

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EMPREGO DE EPS RECICLADO EM BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO PARA
OTIMIZAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES

PAULO JOSÉ SIMÃO GONÇALVES

MANAUS
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PAULO JOSÉ SIMÃO GONÇALVES

EMPREGO DE EPS RECICLADO EM BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO PARA
OTIMIZAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes de Construção.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos

MANAUS
2018

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

G635e Gonçalves, Paulo José Simão
Emprego de EPS reciclado em blocos vazados de concreto para
otimização do conforto térmico das edificações / Paulo José Simão
Goncalves. 2018
147 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Raimundo Pereira de Vasconcelos
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
Federal do Amazonas.

1. Concreto leve. 2. Materiais alternativos. 3. Termografia. 4.
Alvenaria. I. Vasconcelos, Raimundo Pereira de II. Universidade
Federal do Amazonas III. Título

PAULO JOSÉ SIMÃO GONÇALVES

EMPREGO DE EPS RECICLADO EM BLOCOS VAZADOS DE CONCRETO PARA
OTIMIZAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes de Construção.

Aprovado em 06 de fevereiro de 2018.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos, Presidente
Universidade Federal do Amazonas



Prof.^a Dr.^a Valdete Santos de Araújo, Membro
Universidade do Estado do Amazonas



Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho, Membro
Universidade Federal do Amazonas

Dedico esta dissertação a Deus pelas experiências proporcionadas e graças alcançadas ao longo de minha vida.

E aos meus pais, Ana e Pedro, pela dedicação e ensinamentos repassados, que foram e são fundamentais para a minha formação pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos, por aceitar o convite de ser o orientador deste projeto e contribuir diretamente no planejamento experimental e no sucesso alcançado.

À coordenadora da pós-graduação, prof^a. Dr^a. Virgínia Mansaneres Giacon, pela acolhida e, assim como outros docentes que tive contato, pelos ensinamentos compartilhados.

Aos funcionários da secretária do programa, Beatriz Mar, Diego Oliveira e Ivandson Kallen, pela atenção e dedicação prestadas.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas, pelo suporte econômico fornecido para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, pela cessão de publicações científicas de seu acervo, importantes para a fundamentação teórica do trabalho.

Às empresas Polimix Concreto Ltda., Usemix Concreto e Fundações Ltda., à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais do Amazonas e a Coordenação do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Amazonas, pela cessão de seus equipamentos para a execução de alguns ensaios adotados no programa experimental.

Aos técnicos de laboratório Rosinaldo e Viviane, Luiz, Jorge, Nilson, Reinaldo e José, pelo auxílio prestado na execução dos ensaios realizados na Universidade Federal do Amazonas.

Aos meus colegas de mestrado Adma Darwich, Daiana Cavalcante, Frank Brasil, Lucinaldo Souza e Wallace Belchior e aos senhores Gilberto Araújo e Armando Andrade que também me auxiliaram na pesquisa.

*“Assim implorei e a inteligência me foi dada;
suplicuei e o espírito de sabedoria veio a mim.
Eu a preferi aos cetros e tronos,
e avaliei a riqueza como um nada ao lado da sabedoria” – Sab. 7, 7-8.*

RESUMO

A preservação dos recursos naturais e a implantação do fator sustentável na concepção de projetos são duas das principais preocupações observadas atualmente por pesquisadores e engenheiros em todo mundo. A pesquisa desenvolvida buscou viabilizar uma nova elaboração de concretos que incorporassem estas diretrizes ao inserir o poliestireno expandido, oriundo da reciclagem mecânica, em substituição parcial ao agregado graúdo tradicional empregado no estado do Amazonas. Inicialmente, realizou-se a caracterização físico-química dos componentes envolvidos com o intuito de verificar o emprego destes na produção de blocos vazados. Após esta fase, obteve-se a dosagem experimental por meio da associação do Modelo de Empacotamento Compressível com a metodologia adaptada de Tango para os quatro tipos de concretos produzidos (com teores de substituição volumétrica de 0, 5, 10 e 15% do agregado graúdo por EPS reciclado), definindo um fator a/c igual a 0,5 para todos eles. Os ensaios executados para verificação das propriedades físicas e mecânicas seguiram as diretrizes da NBR 12118:2013, e resultaram em duas classificações quanto à resistência à compressão encontrada: os blocos referenciais (0%) e com 5% de substituição da brita pelo EPS reciclado (definido como o limite para empregar esta troca segundo a NBR 6136:2014) poderiam ser direcionados para fins estruturais, enquanto que os com 10 e 15% de substituição não atenderam a resistência mínima de aceitação. A respeito da análise térmica, verificou-se que os blocos atenderam parcialmente a NBR 15575-4:2013, necessitando de adequações para garantir o nível de desempenho mínimo exigido por esta norma. Os confortos térmicos proporcionado pelos blocos referenciais e com 15% de EPS apresentaram resultados semelhantes em função da transmitância térmica que, juntamente com as distintas temperaturas radiantes, equipararam os fluxos médios de calor em ambos exemplares. Contudo, no horário de pico da temperatura ambiente, verificou-se o maior atraso e inércia térmica na alvenaria com EPS reciclado, reduzindo da transmissão de calor entre as faces das paredes.

Palavras-chave: Concreto leve. Materiais alternativos. Termografia. Alvenaria.

ABSTRACT

The natural resources preservation and implementation of sustainable factor in projects are two of main concerns observed currently by researchers and engineers resident around world. The developed research seeked to make feasible new concretes that incorporate these guidelines inserting expanded polystyrene, from mechanical recycling, in partial replacement of traditional coarse aggregate used in Amazonas. Firstly was carried out a physicochemical characterization in involved components to verify their uses on production of hollow concrete blocks. After that, the experimental dosage was obtained in association of Compressible Packaging Model with Tango's adapted methodology for four concretes produced (with content ratios of 0, 5, 10 and 15% as partial volumetric replacement of coarse aggregate by recycled EPS) and w/c ratio of 0,5 was found for all concretes. The tests performed procedures to check physical and mechanical properties followed the NBR 12118:2013, and resulted in two classifications in terms of compressive strenght: referencial (0%) and 5% gravel's parcial replacement by recycled EPS (defined as limit for employing this exchange according to NBR 6136:2014) attested their uses for structural applications, while 10 and 15% EPS' partial replacement couldn't be used because their compressive strenght were lower than minimum acceptance strenght. Regarding thermal analysis, it was verified that all blocks partially attented NBR 15575-4:2013, necessitating adjustments to ensure the minimum perfomance level required for that standard. The thermal comfort provided by referencial blocks and blocks with 15% of recycled EPS presented similar results as a function of thermal transmittance and different radiant temperatures, became similar average heat flows in both specimens. However, at times when environment peak temperature were recorded, it was verified greater delay and thermal inertia in the masonry with recycled EPS, reducing heat transmittion through the walls.

Keywords: Lightweight concrete. Alternative materials. Thermography. Masonry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Pérolas de EPS	29
Figura 2.2 – Etapas de produção do EPS	30
Figura 2.3 – Etapas de reciclagem mecânica parcial	33
Figura 2.4 – Embalagem descartável de EPS	35
Figura 2.5 – Edificações compostas por agregados leves	37
Figura 2.6 – Aplicações de concreto leve em regularização de pisos (a) e placas isolantes (b) ...	41
Figura 2.7 – Concreto com distribuição aleatória das pérolas de EPS	44
Figura 2.8 – Laje maciça e pré-moldada com pérolas de EPS	48
Figura 2.9 – Ensaio de maior massa unitária para a mistura dos agregados	52
Figura 2.10 – Bloco de concreto maciço com EPS.....	54
Figura 2.11 – Troca de calor por condução em uma parede	58
Figura 2.12 – Troca de calor por convecção	59
Figura 2.13 – Troca de calor por radiação térmica	60
Figura 2.14 – Mecanismo de troca de calor em uma parede opaca	61
Figura 2.15 – Captação de radiação infravermelha por câmera termográfica.....	63
Figura 3.1 – Fluxograma do programa experimental.....	65
Figura 3.2 – Amostras de EPS reciclado.....	66
Figura 3.3 – Espectômetro usado para ensaio de fluorescência	68
Figura 3.4 – Prensa (a) e máquina universal (b) usados para ensaio de resistência do cimento ...	69
Figura 3.5 – Frasco de Le Chatelier.....	70
Figura 3.6 – Equipamento utilizado para granulometria do cimento	71
Figura 3.7 – Estados de umidade do cimento.....	72
Figura 3.8 – Misturador e pissete usado para demanda de água	73
Figura 3.9 – Conjunto de peneiras para granulometria dos agregados	75
Figura 3.10 – Cilindro metálico usado para massa unitária	76
Figura 3.11 – Aspecto do EPS reciclado a uma temperatura acima de 200 °C.....	77
Figura 3.12 – Equipamentos para compactação real	79

