

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
SISTEMA CONSTRUTIVO DE CONCRETO
COM EPS COMO AGREGADO GRAÚDO**

Luciano André Cruz Bezerra

NATAL – RN
OUTUBRO, 2003.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMA CONSTRUTIVO DE CONCRETO COM EPS COMO AGREGADO GRAÚDO

Luciano André Cruz Bezerra
Orientador: George Santos Marinho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como um dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área: Termociências.

NATAL – RN
OUTUBRO, 2003.

ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMA CONSTRUTIVO DE CONCRETO COM EPS COMO AGREGADO GRAÚDO

Luciano André Cruz Bezerra

Orientador: George Santos Marinho

Dissertação de Mestrado defendida em 31/10/2003, sob julgamento da seguinte banca examinadora:

Prof^a. Dra. Wilza Gomes Reis Lopes

Prof^o. Dr. José Daniel Diniz Melo

Prof^o. Dr. José Ubiragi de Lima Mendes

Prof^o. Dr. George Santos Marinho

NATAL – RN
OUTUBRO, 2003.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo financiamento da pesquisa.

Ao CNPq, pelo financiamento do Projeto CTENERG – 552.372/01-3.

À Empresa Tecleve Ltda., pelo apoio à pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pelo apoio à pesquisa.

Ao Laboratório de Concreto – NTI / UFRN.

Ao Grupo de Pesquisa em Geologia Marinha e Monitoramento Ambiental – GGEMMA / UFRN.

Ao Laboratório de Geoquímica / UFRN.

Ao Laboratório de Laminação – Departamento de Geologia / UFRN

Ao Prof^o. George Santos Marinho.

Ao Prof^o. José Ubiragi de Lima Mendes.

À Prof^a. Wilza Gomes Reis Lopes

À Prof^a. Mônica M. F. Oliveira

Ao Prof^o. José Daniel Diniz Melo

E aos colegas do Laboratório de Transferência de Calor.

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 – MATERIAIS ALTERNATIVOS AGREGADOS AO CIMENTO PORTLAND	3
2.2 – RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	7
2.3 – EPS COMO AGREGADO DE CIMENTO PORTLAND	10
2.4 – ASPECTOS DE DESEMPENHO TÉRMICO	11
3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1 – RADIAÇÃO	14
3.2 – CONVECÇÃO	15
3.3 – CONDUÇÃO	16
3.4 – TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENTRE O MEIO E O AMBIENTE CONSTRUÍDO.	17
3.5 – DIFUSIVIDADE TÉRMICA	17
3.6 – RESISTÊNCIA TÉRMICA	18
3.7 – INÉRCIA TÉRMICA	19
3.8 – CARGA TÉRMICA	19
3.9 – BIOCLIMATOLOGIA	20

3.10 – PROTEÇÃO TÉRMICA DE FECHAMENTOS VERTICAIS	20
4 – METODOLOGIA	22
4.1 – MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO	22
4.1.1 – EXPERIMENTAÇÃO	22
4.1.1.1 – ATIVIDADES PRELIMINARES	22
i – FABRICAÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES	22
ii – ACONDICIONAMENTO TÉRMICO DOS CORPOS DEPROVA	25
4.1.1.2 – APARATO EXPERIMENTAL	26
4.1.1.3 – MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL	29
4.1.1.4 – PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO	30
4.2 – DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE	31
4.3 – DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA E DO CALOR ESPECÍFICO	32
5 – RESULTADOS E ANÁLISE	34
5.1 – RESISTÊNCIA MECÂNICA	34
5.2 – PROPRIEDADES TÉRMOFÍSICAS	35
5.2.1 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA	36
5.3 – DESEMPENHO TÉRMICO	39
6 – CONCLUSÕES	44
7 – SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA	45
8 – BIBLIOGRAFIA	46

LISTA DE SÍMBOLOS

A, A_1	área da superfície que participa do processo de transferência de calor (m^2).
BP	bloco padrão, construído em concreto comum.
BCV	bloco de cimento vazado.
TC8F	tijolo cerâmico de oito furos.
BCL 6_10	bloco de concreto leve com proporção de eps/areia igual a 6/10, em relação a um saco de cimento (50 kg).
BCL 10_6	bloco de concreto leve com proporção de eps/areia igual a 10/6, em relação a um saco de cimento (50 kg).
c_p	calor específico (a pressão constante) do material ($J/kg \cdot K$).
\bar{h}	coeficiente médio de transferência de calor da convecção ($W/m^2 \cdot K$).
k	condutividade térmica do material ($W/m \cdot K$).
k_{eq}	condutividade térmica equivalente ($W/m \cdot K$).
k_1	condutividade térmica da massa de concreto leve propriamente dita ($W/m \cdot K$).
k_2	condutividade térmica do EPS ($W/m \cdot K$).
ℓ	litro.
L	espessura da parede (m).
L_1	espessura da camada de concreto leve (m).

L_2	espessura da camada de EPS (m).
m	Massa do bloco (kg).
m_{Parafina}	Massa da parafina que impermeabilizou a amostra (kg).
M'	Massa de água deslocada pela amostra (kg).
q	fluxo de calor (W/m^2).
Q	taxa de fluxo de calor (W).
R_t	resistência térmica (K/W).
R_{teq}	resistência térmica equivalente (K/W).
T_I	temperatura média na superfície I ($^{\circ}\text{C}$).
T_{II}	temperatura média na superfície II ($^{\circ}\text{C}$).
T_1	temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$ ou K).
T_2	temperatura do meio ($^{\circ}\text{C}$ ou K).
α	difusividade térmica (m^2/s).
ΔT	diferença entre temperaturas ($^{\circ}\text{C}$ ou K).
ε_1	fator de emissividade da superfície (adimensional).
ρ	densidade do material (kg/m^3).
ρ_{AP}	densidade aparente da amostra (kg/m^3).

ρ_{Parafina}	densidade da parafina (kg/m^3).
$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	densidade da água na temperatura do experimento (kg/m^3)
σ	constante da radiação, de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$).

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1	Bancada de Fabricação de Termopares - UFRN/NTI/LTC.	21
Figura 4.2	Bancada de calibração - UFRN/NTI/LTC.	21
Figura 4.3	Curvas de resfriamento: termopares \times TLBV.	22
Figura 4.4	Estabilidade térmica da câmara climatizada.	24
Figura 4.5	Corpos de prova montados e instrumentados.	25
Figura 4.6	Corpos de prova montados e instrumentados.	26
Figura 4.7	(a) Blocos de concreto leve; (b) dimensões e seção transversal dos blocos utilizados.	26
Figura 4.8	Fonte de radiação térmica.	27
Figura 4.9	Disposição dos Sensores de Temperatura.	28
Figura 4.10	Sistema utilizado na determinação da densidade dos blocos de concreto leve.	29
Figura 4.11	Determinação da condutividade térmica e do calor específico dos blocos de concreto.	30
Figura 5.1	Ensaio de resistência à compressão – UFRN/NTI/Lab. Concreto.	31
Figura 5.2	Equivalência entre a seção real e seção de cálculo considerada na analogia elétrica.	33

Figura 5.3	Simulação da variação da condutividade térmica equivalente em função da condutividade térmica do concreto leve.	35
Figura 5.4	Temperaturas médias do “bloco padrão”.	36
Figura 5.5	Temperaturas médias do “bloco de cimento vazado”.	36
Figura 5.6	Temperaturas médias do “tijolo cerâmico 8 furos”.	37
Figura 5.7	Temperaturas médias do BCL6_10.	37
Figura 5.8	Temperaturas médias do BCL10_6.	38
Figura 5.9	Temperaturas médias na superfície I.	39
Figura 5.10	Temperaturas médias na superfície II.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Análise estatística da calibração dos termopares.	23
Tabela 4.2	Composição dos sistemas construtivos avaliados.	27
Tabela 5.1	Resistência mínima dos blocos, segundo a norma NBR 7171.	31
Tabela 5.2	Resistência à compressão dos blocos.	32
Tabela 5.3	Propriedades térmicas dos blocos de concreto.	32
Tabela 5.4	Condutividade térmica equivalente.	34
Tabela 5.5	ΔT entre as superfícies I e II.	38

RESUMO

Nas últimas décadas têm sido grandes os esforços dos pesquisadores na busca por mais informações e conhecimentos sobre como se poderá continuar provendo o desenvolvimento das cidades sem que isso ocorra de forma agressiva ao meio ambiente. A reciclagem e o reaproveitamento de materiais que ainda possuem grande potencial de aplicabilidade são vistos como as soluções mais evidentes em direção ao desenvolvimento sustentável. Um dos aspectos mais relevantes desse desenvolvimento refere-se ao uso racional da energia elétrica. E aqui se insere a Engenharia, com o papel de conceber técnicas e materiais inovadores cujo principal objetivo seja o de reduzir o consumo de energia elétrica, sem que obrigatoriamente se tenha que abrir mão das comodidades conseguidas com sua aplicação. Neste contexto, a presente pesquisa teve o objetivo de analisar de forma quantitativa o desempenho térmico de paredes construídas com blocos de concreto cuja composição agrega o poliestireno expandido (EPS) reaproveitado na forma de flocos e em placas, constituindo desse modo um concreto leve. Realizaram-se experimentos, sistematicamente, com uma parede construída com blocos de concreto comum, considerada como referência; duas paredes com blocos de concreto leve, distintas pelas proporções de EPS/areia; uma parede com tijolos cerâmicos de oito furos e uma com blocos de cimento vazados, de forma a proceder-se com a análise comparativa dos desempenhos térmicos dos sistemas construtivos. Foram realizados ainda, ensaios de resistência à compressão e ensaios de determinação das propriedades termofísicas (ρ , c_p e k) dos blocos de concreto. Os resultados permitiram relacionar quantitativamente o efeito do EPS como agregado em elementos construtivos na redução da taxa de transferência de calor em função da variação de densidade, que também interfere nas outras propriedades térmicas e mecânicas do material, como comprovado. Constatou-se que as paredes de concreto leve apresentaram melhor desempenho térmico do que os outros dois sistemas construtivos consagrados comercialmente. Pôde-se concluir que é viável empregar-se o EPS reaproveitado como material constituinte da mistura para concreto, com a finalidade de fabricar alvenaria de vedação capaz de comportar-se também como isolante térmico entre o meio externo e o interno das edificações. Uma consequência direta disto é a redução do consumo de energia elétrica utilizada pelos sistemas de climatização, sem comprometer a situação de conforto térmico experimentada pelo usuário. Destaca-se ainda que o reaproveitamento do EPS como material de construção contribui com a redução dos problemas ambientais causados por este material. Além disso, os resultados obtidos neste estudo podem servir como referência aos projetistas na hora da escolha do material que irá compor a alvenaria de vedação, e assim poderem adequar os seus projetos às situações mais desejáveis.

PALAVRAS-CHAVE: desempenho térmico, EPS, sistema construtivo alternativo.

ABSTRACT

In the last decades there was a concentrate effort of researchers in the search for options to the problem of the continuity of city development and environmental preservation. The recycling and reuse of materials in industry have been considerate as the best option to sustainable development. One of the relevant aspects in this case refers to the rational use of electrical energy. At this point, the role of engineering is to conceive new processes and materials, with the objective of reducing energy consumption and maintaining, at the same time the benefits of the technology. In this context, the objective of the present research is to analyze quantitatively the thermal behavior of walls constructed with concrete blocks which composition aggregates the expanded polystyrene (EPS) reused in the shape of flakes and in the shape of a board, resulting in a “light concrete”. Experiments were conducted, systematically, with a wall (considerate as a standard) constructed with blocks of ordinary concrete; two walls constructed with blocks of light concrete, distinct by the proportion of EPS/sand; a wall of ceramic bricks (“eight holes” type) and a wall with ordinary blocks of cement, in a way to obtain a comparative analysis of the thermal behavior of the systems. Others tests conducted with the blocks were: stress analysis and thermal properties analysis (ρ , c_p e k). Based on the results, it was possible to establish quantitative relationship between the concentration (density) of EPS in the constructive elements and the decreasing of the heat transfer rate, that also changes the others thermal properties of the material, as was proved. It was observed that the walls of light concrete presents better thermal behavior compared with the other two constructive systems world wide used. Based in the results of the investigation, there was shown the viability of the use of EPS as aggregate (raw material) in the composition of the concrete, with the objective of the fabrication of blocks to non-structural masonry that works as a thermal insulation in buildings. A direct consequence of this result is the possibility of reduction of the consume of the electrical energy used to climatization of buildings. Other aspect of the investigation that must be pointed was the reuse of the EPS as a raw material to civil construction, with a clear benefit to reducing of environmental problems.

KEY-WORDS: thermal behavior, EPS, alternative constructive system.

1 – INTRODUÇÃO

Dados do Programa Infra 2020 para área de energia elétrica, da ABDIB – Associação Brasileira de Infra-estrutura e Indústrias de Base, alertam para a necessidade do Governo brasileiro investir US\$82,3 bilhões até 2020 para assegurar um acréscimo de 85 GW na capacidade de produção de energia, o que corresponderá à cerca de 5 GW/ano (US\$4,8 bilhões/ano), sob pena de comprometer o crescimento econômico do país.

De 1995 a 2002, o Brasil aumentou em 36% a oferta de energia elétrica (ABDIB, 2003). Além de aumentar a oferta, também foram feitas tentativas de introduzir medidas de conservação de energia pelo Governo Federal, que instituiu o PROCEL – Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica, através da Portaria Interministerial nº 1.877 de 30/12/1985. Essas medidas, contudo, não foram suficientes para evitar a crise de abastecimento de energia de 2001.

Nas duas últimas décadas, as facilidades proporcionadas pelos sistemas de ventilação e climatização artificiais induziram uma despreocupação com o consumo de energia elétrica para obtenção de conforto térmico. Nesse período, a construção civil concebeu ambientes onde o conforto térmico dependia exclusivamente desses sistemas. Atualmente, as edificações são responsáveis por 42% do consumo de energia elétrica (LAMBERTS et al, 1997), sendo parte desse consumo devido aos sistemas mecânicos de climatização.

Na região Nordeste, devido a elevada intensidade da radiação solar, o fluxo de calor através dos fechamentos opacos pode chegar a 560 W/m^2 (OLIVEIRA, 1986), representando, portanto, uma importante parcela de carga térmica nas edificações. O desconforto causado por essa situação é bem conhecido. As alternativas para enfrentar o problema constam de modificações que vão desde a concepção do projeto até a substituição dos materiais convencionais utilizados na construção civil.

