como nas suas inter-relações. Deste modo, Lana e Lage (2007) propõem a ampliação do conceito de conforto e chamam a atenção para a importância da presença do *design* como ferramenta estratégica na projeção de ambientes. No primeiro caso, entende-se conforto direcionado a todos os aspectos da relação humana e, no segundo, considera-se como uma área do conhecimento mais adequada e não menos complexa. Assim, numa visão panorâmica, sugerem estudos mais extensos na área do *design* do conforto.

Percebe-se que nos últimos anos as pessoas, de modo geral, conscientizaram-se dos benefícios de atuarem e inovarem segundo indicações de profissionais de projeto. Para Frota e Schiffer (2007), o ambiente construído deve servir ao homem e ter características que promovam conforto ambiental – o que abrange o conforto térmico, sejam quais forem as condições climáticas externas. Somando-se a esses fatores, Lamberts, Dutra e Pereira (1997) ressaltam que a modernidade, juntamente com o aumento da população mundial, trouxe novas preocupações, que se transformaram em novos temas de estudo relacionados ao conforto ambiental, como eficiência energética, saúde ocupacional e produtividade, sustentabilidade, entre outros.

2.2 Conforto térmico

Define-se conforto térmico como o estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda (LAMBERTS *et al.*, 2005). As exigências humanas de conforto térmico estão relacionadas ao funcionamento do organismo no que diz respeito ao fluxo de calor que ele absorve e que ele perde para o ambiente por meio das trocas térmicas. A sensação de conforto depende de condições ambientais e humanas, em que fatores pessoais interferem nessa resposta, seja pela temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do ar e umidade relativa. A sensação de bem-estar é necessária para que o sujeito desenvolva normalmente suas atividades sem acionar, de forma perceptível, seus mecanismos de defesa contra o calor ou contra o frio. Portanto, é importante que se compreendam os mecanismos físicos que fundamentam os modos de transferência de calor.

Estudos desenvolvidos para análise pós-ocupação de edifícios mostram a influência das condições de conforto térmico sobre a qualidade do ambiente e sua influência sobre o desempenho dos usuários (BARBOSA; LAMBERTS, 2002; BATIZ *et al.*, 2009; CONCEIÇÃO; LÚCIO, 2011; KRÜGER; ZANNIN, 2006; NOGUEIRA; NOGUEIRA, 2003; XAVIER; LAMBERTS, 1999). Questionamentos são feitos quanto aos resultados do rendimento em prédios de atividades educacionais e aos materiais empregados em paredes, revestimentos e coberturas (NOGUEIRA; NOGUEIRA, 2003).

O desconforto térmico é, geralmente, uma das maiores reclamações entre os fatores que compõem o conforto ambiental. Frota e Schiffer (2007) descrevem que os primeiros trabalhos desenvolvidos em 1916, pela Comissão Americana de Ventilação, confirmaram que, para trabalhos físicos, o aumento da temperatura de 20 para 24°C diminui o rendimento em 15% e a 30°C de temperatura ambiente com umidade de 80% o rendimento cai 28%.

Como resultante de outros estudos e pesquisas, em décadas seguintes foram criados os índices de conforto térmico que procuram englobar num parâmetro o efeito das variáveis do ambiente. Em geral, esses índices são desenvolvidos fixando-se um tipo de atividade e a vestimenta utilizada pelo indivíduo. A partir daí relacionam-se as variáveis do ambiente e reúnem-se, em forma de cartas ou nomogramas, as diversas condições ambientais que proporcionam respostas iguais por parte dos indivíduos (FROTA; SCHIFFER, 2007).

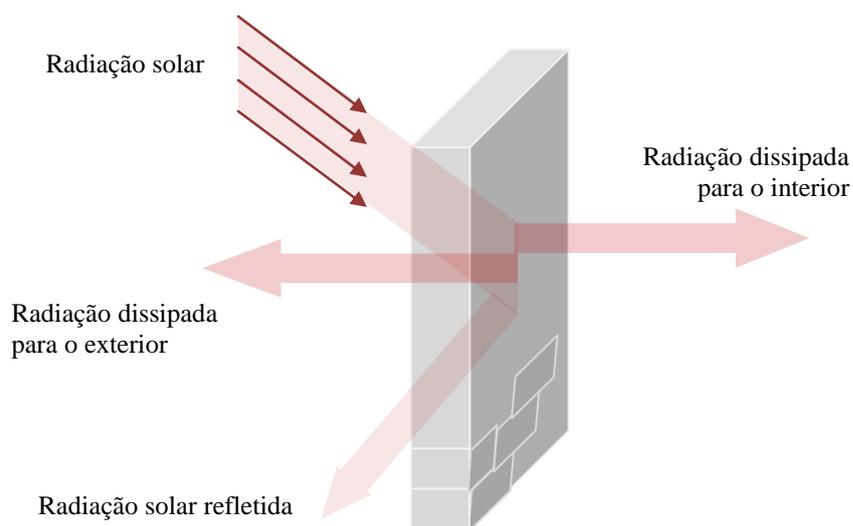
Segundo Frota e Schiffer (2007), os índices de conforto térmico foram desenvolvidos com base em diferentes aspectos do conforto e podem ser classificados como:

- Índices biofísicos - baseiam-se nas trocas de calor entre o corpo e o ambiente, correlacionando os elementos do conforto com as trocas de calor que dão origem a esses elementos;
- índices fisiológicos - baseiam-se nas reações fisiológicas originadas por condições conhecidas de temperatura do ar seco, temperatura radiante média, umidade do ar e velocidade do vento;
- índices subjetivos - baseiam-se nas sensações subjetivas de conforto experimentadas em condições em que os elementos de conforto térmico variam.

As principais variáveis ambientais são: temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa do ar e velocidade do vento. A temperatura do ar não é consequência da ação direta dos raios do sol. A radiação solar é uma onda eletromagnética curta, responsável pela energia no planeta, por ser sua principal fonte. A trajetória da Terra ao redor do Sol, em conjunto com o movimento de rotação da Terra, determina as variações na intensidade da radiação ao longo do ano e durante o dia, respectivamente; em um processo indireto, a radiação solar atinge o solo, onde é absorvida em parte e transformada em calor. Portanto, a temperatura do solo aumenta e, por convecção, aquece o ar (LAMBERTS *et al.*, 2005).

O sol, nossa fonte de calor, incide sobre o edifício, representando sempre ganho de calor, que será função da intensidade da radiação incidente e das características térmicas dos parâmetros do edifício. No caso de uma parede opaca exposta à radiação solar e em condições em que exista diferença de temperatura (entre o ambiente interno e externo), existirá troca de calor – a radiação solar incidente será parcialmente refletida, parcialmente absorvida pela parede e dissipada para o interior e parcialmente dissipada para o exterior. A FIG. 2 ilustra as trocas de calor através de paredes opacas (FROTA; SCHIFFER, 2007).

FIGURA 2 - Trocas de calor através de paredes opacas



Fonte: Adaptado de Frota e Schiffer (2007, p. 42).

O conhecimento das exigências humanas de conforto térmico e do clima associado ao das características térmicas dos materiais e das premissas genéricas para o partido

arquitetônico adequado a climas particulares proporciona condições de projetar edifícios e espaços urbanos cuja resposta térmica atenda às exigências de conforto térmico (FROTA; SCHIFFER, 2007). Entre as estratégias utilizadas para concepção de projetos com melhores condições de conforto térmico e redução de consumo de energia está a utilização de componentes (paredes, coberturas, pisos, etc.) com inércia térmica.

Inércia térmica é a capacidade de uma edificação (ou objeto) de armazenar e liberar calor. Uma edificação com pouca inércia segue muito próxima da variação de temperatura externa; e com inércia infinita, a temperatura interna permanece constante. A razão entre o calor absorvido e o calor armazenado nos materiais da edificação depende da capacidade térmica do material que compõe a envoltória (PAPST, 1999). O uso da inércia térmica na edificação ajuda no atraso e na diminuição dos picos de calor externo.

Imprimir a um edifício características que proporcionem resposta térmica ambiental conveniente não implica acréscimo obrigatório do custo de construção, mas, ao contrário, deve resultar em redução do custo de utilização e de manutenção, além de propiciar condições ambientais internas agradáveis aos ocupantes. O conhecimento do clima, aliado ao dos mecanismos de trocas de calor e do comportamento térmico dos materiais, permite consistente intervenção nos espaços construídos, incorporando os dados relativos ao meio ambiente externo de modo a aproveitar o que o clima apresenta de agradável e amenizar seus aspectos negativos (FROTA; SCHIFFER, 2007; LAMBERTS *et al.*, 2005, LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997) .

No Brasil, a NBR 15220, de 2005, “Desempenho térmico das edificações”, motivou o setor a desenvolver pesquisas sobre materiais adequados para cada tipo de clima e, sobretudo, adaptar os projetos a conceitos como: fator de calor solar, ventilação cruzada e resistência térmica (ABNT, 2005b; 2005c). Roman e Bonin (2003) destacam que a elaboração dos textos normativos que deram origem a essas normas preencheu uma lacuna existente na normalização nacional aplicável à produção habitacional.

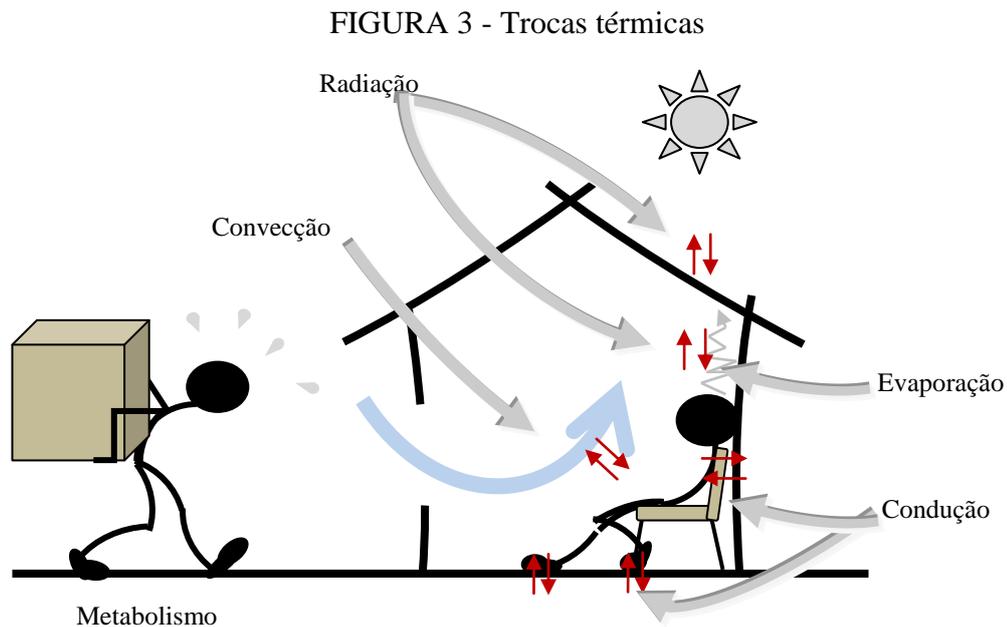
2.2.1 Considerações sobre a resposta humana à condição térmica

Frota e Schiffer (2007, p. 17) ressaltam que: “o organismo humano, complexo, pode ser, grosso modo, comparado a uma máquina térmica que produz calor segundo sua atividade e precisa liberar calor em quantidade suficiente para que sua temperatura interna se mantenha da ordem de 37°C – homeotermia”. Quando as condições ambientais não são favoráveis e o balanço térmico entre o corpo humano e o ambiente não é estável, resulta em sensação de desconforto pelo calor ou pelo frio, sinal de que o organismo humano está perdendo mais calor ou menos calor que o necessário para a manutenção da homeotermia. Esta passa a ser conseguida com um esforço adicional que sempre representa sobrecarga, com queda de rendimento no trabalho, até o limite, sob condições de rigor excepcionais: perda total de capacidade para realização de trabalho e/ou problemas de saúde.

A manutenção da temperatura interna do organismo humano relativamente constante, em ambientes cujas condições termo-higrométricas são as mais variadas e variáveis, faz-se por meio de seu aparelho termorregulador. Apesar de ser o meio natural de controle de perdas de calor pelo organismo, a termorregulação representa um esforço extra e, por conseguinte, uma queda na potencialidade de trabalho. “O organismo humano experimenta sensação de conforto térmico quando perde para o ambiente, sem recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação, o calor produzido pelo metabolismo compatível com sua atividade” (FROTA; SCHIFFER, 2007).

O organismo humano passa diariamente por uma fase de fadiga - catabolismo - e por fase de repouso - anabolismo. O catabolismo, sob o ponto de vista fisiológico, envolve três tipos de fadiga: a física (muscular, resultante do trabalho de força), a termo-higrométrica (relativa ao calor ou ao frio) e a nervosa (visual e sonora). O conforto térmico humano e sua resposta fisiológica ao estresse térmico dependem da produção de calor metabólico, do nível de fatores ambientais e do tipo de vestimenta que o indivíduo estiver usando. O efeito conjugado dos mesmos é que definirá o grau de conforto ou desconforto térmico sentido pelas pessoas. Desta forma, os parâmetros mais importantes do conforto térmico subdividem-se em duas classes: a) as individuais (o metabolismo e o vestuário); e b) as ambientais (temperatura, umidade, velocidade do ar e temperatura média radiante) (FROTA; SCHIFFER, 2007).

A quantidade de calor liberado pelo organismo é, então, função da atividade desenvolvida e será dissipado a partir de mecanismos de trocas térmicas entre o corpo e o ambiente. Resultantes das diferenças de temperatura entre o corpo e o ambiente, as trocas térmicas (FIG. 3) podem ser trocas secas (condução, convecção e radiação), o que, neste caso, é denominado calor sensível; ou trocas úmidas, denominado calor latente, que envolve mudanças de fase – o suor (líquido) passa para o estado gasoso através da evaporação (LAMBERTS *et al.*, 2005).



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

A busca pelo bem-estar físico, fisiológico e psicológico humano vem de longa data, porém apenas nas últimas décadas têm se intensificado os estudos dos efeitos do conforto térmico sobre as pessoas em ambientes internos (LAMBERTS; XAVIER, 2002).

2.3 Desenvolvimento sustentável

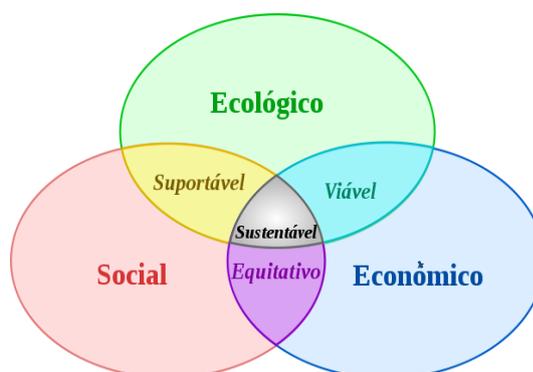
A questão ambiental tem sido largamente difundida, principalmente na última década. A conscientização do papel de cada cidadão inserido nesse cenário passou a ter grande relevância e a sustentabilidade tornou-se uma preocupação concreta. O termo sustentabilidade passou a dominar grande parte do discurso atual em diferentes setores da sociedade (VEZZOLI, 2010). O conceito de sustentabilidade, da forma como é tratado, foi

construído a partir de 1962, quando se desmitificou que o ambiente possuía infinita capacidade de absorver os poluentes. Apesar das abundantes riquezas ainda existentes no mundo, o modelo de crescimento econômico ainda gera grandes desequilíbrios tais como miséria, degradação ambiental e poluição em crescimento.

Em 1987, em reunião da Organização das Nações Unidas (ONU), o relatório presidido pela primeira ministra norueguesa, Gro Harlem Brundtland, definiu desenvolvimento sustentável como sendo aquele capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender às necessidades das futuras gerações. Essa proposta, que rompe com os antigos modelos econômicos, é a primeira a integrar meio ambiente com futuro econômico, social e cultural das sociedades. Contudo, para ser alcançado, o desenvolvimento sustentável depende de planejamento e do reconhecimento de que os recursos naturais são finitos. Neste sentido, o princípio do desenvolvimento sustentável busca conciliar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental e a erradicação da pobreza no mundo (KAZAZIAN, 2005).

De acordo com Norman e MacDonald (2003), o desenvolvimento sustentável estabelece objetivos multidimensionais ao considerar aspectos essenciais: econômico, ambiental e social. A dimensão econômica, em que a organização deve ser capaz de produzir produtos e serviços continuamente; a dimensão ambiental procura reduzir as agressões ao meio ambiente, promover a melhoria das condições ambientais e evitar o desperdício; e a dimensão social, que busca avaliar o impacto do negócio no sistema social no qual ela atua. As práticas organizacionais social e ambientalmente responsáveis dão credibilidade à gestão, o que é valorizado por grandes empresas e pela sociedade, quando decidem com quem farão negócios (*Triple Bottom Line*). O desenvolvimento sustentável busca o equilíbrio entre as dimensões ambiental, sociocultural e econômica (FIG. 4), sendo definidas como metas ações ambientalmente responsáveis, socialmente justas, economicamente viáveis.

FIGURA 4 - Dimensões da sustentabilidade



Fonte: Elkington (1994).

A partir da conscientização das consequências da ação do modo de vida da humanidade sobre ambiente natural, a perspectiva da sustentabilidade põe em discussão nosso atual modelo de desenvolvimento. A procura por um novo pressuposto para o processo de desenvolvimento busca soluções que podem seguir múltiplos caminhos, como os da eficiência a partir de soluções tecnológicas e mudanças culturais visando à não interferência no ambiente natural (MANZINI; VEZZOLI, 2002).

Diante dessa busca por soluções, principalmente tendo como foco a ameaça de escassez dos recursos naturais e a realidade dos lixões/aterros sanitários, a prática do conceito dos 3 Rs – reduzir, reutilizar e reciclar – passa a ter papel significante nesse processo de mudança em que o pensar um produto leve em conta a análise de seu ciclo de vida e a visão dos 3 Rs tenha influência nas decisões de todo o processo. Kindlein e Cândido (2009) enfatizam que reduzir está inserido no processo do *design* como uma busca de minimização da quantidade de material empregado no produto e no processo de fabricação e distribuição; reutilizar significa utilizar novamente os sistemas e subsistemas dos objetos em sua forma original ou em partes descartadas; e o terceiro R, de reciclar, consiste em aproveitar os materiais dos produtos descartados que podem voltar para as indústrias como matéria-prima para a fabricação de novos produtos.

O desequilíbrio, em relação à geração de resíduos, traz sérios riscos à preservação ambiental. Isso porque as empresas fabricantes têm dificuldades em dar destinação aos produtos ao final de sua vida útil. A maioria dos materiais depois de utilizados é descartada inadequadamente nos aterros sanitários ou diretamente na natureza, provocando, muitas

vezes, a contaminação do solo, dos lençóis freáticos, do ar, etc. Uma alternativa de destinação correta para os resíduos/materiais seria o reaproveitamento em algum processo industrial. Hoje se percebe que o planeta não consegue mais repor os recursos naturais consumidos: gasta-se além da capacidade de regeneração ambiental (RODRIGUES, 2009).

Países em desenvolvimento, muitas vezes, priorizam crescimento econômico em detrimento das questões sociais e ambientais. Este fato se deve à conjugação de dois fatores: a escassez de recursos financeiros e a busca pelo progresso econômico, como meio de melhorar as condições de vida da população. Nesse contexto, em que a viabilidade econômica por vezes assume importância vital em detrimento da ambiental, as organizações brasileiras vêm implementando ações no sentido de incorporar os conceitos de desenvolvimento sustentável. É importante ressaltar que, a longo prazo, a procura por inovações para atender a padrões ambientais e a busca por materiais alternativos podem determinar a redução dos custos (WILKINSON; HILL; GOLLAN, 2001).

2.4 Poliestireno expandido (EPS)

EPS é a sigla internacional do poliestireno expandido, de acordo com a Norma DIN ISO-1043/78. O EPS é um plástico celular rígido, resultante da polimerização do estireno em água. Segundo a Associação Brasileira do Poliestireno Expandido (ABRAPEX, 2010), em seu processo produtivo emprega-se o pentano como agente expensor para a transformação do EPS, um hidrocarbureto que se deteriora rapidamente pela reação fotoquímica gerada pelos raios solares, sem comprometer o meio ambiente. O produto final é composto de pérolas expandidas, que consistem em até 98% de ar e apenas 2% de poliestireno. Em 1 m³ de EPS, por exemplo, existem de 3 a 6 bilhões de células fechadas e cheias de ar. O EPS tem inúmeras aplicações em embalagens industriais, artigos de consumo (caixas térmicas, pranchas, porta-gelo, etc.), na agricultura e na construção civil.

Nas instalações dos produtores de EPS, a matéria-prima é sujeita a um processo de transformação física, não alterando as suas propriedades químicas. Essa transformação processa-se em três etapas: pré-expansão, armazenamento intermediário e moldagem. A expansão do poliestireno (PS) expansível é efetuada numa primeira fase a partir de aquecimento por contato com vapor de água. O agente expensor incha o PS para um volume cerca de 50 vezes maior que o original. Daí resulta um granulado de partículas de

isopor constituídas por pequenas células fechadas, que é armazenado para estabilização e depois introduzido em moldes e novamente exposto a vapor de água, o que provoca a soldadura do mesmo. Assim, obtém-se um material expandido, que é rígido e contém grande quantidade de ar.

Para fabricar placas para a construção civil, produzem-se blocos de isopor (EPS) em grandes moldes prismáticos; para fabricar moldados em isopor, o granulado é insuflado para dentro de moldes com a conformação das peças pretendidas. A escolha do tipo de matéria-prima e a regulação do processo de fabricação permitem a obtenção de ampla gama de tipos de isopor, com diversas densidades, cujas características se adaptam às aplicações previstas.