Figura 3.13 – Efeito de parede sobre os grãos.....	82
Figura 3.14 – Comportamento da função $f(\beta)$ para uma mistura binária.....	83
Figura 3.15 – Ponto de pelota de mão para umidade ideal dos blocos	85
Figura 3.16 – Vista frontal da vibroprensa (a) e etapas de produção dos blocos (b a f).....	87
Figura 3.17 – Cura ao ar dos blocos em ambiente fechado.....	88
Figura 3.18 – Capeamento em cima de placas de vidro (a) e aspecto superficial dos blocos (b) .	89
Figura 3.19 – Prensa hidráulica para rompimento por compressão axial	89
Figura 3.20 – Medição da massa seca do bloco após 24 h na estufa	90
Figura 3.21 – Montagem do experimento: base de concreto (a); paredes de alvenaria (b); parte superior composta pelo conjunto compensado, EPS e telhas de fibrocimento (c); caixa térmica.....	91
Figura 3.22 – Leitores das variações térmicas das caixas térmicas (a): câmara termográfica para as leituras externas (b e d) e termômetro digital para a temperatura interna (c)	92
Figura 4.1 – Corpos de prova rompidos aos 28 dias de idade com falhas no capeamento	94
Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos	98
Figura 4.3 – Curva granulométrica do agregado miúdo	98
Figura 4.4 – Curva granulométrica do aglomerante hidráulico.....	99
Figura 4.5 – Abatimentos de tronco de cone para os quatro tipos de blocos	101
Figura 4.6 – Fissuração típica dos blocos submetidos às cargas compressivas	104
Figura 4.7 – Termogramas das faces da parede sombreada dos blocos BREF (a) e da correspondente para os blocos B15 (b) sob total ação do sol.....	111
Figura 4.8 – Termogramas das paredes, sob mesmo direcionamento, dos blocos B15 (a) e BREF (b) com sombreamento da cobertura.....	112
Figura 4.9 – Gráfico das variações entre os ambientes da caixa e o horário de medição.....	114
Figura Ap.1- Comparação das soluções para ensaio de impurezas orgânicas na areia	131
Figura Ap.2 – Descrição dos locais aferidos nos blocos.....	134
Figura Ap.3 – Fissurações nos corpos de prova cilíndricos	135
Figura Ap.4 – Vistas frontal (a) e de corte (b) dos blocos para análise térmica	136
Figura An.1 - Zoneamento bioclimático brasileiro.....	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação das densidades dos blocos de concreto.....	51
Tabela 2.2 – Relação entre os traços das misturas secas e as resistências estimadas	52
Tabela 2.3 – Condutividade térmica dos materiais de construção.....	58
Tabela 3.1 – Dosagem experimental dos blocos de concreto moldados, com valores em kg/m^3 ..	84
Tabela 3.2 – Dosagem corrigida dos quatro tipos de blocos de concreto, com valores em kg/m^3 ..	85
Tabela 4.1 – Descrição e quantificação estimada dos óxidos cimentícios.....	93
Tabela 4.2 – Índice de finura, tempo de pega e resistência específica do cimento	93
Tabela 4.3- Índices de forma e de vazios, massas unitárias, teores de umidade e de materiais deletérios dos agregados.....	95
Tabela 4.4 – Massas específicas, teores de absorção e compacidades médias	97
Tabela 4.5 – Distribuições granulométricas dos agregados graúdos e miúdo.....	98
Tabela 4.6 – Resistência à compressão axial dos blocos	101
Tabela 4.7 – Resistência à compressão axial dos corpos de prova cilíndricos	103
Tabela 4.8 – Dimensões reais dos blocos-testemunho.....	104
Tabela 4.9 – Umidade relativa e absorção dos blocos	105
Tabela 4.10 – Massa específica seca dos blocos	107
Tabela 4.11 – Massa específica estimada para blocos com teores acima de 15%.	107
Tabela 4.12 – Propriedades térmicas dos blocos moldados	108
Tabela 4.13 – Propriedades térmicas estimadas para teores acima de 15%	108
Tabela 4.14 – Temperaturas médias horárias das caixas de alvenaria e do ambiente	109
Tabela Ap.1 – Resistência à compressão das amostras de cimento	131
Tabela Ap.2 – Distribuição granulométrica do cimento	132
Tabela Ap.3 – Proporção ideal dos materiais secos pelo MEC.....	133
Tabela Ap.4 – Dimensões reais dos blocos-testemunho	134
Tabela Ap.5 – Pesos, teor de absorção e umidade dos blocos vazados	135
Tabela Ap.6 – Variações térmicas horárias das paredes de alvenaria e do ambiente.....	139
Tabela An.1 – Exigência química do cimento CPI-S	141

Tabela An.2 – Exigências físicas e mecânicas do cimento comum.....	141
Tabela An.3 – Metodologias e características referentes as pérolas de EPS	141
Tabela An.4 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo	142
Tabela An.5 – Limites da composição granulométrica do agregado miúdo	142
Tabela An.6 – Limites de concentração de materiais deletérios para os agregados graúdos	142
Tabela An.7 – Limites de concentração de materiais deletérios para o agregado miúdo	143
Tabela An.8 – Compacidade experimental dos agregados por faixa granulométrica	144
Tabela An.9 – Compacidade experimental dos cimentos sem superplastificante	144
Tabela An.10 – Compacidades experimentais do cimento e das pozolanas	144
Tabela An.11 – Classificação dos blocos vazados pelas dimensões nominais	145
Tabela An.12 – Requisitos para resistência à compressão, absorção e retração	145
Tabela An.13 – Requisitos quanto as dimensões dos blocos-testemunho	145
Tabela An.14 – Limites para a transmitância térmica de paredes externas	146
Tabela An.15 – Limites para a capacidade térmica de paredes externas	146
Tabela An.16 – Resistência térmica superficial interna e externa.....	146
Tabela An.17– Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura	146
Tabela An.18– Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiações a temperaturas comuns (ondas longas).....	146
Tabela An.19– Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) do concreto	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AM	Amazonas
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standards
CEB-FIP	Comité Euro-International du Béton and Fédération Internationale de la Précontrainte
CFC	Clorofluorcarbono
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP	Cimento Portland
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CP'S	Corpos de Prova
CV	Coefficiente de Variação
DMC	Dimensão Máxima Característica
DP	Desvio Padrão
EN	Norma Europeia
EPS	Expanded Polystyrene
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Eq.	Equação
Ex.	Exemplo
FRX	Fluorescência de Raios X
FSC	Fator de Saturação de Cal
HCFC	Hidroclorofluorcarboneto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IF	Índice de Forma
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISO	International Organization for Standardization
LaMAC	Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos
LEM	Laboratório de Ensaios de Materiais
MEC	Modelo de Empacotamento Compressível
MF	Módulo de Finura
n ^o	Número
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
pH	Potencial Hidrogeniônico
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
SINDUSCON	Sindicato da Indústria da Construção Civil
SVVIE	Sistema de Vedações Verticais Internas e Externas
UEA	Universidade do Estado do Amazonas
UFAM	Universidade Federal do Amazonas