Através do uso de sistemas construtivos com elevada resistência térmica, pode-se reduzir o fluxo de calor através dos fechamentos e, dessa forma, diminuir a carga térmica no interior das edificações. Conseqüentemente, edificações que venham a utilizar sistemas construtivos com essa característica, apresentarão menor consumo de energia elétrica destinada à climatização.

É possível reduzir em 30% o consumo de energia em prédios já construídos e em até 50% em novas construções (LAMBERTS *et al.*, 1997). Um dos fatores a ser considerado é o de atrelar o conforto ambiental à redução do consumo de energia, tendo em vista que parte do consumo destina-se a esse fim.

O conhecimento das propriedades térmicas dos materiais de construção constitui o ponto de partida para abordagem do problema da transferência de calor através dos fechamentos opacos das edificações. Assim, escolhendo-se corretamente o tipo de material a ser utilizado nas construções, pode-se chegar à concepção de sistemas alternativos capazes de reduzir a parcela da carga térmica solar que é transmitida para o interior das habitações.

Existem várias técnicas para redução do consumo de energia destinada à obtenção de conforto térmico. Na pesquisa desenvolvida, consideraram-se os efeitos da variação da densidade na taxa de transferência de calor através de paredes construídas com blocos de concreto leve – fabricados com seção transversal na forma de sanduíche, composta por duas placas de concreto ao qual agregou-se EPS reaproveitado no formato de flocos, intercaladas por uma placa de EPS, também reaproveitada.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A construção civil é o segmento de atividade que emprega 1 em cada 3 trabalhadores no Brasil, sendo responsável por 14% das transações econômicas do país. Depois dos gastos com mão de obra, gastos com material representam a maior parcela de custo da construção. Entretanto, a construção civil é o ramo que melhores resultados apresenta na reciclagem de resíduos industriais. Escória de alto forno, cinzas e sílica ativa estão entre os resíduos mais empregados e as pesquisas sobre outros resíduos é extensa. No Centro de Pesquisa e Desenvolvimento do Estado da Bahia – CEPED/Bahia, por exemplo, pesquisa-se o uso de lama de fluoreto de cálcio como agregado de blocos cerâmicos (CASSA et al., 2001). Desse modo, a concorrência no setor tem impulsionado pesquisas por sistemas mais eficientes, o que se traduz por leveza, resistência mecânica, e bons desempenhos acústico e térmico.

A pesquisa desenvolvida insere-se no contexto acima descrito com ênfase em desempenho térmico. Para tanto, a revisão bibliográfica foi dividida em três partes: na primeira, apresenta-se uma seleção sobre o uso de materiais alternativos utilizados como agregados ao cimento Portland para fabricação de elementos construtivos; na segunda parte analisa-se o uso do EPS (poliestireno expandido) como agregado ao cimento Portland para composição de blocos. Por último, são apresentados alguns aspectos do desempenho térmico em função da escolha do elemento construtivo.

2.1 – MATERIAIS ALTERNATIVOS AGREGADOS AO CIMENTO PORTLAND

Atualmente, a produção mundial de cimento Portland é de aproximadamente 1,2 bilhões de toneladas por ano. Estima-se que por volta de 2015 a produção atinja cerca de 3,5 bilhões de toneladas/ano (SAMPAIO *et al.*, 2000).

Segundo Muntean (2000) a indústria de cimento Portland (CP) consome grandes quantidades de energia, mais especificamente, para produção de 1 kg de cimento necessita-se de 3100 kJ a 3800 kJ de energia na forma de calor. Como subproduto, gera-se cerca de 1 t de dióxido de carbono para cada tonelada de cimento, o que agrava o problema do aquecimento global devido ao “efeito estufa”. A busca por cimentos alternativos, em particular cimentos

“não-Portland” com qualidades semelhantes àsquelas do CP, constitui um dos maiores desafios do século, o autor sugere ainda que cimentos alternativos podem ser compostos a partir de materiais como: cinza, piritá, casca de arroz e gesso.

Sabir e Wild (2000) afirmaram que o uso de pozolanas em concreto não apenas resulta em vantagens ambientais, mas também na melhoria das propriedades do concreto, em particular de sua durabilidade, fazendo dos materiais que se enquadram nessa categoria ideais para uso em ambientes agressivos.

Swamy (2000) destacou a vantagem da combinação entre o cimento Portland e a cinza resultante da combustão do carvão mineral, que por possuir características pozolânicas, consequência da afinidade química entre os dois materiais, contribui para o aumento da resistência mecânica e da durabilidade.

Stroeven *et al.* (2000) atestaram a viabilidade do uso da cinza da casca de arroz como agregado de cimento Portland e citaram resultados positivos, obtidos em Cuba, no uso de bagaço de cana-de-açúcar com o mesmo objetivo.

Sampaio *et al.* (2000) consideraram percentuais de 10, 15 e 20% de cinza da casca do arroz como agregado na composição de concreto de CP. Como resultado, atestaram o aumento da durabilidade e resistência à corrosão no concreto com cinza.

Arboláezl (2000) investigou as propriedades pozolânicas da casca do arroz e concluiu que a substituição de até 30% de cimento pelo material alternativo não compromete a resistência do cimento.

Geyer, A. *et al.* (2000) analisaram o uso de cinza resultante da incineração do lodo proveniente do tratamento de esgoto como substituto parcial do cimento na mistura para produção de concreto. Concluíram que o material é comparável ao material arenoso e pode ser usado como material de compactação. Para concretos com fator água/cimento igual a 0,80, demonstraram que o resíduo pode substituir até 20% da quantidade de cimento no concreto.

Recena e Reschke (2000) analisaram a utilização de resíduo de couro curtido à base de cromo e demonstraram ser possível obter um tipo particular de fibrocimento adequado

à produção de componentes para construção civil, como placas de piso, placas de forro, telhas planas e telhas onduladas.

Moura (2000) desenvolveu uma pesquisa sobre a reciclagem da escória de cobre e comprovou que a adição de 20% deste material ao concreto eleva significativamente seu desempenho com respeito às propriedades avaliadas (concreto no estado fresco: trabalhabilidade e massa específica; concreto no estado endurecido: massa específica, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, absorção por imersão, absorção por sucção capilar, carbonatação e resistência ao ataque por sulfato). Concluiu, ainda, que a substituição de 40%, em volume, do agregado miúdo por escória de cobre granulada também melhora o desempenho do concreto no tocante às propriedades mencionadas.

Marques e Tochtrop (2001) efetuaram estudos sobre a dosagem de argamassa e blocos de cimento Portland com adição de resíduo de tinta poliuretana, material subproduto dos setores de pintura das indústrias localizadas no distrito industrial de Manaus. O resíduo, depois de seco à temperatura ambiente, triturado em moinho de bolas e classificado em peneiras ABNT, foi adicionado, em diversas proporções, a misturas de cimento, areia e água. Como resultado, os autores obtiveram ganho na resistência mecânica e constataram a viabilidade de uso do resíduo na produção de argamassa e blocos de cimento.

De acordo com Geyer, R. *et al.* (2000), em uma única siderúrgica podem ser geradas milhões de toneladas de resíduo por ano. Descartar esse resíduo em aterros, além de representar perda de material, traz graves conseqüências ao meio ambiente. No trabalho que desenvolveram, foi demonstrada a viabilidade de agregar até 10% de escória de alto-forno ao cimento para formação de concreto sem comprometer suas propriedades mecânicas.

Arrivabene *et al.* (2001) estudaram a possibilidade de utilização da escória de alto forno nas suas diferentes formas (granulada moída, granulada e bruta britada), na produção de blocos para serem utilizados como quebra-mar e obtiveram resultados positivos acerca do desempenho conseguido com o concreto fabricado com o resíduo, denominado pelo autor de concreto-escória.

Mymrin (2001a) analisou, experimentalmente, o uso de resíduos da indústria metalúrgica, acrescido de 2% de CaO como material com potencialidade de ser empregado pela

engenharia civil. O aumento detectado na resistência mecânica à compressão, para determinadas concentrações de resíduo nas amostras, permitiu que o autor recomendasse o uso do resíduo como agregado de novos materiais de construção, utilizados na produção de ladrilhos e tijolos, destacando-se ainda, os aspectos econômicos e ambientais.

Kreuz *et al.* (2001) utilizaram cinza pesada, resultante de processos termoeletrônicos, como material de substituição parcial da areia para concreto e estudaram as propriedades do concreto fresco e endurecido. Embora tendo observado um aumento no consumo de água, os autores constataram que os concretos com cinza pesada apresentaram desempenho mecânico equivalente ou superior ao concreto produzido com materiais convencionais. Além disso, concluíram que para a mesma resistência à compressão, os concretos com incorporação de cinza pesada possuem um menor consumo de cimento por metro cúbico.

Mymrin (2001b) realizou experimentos com amostras contendo agregados provenientes de escória de alto forno, areia de fundição, resíduos de minas de carvão, finos de brita (pó de pedra) entre outros. Os materiais amorfos obtidos apresentaram boa estabilidade. O autor demonstrou que resíduos industriais podem ser utilizados como material “ligante” (de união) para produzir novos materiais de construção, constatando um aumento na resistência à compressão. Afirmou ainda, que os materiais desenvolvidos podem ser economicamente viáveis no caso de utilizá-los na construção civil (em rodovias, pistas de pouso, represas etc.), não apenas pela redução dos custos, mas também com respeito aos aspectos ambientais.

Arruda *et al.* (2001) avaliaram a possibilidade de empregar resíduo vítreo (pó de vidro tipo soda-cal ou vidro branco) na fabricação de concreto e concluíram que o material, da forma como foi processado, não pode ser classificado como material pozolânico. Entretanto, nos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica, o concreto com adição de pó de vidro apresentou características semelhantes às observadas nos traços de referência.

Cordeiro *et al.* (2001) utilizaram resíduos cerâmicos como aditivo mineral para concreto e atestaram que a substituição parcial do cimento pelo aditivo melhora, de forma significativa, as propriedades dos concretos e argamassas, tais como, resistência e durabilidade. Concluíram ainda que, os melhores resultados obtidos para argamassa, se deram substituindo-se 15% do cimento (em massa) pelo resíduo de tijolos moídos.

Colturato *et al.* (2003) avaliaram a viabilidade de transformar rejeitos originados pelas mineradoras de minério de ferro, em areia artificial com o propósito de utilizá-la na construção civil. Os autores separaram os resíduos em duas categorias: rejeito de flotação, caracterizado por ser um material de granulometria mais fina, tendo sido recomendado para uso em argamassa de reboco interno, ou ainda, em pisos quando misturado com brita; e rejeito de espirais, que possui granulometria mais grosseira, que segundo os autores, pode ser empregado no preparo de argamassa para assentamento de peças de alvenaria e revestimento, e também na construção pesada, como por exemplo, em sub-bases e compactação de pavimentos asfálticos ou de concreto, assim como misturado ao próprio concreto de pavimentação.

2.2 – RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Na forma como ocorre no Brasil, o processo de urbanização (construção e demolição) resulta numa quantidade de resíduos perniciosos ao ambiente. A situação se agrava diante da pressão causada pelo déficit habitacional e da política de medidas paliativas, adotadas pela maioria dos municípios no combate ao problema; entre os principais, destacam-se: comprometimento da paisagem, do tráfego de pedestres e veículos e da drenagem urbana, atração de resíduos não-inertes, multiplicação de vetores de doenças e outros (John, 2001). Segundo estes mesmos autores, resíduos são subprodutos gerados pelos processos econômicos. O despejo de resíduos da construção civil em aterros chega a custar US\$100,00/tonelada somente na cidade de São Paulo. Assim, de acordo com os autores, através da reciclagem é possível inverter a situação e transformar o resíduo numa fonte de faturamento. Neste contexto, desenvolveram o “Projeto Entulho Bom” com objetivo de reciclar e reaproveitar o entulho proveniente da construção civil como matéria prima para fabricação de elementos de construção. De acordo com os pesquisadores envolvidos no projeto, a prática permite reduzir os problemas decorrentes do descarte de resíduos da construção civil no meio ambiente.

Para John (2000), a mais destacada dentre as contribuições ambientais que a reciclagem de resíduos sólidos propicia diz respeito aos efeitos diretos na conservação dos recursos naturais, mesmo nos casos onde há abundância, como por exemplo, o calcário e a argila, cuja extração de matéria prima causa dano à paisagem e pode afetar o ecossistema. O autor apontou, ainda, a redução dos aterros e da incineração, a redução do consumo energético

destinado à produção de determinado produto e a redução da emissão de poluentes por conta da fabricação de um mesmo produto, como benefícios diretos da reciclagem.

Segundo John (2001), a política de proteção ambiental vigente no Brasil considera apenas a deposição de resíduos. Para os autores, atualmente não é viável a reciclagem de resíduos dentro do próprio processo responsável pela sua geração. Eles apontam a reciclagem secundária de resíduos como alternativa a ser explorada, ou seja, é viável a reciclagem de um resíduo proveniente de um processo produtivo externo. Afirmam ainda que a falta de tradição em inovação tecnológica é responsável pela resistência apresentada pela indústria da construção civil frente ao uso de resíduos como fonte de matéria prima.

No entanto, recentemente (abril de 2003), a Comissão de Desenvolvimento Econômico Sustentável, Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente aprovou o Projeto de Lei que propõe incentivar o uso, a comercialização e a industrialização de materiais recicláveis na construção de casas populares, endossando a reciclagem de entulho na construção civil (SUPEROBRA, 2003).

De acordo com SuperObra (2003), a proposta do referido Projeto de Lei, contrapõe-se aos trabalhos do Conama (Conselho Nacional de Meio Ambiente) que instituiu, por meio de resolução, em janeiro de 2003, a responsabilidade das empresas quanto ao destino dos resíduos que saem da obra. Com isso a legislação do Conselho responsabiliza diretamente o construtor pelo entulho gerado em sua empresa e soma-se aos regulamentos do PBQP-H (Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat) que servem de referência aos bancos (Caixa Econômica Federal, Itaú, Bradesco e ABN Real) para a liberação de crédito imobiliário.