O EPS não é biodegradável, mas é reciclável. Os descartes de embalagens de isopor ocupam grandes volumes nos aterros sanitários (FIG. 5) (AMBIENTE BRASIL, 2010).

FIGURA 5 - Resíduo de EPS



Fonte: Ambiente Brasil (2010)

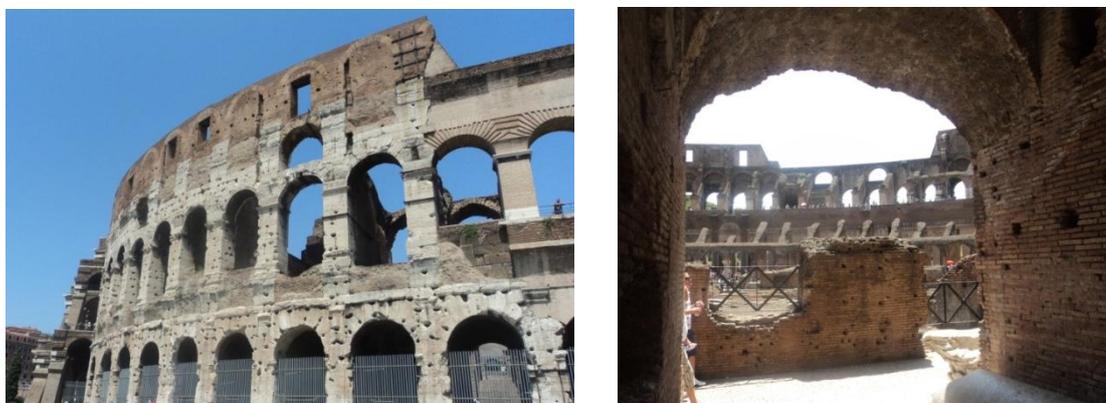
Pesquisas sobre aproveitamento de EPS são encontradas nos artigos científicos em aplicações como agregado em blocos de concreto (SOARES, 2010), em compósitos com serragem de madeira *pinus elliotti* (POLETTO *et al.*, 2010) ou aplicado ao concreto para redução da permeabilidade (AMIANI; BOTARO, 2008). Essas pesquisas ressaltam a escolha do EPS por apresentar características importantes como baixas absorções de água, resistência ao envelhecimento e por ser estéril, ou seja, não constitui substrato para a proliferação de microrganismos.

2.5 Alvenaria estrutural

A alvenaria é um sistema estrutural empregado pelo homem desde os primórdios das grandes civilizações. Desde a Antiguidade ela tem sido utilizada largamente pelo ser

humano em suas habitações, monumentos e templos religiosos. As pirâmides de Gizé, o Farol de Alexandria, o Coliseu (FIG. 6) e as grandes catedrais góticas são exemplos dessas construções. Apesar do uso intenso da alvenaria, apenas no início do século XX, por volta de 1920, começou-se a estudar o assunto com base em princípios científicos e experimentação laboratorial. Com isso, podem-se desenvolver teorias que fundamentam a arte de se projetar em alvenaria estrutural de forma racional (RAMALHO; CORREA, 2003).

FIGURA 6 - Vista da fachada original e detalhe interno do Coliseu (construção entre 70 e 90 d.C.)



Fonte: Arquivo da autora.

Com a utilização do aço estrutural e do concreto armado, que possibilitaram a construção de edifícios com peças de dimensões reduzidas, a utilização da alvenaria dirigiu-se prioritariamente a construções de pequeno porte. Mas, a partir da década de 1950, com a procura por formas alternativas de construção, a alvenaria estrutural ganhou novo ânimo, sendo utilizada em vários edifícios construídos em diferentes países do mundo, como Inglaterra, Alemanha, Suíça, Austrália e Estados Unidos. Nos últimos anos, o interesse pela alvenaria estrutural cresceu de forma acentuada, em especial no nosso país, devido às vantagens que se obtêm com a sua utilização. Essa técnica tem mostrado diversas vantagens, tais como: redução de custos, simplificação de técnicas de execução, menos diversidade de materiais empregados, redução da mão-de-obra, rapidez na execução, menos desperdício de materiais, melhor controle do processo, entre outros. Isso permite melhor penetração no mercado, especialmente junto às classes média e baixa.

2.5.1 Definição da alvenaria estrutural

Camacho (2006) conceitua alvenaria estrutural como o processo construtivo no qual os elementos que desempenham a função estrutural são de alvenaria, sendo os mesmos projetados, dimensionados e executados de forma racional em um sistema que alia alta produtividade à economia, desde que executado de maneira correta.

A alvenaria estrutural armada é aquela construída com blocos vazados assentados com argamassa, na qual certas cavidades são preenchidas com graute contendo armaduras envolvidas o suficiente para absorver os esforços calculados, além daquelas armaduras com finalidade construtiva ou de amarração (CAMACHO, 2006).

O bloco para alvenaria estrutural constitui a unidade básica desse método construtivo. O bloco de concreto é o mais utilizado no Brasil, confeccionado em diversas geometrias e resistências à compressão. Obtida pela mistura e cura do cimento Portland, agregados (grauído e miúdo) e água, deve apresentar tolerância dimensional de ± 3 mm. Os blocos-padrão encontrados apresentam resistência à compressão de 4,5 a 15 MPa, podendo exibir, em casos especiais, resistência de até 20 MPa (RAMALHO; CORRÊA, 2003).

O bloco cerâmico é o mais utilizado na região Sul do Brasil, onde a argila – que é a matéria-prima da unidade – é de boa qualidade e existem empresas com avançada tecnologia. As unidades são moldadas em máquinas extrusoras, expostas à secagem e queimadas sob temperaturas muito elevadas, com porosidade muito baixa devido à sinterização perfeita. A qualidade das unidades cerâmicas está intimamente relacionada à qualidade das argilas empregadas na fabricação e também ao processo de produção.

Da mesma forma que nos blocos de concreto, fissuras, trincas e outros defeitos nos blocos cerâmicos podem acarretar prejuízos, tanto no assentamento dos blocos quanto na resistência da edificação .

Atualmente, tem havido progressiva busca pela racionalização dos processos construtivos, visando ao aumento da produtividade e à redução dos custos de construção, resultando em crescente demanda por projetos de edifícios em alvenaria estrutural racionalizada. A FIG. 7 mostra uma construção em alvenaria estrutural.

Na alvenaria estrutural, em particular, encontram-se boas condições de implementação de uma ação organizacional em obra. Isto se explica pelo melhor detalhamento do projeto em relação às obras convencionais, pela melhor padronização na execução dos procedimentos construtivos, bem como por mais simplicidade inerente ao processo. Assim, pode-se utilizar a organização da produção como ferramenta para se atingir um grau mais elevado de industrialização do processo, aumentando a sua produtividade, o controle na execução dos procedimentos e, conseqüentemente, a qualidade (GREVEN; BALDAUF, 2007).

FIGURA 7 - Construção em alvenaria estrutural (bloco de concreto) - regional leste de Belo Horizonte



Fonte: URBEL – Prefeitura de Belo Horizonte, 2010.

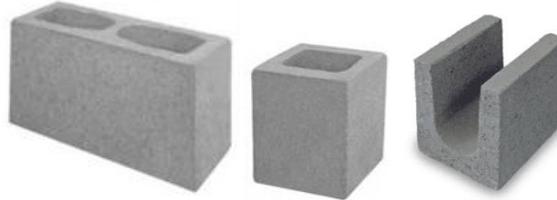
Os principais componentes empregados na construção de estruturas em alvenaria estrutural são as unidades (tijolos ou blocos), as armaduras (construtivas ou de cálculo), o graute e a argamassa. A argamassa deve possuir capacidade de retenção de água para que, ao entrar em contato com blocos de absorção inicial elevada, não tenha suas funções primárias prejudicadas pela excessiva perda de água para a unidade. Também é importante que esta consiga desenvolver resistência suficiente para absorver os esforços solicitantes que podem atuar na estrutura logo após o assentamento (CAMACHO, 2006; MANZIONE, 2004; RAMALHO; CORRÊA, 2003).

2.5.2 Blocos de alvenaria estrutural

No Brasil, atualmente são disponibilizados no mercado blocos cerâmicos, blocos de concreto, blocos sílico-calcáreos, blocos de concreto celular, com as mais variadas

dimensões e resistências. A escolha do tipo adequado deve ser feita de acordo com o projeto e as características do produto. A maioria das construções em alvenaria estrutural é feita com blocos de concreto (FIG. 8) (CAMACHO, 2006; RAMALHO; CORRÊA, 2003).

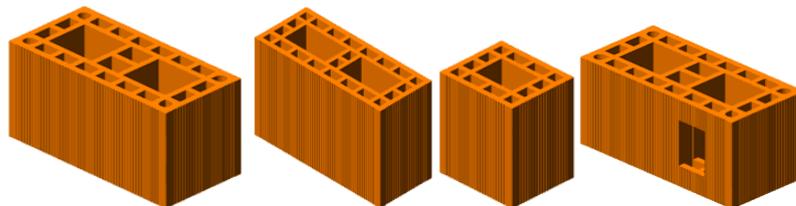
FIGURA 8 - Blocos de concreto para alvenaria estrutural



Fonte: Comunidade da construção (2011).

O bloco cerâmico (FIG. 9), apesar de ser menos utilizado, tem como vantagem o aspecto estético da construção, permitindo, em alguns casos, reduzir ou dispensar revestimentos. Além disso, são mais leves que os blocos de concreto, facilitando, com isso, seu manuseio na obra. Esse fato implica também reduzida ação sobre a fundação, o que também é vantajoso do ponto de vista econômico.

FIGURA 9 - Blocos de cerâmica para alvenaria estrutural



Fonte: Pauluzzi (2010).

Os blocos possuem dimensões conhecidas e variabilidade dimensional, possibilitando que se aplique a técnica de coordenação modular. A coordenação modular consiste no ajuste de todas as dimensões da obra, horizontais e verticais, como múltiplo da dimensão básica da unidade, cujo objetivo principal é evitar cortes e desperdícios na fase de execução. Nessa fase devem ser previstos todos os encontros de paredes, aberturas, pontos de graute e ferragem, ligação laje-parede, caixas de passagem, colocação de pré-moldados e instalações em geral (CAMACHO, 2006; GREVEN; BALDAUF, 2007; RAMALHO; CORRÊA, 2003).

Greven e Baldauf (2007) acreditam que a utilização da coordenação modular possibilita melhor aproveitamento e troca dos componentes construtivos, evitando-se recortes e perdas e, em consequência, com diminuição do uso de recursos naturais e redução do consumo de energia nos processos produtivos.

Tem-se como principal inconveniente, conforme salientam Ramalho e Corrêa (2003), a dificuldade de se adaptar a arquitetura para novo uso, pois, considerando que paredes fazem parte da estrutura, não existe a possibilidade de modificações ou remoções. Outro parâmetro a considerar é a manutenção do módulo, que afeta de forma direta o projeto arquitetônico e condiciona de maneira marcante os projetos de instalações elétricas e hidráulicas.

Contudo, no Brasil, o sistema construtivo em alvenaria estrutural tem experimentado grande impulso. Principalmente a alvenaria não armada de blocos vazados parece ser um dos mais promissores, tanto pela economia como pelo número de fornecedores existentes (RAMALHO; CORREA, 2003). Segundo Camacho (2006), a experiência tem demonstrado que o conveniente emprego da alvenaria estrutural pode trazer vantagens técnicas e econômicas, como redução de custos (cerca de 30%), menos diversidade de materiais empregados, redução da variedade de mão-de-obra e mais rapidez na execução.

2.6 Ensaios não destrutivos

Há algum tempo a utilização de ensaios não destrutivos tem se mostrado importante ferramenta para controle do desempenho dos materiais em serviço. Esses ensaios são definidos como sendo aqueles que não prejudicam nem causam dano ao uso futuro do elemento ensaiado, ou seja, não provocam perda na capacidade resistente do elemento (LEITE, 1966).

Além de poderem ser feitos *in loco*, a velocidade de execução, os custos e a ausência de danos permitem que os ensaios não destrutivos sejam realizados repetidas vezes, possibilitando investigação mais abrangente e acompanhamento sistemático do elemento em estudo. Contudo, o conhecimento das condições de trabalho deve servir de guia para o estabelecimento de critérios de qualidade e de funcionamento, uma vez que os resultados são, na maioria das vezes, de caráter qualitativo e com significado indireto (AGUILAR *et*

al., 2003). Castanedo (2005) refere que são muitas as técnicas utilizadas para inspeção de materiais por métodos não destrutivos. Entretanto, nenhuma delas pode revelar todas as informações requeridas. Uma técnica de ensaio não destrutivo que vem sendo cada vez mais utilizada é a termografia (CASTANEDO, 2005; CORTIZO, 2007; MALDAGUE, 2002; MALHOTRA; SIVASUNDARAM, 1991; MEOLA *et al.*, 2005; RANTALA *et al.*, 1997; SALES, 2008; SALES *et al.*, 2011; TAVARES, 2006; WEIL, 1991).

2.7 Conceitos básicos

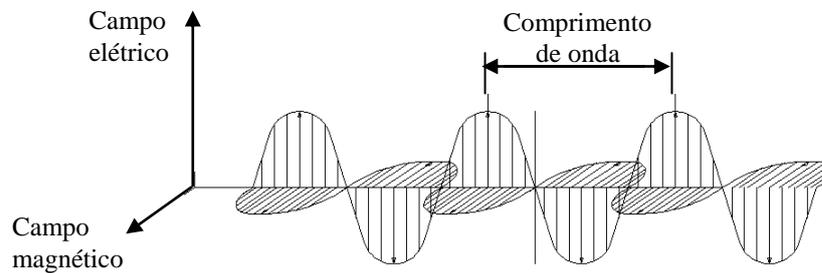
Para melhor entendimento das questões relacionadas à termografia infravermelha, são descritos alguns conceitos gerais, considerações sobre radiação infravermelha, transferência de calor, termografia infravermelha, suas aplicações e limitações.

2.7.1 Radiação infravermelha

As ondas, em função de sua origem, podem ser mecânicas ou eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas, compostas de campos elétricos e magnéticos, podem ser geradas por fenômenos naturais, como o Sol, ou criadas pelo homem. Os exemplos de ondas eletromagnéticas vão desde as micro-ondas até a radiação gama. A radiação infravermelha faz parte do espectro eletromagnético e se comporta de modo similar à luz visível, atravessando o espaço na velocidade da luz. Pode ser refletida, absorvida, emitida e transmitida através de um corpo sólido (INCROPERA; DEWITT, 2008; LILLES; KIEFER, 1977).

No sentido clássico, a radiação eletromagnética é descrita como uma junção de campo magnético com campo elétrico (FIG. 10) que se propaga no vácuo transportando energia (CALLISTER, 2002).

FIGURA 10 - Onda eletromagnética

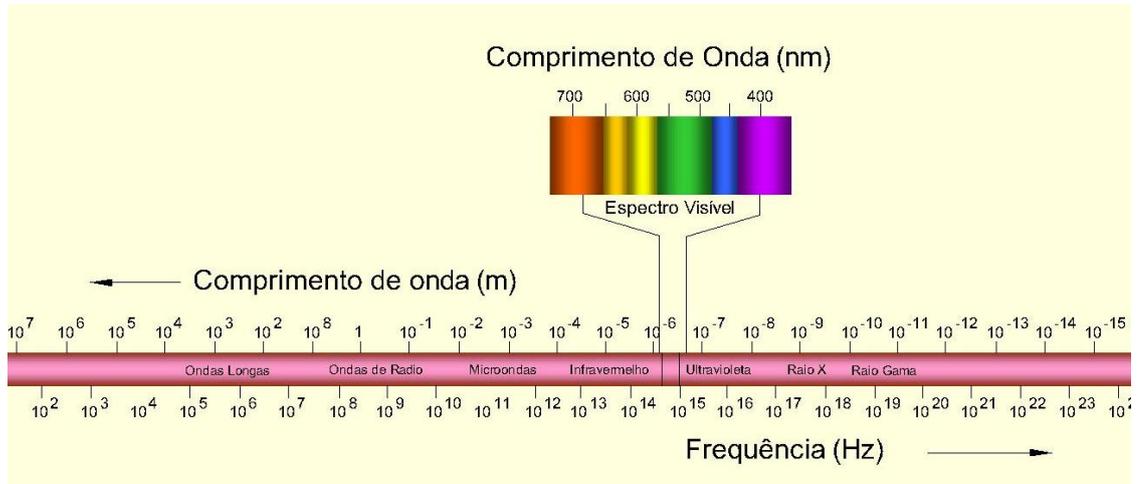


Fonte: Adaptado de Callister (2002).

As ondas eletromagnéticas têm a capacidade de carregar energia para longe da fonte que as gerou. Quanto mais alta a frequência da onda, mais energia ela contém. Além disso, ondas de frequências diferentes não interferem entre si, fazendo com que a frequência seja uma das principais características das ondas eletromagnéticas. Como todas essas ondas se deslocam na velocidade da luz, há uma relação fixa entre frequência e comprimento de onda, o que faz com que os gráficos normalmente mostrem as frequências crescentes e os comprimentos de onda decrescentes correspondentes em um mesmo eixo. O conjunto de todas as frequências das ondas eletromagnéticas é chamado de espectro eletromagnético (INCROPERA; DEWITT, 2008; LILLES; KIEFER, 1977).

O espectro eletromagnético é descrito como um conjunto de diversas regiões (FIG. 11); cada região caracteriza uma faixa de frequência que é associada a um conjunto de propriedades/aplicações. A luz visível é a parte do espectro eletromagnético que os olhos humanos são capazes de perceber e compreende pequena parte de todo o espectro. As frequências acima do visível são chamadas de ultravioleta, Raios-X e Raios-Gama. Para além do espectro visível estão as radiações de infravermelho, micro-ondas e as radiofrequências que são utilizadas em radares e transmissões de rádio e TV.

FIGURA 11 – Espectro eletromagnético



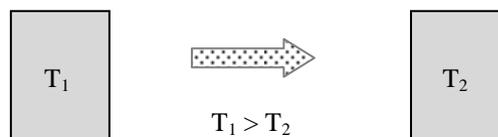
Fonte: Adaptado por Sales (2008).

A porção intermediária do espectro, que se estende e aproximadamente de 10^{-4} a 10^{-7} m que inclui uma fração do ultravioleta, todo o visível e o infravermelho, é chamada de radiação térmica, porque é causa e efeito do estado térmico ou da temperatura da matéria. Por essa razão a radiação térmica é pertinente à transferência de calor (INCROPERA; DEWITT, 2008).

2.7.2 Fundamentos da transferência de calor

A transferência de calor é a energia térmica transiente devida à diferença de temperaturas no espaço (FIG. 12). Os corpos com alta temperatura (T_1) perdem parte de sua energia, enquanto os corpos com baixas temperaturas (T_2) assimilam essa energia térmica e os dois entram em equilíbrio ($T_1 = T_2$) (INCROPERA; DEWITT, 2008; LAMBERTS; GHISI; PAPST, 2000).

FIGURA 12 – Transferência de calor



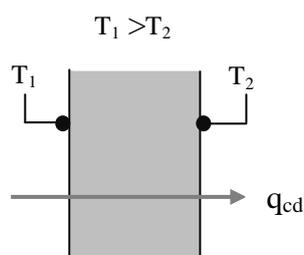
Fonte: Adaptado de Lamberts; Ghisi; Papst, (2000).

As trocas de calor que envolvem variações de temperatura são normalmente denominadas de trocas secas. Esses mecanismos acontecem por meio de uma condição básica: a existência de corpos em temperaturas diferentes (FROTA; SCHIFFER, 2007). É importante que se compreendam os mecanismos físicos que fundamentam os modos de transferência de calor, pois eles delimitam a zona de conforto para aplicação na arquitetura, engenharia e no *design* do conforto, em que devem ser considerados aspectos básicos de trocas térmicas em um ambiente construído, as quais ocorrem de três formas: condução, convecção e radiação térmica.

2.7.2.1 Condução

No estudo da transferência de calor, a condução térmica pode ser considerada a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas de menos energia, devido às interações que existem entre elas (FIG. 13). Ela ocorre através de meio sólido ou atuando em uma substância líquida em níveis de atividades atômicas e moleculares (INCROPERA; DEWITT, 2008).

FIGURA 13 - Modo de transferência de calor por condução

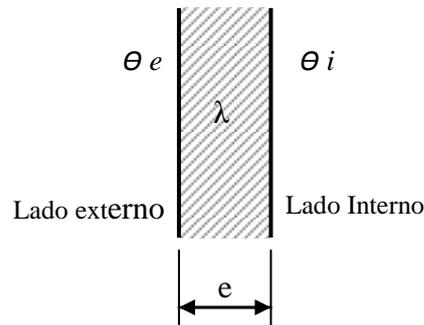


(q_{cd} : fluxo térmico por condução; T_1 : Temperatura da superfície 1, T_2 : temperatura da superfície 2)

Fonte: Adaptado de Incropera; Dewitt (2008, p. 2).

É possível quantificar o processo de transferência de calor em termos de equações e de taxas apropriadas (INCROPERA; DEWITT, 2008). Frota e Schiffer (2007) mostram um esquema de trocas de calor por condução em paredes, usando as equações (3.1) e (3.2) para quantificar a energia transferida por unidade de tempo através do material (FIG. 14):

FIGURA 14 - Trocas de calor por condução



Fonte: Adaptado de Frota e Schiffer (2007, p. 34).

$$q_{cd} = \frac{\lambda}{e} (\theta_e - \theta_i) \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (2.1)$$

sendo:

q_{cd} – intensidade do fluxo térmico por condução.

e – espessura da parede (m);

θ_e – temperatura da superfície externa da envolvente ($^{\circ}C$);

θ_i – temperatura da superfície interna da envolvente ($^{\circ}C$);

λ – coeficiente de condutividade térmica do material ($W/m^{\circ}C$).