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	Óxido de alumínio
a	Coefficiente do efeito de afastamento dos grãos de classe distinta
BREF	Bloco de referência (sem a presença de EPS reciclado)
B5	Bloco com substituição parcial de 5% do pedrisco por EPS reciclado
B10	Bloco com substituição parcial de 10% do pedrisco por EPS reciclado
B15	Bloco com substituição parcial de 15% do pedrisco por EPS reciclado
b	Coefficiente do efeito de parede entre os grãos de classe distinta
C	Compacidade experimental
C_t	Capacidade térmica
CaO	Óxido de cálcio
C_5H_{12}	Pentano
cm	Centímetro(s)
cm^2	Centímetro(s) quadrado(s)
cm^3	Centímetro(s) cúbico(s)
D	Dimensão dos grãos do componente do concreto
d_{50}	Dimensão referente a 50% da composição granulométrica do material
d/D	Relação entre a menor e a maior dimensão de uma partícula
dm^3	Decímetro(s) cúbico(s)
Fe_2O_3	Óxido de ferro (III)
Fator a/c	Fator água/cimento
$f_{bk,est}$	Resistência característica à compressão axial dos blocos de concreto
$f_{bd,28}$	Resistência média à compressão dos blocos aos 28 dias
g	Gramas(s)
h	Hora(s)
Hz	Hertz
i	Classe qualquer dos materiais do concreto
J	Joule(s)
K	Kelvin
K_c	Índice de compactação para a mistura

kg	Quilograma(s)
kPa	Quilopascal(s)
K ₂ O	Óxido de potássio
l	Litro(s)
M	Número de componentes do concreto
MgO	Óxido de magnésio
MPa	Megapascal(s)
min.	Minuto(s)
ml	Mililitro(s)
m	Metro(s)
m ²	Metro(s) quadrado(s)
m ³	Metro(s) cúbico(s)
mm	Milímetro(s)
N	Newton(s)
n	Número de classes adotadas para granulometria dos componentes do concreto
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
psi	Libras por polegada quadrada
R	Resistência térmica do material
R _t	Resistência térmica da parede
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₃	Trióxido de enxofre
TiO ₂	Dióxido de titânio
U	Transmitância térmica
V _a	Volume da amostra de EPS
V _p	Volume perturbado por efeito de parede nos grãos
W	Watt(s)
y	Fração volumétrica de uma classe granulométrica específica
ρ	Densidade de massa aparente
λ	Condutividade térmica do material de uma camada da parede
φ	Compacidade real da mistura

$f(\phi)$	Função para determinação do empacotamento real
$f(\beta)$	Função para determinação da compacidade virtual de uma classe de grãos
γ	Compacidade virtual da mistura
\bar{B}	Compacidade virtual média de empacotamento
β	Compacidade virtual de uma classe de grãos tomada individualmente
β_1 e β_2	Raízes da função da compacidade virtual de uma classe de grãos
β_a e β_b	Descontinuidades da função da compacidade virtual de uma classe de grãos
%	Por cento
°C	Grau(s) Celsius
μm	Micrômetro(s)
I, II e III	1º, 2º e 3º em algarismos romanos
π	Número pi
Σ	Somatório de uma função qualquer dentro de um intervalo pré-determinado
”	Polegada(s)
Δ_{int} e Δ_{ext}	Variações entre as temperaturas máximas e mínimas internas e externas da caixa térmica

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
1.1 Introdução	23
1.2 Objetivos	24
1.2.1 Objetivo geral.....	24
1.2.2 Objetivos específicos.....	24
1.3 Justificativa	24
1.4 Estrutura da dissertação	27
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA	29
2.1 Poliestireno expandido	29
2.1.1 Propriedades e características	31
2.1.2 Reciclagem do EPS	32
2.1.2.1 <i>Reciclagem mecânica</i>	32
2.1.2.2 <i>Reciclagem química</i>	34
2.1.2.3 <i>Reciclagem energética</i>	34
2.1.3 Finalidades do poliestireno expandido	35
2.2 Concreto leve	36
2.2.1 Propriedades e características	38
2.2.2 Etapas de produção e manuseio do concreto leve.....	39
2.2.3 Utilização do concreto com agregados leves.....	41
2.2.4 Classificação dos concretos leves	42
2.3 Concreto leve com EPS	43
2.3.1 Propriedades e características	44
2.3.2 Aplicações do concreto com EPS	48
2.4 Blocos de concreto	49
2.4.1 Propriedades dos blocos vazados de concreto	50
2.4.2 Dosagem empírica dos blocos	51
2.4.3 Blocos de concreto com EPS	53

2.5 Alvenaria com blocos de concreto	54
2.6 Conforto térmico	56
2.6.1 Mecanismos de troca de calor	57
2.6.1.1 <i>Condução</i>	57
2.6.1.2 <i>Convecção</i>	59
2.6.1.3 <i>Radiação</i>	59
2.6.2 Detecção de variações térmicas em paredes opacas	61
2.6.2.1 <i>Simulação computacional</i>	62
2.6.2.2 <i>Termografia infravermelha</i>	63
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA DA PESQUISA	65
3.1 Programa experimental	65
3.2 Escolha e coleta dos materiais	66
3.3 Caracterização dos componentes do concreto	67
3.3.1 Cimento Portland	67
3.3.1.1 <i>Composição química</i>	67
3.3.1.2 <i>Índice de finura</i>	68
3.3.1.3 <i>Tempo de pega</i>	69
3.3.1.4 <i>Resistência mecânica</i>	69
3.3.1.5 <i>Massa específica</i>	69
3.3.1.6 <i>Granulometria a laser</i>	70
3.3.1.7 <i>Demanda de água</i>	71
3.3.2 Agregados	73
3.3.2.1 <i>Densidade real e massa específica aparente</i>	73
3.3.2.2 <i>Distribuição granulométrica</i>	74
3.3.2.3 <i>Índice de forma</i>	75
3.3.2.4 <i>Teor de absorção</i>	75
3.3.2.5 <i>Massa unitária e índice de vazios</i>	76
3.3.2.6 <i>Teor de umidade</i>	76
3.3.2.7 <i>Teor de materiais deletérios ao concreto</i>	77

3.3.2.8 <i>Compacidade experimental</i>	78
3.3.3 <i>Água de amassamento</i>	80
3.4 Dosagem experimental dos blocos	80
3.4.1 Definição da mistura seca do concreto	80
3.4.2 Determinação do fator a/c.....	85
3.5 Produção e cura dos blocos de concreto	86
3.6 Ensaio nos blocos	88
3.6.1 Ensaio mecânico	88
3.6.1.1 <i>Resistência à compressão axial</i>	88
3.6.2 Ensaio físicos.....	90
3.6.2.1 <i>Análise dimensional</i>	90
3.6.2.2 <i>Absorção e umidade relativa</i>	90
3.6.2.3 <i>Análise térmica</i>	90
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
4.1 Componentes da mistura seca	93
4.1.1 Caracterização específica do cimento	93
4.1.2 Caracterização específica dos agregados.....	94
4.1.3 Caracterização para dosagem experimental.....	97
4.2 Blocos de concreto	100
4.2.1 Dosagem experimental	100
4.2.2 Resistência à compressão axial	101
4.2.3 Análise Dimensional	104
4.2.4 Umidade relativa e absorção	105
4.2.5 Massa específica	107
4.2.6 Desempenho térmico	107
4.2.6.1 <i>Análise via NBR 15575</i>	107
4.2.6.2 <i>Experimento prático de variação térmica na alvenaria de blocos</i>	109
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
5.1 Conclusões	117

5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	118
REFERÊNCIAS	121
APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E CIMENTO	131
APÊNDICE B – DOSAGEM DOS BLOCOS	133
APÊNDICE C – PROPRIEDADES NORMATIZADAS DOS BLOCOS.....	134
APÊNDICE D – DESEMPENHO TÉRMICO DOS BLOCOS	136
ANEXO A - CONTROLE DE QUALIDADE DOS COMPONENTES DO CONCRETO	141
ANEXO B – REFERÊNCIAS DE DOSAGENS DE CONCRETOS PELO MEC	144
ANEXO C - CONTROLE DE QUALIDADE E CARACTERÍSTICAS DOS BLOCOS DE CONCRETO.....	145

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

As altas temperaturas e umidades do ar interferem no bem-estar do ser humano, principalmente em Manaus, localizada numa zona bioclimática onde esses fatores estão presentes na maior parte do ano (BARBOSA, 2016). O desenvolvimento de materiais sustentáveis reduz, de acordo com a autora, o consumo de matérias-primas como a madeira, que permite a redução do desflorestamento da Amazônia, favorecendo a redução dos efeitos adversos causadas por estas condições climáticas desfavoráveis.

