

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

MILENE CARVALHO
ARQUITETA E URBANISTA

**INCLUSÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS EM BLOCOS
ESTRUTURAIS CERÂMICOS COM FOCO EM CONFORTO
TÉRMICO**

Porto Alegre
2017

MILENE CARVALHO
ARQUITETA E URBANISTA

**INCLUSÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS EM BLOCOS
ESTRUTURAIS CERÂMICOS COM FOCO EM CONFORTO TÉRMICO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico

Porto Alegre
2017

MILENE CARVALHO

INCLUSÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS EM BLOCOS ESTRUTURAIS CERÂMICOS COM FOCO EM CONFORTO TÉRMICO

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, na área de Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Sandro Campos Amico

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ângela Gaio Graeff – LEME/UFRGS

Prof. Dr. Derval dos Santos Rosa - UFABC

Prof. Dr. Heitor da Costa Silva – LABCON/UFRGS

AGRADECIMENTOS

Aos **meus pais**, que mesmo nem sabendo direito o que tanto consumia meu tempo, sempre se orgulharam muito de mim. A eles que muito contribuíram para hoje eu ser a pessoa e profissional que sou, o meu muito obrigada.

A minha professora de artes do colégio, **Marisiane Kochhann**, que me influenciou a fazer arquitetura, o que foi o começo de tudo.

Ao professor, engenheiro, mestre em engenharia e quase doutor desde os tempos que eu trabalhava com ele, **Marcus Daniel Friederich dos Santos**, o qual influenciou muito na minha formação de arquiteta obreira. Aprendo com ele há mais de quinze anos e talvez há um pouco menos do que isso, sou desafiada por ele.

Ao professor doutor **Uziel Quinino** que disse que eu deveria fazer mestrado para dar aula oficialmente e passar mais aos alunos do que eu via nos canteiros de obras.

Ao amigo, engenheiro mecânico, **Luciano Patella** que fez meu contato com o professor Sandro Amico para entrar no mestrado.

Ao meu chefe **Juan Roberto Germano**, que me proibiu de desistir do mestrado depois de eu tirar a nota mais baixa da minha vida.

Aos colegas **Diego Tolotti**, com formação em engenharia mecânica e **Vitória Oliveira**, excelente professora de química que me ajudaram muito na disciplina de ciência dos materiais.

Aos meus chefes **Juan Carlos Germano** e **Renan Germano** por me liberarem para as aulas.

Ao colega **Matheus Santos** que organizava dentro dos laboratórios o empréstimo dos equipamentos de ensaio e me auxiliava em tudo que era preciso. Sem o apoio dele teria sido tudo bem mais complicado. Ao **Mauro Ricardo da Silveira** do Lapol que também auxiliou nos ensaios.

Ao colega, engenheiro civil, **Leonel Guarnieri**, que ajudei a entrar no mestrado e que depois me ajudou muito com questões técnicas, principalmente referentes a normas, além de ter moldado minhas amostras de graute na obra dele. Obrigada, Leonel, foi confortante nos momentos de stress saber que tinha mais alguém na mesma situação.

Ainda na colaboração quanto aos ensaios, a **Pauluzzi Blocos Cerâmicos** que forneceu os blocos e a Bennter Argamassas que forneceu o aditivo incorporador de ar e informações sobre a utilização do mesmo, principalmente ao **Silvério, Thomás e Jonathan**.

Agradeço aos laboratórios: Design, LAPOL, *LAPROM* e *LEME* onde fiz ensaios. Sem os ensaios, meu trabalho não existiria.

Agradeço a todos os amigos que respeitaram minha ausência em muitos momentos, entender ninguém entendia muito, falando bem a verdade, mas pelo menos respeitavam.

Por fim, ao professor **Sandro Amico**, que me aceitou como orientanda, mesmo sendo arquiteta, com todas minhas limitações. Que me desafiou, do jeito dele, até o último momento, mas que também me ajudou muito. Talvez tenha sido o melhor orientador que eu pudesse ter, já que sou movida por desafios e desafiar é a especialidade dele.

TRABALHOS PUBLICADOS

CARVALHO, M.; AMICO, S.C.; LANDELL, R.; GHILARDI, G.F. Análise do desempenho térmico de blocos estruturais cerâmicos preenchidos com materiais leves utilizando termografia. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, CBECIMAT, 2016, Natal/RN. p. 4184 – 4193.

RESUMO

Materiais aplicados na construção civil são importantes para fornecer segurança e conforto às pessoas. Quanto mais adequadas as propriedades térmicas, menos energia é necessária para aquecer ou resfriar uma área construída. A NBR 15575:2013 - Desempenho de Edificações Habitacionais, padronizou desempenhos térmicos para construções. Os blocos estruturais cerâmicos atendem o padrão mínimo, porém acredita-se que seu desempenho possa ser melhorado utilizando materiais de características isolantes dentro de seus furos verticais. Assim, o objetivo deste trabalho é investigar compósitos de matriz cimentícia com agregados leves para o aprimoramento térmico de blocos estruturais cerâmicos. Para o estudo, quatro corpos de prova foram produzidos preenchendo o vazado dos blocos com compósitos de matriz cimentícia utilizando 80% agregados leves (argila expandida, vermiculita, poliestireno expandido (EPS) e perlita expandida), 20% de cimento, além de uma amostra preenchida com graute estrutural que é comumente utilizado em edificações de alvenaria estrutural. Também foram produzidos corpos de prova com os compósitos, para a análise de massa específica, microscopia, resistência à compressão, absorção de água e desempenho térmico medido por termografia. Nos blocos, analisou-se massa final preenchido, absorção de água e desempenho térmico. No estudo termográfico, os blocos preenchidos foram comparados ao bloco cerâmico vazado padrão. Concluiu-se que o preenchimento dos vazados dos blocos com todos os compósitos leves e com o graute estrutural proporcionou um desempenho térmico melhor que o do bloco padrão, se destacando o EPS como melhor desempenho. O desempenho térmico dos prismas de compósitos confirmou o que foi observado nos corpos de prova de blocos. Assim foram feitos novos corpos de prova maximizando o teor de EPS para 85% e 90%. A análise térmica destas amostras apresentou melhor resultado para EPS 90%. O aumento do teor de EPS diminuiu a resistência à compressão e aumentou a absorção de água, porém, como o foco é o desempenho térmico e o bloco preenchido com o compósito EPS (90%) atende as características normativas, esta pode ser uma solução interessante.

Palavras chave: compósitos de matriz cimentícia, termografia, desempenho térmico, bloco estrutural cerâmico.

ABSTRACT

Materials applied in civil construction are important to provide security and comfort to people. The more appropriate the thermal properties are, the less energy it is necessary to provide heat or cold to a constructed area. The NBR 15575:2013 standard, which deals with the Performance of Residential Constructions, has standardized thermal performances for buildings. Structural ceramic blocks meet the minimum standard, but it is believed that their performance can be improved by means of materials with isolating characteristics within their vertical holes. Thus, the aim of this paper is to investigate cementitious matrix composites with lightweight aggregates for thermal improvement of ceramic structural blocks. For the study, four specimens were produced by filling the hollow spaces of the blocks with cementitious matrix composites using 80% of lightweight aggregates (expanded clay, vermiculite, expanded polystyrene – EPS –, and expanded perlite), and 20% of cement. These were compared to a sample filled with structural grout, which is commonly used in structural masonry buildings. Specimens were also produced with the composites for specific mass analysis, microscopy, compression resistance, water absorption and thermal performance measured by thermography. In the blocks, the final, filled weight was analyzed, as well as water absorption and thermal performance. In the thermographic study, the filled blocks were compared to standard ceramic hollow blocks. It was concluded that filling the hollow spaces of the blocks with all the lightweight composites and structural grout provided a better thermal performance than that of standard blocks, highlighting EPS as having the best performance. Thermal performance of the composite prisms confirms what was observed in the block specimens. Thus, new specimens were made maximizing the EPS content to 85% and 90%. Thermal analysis of these samples presented better results for EPS 90%. The increase in the EPS content decreased compression resistance and increased water absorption. However, as the focus is thermal performance and as the block filled with EPS composite (90%) meets the requirements of the standard, this may be an interesting solution.

Keywords: cementitious matrix composites, thermography , thermal performance, , structural ceramic blocks

SUMÁRIO

TRABALHOS PUBLICADOS.....	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Desenvolvimento sustentável.....	5
3.2 Conforto térmico em edificações.....	5
3.3 Requisitos e critérios de desempenho térmico segundo a NBR 15575	7
3.4 Trocas térmicas.....	9
3.5 Resistência térmica.....	12
3.6 Inércia térmica.....	14
3.7 Condutividade térmica, transmitância térmica e capacidade térmica.....	15
3.8 Emissividade.....	18
3.9 Termografia.....	20
3.10 Bloco estrutural cerâmico.....	22
3.11 Alvenarias	23
3.12 Agregados leves	25
3.12.1 Argila expandida	26
3.12.2 Poliestireno expandido (EPS)	29
3.12.3 Perlita expandida	33
3.12.4 Vermiculita expandida.....	35
3.13 Graute.....	37
4 EXPERIMENTAL.....	38
4.1 Programa Experimental	38
4.2 Materiais.....	39
4.2.1 Bloco.....	39
4.2.2 Agregados	40
4.2.3 Cimento e Incorporador de ar	41

4.2.4 Composição das amostras	42
4.3 Fabricações dos corpos de prova	42
4.3.1 Trabalhabilidade, <i>slump flow</i>	43
4.4 Massa específica	45
4.5 Estudos morfológicos das amostras	45
4.6 Absorção de água	46
4.7 Resistência à compressão axial dos compósitos	46
4.8 Termografia.....	47
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1 Caracterização dos materiais e trabalhabilidade da massa do compósito	50
5.2 Compósitos de matriz cimentícia	53
5.3 Efeito da inclusão de compósitos de matriz cimentícia nas propriedades de blocos estruturais cerâmicos.....	60
5.4 Efeito do aumento do teor de EPS nas propriedades	65
6 CONCLUSÕES	72
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
ANEXO A	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Trocas de calor [Adaptado de Frota <i>et al.</i> , 2007]	7
Figura 2. Troca de calor por condução [adaptado de Frota <i>et al.</i> , 2007].....	10
Figura 3. Tipos de blocos avaliados e sua resistência térmica em (m ² .K)/W [adaptado de Al-Hadhrami <i>et al.</i> , 2013].....	13
Figura 4. Análise térmica das tipologias [adaptado de Sutcu <i>et al.</i> , 2014]	19
Figura 5. Configuração do termovisor. [adaptado de Cortizo <i>et al.</i> , 2008].....	20
Figura 6. (a) sistema aquecimento elétrico; (b) termografia lateral dos blocos com e sem EPS; (c) paredes; (d) tipologias analisadas; (e) blocos com EPS; (f) termografia superior dos blocos com e sem EPS [adaptado de Pedra, 2011]	22
Figura 7. Blocos Cerâmicos : (a) paredes maciças (internas e externas); (b) paredes maciças (externas maciças e internas vazadas); (c) paredes vazadas [NBR 15270-3, 2005]	23
Figura 8. Edificação construída no sistema de alvenaria estrutural [autora, 2016] ...	24
Figura 9. Edificação construída no sistema de alvenaria racionalizada [autora, 2016]	25
Figura 10. Tijolos vazios e com preenchimento de EPS [Pavlik <i>et al.</i> , 2013].	30
Figura 11. Organograma do programa experimental.	38
Figura 12. Ilustração do bloco estrutural cerâmico 14×19×29cm, Fbk 10 MPa.....	39
Figura 13. Ilustração do britador de rolos <i>Maqbrit</i> , LAPROM – UFRGS.....	40
Figura 14. Slump Flow.....	43
Figura 15. (a) fôrmas metálicas para moldagem dos corpos de prova de compressão; (b) fôrmas prismáticas 10×19×29cm em chapa plastificada; (c) blocos etiquetados com identificação para serem preenchidos as misturas (d) corpos de prova cilíndricos capeados (d) amostras moldadas.	44
Figura 16. Amostra sendo analisada no microscópio Dino–Lite Pro.	46
Figura 17. (a) Prensa IH – F2000 kNI marca Shimadzu do LEME – UFRGS, (b) Prensa INSTRON 3382, LAPOL – UFRGS.....	47
Figura 18. Ilustração termografia do compósito.	48
Figura 19. Ilustração termografia do bloco.	48
Figura 20. Câmera de termografia por infravermelho Ti400.....	49
Figura 21. Captura de tela do software Fluke Connect Smart View	49
Figura 22. Caracterização dos agregados leves	50
Figura 23. Agregados: (a-b) argila expandida; (c-d) EPS; (e-f) perlita expandida; (g-h) vermiculita expandida.....	51
Figura 24. Absorção dos agregados porosos ensaiados.....	52

Figura 25. Imagens dos compósitos produzidos: (a) argila expandida; (b) perlita expandida; (c) vermiculita expandida; (d) graute; (e) EPS 80%; (f) EPS 85%; (g) EPS 90%.	53
Figura 26. Fotomicrografias do: (a-b) compósito de argila expandida; (c-d) compósito de EPS; (e-f) graute; (g-h) compósito de perlita expandida; (i-j) compósito de vermiculita	54
Figura 27. Resistência a compressão axial: (a) compósito com argila expandida; (b) compósito com EPS; (c) graute; (d) compósito com perlita expandida (e); compósito com vermiculita expandida (f); resistência média dos compósitos, aos 28 dias.	56
Figura 28. Curvas de temperatura durante os 300 min na face exposta ao calor e na face oposta para os diferentes compósitos	57
Figura 29. Imagens termográficas da face dos compósitos oposta ao aquecimento, após 300 min de aquecimento.	58
Figura 30. Imagens termográficas da face lateral após 300 min de aquecimento.	59
Figura 31. Absorção de água dos blocos preenchidos.	60
Figura 32. Curvas de temperatura durante os 300 min na face exposta ao calor e na face oposta para as diferentes amostras de blocos	61
Figura 33. Imagens termográficas da face oposta dos blocos, após 300 min de aquecimento.	62
Figura 34. Imagens termográficas da face lateral dos blocos após 300 min de aquecimento.	63
Figura 35. Aumento de temperatura depois de 300 min no bloco vazio, blocos preenchidos e compósitos com diferentes materiais.	64
Figura 36. Fotomicrografias dos compósitos com diferentes teores de EPS – (a-b) – EPS (80%); (c-d) - EPS (85%); (e-f) – EPS (90%)	66
Figura 37. Resistência à compressão e deformação: (a) compósito com EPS (80%); (b) compósito com EPS (85%); (c) compósito com EPS (90%); (d) resistência média com diferentes teores de EPS	67
Figura 38. Curvas de temperatura durante os 300 min na face exposta ao calor e na face oposta para as três amostras de compósito com EPS	68
Figura 39. Imagens termográficas de amostras de compósitos com 80%, 85% e 90% de EPS aquecidas por 300 min: (a) face oposta ao aquecimento (b) face lateral.	69
Figura 40. Curvas de temperatura durante os 300 min na face exposta ao aquecimento e na face oposta para as três amostras de blocos preenchidas com compósito com EPS	70
Figura 41. Imagens termográficas dos blocos preenchidos com compósitos (80%, 85% e 90%) de EPS aquecidas por 300 min: (a) face oposta ao aquecimento (b) face lateral.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Transmitância térmica de paredes externas [NBR 15575-4, 2013]	8
Tabela 2. Capacidade térmica de paredes externas [NBR 15575-4, 2013]	8
Tabela 3. Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de materiais [NBR 15220-2, 2005]	16
Tabela 4. Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura [NBR 15220-2, 2005]	17
Tabela 5. Características térmicas de blocos cerâmicos e de concreto [adaptado de Santos <i>et al.</i> , 2015]	17
Tabela 6. Desempenho térmico das tipologias com variação de geometria, condutividade térmica e emissividade [adaptado de Sutcuca <i>et al.</i> , 2014]	19
Tabela 7. Propriedades de concretos com adição de perlita . [Sengul <i>et al.</i> , 2011]..	34
Tabela 8. Composição das amostras	42
Tabela 9. Massa específica dos compósitos	55
Tabela 10. Aumento da massa com a inclusão dos compósitos	60
Tabela 11. Composição das amostras com diferentes teores de EPS.....	65
Tabela 12. Massa específica e absorção de água dos compósitos com diferentes teores de EPS	66
Tabela 13. Aumento da massa com a inclusão de compósitos com diferentes teores de EPS	69
Tabela A.1. Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) dos materiais utilizados para cálculo de sistema de alvenarias com o bloco estudado	81
Tabela A.2 Transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) de sistemas compostos com blocos estruturais cerâmicos de 10 MPa.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Área
α	Absortância
c	Calor específico
cp	Calor específico a pressão constante
CT	Capacidade térmica
d	Distância
e	Espessura do bloco, da camada ou da parede
ε	Emissividade
EPS	Poliestireno expandido
fbk	Resistência característica
fbm	Resistência média
FT-IR	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier
hc	Coefficiente de transferência de calor por convecção,
hr	Coefficiente de transferência de calor por radiação
L	Comprimento característico,
λ	Condutividade térmica
m_s	Massa seca
m_u	Massa úmida da amostra saturada
Pot	Potência
PS	Poliestireno
qx''	Fluxo de calor
q_{cd}	Fluxo térmico por condução
q_{conv}	Fluxo térmico por convecção
q_{rad}	Fluxo térmico por radiação
ρ	Massa específica
PA	Pedra pomes
R	Resistência térmica
Rt	Resistência térmica total (ou equivalente)
[qx]	Taxa de transferência de calor na direção x
SF	Fumo de Sílica
t	Tempo

T_1	Temperatura da superfície 1
T_2	Temperatura da superfície 2
T_e	Temperatura da superfície externa
T_i	Temperatura da superfície interna
θ	Temperatura da superfície da parede de interesse
θ_e	Temperatura da superfície externa da envolvente
θ_r	Temperatura radiante relativa às demais superfícies dos arredores
θ_t	Temperatura da superfície interna da envolvente
U	Transmitância térmica

1 INTRODUÇÃO

O conforto térmico de ambientes é um tema muito discutido quando se pensa em arquitetura, engenharia e sustentabilidade energética. No que se refere à sustentabilidade energética, o tema é sempre relacionado aos índices de consumo de energia elétrica decorrentes do uso de sistemas de ar condicionado para se alcançar o conforto térmico [Oliveira *et al.*, 2015]. Esse consumo é consequência, principalmente, dos elementos arquitetônicos, dos materiais utilizados, dos aspectos climáticos locais e das demandas de conforto humano desejado [Brager *et al.*, 1998]. A determinação das propriedades térmicas de materiais construtivos é, portanto, um relevante campo de estudo dentro da engenharia de materiais e civil para a correta seleção dos materiais.

O crescimento das exigências de conforto térmico em edifícios residenciais é um indicador positivo numa sociedade moderna, desde que suportado por uma conscientização da necessidade da minimização dos recursos energéticos para a sua obtenção [Ferreira, 2006]. Na maioria dos países do mundo, o desenvolvimento de projetos arquitetônicos inicia pela definição do desempenho do produto e suas partes para depois definirem-se as tecnologias construtivas a serem utilizadas. Em países desenvolvidos, estudos referentes a desempenho térmico de vedações verticais já foram feitos há várias décadas. Em países desenvolvidos o custo da energia é bem mais elevado que no Brasil, sendo assim o investimento em vedações é bem mais elevado e se tem um retorno mais rápido com a economia de energia. Paredes de até 50 cm, com blocos alveolares, preenchidos ou não preenchidos com materiais isolantes são comumente utilizadas na Europa. Sistemas de paredes de alvenaria e fachada ventilada sobreposta com materiais isolantes também já foram largamente estudadas. Nos Estados Unidos e Canadá há muitas décadas se utilizam sistemas de vedações leves com isolamento térmico em seu interior. Estes sistemas consolidados há décadas em outros países ainda não são muito estudados ou difundidos pelo custo mais elevado. Soluções que não alterem muito os sistemas construtivos já utilizados são uma maneira de melhorar o desempenho.

No Brasil, em geral, essa prática é diferente principalmente em projetos habitacionais e definem-se primeiro as questões de arquitetura, de seleção das

tecnologias e de custos para, posteriormente, considerar o atendimento às exigências de desempenho [Aquino, 2005]. Entretanto, esse cenário mudou com a entrada em vigor da norma brasileira de desempenho de edifícios habitacionais, ABNT NBR 15575 [2013], que estabelece requisitos, critérios de desempenho e métodos de avaliação para cinco subsistemas de edifícios habitacionais (estruturas, pisos, vedações verticais, coberturas e instalações), além dos requisitos para o edifício como um todo. São estabelecidos requisitos e critérios para avaliação estrutural, segurança ao fogo, estanqueidade à água, desempenho térmico, acústico, lumínico, habitabilidade, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade, conforto tátil e antropodinâmico, adequação ambiental e durabilidade.

Cada vez mais a prática de projetar com enfoque no desempenho deve ser incorporada ao projeto, principalmente em razão da crescente preocupação com durabilidade e sustentabilidade. De fato, segundo as diretrizes apresentadas no documento UNEP/TIE [2007], um produto para atender às exigências de sustentabilidade deve ser pensado estrategicamente, sendo todas as etapas e atividades do processo de produção do edifício direcionadas para atender aos mesmos objetivos de atendimento a requisitos de desempenho e sustentabilidade desde o início do processo.

De 1995 a 2002, o Brasil aumentou em 36% a oferta de energia elétrica e 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. 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 muitos ambientes onde o conforto térmico depende exclusivamente desses sistemas.

Este estudo focou no desempenho térmico de blocos estruturais cerâmicos que atendem o padrão mínimo exigido pela NBR 15575, mas que poderiam ser aprimorados com a inclusão de materiais de características isolantes dentro de seus vazados verticais. Estes blocos são muito utilizados em sistemas de vedações verticais de dois sistemas construtivos: alvenaria estrutural e alvenaria de vedação racionalizada. São construídas desde habitações de interesse social até

empreendimentos de alto padrão com com estes sistemas. Segundo a Pauluzzi Blocos Cerâmicos, empresa fabricante dos blocos estudados, desde 1993 foram construídos mais de 18 milhões de m² de alvenaria com este tipo de bloco cerâmico no Rio Grande do Sul, o que equivale a aproximadamente 180 mil unidades habitacionais.

O aprimoramento das propriedades térmicas deste elemento constituinte dos sistemas de alvenaria, pode trazer além de maior conforto aos usuários das edificações, economia de energia principalmente com sistemas de ar condicionado e consequente contribuição com o meio ambiente.

Pires [2013] investigou os custos de construção e a energia gasta no ciclo de vida de projetos simulados com soluções baseadas em conforto ambiental passivo e ativo, verificando a influência no consumo de energia da edificação. Foram analisados projetos de edificações residenciais verticais e horizontais, de classe média e baixa, em dois climas distintos, examinando o tipo de envelope, as absorções e o uso de elementos construtivos. O ciclo de vida dos projetos propostos foi analisado considerando-se um período de 50 anos, comparando os custos e a energia incorporada das alternativas. Como um segundo parâmetro de sustentabilidade, também se analisou a eficiência energética conforme o selo de eficiência energética Procel Edifica. Os resultados indicam que com o aumento do isolamento da envoltória se verifica uma melhoria do conforto térmico, de até 54%, e economia de energia, em ambos os climas, com um período de retorno de 2 a 6 anos, em alguns casos.

Este trabalho procurou estudar compósitos de matriz cimentícia que possam melhorar o desempenho térmico de blocos estruturais cerâmicos quando inseridos dentro dos vazados dos mesmo. Além do desempenho térmico avaliou-se a influência da inserção destes compósitos nos blocos, tendo em vista o cumprimento das normas existentes para blocos cerâmicos.

2 OBJETIVOS

Objetivo Geral

Investigar compósitos de matriz cimentícia com agregados leves para o aprimoramento do desempenho térmico de blocos estruturais cerâmicos.

Objetivos Específicos

- Comparar o desempenho de blocos estruturais cerâmicos preenchidos com compósitos cimentícios com o desempenho do bloco vazio comercial e blocos preenchidos com graute estrutural;
- Fazer estudos complementares do impacto da inclusão dos compósitos nos blocos, verificando aumento de massa e absorção de água;
- Estudar isoladamente cada um dos compósitos produzidos e correlacionar com os resultados obtidos para os blocos;
- Otimizar o teor de agregado com o material com melhor desempenho para maximizar os benefícios.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Desenvolvimento sustentável

A questão ambiental tem sido largamente difundida, principalmente nas últimas décadas. A conscientização do papel de cada agente inserido nesse cenário passou a ter grande relevância e a sustentabilidade tornou-se uma preocupação concreta. O conceito de sustentabilidade, da forma como é tratado, foi construído a partir de 1962, quando se desmitificou que o ambiente possuía infinita capacidade de absorver os poluentes.

Em 1987, a Organização das Nações Unidas (ONU), definiu desenvolvimento sustentável como sendo aquele capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender às necessidades das futuras gerações. Essa proposta, que rompe com os antigos modelos econômicos, é a primeira a integrar meio ambiente com futuro econômico, social e cultural das sociedades. Contudo, para ser alcançado, o desenvolvimento sustentável depende de planejamento e do reconhecimento de que os recursos naturais são finitos. [Kazazian, 2005].

O desenvolvimento sustentável busca o equilíbrio entre as dimensões ambiental, sociocultural e econômica, onde metas são definidas como ações ambientalmente responsáveis, socialmente justas, economicamente viáveis.

3.2 Conforto térmico em edificações

O homem sempre buscou o conforto e a satisfação do bem-estar físico. Para atender suas exigências de sobrevivência, construiu abrigos para se proteger, buscou proteção em suas vestimentas, procurou a proximidade da água, aprendeu a aproveitar a ventilação natural, entre outros. Desta forma, percebe-se que as exigências humanas de conforto, de modo geral, sempre estiveram relacionadas ao funcionamento do organismo [Frota *et al.*, 2007].

Define-se conforto térmico como o estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda [Lamberts *et al.*, 2011]. As exigências do homem com o conforto térmico estão relacionadas ao funcionamento

do organismo no que diz respeito ao fluxo de calor que ele absorve e que ele perde para o ambiente por meio de trocas térmicas. A sensação de conforto depende de condições ambientais e humanas, e fatores pessoais interferem nessa resposta, seja pela temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do ar e umidade relativa. A sensação de bem-estar é necessária para que o sujeito desenvolva normalmente suas atividades sem acionar, de forma perceptível, seus mecanismos de defesa contra o calor ou contra o frio.

Análises pós-ocupação de edifícios mostram a influência das condições de conforto térmico sobre a qualidade do ambiente e o desempenho dos usuários [Conceição *et al.*, 2011; Krüger *et al.*, 2006]. Entretanto não há consenso quanto aos resultados do rendimento em prédios de atividades educacionais e aos materiais empregados em paredes, revestimentos e coberturas [Nogueira *et al.*, 2003].

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

Nas décadas seguintes, foram criados índices de conforto térmico que procuram englobar num parâmetro o efeito das variáveis do ambiente. Em geral, esses índices são desenvolvidos fixando-se um tipo de atividade e a vestimenta utilizada pelo indivíduo. A partir daí relacionam-se as variáveis do ambiente e reúnem-se, em forma de cartas ou nomogramas, as diversas condições ambientais que proporcionam respostas iguais por parte dos indivíduos [Frota *et al.*, 2007].

O sol incide sobre o edifício (paredes, aberturas e cobertura), e gera um ganho de calor que será função da intensidade da radiação incidente e das características térmicas dos materiais que compõem a edificação. No caso de uma parede opaca exposta à radiação solar e em condições em que exista diferença de temperatura (entre o ambiente interno e externo), existirá troca de calor – a radiação solar incidente será parcialmente refletida, parcialmente absorvida pela parede e dissipada para o interior e parcialmente dissipada para o exterior, como ilustra a Figura 1 [Frota *et al.*, 2007].