De acordo com Carneiro *et al.* (2001), o uso do agregado reciclado apresenta vantagens econômicas em relação aos agregados naturais que pode chegar a diferenças de custos finais de até 50%. Esse fato pode ser aproveitado para promoção de benefícios sociais, através da ampliação da oferta pública de infra-estrutura urbana e habitação popular. Como exemplo, os autores citam as cidades de Belo Horizonte-MG, Ribeirão Preto-SP, São José dos Campos-SP, São Paulo-SP e Londrina-PR, que possuem programas de reciclagem de entulhos da construção civil. Em Belo Horizonte-MG já é comum o uso de resíduos na fabricação de blocos e “guias” ou “meio-fio”. O uso de resíduos como material agregado na construção civil,

além de contribuir para economia de gastos com aterramento e, em alguns casos, obter produtos com melhores características técnicas, também permite reduzir a contaminação do meio ambiente.

Para que se possa implementar o uso de novos materiais, concebidos a partir de rejeitos da construção e demolição, é imprescindível que sejam investigadas suas características o que revelará o quanto será viável a inserção destes materiais nos processos construtivos. Sendo assim, atualmente, muitos pesquisadores têm se dedicado a desenvolver atividades que visam explorar as potencialidades dos resíduos da construção civil, bem como caracterizar os novos materiais obtidos com a reciclagem e o reaproveitamento desses resíduos, como se pode constatar a seguir.

Zordan (1997) realizou pesquisa sobre a utilização de entulho como agregado na produção de concreto e concluiu que a parte graúda do entulho apresenta aspectos negativos para a resistência do concreto, por conta dos materiais cerâmicos polidos terem insuficiente aderência à pasta de cimento. O entulho também apresentou maior trabalhabilidade do que os agregados convencionais, provavelmente, afirma o autor, por possuir arestas mais arredondadas e por uma certa quantidade de terra entre os finos. Constatou que a resistência à abrasão ficou em média 26,5% maior que a do concreto de referência. Observou, ainda, que a resistência à compressão do concreto com entulho apresentou, em todos os testes, valores abaixo da resistência à compressão medida no concreto de referência. Entretanto, considerando-se apenas concreto feito com o agregado reciclado, o traço com a menor proporção cimento/agregado apresentou resistência mecânica mais elevada do que os traços com maior percentual de cimento, resultado este que o autor atribuiu ao fato de que nos traços mais ricos (maior quantidade de cimento) os agregados ou a interface cimento-agregado, neste caso, constituem as partes mais frágeis do concreto. O autor recomendou o uso do concreto feito com entulho em obras de infra-estrutura urbana e como alvenaria sem função estrutural. Também sugeriu que se houver uma classificação do entulho que chega às usinas de reciclagem, garantindo que os materiais diferentes sejam separados antes de serem britados, seria possível obter agregado de melhor qualidade.

Para Santana et al. (2001), a utilização de agregados reciclados em argamassas de revestimento constitui uma alternativa viável. As argamassas produzidas com agregado reciclado têm apresentado desempenho significativamente superior ao das argamassas

convencionais. Observou-se em alguns casos que, em função do teor de materiais cerâmicos presentes, a utilização de agregados reciclados permitiu uma redução de 30% no consumo de cimento da argamassa e um incremento nas propriedades mecânicas. Carneiro et al. (2001) destacaram, ainda, outros materiais passíveis de serem reciclados e que compõem o entulho proveniente da construção civil: plásticos, borracha e papelão, todos classificados como resíduos inertes, conforme a NBR 10004. Em função das limitações técnicas atuais, o processo para reciclagem desses resíduos nem sempre é economicamente viável.

Segundo Levy (1997), apud Santana *et al.* (2001), nos últimos anos, diversas construtoras em atividade no país passaram a utilizar argamassas produzidas com agregado reciclado, em substituição às adições e aos agregados convencionais.

2.3 – EPS COMO AGREGADO DE CIMENTO PORTLAND

A utilização de resíduos como matéria prima na fabricação de elementos construtivos tem obrigatoriamente de apresentar vantagens tanto do ponto de vista técnico (por exemplo, resistência mecânica e desempenho térmico) quanto dos pontos de vista econômico e ambiental.

Para Cassa *et al.* (2001), o lixo doméstico não apresenta potencial de aproveitamento como matéria prima para produção de materiais de construção. Por outro lado, os autores admitem que a reciclagem de vidro, plástico, metal, papel e papelão possibilitam a redução do volume de lixo depositado nos aterros, além de economizar recursos naturais e gerar emprego e renda. Não consideram, portanto, a possibilidade de reciclagem de EPS, apenas classificam-no como “resíduo volumoso de baixa densidade”.

Marinho *et al.* (2003) realizaram análise computacional onde compararam o desempenho térmico de um ambiente construído com alvenaria de tijolo (8 furos) e blocos de concreto leve, utilizando o programa Arqitrop. Constataram uma diferença de carga térmica de dez vezes entre os dois casos, sendo que o concreto leve apresentou melhor desempenho.

Bezerra *et al.* (2003a) realizaram análise experimental do desempenho térmico de sistema construtivo (parede) fabricado com blocos de concreto leve com EPS como agregado graúdo, além de ensaio mecânico (compressão). Comparando os resultados com aqueles

obtidos com bloco de concreto comum, demonstraram a viabilidade do uso do bloco de concreto leve tanto no que diz respeito à resistência mecânica como no que se refere ao desempenho térmico.

Bezerra *et al.* (2003b) repetiram a análise anterior considerando-se sistemas construtivos fabricados em bloco de concreto leve e em tijolo de oito furos. Constataram vantagens do sistema com bloco com agregado de EPS sobre o sistema convencional com relação ao desempenho térmico.

2.4 – ASPECTOS DE DESEMPENHO TÉRMICO

O conhecimento de técnicas de conservação pode resultar numa redução de até 15% do consumo de energia pelo setor produtivo. O uso do EPS em obras civis, por exemplo, é uma tecnologia comprovadamente viável para conservação de energia, necessitando apenas maior divulgação de suas qualidades. Na Europa, a construção civil responde por 65% do consumo de EPS, enquanto no Brasil chega a apenas 4% (KRÜGER *et al.*, 1999).

De acordo com Lamberts *et al.* (1997), dos 229 TWh de energia elétrica consumida no Brasil em 1992, cerca de 42% (portanto, 96 TWh) eram destinados às edificações residenciais, comerciais e públicas. As residências respondiam por 23% do consumo de energia nacional – este foi o setor responsável pelo maior crescimento nos últimos anos (triplicou entre 1990 e 1997): enquanto que os setores comercial e público respondiam respectivamente por 11% e 8%.

Mesmo abundantes, os recursos hidroelétricos do país não são ilimitados, além do que, a produção de energia necessita de grandes investimentos. Assim, se forem mantidos os índices de crescimento do consumo nos setores residencial, comercial e público, novas crises de abastecimento poderão ocorrer. Considerações sobre conservação de energia (eficiência energética) serão indispensáveis na concepção de novos projetos, inclusive no que diz respeito às especificações de materiais.

Apesar de estar presente em menos de 10% das residências do país e de representar apenas 7% do consumo de energia doméstica, devido à qualidade das construções atuais, o aparelho condicionador de ar deverá ter sua utilização ampliada nos próximos anos.

No caso das edificações públicas e comerciais, responsáveis por 19% do consumo da energia elétrica produzida no país, a maior parte da eletricidade destina-se aos sistemas de iluminação e climatização (LAMBERTS et al., 1997).

Do exposto acima, percebe-se a importância da escolha do material para constituir o envelope das edificações. Em especial na região Nordeste do Brasil, caracterizada por elevados índices de insolação – responsável pela maior parcela da carga térmica no interior das edificações, a escolha do material dos fechamentos reflete diretamente no consumo de eletricidade, utilizada pelos sistemas de climatização. Em prédios comerciais, por exemplo, onde são utilizados grandes fechamentos transparentes, os sistemas de climatização chegam a responder por até 70% do consumo de energia elétrica. Sobre esse aspecto Lamberts et al. (1997) explicam que, o isolamento térmico ou proteção solar de paredes, janelas e telhados devem ser estudados com o objetivo de se evitar ganhos térmicos excessivos e obter melhorias nas condições de conforto térmico no interior das edificações.

Devido às diferenças entre as funções das edificações residenciais, comerciais e públicas, a dependência entre clima e consumo de energia apresenta especificidades que exigem do projetista, estratégias diferenciadas para enfrentar os problemas decorrentes dos efeitos da carga térmica solar sobre os envoltórios.

Do ponto de vista da Arquitetura, de acordo com Lamberts *et al.* (1997), define-se eficiência energética como a obtenção de um serviço com baixo dispêndio de energia. Desse modo, um edifício será mais eficiente que outro quando proporcionar as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia.

Para Geller (1994), apud Lamberts *et al.* (1997), economizar energia é mais barato do que fornece-la. Nesse ponto, inserem-se Arquitetos e Engenheiros, cujos projetos devem ser concebidos de modo a possibilitar a construção de edifícios que proporcionem, simultaneamente, economia de energia e conforto ao usuário. A adoção desta estratégia, segundo os autores, já produziu vários resultados positivos; a título de exemplo cita-se o “Pavilhão de Sevilha” (Espanha), cujo projeto permitiu reduzir o consumo da energia para obtenção de conforto térmico a um quarto do que seria requerido por um sistema de condicionamento de ar.

Na presente pesquisa, considerou-se a variação da densidade (quantidade de EPS utilizado como agregado) no desempenho térmico de sistema construtivo, tendo sido efetuadas análises experimentais comparativas desse sistema com sistemas compostos por alvenaria de tijolos cerâmicos de oito furos e de blocos convencionais de cimento.

3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nas sessões apresentadas a seguir, são resumidos os principais conceitos dos processos de transferência de calor.

3.1 – RADIAÇÃO

A radiação térmica, emitida por toda matéria com temperatura acima de 0 K, é uma forma de transmissão de calor que não necessita de um meio material para propagação, pois a energia é transmitida na forma de ondas eletromagnéticas (ou ainda, na forma de fótons). Dessa forma, todos os corpos em presença uns dos outros, e que se apresentam a diferentes temperaturas, trocam calor por radiação e o fluxo de calor se traduz como sendo a taxa líquida de energia que é trocada entre os corpos. Na equação 1, descreve-se o fenômeno, matematicamente:

$$Q_{\text{rad}} = A_1 \sigma \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (1)$$

onde:

Q_{rad} – taxa de fluxo de calor radiante (W).

A_1 – área da superfície que participa do processo de transferência de calor (m^2)

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

ε_1 - fator de emissividade da superfície (adimensional)

T_1 – temperatura da superfície 1 (K)

T_2 – temperatura da superfície 2 (K)

A emissividade fornece uma medida da capacidade de emissão de energia de uma superfície em relação a de um corpo negro (radiador ideal). Com valores que se encontram na faixa $0 \leq \varepsilon \leq 1$, a emissividade depende fortemente do material da superfície e do seu acabamento.

A principal fonte de energia radiante conhecida é o sol, sendo que em regiões de baixas latitudes, como no Nordeste do Brasil, a radiação solar é o principal fator de ganho

térmico em edificações. Dessa forma, a análise do comportamento dos materiais utilizados nos fechamentos opacos que compõem o envelope construtivo é imprescindível à análise da eficiência energética das edificações.

3.2 – CONVECÇÃO

Quando um fluido em repouso é aquecido, o gradiente de temperatura entre suas regiões está associado a um gradiente de densidade que provoca deslocamento da massa do fluido de forma cíclica, originando as chamadas correntes convectivas. Dessa forma, o transporte de calor se processa através do transporte de massa. De outro modo, se o fluido escoar sobre uma superfície sólida, estando ambos a temperaturas distintas, haverá troca de calor entre a superfície e o fluido. Se a agitação ou o escoamento do fluido for feito mecanicamente então se fala em transferência de calor por convecção forçada. Por outro lado, se a movimentação do fluido for originada apenas pela diferença de densidade, tem-se a convecção livre (ou natural). Para calcular a taxa de fluxo de calor trocado por convecção utiliza-se a equação mostrada a seguir:

$$Q_{\text{conv}} = A\bar{h}(T_1 - T_2) \quad (2)$$

onde:

Q_{conv} – taxa de fluxo de calor transferido por convecção (W).

A – área da superfície que participa do processo de transferência de calor (m^2)

\bar{h} – coeficiente médio de transferência de calor da convecção ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)

T_1 – temperatura da superfície (K)

T_2 – temperatura do fluido circundante (K)

O coeficiente de transferência de calor por convecção depende do fluido que escoar sobre a superfície, da natureza do escoamento, do acabamento superficial e de uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido.

3.3 – CONDUÇÃO

A condução é o modo de transferência de calor que está diretamente relacionado à atividade atômica, molecular e eletrônica, sendo que o transporte de energia, de uma região de maior temperatura para outra com temperatura inferior, é causado pelo movimento cinético ou pelo impacto direto de moléculas, no caso dos fluidos em repouso, e pelo movimento de elétrons, no caso de metais.

Ozisik (1990) descreve a Lei de Fourier da seguinte forma: “a taxa de fluxo de calor por condução, em uma dada direção, é proporcional à área normal à direção do fluxo e ao gradiente de temperatura naquela direção”. No caso de paredes planas a Lei de Fourier pode ser expressa matematicamente de forma simplificada como:

$$Q_{\text{cond}} = \frac{Ak}{L}(T_1 - T_2) \quad (3)$$

onde:

Q_{cond} – taxa de fluxo de calor transferido por condução (W).

k – condutividade térmica do material (W/m·K)

T_1 – temperatura da superfície 1 (K)

T_2 – temperatura da superfície 2 (K)

A – área da superfície que participa do processo de transferência de calor (m²)

L – distância entre as superfícies 1 e 2 (m)

Num sistema construtivo, o coeficiente de condutividade térmica (k) depende, principalmente, do material, de sua espessura e da diferença de temperatura entre suas faces. Nos materiais compostos, k também é função das propriedades radiantes das superfícies e da fração de ar aprisionado no interior do material (AKTUSU e SATO, 1988). Em materiais porosos, k depende da composição, da quantidade de matéria sólida, da distribuição, geometria e dimensões dos poros, do teor de umidade e do tipo de gás aprisionado. Materiais com porosidade celular homogênea exibem melhores características isolantes do que materiais com mesma densidade, mas com células de ar extrudadas, no qual o calor se propaga principalmente por convecção natural (SILVA, 1999). Analisando o problema, Tzou

(1995) concluiu que, mais que uma propriedade térmica do material poroso, k é uma propriedade estrutural.

3.4 – TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENTRE O MEIO E O AMBIENTE CONSTRUÍDO.