A extração dos recursos naturais da Amazônia através de atividades como a britagem de rochas e a retirada de areia nos leitos dos rios para produção de agregados de concreto reduzem a quantidade de materiais naturais finitos, além de requerer, segundo Souza (2013), o cuidado quando a exploração ocorre de forma descontrolada devido aos graves impactos ambientais que surgirão rapidamente.

No cenário urbano, destacam-se a falta de conscientização da população quanto ao descarte equivocado dos seus resíduos (domésticos, industriais ou da construção civil) e a não obediência à Resolução nº 307 de 2002 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), no que diz respeito ao tratamento desses resíduos (MANAUS, 2015), ao proporcionar, de acordo com o próprio conselho, danos a saúde em função da má disposição destes resíduos em lixões e aterros.

Indo de encontro a essa situação, o setor da construção civil passou a incorporar resíduos que até pouco tempo eram considerados como “inutilizáveis” para diminuição de seus impactos ambientais e atendimento das obrigações técnicas impostas na produção de novos compósitos (OLIVEIRA, 2013; BARBOSA, 2016). A inserção de resíduos de madeiras para a melhoria do desempenho térmico é um desses novos tipos de materiais inseridos em compósitos de matriz cimentícia (RIBEIRO, 2016). Contudo existem polímeros porosos, como o poliestireno expandido (também conhecido pela sigla inglesa EPS – Expanded Polystyrene), que proporcionam os mesmos benefícios segundo Oliveira (2013) em relação à isolamento térmica.

O EPS em compostos cimentícios proporciona, de acordo com o mesmo autor, uma redução dos gastos por meio da diminuição do consumo dos insumos tradicionais devido à

substituição parcial ou integral dos materiais convencionais, ao permitir aplicações destes concretos e argamassas nos mais diversos segmentos construtivos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Estudar as propriedades físicas e mecânicas de blocos vazados de concreto com a substituição parcial do agregado graúdo convencional por poliestireno expandido reciclado.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar fisicamente o poliestireno expandido reciclado para avaliação do processo de reciclagem em suas propriedades;
- Determinar a dosagem experimental ideal do concreto a ser utilizado na produção dos blocos com e sem substituição de poliestireno expandido reciclado;
- Avaliar as propriedades térmicas dos blocos de concreto produzidos, com ênfase no conforto térmico;
- Definir a aplicação do produto quanto aos resultados obtidos em função dos limites impostos pelas normas técnicas responsáveis.

1.3 Justificativa

A cidade de Manaus, um dos mais importantes centros urbanos da região norte do país segundo o último recenseamento do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), vivencia o crescimento de sua população desde a instalação do Pólo Industrial, ocorrida na década de 70. Mais recentemente, com a escolha da capital do Amazonas como subsede da Copa do Mundo de Futebol em 2014 e das Olimpíadas em 2016, além da construção de conjuntos habitacionais para famílias de baixa renda, por meio de um programa de desenvolvimento urbano do governo federal, houve um aumento no número de obras espalhadas por todas as zonas da

cidade. Atualmente mesmo com a oscilação no setor construtivo, conforme os dados apresentados pelo Sindicato da Indústria da Construção Civil do Amazonas (SINDUSCON-AM, 2017), ainda há demanda por materiais construtivos relacionados à produção do concreto.

Aliada a extensão territorial do Amazonas, Souza (2013) afirma que as principais jazidas onde ocorre a extração da brita, de origem granítica (rochas duras), utilizadas para suprir o setor construtivo da capital, tanto em construções verticais quanto para pavimentação, estão situadas nos municípios de Barcelos e Presidente Figueiredo (distantes a mais de 150 km de Manaus), refletindo em um alto custo para obtenção destas matérias-primas para o concreto. Com isso, têm sido empregadas alternativas para superar este obstáculo segundo o autor, como a substituição da brita pelo seixo, embora a retirada deste material alternativo ocorra principalmente em locais próximos ao rio Aripuanã (distante cerca de 700 km do porto da capital), aumentando o tempo de espera.

Ao analisar do ponto de vista técnico, o uso do seixo, apesar do aumento da trabalhabilidade, reduz as propriedades mecânicas do concreto em função da perda de aderência na zona matriz-agregado (NEVILLE, 2016). Logo essas dificuldades envolvendo a qualidade e os custos do concreto na região contribuem, por exemplo, para dificultar a produção de blocos de concreto (VIEIRA et al., 2016).

O emprego de blocos de concreto para alvenaria (estrutural ou de vedação) surge como opção para substituição dos tijolos cerâmicos por consumir menos energia e combustíveis fósseis durante a sua fabricação, de acordo com Ling e Teo (2013), contribuindo para redução do impacto ambiental que seria causado por esta atividade em larga escala.

Do ponto de vista das vantagens técnicas, Pedra (2011) e a própria NBR 6136 (ABNT, 2014), destacam:

- O alcance de valores de resistência superiores aos dos tijolos cerâmicos, podendo-se optar pelo emprego da alvenaria estrutural que contribui para distribuição de cargas as fundações;
- A maior diversidade de fôrmas e aplicações dos blocos, que proporcionam uma otimização e economia na produção;
- A maior facilidade para as instalações elétricas, hidráulicas e de armadura metálica devido as câmaras de ar presentes nos blocos;

- O maior controle tecnológico, com a facultativa produção das unidades de alvenaria no próprio canteiro de obra.

Enquanto que as principais desvantagens observadas desse modelo em relação ao convencional, ainda de acordo com Pedra (2011), são:

- A perda da produtividade quando se empregam blocos de dimensões e pesos superiores aos adotados pelos tijolos cerâmicos, em virtude das dificuldades de manuseio;
- O dispêndio no acabamento das alvenarias externas, pois em algumas situações é possível suprimir revestimentos nos tijolos cerâmicos. A predominância de argilas e os custos dos agregados do concreto são outras variáveis que contribuem na diferença entre a escolha dos tijolos;
- Quando os blocos são utilizados em alvenarias estruturais, não é permitida a demolição dessas paredes para alterações de projeto.

Como o concreto é formado majoritariamente por seus agregados para redução no consumo do cimento, Neville (2016) afirma que estes afetam diretamente no peso próprio dos compósitos cimentícios, e a substituição por materiais mais leves, abundantes e que possam desempenhar o mesmo papel (sem aumentar consideravelmente o consumo de cimento) é uma das saídas encontradas para resolver esse problema.

Diante disso, surgem espaços para a aplicação de materiais regionais ou não convencionais em estruturas de concreto, como o poliestireno expandido. De acordo com Sartorti (2015), é possível identificar que a inserção do EPS no concreto, seja como material de enchimento em lajes ou para substituição de agregados, apresenta vantagens técnicas e econômicas.

A incorporação de energia em construções externas que empregam o EPS também colabora para a racionalização de recursos naturais e energéticos, segundo Dissanayake, Jayasinghe e Jayasinghe (2017), adquirindo uma serventia maior principalmente em grandes pólos consumidores.

Adicionado a estas vantagens, identifica-se a adoção da reciclagem de embalagens descartadas de poliestireno expandido em indústrias da Zona Franca de Manaus (VIEIRA et al., 2016), reincorporando-as em novos produtos e reduzindo conseqüentemente o número de resíduos no aterro da cidade. Acrescenta-se ainda que essa atividade também afeta no consumo

energético das edificações, segundo Martins (2017), preenchendo todos os requisitos necessários para atestar as suas viabilidades técnicas, econômicas e ecológicas.

Logo, pode-se constatar que o reuso do poliestireno expandido em blocos vazados de concretos atende a linha de pesquisa desenvolvida pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas (PPGEC-UFAM), estimulando o desenvolvimento da pesquisa voltada, sobretudo, para a possibilidade da obtenção de edificações que proporcionem maior conforto térmico ao substituir parcialmente os agregados convencionais do concreto pelo EPS oriundo da reciclagem.