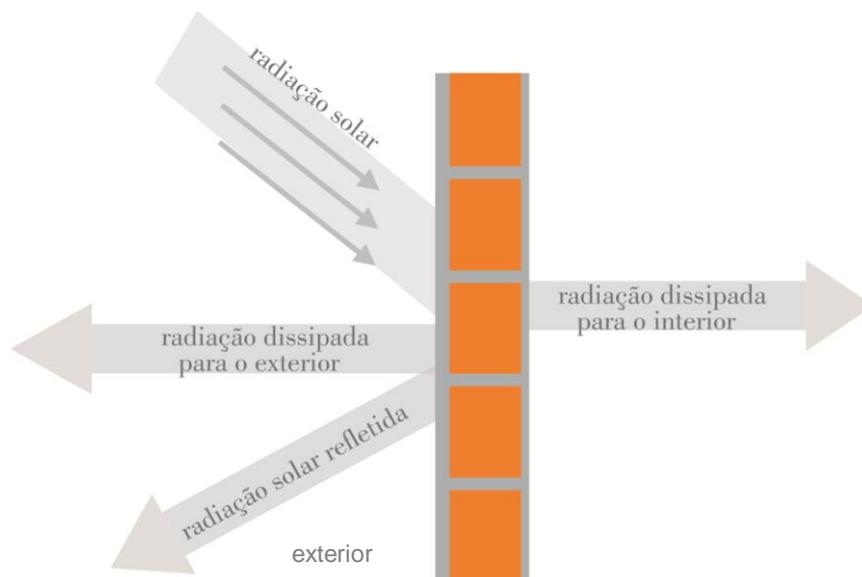


Figura 1. Trocas de calor [Adaptado de Frota *et al.*, 2007]

3.3 Requisitos e critérios de desempenho térmico segundo a NBR 15575

Visando a regulamentação do desempenho de edificações habitacionais, em 2013 entrou em vigor a NBR 15575 – Desempenho de edificações habitacionais. Dentre outros temas a norma aborda o desempenho térmico onde apresenta requisitos e critérios de desempenho.

A transmitância térmica e a capacidade térmica do sistema de vedação vertical em fachadas são requisitos que possuem critérios a serem atendidos em função da zona bioclimática na qual se encontra a edificação. A transmitância térmica representa o fluxo de calor entre a fachada e o ambiente externo, e a capacidade térmica é a quantidade de energia (kJ) requerida para elevar em um Kelvin a temperatura de uma superfície unitária (1 m²). A capacidade térmica é importante em zonas bioclimáticas, onde há variações de temperaturas significativas [NBR15575, 2013].

A transmitância térmica é função das espessuras e da condutividade térmica dos materiais que compõem a fachada, bem como das cores de revestimento externo. Assim, o desempenho térmico requerido será definido pela espessura e condutividade térmica dos blocos cerâmicos e pela espessura e condutividade térmica das argamassas de revestimento, assim como pela absorvância térmica decorrente da cor utilizada.

As paredes utilizadas como vedação externa (fachadas) devem apresentar transmitância térmica segundo os limites estabelecidos na NBR 15575-4 em função da zona bioclimática em que se encontra o empreendimento. A transmitância e a capacidade térmica são calculadas em concordância com o método previsto na NBR 15220 - Parte 1. Em vedações verticais compostas por blocos ou tijolos o desempenho térmico depende da geometria do bloco (espessura das paredes do bloco, dimensão dos vazados - sentido, posição e orientação), da densidade da argila, da densidade da argamassa de assentamento e revestimento e do revestimento.

Para especificar a fachada atendendo os requisitos de desempenho térmico o projetista deverá a partir da escolha da composição da parede – tipo e espessura de blocos, tipo e espessura dos revestimentos externo e interno - calcular a transmitância e a capacidade térmica e, com a absorvância da cor do revestimento externo a ser escolhida, verificar o limite admissível a ser atendido

Os valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U) das paredes externas estão apresentados na Tabela 1, onde α é a absorvância à radiação solar da superfície externa da parede.

Tabela 1. Transmitância térmica de paredes externas [NBR 15575-4, 2013]

Transmitância Térmica U (W/m ² .K)		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
U ≤ 2,5	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$
	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5

Os valores mínimos admissíveis para a capacidade térmica (CT) das paredes externas estão apresentados na Tabela 2. Caso o valor resultante não atenda aos critérios da NBR 15575 para a zona bioclimática considerada, deve-se adotar outra composição de parede que atenda.

Tabela 2. Capacidade térmica de paredes externas [NBR 15575-4, 2013]

Capacidade Térmica CT (kJ/m ² .K)	
Zona 8	Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7
sem exigências	$\alpha \geq 130$

3.4 Trocas térmicas

A termodinâmica é o ramo da física que estuda a relação entre o calor e outras formas de energia. Sempre que houver diferença de temperatura entre dois sistemas colocados em contato, haverá transferência de energia com fluxo na direção do corpo de menor temperatura, até que o sistema atinja o equilíbrio térmico. A essa energia em trânsito dá-se o nome de calor. Desse modo, um sistema pode perder ou receber calor, mas nunca armazená-lo [Kreith, 1977].

O estudo da termodinâmica se atém aos estados iniciais e finais de equilíbrio de um corpo e à determinação da quantidade de calor necessária ao sistema para transição entre estados de equilíbrio. O entendimento dos fenômenos de transferência de calor, em complemento, estende a análise termodinâmica para o estudo dos meios pelos quais esse calor é transferido e para o cálculo das taxas nas quais essa transferência ocorre [Incropera *et al.*, 2003].

Os processos de transmissão de calor são universais e, em muitas situações, ocorrem de forma simultânea. A condução (ou difusão) envolve o fluxo de calor entre dois meios (sólidos, líquidos ou gasosos) que se tocam ou mesmo entre partes de um meio que estejam a diferentes temperaturas. Em nível microscópico, a condução se dá pela comunicação molecular direta, processo no qual há transferência de energia cinética entre as moléculas constituintes do(s) meio(s). [Incropera *et al.*, 2003; Kreith, 1977].

É o único processo pelo qual o calor pode ser transmitido em meios sólidos. Nos meios não sólidos, ela é geralmente combinada com a convecção e/ou radiação. A transferência de calor por condução pode ocorrer em diferentes direções do meio (multidimensional), seja em um regime permanente (estacionário), no qual o perfil de temperatura ao longo do meio se mantém constante com o passar do tempo, seja em um regime transiente (não estacionário), em que se observa a variação do perfil de temperatura em função do tempo.

A equação de transferência de calor por condução que descreve a distribuição de temperatura no meio é regida pela Lei de Fourier, estabelecida a partir de evidências experimentais. No caso de um meio em que há uma distribuição de temperatura $[T(x)]$ em ($^{\circ}\text{C}$), o fluxo de calor $[q_x]$, em (W/m^2), correspondente à taxa de transferência de calor $[q_x]_A$ em (W) na direção $[x]$ por unidade de área $[A]$ em

(m²) perpendicular à direção de transferência, é dado, segundo a Lei de Fourier, (Equação 1) [Kreith, 1977].

$$qx'' = \frac{qx}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Observa-se que a Lei de Fourier define a constante de proporcionalidade [λ], denominada condutividade térmica. Essa propriedade de transporte, cuja unidade de medida é (W/m.K), está relacionada à habilidade de uma substância em conduzir calor, e expressa a taxa pela qual a energia é transferida pelo processo de difusão. A condutividade térmica depende dos elementos estruturais da matéria e da temperatura. [Callister, 2006; Incropera, 2003]. E o fluxo de calor por condução aumenta com o aumento da condutividade.

É possível quantificar o processo de transferência de calor em termos de equações e de taxas apropriadas [Incropera, 2008]. Frota e Schiffer [2007] mostram um esquema de trocas de calor por condução em paredes, usando as Equações (2) e (3) para quantificar a energia transferida por unidade de tempo através do material [Figura 2].

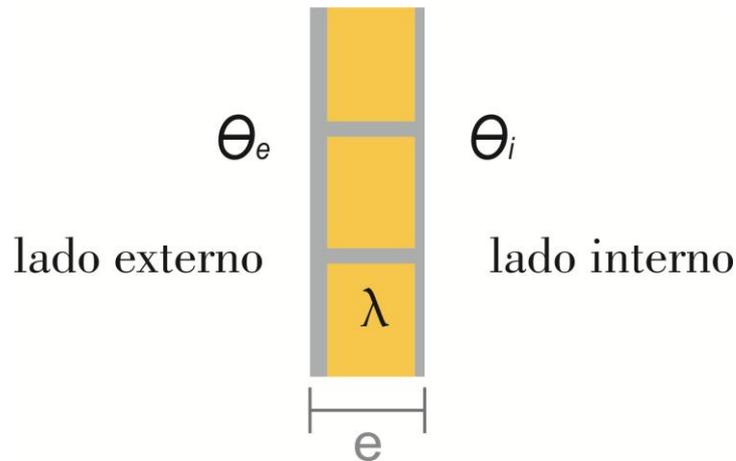


Figura 2. Troca de calor por condução [adaptado de Frota *et al.*, 2007]

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

Sendo: q_{cd} – intensidade do fluxo térmico, fluxo térmico por condução; e – espessura da parede (m); θ_e – temperatura da superfície externa da envolvente; θ_t – temperatura da superfície interna da envolvente (°C); λ – coeficiente de condutividade térmica do material (W/m °C).

Como $\frac{e}{\lambda} = r$, sendo (r) a resistência térmica específica da parede (m² °C/W), tem-se que

$$q_{cd} = \frac{(\theta_e - \theta_t)}{\gamma} \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (3)$$

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

Segundo Frota e Schiffer [2007], a intensidade do fluxo térmico envolvido no mecanismo de troca por convecção é dada pela Equação (4):

$$q_{conv} = h_c (t - \theta) \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (4)$$

Sendo: q_{conv} – intensidade do fluxo térmico por convecção (W/m^2); h_c – coeficiente de trocas térmicas por convecção ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$); t – temperatura do ar ($^\circ C$); θ – temperatura da superfície do sólido (parede) ($^\circ C$), sendo que $t > \theta$ ou $\theta > t$.

Quando relacionadas às superfícies verticais, as trocas de calor por convecção são ativadas pela velocidade do ar. Nesse caso, mesmo que o movimento do ar advinha de causas naturais, como o vento, o mecanismo de troca entre a superfície e o ar passa a ser considerada convecção forçada.

A radiação térmica é uma forma de transmissão de calor que não necessita de um meio material para sua propagação, pois superfícies com temperaturas diferentes do zero absoluto emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Ao contrário da condução e da convecção, na radiação térmica o transporte de energia é instantâneo e associado a um mecanismo diferente. A energia não é transportada ponto a ponto no interior do meio, mas a partir de troca direta entre as superfícies afastadas e a diferentes temperaturas [Incropera *et al*, 2008]. A radiação ocorre mediante dupla transformação da energia: uma parte do calor do corpo com alta temperatura converte-se em energia radiante, que chega até o corpo com baixa temperatura, onde é absorvida em proporção que depende da superfície receptora, sendo novamente transformada em calor [Frota *et al.*, 2007; Papst, 1999].

Todo corpo com temperatura superior a 0K (-273°C) emite calor por radiação, através do vácuo ou de materiais transparentes à referida radiação e o fluxo máximo de calor é emitido por um corpo ideal que é chamado corpo negro. Os corpos reais emitem e absorvem menos calor radiante [Coutinho, 2005].

O fluxo de calor envolvido no mecanismo de troca por radiação será expresso pela Equação (5):

$$q_{rad} = h_r (\theta - \theta_r) \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (5)$$

Sendo: q_{rad} – intensidade do fluxo térmico por radiação (W/m^2); h_r – coeficiente de trocas térmicas por radiação (W/m^2) ($^{\circ}C$); θ – temperatura da superfície da parede de interesse ($^{\circ}C$); θ_r – temperatura radiante relativa às demais superfícies nos arredores ($^{\circ}C$)

O coeficiente hr é um parâmetro simplificado, que resume todos os fatores que interferem nas trocas por radiação, tais como: temperaturas das superfícies, aspectos geométricos e físicos e, principalmente, a emissividade térmica da superfície [Frota *et al.*, 2007].

A radiação incidente é toda radiação que atinge um corpo proveniente dos seus arredores. Ela pode ser oriunda de uma fonte especial, tal como o sol, ou de outras superfícies às quais a superfície de interesse esteja exposta. Citam-se quatro formas de troca de calor por radiação: emissão, absorção, reflexão e transmissão. A emissão ocorre quando a energia é liberada pelo material, a absorção quando ele retém a energia, reflexão é quando o material reflete a energia e a transmissão acontece quando a energia atravessa o material. [Incropera *et al.*, 2008; Verati, 2011]:

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

- Parte da energia solar incidente na superfície da alvenaria será refletida para o exterior; o restante é absorvido pela superfície;
- A temperatura superficial externa aumenta, excedendo a temperatura do ar;
- Parte da energia é emitida para o exterior por radiação de ondas longas e parte é transmitida para o interior por condução através do material da parede e emitida para o ambiente interno. [Frota *et al.*, 2007; Lamberts *et al.*, 2000]

3.5 Resistência térmica

Segundo a NBR 15220 – 1 - Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades, a Resistência térmica de elementos e componentes é o quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de

calor, em regime estacionário, é representada por $[R]$ e dada em $(m^2.K)/W$. A resistência superficial interna $[R_{si}]$ é a resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície interna de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção. Resistência superficial externa $[R_{se}]$ é a resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície externa de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção. Resistência térmica total $[RT]$ é o somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa e é o inverso da transmitância térmica.

Al-Hadhrani *et al.*, [2013] avaliaram a resistência térmica de sistemas de paredes compostos por blocos e argamassas, sendo que foram feitas variações a partir dos dois componentes. A Figura 3 apresenta tipologias de paredes estudadas, as geometrias dos blocos, com a adição de agregados na massa dos blocos ou preenchimento dos vazados com poliestireno expandido ou perlita expandida e os resultados de resistência térmica.

Verifica-se que os blocos tipo 1 a 9 (cerâmicos) obtiveram uma resistência térmica maior que os blocos tipo 10 e 11 (de concreto). O bloco de concreto com argamassa convencional foi o que apresentou a menor resistência térmica. Para este tipo de bloco, a simples adição do isolante perlita aumentou, aproximadamente, em 100% a resistência térmica da unidade. Em todas as tipologias a adição de agregado isolante (na massa do bloco ou no preenchimento dos furos) trouxe benefícios ao sistema.

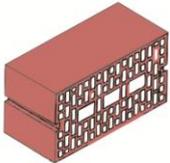
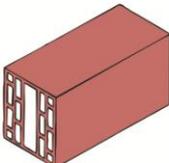
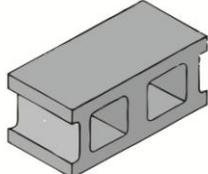
 40×20×20 cm	R (m ² .K)/W	 40×20×20 cm	R (m ² .K)/W	 40×20×20 cm	R (m ² .K)/W
Tipo 1 - bloco cerâmico com argamassa convencional	0,524	Tipo 5 - bloco cerâmico com argamassa isolante	0,576	Tipo 10 - bloco de concreto com argamassa convencional	0,205
Tipo 2 - bloco cerâmico com adição de poliestireno	0,606	Tipo 6 - bloco cerâmico com vazios preenchidos com mistura de perlita e cimento e argamassa isolante	0,633	Tipo 11 - bloco de concreto com adição de perlita	0,409
Tipo 3 - bloco cerâmico com adição de perlita	0,575	Tipo 7 - bloco cerâmico com preenchimento de lã mineral	0,763		
Tipo 4 - bloco cerâmico com vazios preenchidos de EPS	0,557	Tipo 8 - bloco cerâmico com preenchimento de perlita e cimento e com argamassa convencional	0,514		
		Tipo 9 - bloco cerâmico com preenchimento lã mineral e com argamassa convencional	0,524		

Figura 3. Tipos de blocos avaliados e sua resistência térmica em $(m^2.K)/W$ [adaptado de Al-Hadhrani *et al.*, 2013]

Rojas *et al.*, (2015) monitoraram por um ano dois *test cells* na cidade de Torreón, México onde o clima é classificado como quente e úmido. Os *test cells* analisados possuíam paredes de vedação externa e cobertura em concreto maciço, uma com 10cm em concreto convencional apenas (TC1) e outra com 8cm em concreto de alta densidade e 2cm de isolameto térmico (na parte externa) (TC2) ambos com dimensões internas de 280x280x270cm. Cada protótipo possuía uma porta e uma janela circular que foram mantidas abertas no período da noite para ventilação noturna. Para medição das temperaturas internas e externas dos protótipos foram utilizados termopares posicionados no centro de todas as paredes e da cobertura de ambos. Para medição da temperatura e humidade externas foi utilizada uma estação climática. Velocidade dos ventos e radiação solar também foram medidas por outra estação. As variáveis eram registradas pelos equipamentos a cada 10 minutos ao longo de 12 meses. Nas análises experimentais TC2 obteve resistência e capacidade térmica 50% e 10% maior, respectivamente.

3.6 Inércia térmica

Inércia térmica é a capacidade de uma edificação de armazenar e liberar calor. Uma edificação com pouca inércia segue muito próxima a variação da temperatura externa, e com uma inércia infinita, a temperatura interna permaneceria constante. Segundo Yannas e Madonado [1995], o fato de armazenar calor dentro da estrutura da edificação, funciona como um dissipador de calor, evitando a oscilação e os picos durante o dia, e dissipando o calor mais tarde. A necessidade de grande inércia térmica aumenta com a variação da temperatura externa, radiação solar e ou ganhos de calor. A razão entre o calor absorvido e o calor armazenado nos materiais da edificação depende da capacidade térmica do material que compõe a envoltória.

A capacidade térmica por unidade de superfície é o produto da densidade pela espessura e pelo calor específico dos seus componentes. O conceito de massa térmica refere-se à combinação da densidade e da espessura do material, pois se o calor específico dos materiais de construção (inorgânicos) encontram-se na faixa de 0,87 a 1,67 kJ/kg.K, a capacidade térmica dos componentes das edificações é quase inteiramente dependente do peso da estrutura. A massa térmica das

edificações pode estar contida em paredes, partições internas, pisos, coberturas, desde que constituídos de material com grande capacidade térmica como concreto, tijolos, telhas, etc.

Segundo Santamouris [1996] o uso de inércia térmica tem efeito positivo tanto no verão como no inverno. No inverno, o ganho solar durante o dia é armazenado na massa térmica, e transferido para dentro da edificação no período noturno, quando é necessário o aquecimento. No verão, o calor é armazenado na massa térmica, reduzindo o pico das cargas de resfriamento. Comparando edificações com pouca e muita inércia térmica para outono e primavera, observou que edificações leves podem precisar de aquecimento para uma parte do dia e resfriamento para outra parte do dia. Já edificações com inércia térmica, dependendo das condições externas, podem apresentar condições internas confortáveis.

3.7 Condutividade térmica, transmitância térmica e capacidade térmica

O coeficiente de condutividade térmica (λ) é definido como a propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m^2 , quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 K/m [NBR 15220-1, 2005]. Frota e Schiffer [2007] esclarecem que esse coeficiente depende da densidade do material, da natureza química e da umidade do material, pois a água é mais condutora que o ar.

Segundo a NBR 15220, transmitância térmica ou coeficiente global de transferência de calor (U) é o inverso da resistência térmica total e é expressa pela unidade $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Já a capacidade térmica (C) é a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema e é expressa pela unidade J/K .

A transmitância térmica de componentes, de ambiente a ambiente, é o inverso da resistência térmica total, conforme a Equação (6):

$$U = 1/RT \quad (6)$$

A capacidade térmica de componentes pode ser determinada pela Equação (7):

$$C_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot C_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot C_i \cdot \rho_i \quad (7)$$

Sendo: λ_i é a condutividade térmica do material da camada i^a ; R_i é a resistência térmica da camada i^a ; e_i é a espessura da camada i^a ; c_i é o calor específico do material da camada i^a ; ρ_i é a densidade de massa aparente do material da camada i^a .

Segundo a NBR 15220, a resistência térmica total de um componente plano (parede ou laje, por exemplo) constituído de camadas homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor é determinada pela Equação (8):

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{tn} + R_{ar1} + R_{ar2} + \dots + R_{arn} \dots \quad (8)$$

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

Segundo a NBR 15220, no caso dos blocos cerâmicos com vazados na vertical, como o ar apresenta uma densidade de massa aparente muito baixa ($\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$), a sua capacidade térmica, em componentes com câmaras de ar, pode ser desprezada.

A Tabela 3 apresenta valores médios de coeficiente de condutividade térmica (λ) e calor específico (c) para alguns materiais de construção [NBR 15220-2, 2005].

Tabela 3. Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de materiais [NBR 15220-2, 2005]

Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/(m.K))	c (kJ/(kg.K))
argamassa comum	1800-2100	1,15	1,00
argamassa de gesso (ou cal e gesso)	1200	0,70	0,84
tijolos e telhas de barro	1000-1300	0,70	0,92
	1300-1600	0,90	0,92
	1600-1800	1,00	0,92
	1800-2000	1,05	0,92
concreto normal	2200-2400	1,75	1,00
concreto com argila expandida dosagem de cimento > 300 kg/m ³ , r dos inertes > 350 kg/m ³	1600-1800	1,05	1,00
	1400-1600	0,85	1,00
	1200-1400	0,70	1,00
	1000-1200	0,46	1,00
dosagem de cimento < 250 kg/m ³ , r dos inertes < 350 kg/m ³	800-1000	0,33	1,00
	600-800	0,25	1,00
	< 600	0,20	1,00
concreto de vermiculite (3 a 6 mm) ou perlite expandida fabricado em obra	600-800	0,31	1,00
	400-600	0,24	1,00
dosagem (cimento/areia) 1:3	700-800	0,29	1,00
	600-700	0,24	1,00
dosagem (cimento/areia) 1:6	500-600	0,20	1,00
concreto celular autoclavado	400-500	0,17	1,00
argila expandida	< 400	0,16	-
poliestireno expandido moldado	15-35	0,040	1,42
poliestireno estrudado	25-40	0,035	1,42

Os valores da resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas apresentados para uma temperatura média da camada entre 0°C e 20°C e com uma diferença de temperatura entre as superfícies limitantes menor do que 15°C estão na Tabela 4.

Tabela 4. Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura [NBR 15220-2, 2005]

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

Notas:
1 e é a emissividade hemisférica total.
2 Os valores para câmaras de ar com uma superfície refletora só podem ser usados se a emissividade da superfície for controlada e previsto que a superfície continue limpa, sem pó, gordura ou água de condensação.
3 Para coberturas, recomenda-se a colocação da superfície

*Para o tijolo cerâmico a NBR 15220 especifica uma emissividade de 0,85 a 0,95.

Santos *et al.*, [2015] realizou um estudo de caso com avaliação comparativa do comportamento térmico de edificações executadas com fechamentos em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e de concreto. Foram realizadas medições de temperaturas externas e internas, simultaneamente obtidas em duas edificações, nas quais o diferencial construtivo era apenas o tipo de bloco estrutural utilizado nos fechamentos. As características térmicas dos blocos foram calculadas, conforme NBR 15220 e estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Características térmicas de blocos cerâmicos e de concreto [adaptado de Santos *et al.*, 2015]

	bloco concreto	bloco cerâmico
Resistência térmica da parede	0,18 (m ² .K)/W	0,31 (m ² .K)/W
Resistência térmica total	0,35 (m ² .K)/W	0,48 (m ² .K)/W
Transmitância térmica	2,88 (m ² .K)/W	2,09 (m ² .K)/W
Capacidade térmica	264,31 (KJ/(m ² .K))	194,17(KJ/(m ² .K))

Essas edificações localizam-se no mesmo lote, com a mesma posição de implantação. As medições foram efetuadas no inverno e no verão, utilizando

registradores de temperatura colocados no segundo pavimento e na cobertura, posicionados em ambientes com diferentes orientações solares. Foram analisadas as influências do tipo de bloco, da orientação solar dos fechamentos dos ambientes e dos ganhos térmicos pela cobertura. Observou-se que, tanto no inverno como no de verão, ocorreram pequenas diferenças nas temperaturas internas entre os dois edifícios monitorados, com uma pequena vantagem para o bloco cerâmico.

3.8 Emissividade

Segundo a NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades, emissividade é o quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura. A radiação emitida pela superfície de um material tem sua origem na energia térmica da matéria limitada pela superfície e a taxa na qual a energia é liberada por unidade de área é denominada poder emissivo da superfície. Existe um limite superior para o poder emissivo, que é previsto pela lei de Stefan-Boltzmann e de Planck (teoria do corpo negro). Um corpo negro é um objeto ideal que absorve toda a radiação incidente em qualquer comprimento de onda (poder emissivo igual a 1). A relação existente entre a energia emitida por um corpo real, em relação a um corpo negro, sob a mesma temperatura é conhecida como emissividade (ϵ). A emissividade determina a quantidade de energia que um corpo emite em um dado comprimento de onda. Ela depende fortemente da superfície do material e de seu acabamento [Incropera *et al.*, 2008].

Sutcuca *et al.*, [2014] analisaram o comportamento térmico de blocos cerâmicos vazados com a incorporação de resíduo de papel na argila (10 e 20%) utilizando como um dos parâmetros para a análise a emissividade do material. A condutividade térmica medida foi de 0,68 (sem resíduo), 0,535 (10%) e 0,39 W/m K (20%), conforme Tabela 6. Foi aplicado o método de elementos finitos para análise térmica numérica não linear de três tipologias de blocos [Figura 4], incluindo fenômenos de radiação e convecção dentro dos furos.

A temperatura média para o coeficiente de radiação do corpo negro desempenha um papel importante na transmitância térmica, uma temperatura mais baixa implica uma menor transmitância. A tipologia mais eficiente foi a B3, seguida

por B2 e B1, conforme tabela 6. Onde λ = condutividade térmica do material; ϵ = emissividade; U1 = transmitância térmica média; U2 = transmitância térmica máxima.