Como $\frac{e}{\lambda} = r$, sendo (r) a resistência térmica específica da parede ($m^2 \text{ }^{\circ}C/W$), tem-se que:

$$q_{cd} = \frac{(\theta_e - \theta_i)}{r} \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (2.2)$$

O coeficiente de condutividade térmica (λ) é definido como a propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de $1 \text{ } W/m^2$, quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro (NBR 15220-1). Frota e Schiffer (2007) esclarecem que esse coeficiente depende da densidade do material que é mais condutor que o ar, da natureza química (materiais amorfos são, em geral, menos condutores que os cristalinos) e da umidade do material, pois a água é mais condutora que o ar. A TABELA 1 apresenta valores médios relativos ao coeficiente de condutividade térmica (λ) para alguns materiais de construção (NBR 15220-2). Nesta pesquisa foi construído um modelo de alvenaria estrutural em que foram utilizados blocos de concreto, blocos de cerâmica, poliestireno expandido e argamassa de assentamento. Os valores do TABELA 1 demonstram que os concretos e

argamassas são mais condutores do que as cerâmicas e que o poliestireno expandido tem condutividade térmica baixa.

TABELA 1 - Condutividade térmica (λ) de materiais de construção

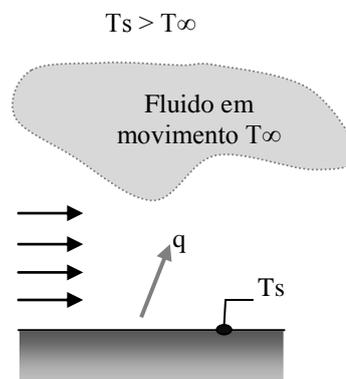
Material	λ [W/(m.K)]
Argamassa comum	1,15
Argamassa de gesso (ou cal e gesso)	0,70
Tijolos e telhas de barro	0,70
	0,90
	1,00
	1,05
Concreto com agregado de pedra (concreto normal)	1,75
Areia seca	0,30
Isolantes térmicos - Poliestireno expandido moldado	0,040
Aço, ferro fundido	55
Alumínio	230
Vidro comum	1,00

Fonte: ABNT (2005c).

2.7.2.2 Convecção

Segundo Incropera e DeWitt (2008), a convecção pode ser considerada a forma de transferência de calor que ocorre entre uma superfície de um sólido e um fluido (gás ou líquido) em movimento quando eles estiverem sob diferentes temperaturas (FIG. 15).

FIGURA 15 – Convecção de uma superfície para um fluido em movimento



(q : fluxo térmico; T_s : temperatura da superfície; T_∞ : temperatura do fluido)

Fonte: Adaptado de Incropera; DeWitt (2008, p. 2).

O modo de transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos: a transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão) e a energia transferida por meio do movimento global do fluido (INCROPERA; DEWITT, 2008).

Segundo Frota e Schiffer (2007), a intensidade do fluxo térmico envolvido no mecanismo de troca por convecção é dada pela equação (3.3):

$$q_{conv} = h_c (t - \theta) \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (2.3)$$

sendo:

q_{conv} – intensidade do fluxo térmico por convecção (W/m^2);

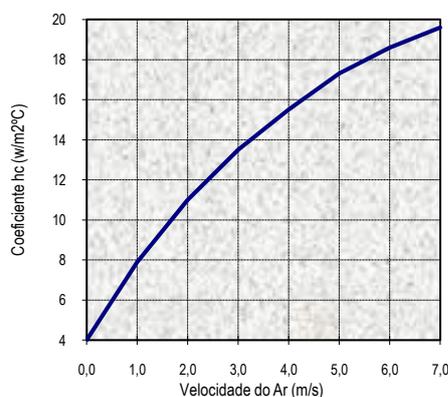
h_c – coeficiente de trocas térmicas por convecção ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$);

t – temperatura do ar ($^\circ C$);

θ – temperatura da superfície do sólido (parede) ($^\circ C$), sendo que $t > \theta$ ou $\theta > t$.

Quando relacionadas às superfícies verticais, as trocas de calor por convecção são ativadas pela velocidade do ar. Nesse caso, mesmo que o movimento do ar advinha de causas naturais, como o vento, o mecanismo de troca entre a superfície e o ar passa a ser considerada convecção forçada. Em superfície horizontal, a convecção é dificultada pelos fluxos ascendentes e descendentes das massas de ar. São adotados como valores médios de convecção entre o ar e as superfícies de uma edificação (CROISSET *apud* FROTA; SCHIFFER, 2007): para superfície vertical, h_c varia de acordo com a velocidade do ar (FIG. 16); em superfície horizontal, $h_c = 1,2$ ($W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$) fluxo descendente e $h_c = 7$ ($W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$) fluxo ascendente.

FIGURA 16 - Variação do coeficiente de convecção h_c

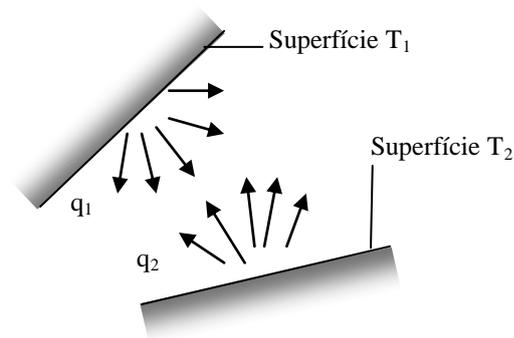


Fonte: Frota e Schiffer (2007, p. 33).

2.7.2.3 Radiação

A radiação térmica é uma forma de transmissão de calor que não necessita de um meio material para sua propagação, pois superfícies com temperaturas diferentes do zero absoluto emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas (FIG. 17). Ao contrário da condução e da convecção, na radiação térmica o transporte de energia é instantâneo e associado a um mecanismo diferente. A energia não é transportada ponto a ponto no interior do meio, mas a partir de troca direta entre as superfícies afastadas e a diferentes temperaturas (INCROPERA; DEWITT, 2008). A radiação ocorre mediante dupla transformação da energia: uma parte do calor do corpo com alta temperatura converte-se em energia radiante, que chega até o corpo com baixa temperatura, onde é absorvida em proporção que depende da superfície receptora, sendo novamente transformada em calor (FROTA; SCHIFFER, 2007; LAMBERTS; GHISI; PAPST, 2000).

FIGURA 17 - Troca de calor por radiação entre duas superfícies



(q_1 e q_2 : intensidades dos fluxos térmicos; T_1 e T_2 : temperaturas das superfícies).

Fonte: Adaptado de Incropera; DeWitt (2008, p. 2).

O fluxo de calor envolvido no mecanismo de troca por radiação será (3.4):

$$q_{rad} = h_r (\theta - \theta_r) \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (2.4)$$

sendo:

q_{rad} – intensidade do fluxo térmico por radiação (W/m^2);

h_r – coeficiente de trocas térmicas por radiação (W/m^2) ($^{\circ}C$);

θ – temperatura da superfície da parede de interesse ($^{\circ}C$);

θ_r – temperatura radiante relativa às demais superfícies nos arredores ($^{\circ}C$).

O coeficiente h_r é um parâmetro simplificado, que resume todos os fatores que interferem nas trocas por radiação, tais como: temperaturas das superfícies, aspectos geométricos e físicos e, principalmente, a emissividade térmica da superfície (FROTA; SCHIFFER, 2007).

2.7.2.4 Trocas de energia por radiação

Neste trabalho, em função do uso da tecnologia da termografia, apenas as formas de radiação e o intercâmbio de energia entre os corpos serão apresentados.

A radiação incidente é toda radiação que atinge um corpo proveniente dos seus arredores. Ela pode ser oriunda de uma fonte especial, tal como o sol, ou de outras superfícies às quais a superfície de interesse esteja exposta. Citam-se quatro formas de troca de calor por radiação: emissão, absorção, reflexão e transmissão. A emissão ocorre quando a energia é liberada pelo material, a absorção quando ele retém a energia, reflexão é quando o material reflete a energia e a transmissão acontece quando a energia atravessa o material. Independentemente das fontes que a geraram, a radiação incidente sobre um corpo pode ocorrer da seguinte forma (INCROPERA; DEWITT, 2008; VERATI, 2011):

- Uma fração da radiação pode ser absorvida – absorptância (α);
- Uma fração da radiação pode ser refletida – refletância (ρ);
- Uma fração da radiação pode ser transmitida – transmitância (τ);

Considerando que um corpo tem certa capacidade ou habilidade para absorver, refletir ou transmitir energia, a soma desses três coeficientes, para um mesmo comprimento de onda, sempre será igual a 1, conforme a equação (3.5) (VERATI, 2011):

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.5)$$

Para materiais opacos (transmitância = 0), essa relação se simplifica para (3.6):

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2.6)$$

Segundo Incropera e DeWitt (2008), uma porção, ou toda a irradiação, pode ser absorvida pela superfície, aumentando, dessa forma, a energia térmica do material. A capacidade ou habilidade que um corpo tem de absorver energia radiante incidente é sempre a mesma que ele tem de emitir sua própria energia em forma de radiação infravermelha, chamada de poder emissivo.

2.7.2.5 Poder emissivo: emissividade

A radiação emitida pela superfície de um material tem sua origem na energia térmica da matéria limitada pela superfície e a taxa na qual a energia é liberada por unidade de área é denominada poder emissivo da superfície. Existe um limite superior para o poder emissivo, que é previsto pela lei de Stefan-Boltzmann e de Planck (teoria do corpo negro). Um corpo negro é um objeto ideal que absorve toda a radiação incidente sobre ele em qualquer comprimento de onda (poder emissivo igual a 1). A relação existente entre a energia emitida por um corpo real, em relação a um corpo negro, sob a mesma temperatura é conhecida como emissividade (ϵ). A emissividade determina a maior ou menor quantidade de energia que um corpo emite em um dado comprimento de onda. Ela depende fortemente da superfície do material e de seu acabamento (INCROPERA; DEWITT, 2008). De forma simplificada, pode-se dizer que emissividade é a capacidade que um corpo tem de emitir radiação térmica, quando comparado a um corpo negro, que tem emissividade igual a 1 (ou seja, tudo que ele recebe ele transmite), conforme mostrado na equação (3.7):

$$\alpha = \epsilon \tag{2.7}$$

sendo:

α – coeficiente de absorvidade ou absorptância

ϵ – coeficiente de emissividade.

A quantidade total de radiação que o corpo emite depende da sua temperatura e da sua emissividade. Um corpo de emissividade elevada irradia mais energia que um corpo com emissividade baixa, à mesma temperatura. A radiação total de saída de um corpo independe de sua fonte original. Além da energia emitida do próprio corpo, existe a

interferência de energias refletidas e transmitidas de outras fontes. Um corpo sempre será capaz de emitir, refletir e transmitir energia (INCROPERA; DEWITT, 2008; VERATI, 2011). A soma dessas energias será igual a 1, expresso pela equação (3.8):

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (2.8)$$

sendo:

ε – coeficiente de emissividade.

ρ – coeficiente de reflexão ou refletância

τ – coeficiente de transmissibilidade ou transmitância

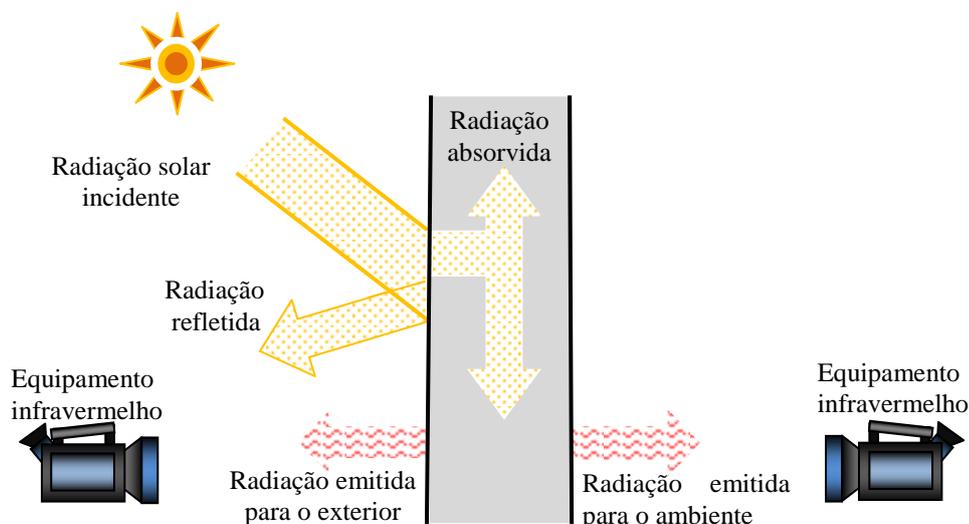
2.7.2.6 Trocas de calor através de paredes opacas

Em paredes opacas de alvenaria expostas à radiação solar e sujeitas a determinada diferença de temperatura entre os ambientes que separam (interior e exterior), os mecanismos de trocas térmicas funcionam da mesma forma, ou seja (FROTA; SCHIFFER, 2007; LAMBERTS; GHISI; PAPST, 2000):

- Parte da energia solar incidente na superfície da alvenaria será refletida para o exterior; o restante é absorvido pela superfície;
- a temperatura superficial externa aumenta, excedendo a temperatura do ar;
- parte da energia é emitida para o exterior por radiação de ondas longas e parte é transmitida para o interior por condução através do material da parede e emitida para o ambiente interno.

A radiação que é liberada para o exterior e para o interior da alvenaria (emissividade) pode ser captada por equipamentos de infravermelho, conforme esquema apresentado na FIG. 18.

FIGURA 18 - Radiação solar em superfícies opacas



Fonte: Adaptado de Frota e Schiffer (2007, p. 42). (Houve alteração na ilustração com acréscimo do equipamento infravermelho)

2.8 Termografia infravermelha

A história da termografia remonta a 1800, quando Willian Herschel (1738-1822), baseando-se nas experiências desenvolvidas por Isaac Newton, decompôs a luz solar por meio de um prisma. Por volta de 1880, os estudos de Samuel Langley levaram-no a fabricar um detector de calor que tinha sua resistência elétrica modificada de acordo com sua temperatura (bolômetro). A termografia propriamente dita nasceu no período pós-guerra como uma técnica de imageamento remoto destinado a atender às necessidades da área militar, cujo objetivo primordial era a localização e rastreamento de alvos a partir de imagens térmicas. Nos anos 50 surgiu o radiômetro, primeiro sistema infravermelho destinado à medição rápida de temperaturas em pontos determinados e em curtas distâncias. Durante as décadas de 1970/80 o desenvolvimento da tecnologia de circuitos integrados possibilitou a fabricação de equipamentos mais leves e fáceis de manejar. A década de 1990 teve destaque especial, devido ao surgimento do detector chamado *Charged Coupled Device* (CCD), dispositivo responsável pela transformação da luz em sinais elétricos, capaz de criar imagens de alta qualidade e baixo ruído. Neste sentido, a evolução da termografia caminha atrelada ao desenvolvimento tecnológico e ao surgimento

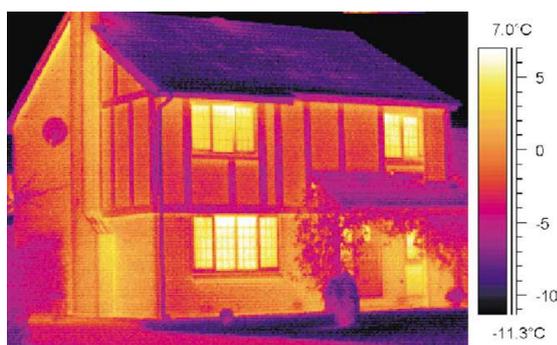
de novos detectores mais ágeis e mais sensíveis (HUDSON, 2006; ROGALSKI, 2003; 2004).

No início deste século, a adoção dos microbolômetros nos sistemas de aquisição de imagens térmicas possibilitou o desenvolvimento de novos detectores e câmeras infravermelhas. Contudo, a termografia ainda é um método emergente no campo dos ensaios não destrutivos e se apresenta como técnica promissora para medição do campo de temperatura da superfície de todos os tipos de material a partir da radiação infravermelha emitida por eles. Por seu caráter não invasivo, ela se apresenta como interessante alternativa para o diagnóstico de defeitos, identificação de anomalias e de falhas em materiais, o que poderia ser de grande valia para o controle de elementos estruturais no campo da construção (HUDSON, 2006; MENDONÇA, 2005; MEOLA *et al.*, 2005).

2.8.1 Descrição do método

A termografia por infravermelho consiste na captação de imagens de calor, não visíveis pelo olho humano. O processo é feito por meio de equipamentos que convertem a energia emitida pela superfície dos materiais em imagens térmicas. São constituídos basicamente de sensores ou detectores de radiação, amplificadores de sinais e um processador. A imagem é obtida pelos detectores sensíveis ao infravermelho, que captam a radiação térmica e a convertem em sinais elétricos. Esses sinais normalmente são baixos e proporcionais ao fluxo de radiação, por isso são amplificados, lidos e processados por meio de *softwares* e são transformados em imagens térmicas ou termogramas (FIG. 19) (SALES, 2008).

FIGURA 19 - Imagem térmica da alvenaria



Fonte: Clark, McCann e Forde (2003).

Neste trabalho, um detector ou sensor é considerado um dispositivo que converte a energia eletromagnética incidente em alguma outra forma de sinal mensurável (CASTANEDO, 2005; HUDSON, 2006). Dependendo da aplicação e dos objetivos desejados, a técnica de imageamento por termografia pode ser dividida em segmentos distintos: termografia qualitativa, quantitativa e analítica. Na termografia qualitativa, as informações obtidas sobre determinado material provêm da análise de diferenças em seus padrões de distribuição térmica. Na termografia quantitativa, as informações obtidas provêm da medição direta das temperaturas associadas aos padrões de distribuição térmica observadas. Já a termografia analítica dedica-se à otimização de métodos de trabalho em inspeções, tratamento estatístico dos resultados obtidos e a tradução dos dados térmicos em termos econômicos e de aumento de qualidade (VERATTI, 2011).

Os termovisores ou câmara termográficas (FIG. 20) possibilitam adequar o campo de visão do aparelho às necessidades específicas de cada observação. Desta forma, elas captam, por meio de lentes intercambiáveis, a radiação infravermelha que é emitida pelo objeto analisado e decodifica (a partir de algoritmos) em tons que variam dos mais escuros para os mais claros. De modo geral, o registro das imagens térmicas gerados pelos sistemas infravermelhos pode ser analógico ou digital, o que permite a ligação do sistema a televisores ou computadores para posterior análise e processamento das informações (SALES, 2008).

FIGURA 20 - Câmera de infravermelho
(termovisor P640)



Fonte: *Flir Systems* (2009).

2.8.2 Técnicas de estimulação para a captação da imagem

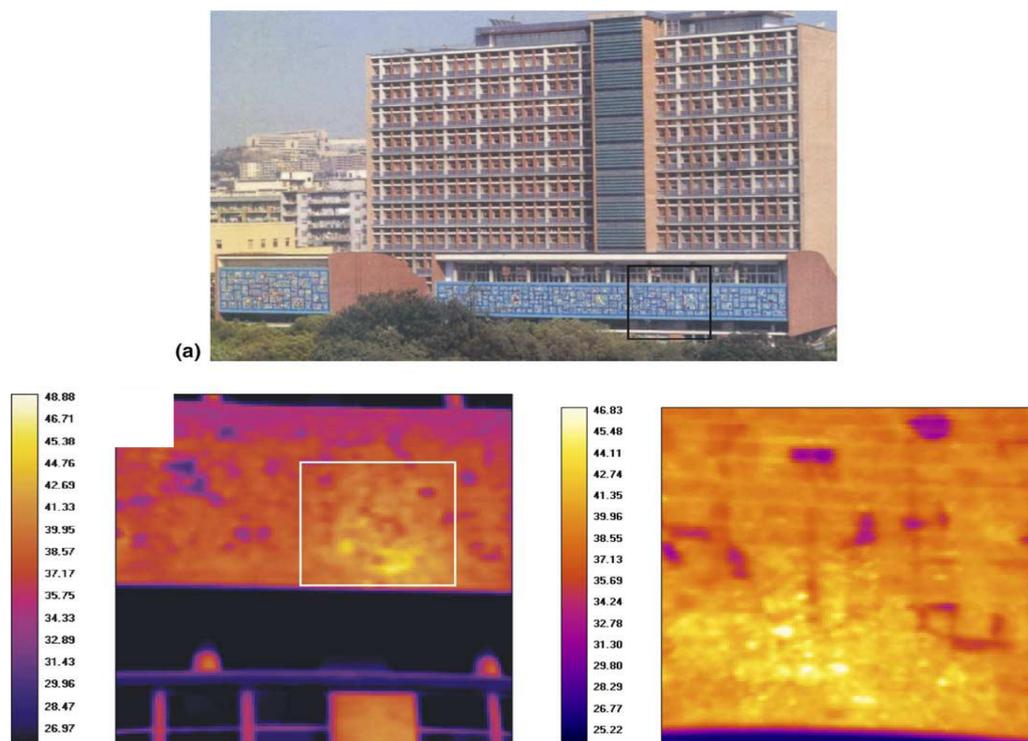
Quando se utilizam os sensores térmicos, a captação da radiação incidente é obtida a partir da estimulação que promove o aquecimento ou resfriamento do objeto. Dependendo da forma como é feita essa estimulação, os sistemas que utilizam sensores térmicos são classificados em passivos e ativos (VERATI, 2011).