1.4 Estrutura da dissertação

A parte escrita da pesquisa apresentada foi dividida nos seguintes capítulos:

Capítulo 1 – Contextualiza a importância do tema abordado e da sua interação com o programa de pós-graduação (busca por materiais alternativos e/ou regionais na construção civil);

Capítulo 2 – Descreve os termos, conceitos, classificações, aplicações e metodologias (produtivas e avaliativas) do material alternativo (EPS reciclado) e do concreto estudado (blocos vazados com agregados leves);

Capítulo 3 – Detalha o programa experimental adotado na pesquisa, através da descrição dos processos produtivos, materiais e ensaios (normatizados ou experimentais) adotados, informando suas referências;

Capítulo 4 – Apresenta os resultados obtidos pelos experimentos práticos destacados no capítulo 3, e compara-os com os limites sugeridos pelas normas responsáveis e outras recomendações relacionadas ao tema, descritas no capítulo 2;

Capítulo 5 – Cita as mais relevantes conclusões obtidas em função da análise dos resultados expressos no capítulo anterior.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Poliestireno expandido

Sartorti (2015) afirma que o poliestireno expandido, vulgarmente conhecido como isopor (marca registrada de uma empresa alemã), é um polímero pertencente à família dos plásticos celulares, fruto da polimerização do estireno em água. A expansão do poliestireno conta com a presença do agente expensor pentano (C_5H_{12}), escolhido em função de sua estrutura - composta apenas de átomos de carbono e hidrogênio - que se deteriora facilmente em decorrência da reação fotoquímica oriunda dos raios solares, sem agredir o meio ambiente.

Após a expansão, as pérolas (Figura 2.1) apresentam volume composto por aproximadamente 98% de ar e somente 2% de poliestireno expandido (OLIVEIRA, 2013), caracterizando-as, segundo Sartorti (2015) como espumas inodoras com coloração branca.

Figura 2.1 – Pérolas de EPS.



Fonte: XU et al. (2016).

Aditivos ocasionalmente são acrescentados para melhoria de algumas das propriedades do EPS, como o retardante de chama que, de acordo com a NBR 11752 (ABNT, 2007), é determinante para sua a divisão em duas classes:

- A classe P para os não retardantes;
- A classe F para os retardantes.

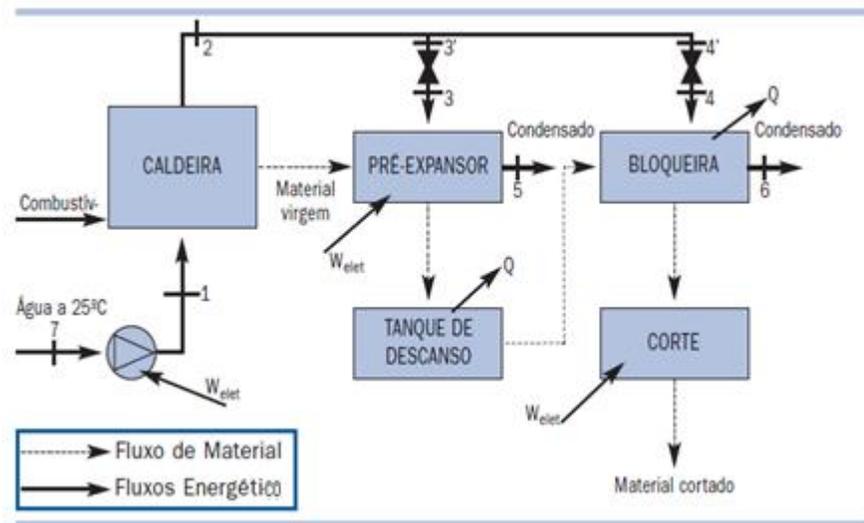
Há também, segundo a referida norma, a divisão quanto à sua massa específica:

- Grupo I – para as amostras que possuem valores entre 13 a 16 kg/m³;
- Grupo II - para as amostras que possuem valores entre 16 a 20 kg/m³;
- Grupo III - para as amostras que possuem valores entre 20 a 25 kg/m³.

O processo de fabricação do EPS, de acordo com Oliveira (2013) e Sartorti (2015), consiste em uma transformação física sem alteração de suas propriedades químicas, a partir das etapas descritas abaixo e esquematizadas na Figura 2.2:

- Pré-expansão: inicialmente, em um pré-expansor, onde o poliestireno é aquecido por vapor de água. Com isso, as pérolas passam a ocupar um volume 50 vezes maior do que o seu anterior, com aparecimento de granulados de partículas. O processo de expansão dentro da câmara de vapor também pode ser interrompido antes do final do processamento com aplicação de jatos de água fria no molde;
- Armazenamento intermediário: refere-se ao período de estabilização do material e pré-transformação. Com o resfriamento do EPS, surgem vazios nos interiores das células, preenchidos por ar posteriormente;
- Moldagem: há a introdução do polímero em moldes e segunda exposição ao vapor de água para a “soldagem”, ao evitar perdas do produto expandido. Após este processo, o material é cortado de acordo com a variação no tempo de espera determinado (em função da densidade almejada).

Figura 2.2 – Etapas de produção do EPS.



Fonte: GROTE; SILVEIRA (2002).

Segundo Cruz (2015), há uma perspectiva de crescimento anual na produção mundial de EPS, estimando que em 2020 existirá uma demanda de 23,5 toneladas. No Brasil, a autora afirma que aproximadamente 13 das 39 mil toneladas de EPS descartadas foram recicladas em 2012. As regiões sudeste e sul foram às principais responsáveis pela execução desta atividade, com um percentual acumulado de 79%, devido principalmente à questão da logística reversa, enquanto que a região norte foi responsável por 17,3%, de acordo com o referencial da autora.

A descrição dos tipos de reciclagem será detalhada no item 2.1.2.

2.1.1 Propriedades e características

Oliveira (2013), Ferrándiz-Mas e García-Alcoel (2012) afirmam que as principais propriedades e características do EPS são:

- a) Baixa condutividade térmica: a sua estrutura (células fechadas preenchidas com ar) dificulta o fluxo de calor. Isto confere isolamento térmico e contribui para a preservação dos recursos e redução dos gastos relacionados à energia;
- b) Absorção de impactos: possui um mecanismo semelhante ao da isolamento térmico (em virtude de sua estrutura), ao absorver grande parte da energia recebida e dispersar apenas uma pequena parcela dessa energia;
- c) Baixo peso específico: com densidades entre 10 e 30 kg/m³, reduz sensivelmente o peso próprio das estruturas que os incorporam;
- d) Resistência mecânica: apesar de sua leveza, o EPS possui boa resistência mecânica específica (relação entre a máxima carga suportada e o seu peso específico). Este material possui também alta compressibilidade;
- e) Baixa absorção de água: o poliestireno expandido quando imerso absorve pequenas quantidades de água, o que o caracteriza como um material hidrofóbico, mantendo as suas propriedades térmicas e mecânicas;
- f) Versatilidade: existem tamanhos e formatos de produtos a base desse polímero que facilitam o atendimento às especificidades de determinadas aplicações. A sua leveza também facilita o seu manuseamento;
- g) Resistência ao envelhecimento: suas propriedades mantêm-se inalteradas ao longo de sua vida útil;

- h) Resistência química: o EPS é considerado inerte e apresenta afinidade com produtos como o cimento, gesso, cal e água. Ele também apresenta resistência quando exposto a ácidos e álcalis;
- i) Resistência biológica: fungos e bactérias não se proliferam no poliestireno expandido;
- j) Alto poder sustentável: é totalmente reciclável. A sua fabricação não ocasiona danos à saúde e ao meio ambiente, pois não produz clorofluorcarbonos (CFC) nem hidroclorofluorcarbonetos (HCFC). O seu acúmulo em aterros sanitários não contamina o solo, ar ou a água subterrânea (com longo período de decomposição).

2.1.2 Reciclagem do EPS

De acordo com Cruz (2015), pelo fato do EPS não ser biodegradável e descartado em grandes quantidades quando utilizado como embalagens de bens ocasionam o acúmulo elevado de resíduos em aterros, resultando em um grave problema de poluição ambiental, visto que a incineração deste polímero também pode gerar poluição secundária.

Apesar de envolver alto capital de investimento com expectativa de lucro com a comercialização de produtos em média e grande escala, a reciclagem surge como alternativa para sanar este problema (OLIVEIRA, 2013). Porém, além da questão econômica, Cruz (2015) atenta também para o ponto de vista ecológico, com a redução da concentração de gás carbônico na atmosfera oriundo do elevado consumo energético para produção do EPS é outro ponto positivo identificado quando se adota essa atividade sustentável.

Existem três tipos de reciclagem para o EPS: a mecânica, a química e a energética.