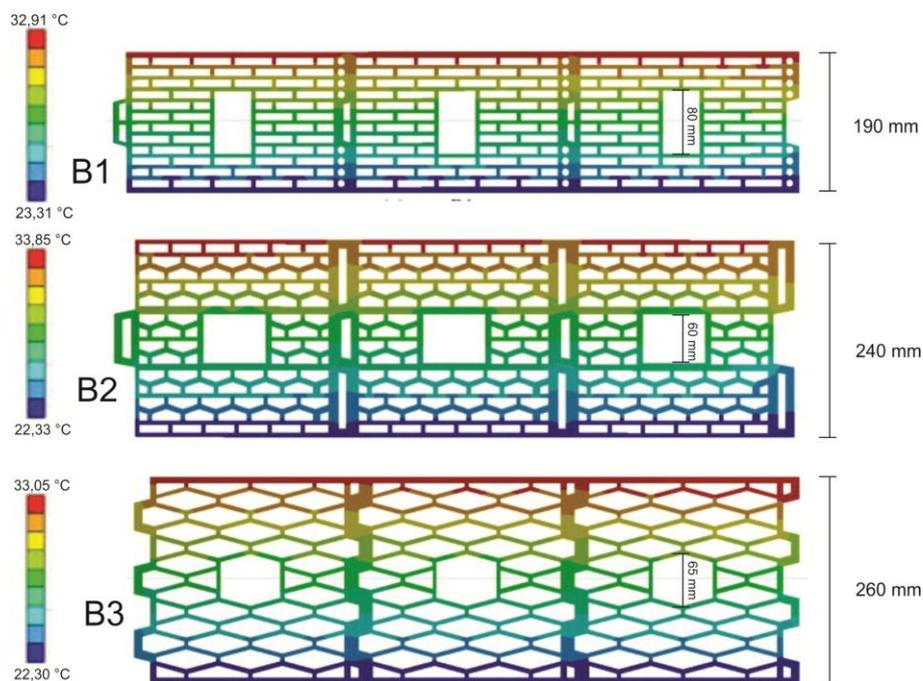


Figura 4. Análise térmica das tipologias [adaptado de Sutcuca *et al.*, 2014]

Tabela 6. Desempenho térmico das tipologias com variação de geometria, condutividade térmica e emissividade [adaptado de Sutcuca *et al.*, 2014]

Bloco	λ (W/m K)	ϵ	T radiação corpo negro (°C)	U1 (W/m ² K)	U2 (W/m ² K)
B1	0,39	0,75	-13,15	0,704	0,768
B2	0,39	0,75	-13,15	0,652	0,734
B3	0,39	0,75	-13,15	0,473	0,507
B1	0,535	0,81	8,35	0,926	1,014
B2	0,535	0,81	8,35	0,847	0,958
B3	0,535	0,75	8,35	0,646	0,696
B1	0,68	0,99	29,85	1,213	1,328
B2	0,68	0,99	29,85	1,083	1,226
B3	0,68	0,99	29,85	0,863	0,931

Segundo o estudo, a resistência térmica é uma função não-linear que depende da geometria dos vazados, das propriedades do material e da distribuição da temperatura. Em todos os casos analisados, a transmitância térmica foi reduzida minimizando a condutividade térmica do material e diminuindo a emissividade da radiação superficial dos vazados.

3.9 Termografia

A termografia por infravermelho consiste na captação de imagens de calor, não visíveis pelo olho humano. O processo é feito por meio de equipamentos que convertem a energia emitida pela superfície dos materiais em imagens térmicas. São constituídos basicamente de sensores ou detectores de radiação, amplificadores de sinais e um processador. A imagem é obtida pelos detectores sensíveis ao infravermelho, que captam a radiação térmica e a convertem em sinais elétricos. Esses sinais normalmente são baixos e proporcionais ao fluxo de radiação, por isso são amplificados, lidos e processados por meio de *softwares* e são transformados em imagens térmicas ou termogramas [Clark *et al.*, 2003].

De um modo geral, o sinal decodificado é apresentado nos termogramas numa graduação entre tons escuros e claros, segundo os limites da escala de temperatura em uso. O registro das imagens térmicas gerado é digital e permite a ligação desse sistema a televisores ou computadores para posterior análise e processamento das informações [Maldague, 2002; Sales, 2008]. A Figura 5 apresenta, a configuração básica de um termovisor, câmeras termográficas com sensores térmicos.

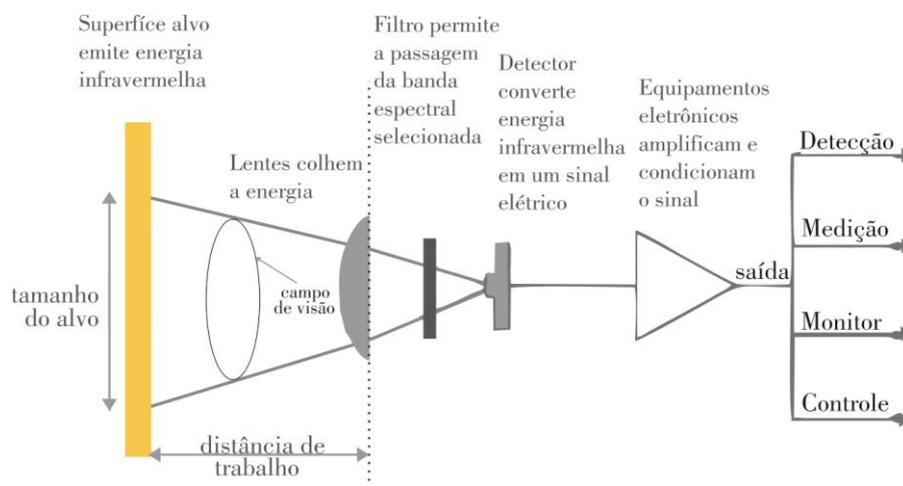


Figura 5. Configuração do termovisor. [adaptado de Cortizo *et al.*, 2008]

Para o uso dos sensores térmicos, há de se estimular o aquecimento ou o resfriamento do objeto ensaiado. Esse estímulo pode ser passivo ou ativo. Na primeira situação, nenhuma estimulação artificial é utilizada, sendo propriamente natural o gradiente de temperatura existente entre o objeto em observação e o meio no qual ele está inserido. [Maldague, 2002].

Por outro lado, os sistemas ativos permitem a obtenção de resultados quantitativos e a possibilidade de mensurar e controlar os parâmetros do ensaio, como fonte, tempo, intensidade e distância. Nessa situação, há o aquecimento ou resfriamento artificial do objeto para se obter o gradiente de temperatura necessário ao ensaio. Assim, o fornecimento de energia pode variar segundo a intensidade (alta ou baixa), a posição (sobre a face frontal ou posterior da superfície observada), a fonte geradora (como lâmpadas ou resistores), a frequência (pulso, constante ou modulado), o tempo (instantâneo ou moderado) e o tipo (injeção de calor ou injeção de jatos de ar frio) [Cortizo *et al.*, 2008; Maldague, 2002].

A termografia pode ser aplicada ao conforto térmico de edificações, como em Barreira e Freitas [2007], que apresentam um estudo realizado no *Buildings Physics Laboratory* (LFC), da Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Portugal (FEUP), sobre o conforto proporcionado por diferentes tipos de revestimentos de piso comumente utilizados no interior das edificações de Portugal e que também são muito comuns no Brasil (carpete, cortiça, vinil, madeira, cerâmica e granito). A termografia foi utilizada para avaliar o grau de interferência da temperatura do material em contato com a sola dos pés descalços e relatou-se que o carpete induziu altas temperaturas superficiais na sola do pé, seguido de cortiça, madeira, vinil, azulejo cerâmico e, por último, o granito.

Sales *et al.*, [2010], estudaram o desempenho térmico de um modelo de alvenaria estrutural com blocos estruturais de concreto com e sem EPS como isolamento usando termografia infravermelha. O procedimento experimental consistiu na montagem e análise de quatro blocos de concreto estrutural, na qual dois blocos foram preenchidos com esferas de EPS com aproximadamente 0,4 mm de diâmetro. Nos outros dois blocos, a cavidade interna permaneceu vazia. As amostras foram preparadas e montadas ao ar livre onde permaneceram 24 h sujeitas a flutuação climática do ambiente local. Posteriormente, foi realizado ensaio termográfico aquecendo artificialmente os blocos usando um aquecedor por aproximadamente 1 h. As imagens foram feitas usando um método qualitativo, a uma distância de 0,50 cm entre o equipamento e os blocos de alvenaria de concreto. A taxa de emissividade usada foi de 0,75. Foi possível observar que a temperatura nos blocos com preenchimento chegou a 28 °C e nos blocos vazios atingiu 32 °C.

Pedra [2011] estudou através de ensaios com termografia o desempenho de blocos cerâmico e de concreto com e sem o preenchimento de EPS aglutinado com amido de milho e cola branca em seus vazados verticais. Foi analisado o desempenho dos blocos isoladamente e deles no sistema de parede com argamassa convencional e sem revestimento [Figura 6] .

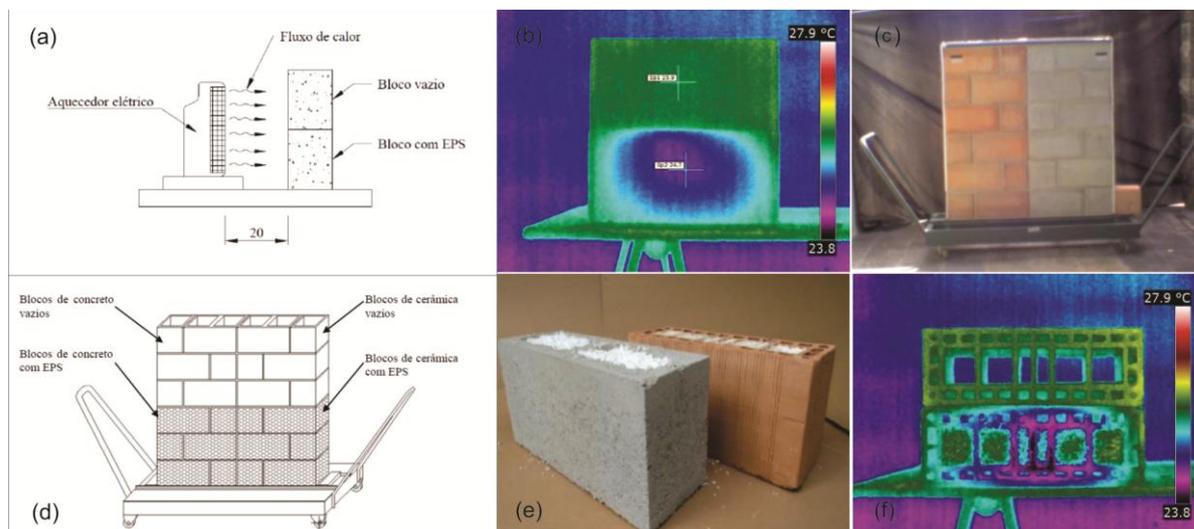


Figura 6. (a) sistema aquecimento elétrico; (b) termografia lateral dos blocos com e sem EPS; (c) paredes; (d) tipologias analisadas; (e) blocos com EPS; (f) termografia superior dos blocos com e sem EPS [adaptado de Pedra, 2011]

Foram feitas análises com aquecimento elétrico e nas paredes com aquecimento solar. Os blocos cerâmicos preenchidos com EPS tiveram o melhor desempenho, seguidos pelos de concreto preenchido com EPS, cerâmico vazio e os piores resultados foram para os blocos de concreto vazios. No aquecimento solar, a termografia detectou uma diferença de 2,5 °C entre os blocos com e sem EPS após 6 h. O ganho na capacidade térmica em presença do EPS foi de 20,2% nos blocos de concreto e 23,6% nos blocos de cerâmica.

3.10 Bloco estrutural cerâmico

Segundo a NBR 15270-3, bloco cerâmico estrutural é um componente da alvenaria estrutural que possui furos prismáticos perpendiculares às faces que os contêm. Os blocos cerâmicos estruturais são produzidos para serem assentados com os furos na vertical e podem ter as paredes maciças ou vazadas. Os blocos com paredes maciças são componentes da alvenaria estrutural cujas paredes

externas são maciças e as internas podem ser maciças ou vazadas conforme representado nas Figuras 7(a) e 7(b). O bloco de paredes vazadas é empregado na alvenaria estrutural não armada, armada e protendida, conforme representado na Figura 7(c).

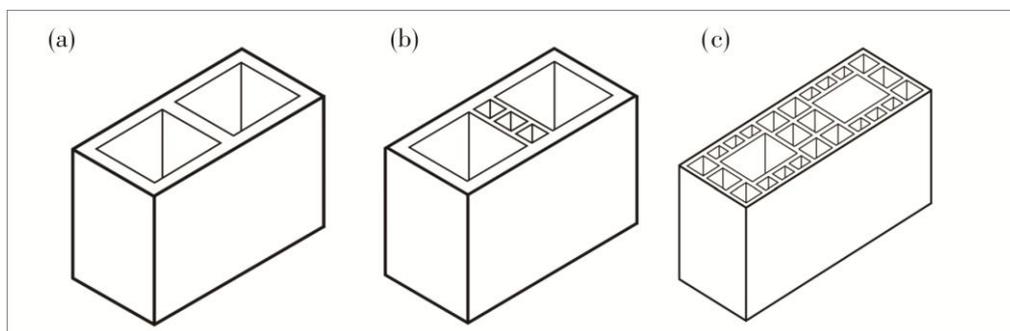


Figura 7. Blocos Cerâmicos : (a) paredes maciças (internas e externas); (b) paredes maciças (externas maciças e internas vazadas); (c) paredes vazadas [NBR 15270-3, 2005]

Blocos estruturais cerâmicos são constituídos por argila, esta composta de sílica, silicato de alumínio e variadas quantidades de óxidos ferrosos, podendo ser calcária ou não. Os blocos e tijolos cerâmicos estruturais para alvenaria estrutural devem apresentar propriedades físicas (aspecto, dimensões, absorção de água, esquadro e planeza) de acordo com a NBR 15270-2, 2005.

O processo produtivo dos blocos cerâmicos estudados passa pela extração da argila, homogeneização, descanso da argila, laminação, extrusão, corte, secagem e posteriormente queima a aproximadamente 900°. Depois de entrar para o processo produtivo, o bloco leva aproximadamente dois dias para ser fabricado. (Pauluzzi Blocos Cerâmicos, 2017).

3.11 Alvenarias

A alvenaria estrutural é um dos sistemas construtivo comumente empregado em países como o Brasil, devido à facilidade de execução e economia proporcionadas. Essas vantagens tornam este tipo de sistema competitivo economicamente em relação aos demais [Mohamad *et al.*, 2009].

Camacho [2006] conceitua alvenaria estrutural como o processo construtivo no qual os elementos que desempenham a função estrutural são de alvenaria, sendo os mesmos projetados, dimensionados e executados de forma racional em

um sistema que alia alta produtividade à economia, desde que executado de maneira correta. A alvenaria estrutural armada é aquela construída com blocos vazados assentados com argamassa, na qual certas cavidades são preenchidas com graute contendo armaduras envolvidas o suficiente para absorver os esforços calculados, além daquelas armaduras com finalidade construtiva ou de amarração. Assim, na alvenaria estrutural, as paredes construídas com blocos e argamassa são a estrutura do prédio, dispensando vigas e pilares convencionais de concreto armado, conforme a Figura 8.



Figura 8. Edificação construída no sistema de alvenaria estrutural [autora, 2016]

O desenvolvimento das estruturas em alvenaria foi muitas vezes limitado pela disponibilidade de materiais, pelo grau de desenvolvimento de tecnologias construtivas, pela inexistência de procedimentos para dimensionamento e pelos custos. A importância de cada fator variou em cada época histórica, sendo talvez o custo o principal limitante ou incentivo para a adoção do sistema. O extraordinário desenvolvimento dos materiais da alvenaria, dos conceitos para projeto e das técnicas construtivas, em muito contribuiu para o grande crescimento do uso da alvenaria estrutural como uma solução eficiente para nossas edificações modernas [Parsekian *et al.*, 2012].

Blocos de alta resistência são hoje disponíveis em uma variada gama de materiais, formas, cores e texturas. Características como potencial de variação dimensional higroscópica, isolamento térmico e acústico foram muito melhoradas ao longo do último século. Argamassas e grautes industrializados e pré-misturados são

hoje disponíveis e contribuem para o aumento de controle e produtividade da obra. [Paesekian *et al.*, 2012].

O Rio Grande do Sul é referência no sistema de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, sendo o estado com os prédios mais altos do Brasil. Enquanto em outros estados este tipo de construção se limita muitas vezes a edificações de no máximo cinco pavimentos, aqui há empreendimentos de até 16 pavimentos construídos com blocos de alta resistência e alto controle tecnológico.

Diferente do sistema de alvenaria estrutural, onde os blocos têm a função de estrutura, na alvenaria de vedação racionalizada, estes, funcionam somente como elemento de fechamento das estruturas de concreto armado (vigas e pilares).



Figura 9. Edificação construída no sistema de alvenaria racionalizada [autora, 2016]

O sistema se diferencia da alvenaria convencional por possibilitar a passagem das instalações por dentro do furo dos blocos, evitando o corte das paredes para a execução de todas as instalações.

O subsistema vedação vertical é responsável pela proteção do edifício de agentes indesejáveis (chuva, vento etc.) e também pela compartimentação dos ambientes internos. A maioria das edificações executadas pelo processo construtivo convencional (estrutura reticulada de concreto armado moldada no local) utiliza para o fechamento dos vãos paredes de alvenaria [Silva, 2006].

3.12 Agregados leves

Segundo Mehta e Monteiro [2014], o concreto leve pode consistir somente nos agregados leves ou em uma combinação de leves e normais, e é comum utilizar

areia com densidade normal como agregado miúdo e limitar a dimensão máxima do agregado leve graúdo em 19 mm, apesar de na maioria dos processos de fabricação, serem obtidas partículas com diâmetros de até 25 mm. Os agregados possuem massa específica unitária menor que 1120 kg/m³ podendo ser naturais ou artificiais. O peso leve do agregado se deve à microestrutura celular ou à alta porosidade. Agregados leves naturais são obtidos por meio de extração direta de jazidas e britagem dessas rochas ígneas vulcânicas, como pedra-pomes ou tufo. Esse tipo de agregado possui pouca aplicação devido à grande variabilidade de suas propriedades e também pela localização das jazidas. Agregados leves sintéticos são produzidos pelo tratamento térmico de vários materiais como argilas, folhelhos, ardósia, diatomito, perlita, vermiculita e escórias expandidas. [Rossignolo *et al.*, 2005].

Os agregados muito porosos geralmente são frágeis e, portanto, mais adequados para produção de concretos isolantes não estruturais. Os agregados menos porosos, são mais resistentes e, portanto, mais adequadas para concreto estrutural [Mehta e Monteiro, 2014]. As características de porosidade e absorção de água dos agregados leves afetam as propriedades dos concretos e o processo de hidratação do cimento. A velocidade e a quantidade de água absorvida pelos agregados leves dependem dos seguintes fatores: porosidade total, conectividade entre os poros, características da superfície do agregado, umidade do agregado antes da mistura, temperatura, tipo de lançamento do concreto e utilização de aditivos no concreto [Rossignolo *et al.*, 2005].

3.12.1 Argila expandida

A argila expandida é o produto obtido por aquecimento de alguns tipos de argila em temperaturas em torno de 1100 °C a 1200 °C. Próximo destas temperaturas, uma parte dos constituintes do material se funde gerando uma massa viscosa enquanto a outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que são incorporados por esta massa sinterizada, expandindo em até sete vezes o seu volume inicial. Esses gases retidos no interior da argila não podem escapar para o exterior devido à fase líquida que envolve as partículas da argila. Essa estrutura porosa se mantém após o resfriamento, de modo que a massa unitária do material

resultante torna-se menor do que antes do aquecimento, podendo ser utilizada como agregado graúdo na fabricação de concretos leves, com o objetivo de reduzir o peso próprio das estruturas e melhorar propriedades térmicas [Santos, 2002].

Os agregados de argila expandida, produzidos pelo processo de sinterização contínua possuem massa específica aparente na faixa compreendida entre 650 kg/m³ e 900 kg/m³ e os produzidos em forno rotativo, entre 300 kg/m³ e 650 kg/m³. A granulometria do agregado e o fator água/cimento exercem influência na trabalhabilidade dos concretos e devem ser considerados em conjunto, pois quanto menor for a granulometria do agregado maior será a quantidade de água necessária para envolver os grãos do mesmo, formando uma película d'água responsável por uma boa trabalhabilidade [Mehta *et al.*, 1994].

A caracterização da microestrutura da argila expandida é importante para a fabricação dos concretos, auxiliando na compreensão das reações físico-químicas que ocorrem na sua interface com a matriz de cimento. Devido à sua alta porosidade, a argila expandida proporciona uma redução da resistência mecânica dos concretos [Wasserman *et al.*, 1996]. Por outro lado, uma importante característica do agregado leve é a boa aderência entre este e a pasta hidratada de cimento que o envolve. Esta aderência ocorre pela textura áspera da superfície do agregado leve, resultando em um intertravamento mecânico entre o agregado e a pasta. A aderência também pode ser melhorada pela água absorvida pelo agregado no momento da mistura do concreto, que com o tempo, torna-se disponível para a hidratação do cimento anidro [Weber *et al.*, 1997]. Parte dessa hidratação ocorre na região da interface agregado matriz, tornando a aderência entre o agregado e a matriz mais resistente [Mehta *et al.*, 1994].

No Brasil, no final da década de 1960, iniciou-se a produção de argila expandida com o intuito de utilizar concreto leve nos elementos pré fabricados, facilitando o transporte e a montagem das peças para habitações. Desde então, a argila expandida encontra aplicação em diversos setores da construção civil nacional, e a tecnologia do concreto estrutural leve tem motivado pesquisas em diversas universidades do Brasil [Sacht *et al.*, 2010].

Vários estudos têm analisado a influência da argila expandida na obtenção de concreto leve [Giacomin, 2005; Maycá *et al.*, 2008; Moravia *et al.*, 2006]. A porosidade e a elevada absorção de água das argilas expandidas afetam

significativamente a trabalhabilidade, a zona de transição (pasta-agregado) e a resistência do concreto. A quantidade de água absorvida pelos agregados leves e a velocidade com que ela é absorvida dependem da porosidade total, conectividade entre os poros e umidade do agregado antes da mistura. Para agregados leves com valores elevados de absorção de água é recomendado realizar uma pré-umidificação para evitar prejuízo na trabalhabilidade do concreto fresco [Moravia *et al.*, 2006; Rossignolo, 2003].

Sacht *et al.*, [2010] avaliaram da influência do teor de argila expandida na condutividade térmica de concretos leves. Foram avaliados concretos leves com massa específica variando entre 1216 a 2364 Kg/m³, produzidos com argila expandida em substituição ao agregado gráudo natural (basalto). A condutividade térmica dos concretos variou entre 0,54 e 1,80 W/mK . A partir da diminuição dos valores de massa específica, devido à substituição de brita basáltica por argila expandida, houve um decréscimo da condutividade térmica. Isso se explica principalmente devido ao ar aprisionado na estrutura celular dos agregados leves fazendo com que seja reduzida a transferência e a absorção de calor.

Moravia *et al.*, [2006] caracterizaram a microestrutura do agregado leve de argila expandida visando sua utilização na fabricação de concretos. Na caracterização física da argila expandida foram avaliadas a massa unitária, a granulometria e a absorção de água por imersão total do agregado. Na caracterização microestrutural, foram realizadas análise química, microscopia eletrônica de varredura, difração de raios X e porosimetria por intrusão de mercúrio. A argila expandida apresentou granulometria entre as britas com graduação 0 e 1, e apresentou alta absorção de água devido à elevada porosidade deste agregado. Na análise de difração de raios X evidenciou-se a presença de sílica na forma mineral de α -quartzo, silicato de magnésio e óxido de alumínio e magnésio. Analisaram ainda que a elevada absorção de água, quando não prevista, pode ser prejudicial ao concreto, reduzindo sua trabalhabilidade. Além disso, parte da água necessária para a hidratação dos compostos do cimento será absorvida por este agregado, reduzindo, possivelmente, a resistência mecânica do concreto. Como solução, utilizaram a pré saturação do agregado. Verificou-se que todos os traços do concreto leve, apresentaram queda de resistência em relação aos respectivos traços do concreto de referência.

3.12.2 Poliestireno expandido (EPS)

EPS é a sigla internacional do poliestireno expandido, de acordo com a Norma DIN ISO-1043/78. O EPS é um plástico celular rígido, resultante da polimerização do estireno em água. Segundo a Associação Brasileira do Poliestireno Expandido [Abrapex, 2010], em seu processo produtivo emprega-se o pentano como agente expensor para a transformação do EPS, um hidrocarbureto que se deteriora rapidamente pela reação fotoquímica gerada pelos raios solares, sem comprometer o meio ambiente. O produto final é composto de pérolas expandidas, que consistem em até 98% de ar e apenas 2% de poliestireno. Em 1 m³ de EPS, existem de 3 a 6 bilhões de células fechadas e cheias de ar.

Na indústria, a matéria-prima é sujeita a um processo de transformação física, não alterando as suas propriedades químicas. Essa transformação processa-se em três etapas: pré-expansão, armazenamento intermediário e moldagem. A expansão do poliestireno (PS) expansível é efetuada numa primeira fase a partir de aquecimento por contato com vapor de água. O agente expensor incha o PS para um volume cerca de 50 vezes maior que o original resultando um granulado de partículas de isopor constituídas por pequenas células fechadas, que é armazenado para estabilização e depois introduzido em moldes e novamente exposto a vapor de água, o que provoca a solda do mesmo. Assim, obtém-se um material expandido, que é rígido e contém grande quantidade de ar [Ambiente Brasil, 2017].

O EPS não é biodegradável, mas é reciclável. Os descartes de embalagens de isopor ocupam grandes volumes nos aterros sanitários [Ambiente Brasil, 2017]. Há pesquisas sobre aproveitamento de EPS em aplicações como agregado em blocos de concreto [Soares, 2010], em compósitos com serragem de madeira *pinus elliotti* [Poletto *et al.*, 2010] ou aplicado ao concreto [Amiantil; Botaro, 2008]. Essas pesquisas ressaltam a escolha do EPS por apresentar características como baixa absorção de água, resistência ao envelhecimento e por esterilidade, ou seja, não constitui substrato para a proliferação de microrganismos.

Segundo Babu *et al.*, [2003], agregados não absorventes e hidrofóbicos como os grânulos de EPS não sofrem absorção de água, não prejudicando a produção de concreto leve. Ainda conforme os autores, a utilização de EPS não só reduz o peso do concreto, mas também possibilita a redução da permeabilidade e aumenta a

resistência aos ataques químicos, devido à sua natureza inerte e à célula fechada. Investigações feitas na zona de contato do concreto com os grânulos de EPS mostraram que o contato entre esses dois materiais é muito próximo, sem fratura ou microfissuras, e a adesão dos dois componentes depende do tamanho e da forma dos grânulos de EPS usados [Laukaitis *et al.*, 2003].

A propriedade higroscópica do EPS garante que o isopor mantenha as suas características térmicas e mecânicas mesmo sob a ação da umidade. Esta propriedade é muito importante devido ao fato da água deteriorar a capacidade de isolamento de um material isolante térmico [Souza *et al.*, 2006].

Pavlík *et al.*, [2013] analisaram a condutividade térmica efetiva de tijolos vazios com as cavidades preenchidas por ar ou poliestireno expandido [Figura 10] usando uma abordagem experimental-computacional híbrida. A configuração experimental envolveu a aplicação de uma caixa de isolamento térmico e um conjunto de sondas de temperatura e fluxo de calor colocadas nas posições características do sistema de caixa isoladora de amostras.

Usando os fluxos de calor e temperaturas medidos, determinou-se a perda de calor do sistema. Os resultados experimentais mostraram que a aplicação de poliestireno expandido como enchimento de cavidade em vez de ar leva a uma diminuição de aproximadamente 30% na condutividade térmica efetiva de blocos vazios.

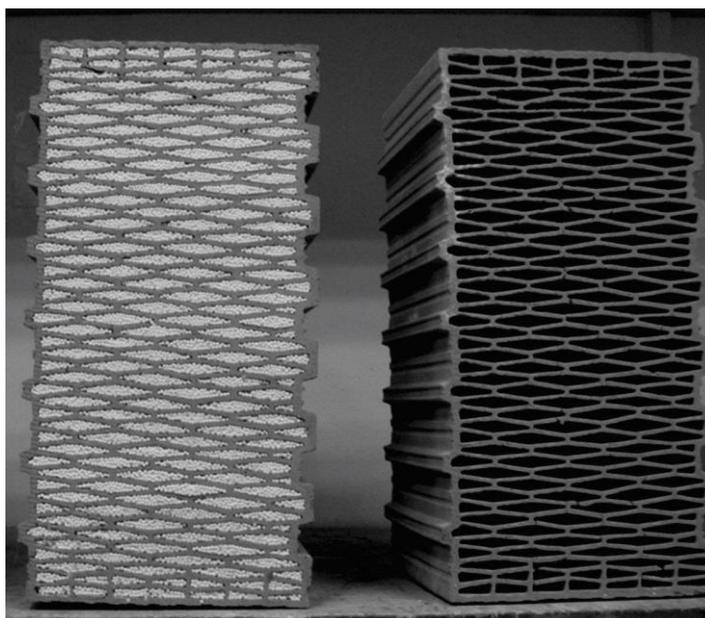


Figura 10. Tijolos vazios e com preenchimento de EPS [Pavlík *et al.*, 2013].