Uma edificação absorve energia térmica do meio externo através dos mecanismos de radiação e convecção. A temperatura de sua face externa eleva-se em relação à temperatura inicial e, como a temperatura da face interna é menor, ocorrerá um fluxo de calor por condução na direção desta última. A intensidade desse fluxo dependerá, entre outros fatores, da espessura da parede (L), da capacidade calorífica do material (c_p), de sua densidade (ρ) e de sua condutividade térmica (k). Em consequência da elevação da temperatura, haverá um fluxo de calor da face interna da parede para o ambiente interno, através dos mecanismos de radiação e de convecção.

Para determinar a influência que o tipo de material tem sobre a intensidade de fluxo através da parede, utiliza-se a propriedade térmica denominada de condutividade térmica (k). Materiais bons condutores de calor têm valores de k elevados – para o alumínio, por exemplo, $k_{Al} = 237 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ a 300 K (INCROPERA e DEWITT, 1998). Quanto maior o valor de k , maior será o fluxo de calor através da parede e, portanto, a temperatura da face interna.

Materiais que possuem baixa densidade (cortiça, eps, lã de vidro e concreto celular) têm baixa condutividade principalmente devido à porosidade que apresentam. Neles, o ar confinado no interior dos poros dificulta a transferência de calor (LAMBERTS *et al.*, 1997).

As variáveis citadas acima podem ser combinadas em duas propriedades térmicas de especial interesse da análise do desempenho térmico dos fechamentos, a saber: difusividade térmica (α) e resistência térmica (R_t).

3.5 – DIFUSIVIDADE TÉRMICA

É a relação entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica, definida como sendo o produto entre o calor específico pela densidade do material. A

difusividade térmica é uma propriedade que está relacionada à propagação do calor em um meio, no decorrer das variações de temperatura em função do tempo. Portanto, quanto maior a difusividade térmica mais rápida será a difusão de calor no meio. A difusividade térmica é expressa na forma matemática como:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (4)$$

onde:

α – difusividade térmica (m^2/s);

k – condutividade térmica ($W/m \cdot K$);

ρ – densidade do material (kg/m^3);

c_p – calor específico do material ($J/kg \cdot K$).

3.6 – RESISTÊNCIA TÉRMICA

Fisicamente, a resistência térmica traduz-se como sendo a maior ou menor facilidade com que se dá o fluxo de calor em determinada direção. Pela equação 5, observa-se que a resistência térmica, neste caso para uma parede plana, depende da geometria do material e de sua condutividade térmica.

$$R_t = \frac{L}{kA} \quad (5)$$

onde:

R_t – resistência térmica (K/W);

L – espessura da parede (m);

k – condutividade térmica ($W/m \cdot K$);

A – área perpendicular ao fluxo de calor (m^2).

Analisando-se as equações (4) e (5) constata-se a possibilidade de redução da taxa de transferência de calor através de fechamentos opacos se esses forem construídos com materiais de baixa condutividade térmica, pois resultarão na redução da difusividade térmica e elevação da resistência térmica.

3.7 – INÉRCIA TÉRMICA

Um sólido retém parte da energia que flui entre suas faces. A quantidade que ficará retida depende da capacidade térmica do material que constitui o sólido. Essa característica dos corpos é denominada de inércia térmica. Materiais com elevada inércia térmica permitem diminuir a amplitude de variação da temperatura no interior das edificações. Dessa forma, os picos de temperatura interna dos ambientes podem ser modificados para reduzir as sensações de desconforto devido ao “calor” ou ao “frio”.

3.8 – CARGA TÉRMICA

Para determinar a quantidade total de calor que deve ser extraída ou fornecida a um ambiente construído para proporcionar conforto térmico aos usuários, deve-se determinar a carga térmica do ambiente, ou seja, a soma de todos os acréscimos e perdas de energia através do envelope da edificação.

De acordo com Lamberts et al (1997), os principais fatores que contribuem para a carga térmica de um ambiente construído são: fatores climáticos (insolação, umidade, temperatura do ar externo), fator humano (número de ocupantes, tipo de atividade) e fator arquitetônico (tipo de iluminação, equipamentos existentes, número de renovações do ar, e tipos de fechamentos).

No caso dos fechamentos opacos, o ganho de calor é determinado simplesmente pelo produto da taxa de calor que o atravessa pela sua área; matematicamente descrito como:

$$Q = q.A \quad (6)$$

onde:

q – fluxo de calor (W/m²).

Q – taxa de fluxo de calor (W).

A – área da superfície que participa do processo de transferência de calor (m²).

3.9 – BIOCLIMATOLOGIA

Segundo D’Amico (2000), a “arquitetura bioclimática” fundamenta-se na adequação e na utilização positiva das condições do meio ambiente e materiais constituindo-se em uma prática que parte do estudo das condições climáticas e ambientais e também da adequação do projeto arquitetônico para proteção e/ou utilização dos distintos processos naturais.

Um dos fatores que deve ter grande ênfase nos projetos bioclimáticos é o conforto térmico no ambiente construído, tendo em vista que, de acordo com a ASHRAE (1993), “conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve o usuário”.

Com base na carta bioclimática de Natal-RN, Lamberts et al (1997) identificaram que o conforto térmico na cidade é alcançado em cerca de 14,7% das horas anuais – logo, o desconforto está presente em 85,2% das horas do ano. Eles apontam que o desconforto é provocado em sua grande maioria (84,7% das horas anuais) devido ao calor, sendo um período insignificante (0,5%) causado devido ao frio. Apontaram o aproveitamento da ventilação natural como principal estratégia a ser adotada para contornar o problema.

3.10 – PROTEÇÃO TÉRMICA DE FECHAMENTOS VERTICAIS

Numa edificação, os ganhos de energia por radiação podem ocorrer de modo direto, difuso, por reflexão da energia no solo e nas adjacências, por emissão do solo aquecido e da atmosfera. As perdas, por sua vez, podem ocorrer por radiação emitida da edificação para o ar circundante, para o solo ou para superfície.

Lamberts et al. (1997) sugeriram usar coberturas vegetais nas paredes externas das edificações como recurso para redução dos efeitos da radiação solar, fato decorrente da “evapotranspiração” e do sombreamento.

Ainda de acordo com Lamberts et al. (1997), é possível reduzir a carga solicitada aos sistemas de climatização artificial, e conseqüentemente a demanda de energia elétrica, se

forem adotadas estratégias como: uso de proteções solares em aberturas; uso de cores claras no exterior; uso de ventilação cruzada e redução da “condutância” (ou “transmitância”) térmica (U) das paredes, janelas e coberturas. Entenda-se por condutância térmica a propriedade definida pelo inverso da resistência térmica total do fechamento.

4 – METODOLOGIA

Em conformidade com os objetivos propostos nesta pesquisa implementou-se uma metodologia de tal forma que os resultados obtidos pudessem fornecer uma gama de informações acerca da caracterização, sob o ponto vista térmico, dos sistemas construtivos fabricados a partir do concreto leve. Para tanto, determinaram-se suas propriedades térmicas e analisou-se o desempenho térmico de paredes construídas com blocos de concreto leve por meio de comparação com uma parede construída com blocos maciços de concreto, que foram considerados como referência, pois, apresentam maior densidade e conseqüentemente maior condutividade térmica do que o bloco leve. O sistema alternativo avaliado também teve seu desempenho térmico comparado ao desempenho de dois sistemas construtivos convencionais.

4.1 – MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO

O desempenho térmico do sistema construtivo alternativo foi avaliado através da análise comparativa em relação à parede construída com blocos de concreto comum, adotado como padrão, e em relação às paredes construídas com dois outros tipos de alvenarias convencionais: blocos de concreto vazado e tijolos cerâmicos de 8 furos. Tal análise foi feita com auxílio das curvas de temperatura traçadas a partir dos dados coletados em cada experimento.

4.1.1 – EXPERIMENTAÇÃO

Para análise do desempenho térmico dos elementos construtivos, adaptou-se a metodologia descrita para ensaio de determinação de condutividade térmica em elementos homogêneos, conhecida como método “caixa quente protegida”, que segue as orientações contidas no texto normativo ASTM C 236 (FARHAT, 1988).

4.1.1.1 – Atividades Preliminares

i) Fabricação e calibração dos termopares

Para a preparação dos sensores de temperatura empregados nos experimentos, utilizou-se a bancada de fabricação de termopares, que se encontra no Laboratório de

Transferência de Calor localizado no Núcleo Tecnológico Industrial da UFRN. Foram construídos 8 termopares tipo T (cobre-constantan) calibre 24 (bitola de 0,51 mm) com revestimento em PVC. Entenda-se por fabricação, a soldagem, que no caso foi a arco elétrico, de uma das extremidades do par termoelétrico. Tal soldagem deve ser feita em meio não oxidante, caso contrário a junção entre os metais será prejudicada, comprometendo a confiabilidade do sensor. Para criar um ambiente inerte utilizou-se o gás argônio injetado na ferramenta de solda. Esta última e os outros equipamentos utilizados na fabricação dos termopares são mostrados na figura 4.1.

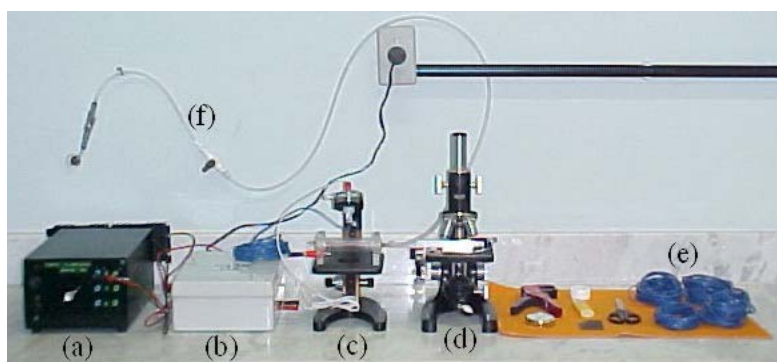


Figura 4.1 – Bancada de Fabricação de Termopares - UFRN/NTI/LTC:
(a) Fonte ajustável; (b) Banco de capacitores; (c) Ferramenta de solda;
(d) Microscópio; (e) Termopares; (f) Tubulação de gás.

Após a fabricação, realizou-se a calibração dos termopares já instalados no sistema de aquisição de dados (SAD) destinado aos experimentos. Como referência, foi utilizado um termômetro de líquido em bulbo de vidro (TLBV) acoplado a um calorímetro (ver figura 4.2), contendo água à temperatura pouco abaixo de 90°C, no início da calibração. O intervalo entre leituras das temperaturas foi de 5 h, durante um período de 60 h.



Figura 4.2 – Bancada de calibração - UFRN/NTI/LTC: (a) SAD;
(b) Calorímetro; (c) Terminal de compensação de junta fria; (d) TLBV.

Tendo em vista que o sistema de aquisição de dados utilizado fornece diretamente os valores de temperatura convertidos para graus Celsius, e que para a análise comparativa do desempenho térmico dos sistemas estudados não houve a necessidade de se fazer a correção dos dados coletados, pode-se afirmar que o procedimento de calibração dos termopares teve como função verificar a estabilidade dos sensores construídos. Pode-se constatar esta estabilidade com auxílio da figura 4.3, onde estão presentes as curvas de resfriamento traçadas a partir das temperaturas registradas pelos termopares, assim como as temperaturas lidas no TLBV. Note-se que o comportamento mostrado pelos termopares assemelha-se bastante ao comportamento observado no termômetro de líquido em bulbo de vidro, apesar da defasagem entre as curvas. Outro objetivo da calibração foi o de verificar o quanto as medições efetuadas por cada par termoelétrico distinguem entre si. Na tabela 4.1 apresenta-se a análise estatística feita considerando-se os valores registrados pelos oito termopares no instante programado para cada medição. Os desvios-padrão calculados revelam que cada sensor registrou, em determinado momento, praticamente os mesmos valores de temperatura dentro do calorímetro, tendo em média variado num intervalo de $0,19^{\circ}\text{C}$ entre o máximo e o mínimo registrado em cada medição.

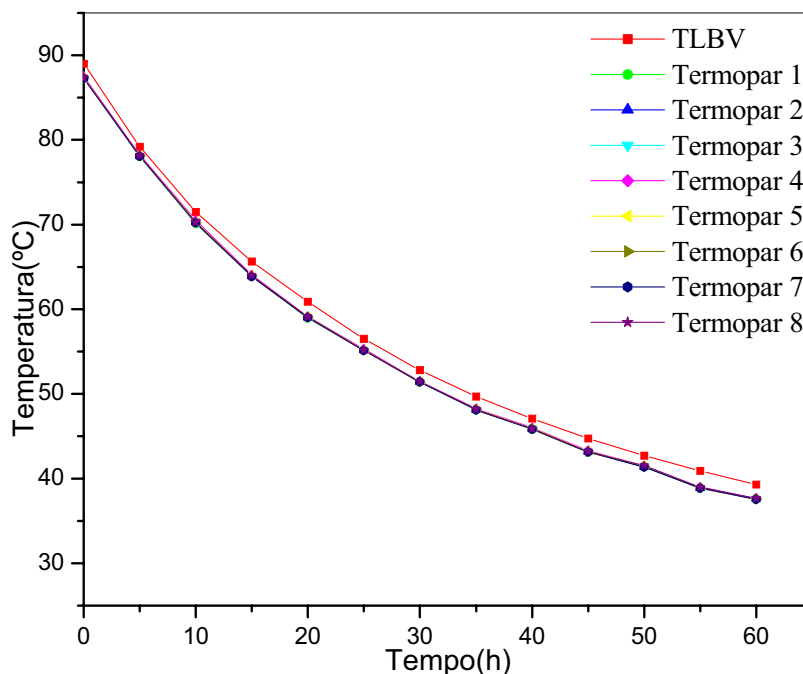


Figura 4.3 – Curvas de resfriamento: termopares × TLBV.

Tabela 4.1 – Análise estatística da calibração dos termopares.