2.8.2.1 Técnica de termografia passiva

Nos sistemas passivos, nenhuma estimulação artificial é utilizada, devendo existir uma diferença natural de temperatura entre o objeto em estudo e o meio no qual ele está inserido, que frequentemente está sob temperatura mais elevada. A análise qualitativa é feita por comparação com uma situação padrão, ficando os resultados sujeitos à experiência do avaliador. A técnica permite o acompanhamento sistemático de condições normais de trabalho e possibilita investigação periódica para conhecer e identificar possíveis anomalias invisíveis a olho nu (SALES, 2008; TAVARES, 2006). A análise pelo método passivo conta com as condições naturais da estrutura estudada e do seu entorno, sendo o calor do sol um fator determinante (CERDEIRA *et al.*, 2011; CLARK; McCANN; FORDE, 2003; CORTIZO, 2007; KAROGLU *et al.*, 2011; LIMA; MAGNANI; NUNES, 2007; MAIERHOFER *et al.*, 2006).

Contudo, a técnica é muito utilizada na avaliação de estruturas prediais, na descoberta de fogo em florestas, em programas de pesquisa de eficiência térmica, no monitoramento de tráfego em estradas, na agricultura, na Biologia, na Medicina, na investigação e detecção de gás, em testes de ensaios não destrutivos em geral. Atualmente, essa técnica está sendo utilizada para estudos de fachadas, estudo de conforto ambiental, para inspeção de deteriorações em edifícios, defeitos e delaminações em grandes áreas de concreto, entre outras. Segundo Meola (2005), diferenças de temperatura detectadas por termografia infravermelha e perfis anormais de temperatura indicam um problema potencial relevante a detectar (FIG. 21).

FIGURA 21 - Termogramas de fachadas mostram descolamento



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

2.8.2.2 Técnica de termografia ativa

Na termografia ativa, ao contrário da termografia passiva, um estímulo externo é necessário para gerar diferenças relevantes de temperatura. Em geral, sua aplicação se dá em casos em que se desejem resultados quantitativos. Na termografia ativa, diferentes técnicas de estimulação térmica podem ser empregadas para provocar um fluxo de calor no objeto de estudo, cada qual com características e limitações próprias (MALDAGUE, 2001). A escolha do tipo de estímulo térmico depende das características do objeto a ser testado e do tipo de informação a ser pesquisada. Os tipos de termografia ativa mais usados são: pulsada, modulada ou *lock-in*, pulsada por fase de aquecimento e a vibrotermografia (AGGELIS, *et al.*, 2010; SALES, 2008). A técnica de termografia pulsada é a mais tradicional delas e consiste basicamente na aplicação de pulsos curtos de energia térmica na superfície do objeto em estudo (de 3 ms a 2 s, dependendo do material). Essa estimulação pode ser “quente” ou “fria”. O importante é o estabelecimento de um gradiente de temperatura entre a fonte térmica e o objeto de estudo. A intensidade da estimulação dependerá da diferença de temperatura entre o material em teste e o ambiente no qual ele está inserido (MALDAGUE, 2001; MEOLA *et al.*, 2005; TARPANI *et al.*, 2009).

A termografia modulada, também conhecida como *lock-in*, é baseada no aquecimento oscilante (aplicação de ondas de calor em determinada frequência) de modo que sejam introduzidas ondas térmicas altamente atenuadas e dispersivas dentro do material e próximo da superfície. Essas ondas podem ser geradas e detectadas remotamente (MEOLA *et al.*, 2005).

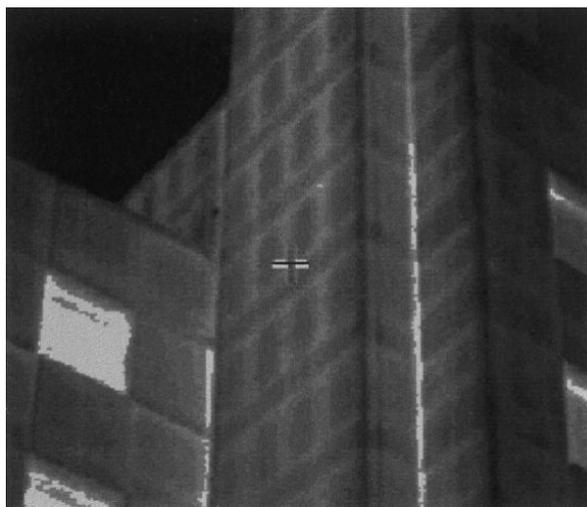
2.8.3 Aplicações da termografia infravermelha

Vem crescendo o campo de aplicação da termografia, desde sua utilização para diagnósticos médicos até determinação de perdas energéticas em fornos industriais. No Brasil, a termografia é muito utilizada por empresas geradoras e distribuidoras de energia elétrica e por empresas especializadas em manutenção industrial para detecção de pontos quentes em dispositivos elétricos, monitoramento da variação de temperatura em caldeiras, fornos e tubulações. Na construção civil a termografia mostra-se eficiente em diagnóstico e doenças de edifícios, como infiltração de água, inspeção de tetos, isolamento, umidade, fungos e em testes de eficiência energética (calefação e refrigeração). Na preservação do patrimônio, a termografia vem, nos últimos anos, sendo estudada como um modo promissor para análise de edifícios antigos a serem restaurados, no estudo da composição de materiais de obra de arte, afrescos, painéis esculturas, entre outros (CORTIZO, 2007; DANESE *et al.*, 2010; KAROGLU *et al.*, 2011; LIMA; MAGNANI; NUNES, 2007; TAVARES, 2006). Lima, Magnani e Nunes (2007) destacam que, apesar de ser uma técnica ainda pouco utilizada em algumas áreas do conhecimento, a termografia demonstra ser importante ferramenta na análise e diagnóstico, quantitativo e qualitativo, para descoberta de efeitos invisíveis aos olhos humanos.

O caráter não destrutivo e não intrusivo da termografia, a alta velocidade de medição e a obtenção de respostas rápidas, assim como a relativa facilidade no manuseio do equipamento, salientam sua utilização em larga escala na inspeção e controle da variação de temperatura dos materiais. Apesar do investimento inicial ainda ser relativamente alto para a aquisição do equipamento, estimativas têm mostrado custo-benefício da razão de 1:4 no uso da termografia em programas de manutenção preventiva com tendência a custos mais baixos no futuro (TAVARES, 2006).

Trabalho desenvolvido por Titman (2001) descreve que, em países de clima frio, a termografia pode ser usada isoladamente ou combinada com outras técnicas para investigação estrutural de edifícios, possibilitando a identificação de linhas de fuga de calor em fachadas cuja estrutura esteja apresentando anomalias, permitindo que o calor interno da edificação escape (FIG. 22).

FIGURA 22 - Termograma mostra perda de calor em fachada



Fonte: Titman (2001).

Estudos do comportamento térmico de vários materiais são relatados em pesquisas recentes com aplicação de termografia infravermelha. Experimentos com amostras compostas de vários tipos de materiais, como cortiça, madeira, *teflon*, cloreto de polivinila (PVC), borracha, poliestireno e outros, são apresentados por Meola, Carlomagno e Giorleo (2004). O artigo destes autores afirma que a termografia pode ser aplicada para identificar camadas diferentes em obras de arte, modificações devido à deterioração natural dos materiais, tratamentos especiais nas superfícies e condições ambientais adversas, o que torna o ensaio promissor para a caracterização de materiais e estudos para restauração e manutenção de patrimônio cultural.

Em outro trabalho, Meola *et al.* (2005) apresentam uma abordagem para avaliação de estruturas de alvenaria utilizando amostras, simulando a construção de protótipos com diferentes materiais (gesso, mármore, calcário). Os resultados mostraram a eficiência da técnica para detecção de defeitos, sendo possível identificar tamanho, posição e natureza da anomalia, bem como variação de consistência e espessura da estrutura dos materiais.

Tavares (2006) propõe uma metodologia para a aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte. A autora utiliza um conjunto de amostras, reproduzindo a estrutura e composição dos materiais empregados na confecção de afrescos e obras de arte sobre madeira. O estudo mostra a aplicação da termografia para identificar umidade, estruturas não visíveis, inclusões não aparentes, materiais de origens diversas, lascamentos das camadas superficiais e características particulares da alvenaria.

Pesquisa realizada por Cortizo (2007) investiga a presença de estruturas ocultas e de anomalias nas edificações do patrimônio histórico cultural brasileiro. O autor evidencia as diferenças resultantes da localização tropical dos prédios estudados e suas características referentes aos materiais e técnicas de construção europeias. E ressalta o valor da utilização da tecnologia do infravermelho em países europeus e sinaliza para a necessidade de assimilação dessa tecnologia no Brasil para a garantia e preservação do patrimônio histórico e cultural brasileiro.

A influência da emissividade nas condições ambientais, cor e refletividade sobre as medições dos ensaios de termografia e a relação entre capilaridade, absorção e secagem de materiais de construção foram estudadas por Barreira e Freitas (2007).

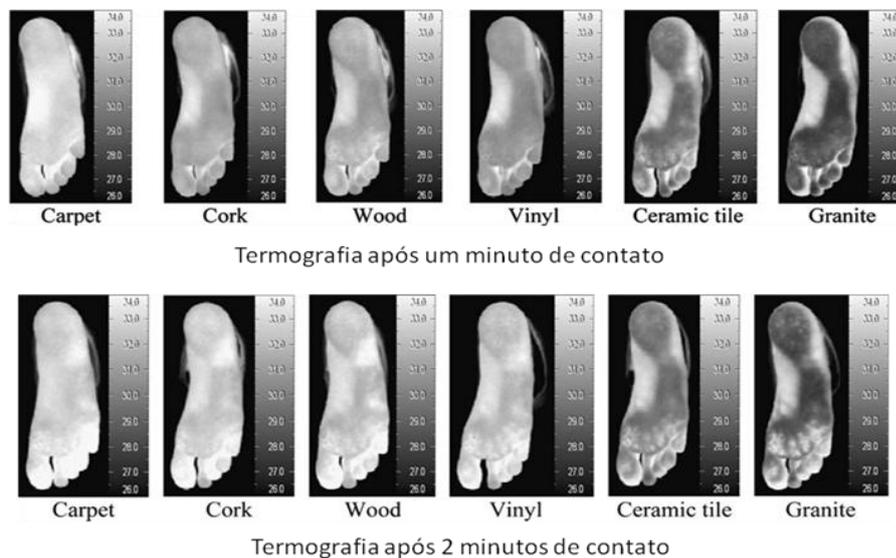
O estudo de Sales (2008) avalia o uso da termografia em materiais cimentícios, enfatizando que é possível identificar falhas, trincas, deteriorações em concretos fabricados com diferentes tipos de materiais e imperfeições. Os resultados evidenciam que a termografia percebe claramente defeitos nas amostras aquecidas ao sol e que melhores resultados são conseguidos durante o resfriamento das mesmas.

2.8.4 Termografia aplicada ao conforto

Na literatura brasileira são incipientes os estudos utilizando imagens em infravermelho para avaliar as condições de conforto dentro do ambiente construído. O Brasil, por ser um país de clima tropical, fica distante dos estudos internacionais, que consideram variações climáticas severas. Barreira e Freitas (2007) apresentam um estudo realizado no *Buildings Physics Laboratory* (LFC), da Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Portugal (FEUP), sobre o conforto proporcionado por diferentes tipos de revestimentos de piso

comumente utilizados no interior das edificações de Portugal e que também são muito comuns no Brasil (carpete, cortiça, vinil, madeira, cerâmica e granito). A termografia foi utilizada para avaliar o grau de interferência da temperatura do material em contato com a sola dos pés descalços. A análise dos termogramas mostra que a termografia foi capaz de detectar a diferença de temperatura que os materiais transmitiram para a sola dos pés dos usuários e a intensidade ao longo do tempo. Pode-se registrar que o carpete induziu altas temperaturas superficiais na sola do pé, seguido de cortiça, madeira, vinil, azulejo cerâmico e, por último, o granito (FIG. 23).

FIGURA 23 - Termogramas da sola dos pés submetida a diferentes tipos de piso



Fonte: Barreira e Freitas (2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, foi feito inicialmente um estudo do desempenho térmico em amostras de blocos de alvenaria estrutural de concreto/cerâmica aos quais foram incorporados EPS e aquecidos artificialmente por aquecedor elétrico. A termografia infravermelha foi utilizada para avaliar a influência do EPS como isolante térmico. Neste primeiro momento, foram analisados amostras de blocos de concreto/cerâmica, sendo comparados a modelos cujo espaço interno foi preenchido com resíduo de EPS. Esses ensaios preliminares tiveram como finalidade a familiarização e ambientação da pesquisadora com o equipamento de termografia e seus parâmetros de teste.

Posteriormente, foi construído um modelo de alvenaria estrutural (blocos de concreto/cerâmica) com dimensões de 120 cm x 120 cm x 15 cm sobre uma base móvel (estrutura metálica) utilizando processo construtivo normalmente utilizado no Brasil. Cuidado adicional foi necessário para obter um modelo estrutural o mais próximo possível da realidade da construção convencional. A plataforma móvel teve a função de facilitar o deslocamento do modelo de alvenaria de forma a permitir intensa insolação durante todo o período de teste, o que poderia ser inviabilizado se o modelo fosse fixo.

3.1 Materiais

Para fabricação das amostras foram utilizados blocos de alvenaria estrutural (cerâmica/concreto) com dimensões de 14 cm x 19 cm x 39 cm e resistência mecânica à compressão de 4,5 MPa. Parte dos blocos de cerâmica foi doada pela empresa Tijolos Jacarandá e parte pelas Cerâmicas Braúnas. Os blocos de concreto foram adquiridos da empresa Blocos Sigma. O EPS em pérolas de aproximadamente 0,2 cm de diâmetro foi adquirido no comércio de Belo Horizonte. Utilizaram-se cola branca e amido de milho como aglutinante para as pérolas de EPS (FIG. 24). Para construção do modelo de alvenaria, empregou-se, além dos blocos, argamassa de assentamento traço 1:1:6, sendo um de cimento CPIII RS, um de cal e seis de areia comum lavada. O fator água/cimento foi de 0,5.

FIGURA 24 - Materiais utilizados na fabricação das amostras e do modelo de alvenaria



a) EPS em pérolas



b) Blocos de concreto e de cerâmica



c) Areia natural lavada



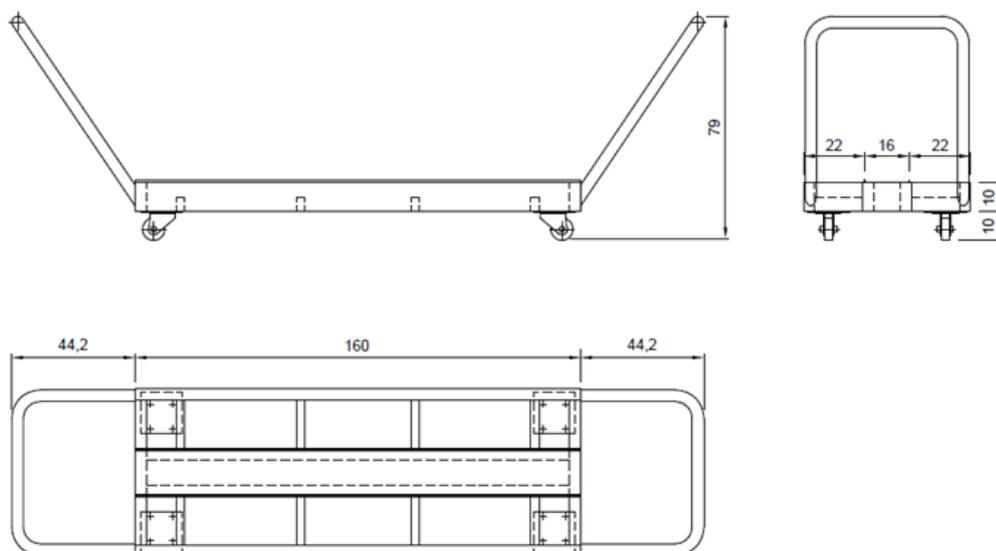
d) Cimento CPIII RS



e) Cal

A plataforma móvel foi construída em estrutura metálica, com dimensões de 160 cm x 60 cm (FIG. 25). Utilizaram-se tubos de aço retangulares de 10 cm x 4 cm e de 5 cm x 3 cm, tubos redondos de 4,2 cm de diâmetro, uma chapa dobrada em U de 16 cm x 10 cm x 160 cm e quatro rodízios de 3 polegadas montados sobre suportes *Schioppa* com capacidade para suportar 170 kg cada.

FIGURA 25 - Representação esquemática da plataforma móvel



3.1.1 Caracterização dos blocos de concreto e de cerâmica

A caracterização física dos blocos de concreto e de cerâmica foi feita em função de seu dimensionamento e volume de seus vazios conforme as normas NBR 15270-2 (2005) e NBR 6136 (2007). As propriedades dos materiais necessárias para a avaliação do desempenho térmico por prescrição, densidade e condutividade térmica, foram determinadas em laboratório, através da verificação da massa e volume (deslocamento da água) e do método de pulso de energia. As massas dos blocos foram determinadas a partir da densidade e do volume. As características referentes a argamassa de assentamento foram retiradas da norma NBR 15220-2 (2005). Os dados relativos à caracterização foram baseados no trabalho de SANSÃO (2011).

3.1.2 Avaliação do desempenho térmico

A avaliação do desempenho térmico por prescrição foi feita determinando-se os valores de resistência (R), capacidade térmica (C_T), transmitância (U), atraso térmico (ϕ) e fator de ganho de calor solar (FS_o). Para tanto, utilizou-se o “Programa para Cálculo da Elementos e Componentes de Alvenarias” desenvolvido pela Universidade Estadual de Campinas – Unicamp. O desenvolvimento do aplicativo de cálculo das propriedades térmicas da parede são descritos por MOREIRA (2004). Os cálculos estão baseados nas equações apresentadas na NBR15220-2 (2005) como mostrado a seguir.

A resistência térmica, R , é dado pela expressão 3.1:

$$R = e / \lambda \quad (3.1)$$

Onde: e é a espessura da parede em metros; λ é a condutividade térmica do material, em W/mK.

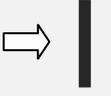
A resistência térmica ambiente a ambiente, R_T , ou seja, do ambiente externo da parede até o ambiente interno da edificação, é dado pela expressão 3.2:

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (3.2)$$

Onde: R_{se} e R_{si} são as resistências superficiais externa e interna e R_t é a resistência térmica de superfície a superfície.

Os valores das resistências superficiais externa e interna recomendados pela norma NBR15220-2 (2005) são dados pela TABELA 2.

TABELA 2 – Resistência térmica superficial interna e externa

R_{si} (m ² .K/W)			R_{se} (m ² .K/W)		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
					
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

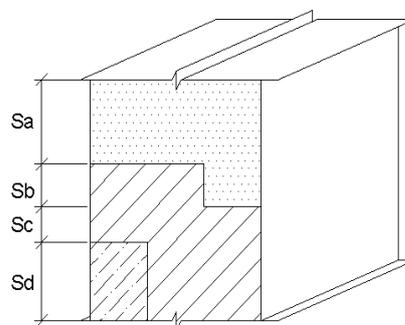
Fonte: NBR 15220-2 (2005)

A resistência térmica total de superfície a superfície, R_t , de um bloco plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, conforme FIG. 26, é dado pela expressão 3.3:

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (3.3)$$

Onde: R_a, R_b, \dots, R_n são as resistências térmicas de superfície a superfície para cada seção (a,b,...,n); A_a, A_b, \dots, A_n são as áreas de cada seção.

FIGURA 26 – Seções de um componente com camadas homogêneas e não homogêneas



A resistência térmica de superfície a superfície para cada seção, R_n , é o somatório das resistências das n camadas homogêneas e câmaras de ar que a compõe determinada pela expressão 3.4:

$$R_n = R_{t1}, R_{t2}, \dots, + R_{tn} + R_{ar1}, R_{ar2}, \dots, + R_{arn} \quad (3.4)$$

Onde: $R_{t1}, R_{t2}, \dots, R_{tn}$ são as resistências das n camadas homogêneas; $R_{ar1}, R_{ar2}, \dots, R_{arn}$ são resistências das câmaras de ar.

Para as câmaras de ar dentro dos blocos, que são camadas de ar não ventiladas, a resistência térmica do ar varia conforme a emissividade da parede, de acordo com a TABELA 3, a espessura da camada e a direção do fluxo, conforme mostrado na TABELA 4.

TABELA 3 – Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiações a temperatura comum (ondas longas)

Tipo de Superfície	α	ϵ
Concreto aparente	0,65/0,80	0,85/0,95
Telha de Barro	0,75/0,80	0,85/0,95
Tijolo Aparente	0,65/0,80	0,85/0,95
Reboco Claro	0,30/0,50	0,85/0,95
Pintura Branca	0,20	0,90

Fonte: NBR 15220-2 (2005)

TABELA 4 – Resistência térmica de camadas de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura

Natureza da superfície da camada de ar	Espessura “e” da camada 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 (2005)

A transmitância térmica, U , é o inverso da resistência térmica total, R_T , conforme expressão 3.5:

$$U = 1/R_T \quad (3.5)$$

Onde: U é a transmitância térmica de componentes; R_T é resistência térmica total.

A capacidade térmica, C_T , de componentes é determinada conforme a expressão 3.6:

$$C_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \rho_i \quad (3.6)$$

Onde: λ é a condutividade térmica do material da camada i^a ; R é a resistência térmica da camada i^a ; e é a espessura da camada i^a c é o calor específico do material da camada i^a ; ρ é a densidade de massa aparente do material da camada i^a .

A capacidade térmica, C_T , de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela expressão 3.7:

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \quad (3.7)$$

Onde: C_{Ta} , C_{Tb} , ..., C_{Tn} são as capacidades térmicas do componente para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela expressão anterior e A_a , A_b , ..., A_n são as áreas de cada seção.