Sayadi *et al.*, [2016] estudaram os efeitos do EPS na resistência ao fogo, na condutividade térmica e na resistência à compressão de concreto espumado. Foram produzidas amostras com densidades de 1200 kg/m³ a 150 kg/m³ com um volume de EPS na faixa de 0 a 82%. O concreto espumado com uma densidade de 800 kg/m³ e um volume EPS de 0% foi concebido como referência. Os resultados indicaram que o aumento do volume do EPS provoca uma redução significativa da condutividade térmica, resistência ao fogo e resistência à compressão do concreto. Devido às propriedades térmicas do agregado EPS (98% ar e 2% de poliestireno). A menor condutividade térmica observada foi de 0,0848 W / mK com teor de 82% de EPS, enquanto esse valor foi 2,5 vezes maior na amostra com 28% EPS. Foi obtida uma menor resistência ao fogo para EPS (82%) como resultado do fato de que as partículas de EPS encolheram e perderam a força quando submetido à alta temperatura. Uma maior resistência ao fogo foi obtida na amostra EPS (28%) e maior conteúdo de cimento devido ao fato de que a sílica amorfa no cimento contribuiu para maior resistência ao fogo.

Soares [2010] estudou a incorporação de poliestireno expandido reciclado (após processo de moagem) em concretos, para a fabricação de blocos de vedação. Segundo a pesquisa sua utilização sem aditivo colante, embora permita a produção de blocos utilizando equipamentos de vibroprensagem, não proporciona boa resistência mecânica à compressão, devido à área superficial do EPS que não apresenta boa aderência aos agregados naturais. Com a utilização de aditivo colante, a mistura apresenta bom desempenho associado à leveza do material (redução de 25% da massa do bloco). A resistência mecânica à compressão aos sete dias para a dosagem experimental, foi superior a 3 MPa e o resultado da absorção de água do bloco individual, apresentou valor inferior a 16%, ambos os resultados em conformidade com o que estabelece a NBR 6136/2007 para blocos vazados de concreto simples para alvenaria de vedação.

Ozório [2016] analisou o comportamento do concreto leve com pérolas de EPS com dosagens compostas por: cimento CPV-ARI, areia, pérolas de EPS, água e aditivo superplastificante. Após análise de 45 misturas, observou ganhos de desempenho mecânico com a adição de sílica ativa, adição de fibras de aço, ajuste na granulometria do agregado miúdo e redução do teor de EPS, obtendo resistência à compressão de 16 MPa e massa aparente de 1370 kg/m³, com fator de

equivalência correspondente ou superior ao de um concreto convencional de 20 MPa e 2400 kg/m³. A resistência remanescente, determinada logo após a ruptura por compressão, resultou, em média, 50% da resistência à compressão. Mesmo após a ruptura o concreto leve com pérolas de EPS permaneceu íntegro, com a forma em que foi moldado, sem lascamento ou colapso. Para os corpos de prova expostos à secagem em temperatura de 250 °C por 72 h, a perda de resistência à compressão foi, em média, 30%. Quanto maior a temperatura de secagem, maior foi a perda de massa. Em média, para os corpos de prova expostos a 50 °C, a perda foi de 1,7%, para 105 °C, de 7%, e para 250 °C, de 10%. Quanto maior a perda de massa, menor foi a capacidade resistente residual. Para o traço com pérolas de tamanho menor, os resultados da resistência à compressão foram 16% maiores que os valores encontrados com pérolas de maior dimensão e maior uniformidade de tamanho. A redução do teor de EPS no concreto aumentou a massa aparente e melhorou a resistência à compressão. O acréscimo na resistência à tração por compressão diametral foi proporcional à redução do teor de EPS no concreto leve. Em contrapartida, como o EPS é impermeável e atua como agente incorporador de vazios, as propriedades de durabilidade avaliadas, absorção e índice de vazios, foram maiores, demonstrando que o EPS no interior do concreto proporciona uma barreira física, dificultando a percolação de fluidos, dificultando a conectividade dos poros.

Na análise do poliestireno quanto ao fogo é importante considerar que é obtido mediante a polimerização do monômero de estireno [C₈H₈] em conjunto com o pentano [C₅H₁₂]. Os plásticos celulares fabricados à base desse polímero possuem uma estrutura formada por milhões de finas células fechadas, cheias de ar. Em composição molecular, se trata de hidrocarboneto puro, que não tem outros elementos químicos a não ser o carbono [C] e o hidrogênio [H] (que será fundamental na toxicidade dos gases de combustão) [Bittner, 2012].

Quando se considera o comportamento ao fogo de algum material de construção é fundamental realizar um estudo nas condições finais de uso. O comportamento não somente dependerá da natureza química, mas também, até certo ponto, do estado físico e da localização do material. Assim, os fatores importantes que devem ser levados em consideração na hora de determinar o risco potencial de incêndio do EPS são:

- Densidade do material expandido e a forma do produto.
- Proximidade a uma possível fonte de ignição.
- Condições de adesão a um substrato ou revestimento.
- Localização do produto.
- Presença de oxigênio (ventilação).

A taxa de liberação de calor é considerada como um parâmetro importante para avaliar o comportamento ao fogo nos materiais. O método de ensaio, Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate -- Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement) - ISO 5660- 2015, permite queimar provetas em uma grande faixa de fluxos de calor utilizando um cone calorimétrico. Ensaio realizados mostram que as placas de EPS se encolhem rapidamente, eliminando-se como fonte de calor, restando somente uma camada de poliestireno fundido.

O poder calorífico dos materiais de EPS (40 MJ/kg) é aproximadamente duas vezes o da madeira (18,4 MJ/kg), mas levando-se em conta a densidade de ambos, o volume calorífico para o EPS fica entre 400 e 1200 MJ/m³ (densidades entre 10 kg/m³ e 30 kg/m³) enquanto produtos procedentes da celulose, da fibra de madeira ou da madeira ficam entre 7150 e 11040 MJ/m³. [TEWARSON, 1976; DEAN, 1975]

O ar contido na estrutura celular do poliestireno expandido não contém oxigênio suficiente para combustão, nem sequer combustão incompleta do material, uma vez que para o EPS a necessidade de ar é 130 vezes maior, em volume, do que o que compõe o material. Isso significa que não pode haver combustão do material, quando ele está protegido por argamassa ou outro revestimento de construção, que impeça a chegada do oxigênio [Bittner, 2012].

3.12.3 Perlita expandida

Perlita, ou perlite, é um vidro vulcânico silicioso cujo volume pode expandir substancialmente sob o efeito do calor. Quando aquecido acima 870 °C, seu volume aumenta em 4-20 vezes o volume original [Chandra *et al.*, 2002]. Como resultado deste aumento de volume e de sua estrutura porosa, a absorção de água da perlita expandida é significativamente alta. Além do que, a densidade da é muito baixa comparada a da perlita normal. Este material é utilizado em diferentes áreas:

construção civil, agricultura, indústria médica e química [Ciullo, 1996]. A ausência de perigo aparente para a saúde e ótima resistência ao fogo são justificativas para o aumentando do uso [Berge, 2001].

A alta absorção de água da perlita expandida pode fornecer água para a hidratação do cimento nas idades posteriores, o que é benéfico para a cura do concreto [Lura *et al*, 2004]. Tal cura interna pode ser importante especialmente para concretos com baixas proporções de água / cimento. A perlita expandida também pode ter atividade pozolânica e pode ser usada como uma mistura mineral quando finamente moída [Yu *et al.*, 2003; Urhan, 1987].

Em estudo realizado por Sengul et al [2011], em concretos onde substituiu-se o agregado normal pela perlita expandida reduziu-se a condutividade térmica das misturas devido a estrutura porosa da perlita. Esta redução foi relativamente pequena uma substituição de 20% e 40%. Para maiores proporções, no entanto, foram registradas reduções substanciais. Por exemplo, a condutividade térmica da mistura contendo 40% de perlite expandida é 12% menor que o da mistura de referência, mas essa relação é de 65% para a mistura com 80% de perlita. As proporções das misturas e as propriedades dos concretos podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7. Propriedades de concretos com adição de perlita . [Sengul *et al.*, 2011]

Misturas - Propriedades Físicas e Mecânicas						
Concretos	NC	EPC20	EPC40	EPC60	EPC80	EPC100
Cimento (kg/m3)	317	337	326	301	297	295
Água (kg/m3)	175	185	179	166	163	162
Água pré-molhagem (kg/m3)	0	37	71	100	131	162
Fator água/cimento	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Areia Natural 0-4mm (kg/m3)	1517	1288	937	581	286	0
Perlita expandida 2-4mm (kg/m3)	0	17	33	47	61	76
Superplastificante	4.8	5.1	1.5	0	0	0
Incorporador de ar (kg/m3)	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9
Peso estado fresco (kg/m3)	2015	1870	1549	1196	939	696
Resistência a compressão (MPa)	28.8	17.3	10.9	4.6	1.1	0.1
Módulo de Elasticidade (GPa)	19.5	12.8	9.4	3.3	–	–
Condutividade Térmica (W/mK)	0.6	0.57	0.53	0.35	0.21	0.13
Absorção de água (%)	6.4	9.8	13.3	19.8	33.9	79.3

A resistência à compressão e, especialmente o módulo de elasticidade dos concretos são reduzido à medida que o conteúdo da perlita expandida aumenta.

Devido à perda de resistência, concretos produzidos neste estudo com mais de 20% de perlita expandida podem ser classificados como concretos de isolamento. Neste estudo, a densidade do concreto foi reduzida para um mínimo de 392 kg/m^3 e a absorção de água aumentou com a quantidade de perlita expandida.

Demirbog̃a e Gũ I [2003], mediram coeficientes de condutividade térmica de concretos constituídos por misturas de perlita expandida (EPA) e agregados de pedra-pomes (PA). Para determinar o efeito do fumo de sílica (SF) e das cinzas volantes (FA) na condutividade térmica do concreto com agregado leve, SF e FA foram adicionados como substituição de cimento, diminuindo os pesos de cimento nas proporções de 10%, 20% e 30% em peso. A condutividade térmica com PA e cimento puro foi a mais alta ($0,3178 \text{ W / mK}$), enquanto as amostras preparadas com EPA e 70% de cimento + 30% FA (substituição de cimento) tiveram o menor valor (0.1472 W / mK).

Abidi *et al.*, [2014] analisaram o comportamento termo-mecânico de um material compósito utilizado como isolante térmico e na proteção anti-incêndio de edificações. O painel era composto da combinação de uma matriz de hidratos de sulfato de cálcio, água e aditivos minerais inorgânicos (perlita e vermiculita). Nos ensaios, quando a matriz é reforçada com 5% e 25% em peso de vermiculita, a condutividade térmica diminuiu de 0.50 para 0.45 e 0.23 W/m.K para frações volumétricas de poros de 47%, 51% e 74%, respectivamente. No caso de reforço com perlita, a condutividade térmica é de 0,35 e 0,16 W/m.K para 5 e 25% em peso de perlita para frações de poro de volume com 57% e 76%, respectivamente. De acordo com os resultados da condutividade térmica, a perlita parece ser um melhor aditivo do que a vermiculita para melhorar o isolamento térmico do compósito.

3.12.4 Vermiculita expandida

A vermiculita é um argilomineral derivado de alteração de micas que possui a peculiaridade de expandir quando submetida a altas temperaturas, e é dessa característica que decorre o valor industrial. A vermiculita é usada principalmente na forma expandida em aplicações de isolamento térmico, acústico, barreira contra fogo, agregados leves e condicionador de solos. [Reis, 2001].

Os depósitos brasileiros e mundiais de vermiculita ocorrem principalmente dentro das zonas de complexos máficos-ultramáficos e carbonatitos. No mundo, destacam-se os depósitos de Libby, nos Estados Unidos e o de Palabora, na África do Sul. A produção mundial em 2013 decresceu 24,2% em comparação com o ano anterior. Os quatro maiores produtores concentraram 80,0% da produção mundial. A líder na produção de vermiculita foi a África do Sul, com 29,9% da produção, seguida pelos Estados Unidos, com 23,0%, e Brasil, com 15,6%. No ano de 2013, os Estados de Goiás (85,5%), Pernambuco (4,2%), Paraíba (7,8%) e Bahia (2,5%) foram responsáveis pela produção de 68.014 toneladas de vermiculita beneficiada [Paula, 2014].

Aguiar [2017] estudou o desempenho de quatro amostras de argamassa com incorporação de vermiculita expandida em porcentagens definidas de substituição de agregado miúdo em volume (25%, 50% e 100%). Foram realizados os ensaios de índice de consistência, densidade de massa e retenção de água, para o estado fresco, e resistência à tração na flexão, resistência à compressão, densidade de massa aparente, absorção de água por capilaridade, índice de vazios, módulo de elasticidade e condutividade térmica, para o estado endurecido. Com a incorporação da vermiculita houve uma redução no índice de consistência, aumentando-se também a retenção de água e o índice de vazios. A densidade de massa nos estados fresco e endurecido diminuiu. Os melhores resultados obtidos foram para a argamassa com 25% de incorporação de vermiculita expandida, havendo a redução de 15% da condutividade térmica, 11,31% de absorção de água por capilaridade, de 3,16% da resistência à tração na flexão e 1,97% resistência à compressão.

Schackow *et al.*, [2014] compararam as propriedades mecânicas e térmicas do concreto com dois tipos de agregados leves, vermiculita e poliestireno expandido (EPS) usando incorporador de ar e superplastificante. Eles variaram a quantidade de agregado leve (55% e 65%) e de agente incorporador de ar (0,5% e 1,0%). Os resultados mostraram que a adição de agente incorporador de ar deixou os concretos ainda mais leves, porém menos resistentes à compressão. O concreto leve do EPS teve maior resistência, foi mais leve e com menor condutividade térmica foi menor com vermiculita. O melhor conteúdo agregado leve avaliado foi de 55% considerando que o foco era a resistência à compressão.

Braga [2015] estudou argamassa leve com o uso de vermiculita. Primeiro ensaiou cinco traços variando a quantidade de cimento (350 Kg/m³, 400 Kg/m³, 450 Kg/m³, 500 Kg/m³ e 550 Kg/m³) com slump de 14 ± 2 cm. Constatou que o ganho de resistência era proporcional à quantidade de cimento utilizada por traço, assim, adotou o traço com consumo de 450 kg/m³ como padrão para a segunda etapa. Na segunda etapa alterou somente a proporção entre vermiculita e areia. Foram ensaiados cinco traços (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) de vermiculita. Quanto maior a quantidade de vermiculita, menor a densidade e a resistência à compressão. O aumento da vermiculita melhorou o desempenho térmico.

3.13 Graute

A NBR 15812-1, [2010] define graute como um componente utilizado para preenchimento dos espaços vazios dos blocos, com a finalidade de solidarizar armaduras à alvenaria ou aumentar sua capacidade resistente. Em sua maioria, grautes são autoadensáveis, qualificando uma de suas principais funções, o preenchimento de cavidades e orifícios [Bauer, 2005].

O graute é um concreto que apresenta a fluidez necessária para preencher os vazios dos blocos sem separação dos componentes. É composto por cimento, areia, pedrisco, água e em algumas situações pode ser adicionada cal na mistura para diminuir a retração [Mohamad *et al.*, 2017].

Com base na dimensão máxima dos agregados adotados, o graute pode ser classificado como fino ou grosso. No graute fino, a dimensão máxima dos agregados é de 4,8 mm, enquanto no grosso são adotados agregados com dimensão superior a esta. Ainda segundo a norma, a dimensão máxima do agregado do graute deve ser inferior a um terço da menor dimensão dos furos dos blocos a preencher [NBR 15812-1, 2010].

4 EXPERIMENTAL

4.1 Programa Experimental

No programa experimental primeiramente foi feita a caracterização dos agregados utilizados para a fabricação dos compósitos. Após, foi realizada a moldagem dos corpos de prova com os diferentes agregados. Com os corpos de prova moldados, foram realizados ensaios, conforme Figura 11. Após os ensaios iniciais com diferentes materiais, foram moldados corpos de prova com variações de teor de agregado leve com o material de melhor desempenho e ensaiados estes corpos de prova.

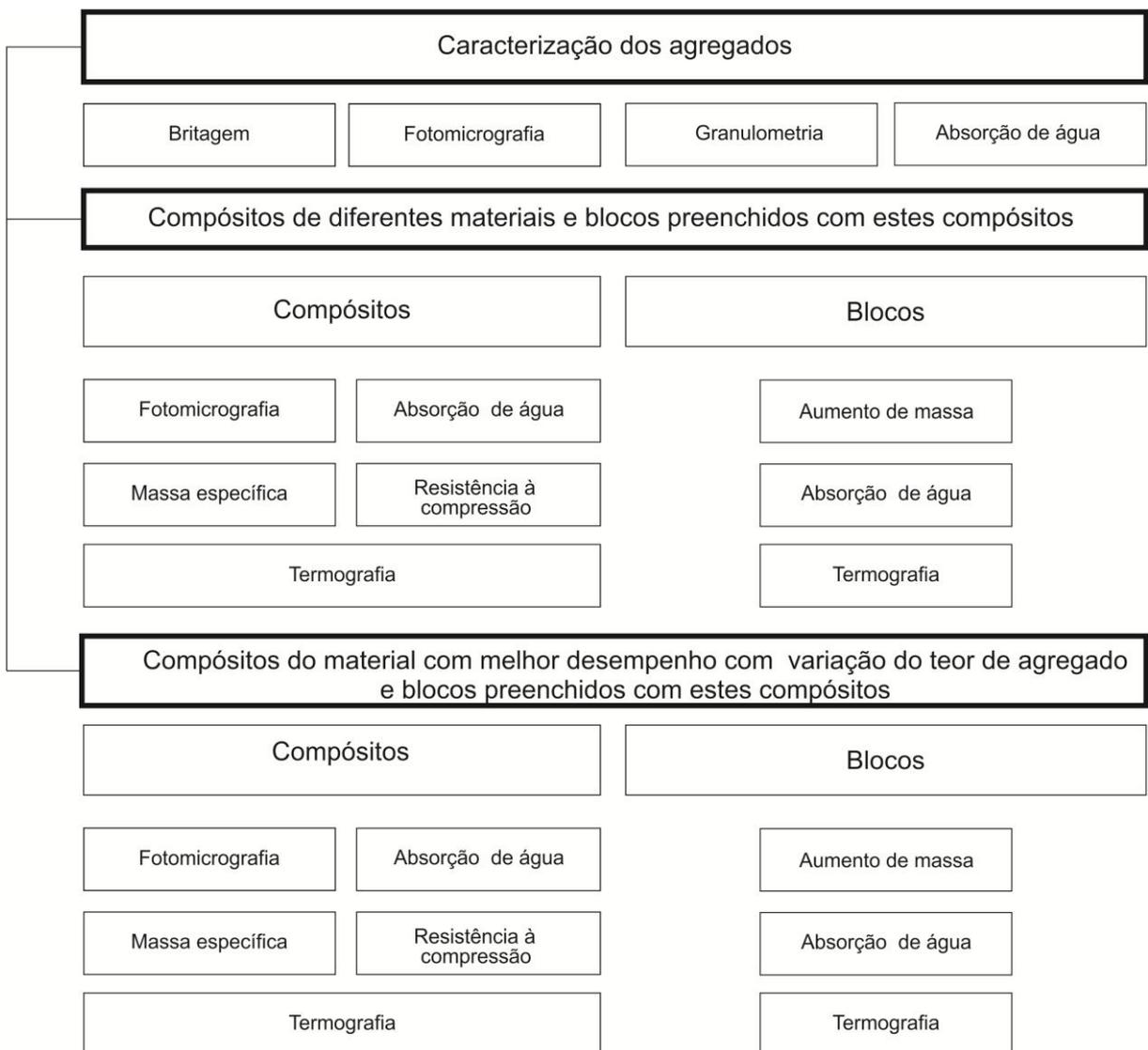


Figura 11. Organograma do programa experimental.

4.2 Materiais

4.2.1 Bloco

Para os estudos foram utilizados blocos estruturais cerâmicos de dimensões 14×19×29 cm [Figura 12], da indústria Pauluzzi Blocos Cerâmicos. Segundo dados fornecidos pela empresa, o lote utilizado apresenta resistência característica a compressão nominal de 10 MPa. Este lote foi ensaiado, segundo NBR 15270, no Laboratório de Materiais de Construção Civil, LMCC da Universidade Federal de Santa Maria, para caracterização geométrica, estrutural e de absorção de água.



Figura 12. Ilustração do bloco estrutural cerâmico 14×19×29cm, Fbk 10 MPa.

Segundo os ensaios, a amostra deste lote (13 blocos) ensaiada apresentou $F_{bk} = 13,0$ MPa, determinado de acordo com NBR 15270:2005 (Parte 2), atendendo às especificações para blocos cerâmicos estruturais. A resistência média, dos 13 blocos ensaiados foi $F_{bm} = 15,7$ MPa.

A NBR 15270:2005 (Parte 2 – item 5.6) especifica que o índice de absorção d'água em qualquer bloco ensaiado, deve ser entre 8,0% e 22,0%. A amostra apresentou um índice mínimo de 8,9% e, média de 9,8%, estando, conforme parâmetros de aceitação e rejeição em conformidade com os requisitos normativos. A área líquida média obtida na amostra foi de 193,46 cm², o que para uma área bruta média de 393,65 cm², também determinada na amostra, representa uma

relação de 0,49. A massa seca média determinada da amostra de blocos foi de 6.966 g, sendo que o valor mínimo observado foi de 6.956 g.

De acordo com ensaio realizado no Laboratório de Sistemas Estruturais da UFSCAR/SP, seguindo a NBR 10838 - Solo - Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego de balança hidrostática, a densidade da argila utilizada na fabricação dos blocos é de 1800 kg/m³.

Suas características térmicas, calculadas segundo a NBR 15220, estão apresentadas no ANEXO A.

4.2.2 Agregados

Como agregados leves para a fabricação dos compósitos de preenchimento dos vazados verticais dos blocos estruturais cerâmicos foram escolhidos 4 materiais: argila expandida, EPS, vermiculita e perlita expandida. Estes materiais foram escolhidos por suas características térmicas e por já serem utilizados comumente na construção civil.

Como a argila expandida vendida comercialmente possui uma granulometria muito superior à granulometria utilizada nos demais agregados, a argila expandida foi submetida à britagem no britador de rolos Maqbrit do Laboratório LAPROM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, conforme Figura 13.



Figura 13. Ilustração do britador de rolos *Maqbrit*, LAPROM – UFRGS.

Todos os agregados foram analisados granulometricamente conforme NBR NM 248 - Agregados - determinação da composição granulométrica [2003] e quanto a massa específica conformes as normas NBR NM 52 -Agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente, [2003] e NBR NM 53 -Agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, [2003]. Também foram feitas imagens dos agregados com o microscópio Dino-Lite Pro com aumento de 200×.

Os agregados foram ensaiados segundo NBR NM 53:2003 para caracterização do teor de absorção de água. Os agregados foram secos em estufa até massa constante, pesados em balança de precisão 0,01 g e submergidos por 24 h em água à temperatura ambiente. Após 24 h as amostras foram retiradas da água e envolvidas em um pano absorvente até que a água visível fosse eliminada. Imediatamente depois de enxugadas, as amostras foram pesadas novamente. Para o cálculo de determinação da absorção se utiliza a Equação (9) e os resultados estão apresentados na Figura 16.

$$AA(\%) = \frac{mu - ms}{ms} \times 100 \quad (9)$$

Sendo: mu = massa úmida da amostra saturada e ms = massa seca

4.2.3 Cimento e Incorporador de ar

O cimento utilizado foi o CP IV 32 da marca Votorantin. O concreto produzido com este cimento, em relação ao concreto feito com Cimento Portland Comum, apresenta maior impermeabilidade, maior durabilidade e maior resistência mecânica à compressão a longo prazo. É geralmente utilizado para grandes volumes de concreto devido ao baixo calor de hidratação e em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos devido a sua baixa porosidade. É fabricado obedecendo os requisitos da NBR 5736 e pertence à classe de resistência de 25 a 32 MPa.

O aditivo incorporador de ar utilizado foi o Power MIX 411 BR - Aditivo incorporador de ar para argamassas estabilizadas, fabricado por MC-Bauchemie Brasil. É formulado com incorporadores de ar, retentores de água e agentes estabilizantes. O fabricante indica uma dosagem de 0,1 a 0,5 % sobre a massa de cimento. No caso de agregados leves o incorporador de ar ajuda a tornar a mistura

homogênea, evitando a segregação ou flutuação dos agregados, além de deixar o compósito mais leve com a formação de poros não interligados.

4.2.4 Composição das amostras

Antes da moldagem das amostras e definição das proporções, foram testadas algumas misturas, alterando a quantidade de água e testando o procedimento de pré-molhagem dos agregados com alta absorção de água. A trabalhabilidade destas misturas foi verificada pelo método de slump flow e assim se definiu as quantidades de água de pré-molhagem para cada tipo de agregado. Devido à grande diferença entre a massa específica dos materiais empregados (cimento, areia, argila expandida, EPS, perlita e vermiculita), as proporções estão expressas em volume como apresentado na Tabela 8.

Tabela 8. Composição das amostras

	agregado	cimento	relação água/cimento		aditivo incorporador de ar
argila expandida	80%	20%	1,4 *	1,5 **	0,25% sobre a massa do cimento
EPS			1,4 *		
perlita			1,4 *	1,7 **	
vermiculita			1,4 *	2 **	
graute	20% cimento / 40%areia / 40% brita zero / 500 ml superplastificante para cada 50 kg de cimento				

* para a mistura **total de água com a pré-molhagem

4.3 Fabricações dos corpos de prova

Os agregados argila expandida, perlita expandida e vermiculita expandida, apresentam absorção de água alta. Parte desta absorção ocorre logo que o agregado é colocado em contato com a água e outra parte é lenta. Devido à alta absorção, parte da água de amassamento acaba sendo absorvida pelos poros do agregado, prejudicando a trabalhabilidade da mistura. Para minimizar este fenômeno, procedeu-se a pré-molhagem dos agregados, imergindo os mesmos em baldes com água, onde permaneceram por 10 min.

4.3.1 Trabalhabilidade, *slump flow*

Para determinação da trabalhabilidade dos compósitos, foi utilizado o ensaio de espalhamento (*Slump Flow*) indicado pela ASTM C1611: 2006, que consiste na medida de espalhamento utilizando o mesmo molde de tronco de cone indicado pela ABNT NBR 7223:1992, para medida do abatimento do tronco de cone (*Slump Test*). Após o preenchimento completo do tronco de cone, sem auxílio de vibração ou adensamento, com sua abertura menor para baixo, o molde é retirado e, após o concreto parar de se mover, é feita a medida do espalhamento em duas posições aproximadamente ortogonais. A medida do espalhamento corresponde à média aritmética dessas medidas. Para os estudos foi determinado um espalhamento de $500 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$, que corresponde a uma mistura auto adensável. A Figura 14 apresenta as etapas da realização do ensaio de espalhamento dos compósitos.



Figura 14. Slump Flow.