Medições	Média (°C)	Desvio padrão (°C)	T _{min} (°C)	T _{máx} (°C)	Intervalo (°C)
1	87,34	0,08	87,24	87,51	0,27
2	78,13	0,05	78,05	78,21	0,17
3	70,30	0,12	70,12	70,51	0,40
4	63,94	0,06	63,87	64,05	0,18
5	59,05	0,06	58,94	59,15	0,21
6	55,19	0,06	55,11	55,29	0,19
7	51,44	0,03	51,40	51,49	0,09
8	48,17	0,06	48,10	48,27	0,17
9	45,90	0,06	45,80	45,98	0,18
10	43,19	0,06	43,12	43,31	0,19
11	41,44	0,06	41,37	41,51	0,15
12	38,90	0,04	38,86	38,97	0,12
13	37,61	0,05	37,54	37,69	0,14

ii) Acondicionamento térmico dos corpos de prova

Com base no princípio da transmissão de calor que afirma que o fluxo de calor ocorre no sentido de uma região de maior temperatura para outra com temperatura inferior, além de utilizar a fonte radiante para aquecer uma das faces dos painéis de alvenaria, optou-se por construí-los de forma que suas superfícies ficassem voltadas para ambientes contíguos independentes que, durante os experimentos, permaneciam fechados de modo a evitar a interferência de rajadas de vento.

Para intensificar o processo de transferência de calor, o ambiente oposto ao da fonte térmica foi climatizado durante os experimentos, por meio de dois condicionadores de ar com 18.000 Btu cada, disponíveis na sala em questão. Considerando-se que as dimensões da sala climatizada são proporcionalmente grandes, em relação à área das paredes estudadas, fez-se necessário avaliar sua estabilidade térmica no intervalo em que ocorreram os experimentos. Para tanto, foram distribuídos 8 termopares dispostos aleatoriamente em pontos desencontrados, em relação aos planos vertical e horizontal, no volume do recinto.

Primeiramente foram coletados dados para o ambiente sem climatização, objetivando verificar as variações na temperatura ao longo do dia. Em seguida fez-se a coleta de

dados com a climatização ativada. Ambos os experimentos foram realizados em um período de 24 horas. Na figura 4.4, apresentam-se os resultados para ambas as condições.

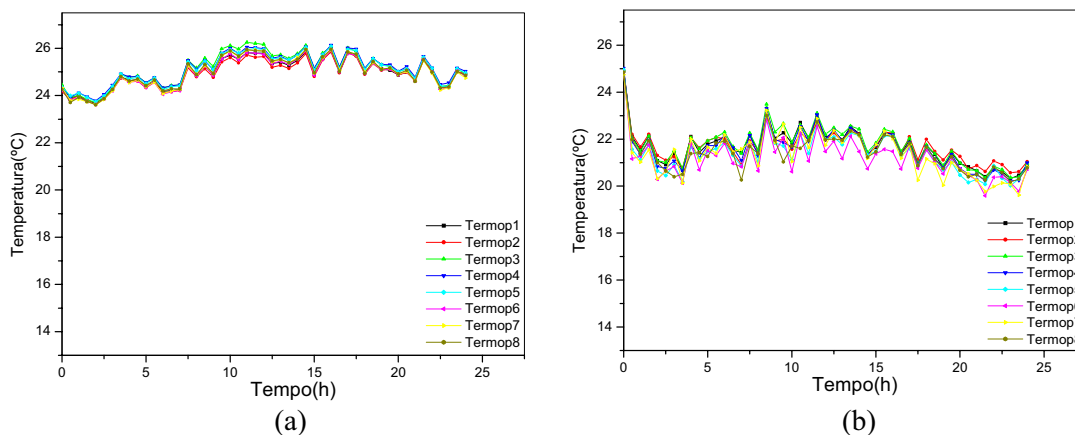


Figura 4.4 – Estabilidade térmica da câmara climatizada:
(a) Não climatizada; (b) Climatizada.

Sem climatização (figura 4.4a), a sala apresentou um perfil de temperatura ao longo do dia que oscilava entre 23,6°C e 26,3°C, ou seja, 2,7°C de amplitude. A partir disto, observou-se que com a climatização ativada, inicialmente, as oscilações nas temperaturas se acentuaram devido à convecção impelida pelos condicionadores de ar.

No entanto, como pode ser observado na figura 4.4b, após 17 h a temperatura volta a apresentar relativa estabilidade, variando no intervalo de 19,5°C a 22,1°C, correspondendo a uma amplitude de 2,6°C, embora sejam temperaturas inferiores às medidas anteriormente.

Considerando-se que o objeto de estudo devia encontrar-se em condição de regime permanente de transferência de calor, e que para o cálculo das médias das temperaturas atingidas pelas superfícies dos corpos de prova somente seriam levados em conta as 5 últimas horas dos experimentos, concluiu-se que a sala possuía estabilidade térmica adequada aos objetivos da pesquisa.

4.1.1.2 – Aparato Experimental

Constituiu-se de três partes fundamentais: sistema de medição de temperatura, corpos-de-prova e fonte de calor radiante.

O sistema de medição de temperatura era composto por um microcomputador equipado com placa de aquisição de dados (Strawberry Tree: DynaRes; Software: WorkBench) de oito canais para sensor termopar, dotada de conversor analógico / digital com compensação automática de junta fria. Os termopares utilizados foram do tipo T (cobre-constantan), apropriados para a faixa de trabalho de -190°C a 370°C (BORCHARDT e GOMES, 1979), estando adequados aos objetivos da pesquisa, pois as temperaturas observadas nos experimentos encontravam-se contidas no intervalo de 20°C a 60°C .

A segunda parte do aparato era formada pelos corpos-de-prova, que neste caso constituíam-se em painéis de alvenaria, construídos com os blocos a serem avaliados. A título de comparação, foram considerados quatro sistemas distintos: blocos de concreto comum (cimento, areia, brita e água) que se convencionou como referencial (BP), blocos de cimento vazados (BCV), tijolos cerâmicos de 8 furos (BC8F) e os blocos de concreto leve (concreto com EPS como agregado – BCL6_10 e BCL10_6), avaliados para duas proporções distintas de EPS/areia (ver figura 4.5 e 4.6).

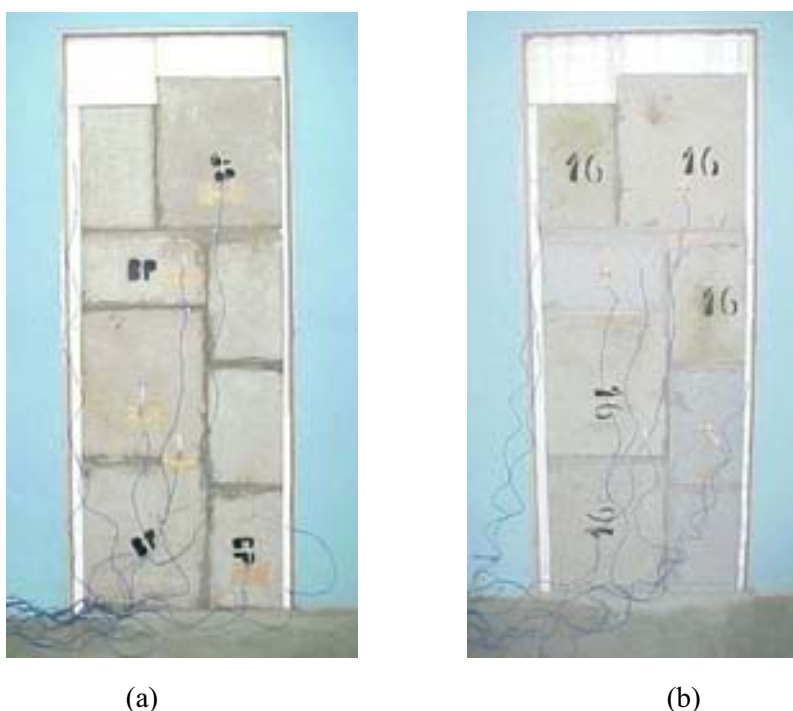


Figura 4.5 – Corpos-de-prova montados e instrumentados: (a) BP (b) BCL6_10.

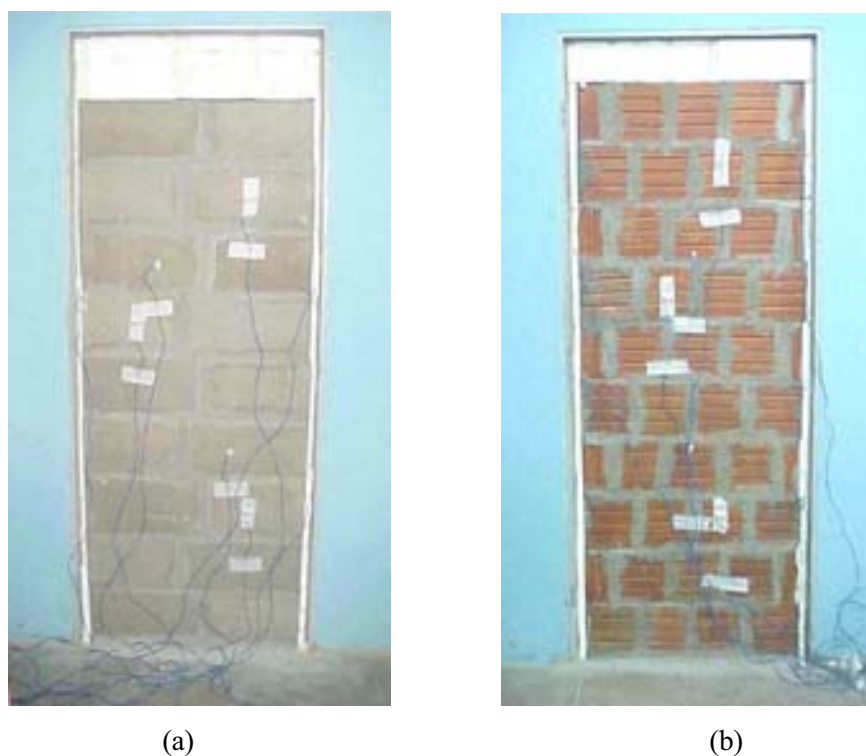


Figura 4.6 – Corpos-de-prova montados e instrumentados: (a) BCV (b) BC8F.

Os blocos de concreto leve foram construídos substituindo-se o agregado graúdo do concreto convencional por EPS na forma de flocos. Além disso, os blocos levavam em seu interior uma placa, também de EPS, formando uma seção transversal do tipo sanduíche com camadas de 0,03 m de concreto leve, 0,04 m de EPS e mais 0,03 m de concreto leve, como apresentado na figura 4.7.

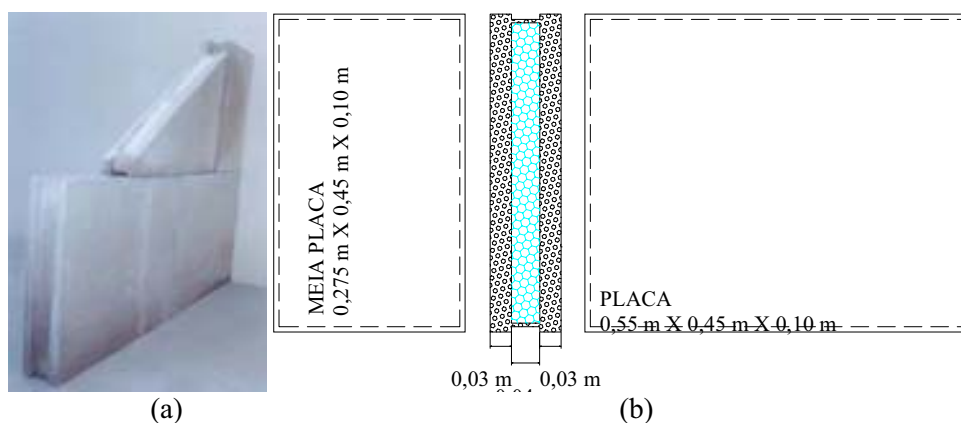


Figura 4.7 – (a) Blocos de concreto leve; (b) dimensões e seção transversal dos blocos utilizados

Na tabela 4.2 estão descritas as proporções dos materiais utilizados na fabricação dos blocos com os dois tipos de concreto considerados. Tanto os blocos de concreto comum quanto os de concreto leve foram fornecidos pela empresa TECLEVE Indústria e Comércio Ltda.

Tabela 4.2 – Composição dos sistemas construtivos avaliados.

Sistema Construtivo	Cimento	EPS	Brita	Areia	Água
BP	1saco (50 Kg)	–	60 ℓ	60 ℓ	30 ℓ
BCL 6_10	1saco (50 Kg)	60 ℓ	–	100 ℓ	30 ℓ
BCL 10_6	1saco (50 Kg)	100 ℓ	–	60 ℓ	30 ℓ

O aparato experimental se completa com a fonte radiante, utilizada para aquecer uma das faces dos corpos de prova. A fonte possuía 24 lâmpadas de filamento de tungstênio, com 200 W cada, dispostas tal como mostrado na figura 4.8.



Figura 4.8 – Fonte de radiação térmica.

4.1.1.3 – Montagem do Aparato Experimental

Inicialmente ergueu-se a alvenaria, assentada com argamassa de cimento e areia no traço 1:5, no local da abertura existente entre as duas salas adjacentes. Tal abertura apresentava 0,80 m de largura por 2,10 m de altura, não sendo totalmente preenchida pela alvenaria, de modo que os espaços vazios restantes, nas laterais e na parte superior, foram preenchidos com EPS, visando reduzir as perdas de calor nas direções perpendiculares a direção do fluxo desejada. Três dias após a construção da parede, segue a colocação dos sensores de temperatura nas faces das paredes. Para as seções consideradas, convencionou-se o seguinte:

Superfície I – Face da parede voltada para a fonte de radiação térmica;

Superfície II – Face da parede voltada para o interior da sala climatizada.

Foram então instalados 3 termopares na superfície I e 3 na superfície II, distribuídos conforme indicado na figura 4.9.

● Superfície I

● Superfície II

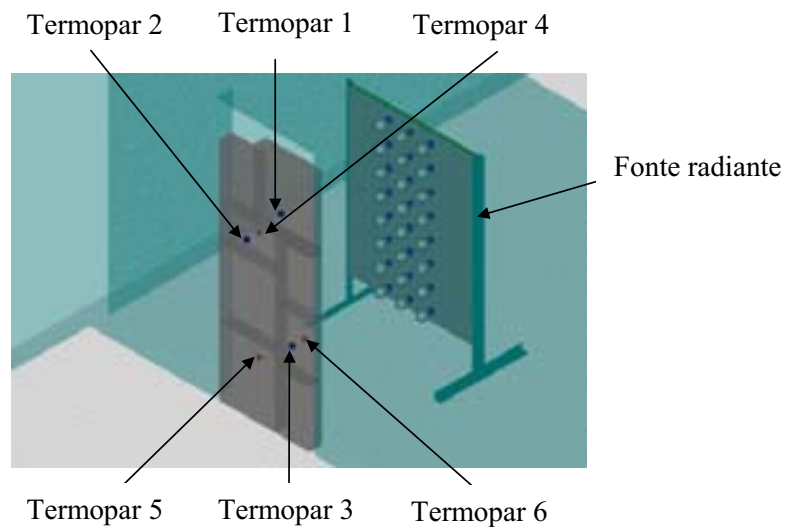


Figura 4.9 – Disposição dos Sensores de Temperatura.