O atraso térmico, ϕ , de um componente formado por diferentes materiais superpostos em "n" camadas paralelas às faces (perpendiculares ao fluxo de calor), varia conforme a ordem das camadas e é determinado pela expressão 3.8:

$$\phi = 1,382 \cdot R_t \sqrt{B_1 + B_2} \quad (3.8)$$

Onde: R_t é a resistência térmica de superfície a superfície do componente; B_1 é dado pela expressão 3.9 e B_2 é determinado pela expressão 3.11.

$$B_1 = 0,226 \frac{B_o}{R_t} \quad (3.9)$$

Onde: R_t é a resistência térmica de superfície a superfície do componente; B_o é dado pela expressão 3.10.

$$B_o = C_r - C_{Text} \quad (3.10)$$

Onde: C_T é a capacidade térmica total do componente; C_{Text} é a capacidade térmica externa do componente

$$B_2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{R_t} \right) \cdot \left(R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10} \right) \quad (3.11)$$

Onde: λ é a condutividade térmica do material; c é o calor específico do material; ρ é a densidade de massa aparente do material; R_t é a resistência térmica; R_{tex} é a resistência térmica da face externa.

O fator de ganho de calor solar de elementos opacos, FS_o , admitindo R_{se} constante e igual a 0,04 é dado pela expressão 3.12:

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha \quad (3.12)$$

Onde: FS_o é o fator solar de elementos opacos em percentagem; U é a transmitância térmica do componente; α é a absorvância à radiação solar.

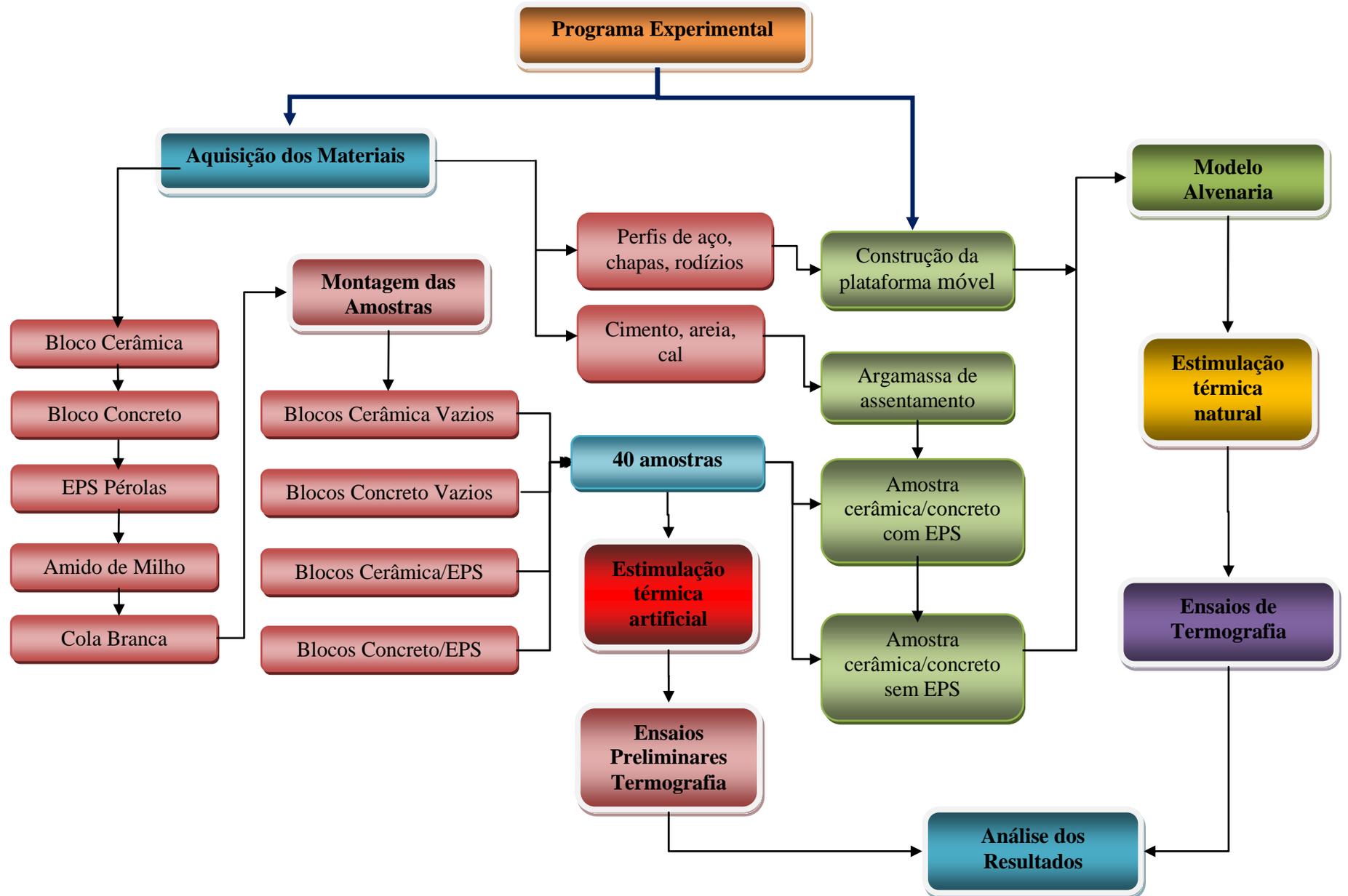
3.2 Métodos

O método empregado nesta pesquisa foi essencialmente experimental e pode ser descrito nas seguintes etapas:

- Ensaios preliminares
- Modelo de alvenaria

Estas atividades foram desenvolvidas nos laboratórios da Universidade do Estado de Minas Gerais UEMG e a representação esquemática das etapas do trabalho experimental é apresentada na FIG. 27.

FIGURA 27 - Representação esquemática das etapas de trabalho



3.2.1 Ensaios preliminares

Após a aquisição dos materiais, foram preparadas as amostras de blocos de concreto/cerâmica, com e sem o preenchimento de poliestireno expandido. Para a escolha do aglutinante e as proporções adequadas da mistura, foram feitos quatro cubos de papelão encorpado para conter EPS misturado com o amido/cola. Para cada tipo de aglutinante foram feitas duas amostras nas proporções de 10 e 25% do material aglutinante e 10 e 25% de água da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), para a mesma quantidade de pérolas. As amostras permaneceram em repouso e o excesso de água/material aglutinante foi drenado naturalmente durante a secagem (FIG. 28). As amostras contendo amido de milho, após uma semana de secagem, desenvolveram uma camada de fungos (bolor). Optou-se, então, pela cola branca na proporção de 100% de pérolas de EPS, 10% de material aglutinante e 10% de água da COPASA.

FIGURA 28 - Amostras de EPS utilizando aglutinante de amido de milho e cola branca



Definido o tipo de aglutinante, as cavidades internas dos blocos de cerâmica e de concreto foram preenchidas com a mistura de EPS em pérolas e o material aglutinante. Depois de drenado o excesso de água/material aglutinante, as mostras permaneceram por sete dias ao ar livre para secagem (FIG. 29). Para tanto, utilizaram-se blocos com dimensões de 14 cm x 19 cm x 39 cm e meio-blocos de 14 cm x 19 cm x 19 cm de alvenaria estrutural de concreto/cerâmica, normatizados pelas NBR6136 (ABNT, 2007) e NBR15270 (2005a), respectivamente, em um total de 40 amostras.

FIGURA 29 - Amostras preenchidas com EPS e prontas para teste



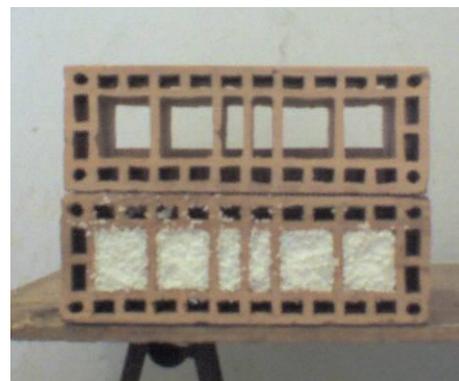
Depois da secagem, as amostras foram preparadas em pares para o teste e transportadas para o Laboratório Integrado de Modelagem, Prototipagem e Ensaio Universais (LEMP) da Escola de *Design* da Universidade do Estado de Minas Gerais. A montagem utilizada para os ensaios foi composta de blocos vazios sobre blocos preenchidos com EPS, variando o tipo de bloco (cerâmica/concreto), conforme FIG. 30 e 31.

FIGURA 30 - (a) Amostras de cerâmicas com e sem EPS;

(b) vista de topo amostra pronta para teste



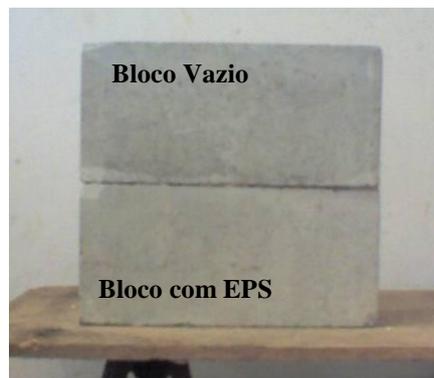
(a)



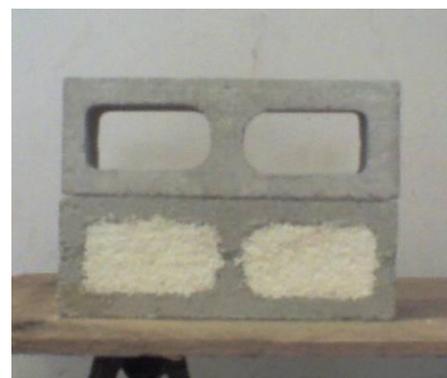
(b)

FIGURA 31 - (c) Amostras de concreto com e sem EPS;

(d) vista de topo amostra pronta para teste



(c)



(d)

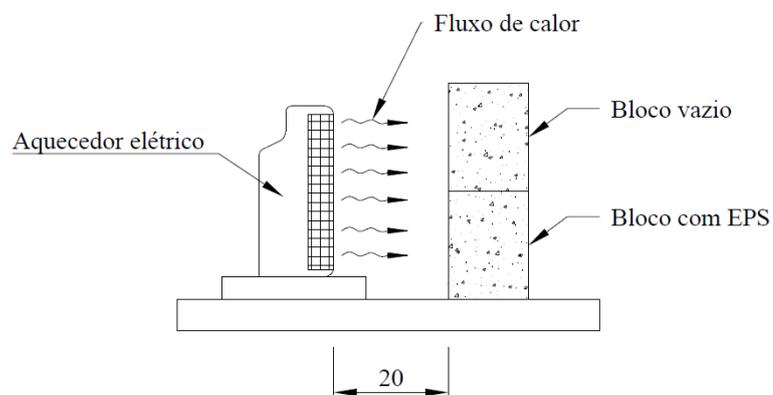
Para realização dos testes, as amostras foram posicionadas de forma tal que as leituras iniciais fossem feitas sem a interferência de fonte indireta de calor. A temperatura ambiente no momento dos testes foi de 29°C. Em seguida, um aquecedor elétrico de resistência cerâmica, *DeLonghi - Living Innovation CE* - 110V ~ 60Hz 1300W (FIG. 32), foi utilizado para estimular artificialmente as amostras e elevar a temperatura.

FIGURA 32 - Aquecedor elétrico
DeLonghi - Living Innovation



Durante a estimulação, as amostras foram posicionadas à distância de cerca de 20 cm do aquecedor elétrico e foram estimuladas por 30 minutos, conforme esquema apresentado na FIG. 33.

FIGURA 33 – Esquema de aquecimento das amostras



A câmera foi posicionada à distância de 150 cm das amostras e as imagens termográficas foram registradas antes e após o aquecimento dos blocos. Também foi registrada uma

imagem de topo do conjunto, para perceber o calor transiente dentro do material. A câmera empregada nesta pesquisa foi uma *Thermacam P640, high definition* (FIG. 34), com detector de 640 x 480, 307.000 pixels de resolução, escala de temperatura de -40°C a 500°C e precisão de 2° ou 2% da leitura de medição. Esse equipamento infravermelho opera na faixa espectral (comprimento de onda) entre 7,5 e 13 μm e foi calibrado para captar a energia térmica correspondente à emissividade de 0,95 (valor próximo de 0,93, que é sugerido por Incropera e DeWitt, 2008, para o concreto). O equipamento utilizado nesta pesquisa foi disponibilizado pelo Centro de Estudos em *Design* e tecnologia (CEDtec) da Universidade do Estado de Minas Gerais e aferido pelo fabricante.

FIGURA 34 - Câmera termográfica infravermelho:

Flir modelo P640



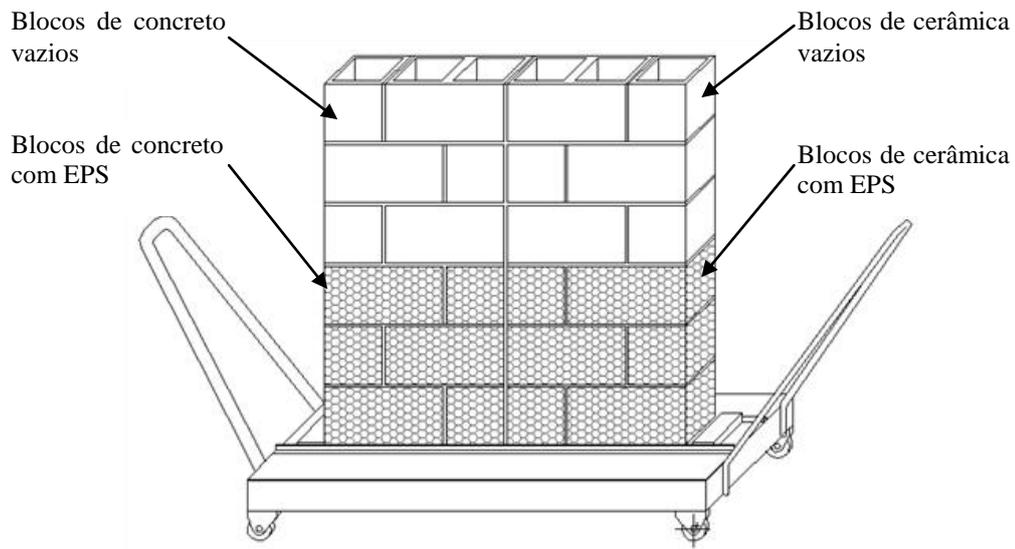
As imagens termográficas foram feitas com a supervisão de um técnico credenciado nível II da mesma Universidade e seguiu os procedimentos indicados pelo fabricante e pela NBR 15572/2008 (ABNT, 2008).

3.2.2 Modelo de alvenaria

Após a montagem e secagem total das amostras de blocos de concreto/cerâmica e dos ensaios preliminares, foi construído o modelo de alvenaria estrutural sobre a plataforma móvel. O modelo foi construído com blocos de concreto/cerâmica compondo uma parede com quatro áreas distintas, duas áreas de blocos concreto/cerâmica vazios e duas áreas de blocos concreto/cerâmica contendo EPS em seu interior. O esquema está apresentado na

FIG. 35. Os blocos foram unidos com argamassa de assentamento (traço 1:1:6), com espessura média de 1 cm.

FIGURA 35 - Representação esquemática do modelo de alvenaria estrutural composto de blocos de concreto, de cerâmica, vazios e com preenchimento de EPS



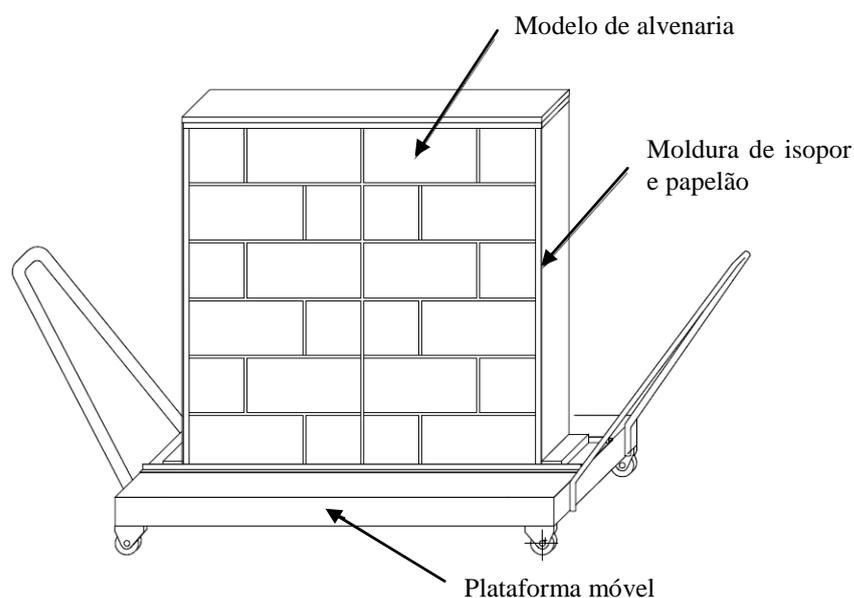
A parede de alvenaria foi construída por profissional da área (pedreiro), utilizando-se o método tradicional de assentamento (FIG. 36). A estrutura obedeceu à composição de blocos preenchidos com EPS nas três primeiras fiadas e blocos vazios nas fiadas superiores. O período de cura da alvenaria foi de 28 dias.

FIGURA 36 - Sequência da construção do modelo de alvenaria



As laterais do modelo foram protegidas com moldura de poliestireno expandido em chapa medindo 1,5 cm x 15 cm, fixada sobre papel cartão (FIG. 37). A moldura teve a finalidade de isolar a insolação indireta recebida pelas laterais do modelo.

FIGURA 37 - Representação esquemática da proteção de EPS da lateral da alvenaria estrutural, construída sobre a plataforma móvel



Os testes foram realizados em Belo Horizonte, no mês de maio, em dia ensolarado, céu aberto e sem nuvens, temperatura ambiente em torno de de 27 °C, umidade relativa do ar 57%. O modelo recebeu insolação direta frontal por seis horas (de 10 às 16 horas), período em que foi feito o registro das imagens termográficas. A câmera foi posicionada perpendicularmente em relação ao modelo (FIG. 38) e o foco foi ajustado para obter melhor nitidez da imagem. Foi determinada distância de 2 metros entre a câmera e o modelo. Imagens foram obtidas em três momentos em cada lado das superfícies da alvenaria. A primeira às 10 horas da manhã, antes da incidência solar. A segunda às 14 horas e a terceira às 16 horas.

FIGURA 38 - Posicionamento da câmera para realizar as medições



Durante os testes o modelo foi deslocado de forma a acompanhar o movimento dos raios solares e recebeu insolação plena em uma das superfícies (FIG. 39).

FIGURA 39 - Insolação do modelo



No momento da captura das imagens, foi colocada uma lona escura ao fundo para tentar diminuir as interferências e fontes de reflexão (FIG. 40).

FIGURA 40 - Modelo preparado para teste:
fundo escuro



Também foi verificada a temperatura refletida do local de medição com o intuito de conhecer o processo. O manual do *Infrared Training Center* (ITC) sugere que a temperatura ambiente refletida seja verificada, regulada e compensada corretamente para materiais de emissividade baixa e para longas distâncias ou quando a temperatura do objeto esteja relativamente próxima da do ambiente. Ele ressalta que, apesar das diferentes condições do entorno, é difícil identificar claramente a influência dessa compensação sobre a temperatura refletida. Contudo, quando as variações de temperatura refletida são reduzidas, os valores da temperatura do objeto não sofrem alterações muito significativas.

Para verificar a temperatura aparente refletida do local, foi realizada análise simplificada com o auxílio de uma folha de alumínio polido de elevada reflexão e baixa emissividade (0,05) (FIG. 41). A câmera foi ajustada com o valor da temperatura refletida igual a zero e com valor de emissividade igual a um, sendo comparada com uma fita adesiva de emissividade conhecida 0,95. A folha foi posicionada no mesmo plano de medição da imagem e foi gravada em infravermelho.

FIGURA 41 - Teste para verificar a temperatura aparente refletida do local de medição



4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos com os métodos descritos no capítulo 3 e suas respectivas análises são apresentados a seguir.

4.1 Caracterização dos Materiais

As propriedades dos materiais (TABELA 5) foram determinadas em laboratório por SANSÃO (2011) e apresentadas pela norma NBR15220-2 (2005).

TABELA 5 – Propriedades dos materiais determinadas em laboratórios e dadas pela NBR15220-2 (2005)

	Condutividade (W/(m.k))		Densidade (kg/m ³)	
	Laboratório	Norma	Laboratório	Norma
Concreto	1,8	1,75	2300	2200 - 2400
Cerâmica	0,7	0,7 - 0,9	1300	1300 - 2400
Argamassa	-	1,05	-	2000

Fonte: Sanção (2011)

Observa-se que os valores experimentais referentes ao concreto e a cerâmica são coerentes com os relatados na norma NBR15220-2 (2005).

Os resultados da análise dimensional dos blocos de concreto e de cerâmica são apresentados conforme FIG.42 e 43. O bloco de concreto com 14 cm de largura tem 10 cm de espessura de câmara de ar, e o bloco de cerâmica ao contrário dos de concreto, apresentam variação da geometria interna.

FIGURA 42 - Dimensões do bloco de concreto

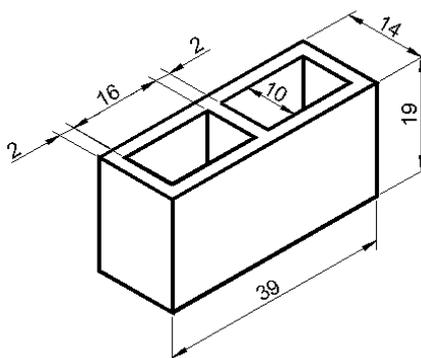
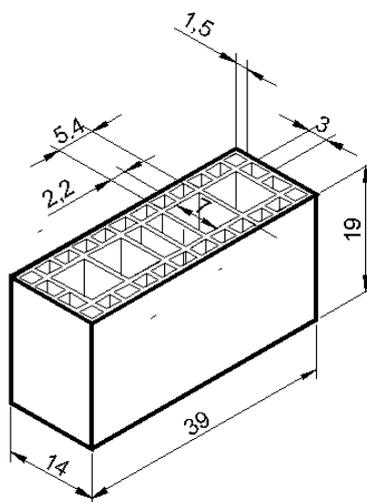


FIGURA 43- Dimensões do bloco de cerâmica



A TABELA 6 sintetiza as caracterizações geométricas ilustradas nas FIG. 42 e 43 e apresenta os resultados obtidos referentes as massas dos blocos determinadas em laboratório por SANSÃO (2011).