As amostras estudadas não possuem agregados de granulometria muito elevada, apresentando normalmente uma fluidez maior que um concreto convencional. Por esse motivo, foi utilizado o método ora descrito para medida de trabalhabilidade, que é normalmente utilizado para medidas reológicas de concretos auto adensáveis.

O valor do espalhamento expressa a capacidade do concreto escoar pela ação do próprio peso e relaciona-se à sua habilidade de preenchimento. É possível observar outras características importantes nesse ensaio, tais como: homogeneidade da mistura, ausência de segregação ou de flutuação dos agregados, ausência de exsudação nas bordas da porção espalhada; e o formato do espalhamento, que deve ser preferencialmente arredondado devido à adequada coesão da mistura.

4.3.2 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova foi feita segundo a NBR 5738/2015. As fôrmas foram revestidas com uma fina camada de óleo mineral para que facilitasse a desmoldagem dos corpos de prova dos [Figura 15(a) e 15(b)]. Na moldagem, segundo determina a norma, como as massas das amostras apresentavam características de autoadensamento, foi dispensada a etapa de adensamento por golpes. As misturas foram colocadas nos moldes e logo após foi feito o procedimento de rasamento com régua metálica, que consiste na uniformização inicial da superfície do corpo de prova.

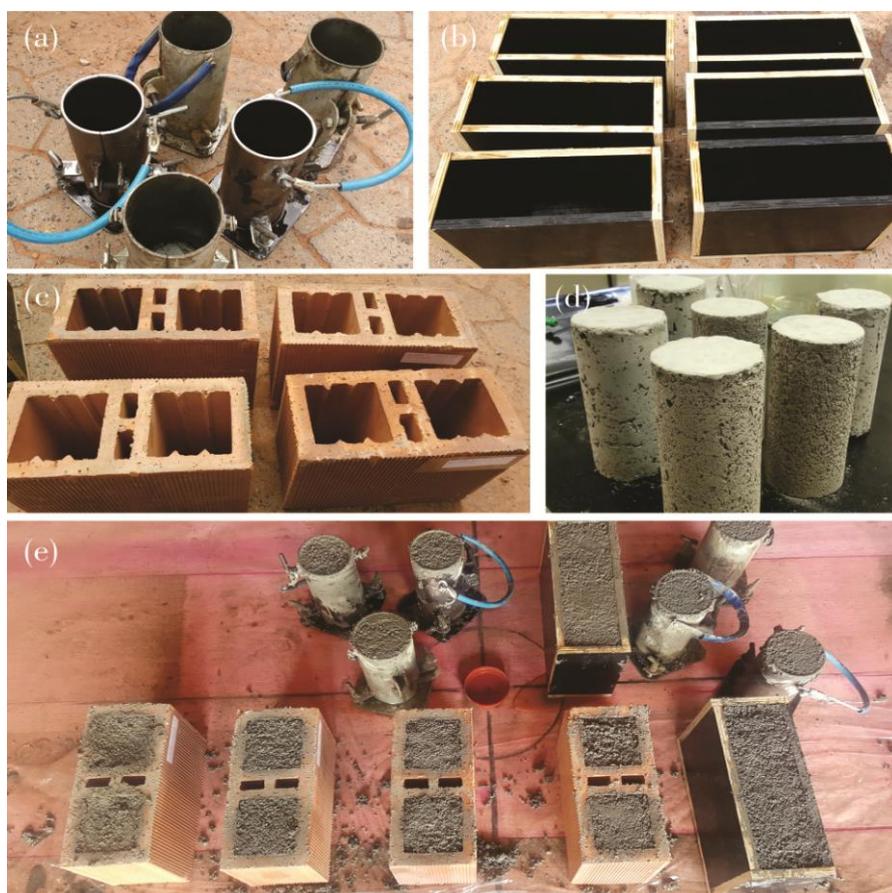


Figura 15. (a) fôrmas metálicas para moldagem dos corpos de prova de compressão; (b) fôrmas prismáticas 10×19×29cm em chapa plastificada; (c) blocos etiquetados com identificação para serem preenchidos as misturas (d) corpos de prova cilíndricos capeados (d) amostras moldadas.

Antes do ensaio de resistência a compressão, os corpos de prova cilíndricos passaram pelo capeamento, segundo NBR 5738:15, para tornar suas superfícies

planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do corpo de prova [Figura 15(d)]. Os corpos de prova prismáticos (10 cm × 19 cm × 29 cm), utilizados para ensaio de absorção e termografia foram moldados com os mesmos procedimentos da NBR 5738:2015, mas sem realizar o procedimento de capeamento.

Para as amostras de blocos preenchidos, foi utilizada a mesma massa de amostra dos demais corpos de prova. Teve-se o cuidado de umedecer o bloco [Figura 15(c)] para não absorver muita água da massa e como o compósito ficaria no vazado do bloco, não se utilizou óleo desmoldante, somente foram preenchidos os vazados e posteriormente feito o rasamento com régua metálica.

Para todas as amostras, com os diferentes agregados, foi feita uma mistura única em betoneira e com esta massa foram feitos os três tipos de amostras (corpos de prova cilíndricos, prismáticos e blocos preenchidos [Figura 15(e)]).

4.4 Massa específica

A massa específica no estado endurecido foi determinada utilizando corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A massa do corpo de prova foi medida em balança com resolução de 0,1 g, após secagem em estufa a 60 °C, até massa constante.

A temperatura de 60° foi determinada após ensaios de amostras de EPS no forno onde se percebeu que a perda de massa era grande e em temperaturas acima de 80 °C já ocorriam deformações.

Foram utilizados os mesmos corpos de prova de compressão para a realização deste ensaio, 3 unidades de cada compósito.

4.5 Estudos morfológicos das amostras

As amostras de compósitos foram cortadas longitudinalmente, em serra circular com água, para que os compósitos fossem observados internamente. Após o corte, as mesmas foram secas em estufa e observadas no microscópio Dino-Lite Pro [Figura 16] com aumento de 200× e analisadas no software DinoCapture 2.0 que possibilita, além da visualização das imagens, a inserção de escala.

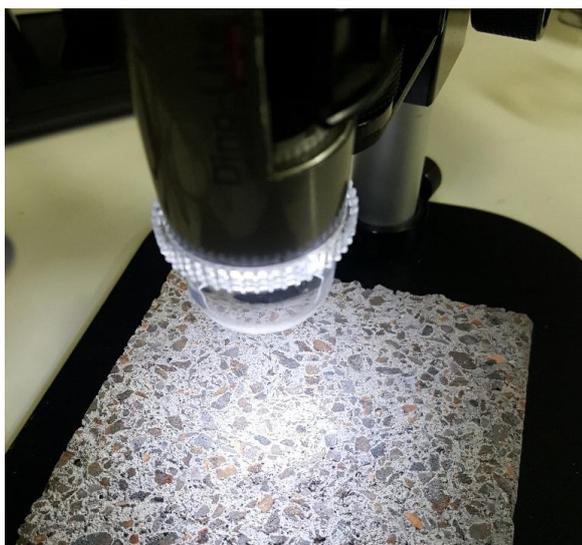


Figura 16. Amostra sendo analisada no microscópio Dino–Lite Pro.

4.6 Absorção de água

Para o ensaio de absorção de água, as amostras foram secas em estufa até massa constante. As amostras foram pesadas secas, após foram submersas por 1 min, pesadas para determinação da absorção inicial e posteriormente ficaram 24h submersas e pesadas novamente.

O índice de absorção de água, segundo NBR 15270:2005, é determinado pela Equação (10).

$$AA(\%) = \frac{mu - ms}{ms} \times 100 \quad (10)$$

Sendo: mu = massa úmida da amostra saturada e ms = massa seca

4.7 Resistência à compressão axial dos compósitos

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme ASTM C 39/C 39M – 03 Método de Teste Padrão para Resistência à Compressão de Amostras de Concreto Cilíndrico com um avanço de carga de 0,15 MPa/seg, devido à baixa resistência de algumas amostras. Nos ensaios das amostras de EPS com maiores teores esta taxa foi diminuída para 0,10 MPa/seg devido a baixíssima resistência a compressão das amostras.

As amostras contendo agregados leves foram ensaiadas no laboratório Lapol da Engenharia de Materiais da UFRGS na Prensa INSTRON 3382 [Figura 17 (b)]. As amostras de graute, devido à resistência superior, não puderam ser ensaiadas nesta prensa, sendo ensaiadas na Prensa IH – F2000 kNI marca Shimadzu [Figura 17(a)], com capacidade de 2000 kN, no laboratório LEME da Engenharia Civil da UFRGS.

Para esta caracterização foram ensaiados 3 corpos de prova de cada material na idade de referência (28 dias).



Figura 17. (a) Prensa IH – F2000 kNI marca Shimadzu do LEME – UFRGS, (b) Prensa INSTRON 3382, LAPOL – UFRGS.

4.8 Termografia

Foi montado um sistema de aquecimento composto por um termo ventilador de 2000 W da marca Cadense e um túnel (20 cm do aquecedor até a amostra) composto por chapas de MPF 18 mm, para canalizar o calor para a face exposta dos blocos e dos compósitos [Figuras 18 e 19]. O termógrafo ficou a 1 m de distância da face analisada do corpo de prova. O termógrafo foi configurado com a distância de 1 m e para uma emissividade de 0,90. O ensaio começou ao ligar o aquecedor e teve a duração de 300 min. No tempo zero (ao ligar o aquecedor), foi realizado o primeiro registro de temperatura e a cada 3 min foi realizada uma nova medição, possibilitando assim acompanhar o aumento da temperatura ao longo do tempo. Este procedimento foi realizado para as 6 corpos de provas de blocos, 1 vazio e 5 preenchidos e para as 5 amostras de prismas de compósitos.

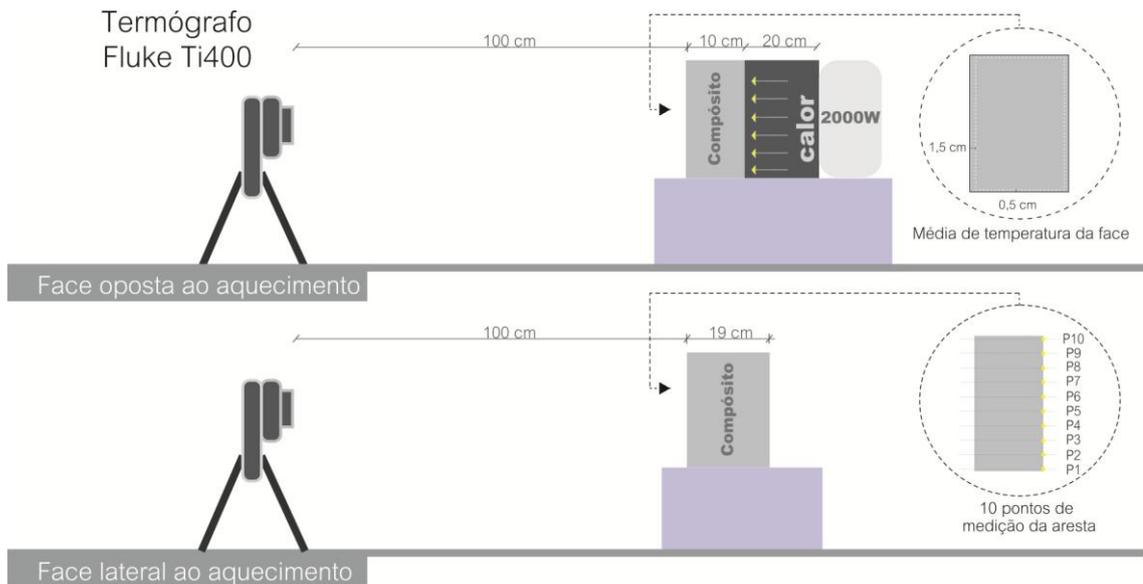


Figura 18. Ilustração termografia do compósito.

Foi realizada também a termografia na face lateral dos corpos de prova de blocos e compósitos para analisar como a passagem do calor acontece no decorrer do tempo. Além disso foi utilizada a medição de 10 pontos na aresta exposta ao calor para se calcular uma média aproximada de temperatura da face aquecida.

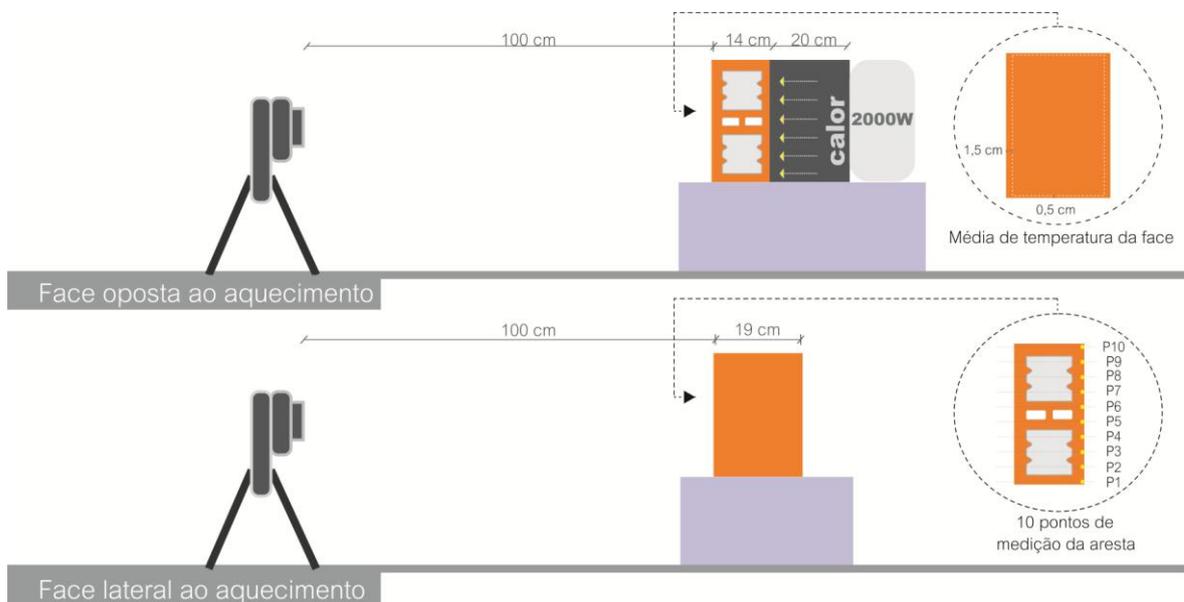


Figura 19. Ilustração termografia do bloco.

Para registrar a variação da temperatura, foi utilizado um termógrafo Fluke modelo Ti400 [Figura 20].



Figura 20. Câmera de termografia por infravermelho Ti400

No bloco vazio, os vazados foram fechados com chapas de EPS de densidade 25 kg/m^3 , com espessura de 1,5 cm, recortadas no formato dos vazados, para que o ar à temperatura ambiente não circulasse e prejudicasse a análise. Como a análise da temperatura na face oposta ao aquecimento foi feita através da média da face desprezando-se 1,5 cm nas laterais da medição para todas as amostras [Figura 21], acredita-se que este fechamento de EPS não tenha influenciado muito na medição.

Após os ensaios as imagens geradas foram analisadas no software Fluke Connect Smart View. Foi utilizada a medição da face oposta ao aquecimento, desprezando-se 1,5 cm nas laterais e 0,5 cm na parte superior e inferior.

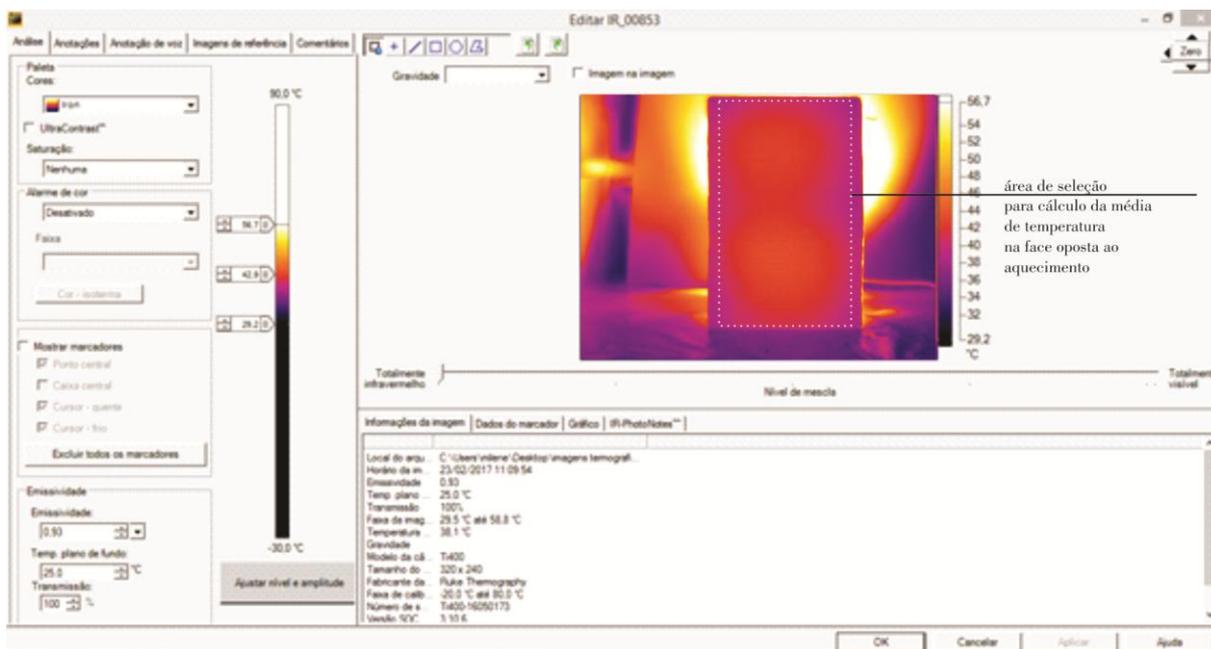


Figura 21. Captura de tela do software Fluke Connect Smart View

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização dos materiais e trabalhabilidade da massa do compósito

Os agregados leves foram caracterizados segundo NBR NM 52 e NBR NM 248. Os resultados da caracterização estão apresentados na Figura 22.

	<p>Argila expandida - depois de britada massa específica aparente 540 kg/m³ - (NBR NM 52) dimensão máxima característica 3,8 mm - (NBR NM 248) granulometria variando de 1,18 mm a 3,8 mm sendo 45% do volume 1,70 mm.</p>
	<p>EPS massa específica aparente 25 kg/m³ - (NBR NM 52) dimensão máxima característica 4,0 mm - (NBR NM 248) granulometria variando de 2,36 mm a 4,0 mm sendo 55% do volume 3,35 mm.</p>
	<p>Perlita expandida massa específica de 57 kg/m³ - (NBR NM 52) dimensão máxima característica 3,35 mm - (NBR NM 248) granulometria varia de 1,18 mm a 3,35 mm sendo 50% do volume 1,70 mm.</p>
	<p>Vermiculita expandida massa específica de 114 kg/m³ - (NBR NM 52) dimensão máxima característica 4,2 mm - (NBR NM 248) granulometria varia de 2,36mm a 4,2 mm sendo 55% do volume apresenta 2,36 mm</p>

Figura 22. Caracterização dos agregados leves

Para os agregados do graute foi feita somente análise granulométrica e de massa específica. A areia apresenta massa específica de 2630 kg/m³, dimensão máxima característica 2,36 mm. A granulometria varia de 2,38 mm a 0,3 mm, sendo 45,3% do volume de 0,3 mm. O pedrisco apresenta massa específica de 2800 kg/m³, dimensão máxima característica 12,5 mm. A granulometria varia de 4,8 mm a 12,5 mm.

As fotomicrografias feitas com o microscópio Dino Lite Pro, estão apresentadas na Figura 23.

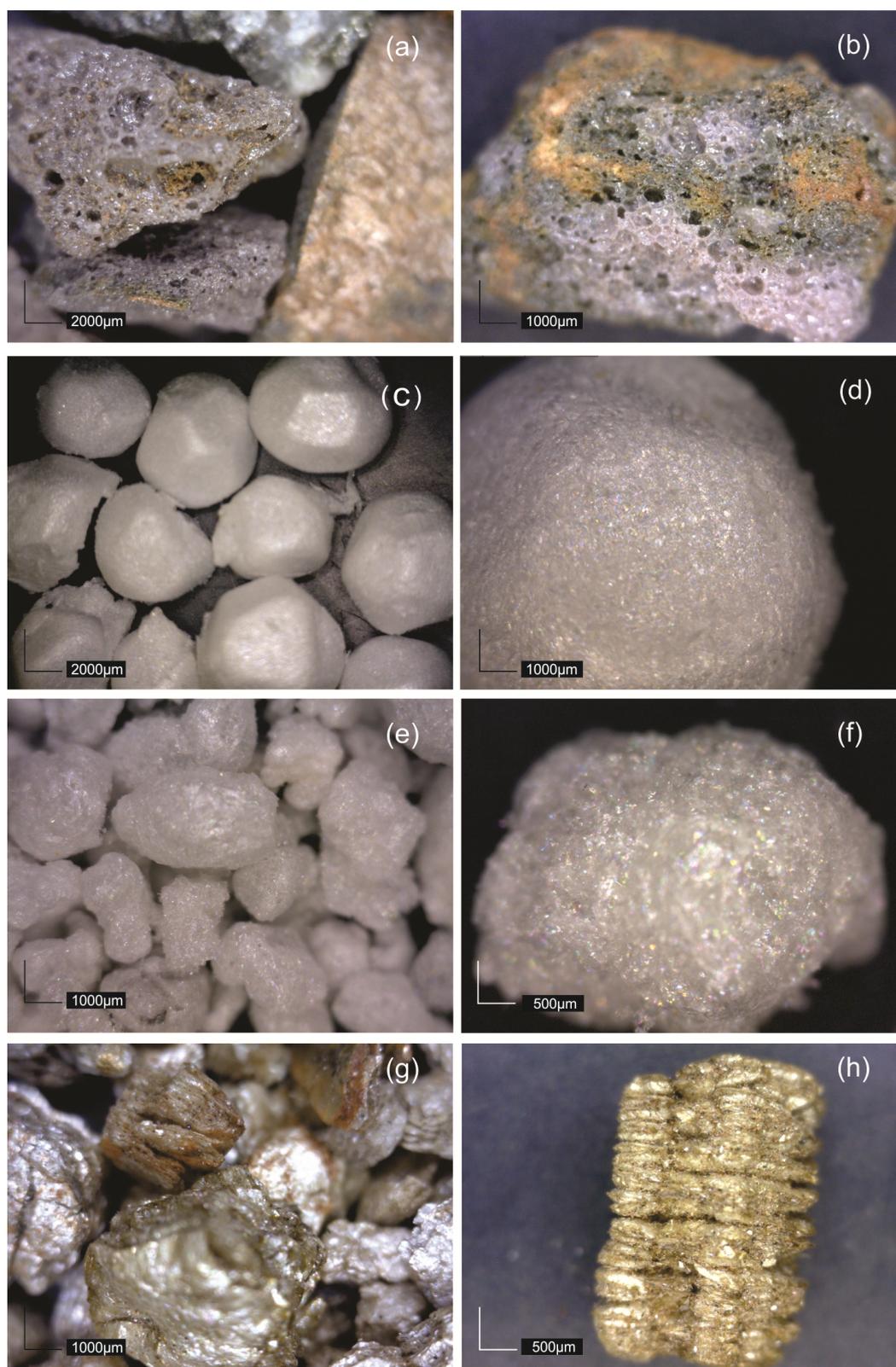


Figura 23. Agregados: (a-b) argila expandida; (c-d) EPS; (e-f) perlita expandida; (g-h) vermiculita expandida.

- A argila expandida [Figuras 23(a-b)] depois de britada, apresentou formato sub angular, coloração bicolor com partes cinzas e outras douradas e alta porosidade.
- O EPS [Figuras 23(c-d)] utilizado possui perólas não uniformes na cor branca, com poros não interligados (o que faz com que sua absorção seja baixa).
- A perlita expandida [Figuras 23(e-f)] apresentou formato sub arredondado e coloração branca brilhante, devido à grande reflectividade das bolhas contidas no material.
- A vermiculita expandida [Figuras 23(g-h)] apresenta-se no formato de flocos sanfonados dourados cheios de camadas de ar em seu interior.

Os resultados de absorção de água dos agregados, que posteriormente foram utilizados para determinar a quantidade de água de pré-molhagem na fabricação das massas dos compósitos, estão apresentados na Figura 24.

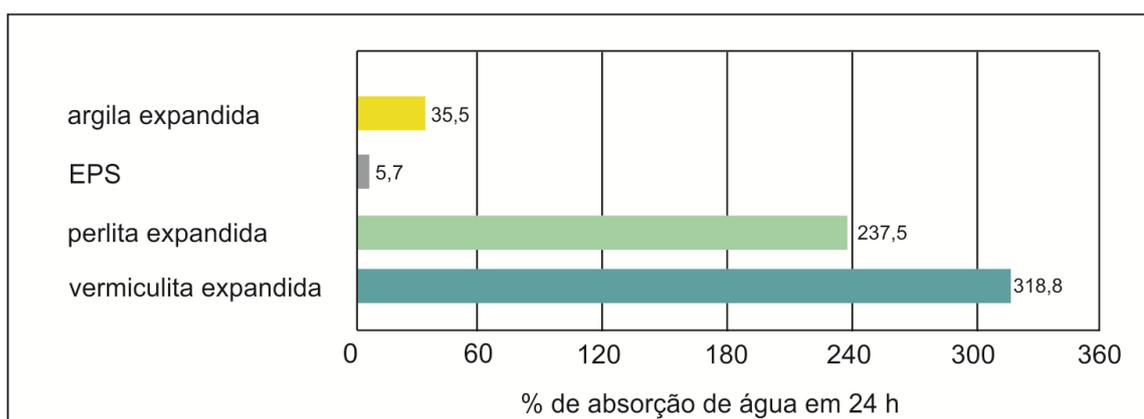


Figura 24. Absorção dos agregados porosos ensaiados.

Quanto a trabalhabilidade, as misturas avaliadas ficaram dentro da variação de espalhamento *Slump Flow*, desejada ($500 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$), demonstraram boa coesão, com espalhamento circular, não apresentaram segregação ou flutuação dos agregados leves, e não ocorreu exsudação na mistura. Portanto, apresentaram fluidez e condições ideais para o preenchimento dos vazados dos blocos e da moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos.

5.2 Compósitos de matriz cimentícia

Os compósitos, depois de desformados, apresentaram diferentes texturas, conforme pode ser observado na Figura 25. Nas Figuras 25 (a-c), pode-se observar os compósitos com os diferentes agregados leves na proporção de 80% de agregado para 20% de cimento e o compósito de graute estrutural [Figura 25 (d)]. Na parte inferior da imagem, os compósitos com o agregado leve EPS nos teores de 80%, 85% e 90% respectivamente [Figuras 25 (e-g)].