2.1.2.1 Reciclagem mecânica

A reciclagem mecânica é direcionada a produção de blocos, placas ou painéis e ocorre de duas formas: parcial ou completamente.

Para a reciclagem parcial é necessária a presença, segundo Cruz (2015), de grandes quantidades de matérias-primas virgens (entre 60 e 70%) para obter uma composição ideal que

3ª Fase: Concluído o adensamento, insere-se o EPS na extrusora para submetê-lo a um novo aquecimento (com controle de temperatura) até seu amolecimento;

4ª Fase: Ao atingir este estágio, o material é homogeneizado e transformado em filetes (com formato semelhante à de uma massa de espaguete);

5ª Fase: Os filetes são resfriados e secos. Por último, são picotados e transformados em grânulos, tornando-os a partir desse ponto reutilizáveis.

2.1.2.2 *Reciclagem química*

Santos (2013) afirma que a reciclagem química ocorre por despolimerização (quebra das macromoléculas do polímero) através de:

- Solvólise (Ex.: hidrólise, alcoólise e amilose);
- Métodos térmicos (Ex.: pirólise, gaseificação e hidrogenação);
- Métodos térmicos/catalíticos (Ex.: pirólise com presença de catalisadores seletivos).

Este processo transforma os polímeros da família dos policondensados, em monômeros, oligômeros ou hidrocarbonetos em função da ação de calor ou de agentes químicos, com a presença de solventes (água ou álcool) e ocasionalmente catalisadores.

Algumas das aplicações, de acordo com Cruz (2015), do processo de reciclagem química do EPS são a substituição e produção do coque para fabricação do aço, a sua conversão em óleo e no processo de gaseificação, que servem de insumo (matéria-prima ou combustíveis) para a indústria química.

2.1.2.3 *Reciclagem energética*

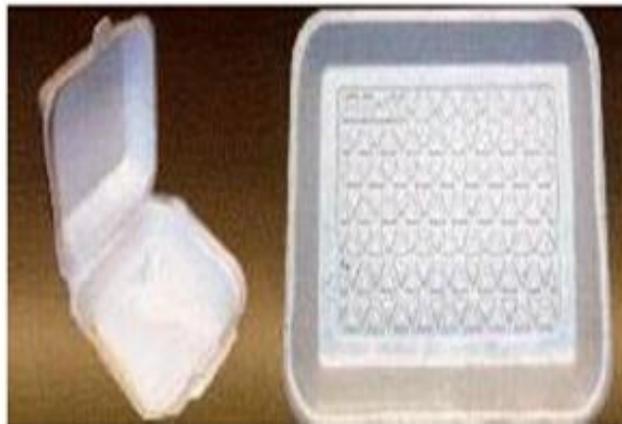
A reciclagem do EPS é direcionada para substituição de combustíveis e em processos de recuperação de energia por incineração controlada, reduzindo o consumo de recursos naturais fósseis (SANTOS, 2013; CRUZ, 2015). A reciclagem energética, de acordo com os autores, é destinada quando não há viabilidade para o uso dos tipos de reciclagem descritos anteriormente, além de servir como fonte de calor para a fabricação de novos produtos a base de EPS.

2.1.3 Finalidades do poliestireno expandido

Oliveira (2013), Sartorti (2015) afirmam que o EPS pode ser utilizado como:

- Produtos de embalagens de proteção (Figura 2.4);
- Complemento de moldes de peças injetadas ou de fundição;
- Aeração de solos;
- Fôrmas e caixões perdidos;
- Pisos compostos;
- Juntas de dilatação;
- Isolamento térmico de lajes impermeabilizadas, telhados e dutos de ar-condicionado;
- Painéis divisórios;
- Bancos de jardim;
- Bases para calçamento;
- Fundações para estradas;
- Forros (isolantes ou decorativos);
- Confeção de concretos leves.

Figura 2.4 - Embalagem descartável de EPS.



Fonte: PEDRA (2011).

Destaca-se o desenvolvimento de pesquisas, desde a publicação de Cook (1973), para utilização e aperfeiçoamento de tecnologias voltadas à produção de concretos leves com a presença do EPS em sua composição.

2.2 Concreto leve

O concreto é um dos produtos mais produzidos no mundo, apresentando uma diversidade de composições que são utilizadas nas mais distintas aplicações. De acordo com Mehta e Monteiro (2013), os componentes principais são: cimento, agregados (naturais ou artificiais) e água, produzindo uma estrutura heterogênea, complexa, de múltiplas fases e monolítica. Porém, dependendo da finalidade, acrescentam-se aditivos (ou adições) e outros materiais como, por exemplo, as barras/fibras metálicas para melhoria do seu comportamento na pós-fissuração.

As densidades dos concretos tradicionais variam entre 2200 a 2600 kg/m³. O seu emprego em edificações de grande porte colabora para que as fundações, compostas geralmente por esse mesmo tipo de compósito, sejam de grandes dimensões devido à contribuição do peso próprio da supraestrutura no carregamento total, elevando com isso o consumo de seus insumos e dificultando em algumas situações a execução desse empreendimento, em virtude dos custos gerados e da baixa capacidade de suporte apresentada por alguns solos. Para superar estes obstáculos, tem sido empregado, segundo Neville (2016), concretos com agregados mais leves que os usuais, substituindo-os parcial ou completamente.

O percentual de redução do peso específico proporcionado pelo concreto leve depende basicamente da sua aplicação: a American Concrete Institute (ACI) 213R define um intervalo entre 1120 e 1920 kg/m³ para fins estruturais, enquanto Neville (2016), em adaptação a publicação citada, afirma que para um valor de 300 kg/m³ o mesmo só pode ser utilizado para isolamento térmica. Apesar da faixa de variação da massa específica do concreto leve, há um consenso sobre a diminuição do carregamento transmitido à infraestrutura.

Os registros mais antigos do emprego do concreto leve datam de 1100 a.C., no México (ANGELIN, 2014). Todavia, os mais famosos mostram que no Império Romano este tipo de concreto foi utilizado para a reconstrução da cúpula do Panteão de Roma e na construção do Coliseu, com o uso de pedra-pome (ACI, 2014). Durante a Primeira Guerra Mundial (1914-1918) se iniciou a produção do concreto leve da forma como é conhecida atualmente através da construção de navios com a presença de xisto expandido.

Nas décadas de 60 e 70, o setor da construção civil adotou definitivamente este concreto ao inaugurar edificações espalhadas em vários países, como na Austrália (Park Regis em 1967),

África do Sul (Standart Bank em 1970) e Alemanha (BMW Building em 1969), conforme demonstrado na Figura 2.5. Durante esse período em São Paulo, registrou-se a produção dos primeiros artefatos pré-moldados de concreto leve no Brasil, a base de argila expandida, voltados para fins estruturais.

Figura 2.5 - Edificações compostas por agregados leves.



Park Regis
Fonte: CATÓIA (2012).

Standart Bank

BMW Building

O concreto leve apresenta usualmente uma absorção de água superior a do concreto usual, interferindo diretamente na trabalhabilidade, que é inferior ao mesmo referencial (ANGELIN, 2014). Contudo, a autora destaca que a porosidade contribui para a melhor aderência existente na zona de transição matriz-agregado, devido à penetração da pasta nos vazios dos agregados.

As variações volumétricas encontradas nos concretos leves contribuirão, por exemplo, para os efeitos da carbonatação, apesar de Sartorti (2015) afirmar que a penetração (em torno de 2 cm) de gás carbônico no concreto, composto por agregado leve hidrofóbico, não foi suficiente para reduzir o pH da estrutura.

Neville (2016) afirma que há interferência frente a ciclos de gelo e degelo quando o agregado leve encontra-se saturado, procurando empregá-lo no estado seco ou substituí-lo pelo convencional em locais sujeitos a esse fenômeno. Quanto à reação álcali-agregado, o autor destaca que não existem ocorrências prejudiciais quando se adota o concreto leve.

2.2.1 Propriedades e características

As principais vantagens adquiridas com o emprego dos concretos leves são a redução do peso próprio e o aumento da capacidade de absorção de energia (ANGELIN, 2014). Todavia, a autora destaca que a inserção de agregados mais leves afeta algumas das mais importantes propriedades do concreto, seja no estado fresco quanto no estado endurecido.