TABELA 6 – Características dos blocos

Material	Espessura (cm)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Massa Laboratório (kg)
Bloco de cerâmica	14	19	39	6,38
Bloco de concreto	14	19	39	9,44

Fonte: Sanção (2011)

Os resultados indicam que os blocos de concreto apresentam maior massa que os blocos cerâmicos, ou seja, incorporam maior quantidade de materiais para uma mesma família de blocos.

4.2 Avaliação do desempenho térmico

Os valores relativos à resistência térmica, transmitância térmica (U), capacidade térmica e atraso térmico, apresentados na TABELA 7, foram calculados por meio do Programa para Cálculo de Elementos e Componentes de Alvenarias, considerando paredes de blocos de concreto e de blocos de cerâmica sem reboco. O fator de ganho de calor solar (FS_o) foi

obtido pela expressão 3.12, considerando $\alpha = 0,75$ para superfícies de concreto aparente e cerâmica, conforme TABELA 3.

TABELA 7 – Resistência térmica, Capacidade térmica, Transmitância térmica, Atraso térmico e Fator de ganho solar

Material	Resistência térmica total (m ² . K/W)	Capacidade térmica (KJ/M ² . K)	Transmitância Térmica - U (W/m ² . K)	Atraso Térmico - ϕ (Horas)	Fator Solar - FS _o (%)
Bloco de cerâmica	0,445	39,2	2,24	1,84	6,72
Bloco de concreto	0,321	115	3,12	2,09	9,36

Os resultados encontrados para resistência térmica, transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico indicam que os blocos de cerâmica quando comparados com os de concreto apresentam maior desempenho térmico.

4.3 Análise dos resultados de termografia

A partir das imagens termográficas e informações armazenadas na câmera, os dados foram analisados utilizando-se o *software ThermaCAM™ QuickReport 1.2 SP1 Flir Systems* (2009). Este *software*, além de analisar, tratar e classificar permite o armazenamento dos dados a partir de relatórios como o exemplificado na FIG. 44. O programa também tem interface com o Excel, o que possibilita a construção de gráficos e tabelas.

FIGURA 44- Relatório dos dados da imagem termográfica

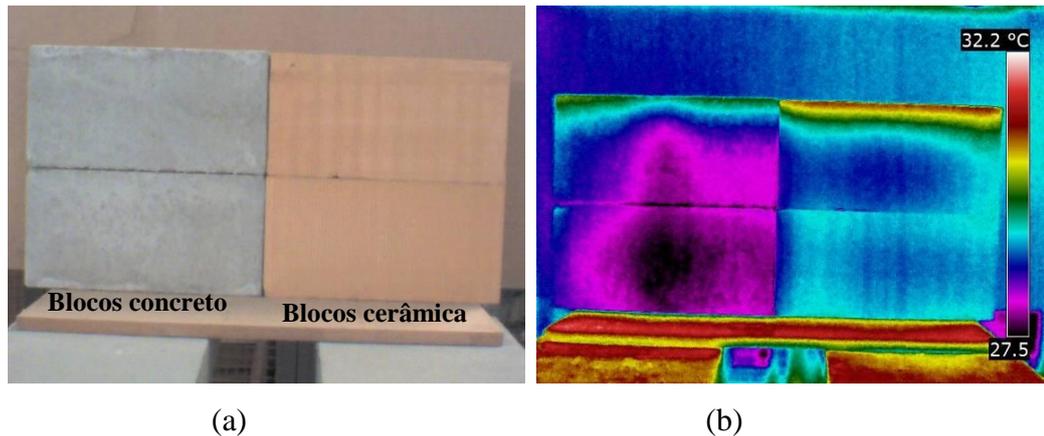


4.3.1 Ensaios e análises preliminares

A FIG. 45 apresenta o termograma dos blocos de concreto/cerâmica em temperatura ambiente e sem interferências de estimulação artificial. É possível detectar temperaturas variando de 27,5 a 32,2 °C, conforme pode ser observado na escala de temperaturas do lado direito da imagem termográfica. A análise visual da imagem permite verificar que a

intensidade da cor nos blocos indica que a temperatura é mais elevada na cerâmica do que no concreto. Na parte superior do conjunto a temperatura ficou mais elevada, porque as amostras estiveram apoiadas em superfícies com temperaturas diferentes antes dos testes.

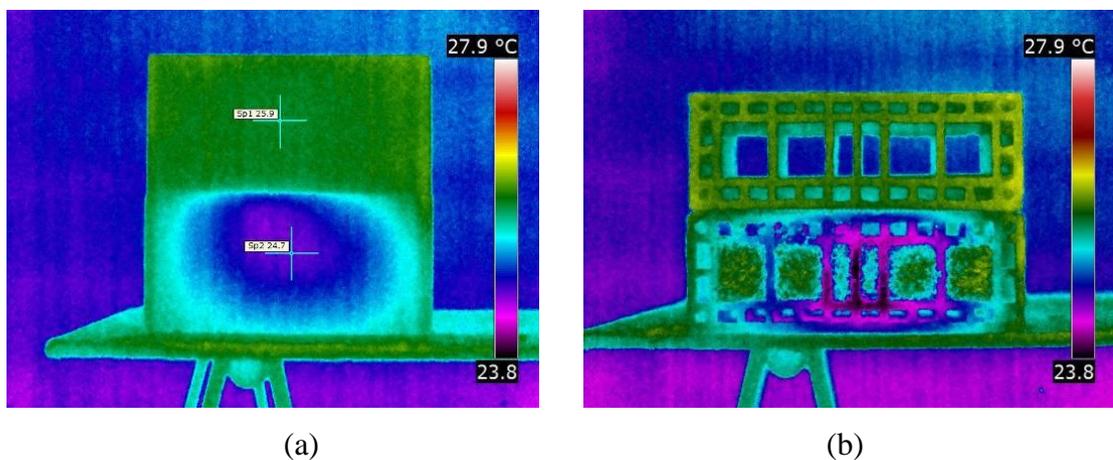
FIGURA 45 - (a) Blocos de alvenaria estrutural; (b) termograma das amostras de concreto e cerâmica



Na FIG. 46 acompanha-se a montagem dos blocos de cerâmica: um bloco com EPS e outro vazio antes do aquecimento (vista frontal e de topo). As imagens termográficas sugerem temperaturas distintas. Foi determinado um ponto de leitura central em cada amostra. O bloco contendo EPS exibiu temperatura de 24,7 °C e o bloco vazio 25,9 °C. A temperatura no bloco vazio foi de 1,2 °C - mais elevada do que no preenchido com EPS, o que pode ser percebido também na imagem de topo.

FIGURA 46 - Termograma de amostras de cerâmica antes do aquecimento:

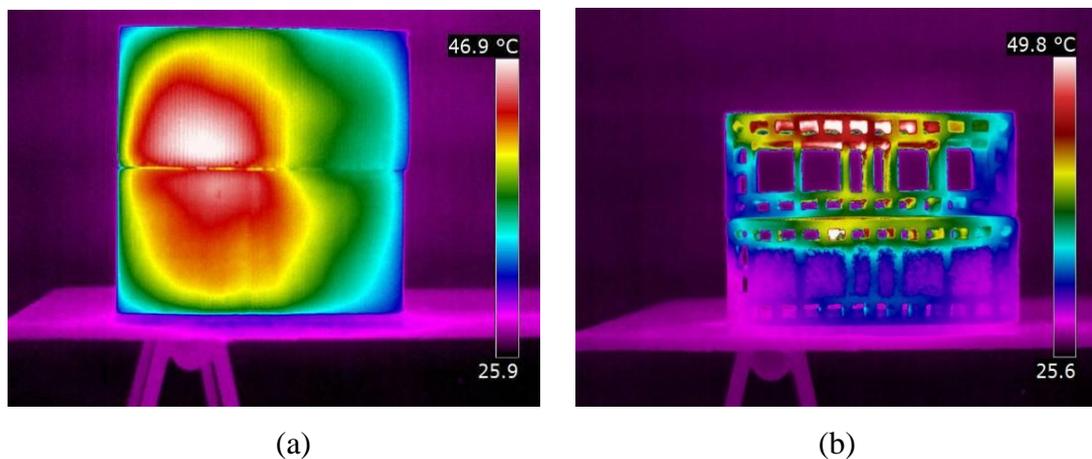
(a) vista frontal (b) vista de topo



Após a exposição das mesmas amostras ao calor do aquecedor elétrico (30 minutos), as imagens termográficas foram registradas na superfície que recebeu diretamente o calor (FIG. 47). Experimento semelhante foi executado por Sales *et al.* (2010b) em blocos de concreto. O termograma mostra que, nos blocos contendo EPS e nos blocos vazios, a temperatura superficial foi diferente (máxima de 46,9 °C e mínima de 25,9 °C). Apesar da proximidade do aquecedor elétrico, nota-se diferença que pode ser percebida também na vista de topo.

FIGURA 47 - Termograma de amostras de cerâmica após o aquecimento:

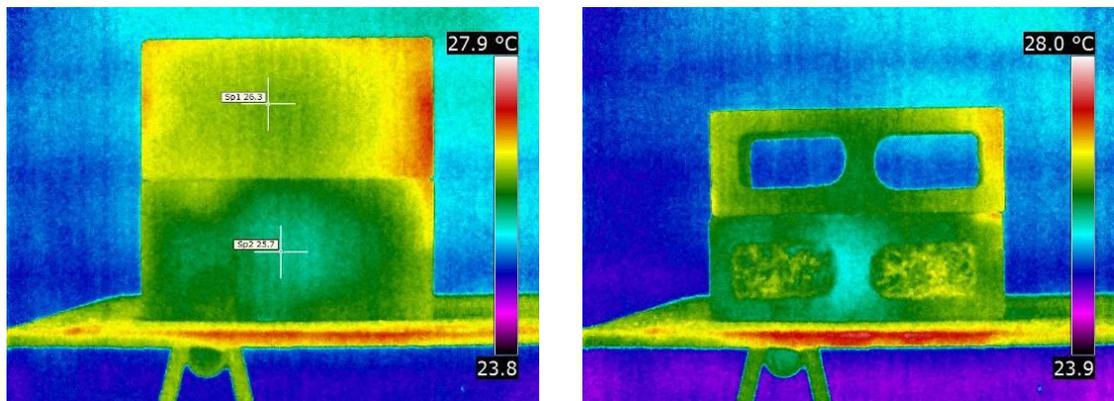
(a) vista frontal (b) vista de topo



Para as amostras de concreto o procedimento foi semelhante. A análise visual da imagem termográfica (FIG. 48), em temperatura ambiente, mostra que existe diferença de temperatura entre os dois blocos, o que foi confirmado pela leitura pontual feita em cada amostra. O bloco com EPS apresentou temperatura de 25,7 °C e o bloco vazio 26,3 °C, diferença de 0,6 °C. Na imagem de topo destaca-se que o EPS contribuiu para manter a estrutura do bloco com temperatura mais baixa.

FIGURA 48 - Termograma de amostras de concreto antes do aquecimento:

(a) vista frontal (b) vista de topo



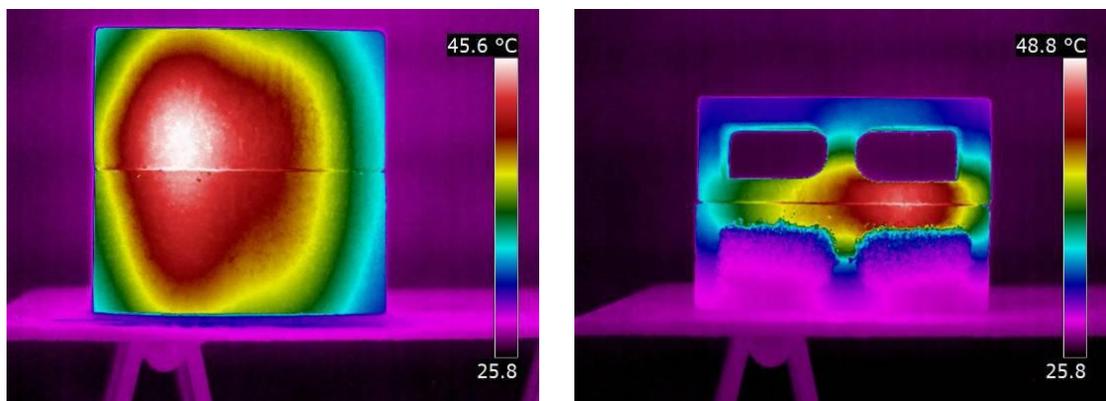
(a)

(b)

Após o aquecimento, as amostras de concreto apresentaram gradiente de temperatura bastante semelhante para as amostra com e sem EPS (FIG. 49). Essa imagem do lado aquecido da amostra sugere que a fonte de calor pode ter saturado o material. Isto fica evidente pela temperatura em torno de 46 – 48 °C. A vista de topo descreve que o aquecimento da superfície do material caminhou de forma semelhante nas duas amostras de concreto. Ainda analisando a vista de topo, percebe-se, pela intensidade da cor, que a temperatura é mais baixa na superfície oposta do material.

FIGURA 49 - Termograma de amostras de cerâmica após o aquecimento:

(a) vista frontal (b) vista de topo



(a)

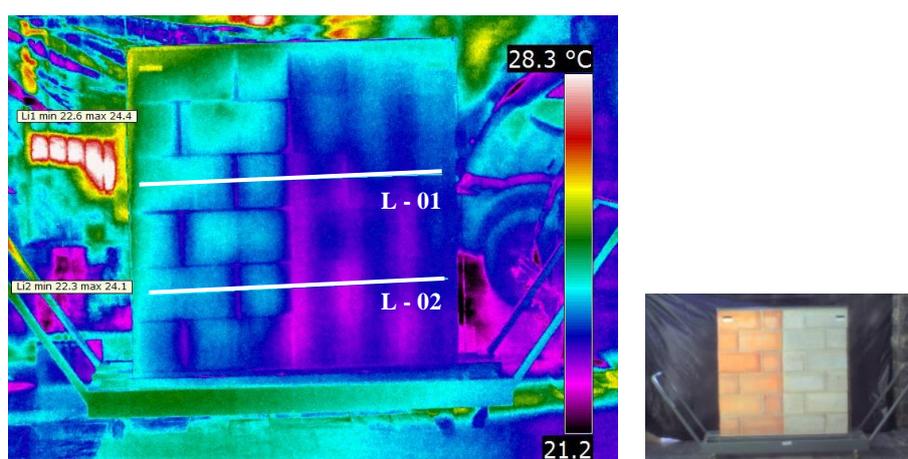
(b)

4.3.2 Respostas térmicas da alvenaria antes da insolação

A partir dos ensaios preliminares foi possível estabelecer critérios mais claros para análise do modelo de alvenaria estrutural. A temperatura superficial foi captada pelo equipamento de termografia e o *software* foi utilizado para gerar gráficos ao longo de linhas de perfil (L-01 e L-02) determinadas na superfície em estudo (FIG. 50). As diferentes cores apresentadas no termograma permitem que se faça uma análise qualitativa da imagem e estime as diferentes temperaturas das superfícies dos blocos, utilizando como referência a escala de cores do lado direito do termograma.

A FIG. 50 mostra o termograma do modelo antes de receber insolação (superfície que vai receber a insolação). A análise da imagem permite identificar duas regiões distintas, nas quais a cor azul-ciano se refere à região dos blocos de cerâmica e a cor rubra, os blocos de concreto. A alvenaria de cerâmica apresenta temperatura inicial mais elevada que a dos blocos de concreto. No entanto, percebe-se ligeiro aumento de temperatura na parte superior do modelo. Isso possivelmente está relacionado ao fato de que o material mais frio tende a entrar em equilíbrio com o ambiente mais quente.

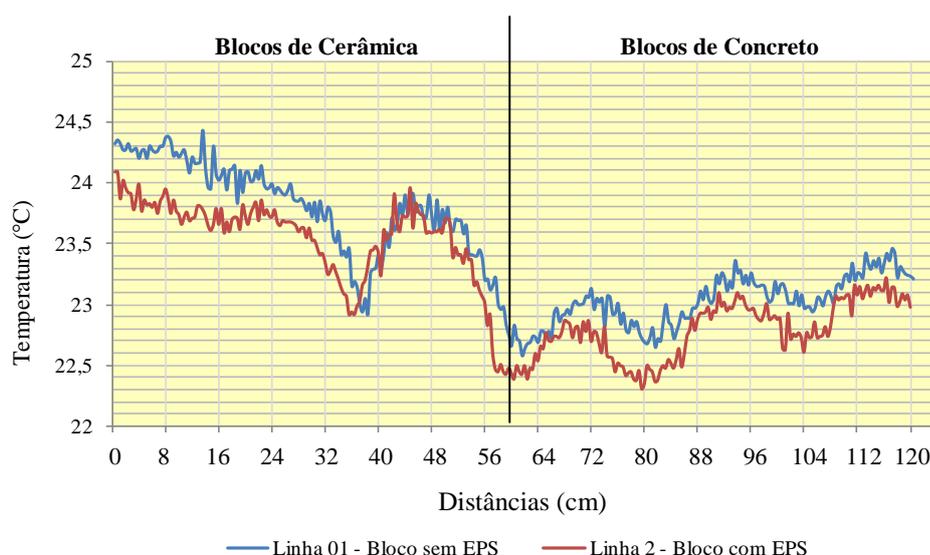
FIGURA 50 - Termograma da superfície que receberá insolação (10 horas)



Os GRÁF. 1 a 8 demonstram os pontos lidos ao longo das linhas de perfil no modelo de alvenaria (120 cm x 120 cm x 14 cm). O *software* relaciona estes pontos ao valor da

temperatura captado pelo equipamento (cada 8 cm equivalem a 20 pontos lidos). A linha L-01 abrange pontos selecionados nos dois tipos de bloco (cerâmica/concreto) sem preenchimento de EPS e a linha L-02 pontos selecionados nos blocos contendo EPS.

GRÁFICO 1 - Linhas de perfil da superfície que receberá insolação (10 horas)

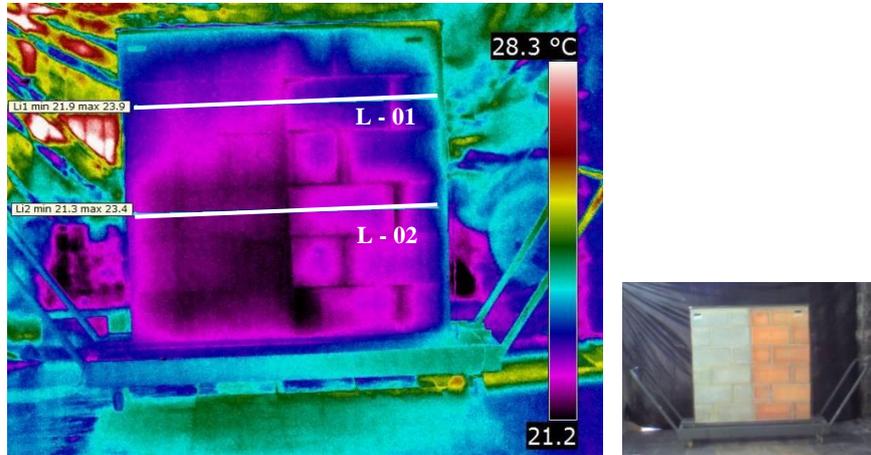


No GRÁF. 1 a termografia foi sensível à presença do EPS incorporado aos dois tipos de blocos, o que pode ser percebido pela diferença entre L-01 e L-02. Notam-se picos de temperatura, que estão relacionados à estrutura interna dos blocos e à argamassa de assentamento. A temperatura em L-01, para os blocos de cerâmica, é em torno de 24,3 °C e declina na união com o bloco menor (meio-bloco), que permanece com 23,9 °C. Nos blocos de concreto a temperatura máxima atingida foi de 23,4 °C, com ligeira queda no centro do bloco. Na linha L-02, as temperaturas seguem o mesmo esquema da linha L-01, porém com temperaturas 0,5 °C mais baixas que L-01, coincidindo em torno de 24 °C, onde estão os blocos menores. Isto pode estar relacionado à estrutura porosa dos blocos de cerâmica que, devido à sua geometria menor, pode estabilizar a temperatura. Deve ser considerado o fato de que, apesar da temperatura ambiente ser de 27 °C, a temperatura inicial dos blocos de cerâmica/concreto com e sem EPS não passou de 24,4 °C.