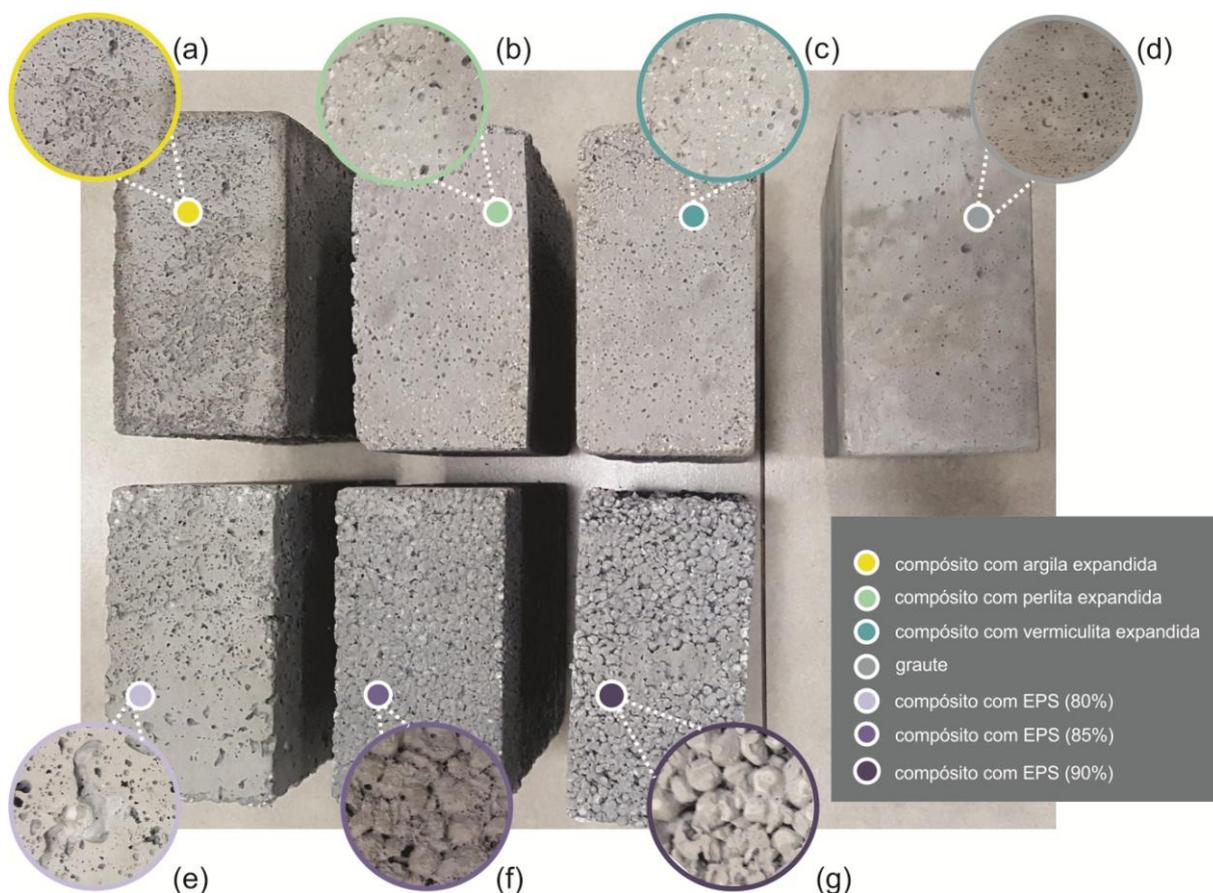


Figura 25. Imagens dos compósitos produzidos: (a) argila expandida; (b) perlita expandida; (c) vermiculita expandida; (d) graute; (e) EPS 80%; (f) EPS 85%; (g) EPS 90%.

A Figura 25 apresenta além dos corpos de prova dos compósitos com os diferentes agregados leves com teor de 80% de agregado, o corpo de prova de graute e os corpos de prova com variações de teor de EPS (85% e 90%) que foi o agregado com melhor desempenho.

As fotomicrografias do interior dos compósitos (cortados em serra com água), feitas no Microscópio Dino Lite Pro, podem ser observadas na Figura 26.

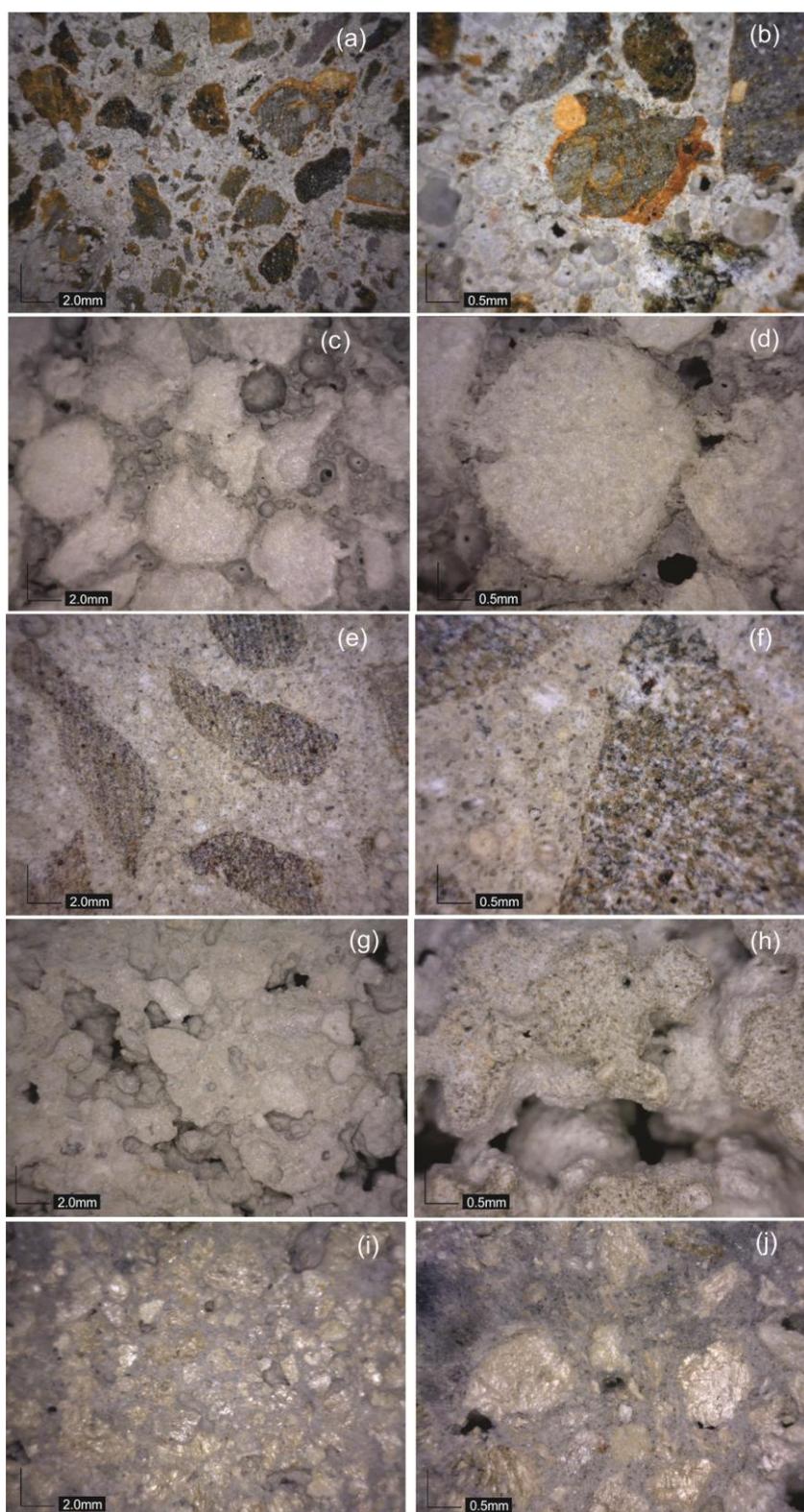


Figura 26. Fotomicrografias do: (a-b) compósito de argila expandida; (c-d) compósito de EPS; (e-f) gaurte; (g-h) compósito de perlita expandida; (i-j) compósito de vermiculita.

Nas figuras 26 (a-b) observa-se a variação de granulometria da argila expandida provocada pela britagem, além dos poros do próprio agregado é possível observar os poros gerados pelo incorporador de ar. Ainda é possível observar o formato sub angular dos agregados e a variedade de granulometria, coloração bicolor com partes cinza e outras douradas. Este compósito apresentou um estrutura bem densa, justificada principalmente pela grande variação granulométrica da argila expandida britada . Nas Figuras 26 (c-d) é possível observar que assim como relatado por Babu *et al.* [2003], o EPS é um agregado não absorvente e hidrofóbico pois as pérolas de EPS não sofrem absorção de água. Apesar de possuir muitos poros, a matriz cimentícia não penetrou nas pérolas, diferente da argila, perlita e vermiculita onde se consegue observar esta penetração. Ainda é possível através do corte observar a não uniformidade geométrica das pérolas de EPS e a pequena variação granulométrica. Nas Figuras 26 (e-f), observa-se um compósito completamente denso, característica própria do graute estrutural, o que justifica sua mínima absorção (Tabela 9) e alta resistência mecânica [Figura 27]. Observa-se [Figuras 26(g-h)] que mesmo mantendo os mesmos teores de cimento, incorporador de ar e resultados de *slump flow* que para os demais compósitos, a amostra com agregado perlita apresentou uma maior porosidade que as demais amostras. O compósito com vermiculita [Figura 26 (g-h)] apresentou uma estrutura homogênea, com pouca variação na granulometria dos agregados.

A massa específica e a absorção de água dos corpos de prova ensaiados está apresentada na Tabela 9 juntamente com seus respectivos desvios padrões e coeficientes de variação.

Tabela 9. Massa específica dos compósitos

AMOSTRAS	Compósito argila expandida	Compósito EPS	Graute	Compósito perlita expandida	Compósito vermiculita expandida
MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	0,84	0,35	1,97	0,57	0,55
DESVIO PADRÃO	0,0020	0,0015	0,0036	0,0020	0,0036
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	0,24	0,44	0,18	0,35	0,66
ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)	18,43	35,99	2,71	61,20	63,86
DESVIO PADRÃO	0,0458	0,0781	0,0289	0,1323	0,2358
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	0,25	0,22	1,07	0,22	0,37

Contrariando os resultados de absorção dos agregados (Figura 24), o compósito com agregado EPS teve uma maior absorção de água que o compósito com agregado argila expandida. Pode-se observar na Figura 26 (c-d) que o

compósito de EPS apresenta uma maior quantidade de poros, o que certamente deve justificar a absorção mais elevada do compósito. Quanto à argila, como foi britada, acabou tendo uma granulometria diversificada, conforme pode ser observado na Figura 26 (a-b), e gerou um compósito mais denso e com maior cobertura de matriz em torno do agregado. Outro fator que pode justificar esta diferença é a massa inicial dos compósitos, bem maior na argila, o que faz com que mesmo absorvendo uma quantidade elevada de água percentualmente acabe sendo menor do que o EPS que tem uma massa inicial pequena.

As Figuras 27 (a-e) apresentam as curvas obtidas em ensaio de compressão dos compósitos em estudo, ensaiados através de corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Os valores apresentados na Figura 27 (f) são os valores médios de resistência para cada compósito.

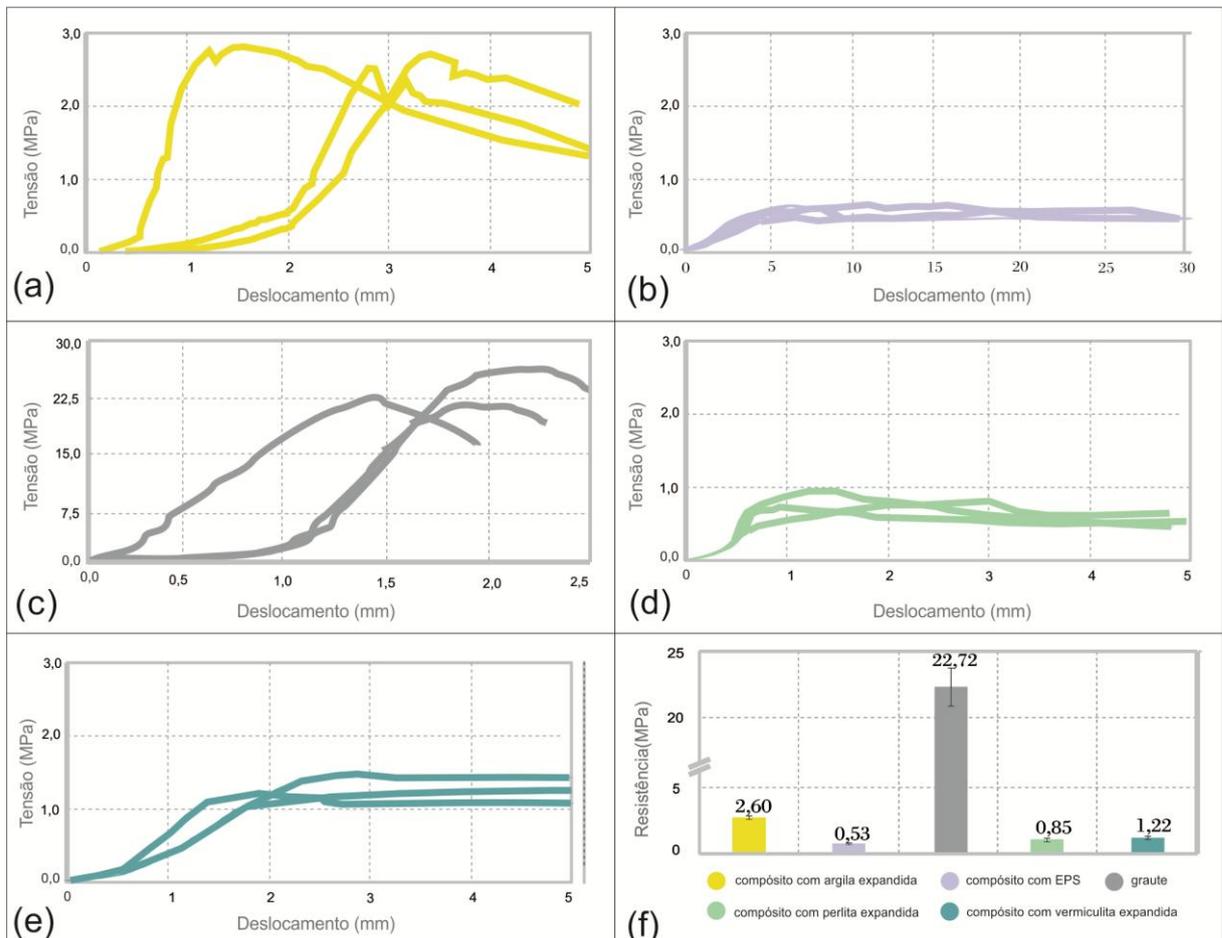


Figura 27. Resistência a compressão axial: (a) compósito com argila expandida; (b) compósito com EPS; (c) graute; (d) compósito com perlita expandida (e); compósito com vermiculita expandida (f); resistência média dos compósitos, aos 28 dias.

Observa-se que o graute estrutural, assim como esperado devido a sua função estrutural, tem a maior resistência à compressão. Entre os compósitos com agregados leves, o maior desempenho é para argila expandida, que também apresenta a maior massa específica, $0,84 \text{ g/cm}^3$ [Tabela 9], e a menor resistência é a do agregado EPS que também possui a menor massa específica, $0,35 \text{ g/cm}^3$ [Tabela 9].

Quanto ao deslocamento, é interessante observar que os compósitos com agregado EPS e perlita expandida apresentaram grande deformação durante o ensaio, em contrapartida, o compósito de alta resistência graute apresentou deformação muito inferior. Ozório [2016] relatou em seu estudo sobre concretos com adição de EPS, a grande deformação e a resistência remanescente que ocorre nesse tipo de concreto, onde mesmo após a ruptura os corpos de prova permanecem íntegros.

A Figura 28 apresenta as curvas de temperatura dos compósitos durante 300min. As linhas contínuas apresentam a média de temperatura da face oposta a exposição direta de calor e as curvas pontilhadas se referem a uma média de temperatura de 10 pontos da aresta da face aquecida.

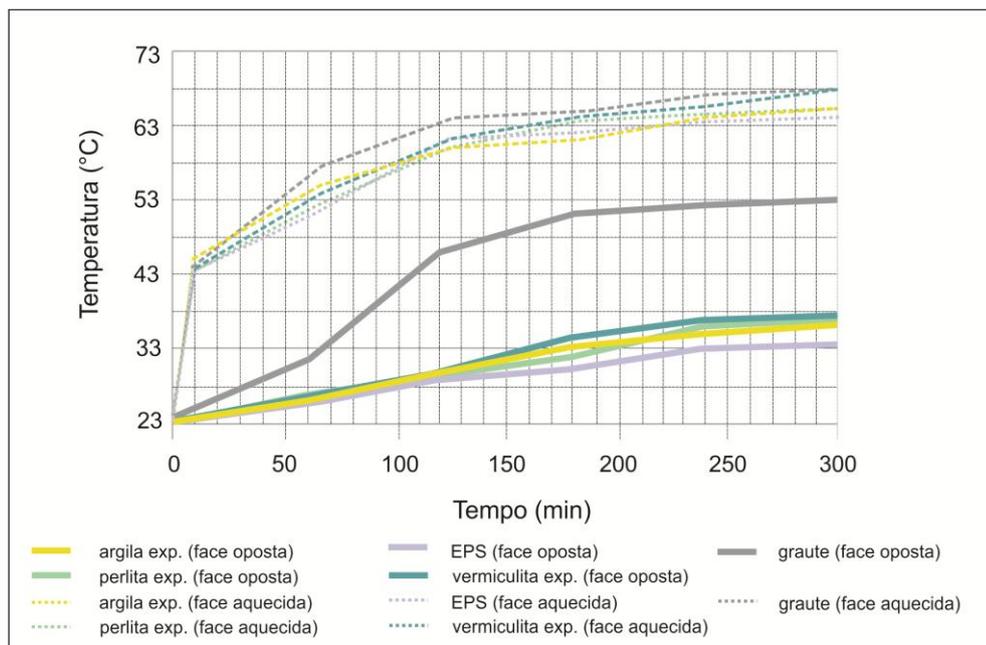


Figura 28. Curvas de temperatura durante os 300 min na face exposta ao calor e na face oposta para os diferentes compósitos

É possível observar um aquecimento elevado da face que recebe calor nos primeiros 10 min de ensaio [Figura 28], o aumento da temperatura posteriormente continua acontecendo, porém de forma mais lenta até que praticamente começa a estabilizar. Na face oposta, o aquecimento ocorre de forma mais contínua, com exceção da amostra de graute que tem uma elevação considerável de temperatura principalmente entre 60 e 120 min. Esta amostra se destaca entre as demais, comportamento já esperado considerando as características do material, que é um bom condutor térmico comparado aos outros, considerados isolantes térmicos.

Após 300 min de aquecimento a mostra com menor média de temperatura na face oposta a exposição de calor foi a com EPS (33,2 °C), seguida pela com argila expandida (35,1 °C), com perlita expandida (36,7 °C), vermiculita (37 °C) e com o pior desempenho, tendo conduzido rapidamente o calor a amostra de graute que atingiu 53,2 °C. Essa diferença de temperaturas pode ser observada claramente nas imagens de termografia apresentadas na Figura 29. A média de temperatura da aresta da face aquecida após os 300 min de aquecimento ficou entre 64 e 68 °C.

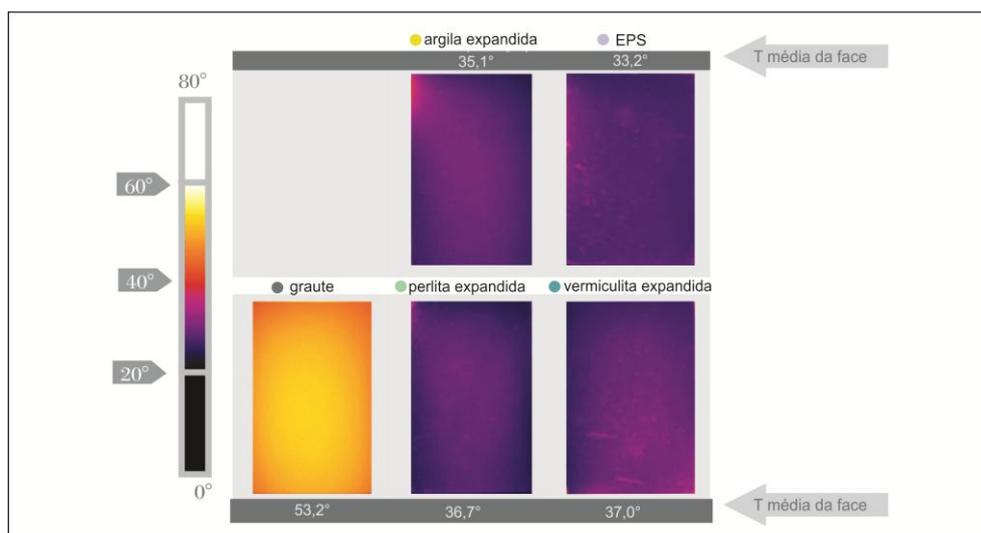


Figura 29. Imagens termográficas da face dos compósitos oposta ao aquecimento, após 300 min de aquecimento.

Na Figura 30 é possível observar a face lateral dos compósitos, sendo à direita das imagens a face aquecida e à esquerda a face oposta (onde foi medida a temperatura). Observa-se que na amostra de graute as duas faces já estavam com temperaturas relativamente próximas, após 300 min de aquecimento, enquanto os materiais isolantes apresentaram um maior aquecimento numa pequena região apenas.

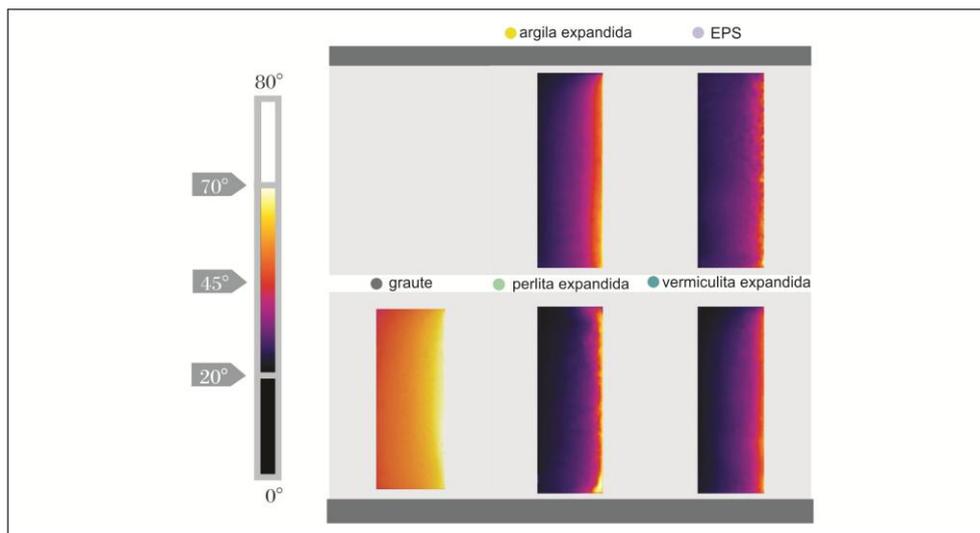


Figura 30. Imagens termográficas da face lateral após 300 min de aquecimento.

A NBR 15220 trás algumas referências de condutividade térmica para concretos com agregados isolantes térmicos e para alguns materiais isolantes, estas referências possuem diferenças de composição quando comparadas com os compósitos estudados, pois os concretos de referência possuem maiores densidades, porém de certa forma as diferenças ou similaridades de desempenho térmico se confirmaram. Segundo a norma, o poliestireno expandido moldado (somente o material), com densidade de 15 a 35 Kg/m³, possui uma condutividade térmica de 0,040 W/m.k enquanto a argila expandida com densidade <400 Kg/m³, 0,16 W/m.k. Já para concretos, a norma trás uma condutividade de 0,46 W/m.k para concreto com argila expandida com densidade de massa aparente de 1000-2000 kg/m³ e 0,24 W/m.k para concretos com perlita e vermiculita com densidades entre 400 e 600 kg/m³. A norma traz perlita e vermiculita como equivalentes, e realmente seus resultados foram muito semelhantes, assim como o resultado do EPS superior ao da argila expandida, relacionado pela norma somente nos materiais isolados, mas que apresenta a menor condutividade térmica no EPS.

Abidi *et al.*, [2014], em um estudo que comparou o desempenho da perlita e da vermiculita também encontrou uma pequena vantagem para a perlita nos concretos estudados.

5.3 Efeito da inclusão de compósitos de matriz cimentícia nas propriedades de blocos estruturais cerâmicos

Para os blocos cerâmicos a NBR 15270:2005 (Parte 2 – item 5.6) especifica que o índice de absorção d'água em qualquer dos blocos ensaiados deve estar entre 8,0% e 22,0% para que se garanta a aderência da argamassa de assentamento e revestimento. A Figura 31 apresenta a absorção dos blocos cerâmicos preenchidos com os compósitos estudados.

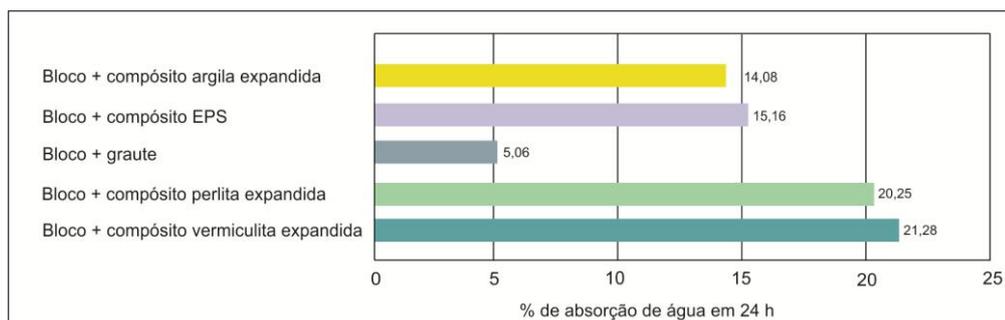


Figura 31. Absorção de água dos blocos preenchidos.

A única amostra que ficou fora da especificação da norma foi a preenchida com graute, porém isto não prejudicaria o desempenho do bloco pois o graute é feito após o assentamento, não influenciando a absorção da argamassa de assentamento. E quanto ao revestimento, como este é feito na parede pronta, o graute também não irá influenciar, pois a argamassa estará em contato somente com as faces de argila do bloco.

A massa dos blocos foi medida em balança de precisão após serem preenchidos e secos em estufa até a constância de massa. Os resultados estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10. Aumento da massa com a inclusão dos compósitos

AMOSTRAS	Compósito argila expandida	Compósito EPS	Graute	Compósito perlita expandida	Compósito vermiculita expandida
MASSA bloco seco com preenchimento (g)	10190	8033	14375	8540	8810
Aumento da MASSA (g)	3267	1143	7460	1622	1875

A amostra que teve o menor aumento de massa foi aquela preenchida com o compósito com agregado EPS. O maior aumento foi na amostra preenchida com graute, que já é utilizado comumente como elemento estrutural nas edificações construídas com o sistema de alvenaria estrutural, diferentemente das outras amostras que teriam somente função de melhorar o desempenho térmico.

Para o ensaio de termografia, das 6 tipologias de blocos ensaiadas, 5 foram preenchidas com compósitos de matriz cimentícia e em 1 somente foram fechadas as laterais resultando em uma camada de ar no interior dos seus vazados. A Figura 32 apresenta as curvas de temperatura dos blocos durante 300min. As linhas contínuas apresentam a média de temperatura da face oposta a exposição direta de calor e as curvas pontilhadas se referem a uma média de temperatura de 10 pontos da aresta da face aquecida. Assim como na curva de aquecimento dos compósitos [Figura 28] é possível observar que nos primeiros 10 min ocorre um grande aquecimento da face aquecida, o aquecimento continuou ocorrendo nos primeiros 120 min e após este período começa a ser menos expressivo até praticamente começar a estabilizar.