Segundo a autora, a demanda pelo consumo de água de amassamento está direcionada a influência da textura superficial e a forma das partículas do agregado. No caso dos concretos leves, para obter uma determinada resistência, recorre-se a uma quantidade superior de materiais cimentantes.

A reologia desses concretos define que para um mesmo abatimento há maior consumo de água em comparação com os concretos tradicionais, o que favorece a segregação. A segregação dos componentes é percebida em virtude da flutuação dos agregados leves pois, de acordo com Neville (2016), os pesos específicos destes agregados são inferiores ao encontrado na argamassa, ocasionando uma mistura menos uniforme e de fraca ligação entre os componentes do concreto.

A redução da massa específica interfere diretamente na resistência mecânica. Este fator é potencializado se as dimensões e o volume ocupado por esses agregados leves aumentam (LIU; CHEN, 2014), ao redirecionar para a si a resistência do concreto, pois dependendo do tipo de agregado escolhido encontram-se valores superiores de resistência nas argamassas. Porém, Angelin (2014) afirma ser possível obter altas resistências à compressão através da incorporação de pozolanas e aditivos redutores de água, citando o exemplo de um concreto que alcançou, por meio do consumo de 550 kg/m^3 de cimento, a resistência à compressão de 100 MPa apresentando uma massa específica de 1750 kg/m^3 .

A autora ainda diferencia o concreto leve do convencional em relação ao caminho percorrido por sua linha de ruptura. Enquanto no concreto convencional a linha percorre a zona de transição matriz-agregado, a mesma nos concretos leves transpassa os agregados graúdos com o colapso da argamassa. O módulo de elasticidade também é reduzido com a introdução destes materiais de menor massa específica, segundo Neville (2016), ao se aproximar do módulo encontrado na matriz e limitar as microfissurações no concreto quando exposto a cargas ou variações de temperatura.

Em relação às deformações devido à ação de cargas de longa duração, como a retração, identificam-se expansões superiores nos concretos leves em associação aos encontrados nos concretos tradicionais, adotando medidas como a pré-saturação dos agregados que permite a hidratação do cimento, evitando a retração autógena (SARTORTI, 2015).

No caso da fluência, o menor módulo de elasticidade restringe essa deformação, apesar da suposição de que a movimentação interna da água ocorrida do agregado para a matriz afeta diretamente na fluência por secagem (NEVILLE, 2016). Contudo, o autor destaca que não há mudanças significativas na fluência em comparação com o concreto usual.

Por fim, Angelin (2014) ressalta que os vazios existentes nos concretos leves agregam benefícios como o aumento da capacidade de absorção térmica e redução da transferência de calor, o que conseqüentemente proporciona uma maior isolamento. Neville (2016) ressalta ainda a redução da dilatação térmica, que proporciona ao concreto a redução do empenamento ou flambagem de faces paralelas em estruturas como pilares, quando expostas a diferentes temperaturas.

2.2.2 Etapas de produção e manuseio do concreto leve

Os modelos de dosagens empregados nos concretos leves são semelhantes aos tradicionais, considerando principalmente a resistência característica desejada, através da determinação das quantidades ideais dos componentes da mistura (por metro cúbico) pela utilização de tabelas ou programas computacionais que empregam conceitos estatísticos e probabilísticos, como regressão linear e as redes neurais (SADRMOMTAZI; SOBHANI; MIRGOZAR, 2013).

Porém existem diferenças entre essas dosagens, cujas mais importantes se referem à influência da umidade, a resistência e o teor utilizado do agregado graúdo nos concretos leves, fatores que são desprezados nos concretos convencionais por não afetarem diretamente as suas principais propriedades. Em publicações como a do Comité Euro-International du Béton and Fédération Internationale de la Précontrainte (CEB-FIP, 1977) e ACI 211.2 (ACI, 1998), encontram-se especificações quanto a dosagem de concretos leves, com um consumo de cimento superior a 300 kg/m^3 em função da mínima trabalhabilidade exigida.

O estudo do empacotamento das partículas também exerce, segundo Catóia (2012) e Neville (2016), uma importância fundamental porque aumenta a coesão e a resistência, reduz a segregação e exsudação, e diminui o consumo de cimento nesse concreto.

Na produção dos concretos leves geralmente é necessário à adição de produtos que afetem a sua reologia, trabalhabilidade e aperfeiçoem as suas propriedades mecânicas. Alguns desses aditivos são os redutores de água (plastificantes e superplastificantes), os modificadores de viscosidade (MONTE; BAMONTE; GAMBAROVA, 2015), além das já citadas pozolanas, com o intuito de aumentar a resistência à compressão.

A porosidade dos agregados leves é o principal ponto a ser observado durante a etapa de mistura. Se a absorção do agregado for superior a 10% em um dia de imersão, recomenda-se um acréscimo na água de amassamento para compensar essa absorção, além de realizar primeiramente a mistura dos outros componentes até os mesmos apresentarem uma mistura homogênea, para posteriormente inserir o agregado gráudo leve pré-saturado e o restante da água para finalização do processo (ANGELIN, 2014). Para agregados leves destinados a funções estruturais, Neville (2016) afirma que não há necessidade de compensação de água para teores inferiores a 15% no primeiro dia de imersão.

O transporte do concreto leve deverá ocorrer, segundo Angelin (2014), evitando ao máximo a segregação de seus componentes e a exsudação. Para combater esses inconvenientes, incorporam-se geralmente finos, aditivos apropriados ou reduz-se o fator água/cimento.

O lançamento de concretos leves por meio de bombeamento (para estruturas situadas a grandes alturas) acarreta, de acordo com a autora, uma preocupação a mais por conta da umidade e da granulometria dos agregados, em virtude da maior absorção de água, afetando diretamente a trabalhabilidade e ratificando a análise do uso desses materiais leves antes da mistura. Neville (2016) sugere, em algumas situações, a substituição do agregado fino leve pelo convencional para facilitar as etapas de lançamento e adensamento.

A redução do peso próprio do concreto leve apresenta vantagens no seu lançamento devido ao menor consumo de massa, aumentando a produtividade, e a redução de esforços nas fôrmas, de acordo com o autor citado anteriormente. Contudo, percebe-se na etapa de adensamento que energias de vibração elevadas para obtenção de uniformidade e redução dos vazios internos em excesso pode contribuir, de acordo com o autor, para o surgimento da

segregação (SARTORTI, 2015). Tamut et al. (2014) sugerem a vibração em menores áreas e com baixa frequência como alternativa ao adensamento do concreto.

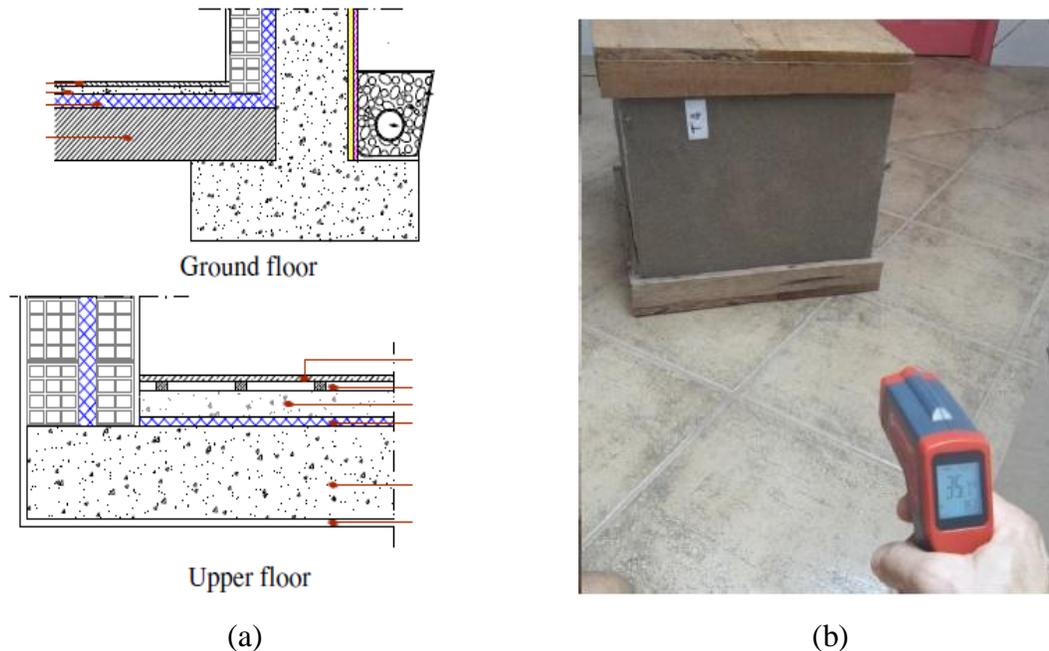
A etapa de cura do concreto leve, conforme afirma Angelin (2014), favorece a hidratação do cimento devido à transferência da água absorvida dos agregados leves para a matriz, minimizando conseqüentemente perdas de líquido para o meio externo e elevando a temperatura em conseqüência da baixa condutividade térmica dos agregados leves. Algumas das medidas adotadas, segundo a autora, para evitar a fissuração são a retirada das fôrmas em um tempo superior ao empregado nos concretos convencionais e o uso de mantas isolantes.