A FIG. 51 mostra o termograma da superfície oposta antes de receber insolação. Percebe-se que as temperaturas são uniformes nos dois tipos de material. Provavelmente isto se justifica porque o modelo ficou próximo de outra alvenaria, o que deve ter dificultado a

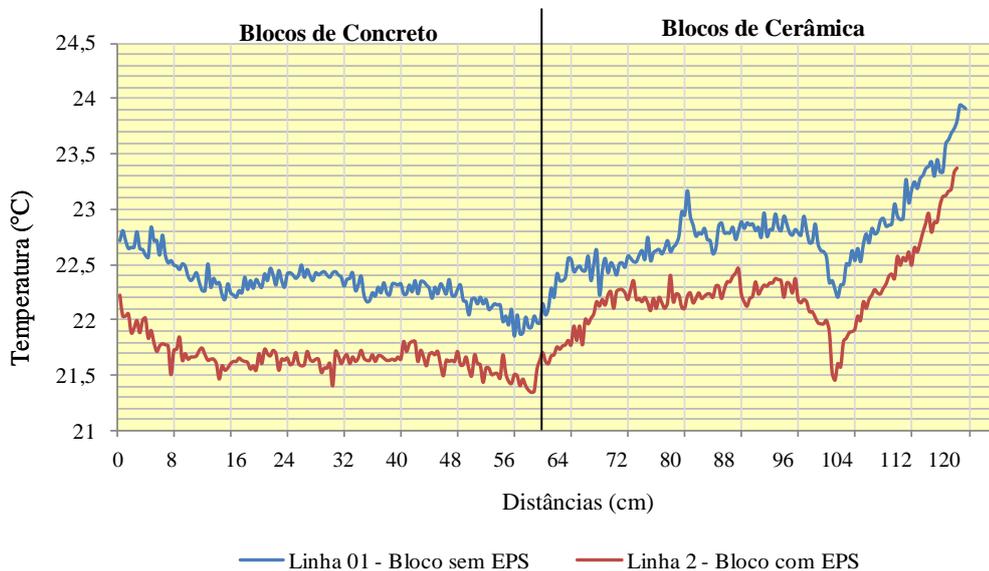
troca de calor desta superfície com o ambiente. No entanto, a superfície começa a ganhar calor do ambiente pelo lado direito e pelo alto.

FIGURA 51 - Termograma da superfície oposta à que receberá insolação (10 horas)



Conforme o GRÁF. 2, a temperatura foi mais baixa ao longo da linha de perfil L-02 para os dois tipos de material com EPS (em torno de 0,7 °C). Os blocos de cerâmica, com temperaturas um pouco acima das dos blocos de concreto, ganham calor mais rapidamente na extremidade (120 cm). Percebe-se com clareza o pico (102 cm) indicando que a argamassa de assentamento está com temperatura mais baixa que o bloco de cerâmica com e sem EPS.

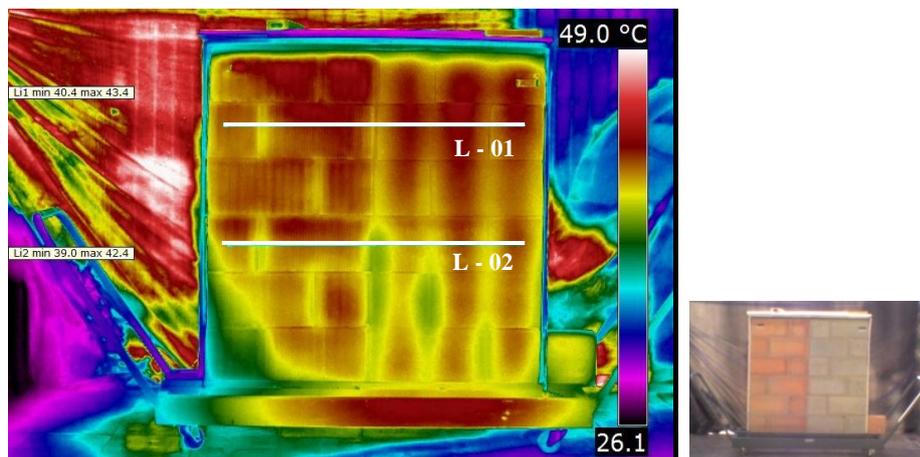
GRÁFICO 2 - Linhas de perfil da superfície oposta à que receberá insolação (10 horas)



4.3.3 Respostas térmicas da alvenaria após insolação

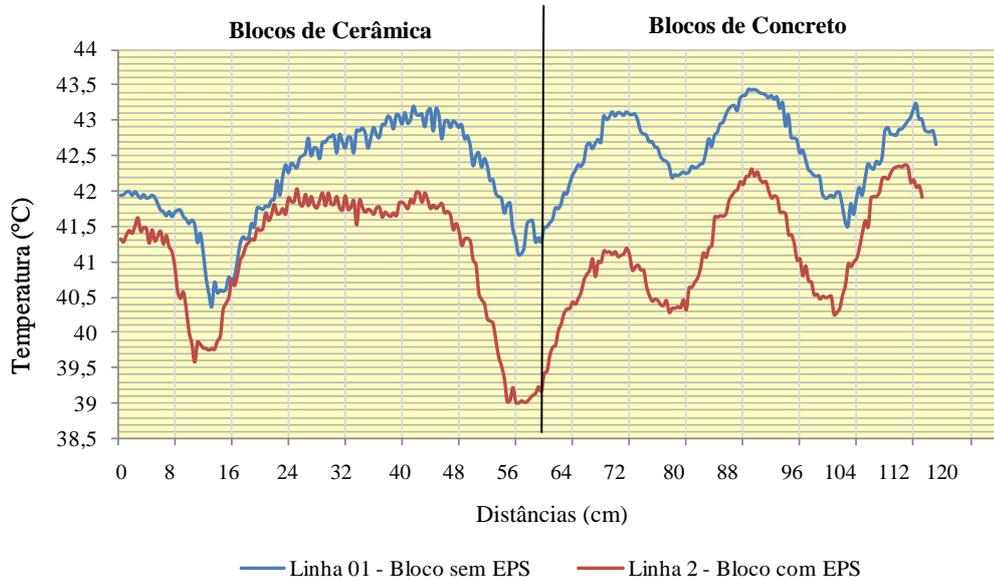
Na FIG. 52 o termograma refere-se à superfície diretamente exposta à insolação de quatro horas. Verificou-se diferença de temperatura na superfície do modelo e na estrutura interna dos blocos e argamassa de assentamento. A distribuição de temperatura na superfície dos blocos sugere que os materiais absorveram calor de forma similar. Estudos feitos por Sales *et al.* (2010a) demonstram que corpos de prova, confeccionados com diferentes tipos de materiais, expostos a duas horas de radiação solar absorveram calor de forma diferente. Os blocos de concreto contendo EPS apresentam pontos com temperaturas discretamente mais baixas.

FIGURA 52- Termograma da superfície após insolação de quatro horas



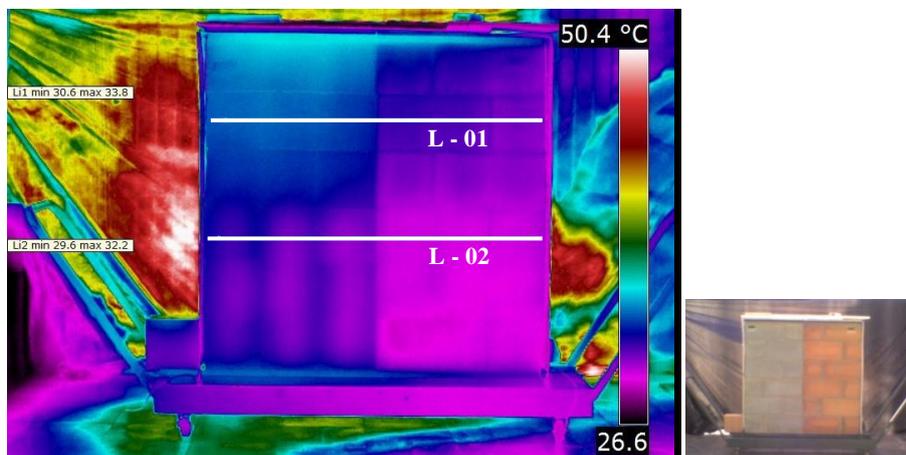
O GRÁF. 3 reforça o fato de que a termografia foi capaz de perceber a interferência do EPS dentro dos blocos. Observa-se mais claramente a estrutura dos blocos pelos picos ao longo da linha L-01 e L-02. A temperatura máxima em L-01 foi bastante semelhante nos blocos de cerâmica e de concreto (43.2 °C). No entanto, reduzida diferença de temperatura aconteceu na extremidade, onde os blocos são menores (meio-bloco). A linha L-02 apresenta temperaturas com variações semelhantes a L-01, porém com queda que varia de 1 a 2 °C em toda a extensão. Os picos irregulares e profundos ao longo da linha (L01 e L02) indicam que a estrutura do bloco e a argamassa de assentamento possivelmente aqueceram-se mais lentamente.

GRÁFICO 3 - Linhas de perfil da superfície após quatro horas de insolação



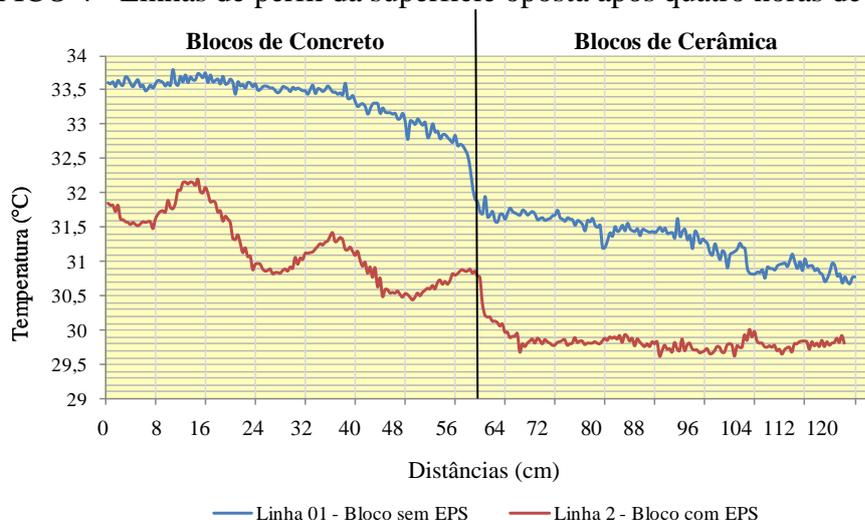
A FIG. 53 mostra a imagem termográfica da superfície oposta, cuja temperatura aumenta como consequência da transferência de calor por condução através do material da parede (ver item 2.7.2.1). A análise qualitativa da imagem mostra que existe diferença na transmissão de calor por condução entre os tipos de materiais. Após serem submetidas ao mesmo tipo de aquecimento, a temperatura na superfície oposta apresenta regiões distintas. Os blocos de concreto sem EPS estão visivelmente mais aquecidos em relação aos preenchidos com EPS. A estrutura interna pode ser identificada, salientando a presença do EPS. Os blocos de cerâmica possuem temperatura superficial uniforme, com ligeiro ganho de calor na parte mais alta, o que indica que o resíduo de poliestireno expandido interferiu na passagem de calor através do bloco concreto/cerâmica de forma diferente.

FIGURA 53 - Termograma da superfície oposta após receber insolação de quatro horas



Mais uma vez a termografia foi capaz de perceber a diferença de material e a interferência do EPS no conjunto (GRÁF. 4). Ao longo da linha L-01, os blocos de concreto atingiram temperatura máxima de 33,8 °C, com ligeiro declínio na mudança de material. Nos blocos de cerâmica a temperatura chegou a 31,8 °C, também declinando na extremidade dos blocos. A linha L-02 manifesta a mesma tendência de temperatura: a máxima ficou em 32,2 °C, caindo na mudança de material. Nos blocos de cerâmica a temperatura permaneceu estável em torno de 30 °C. Nos blocos de concreto com EPS é visível a estrutura pelos picos apresentados. É possível perceber diferença de 1,6 °C entre os blocos de concreto com e sem EPS e diferença de 1,8 °C entre os blocos de cerâmica. Os blocos de cerâmica, por ser de material menos condutor do que o concreto e a argamassa (ver TABELA 1), quando preenchidos com o resíduo de EPS, apresentam também temperaturas mais baixas. Fato confirmado pelos valores encontrados pela caracterização dos blocos (TABELA 7).

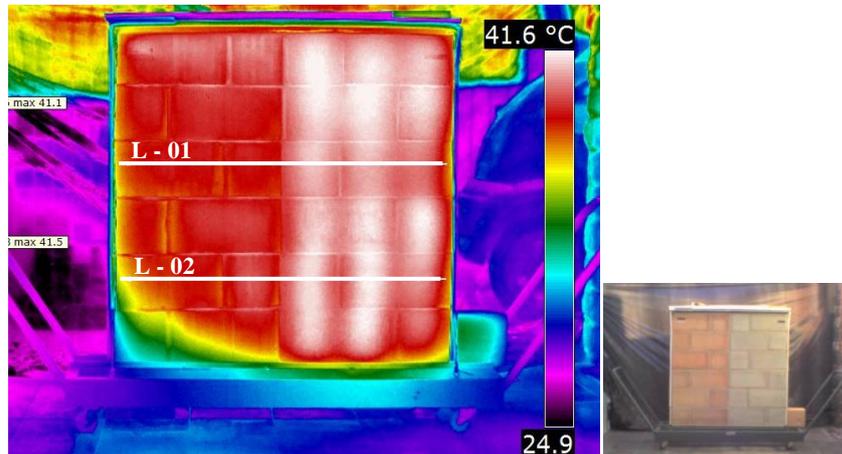
GRÁFICO 4 - Linhas de perfil da superfície oposta após quatro horas de insolação



A imagem obtida com aquecimento por exposição à radiação solar por seis horas está representada na FIG. 54. Novamente se identifica que a termografia é capaz de detectar os dois tipos de material (cerâmica/concreto). A diferença da distribuição de temperatura na superfície do modelo indica que os blocos de cerâmica e de concreto absorvem o calor de forma diferente. Resultado semelhante foi encontrado no trabalho de Ribeiro e Souza (2009) e de Sales *et al.* (2010b). A região de blocos de concreto absorveu mais calor que os blocos de cerâmica. A análise qualitativa do termograma sugere que a termografia identificou os materiais diferentes (cerâmica/concreto), mas não percebeu a presença do EPS. Observa-se que,

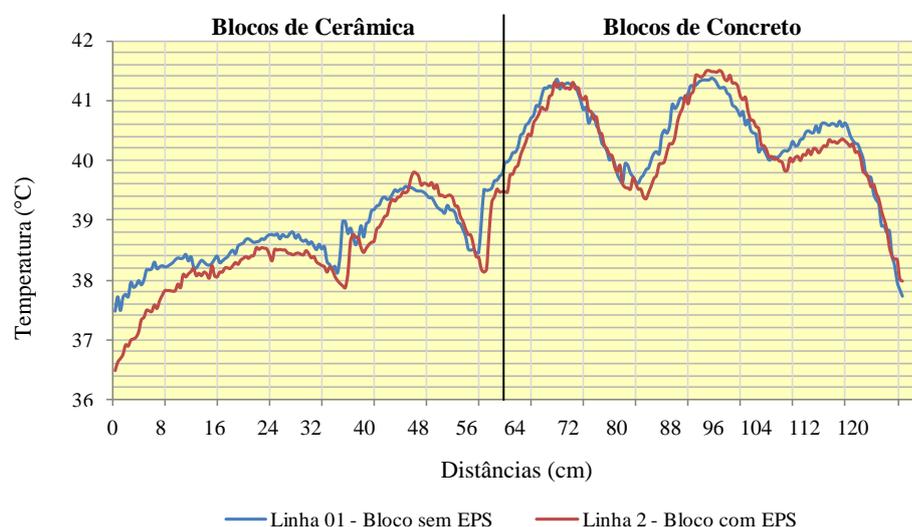
após ser submetida ao mesmo tipo de estímulo, a superfície dos blocos com e sem EPS recebeu ganho de calor de forma semelhante nas duas superfícies. Isso pode ser atribuído ao fato de que a camada superficial dos blocos, por ser estreita, absorve mais facilmente a radiação.

FIGURA 54 - Termograma da superfície após receber insolação de seis horas



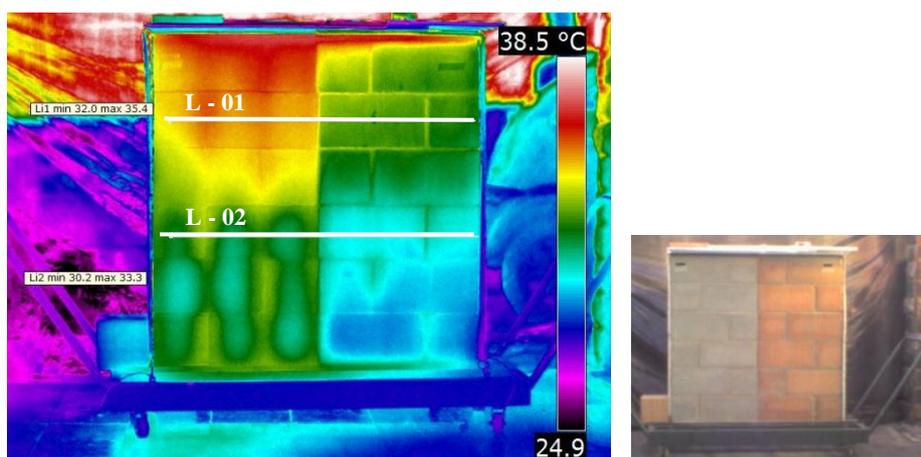
Esse resultado é reforçado, no GRÁF. 5, ao longo das linhas L-01 e L-02. A temperatura máxima superficial dos blocos de cerâmica com e sem EPS girou em torno de 38,8 °C, com elevação de 1 °C no bloco menor. Nos blocos de concreto a máxima foi de 41,5 °C para os blocos com e sem EPS. Na leitura dos pontos mais extremos (zero e 120 cm), apura-se queda brusca nos dois tipos de material. Isso provavelmente se deve ao fato de que na superfície externa a amostra perde calor para o ambiente mais rapidamente. Os picos profundos ao longo da linha (L01 e L02) mostram a estrutura dos blocos, indicando que a argamassa de assentamento tem aquecimento mais lento.

GRÁFICO 5 - Linhas de perfil da superfície após seis horas de insolação



A FIG. 55 refere-se às superfícies aquecidas por condução, conforme mostrado na figura 13 (item 4.7.2.1), podendo ser identificadas de forma clara quatro regiões. A análise da imagem revela diferença na transmissão de calor por condução através do material e que o EPS interferiu nessa condução. Após ser submetida ao mesmo tipo de aquecimento, a superfície dos blocos com preenchimento de EPS apresentou temperatura visivelmente inferior à dos blocos sem EPS. A estrutura interna do bloco de concreto pode ser claramente identificada pela diferença dos dois materiais (estrutura do bloco e EPS). No bloco de cerâmica contendo EPS a temperatura foi mais uniforme, o que indica que a estrutura interna dos blocos não interferiu na aquisição de calor e o resíduo de poliestireno expandido interferiu na transmissão de calor através dos blocos de forma diferente.

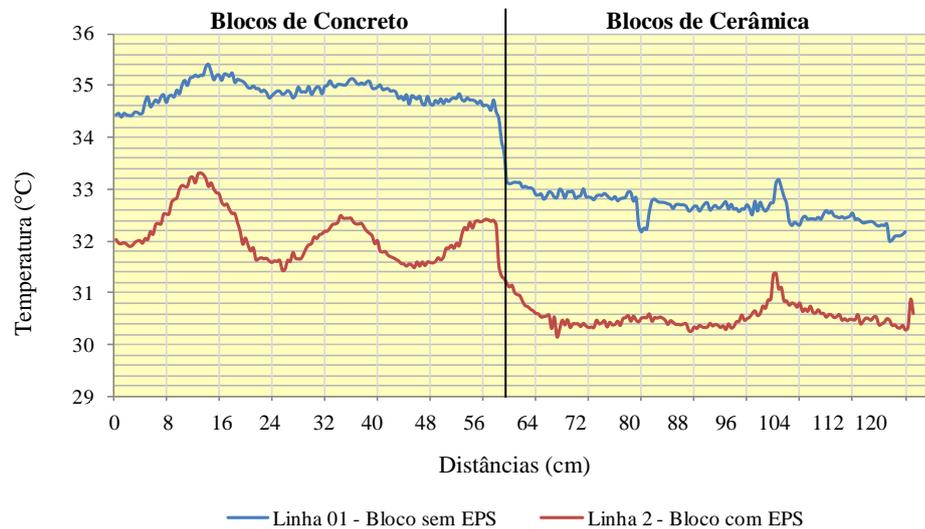
FIGURA 55 - Termograma da superfície oposta após receber insolação de seis horas



As temperaturas da superfície oposta do modelo de alvenaria estão representadas de forma clara no GRÁF. 6. Os blocos de concreto e de cerâmica, quando diretamente aquecidos pelo sol, atingiram temperaturas superficiais bastante semelhantes nas amostras com e sem EPS. No entanto, na superfície oposta esse aquecimento se manteve estável, como pode ser observado em L-01. A temperatura máxima ficou na faixa de 35,4 °C para os blocos de concreto e de 33 °C para os blocos de cerâmica. Na linha L-02 a temperatura ficou na faixa de 33,4 °C para os blocos de concreto e na faixa de 30,4 °C para os blocos de cerâmica. A diferença de temperatura entre os blocos de concreto foi de 2 °C e de 2,6 °C entre os blocos de cerâmica. Houve pico no ponto 102 cm, significando que a argamassa de assentamento ficou mais aquecida nos blocos de cerâmica. Nos blocos de concreto em L-02, mais uma

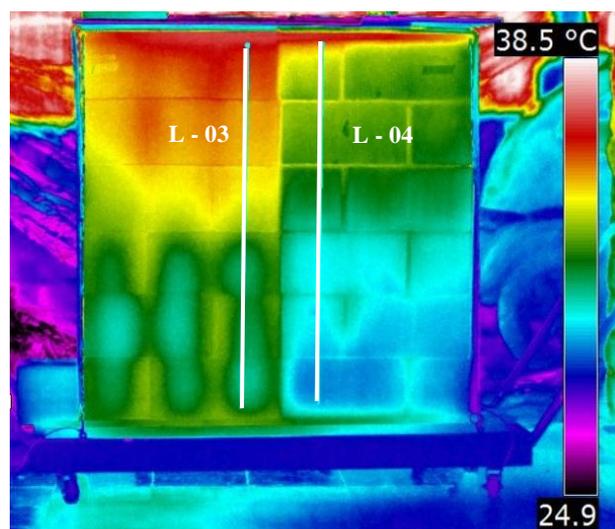
vez ficaram evidentes a estrutura do bloco e a presença do EPS, que se mostra eficiente como isolante térmico tanto nos blocos de concreto quanto nos blocos de cerâmica.