O próximo passo foi a montagem do sistema de aquisição de dados, e o posicionamento da fonte de calor, colocada a 1 m da superfície I, encerrando a montagem do aparato experimental.

4.1.1.4 – Procedimentos de Medição

Configurou-se o sistema de aquisição de dados para armazenar a média das temperaturas lidas nos dez últimos segundos em intervalos de tempo de 15 minutos, em um período de realização de cada experimento correspondente a 24 h.

4.2 – DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE

As medições de densidade dos blocos de concreto leve foram efetuadas pelos técnicos vinculados ao projeto CT-ENERG, tendo sido realizadas no Laboratório de Geoquímica da UFRN. De acordo com Coelho et al. (2003), por não se dispor de um método específico para determinação da densidade de materiais com as características do concreto leve, foram testados três métodos: o método da picnometria, o método de Le Chatelier e o método da densidade aparente utilizando água e parafina desenvolvido por Bó et al. (2002), sendo que este último apresentou-se como o mais apropriado, já que nos dois primeiros, as amostras têm que ser trituradas, fazendo com que os flocos de EPS se soltem e fiquem em suspensão nos líquidos utilizados nos respectivos métodos. Tal fato provoca uma elevação na incerteza das medições, o que levou a descartar aqueles métodos. Já no método adotado, utilizaram-se amostras em forma de cubos com aresta aproximadamente igual a 0,03 m. Dessa forma, o método permitiu ensaiar as amostras tal como foram retiradas dos blocos, ou seja, sem triturá-las, necessitando apenas que fossem impermeabilizadas.

De forma resumida, o método escolhido consiste na preparação de corpos de prova em forma de cubos com arestas aproximadamente iguais a 3 cm, que após serem devidamente pesados, foram mergulhados em parafina fundida por sucessivas vezes, com o intuito de impermeabilizar as amostras para em seguida pesá-los novamente, determinando, desta forma, quanto de parafina foi adicionado ao bloco. Então, os corpos de prova foram colocados em um sistema, tal como o apresentado na figura 4.10, no qual se lê a massa das amostras sob o efeito do empuxo da água contida no béquer.



Figura 4.10 – Sistema utilizado na determinação da densidade dos blocos de concreto leve.

Só então a densidade aparente foi determinada fazendo-se valer a equação (7).

$$\rho_{AP} = \frac{m\rho_{H_2O}\rho_{Parafina}}{M'\rho_{Parafina} - m_{Parafina}\rho_{H_2O}} \quad (7)$$

onde:

ρ_{AP} – Densidade aparente da amostra (kg/m³);

$\rho_{Parafina}$ – Densidade da parafina (kg/m³);

ρ_{H_2O} – Densidade da água na temperatura do experimento (kg/m³);

m – Massa do bloco (kg);

$m_{Parafina}$ – Massa da parafina que impermeabilizou a amostra (kg);

M' – Massa de água deslocada pela amostra (kg).

4.3 – DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA E DO CALOR ESPECÍFICO

As determinações da condutividade térmica e do calor específico foram realizadas utilizando-se o condutímetro Quickline-30, mostrado na figura 4.11, disponível no GGEMMA – Grupo de Pesquisa em Geologia Marinha e Monitoramento Ambiental/UFRN.

As amostras foram cortadas nas dimensões 11 cm x 23 cm no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da UFRN e depois levadas para serem ensaiadas.



Figura 4.11 – Determinação da condutividade térmica e do calor específico dos blocos de concreto.

De posse das propriedades termofísicas dos concretos – padrão e leve – pode-se calcular suas respectivas difusividades térmicas, dado importante na caracterização, referente ao comportamento térmico, dos materiais estudados.

5 – RESULTADOS E ANÁLISE

Por ser o concreto leve um material de construção que agrega a sua composição o poliestireno expandido (EPS), cuja resistência à compressão é relativamente baixa, além dos experimentos para avaliar o desempenho térmico das paredes construídas com os blocos de concreto leve e dos ensaios de determinação das propriedades térmicas foi necessário realizar-se ensaios para verificar a resistência à compressão destes blocos de modo que seu emprego como alvenaria de vedação esteja respaldado por documento normativo. Desta forma, os resultados a seguir estarão apresentados em três partes: resultados de ensaios mecânicos, determinação das propriedades térmicas e resultados de experimentos de análises de desempenho térmico.

5.1 – RESISTÊNCIA MECÂNICA

Foram realizados ensaios de resistência à compressão no Laboratório de Concreto da UFRN (ver figura 5.1), utilizando-se uma prensa hidráulica com tensão de alimentação de 220 V – 380 V e carga máxima de 300 toneladas. As normas utilizadas como referência foram a NBR 6461 (ABNT, 1983a) e a NBR 7171 (ABNT, 1983b) que, embora se refiram especificamente a blocos cerâmicos, o método de ensaio e as especificações de resistências mínimas referem-se à aplicação (no caso, vedação) e não ao tipo de material do qual os blocos são fabricados. Os valores mínimos exigidos por norma encontram-se na tabela 5.1.



Figura 5.1 – Ensaio de resistência à compressão – UFRN/NTI/Lab. Concreto.

Tabela 5.1 – Resistência mínima dos blocos, segundo norma NBR 7171.

Tipo	Categoria	Resistência (MPa)
De vedação	A	1,5
	B	2,5
	C	4
Portante	D	7
	E	10

Fonte: ABNT (1983b)

Como corpos-de-prova, foram considerados os blocos de concreto (leve e convencional) no formato e dimensões dos blocos utilizados pela empresa responsável por sua fabricação. Seguiu-se o método de ensaio descrito na NBR 6461 (ABNT, 1983), referente à verificação da resistência mecânica de blocos cerâmicos para alvenaria. Os resultados dos ensaios estão expressos na tabela 5.2. A título de comparação, também se fez o ensaio para o padrão e para os outros dois sistemas utilizados.

Tabela 5.2 – Resistência à compressão dos blocos.

Blocos	Resistência (MPa)
BP	11,40
BCV	2,75
TC8F	3,96
BTL6_10	3,88
BTL10_6	2,03

Como pode ser observado nas tabela 5.1 e 5.2, os blocos de concreto leve apresentam resistência à compressão de acordo com a mínima resistência exigida por norma para que possam ser empregados como alvenaria de vedação em edificações, conforme a idéia inicial do fabricante. O bloco BCL10_6 enquadra-se na categoria “A”, enquanto o BCL6_10 se enquadra na categoria “B”.

5.2 – Propriedades térmofísicas

Na tabela 5.3 são apresentados os resultados obtidos nos testes para determinação da densidade, calor específico e condutividade térmica das amostras dos elementos construtivos de concreto. Vale ressaltar que as propriedades, para o caso dos “blocos leves”, foram medidas em amostras retiradas das partes dos blocos constituídas apenas pelo concreto leve propriamente dito, ou seja, as propriedades dos blocos, como um todo, devem levar em conta a placa de EPS colocada em seu interior.

Tabela 5.3 – Propriedades termofísicas dos blocos de concreto.

Blocos	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (x106 J/m ³ K)	Condutividade Térmica (W/mK)
BP	1983,4	1,938	1,054
BCL6_10	1438,4	1,827	0,878
BCL10_6	1064,6	1,685	0,445

5.2.1 – Condutividade térmica

Como as condutividades térmicas determinadas nos ensaios feitos com os “blocos leves” correspondem tão somente as condutividades das massas de concreto leve propriamente dita, resolveu-se calcular a condutividade equivalente utilizando-se a analogia feita com os circuitos elétricos para o cálculo da resistência térmica equivalente em paredes compostas. Para simplificar os cálculos, foram feitas as seguintes considerações:

- os blocos apresentam homogeneidade em sua composição;
- a área que participa efetivamente do processo de transferência de calor é igual para todas as seções longitudinais do bloco, como indicado na figura 5.2;
- a condutividade térmica das placas de EPS utilizada nos cálculos foi obtida em tabelas, cujo valor foi de 0,027 W/m·K a 300 K (INCROPERA e DEWITT, 1998; SCHMIDT et al., 1996 e OZISIK, 1990).

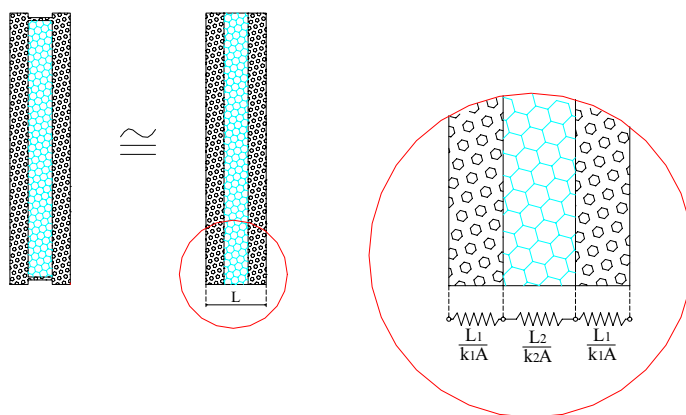


Figura 5.2 – Equivalência entre a seção real e seção de cálculo considerada na analogia elétrica.

De acordo com a analogia elétrica, a resistência térmica equivalente será dada por:

$$R_{\text{teq}} = \frac{L}{k_{\text{eq}}A} = \frac{L_1}{k_1A} + \frac{L_2}{k_2A} + \frac{L_1}{k_1A} \quad (7)$$

onde:

R_{teq} – resistência térmica equivalente (K/W);

L – espessura da parede (m);

k_{eq} – condutividade térmica equivalente (W/m·K);

L_1 – espessura da camada de concreto leve (m);

k_1 – condutividade térmica da massa de concreto leve propriamente dita (W/m·K);

L_2 – espessura da camada de EPS (m);

k_2 – condutividade térmica do EPS (W/m·K);

A – área que participa do processo de transferência de calor (m²).

Arranjando-se os termos da eq. 7, obtém-se que:

$$k_{eq} = \frac{Lk_1k_2}{2k_2L_1 + k_1L_2} \quad (8)$$

Substituindo-se as condutividades térmicas encontradas na tabela 5.3, as espessuras mostradas na figura 4.7 e a condutividade térmica do EPS, foram calculadas as condutividades equivalentes dos “blocos leves”, cujos valores estão presentes na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Condutividade térmica equivalente.

Blocos	Condutividade Térmica (W/m·K)
BCL6_10	0,0645
BCL10_6	0,0619

Quando se considerou a parede composta, as condutividades térmicas dos blocos tiveram seus valores aproximados contrapondo-se aos valores apresentados na tabela 5.3, onde se percebe que a condutividade do BCL6_10 é aproximadamente o dobro da condutividade do BCL10_6. No entanto ao se observar a simulação matemática mostrada na figura 5.3, na qual se fez o valor de k_1 variar no intervalo de [0,01; 1] com incremento de 0,01 e mantendo-se constante os outros parâmetros na eq. 8, percebe-se que a medida em que se incrementam os valores de k_1 , os valores das condutividades térmicas equivalentes tornam-se

cada vez mais próximos em intervalos correspondentes aos respectivos intervalos considerados para os valores de k_1 .

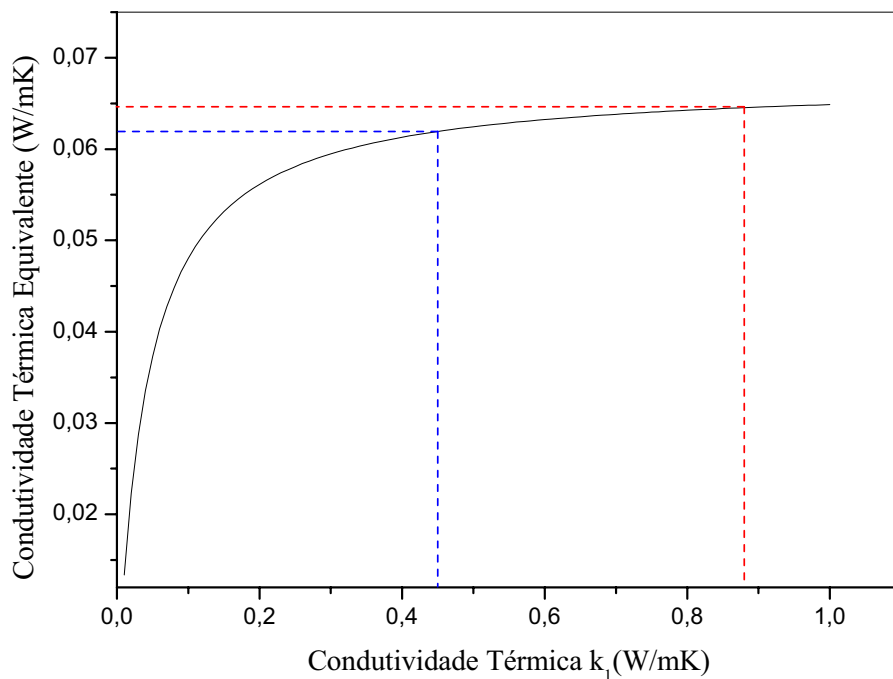


Figura 5.3 – Simulação da variação da condutividade térmica equivalente em função da condutividade térmica do concreto leve.

As retas assinaladas em vermelho e azul, na figura 5.3, correspondem respectivamente às condutividades térmicas dos blocos BCL6_10 e BCL10_6.

5.3 – Desempenho térmico

Nas figuras 5.4 a 5.9, observam-se as curvas para as temperaturas médias das paredes em função do tempo, medidas na face aquecida e na face resfriada, respectivamente.