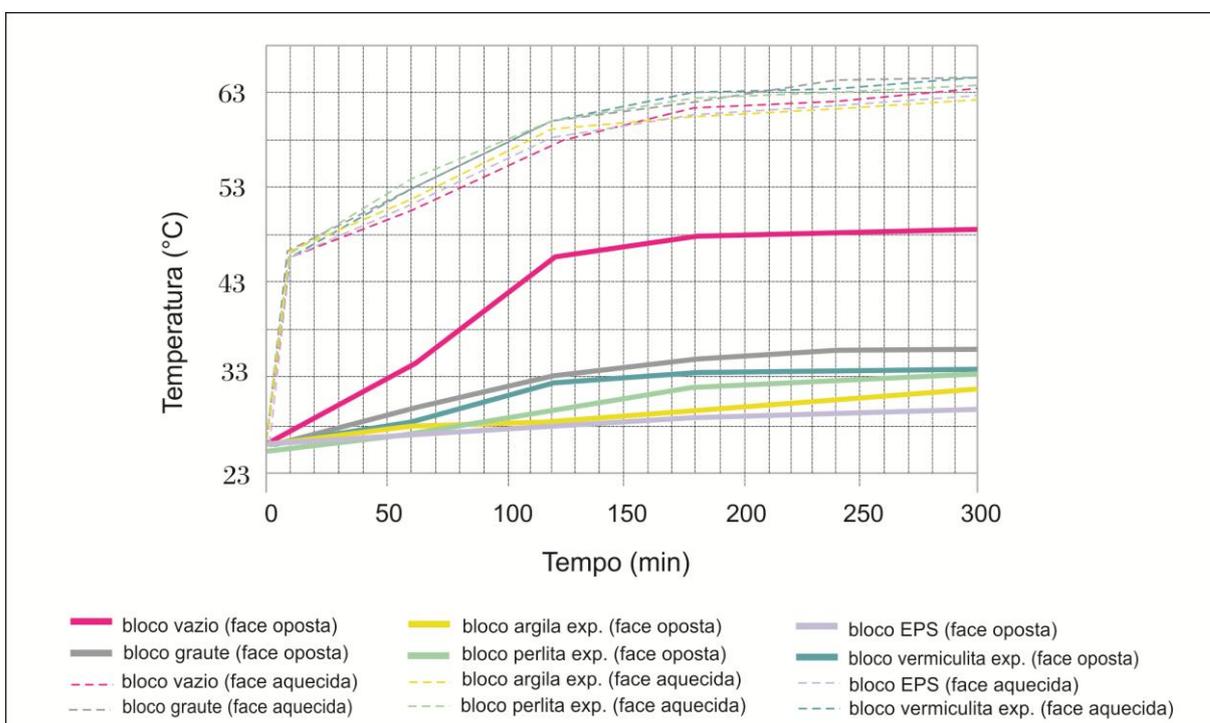


Figura 32. Curvas de temperatura durante os 300 min na face exposta ao calor e na face oposta para as diferentes amostras de blocos

Considera-se que as amostras preenchidas sofreram aquecimento em regime transiente (variação do perfil de temperatura em função do tempo) pelo efeito de condução. Segundo a lei de Fourier, o fluxo de calor aumenta com o aumento da condutividade térmica dos materiais. Em geral a condutividade térmica é maior nos sólidos do que nos líquidos e por sua vez, é maior nos líquidos do que nos gases. Sendo assim, se a amostra não preenchida de compósitos e com apenas uma camada de ar, estivesse sofrendo somente o aquecimento por condução, deveria ter o melhor desempenho, porém, considera-se que tenha ocorrido os fenômenos de convecção e de radiação aquecendo a amostra na face oposta ao aquecimento com maior velocidade que nas demais amostras, conforme pode ser observado nas Figuras 31, 32 e 33. Nos primeiros 120 min houve um aquecimento bem elevado [Figura 32], posteriormente a temperatura foi estabilizando.

O bloco vazio teve o pior desempenho tendo média de temperatura na face oposta após aquecimento de 300 min de 47 °C. O melhor desempenho foi para amostra preenchida com compósito com EPS que teve média de temperatura de 29,9 °C, seguida pela argila expandida [31,8 °C], perlita expandida [33,6 °C], vermiculita [34,6 °C] e graute [35,6 °C].

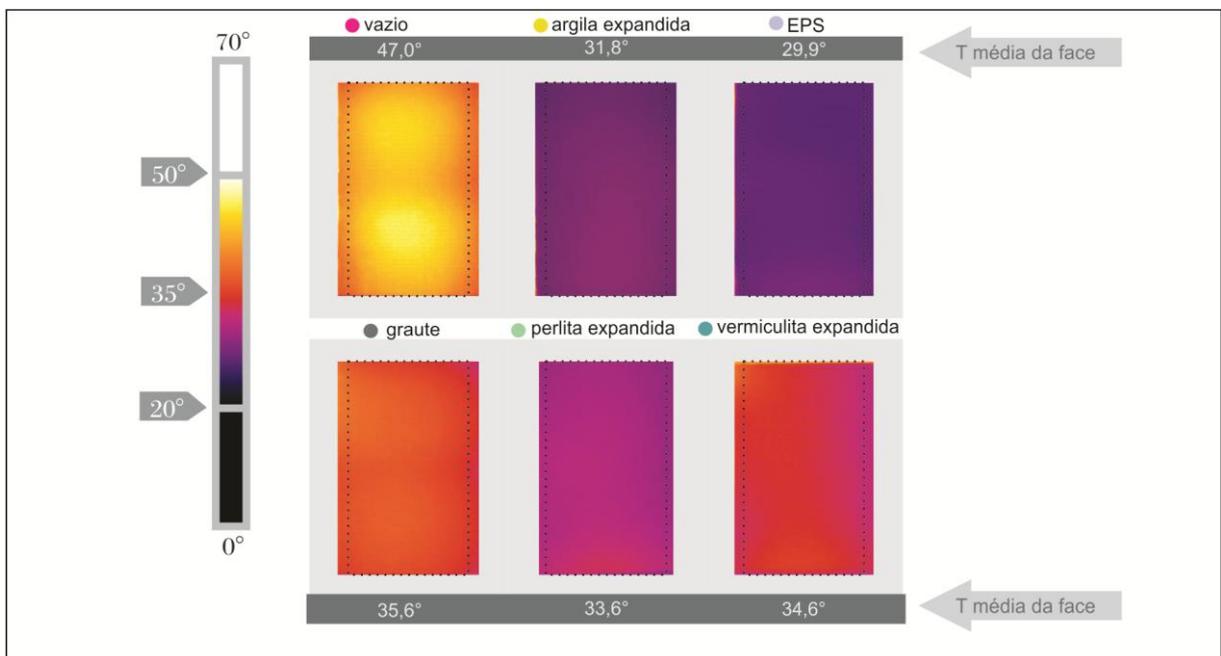


Figura 33. Imagens termográficas da face oposta dos blocos, após 300 min de aquecimento.

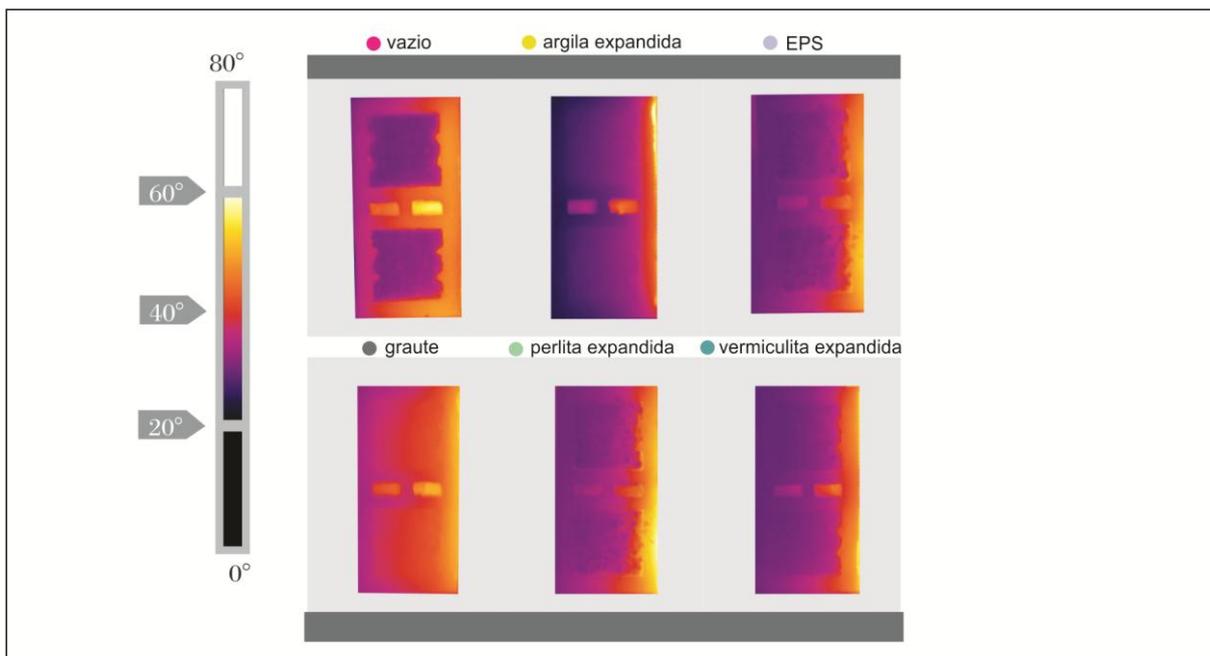


Figura 34. Imagens termográficas da face lateral dos blocos após 300 min de aquecimento.

Alguns estudos já observaram melhorias no desempenho térmico de blocos quando preenchidos. Sales *et al*, [2012], observaram melhorias no preenchimento com EPS de blocos de concreto. Pedra [2011] observou otimização no desempenho de blocos cerâmicos e de concreto e paredes construídas com estas duas tipologias de blocos preenchidas com EPS, seus estudos foram feitos com termografia. Pavlík *et al*, [2013] observou 30% de diminuição da condutividade térmica de blocos preenchidos com EPS. Sutcua [2014] realizou um estudo analisando a influência da condutividade térmica do material e da emissividade em diferentes geometrias na resistência térmica de blocos cerâmicos, neste estudo foram incluídos os fenômenos de radiação e convecção dentro dos vazados dos blocos. Segundo o estudo, a resistência térmica é uma função não-linear que depende da geometria dos vazados, das propriedades do material e da distribuição da temperatura. Em todos os casos analisados, a transmitância térmica foi reduzida minimizando a condutividade térmica do material e diminuindo a emissividade da radiação superficial dos vazados que faz com que aumente a intensidade dos fenômenos de radiação.

O coeficiente h_r (coeficiente de trocas térmicas por radiação) é um coeficiente simplificado que resume todos os fatores que interferem nas trocas por radiação, tais como: temperatura das superfícies, aspectos geométricos e físicos e principalmente

a emissividade térmica da superfície. Segundo a NBR 15220, a cerâmica do bloco com emissividade de aproximadamente 0,85 a 0,95 é considerada de emissividade alta. Este fator pode ter colaborado para o aumento do efeito de radiação durante o ensaio.

Segundo a NBR 15220, os valores de resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas utilizados no cálculo proposto pela norma para caracterização de sistemas construtivos com camadas de ar são dados para temperatura média da camada entre 0 °C e 20 °C e com uma diferença de temperatura entre as superfícies limitantes menor que 15 °C. Como na situação de ensaio as temperaturas já iniciaram maiores que 20 e em grande parte do tempo a diferença de temperatura das superfícies aquecida e oposta era maior que 15 °C, as câmaras de ar não foram muito eficientes.

A Figura 35 apresenta a relação de aumento de temperatura de todas as tipologias avaliadas, sendo o bloco vazio padrão convencional, os blocos preenchidos com compósitos de matriz cimentícia com agregados leves, preenchido com graute e os prismas de compósitos de todos os materiais de preenchimento. Observa-se primeiramente que em todas as situações o preenchimento dos vazados trouxe melhoria de desempenho, inclusive no preenchimento com graute estrutural que é um material com grande condutividade térmica (o que pode ser comprovado na amostra de seu prisma isolado).

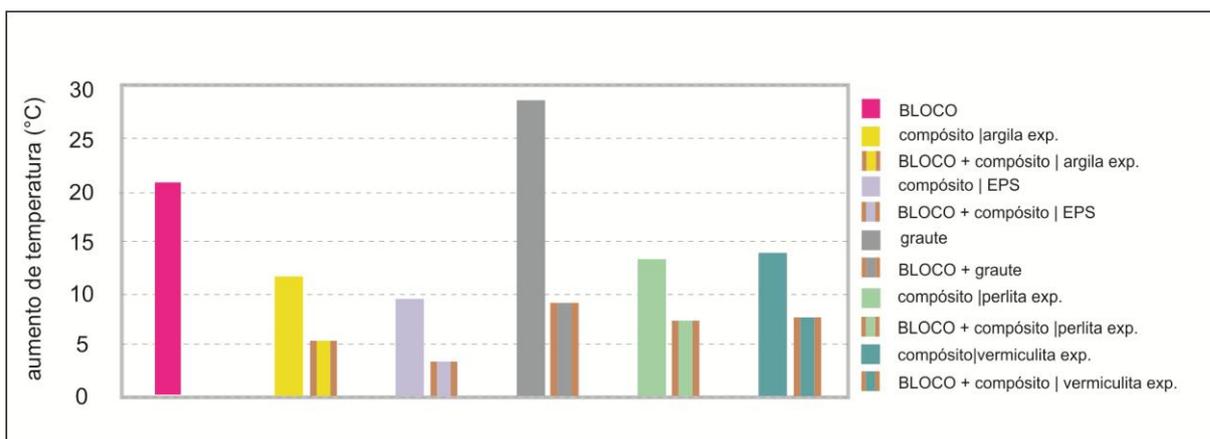


Figura 35. Aumento de temperatura depois de 300 min no bloco vazio, blocos preenchidos e compósitos com diferentes materiais.

As amostras de compósitos em formato de prisma confirmam o desempenho observado nos blocos (Figura 35), com o melhor desempenho para o compósito com

agregado EPS, seguido pelo compósito de argila expandida, e pelos compósitos de perlita expandida e vermiculita expandida. O pior desempenho para tipologias preenchidas foi para a amostra preenchida com graute, porém com um desempenho bastante superior ao do bloco vazio.

5.4 Efeito do aumento do teor de EPS nas propriedades

Após os ensaios iniciais indicarem o melhor desempenho térmico para as amostras de compósito com o agregado EPS, foram feitas novas amostras com teores de 85% e 90% de EPS (nas primeiras amostras o teor era de 80% para todos os agregados leves). A Tabela 11 apresenta a composição das amostras. Nas amostras com menores teores de cimento aumentou-se a quantidade de água e de aditivo para viabilizar uma massa homogênea e autoadensável devido à grande quantidade do agregado EPS. Foram testadas algumas composições e devido ao alto teor de EPS e sua baixa densidade, mantendo-se o teor de água e aditivo incorporador de ar o agregado EPS segregava sempre tendendo a flutuar.

Tabela 11. Composição das amostras com diferentes teores de EPS

	agregado	cimento	relação água/cimento	aditivo incorporador de ar
EPS (80%)	80%	20%	1,4	0,25% sobre a massa do cimento
EPS (85%)	85%	15%	1,5	0,37% sobre a massa do cimento
EPS (90%)	90%	10%	1,6	0,50% sobre a massa do cimento

Nas amostras com diferentes teores de EPS, foi aferida a massa específica através da pesagem dos corpos de prova cilíndricos e a absorção através de corpos de prova prismáticos. Os valores de massa específica e absorção de água para os três teores, juntamente com os respectivos desvios padrão e coeficientes de variação estão expressos na Tabela 12.

Observa-se na Tabela 12 uma diminuição significativa na massa específica do compósito, fator este favorável para o uso como isolante térmico sem aumento muito significativo da massa final dos blocos cerâmicos.

Tabela 12. Massa específica e absorção de água dos compósitos com diferentes teores de EPS

AMOSTRAS	compósito com EPS (80%)	compósito com EPS (85%)	compósito com EPS (90%)
MASSA ESPECÍFICA	0,35	0,26	0,22
DESVIO PADRÃO	0,0015	0,0050	0,0050
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	0,44	1,92	2,27
ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)	35,99	51,59	56,27
DESVIO PADRÃO	0,0781	0,5976	1,1544
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	0,22	1,16	2,05

Quanto a absorção de água [Tabela 12], aumentou consideravelmente com o aumento do teor de EPS, teve um acréscimo maior principalmente da amostra EPS (80%) com absorção de 35,99% para a amostra EPS (85%) com absorção de 51,58%, possivelmente pela quantidade de poros gerados. Assim como na massa específica a diferença entre o compósito EPS (85%), [0,26g/cm³], e EPS (90%), [0,22 g/cm³] não foi tão expressiva, na absorção de água também o compósito EPS (90%) não teve um aumento tão grande, se comparado com o aumento de 80% para 85%.

As fotomicrografias do interior dos compósitos (cortados em serra com água), feitas no Microscópio Dino Lite Pro com aumento de 200 x, podem ser observadas na Figura 36.

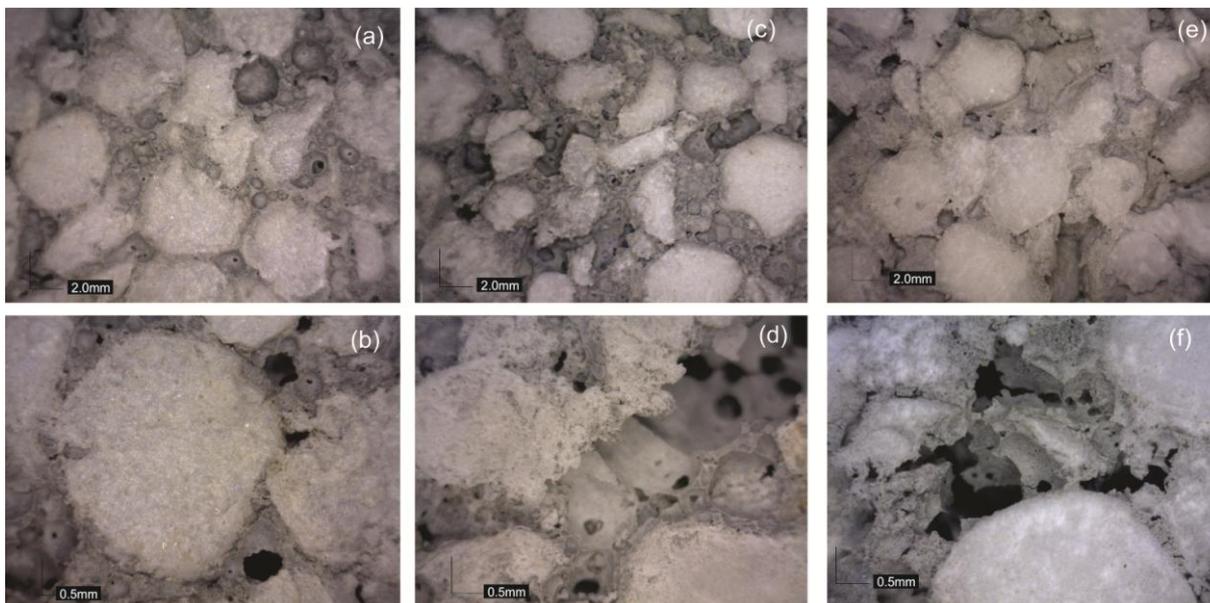


Figura 36. Fotomicrografias dos compósitos com diferentes teores de EPS – (a-b) – EPS (80%); (c-d) - EPS (85%); (e-f) – EPS (90%)

Através das fotomicrografias é possível observar o aumento do teor de EPS acompanhado pelo aumento do número de vazios justificados pela diminuição de matriz e pequeno aumento do teor de incorporador de ar e água.

As amostras de compósitos com os três diferentes teores de EPS foram ensaiadas em ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias, [Figura 37]. As Figuras 37 (a-c) apresentam as curvas tensão x deformação dos compósitos EPS (80%), EPS (85%) e EPS (90%), respectivamente e a Figura 37 (d) apresenta a resistência média para os diferentes teores.

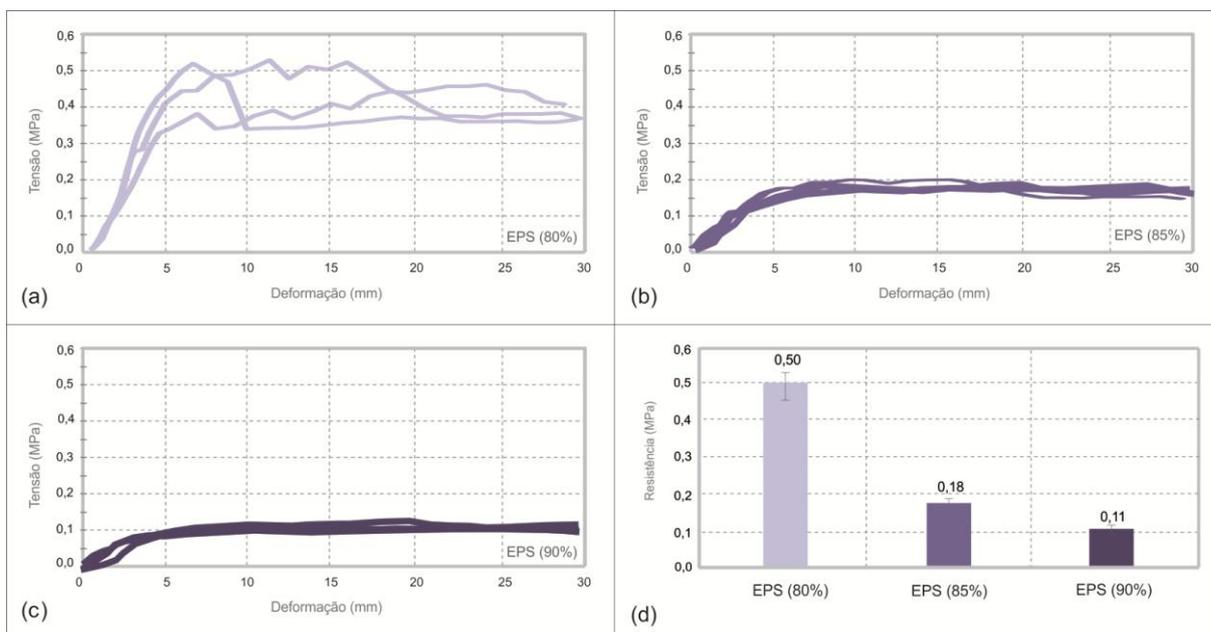


Figura 37. Resistência à compressão e deformação: (a) compósito com EPS (80%); (b) compósito com EPS (85%); (c) compósito com EPS (90%); (d) resistência média com diferentes teores de EPS

Assim como já observado em vários estudos [Shackow , 2014; Sayadi *et al*, 2016; Soares, 2010; Ozório, 2016] o aumento do teor de EPS reduziu consideravelmente a resistência dos compósitos.

O aumento do teor de EPS reduziu a resistência devido à resistência a compressão consideravelmente menor do agregado e menor força de ligação interfacial na zona de contato da matriz (como resultado da natureza hidrofóbica do agregado EPS). Além disso, o comportamento compressível do agregado EPS acelera o colapso da pasta na zona interfacial de matriz. No entanto, como o estudo

tem foco no desempenho térmico, a resistência não é um fator relevante, assim, o aumento do teor pode ser uma alternativa interessante.

Os compósitos com variação nos teores de EPS foram também analisados no ensaio térmico com termografia. As curvas de temperatura para as três amostras de compósitos estão na Figura 38 que apresenta além das temperaturas na face oposta a aquecida, a média de temperatura dos 10 pontos da aresta da face aquecida (curvas pontilhadas).

As amostras com os três teores apresentaram desempenho muito semelhante quando avaliadas termicamente. Após 300 min de aquecimento as temperaturas médias das faces opostas foram de 33,2 °C, 32,5 °C, 31,8 °C para os teores de 80%, 85% e 90% respectivamente [Figura 38].

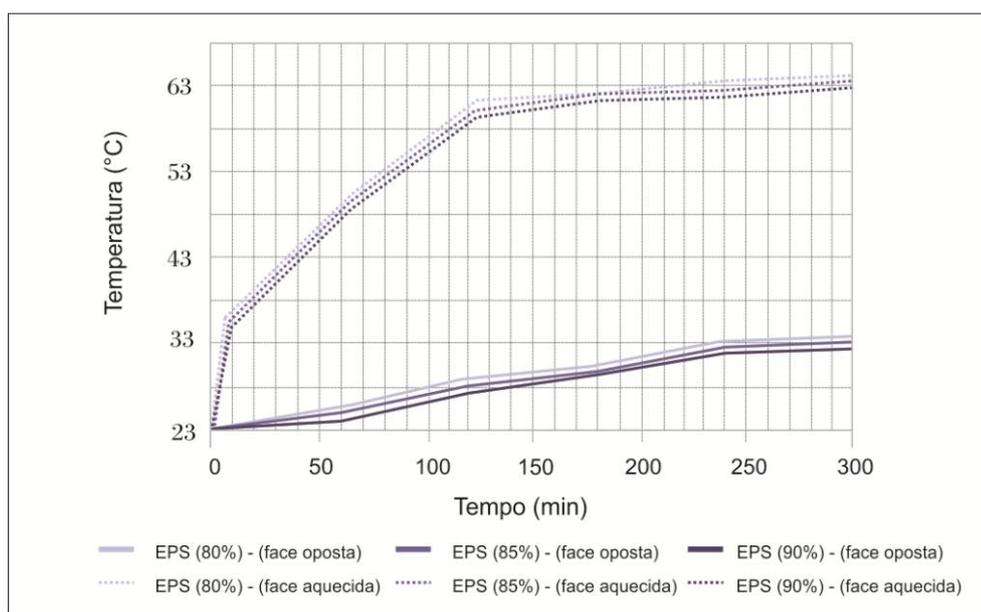


Figura 38. Curvas de temperatura durante os 300 min na face exposta ao calor e na face oposta para as três amostras de compósito com EPS

Observa-se uma melhoria com o aumento do teor de EPS [Figuras 38 e 39]. Na Figura 39 é possível observar que o aquecimento ocorre de forma bem semelhante para todas as amostras e que durante os 300 min menos de ¼ da amostra havia aquecido consideravelmente, mostrando a grande capacidade de isolamento do EPS. Na Figura 39 (a) observa-se as faces dos compósitos opostas ao aquecimento com suas respectivas temperaturas médias após os 300 min. Na Figura 39 (b) observa-se as faces laterais dos mesmos compósitos após os 300 min.