GRÁFICO 6 - Linhas de perfil da superfície oposta após seis horas de insolação



Para melhor entendimento dos resultados, os dados analisados anteriormente foram agrupados ao longo de uma seção vertical (48 cm e 72 cm) em uma linha de perfil (L-03 e L-04), obtidos para cada situação estudada na face oposta à insolação (FIG. 56).

FIGURA 56 - Linhas de perfil vertical



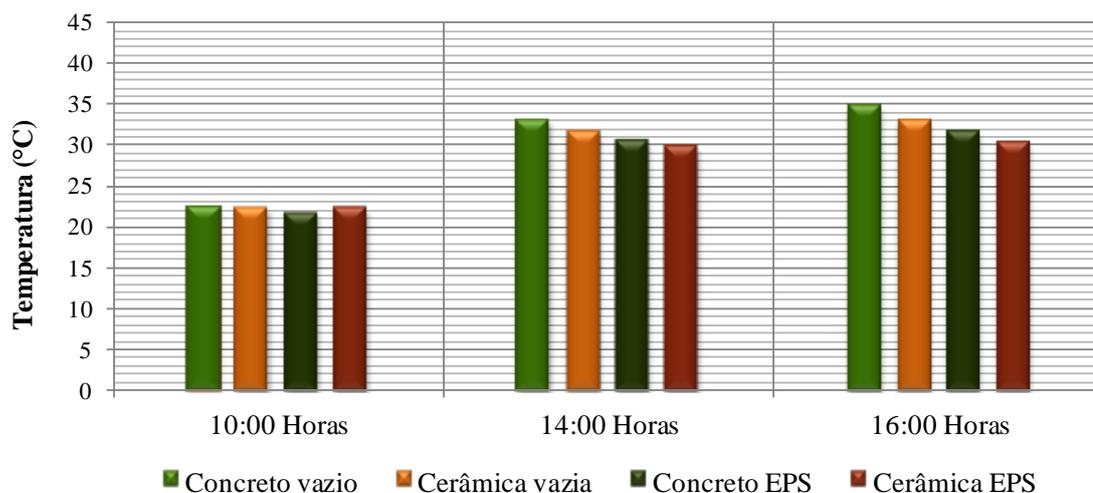
Os valores relativos às medições nas linhas de perfil vertical foram agrupados de forma resumida na TABELA 8 e traduzidos em forma de gráfico de barras.

TABELA 8 - Variação da temperatura das seções verticais

Bloco vazio					
Leitura (H)	Insolação (t_i)	Concreto (T °C)	ΔT (°C)	Cerâmica (T °C)	ΔT (°C)
10:00	0	22,4	12,4	22,4	10,6
14:00	4	33,0		31,6	
16:00	6	34,8		33,0	
Bloco com EPS					
10:00	0	21,7	9,9	22,3	8,1
14:00	4	30,5		29,8	
16:00	6	31,6		30,4	
Eficiência com EPS		20,2%		23,6%	

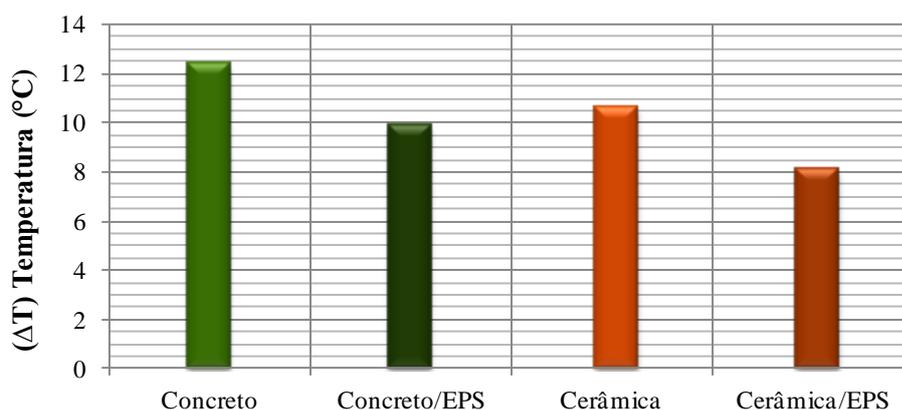
O GRÁF. 7 mostra de forma bastante evidente a influência do EPS na estrutura da alvenaria em todos os horários de medição. A temperatura superficial foi bastante uniforme na primeira medição às 10 horas, em torno dos 22,4 °C, com ligeira queda nos blocos de concreto contendo EPS. Depois de receber insolação por quatro horas os blocos com e sem EPS tiveram ganho significativo de temperaturas, sendo proporcional a influência do EPS no material. Após insolação de seis horas, a alvenaria continuou acumulando calor e a diferença entre os materiais teve a mesma proporcionalidade das 14 horas, ou seja, nos blocos de concreto sem EPS as temperaturas foram mais altas e nos blocos de cerâmica com EPS as temperaturas foram mais baixas. Esse fato foi confirmado por Weil (1991), que relata que o melhor contraste térmico é obtido duas a três horas após o nascer ou o pôr-do-sol, pois o calor deve fluir de/ou para o material.

GRÁFICO 7 - Temperaturas da superfície oposta após quatro e seis horas de insolação



Os resultados ficam evidenciados no GRÁF. 8, no qual são apresentados os valores referentes ao ΔT (variação de temperatura) das situações estudadas. Os dados indicam que a variação da temperatura foi igual em ambos os casos (2,5 °C). No entanto, houve ganho na capacidade de retenção de calor, após seis horas de insolação, de 20,2% nos blocos de concreto e 23,6% nos blocos de cerâmica.

GRÁFICO 8 - Variação de temperatura da superfície oposta após seis horas de insolação



A termografia, apesar de ser um ensaio de fácil execução, necessita de conhecimentos e experiência por parte do avaliador. O método apresenta potencial para ser usado no estudo do conforto de edifícios. Os estudos na área do *design* do conforto térmico ainda estão em fase inicial e novos experimentos devem ser desenvolvidos.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que:

- A termografia apresenta potencial para ser usada no monitoramento qualitativo e quantitativo de superfícies de blocos de concreto/cerâmica com e sem EPS quando submetidos a aquecimento artificial.
- Os termogramas mostram que a transmissão de calor por condução através da alvenaria foi influenciada pela intensidade de insolação o que afetou de forma distinta as regiões estudadas devido a utilização do EPS. A técnica apresenta boa sensibilidade para materiais diferentes (após insolação), mesmo quando as temperaturas são altas.
- Apesar da baixa condutividade térmica do concreto/cerâmica, foi possível detectar por termografia uma diferença de 2,5 °C na variação de temperatura entre os blocos com e sem EPS após insolação de seis horas. O ganho na capacidade térmica em presença do EPS foi de 20,2% nos blocos de concreto e 23,6% nos blocos de cerâmica.
- Os testes termográficos apontam a eficiência do conjunto bloco de concreto/cerâmica e EPS como estratégia para obtenção de alvenarias estruturais mais isolantes.
- A termografia como método de ensaio não destrutivo pode contribuir de forma eficiente para o estudo do design do conforto térmico, uma vez que ela é capaz de identificar as características térmicas do sistema construtivo.

6 SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

Com base na análise dos dados obtidos, sugerem-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Estudo de alvenaria estrutural concreto/cerâmica com argamassa de revestimento utilizando EPS como isolante térmico.
- Uso da termografia para detectar a influência da cor no conforto interno em alvenarias concreto/cerâmica utilizando ou não o EPS como isolante.
- Estudo da forma e do *Design* de blocos estruturais compostos de materiais alternativos com foco no conforto térmico.
- Uso da termografia para estudo de fachadas de obras existentes, com e sem revestimentos externos, para avaliar a influência da envoltória no meio ambiente.
- Estudo sistemático da influência das coberturas e telhados no conforto e na proteção das edificações, utilizando termografia infravermelha.
- Estudo sistemático do resfriamento de diferentes materiais, para estudo do *Design* do conforto utilizando termografia infravermelha.

REFERÊNCIAS

AGGELIS, D.G. *et al.* Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1888–1897, 2010.

AGUILAR, M.T.P. *et al.* Estudo do desenvolvimento de argamassas de revestimento Fabricadas com Sílica ativa e escória. **Revista Metalurgia & Materiais**, v. 59, n. 534, jun 2003.

AKUTSU, M.; SATO, N.M.N.; PEDROSO, N.G. **Desempenho térmico de edificações habitacionais e escolares. Manual de procedimentos para avaliação.** São Paulo: IPT, Divisão de Edificações, 1987.

AMIANTI, M.; BOTARO V.R. Concreto impregnado com polímero (CIP): uso e aplicação do EPS reciclado para redução da permeabilidade de superfícies de concreto. **Revista Matéria**, v. 13, n. 4, pp. 664-673, 2008.

AMBIENTE BRASIL. **Isopor** - O Impacto no Meio Ambiente. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/isopor/isopor__o_impacto_no_meio_ambiente.html>. Acesso em: 10 jul. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 15270-2** Componentes cerâmicos. Parte 2: blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005a.

____. **NBR 15220-1:** Desempenho térmico de edificações. Parte 1: definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005b.

____ **NBR 15220-2:** Desempenho térmico de edificações. Parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005c.

____ **NBR 6136:** Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2007.

____ **NBR 15572:** Ensaios não destrutivos: termografia por infravermelha - guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO. ABRAPEX. **Mercado de EPS.** Disponível em: <<http://www.abrapex.com.br>>. Acesso em: 07 out. 2010.

BARBOSA, M.J.; LAMBERTS, R. Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares, aplicada a Londrina – PR. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, p. 15-18, 2002.

BARREIRA, E.; FREITAS, V.P. Evaluation of building materials using infrared thermography. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 218-224, 2007.

BATIZ, E.C. *et al.* Avaliação do conforto térmico no aprendizado: estudo de caso sobre influência na atenção e memória. **Produção**, v. 19, n. 3, p. 477-488, set./dez. 2009.

CALLISTER JR, W.D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CAMACHO, J.S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira – SP, 2006. Disponível em: < <http://www.nepae.feis.unesp.br>>. Acesso em: 21 set. 2010.

CASTANEDO, C.I. **Quantitative subsurface defect valuation by pulsed phase thermography**: Depth retrieval with the phase. Thèse (obtention grade de Philosophiae Doctor Ph.D.) Faculté des Sciences et de Génie Université Laval – Québec. Oct 2005.

CENSUS BUREAU. U.S. and World Population Clocks. Disponível em : <<http://www.census.gov/main/www/popclock.html>>. Acesso em: 15 de agosto de 2011.

CERDEIRA, F. *et al.* Applicability of infrared thermography to the study of the behaviour of stone panels as building envelopes. **Energy and Buildings**, v. 43, p.1845–1851, 2011.

CLARK, M.R.; McCANN, M.C.; FORDE, M.C. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. **NDT&E International**, v. 36, p. 265–275, 2003.

COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO – **Sistemas à base de cimento**. Disponível em: <<http://www.comunidadeconstrucao.com.br>>. Acesso em: 23 ago. 2011.

CONCEIÇÃO, Z.E.; LÚCIO, M.M.J.R. Evaluation of thermal comfort conditions in a classroom equipped with radiant cooling systems and subjected to uniform convective environment. **Applied Mathematical Modelling**, v. 35, p. 1292-1305, 2011.

CORTIZO, E.C. **Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações**: ênfase em edificações do patrimônio histórico. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

DANESE, M. *et al.* Investigating material decay of historic buildings using visual analytics with multi-temporal infrared thermographic data. **Archaeometry**, v. 52, 3, p. 482–501, 2010.

DE MORAES, D. **Metaprojeto**: o design do design. São Paulo: Blucher, 2010. 228 p.

ELKINGTON, J. Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development. **California Management Review**, v. 36, no. 2, p. 90-100, 1994.

FLIR SYSTEMS. 2009. Disponível em: < <http://www2.flirthermography.com>>. Acesso em: 06 nov. 2010.

FROTA, A.B.; SCHIFFER, S.R. **Manual do Conforto Térmico**. 8. ed., São Paulo: Studio Nobel, 2007. 43 p.

GREVEN, H.D.; BALDAUF, A.S.F. Introdução à coordenação modular da construção no Brasil: uma abordagem atualizada. **Coletânea HABITARE**, Porto Alegre: ANTAC, 2007.

HUDSON, R.D. **Infrared systems engineering**. Pure & Applied Optics. New Yprk, John Wiley & Sons, 2006.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643 p.

JOHN, V.M.; OLIVEIRA, D.P.; LIMA, J.A.R. **Levantamento do estado da arte: seleção de materiais - habitação mais sustentável**. Projeto Finep 2386/04. São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www.habitacaosustentavel.pcc.usp.br/pdf/D2-4_selecao_materiais.pdf>. Acesso em: setembro de 2011.

KAROGLOU, M. *et al.* Reverse engineering methodology for studying historic buildings coatings: The case study of the Hellenic Parliament neoclassical building. **Progress in Organic Coatings**, v. 72, p. 202-209, 2011.

KAZAZIAN, T. **Haverá a idade das coisas leves: Design e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Ed. Senac, 2005. 194 p.

KINDLEIN JÚNIOR, W.; CÂNDIDO, L.H.A. Design de produto e seleção de materiais com foco nos 3R's. **Cadernos de Estudos Avançados em Design**, Sustentabilidade I. Belo Horizonte: UEMG, 2009.

KRÜGER, E.L. A importância do conhecimento de térmica em edificações por engenheiros civis. **Revista Tecnologia e Humanismo**, Curitiba, n. 19, p. 18-21 ago. 1999.

KRÜGER, E.L.; ZANNIN, P.H.T. Avaliação termoacústica de habitações populares na vila tecnológica de Curitiba. **Ambiente Construído**, v. 6, n. 2, 2006.

KRÜGER, E.L.; ROSSI, F.A. Effect of personal and microclimatic variables on observed thermal sensation from a field study in southern Brazil. **Building and Environment**, v. 46, p. 690-697, 2011.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW - PROCEL, 1997.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PAPST, A. L. **Desempenho térmico das edificações**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.

LAMBERTS, R. *et al.* **Desempenho térmico das edificações**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/>>. Acesso em: 27 jul. 2010.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A.A.P. **Conforto térmico e stress térmico**. LabEEE-Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/>>. Acesso em: 29 jul. 2010.

LANA, S.L.B.; LAGE, A.C.A. Creative people: the key of the innovation process. **XXIV World Conference**, Barcelona, 2007.

LEITE, P.G. **Curso de ensaios não destrutivos de metais**. Associação Brasileira de Metais. São Paulo, 1966.

LILLES, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1977.

LIMA, R.C.F.; MAGNANI, F.S.; NUNES, R. Detecção de falhas em monumentos históricos de Olinda através de imagens por infravermelho: uma análise preliminar. **Revista Brasileira de Arquiometria, Restauração e Conservação**, v. 1, p. 343-346, 2007.

MAIERHOFER *et al.* Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures. **Cement & Concrete Composites**, v. 28, p. 393-401, 2006.

MALDAGUE, X.P. Introduction to NDT by active infrared thermography. **Materials Evaluation**, v. 6, p. 1060-1073, 2002.

MALDAGUE, X.P. **Theory and practice of infrared technology for non destructive testing**. New York: Wiley & Sons, 2001.

MALHOTRA V.M.; SIVASUNDARAM, V. Resonance frequency methods. *In*: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **CRC handbook on nondestructive testing of concrete**, 1 ed. Chapter 6, Boston, USA, CRC Pres, 1991.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis**: os requisitos ambientais dos produtos industriais. São Paulo: EDUSP, 2002. 368 p.

MANZIONE, L. **Projeto e execução de alvenaria estrutural**. São Paulo: O Nome da Rosa Editora, 2004. 116p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO. P.J.M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 2008, 573 p.

MENDONÇA, L.V. Termografia por infravermelho: inspeção de betão. **Revista Engenharia e Vida**, n. 16, p. 53-57, 2005.

MEOLA, C.; CARLOMAGNO, G.M.; GIORLEO, L. The use of infrared thermography for materials characterization. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 155, p. 1132-1137, 2004.

MEOLA, C.; CARLOMAGNO, G.M. Recent advances in the use of infrared Thermography. **Publishing Measurement Science and Technology**, v. 15, p. 27-58, 2004.

MEOLA, C. *et al.* Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. **Engineering Failure Analysis**, v.12, p. 875-892, 2005.

MOREIRA, D. C.; LABAKI, L. C.; KOWALTOWSKI, D. C. C. Aplicativo para cálculo das propriedades térmicas de alvenarias. **Encontro Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, São Paulo, 2004.

NOGUEIRA, M.; NOGUEIRA, J.S. Educação, meio ambiente e conforto térmico: caminhos que se cruzam. **Rev. eletrônica Mestr. Educ. Ambient.** ISSN 1517-1256, V. 10, 2003.

NORMAN, W.; MACDONALD, C. **Getting to the Bottom of “Triple Bottom Line”**. Virginia, EUA: Business Ethics Quarterly, 2003.

PAPST, A.L. **Uso de inércia térmica no clima subtropical estudo de caso em Florianópolis-SC**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

PAULUZZI. **Blocos cerâmicos**. Disponível em: <<http://www.pauluzzi.com.br>>. Acesso em: 15 nov. 2010.

PELIZZARI, E. **Aplicações da termografia como ferramenta de manutenção preditiva em conectores elétricos**. 17º. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2006.

POLETTI, M. *et al.* Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos de poliestireno expandido pós-consumo e serragem de *pinus elliotti*. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v. 11, n. 3, 2010.

RAMALHO, M.A.; CORRÊA, M.R.S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. São Paulo: Pini, 2003. 174 p.

RANTALA, J. *et al.* Lock-in thermography with mechanical loss angle heating at ultrasonic frequencies. **Quantitative Infrared Thermography**. Eurotherm Series 50 Edizione ETS, 389-393, Pisa, 1997.

RIBAS, F.F. Reciclagem de lixo: uma questão de sustentabilidade. **Revista Científica**, ano I, v. 01, n. 02, jan-jun 2007.

RIBEIRO, S.B.R.; SOUZA, R.G.S. **Análise do desempenho térmico de envoltórias em alvenaria estrutural**. X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Natal, RN, Brasil, 2009.

RODRIGUES, S.C. **Análise do processo de fabricação do compósito Ecowood: estudo de caso de reciclagem.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2009.

ROGALSKI, A. Infrared detectors: an overview. *Infrared Physics & Technology. Journal of Alloys and Compounds*, v. 371, p.53-57, 2004.

ROGALSKI, A. Infrared detectors: status and trends. *Progress in Quantum Electronics*, v. 27, n. 59, p.210, 2003.

ROMAN, H.; BONIN, L. C. Normalização e certificação na construção habitacional. *Coletânea HABITARE*, V. 3, Porto Alegre, 2003.

SALES, R.B.C. **Estudo de compostos de cimento Portland utilizando o ensaio de frequência ressonante forçada e termografia.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SALES, R.B.C. *et al.* **Concrete macrostructure study using infrared thermography.** IC-NOCMAT 2010. In: International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies: Ecological Materials and Technologies for Sustainable Building. Cairo, Egypt, 2010a.

SALES, R.B.C. *et al.* **Thermal analysis of structural masonry in concrete block containing expanded polystyrene (EPS) using digital infrared thermal image.** 10TH. In: International Conference on Quantitative Infrared Thermography. Québec (Canada), 2010b.

SALES, R.B.C. *et al.* Concrete study using infrared thermography and forced resonant frequency. *Advanced Materials Research*, vol.168 – 170, p. 778 – 786, 2011.

SANSÃO, J. H. **Análise Ambiental de Alvenarias em Blocos: uma discussão baseada na avaliação do ciclo de vida e no desempenho térmico de envoltórias.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SOARES, R.N.B. **Resíduo de construção e demolição e EPS reciclado como alternativa de agregados para a região amazônica: aplicação em blocos para alvenaria.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Curitiba, 2010.

SOUZA, R.V.G.; PEREIRA, F.O.R. **Módulo didático para avaliação de desempenho térmico de sistemas construtivos.** I Conferência Latino Americana de Construção Sustentável; X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, ISBN 85- São Paulo, jul 2004.

TARPANI, J.R. *et al.* Inspeção Termográfica de danos por impacto em laminados de matriz polimérica reforçados por fibras de carbono. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 19, n. 4, p. 318-328, 2009.

TAVARES, S.G. **Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

TITMAN, D.J. Applications of thermography in non-destructive testing of structures. **NDT&E International**, v. 34, p. 149-154, 2001.

URBEL. Companhia Urbanizadora de Belo Horizonte. Prefeitura de Belo Horizonte. Disponível em : <portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?app=urbel>. Contato em: 17 nov. 2010.

VERATTI, A.B. **Manual do curso de formação de termografista nível I do ITC Infrared Training Center**. Rev. 1.1 Publi. Nº 1560063_E-pt/BR – Cap. 1/14. São Paulo 2011.

VEZZOLI, C. **Design de sistemas para a sustentabilidade: teoria, métodos e ferramentas para o design sustentável de “sistemas de satisfação”**. Salvador: EDUFBA, 2010. 343 p.

WEIL, G.J. **Infrared thermographic techniques**. In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **CRC handbook on nondestructive testing of concrete**, 1 ed. Chapter 13, Boston, USA, CRC Pres,1991.

WILKINSON, A.; HILL, M.; GOLLAN, P. The sustainability debate. **International Journal of Operations & Production Management**, London, v. 21, n.12, p. 1492-1500, 2001.

XAVIER, A.A.P.; LAMBERTS, R. Proposta de zona de conforto térmico obtida a partir de estudos de campo em Florianópolis. **V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e II Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído**, Fortaleza, 1999.