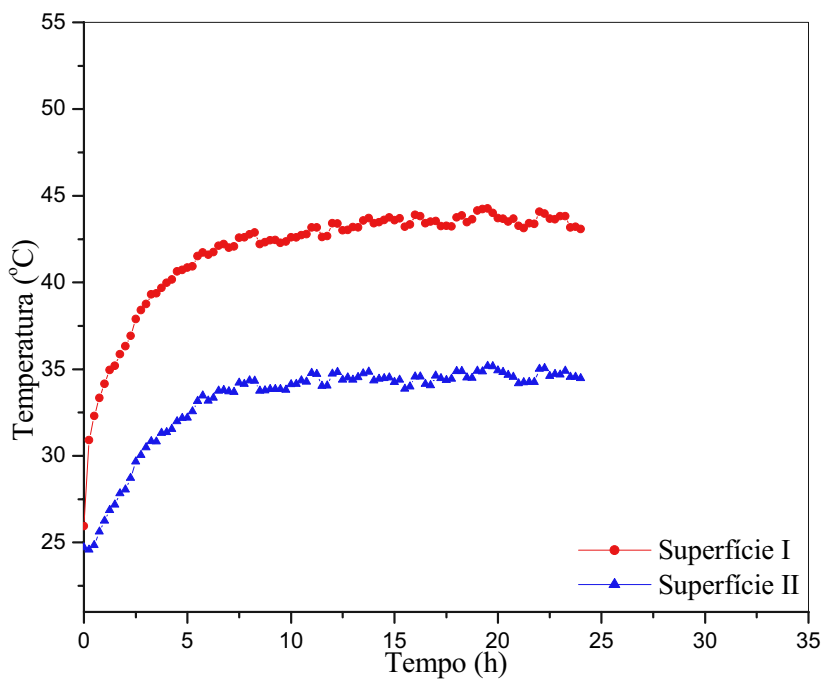


Figura 5.4 – Temperaturas médias do “bloco padrão”.

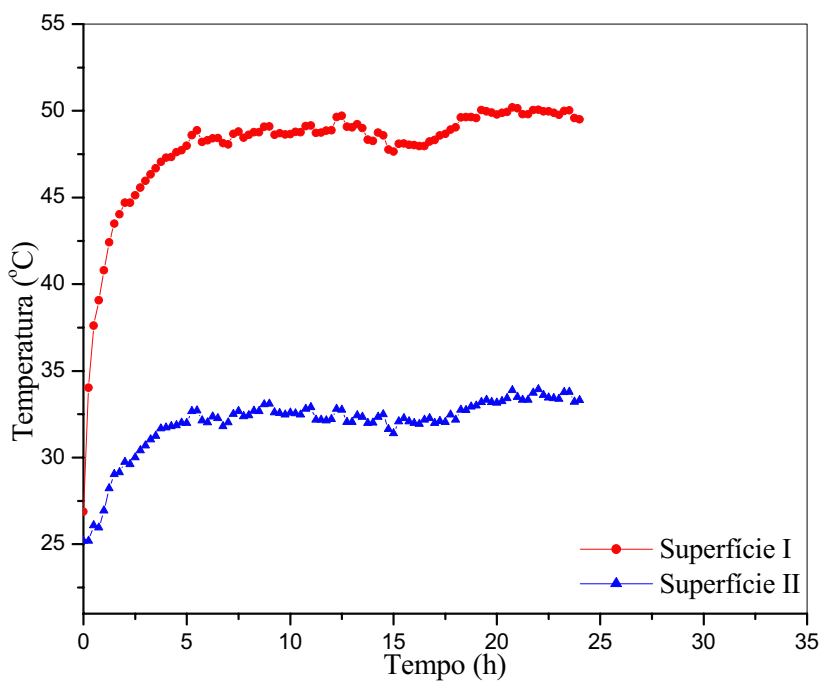


Figura 5.5 – Temperaturas médias do “bloco de cimento vazado”.

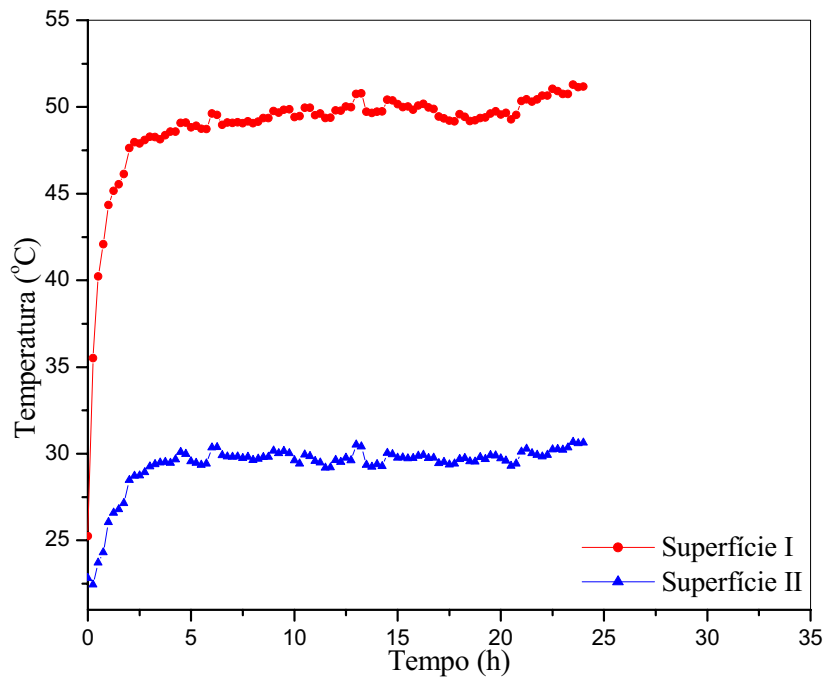


Figura 5.6 – Temperaturas médias do “tijolo cerâmico 8 furos”.

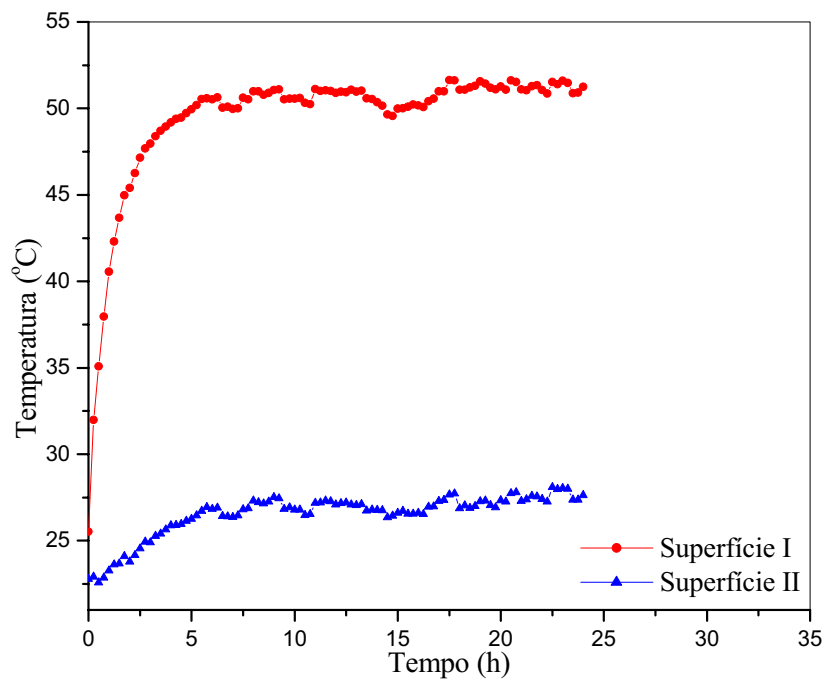


Figura 5.7 – Temperaturas médias do BCL6_10.

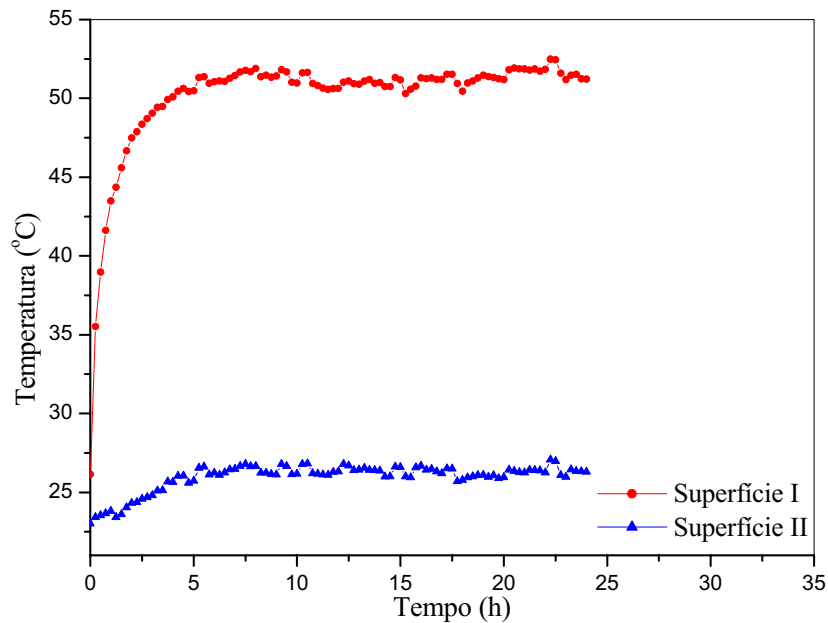


Figura 5.8 – Temperaturas médias do BCL10_6.

Como esperado, em todos os casos considerados, os termopares fixados na superfície II informaram valores de temperaturas inferiores aos lidos no lado exposto à fonte de calor. Na tabela 5.5, estão presentes os valores que ratificam esta afirmação. Tais valores correspondem às médias das temperaturas lidas nas últimas 5 horas de cada experimento.

Tabela 5.5 – ΔT entre as superfícies I e II.

Temperaturas (°C)	BP	BCV	TC8F	BCL6_10	BCL10_6
TI	43,7	49,9	50,3	51,3	51,6
TII	34,7	33,4	30,0	27,5	26,3
$\Delta T = TI - TII$	9,0	16,5	20,3	23,8	25,3

A principal distinção entre os corpos de prova de concreto foi a quantidade de EPS em relação à areia, utilizados na composição dos blocos. Tais variações das proporções de EPS/areia transparecem como sensíveis alterações na densidade dos elementos construtivos analisados.

Sabe-se da significativa influência da densidade de um material sobre sua condutividade térmica, que é a propriedade que rege a maior ou menor facilidade com que um corpo, submetido a um gradiente de temperatura, conduz calor (quanto menor a densidade

menor será a condutividade térmica do material). Este fato está evidenciado, na tabela 5.5, sob distintos pontos de observação: a linha na qual se apresentam as temperaturas lidas na superfície I indica um crescente aumento na temperatura a medida em que se diminui a densidade dos blocos, associada ao aumento da porcentagem de EPS, conseqüência da menor facilidade com que os materiais menos densos permitem a transferência de calor; de forma análoga, as temperaturas lidas na superfície II também refletem a influência da densidade dos corpos sobre a condução do calor, sendo menor a temperatura ao passo em que se reduz a densidade. Entretanto, a evidência mais forte da influência da densidade na condutividade térmica, e conseqüentemente, no desempenho térmico do sistema construtivo, torna-se explícita quando tomadas as diferenças entre as temperaturas das superfícies I e II, percebendo-se a disparidade entre os ΔT 's calculados para cada corpo-de-prova.

A análise dos gráficos, mostrados nas figura 5.4 a 5.8, e das temperaturas médias presentes na tabela 5.5 também permitiu comprovar o melhor desempenho térmico dos blocos de concreto leve em relação às alvenarias convencionais.

A diferença de temperatura entre as faces das paredes sofreu uma variação de 164,4% do bloco padrão para o bloco BCL6_10; 181,1% do padrão para o bloco BCL10_6. Mais uma vez, esses resultados evidenciam o efeito do EPS usado como agregado do concreto na redução da taxa de transferência de calor. Nas figuras 5.9 e 5.10, comparam-se as temperaturas médias nas superfícies das paredes.

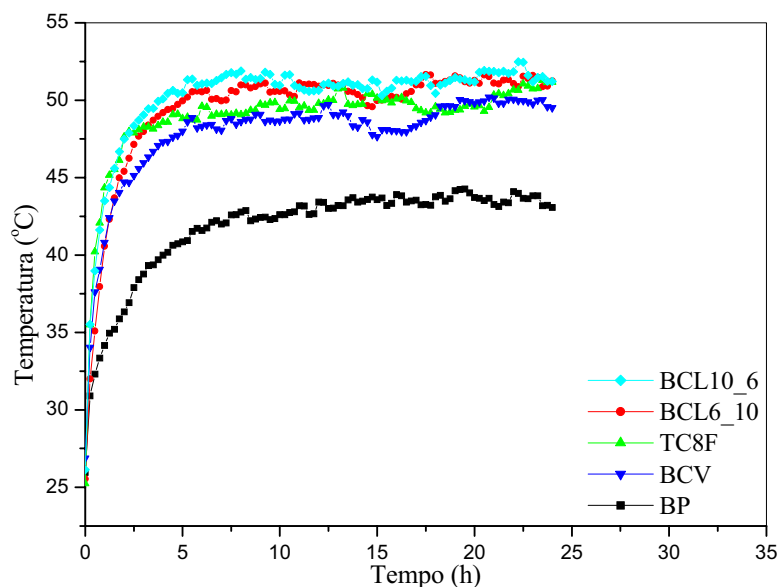


Figura 5.9 – Temperaturas médias na superfície I.

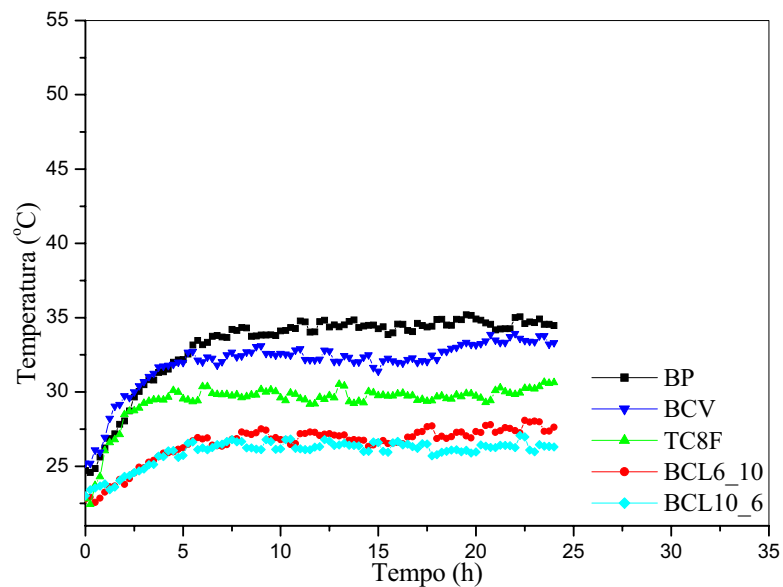


Figura 5.10 – Temperaturas médias na superfície II.