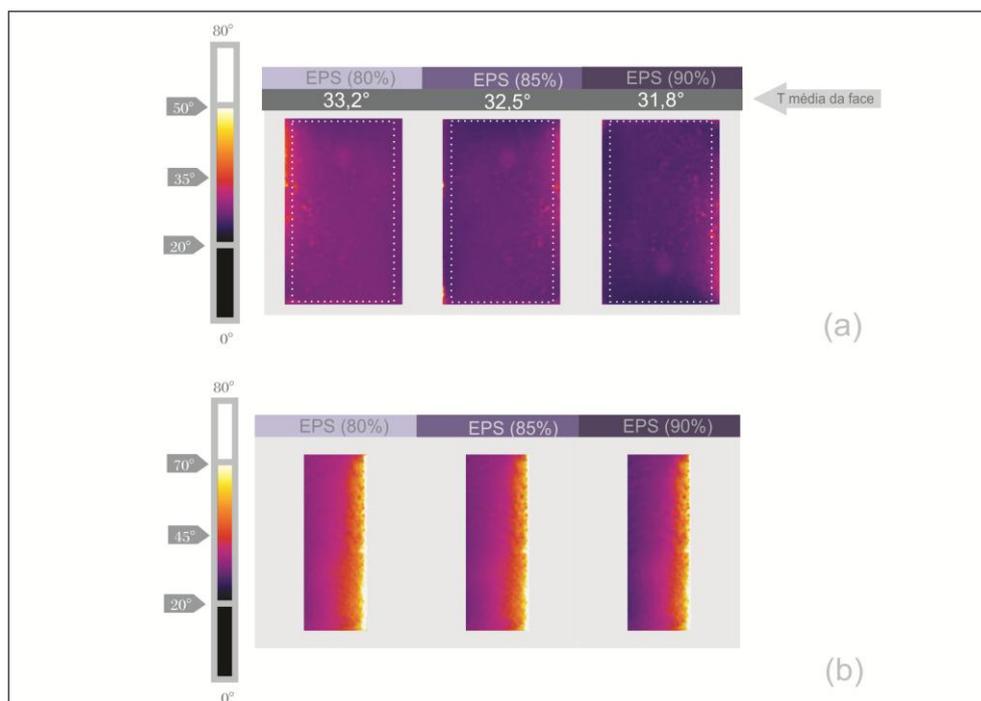


Figura 39. Imagens termográficas de amostras de compósitos com 80%, 85% e 90% de EPS aquecidas por 300 min: (a) face oposta ao aquecimento (b) face lateral.

Na Figura 36, observa-se o aumento da quantidade de vazios com o aumento do teor de EPS, esta quantidade de vazios acabou refletindo na massa específica dos compósitos que diminuiu [Tabela 13], na absorção de água que aumentou [Tabela 13], na resistência à compressão que diminuiu consideravelmente [Figura 37] e menos expressivamente no desempenho térmico [Figuras 39 e 41].

Tabela 13. Aumento da massa com a inclusão de compósitos com diferentes teores de EPS

AMOSTRAS	compósito EPS (80%)	compósito EPS (85%)	compósito EPS (90%)
Aumento da MASSA (g) / aumento percentual	1143/16,59%	935/13,56%	736/9,04%
ABSORÇÃO DE ÁGUA %	15,16	16,01	17,87

Os blocos preenchidos com compósitos com diferentes teores de EPS também foram testados termicamente. Os resultados de termografia apresentaram apenas uma pequena diferença de temperatura entre as amostras. A Figura 40 apresenta as curvas de temperatura observadas durante os 300 min de aquecimento.

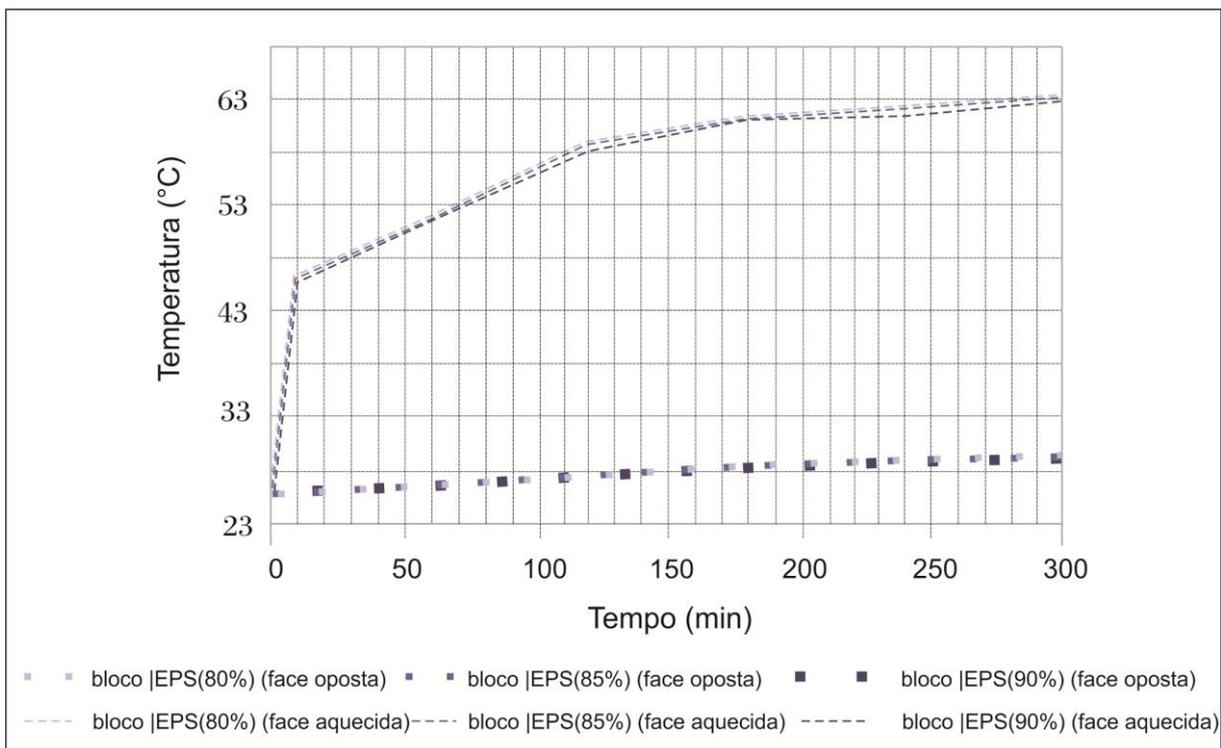


Figura 40. Curvas de temperatura durante os 300 min na face exposta ao aquecimento e na face oposta para as três amostras de blocos preenchidas com compósito com EPS

Após 300 min de aquecimento a média de temperatura na face oposta ao aquecimento era de 29,9 °C, 29,7°C e 29,5°C respectivamente para as amostras com 80%, 85% e 90% de agregado EPS [Figura 40]. Dentro dos vazados dos blocos, a diferença de desempenho dos compósitos com o aumento do teor de EPS foi muito pequena sendo menos significativa que quando analisado o compósito isoladamente.

Observa-se claramente na Figura 41 (a) o efeito do EPS, sendo que na face não aquecida os locais referentes ao vazado preenchido encontram-se em temperatura bem inferior com coloração bem mais escura. Nas imagens da face lateral [Figura 41 (b)] observa-se que a transmissão de calor na argila (bloco) ocorre com maior velocidade do que no preenchimento que apresenta cor bem mais escura representando a menor temperatura.

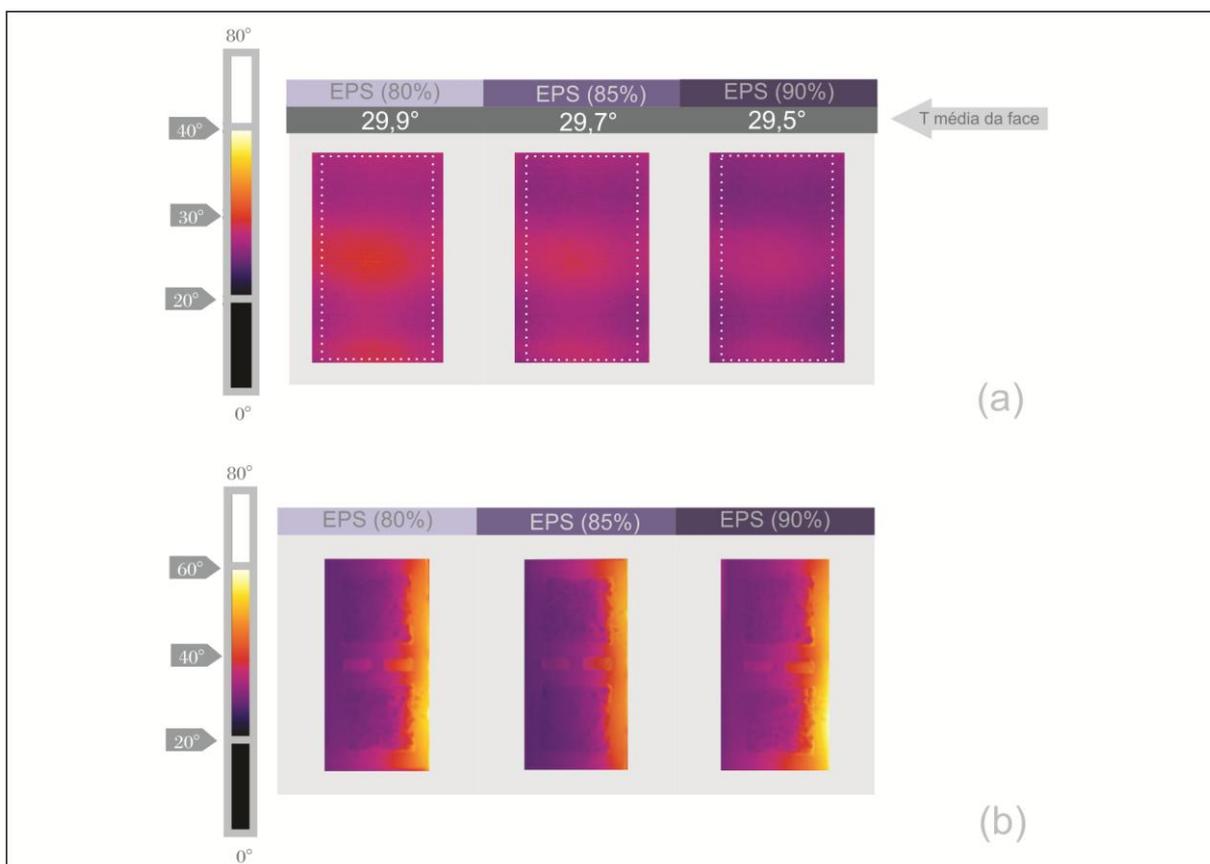


Figura 41. Imagens termográficas dos blocos preenchidos com compósitos (80%, 85% e 90%) de EPS aquecidas por 300 min: (a) face oposta ao aquecimento (b) face lateral.

Considerando o foco principal do estudo, o compósito com 90% de agregado EPS foi o que teve melhor desempenho no isolamento térmico. Também foi o de menor massa, importante característica para não elevar a carga da estrutura, principalmente quando o bloco for utilizado em sistemas de vedação. A absorção de água quando o compósito é inserido dentro do bloco ficou dentro da norma. Apesar da baixa resistência à compressão, dentro do bloco o compósito permanece íntegro não se decompondo, característica fundamental para que seja possível fabricar os blocos com os vazados preenchidos.

6 CONCLUSÕES

- A trabalhabilidade das misturas contendo agregados com alta absorção foi melhorada com a pré molhagem dos agregados antes da realização da mistura das massas dos compósitos.
- A massa específica dos compósitos apresentou uma grande variação conforme a densidade dos agregados utilizados.
- Os compósitos com agregados leves com alta absorção de água (perlita e vermiculita) tiveram uma absorção de água também alta (61,20% e 63,86% respectivamente). O compósito com EPS, um agregado que possui absorção baixa, também levou a uma alta absorção de água (35,99%) devido à formação de poros no compósito. O compósito com argila expandida britada teve uma absorção menor (18,43%), visto que a britagem gerou diferentes granulometrias o que fez com que diminuísse a porosidade do compósito. O graute teve baixíssima absorção (2,71%), característica prevista devido a sua composição e função estrutural.
- Quanto à resistência à compressão, observou-se que o graute estrutural, assim como esperado, devido a sua função estrutural, tem a maior resistência à compressão, 22,52 MPa. Entre os compósitos com agregados leves o maior desempenho é para argila expandida (2,6 MPa), que também apresenta a maior massa específica, (0,84 g/cm³) e a menor resistência é a do compósito com agregado EPS (0,53 MPa), que também possui a menor massa específica (0,35 g/cm³). Os compósitos com perlita e vermiculita tiveram massas específicas e resistências intermediárias entre os compósitos com agregados leves, 0,57 g/cm³ e 0,55 g/cm³ e 0,85 MPa e 1,22 MPa respectivamente.
- Quanto ao aumento de massa dos blocos preenchidos, o maior aumento ocorreu para o preenchimento com graute (7460 g), porém como é utilizado com função estrutural este aumento não é um problema. Para os compósitos com agregado leve, o menor aumento de massa foi para o bloco preenchido com

compósito com EPS (1143 g), seguido pela perlita (1622 g), vermiculita (1875 g) e com maior aumento a argila expandida (3267 g).

- Quanto ao desempenho térmico, observou-se que dentre as tipologias de bloco, em todas as situações o preenchimento dos vazados trouxe melhoria de desempenho, inclusive no preenchimento com graute estrutural que é um material com grande condutividade térmica. As amostras de compósitos em formato de prisma confirmaram o desempenho observado nos blocos, com o melhor desempenho para o compósito com agregado EPS, seguido pelo compósito de argila expandida, de perlita expandida e vermiculita expandida. O pior desempenho para tipologias preenchidas foi para a amostra preenchida com graute, porém, ainda com um desempenho bem superior ao do bloco vazio.
- Acredita-se que a grande diferença de eficiência dos blocos preenchidos com relação ao bloco vazio se justifique pelos fenômenos de radiação e convecção que ocorrem dentro do vazado do bloco, principalmente com a alta emissividade que possui a cerâmica. Depois que o ar no interior do vazado aquece a transmissão de calor para a face oposta à aquecida é muito rápida.
- Com o aumento do teor de EPS observou-se um aumento da quantidade de vazios, que refletiu na diminuição da massa específica dos compósitos, no aumento da absorção de água, na diminuição significativa da resistência à compressão e menos expressivamente no desempenho térmico.
- Assim, considerando todos os aspectos analisados e o cumprimento às normas referentes a blocos cerâmicos, como o foco é o desempenho térmico, o compósito que obteve o melhor desempenho foi o compósito com EPS (90%) ainda com a vantagem de ter baixa densidade o que é um ponto positivo com relação a execução em obras com estrutura de concreto armado, situação na qual é importante não elevar muita a massa das paredes. Outro ponto positivo do EPS é que podem ser estudadas possibilidades da utilização de EPS reciclado, contribuindo ainda mais com a sustentabilidade.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como a pesquisa é baseada no estudo exploratório para o aprimoramento do desempenho térmico de blocos estruturais cerâmicos, ainda existem muitos aspectos que podem ser estudados. Destacam-se a seguir alguns assuntos que poderiam ser considerados na continuidade deste trabalho:

- Variação do teor de agente incorporador de ar nas misturas;
- Variação da granulometria dos agregados leves;
- Estudos de desempenho térmico de paredes em escala real com juntas de argamassa e com revestimentos;
- Estudo das mesmas tipologias fazendo a vedação das laterais com material isolante;
- Estudo do gasto de energia em uma edificação utilizando blocos com isolamento térmico com compósito de EPS.
- Estudo do uso de EPS reciclado na fabricação de compósito para preenchimento do vazado de blocos estruturais

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIDI S; NAIT-ALI B; JOLIFF Y; FAVOTTO C. **Impact of perlite, vermiculite and cement on the thermal conductivity of a plaster composite material: experimental and numerical approaches.**; 68:392–400. Compos B Eng, 2015.

AGUIAR, A. L. D. de. **Estudo das propriedades tecnológicas da argamassa de revestimento com incorporação da vermiculita expandida.** Monografia - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Engenharia Civil. Natal,RN, 2017.

A-HADHRAMI, L.M., AHMAD, A. **Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in Saudi Arabia.** Applied Thermal Engineering Journal, v.29, p.1123-1130, 2009.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1611 -Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete.** 2006

AQUINO, J. **Diagnóstico das dificuldades do uso de projeto para produção de vedações verticais.** São Paulo, 2005. 184p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52 -Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53 -Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10838 - Solo - Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego de balança hidrostática.** Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15.220: Desempenho térmico de edificações, parte 3.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15270-3 Componentes cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15.575: Edifícios habitacionais – Desempenho.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15812-1: Alvenaria estrutural: blocos cerâmicos: parte 1: projetos.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro, 2015.

BABU, K. G.; BABU, D. S. **Behavior of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume.** Cement and concrete research, v.33, p.755-762, 2003.

BARREIRA, E.; FREITAS, V. P. **Evaluation of Building Materials Using Infrared Thermography.** Construction and Building Materials, v. 21, n. 1, p. 218-224, 2007.

BAUER, E. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: Ibracon, 2005. v. 2.

BERGE, B. **The Ecology of Building Materials.** Architectural Press, p. 474, 2001.

BITTNER, P. U. **La seguridad contra incendios: cielorrasos suspendidos con alma de poliestireno expandido.** Jornada Santa Fé, Argentina, 2012.

BRAGA, J. M. **Avaliação de desempenho de concretos leves com vermiculita, com ênfase na resistência à compressão, densidade e conforto térmico.** 2015. 29 f. Artigo (Engenharia Civil), Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2015.

BRAGER, G. S. e R. J. DE DEAR. **Thermal a daptation in the built environment: a literature review.** Energy and buildings, v.27, p.83-96, 1998.

CALLISTER, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada.** 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CAMACHO, J. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural.** Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira – SP, 2006.

CHANDRA S.; BERNTSSO L.; **Lightweight Aggregate Concrete.** Noyes Publications/William Andrew Publishing, p. 367, 2002.

CIULLO, P.A. **Industrial Minerals and Their Uses.** Noyes Publications, p. 580, 1996.

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

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

COUTINHO, A. S. **Conforto e insalubridade térmicas em ambientes de trabalho.** 2. ed. João Pessoa: Ed Universitária, 2005.

CORTIZO, E. C.; BARBOSA, M. P.; SOUZA, L. A. C. **Estado da Arte da Termografia.** In: Fórum Patrimônio – Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável. Belo Horizonte, v.2, n.2, maio/ago., 2008.

DEAN, R.K. **Stored Plastics test program.** Factory Mutual Research Corp. Serial No. 20269. 1975.

DEMIRBOĞA R.; GÜL R. **The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete.** *Cement and Concrete Research*, 33, p. 723–727, 2003.

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

FERREIRA, T. M. D. **Sobre a Utilização do Sistema de Isolamento Térmico pelo Interior em Edifícios Residenciais em Portugal. Análise do Desempenho Higrotérmico.** Dissertação. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006

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

GIACOMIN, R. C. **Estudo das Propriedades do Concreto Com Argila Expandida.** Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

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

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

KREITH, F. **Princípios de transmissão de calor.** São Paulo: Blücher, 1977.

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

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PAPST, A. L. **Desempenho Térmico de Edificações.** Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Florianópolis, 2011.

LAUKAITIS, A.; ZURAUSKAS, R.; KERIEN, J. **The Effect of Foam Polystyrene Granules on Cement Composite Properties.** *Cement & Concrete Composites*, v. 27, p. 41-47, 2003.

LURA, P.; BENTZ, D.P.; LANGE, D.A.; KOVLER, K.; BENTUR, A. **Pumice aggregates for internal water curing,** in: *International RILEM Conference on the Advances in Concrete through Science and Engineering*, Evanston, IL, pp. 137–151, 2004.

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

MAYCÁ, J.; CREMONINI, R. A.; RECENA, F. A. **Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado graúdo para concretos leves estruturais (CLE).** Trabalho apresentado no Curso de Especialização em Construção Civil 2006/2008 - NORIE, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. 751p. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEHTA, P. K ; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - Estrutura, Propriedades e Materiais**, 1a. ed., Editora PINI, S. Paulo, Brasil , 573 p, 1994.

MOHAMAD, G; MACHADO, D.W.N; JANTSCH, A.C.A. **Alvenaria estrutural: construindo o conhecimento**. São Paulo: Blucher, 2017.

MOHAMAD, G.; SANTOS NETO, A.B.S.; PELISSER, F.; LOURENÇO, P.B.; ROMAN, H.R.; **Caracterização mecânica das argamassas de assentamento para alvenaria estrutural – previsão e modo de ruptura**. Revista Matéria, v. 14, n. 2, pp. 824 – 844, 2009.

MORAVIA, W. G. et al. **Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve**. Cerâmica, v. 52, p. 193-199, 2006.

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

OZÓRIO, B. P. M. **Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecânicas**. Tese de doutorado apresentada para a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

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

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e Dimensionamento de Alvenaria Estrutural**. São Carlos: EdUFSCar, 2012.

PAULA, R. F. **Vermiculita**. Departamento Nacional de Produção Mineral, v. 34. p. 122 a 124, 2014.

PAVLÍK, Z.; JERMAN, M.; TRNÍK, A.; KOCÍ V. **Effective thermal conductivity of hollow bricks with cavities filled by air and expanded polystyrene**. Journal of Building Physics. p. 1-13, 2013.

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

PIRES, J. R. **Investigação da viabilidade da redução do consumo de energia elétrica em edificações residenciais através da aplicação de soluções de conforto ambiental passivo**. 2013. 228 f. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2013.

POLETTO M.; DETTENBORN J.; ZATTERA J. ZENI M. **Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos de poliestireno expandido pós consumo e serragem de Pinus elliottii**. Revista Iberoamericana de Polímeros. Volume 11(3), Maio, 2010.

REIS, E. **Levantamento da situação e das carências tecnológicas dos minerais industriais brasileiros com enfoque na mineração de: argila para cerâmica, barita, bentonita, caulim para carga, talco/agalmatolito e vermiculita**. Ministério de ciência e tecnologia, 2001.

ROJAS, J.; BARRIOS, G.; HUELSZ, G; TOVAR, R.; JALIFE-LOZANO S. **Thermal performance of two envelope systems: Measurements in non air-conditioned outdoor test cells and simulations.** Journal of Building Physics, 2015.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. **Concreto estrutural leve.** In: ISAIA, G.C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações.. Cap.43, v.2, p.1333-1362. São Paulo: IBRACON, 2005.

SACHT, H.M; ROSSIGNOLO, J.A.; SANTOS, W.N. **Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida.** Revista Matéria vol.15 no.1 2010.

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

SALES, R. B. C.; SALES, F.A.; TAVARES, S.G.; ANDRADE, R. M. de; AGUILLAR, M. T. P. **Thermal analysis of structural masonry in concrete block containing expanded polystyrene (EPS) using digital infrared thermal image.** 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Québec (Canada), 2010.

SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. (editors), **Passive Cooling of Building.** Published by James & James (Science Publishers) Ltd, Cap. 8: Heat attenuation. UK, 1996.

SANTOS, C. P. F.; MELO, D. M. A.; MELO, M. A. F.; SOBRINHO, E. V. **Caracterização e usos de argilas bentonitas e vermiculitas para adsorção de cobre (ii) em solução.** *Cerâmica*, v48, p178-182, 2002.

SANTOS, J. C. P. dos; KOTHE, K. K.; MOHAMAD, G.; VAGHETTI M. A. O.; RIZZATTI, E. **Thermal behavior of masonry building fence to brazilian climate zone 2.** Revista Matéria, 1517-7076 artigo 11671, pp.1030-1047, 2015.

SAYADI A.A.; TAPIA J.V.; NEITZERT T.R.; CLIFTON G. C. **Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete.** Construction and Building Materials, 112, p. 716–724, 2016.

SCHACKOW, A; EFFTING, C; FOLGUERAS, M.V.; GUTHS, S; MENDES, G.A. **Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent.** 190–197. Construction and Building Materials 57, 2014.

SENGUL O.; AZIZI S.; KARAOSMANOGLU F.; TASDEMIR M.A. **Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete.** *Energy and Buildings*, 43, p. 671–676, 2011.

SILVA, R. C. da; GONÇALVES, M. de O.; ALVARENGA, R. de C. S. S. **Tecnologia: Alvenaria Racionalizada.** Revista Técnica. p 27-34. Edição 112, 2006.

SOARES, R. N. B., **Resíduo de construção e demolição e EPS reciclado como alternativa para a região amazônica.** Dissertação, UTFPR, Curitiba, 2010.

SOUZA, L. M.; SANTOS, R.D.; MELO, A.V.; MENDES, J.U.L.; NASCIMENTO, C.M. – **Compósito a base de gesso e EPS para fabricação de casas populares - 17º CBECIMat** - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, , Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2006.

SUTCUA, M.; DÍAZB, J. J. del C.; RABANALB, F. P. Á.; GENCELCO, O.; AKKURTD S. **Thermal performance optimization of hollow clay bricks made up of paper waste.** Energy and Buildings Volume 75, Pages 96-108, June 2014.

TEWARSON, A., **Heat release rates from samples of polymethylmethacrylate and polystyrene burning in normal air,** Fire and Mat.:90-96, 1976.

URHAN, S. **Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete.** Part 2: observations on expanded perlite aggregate concretes, Cement and Concrete Research 17, p 465–477, 1987.

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

WASSERMAN, R.; BENTUR, A. **Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength.** Cement & Concrete Composites 18, 67-76, 1996.

WEBER, S.; REINHARDT, H. W. **Microstructural evaluation of expanded clay to be used as lightweight aggregate in structural concrete.** Advanced Cement Based Materials 6 59-68, 1997.

YANNAS, S.; MALDONADO, E. **Pascool Handbook - Designing for summer comfort.** Architectural Association Graduate School, Londres. Cap. 4: Thermal Inertia , 1995.

YU, L.H.; OU, H.; LEE, L.L. **Investigation on pozzolanic effect of perlite powder in concrete.** Cement and Concrete Research 33, 73–76, 2003.

ANEXO A

- Caracterização da transmitância e da capacidade térmica dos blocos estudados

Para a caracterização térmica dos blocos cerâmicos padrão (vazios), foram feitos cálculos pela Universidade de Caxias do Sul/RS, de transmitância térmica e capacidade térmica de sistemas de vedações verticais (paredes) utilizando o bloco estudado, com diferentes revestimentos, segundo ABNT NBR 15575-1: Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais e ABNT NBR 15.220-2: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Foi calculada a transmitância e a capacidade térmica para sistemas de vedações verticais com o bloco cerâmico de 10 MPa com largura de 14 cm, nas seguintes situações:

Para os cálculos foram utilizadas as propriedades apresentadas na Tabela 5. Os valores de condutividade térmica e calor específico foram obtidos na NBR 15220-2. Os valores de densidade de argamassa comum e de gesso foram utilizados os padrões sugeridos pela norma e a densidade da argila foi determinada conforme ensaio de densidade realizado pela UFSCAR/SP.

Tabela A.1. Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) dos materiais utilizados para cálculo de sistema de alvenarias com o bloco estudado

Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/(m.K))	c (kJ/(kg.K))
argamassa comum	1800-2100	1,15	1,00
argamassa de gesso (ou cal e gesso)	1200	0,70	0,84
cerâmica	1800*	1	0,92

*conforme relatório de ensaio de densidade da cerâmica emitido pelo laboratório de sistemas estruturais da UFSCAR/SP em janeiro de 2015.

Os valores de transmitância térmica e capacidade térmica dos sistemas de paredes calculados são apresentados na Tabela A.2.

Tabela A.2 Transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) de sistemas compostos com blocos estruturais cerâmicos de 10 MPa

COMPOSIÇÃO DO SISTEMA DE VEDAÇÃO	U [W/(m ² K)]	CT [kJ/(m ² K)]
Junta de 1cm de argamassa e sem revestimento.	2,5	97
Junta de 1cm de argamassa e revestimento de 2,5cm (5mm de chapisco + 2cm reboco) em uma das faces.	2,4	146
Junta de 1cm de argamassa e revestimento de 2,5cm (5mm de chapisco + 2cm reboco) em uma das faces e 1cm na outra face.	2,3	165
Junta de 1cm de argamassa e revestimento de 2,5cm (5mm de chapisco + 2cm reboco) em uma das faces e 2cm na outra face.	2,3	184
Junta de 1cm de argamassa, revestimento externo de 2,5cm (5mm de chapisco + 2cm de reboco) e revestimento interno de argamassa de gesso 1cm	2,2	156

Os valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) das paredes externas no Brasil estão apresentados nas Tabelas 1 e 2 do item 3.3 (Requisitos e critérios de desempenho térmico segundo a NBR 15575), deste trabalho.