Os gráficos traduzem, novamente, o efeito do uso do EPS agregado nos blocos de concreto; na figura 5.9 vê-se através do perfil de temperatura que a transferência de calor é maior no bloco padrão, devido a sua maior densidade em comparação aos blocos de concreto leve; na figura 5.10, em consequência da menor transferência de calor através das paredes com EPS e dos sistemas construtivos convencionais, a temperatura atingida pelo bloco padrão na superfície II, ficou bem mais elevada que das demais.

Percebe-se, na figura 5.10, que a diferença de temperatura entre os blocos BCL6_10 e BCL10_6 foi relativamente pequena. No entanto, para o bloco com maior percentual de EPS, BCL10_6, houve uma redução significativa da resistência mecânica, ou seja, a resistência mecânica passou de 3,88 MPa para 2,03 MPa (tabela 5.2) quando aumentada a proporção EPS/areia, enquanto que a diferença de temperatura média no regime, considerando-se a superfície II, foi apenas de 1,2°C .

6 – CONCLUSÕES

A partir da análise dos dados coletados pôde-se concluir que:

a) os blocos de concreto com EPS como agregado apresentam valores de resistência mecânica que atendem às normas NBR 6461 (ABNT, 1983a) e NBR 7171 (ABNT, 1983b), servindo, portanto, para uso como alvenaria de vedação;

b) a metodologia utilizada na pesquisa mostrou-se adequada às análises dos desempenhos térmicos dos sistemas construtivos;

c) o desempenho térmico dos sistemas construídos com blocos com EPS como agregado deixou evidente a vantagem do seu uso como forma de reduzir a transferência de calor do meio externo para o meio interno; comparando-se ao bloco padrão, as diferenças de temperaturas entre as faces aquecida e resfriada das paredes com os blocos de concreto leve aumentaram em 164,4% e 181,1%, respectivamente para os BCL6_10 e BCL10_6;

d) os sistemas construídos com elementos convencionais, tijolo de oito furos e bloco de cimento vazado, apresentaram desempenhos térmicos inferiores ao sistema alternativo;

e) a diminuição da quantidade de energia transferida para o interior das edificações tem como principal consequência a economia de energia elétrica necessária à climatização de ambientes. Esse fato deve ser mais evidente em edificações comerciais e públicas situadas nas regiões de baixas latitudes, como acontece com a região Nordeste do Brasil, onde a radiação solar é responsável por uma relevante parcela da carga térmica nos espaços construídos;

f) além da contribuição para a melhoria do conforto térmico dos usuários das edificações, o reaproveitamento do EPS na forma de agregado para a construção civil contribui para a redução do custo na produção dos blocos e evidentemente, permite também, reduzir o impacto causado pelo descarte desse material no meio ambiente.

7 – SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA

Sendo a pesquisa parte de um projeto maior (CT ENERG), sua continuação será imprescindível para determinação de aspectos relativos ao desempenho térmico de protótipos de edificações que deverão ser construídas na segunda etapa do projeto. Assim, pretende-se aplicar a metodologia desenvolvida na execução da parte experimental da pesquisa realizada à análise de desempenho térmico dos protótipos, agora levando-se em consideração fatores ambientais, como: orientação espacial, incidência da radiação solar, direção e velocidade dos ventos. Também deverão ser consideradas outras propriedades necessárias à caracterização do elemento construtivo alternativo, entre elas: fator água/cimento e absorção d'água.

8 – BIBLIOGRAFIA

- AKTUSU, M.; SATO, N. M. N. *Propriedades termofísicas de materiais e componentes de construção*. Tecnologia de Edificações; Ed. Pini; SP; 1988, pp. 519-522.
- ARBOLÁEZL, I. A. *Productive technology of pozolanic cement start from the rice husk*. In: Sustainable Construction Into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials. Proceedings of the International Conference held in João Pessoa, Brazil Nov. 2 to 5, 2000.
- ARRIVABENE, L. F.; CALMON, J. L.; SOUZA, F. L. S. *Aproveitamento da escória de alto forno em concreto de blocos utilizados como quebra-mar. Um enfoque ambiental*. In: IV Seminário Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil – materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo, 5 e 6 de junho, 2001. **Anais...** Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/artigos1.htm>> Acesso em: 05 outubro 2003.
- ARRUDA, M. F. Oliveira; PAMPLONA, H. C.; PAMPLONA, A. D. G. *Reutilização de resíduo vítreo (pó de vidro soda-cal) na fabricação de concreto: um estudo experimental*. In: IV Seminário Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil – materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo, 5 e 6 de junho, 2001. **Anais...** Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/artigos1.htm>> Acesso em: 05 outubro 2003.
- ASHRAE. Handbook of Fundamentals. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, New York, USA. (1993).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INFRA-ESTRUTURA E INDÚSTRIA DE BASE – ABDIB. *Brasil terá de investir US\$ 82 bilhões em energia elétrica até 2020*. Retoque Jornalismo. Assessoria de Imprensa da ABDIB, 24 junho 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 6461**. *Bloco cerâmico para alvenaria – verificação da resistência à compressão*. Método de ensaio. ABNT, 1983a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 7171**. *Bloco cerâmico para alvenaria*. Especificações. ABNT, 1983b.
- BEZERRA, L. A. C.; GURGEL, T. L.; MENDES, J. U. L.; MARINHO, G. S. *Desempenho térmico de parede com bloco de concreto leve*. In: Simpósio de Desempenho térmico de sistemas construtivos alternativos. Natal-RN, 06 a 08 de agosto, 2003a. **Anais...** 1 CD-ROM.

- BEZERRA, L. A. C.; GURGEL, T. L.; MENDES, J. U. L.; MARINHO, G. S. *Bloco alternativo para isolamento térmico de paredes*. In: I Simpósio de conforto térmico da UFPI. Teresina-PI, 26 a 28 de agosto, 2003b. **Anais...** 1 CD-ROM.
- BÓ, Marcelo Dal; NEVES, W. F. das; AMARAL, S. do. *Substituição do mercúrio por água na determinação da densidade aparente do suporte cerâmico cru*. 2002. Disponível em: <http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v07n02/v7n2_8.pdf> Acesso em: 05 Março 2003.
- BORCHARDT, I. G.; GOMES, A. F. *Termometria Termoelétrica: Termopares*. Porto Alegre-RS: Ed. Sagra S. A., 1979, 2ª ed. 79p.
- CARNEIRO, A. P. *et al. Características do entulho e do agregado reciclado*. In: CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. (org.). *Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção*. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. p. 142 - 187.
- CASSA, J. C. S. *et al. Diagnóstico dos setores produtores de resíduos na região metropolitana de Salvador/Bahia*. In: CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. (org.). *Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção*. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. p. 46 - 75.
- COELHO, L. M.; OLIVEIRA, C. V. D.; MENDES, J. U. L.; MARINHO, G. S. *Determinação da densidade de sistema construtivo com agregado de eps*. In: Simpósio de Desempenho térmico de sistemas construtivos alternativos. Natal-RN, 06 a 08 de agosto, 2003. **Anais...** 1 CD-ROM.
- COLTURATO, L. F. D. Braga; FERREIRA, G. B.; ARAÚJO, A. C. *Aproveitamento de rejeitos gerados no beneficiamento de minério de ferro*. In: III Encontro Nacional Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis – ENECS. São Carlos-SP, 21 a 24 de setembro, 2003. **Anais...** 1 CD-ROM.
- CORDEIRO, G. C.; VAILLANT, J. M. M; DÉSIR, J. M. *Resíduo cerâmico como aditivo mineral em concreto*. In: IV Seminário Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil – materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo, 5 e 6 de junho, 2001. **Anais...** Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/artigos1.htm>> Acesso em: 05 outubro 2003.
- D'AMICO, F. Celis. *Arquitectura bioclimática, conceptos básicos y panorama actual*. Ciudades para um futuro más sostenible. Boletín CF+S, nº 14, diciembre 2000. Disponível em: <<http://habitat.aq.upm.es>> Acesso em: 30 agosto 2002.
- FARHAT, G. M. *Métodos de medição condutibilidade térmica em materiais com propriedade isolante térmica*. Tecnologia de Edificações; Ed. Pini; SP; 1988, pp. 507-510.

GEYER, A. L. B.; MOLIN, D. D.; CONSOLI, Nilo C. *Recycling of sewage sludge from treatment plants of Porto Alegre city, Brazil, and its use as a addition in concrete*. In: Sustainable Construction Into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials. Proceedings of the International Conference held in João Pessoa, Brazil Nov. 2 to 5, 2000.

GEYER, R. T.; MOLIN, D. D.; VILELA, A. C. F. *Technical study of an alternative cement with electric arc furnace slag*. In: Sustainable Construction Into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials. Proceedings of the International Conference held in João Pessoa, Brazil Nov. 2 to 5, 2000.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentos de Transferência de calor e massa*. 4ª edição. Rio de Janeiro, RJ. Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1998.

JOHN, V. M. *Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. São Paulo, Escola Politécnica da USP, Departamento de Construção Civil; Tese de livre docência, 2000, 113p.

JOHN, V. M. *Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção*. In: CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. (org.). *Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção*. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. p. 26 - 45.

KREUZ, A. Luiz; CHERIAF, Malik; ROCHA, J. Cavalcante. *Propriedade de concretos estruturais incorporando cinza pesada como parte da areia*. In: IV Seminário Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil – materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo, 5 e 6 de junho, 2001. **Anais...** Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/artigos1.htm>> Acesso em: 05 outubro 2003.

KRÜGER. G. V. *Avaliação comparativa de desempenho térmico de painéis de vedação para edificações em estruturas metálicas*. In: Anais do 2º Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Fortaleza, 1999, em CD-ROM.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. *Eficiência energética na Arquitetura*. São Paulo: P.W., 1997, 192p.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. *Durabilidade de concretos produzidos com resíduos minerais de construção civil*. In: Sustainable Construction Into the Next Millennium:

Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials. Proceedings of the International Conference held in João Pessoa, Brazil Nov. 2 to 5, 2000.

MARINHO, G. S.; OLIVEIRA, M. M. F.; MENDES, J. U. L.; ARAÚJO, V. M. D. de. *Aproveitamento de resíduo para fabricação de bloco construtivo alternativo*. In: III Encontro Nacional Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis – ENECS. São Carlos-SP, 21 a 24 de setembro, 2003. **Anais...** 1 CD-ROM.

MARQUES, M. N. de Melo; TOCHTROP JR., Erwin Francisco. *Argamassa e blocos de cimento portland com adição de resíduo de tinta poliuretana*. In: IV Seminário Desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil – materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo, 5 e 6 de junho, 2001. **Anais...** Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/artigos1.htm>> Acesso em: 05 outubro 2003.

MOURA, W. Almeida. *Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto*. Porto Alegre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil; UFRS; Tese de doutorado, 2000, 232p.

MUNTEAN, M. *Low energy ecological cements*. In: Sustainable Construction Into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials. Proceedings of the International Conference held in João Pessoa, Brazil Nov. 2 to 5, 2000.

MYMRIN, V. A. *New construction materials based on hydrometallurgical waste*. Brazilian Journal of Materials Science and Engineering. July 2001a, v. 4, nº 1, pp 29-36.

MYMRIN, V. A. *Transformation of different industrial wastes to stone-like condition*. Brazilian Journal of Materials Science and Engineering. July 2001b, v. 4, nº 1, pp 37-44.

OLIVEIRA, Terange Utagori. *Estudo experimental das propriedades térmicas do ar aquecido por radiação solar em coletores planos*. Natal, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica; UFRN; Dissertação de Mestrado, 1986; 53p.

OZISIK, M. N. *Transferência de calor: um texto básico*. Ed. Guanabara Koogan S. A. Rio de Janeiro-RJ, 1990.

RECENA, F. A. P.; RESCHKE, J. S. *A utilização de resíduos de couro curtido à base de cromo na produção de componentes para construção civil*. In: Sustainable Construction Into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials. Proceedings of the International Conference held in João Pessoa, Brazil Nov. 2 to 5, 2000.

- SABIR, B. B.; WILD, S. *Temperature effects on the strength development in concrete containing fly ash-metakaolin blended cements*. In: Sustainable Construction Into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials. Proceedings of the International Conference held in João Pessoa, Brazil Nov. 2 to 5, 2000.
- SAMPAIO, J.; COUTINHO, J.S.; SAMPAIO, M.N. *Portuguese rice husk ash as a partial cement replacement*. In: Sustainable Construction Into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials. Proceedings of the International Conference held in João Pessoa, Brazil Nov. 2 to 5, 2000.
- SANTANA, M. J. A.; CARNEIRO, A. P.; SAMPAIO, T. S. *Uso do agregado reciclado em argamassas de revestimento*. In: CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. (org.). *Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção*. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. p. 262 - 299.
- SCHMIDT, F. W.; HENDERSON, R. E.; WOLGEMUTH, C. H. *Introdução às ciências térmicas*. Tradução da 2ª edição. Ed. Edgard Blücher Ltda. 1996.
- SILVA, L. C. Ferreira. *Análise das propriedades mecânicas e térmicas de tijolos solo-cimento com e sem adição do pó da fibra de coco*; Natal; Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica; UFRN; Dissertação de Mestrado, 1999; 148p.
- STROEVEN, P. D. D.; BUI, D. D. V.; DONG, A. V. *Contributions to sustainable development of cementitious materials*. In: Sustainable Construction Into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials. Proceedings of the International Conference held in João Pessoa, Brazil Nov. 2 to 5, 2000.
- SUPEROBRA. *Reciclagem de entulho na construção civil*. Jornal eletrônico SuperObra/Notícias: *Economia e Política*. Disponível em: < <http://www.SuperObra.com>> Acesso em: 08 julho 2003.
- SWAMY, R. N. *Sustainable concrete for infrastructure regeneration and reconstruction*. In: Sustainable Construction Into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials. Proceedings of the International Conference held in João Pessoa, Brazil Nov. 2 to 5, 2000.
- TZOU, D. *The anisotropic overall thermal conductivity induced by preferentially oriented pores*; International Journal of Heat and Mass Transfer; v.38; n.1; 1995.
- ZORDAN, E. Sérgio. *A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto*. Campinas-SP, Faculdade de Engenharia Civil – FEC/UNICAMP, Departamento de Hidráulica e Saneamento. Dissertação de mestrado, 1997, 156p.