2.2.3 Utilização do concreto com agregados leves

Ao analisar os benefícios adquiridos pela presença de agregados leves no concreto, Pinto et al. (2012), Torkaman, Ashori, Montazi (2014) e Ribeiro (2016) indicam o seu uso para:

- Regularização de superfícies (Figura 2.6.a);
- Isolamento térmico e absorção acústica (Figura 2.6.b);
- Campo de segurança contra incêndios;
- Vedação (Ex.: blocos furados, tijolos, painéis e concreto massa).

Figura 2.6 – Aplicações de concreto leve em regularização de pisos (a) e placas isolantes (b).



Fontes: PINTO et al. (2012); RIBEIRO (2016).

2.2.4 Classificação dos concretos leves

Existem duas classificações mais empregadas para os concretos leves. A primeira, de acordo com o ACI 213R (ACI, 2014), avalia a sua finalidade, dividindo-os em:

- Estruturais: quando submetidos a grandes esforços. Usualmente são empregados agregados como a argila expandida e cinzas volantes, com exigência de uma resistência mínima de 17 MPa;
- Como materiais isolantes: em situações que há redução considerável da massa específica e não possuem função estrutural. Geralmente se utiliza a perlita (30 kg/m^3) e a vermiculita como agregado leve;
- Para resistência moderada (ou de “alvenaria leve”): para os casos em que se trabalha com valores de massa específica inferiores a 880 kg/cm^3 (agregado graúdo) e 1120 kg/cm^3 (agregado miúdo) e resistência entre 7 e 17 MPa. Neste caso são inseridos materiais como a escória e a pedra-pome.

A outra, de acordo com Angelin (2014) e Neville (2016), se refere à origem dos vazios presentes, classificando o concreto leve com presença de vazios:

- Devido ausência de agregado miúdo: adquirida mediante adequada composição granulométrica do agregado adotado com porosidade granulométrica. Os concretos sem finos pertencem a essa classe;
- Na pasta de cimento: a porosidade é gerada artificialmente por meio de ações externas (de natureza mecânica, física ou química) na matriz cimentícia. Os concretos celulares são os principais expoentes desse grupo;
- Nas partículas dos agregados: obtida pelo uso de um agregado poroso. Os concretos produzidos com pedra-pome, escórias vulcânica ou de alto forno, argila expandida, vermiculita e perlita fazem parte dessa classificação;

Há, entretanto, compósitos que contam com pelo menos dois tipos distintos de vazios internos, como os concretos sem finos produzidos com agregados leves. Além desses concretos leves, Neville (2016) destaca outros compostos por materiais que mais recentemente estão sendo empregados, como os produtos finais da combustão do carvão mineral (em pó, por exemplo) e

coque para a produção de blocos de alvenaria. O lodo de esgoto misturado com argila e o agregado de clínquer também são utilizados, segundo o autor, em menor escala.

Um dos agregados leves artificiais mais utilizados, viáveis e que ainda não recebe muito destaque em livros especializados no assunto é o EPS, ao incorporá-lo para produção de concretos destinados as aplicações mencionadas anteriormente, principalmente no que se refere ao conforto térmico proporcionado (OLIVEIRA, 2013). Por ser tratar do tipo de concreto adotado no presente trabalho, o concreto com EPS será detalhado no item 2.3.

2.3 Concreto leve com EPS

O concreto com a presença de poliestireno expandido faz parte da classe dos concretos leves com porosidade presente nos agregados. O EPS é geralmente empregado na substituição volumétrica parcial dos agregados graúdos tradicionais, de acordo com seu direcionamento, ou até mesmo parte do agregado miúdo, em virtude de sua inércia e granulometria semelhantes.

O concreto leve com EPS também atua como um incorporador de ar, característica encontrada em outra classe (a dos concretos leves com porosidade na massa), contribuindo para a isolamento térmica de suas estruturas (CATÓIA, 2012). A melhoria ao ataque químico e a corrosão das armaduras internas do concreto também são observados, de acordo com Sayadi et al. (2016), quando se substitui o agregado natural, leve ou usual por poliestireno expandido.

Catóia (2012) afirma que o poliestireno expandido pode ser incorporado em compósitos que utilizam qualquer um dos cinco tipos básicos de cimento Portland existente no Brasil. O concreto com EPS adota procedimentos semelhantes aos empregados para o concreto usual, ao minimizar problemas de infraestrutura e técnicas específicas voltadas a sua produção.

Contudo, assim como os outros tipos de concreto leve, existem cuidados referentes à sua introdução na mistura, adotando principalmente aditivos que revistam quimicamente o EPS para evitar a sua segregação na massa (TANG; CUI; TAHMASBI, 2016). Há divergência também quanto à umidade ideal desse polímero, pois embora não absorva grandes quantidades de água, pesquisadores como Herki, Khatib e Negim (2013), Xu et al. (2016) umedecem-no em parte da água de amassamento antes de misturá-lo junto aos outros componentes, enquanto Mandlik et al. (2015) e Liu e Chen (2014) adicionam-no seco na mistura úmida e homogeneizada.

A redução do peso específico das estruturas é obtida em função da sua aplicação (CATÓIA, 2012) e pela realização do controle na granulometria desse polímero termoplástico, utilizando-se, por exemplo, pérolas de pequenos diâmetros de EPS (Figura 2.7).

Figura 2.7 – Concreto com distribuição aleatória das pérolas de EPS.



Fonte: TAMUT et al. (2014).

Normalmente adicionam-se, segundo Mandlik et al. (2015) e Ferrándiz-Mas e García-Alcocel (2012), outros aditivos como os superplastificantes, pozolanas e incorporadores de ar para otimização das propriedades mecânicas e físicas do concreto leve com EPS.

Kaya e Kar (2016) produziram concretos com EPS (na forma de resíduos) e uma resina natural (em substituição parcial ao cimento), enquanto que Liu e Chen (2013) incorporaram além do poliestireno expandido, sílica, superplastificante, fibras curtas de polipropileno e um agente espumante natural (para produção de ar incorporado). Ambos os trabalhos interferiram nos estados frescos e endurecidos do concreto, conferindo menor transmissão de calor e leveza.

2.3.1 Propriedades e características

As características relacionadas à reologia e as propriedades do estado endurecido do concreto que apresentam maiores alterações em função da substituição do agregado tradicional pelo poliestireno expandido são a densidade, trabalhabilidade, resistência à compressão, à tração indireta e ao fogo, módulo de elasticidade, retração, fluência, porosidade, e absorção de água e energia.

O concreto com EPS não apresenta uma faixa de densidade padrão devido ao teor adotado e a sua aplicação (em especial aquelas voltadas a fins estruturais). Porém se admite, com algumas divergências, o limite máximo de 2000 kg/m^3 (OLIVEIRA, 2013). Verifica-se que essa propriedade possui uma relação inversamente proporcional ao volume ocupado pelo poliestireno expandido, tornando-o mais leve que o concreto tradicional.

A ocupação da maior parte do volume do concreto (superior a 60%) por EPS contribui para que o compósito apresente má trabalhabilidade, com perda de fluidez da massa (FERRÁNDIZ-MAS; GARCÍA-ALCOCEL, 2012; HERKI; KHATIB; NEGIM, 2013). Todavia, quando empregado em pequenas quantidades, percebe-se uma distinção no comportamento apresentado em relação ao tipo de poliestireno expandido adotado.

No trabalho de Trussoni, Hays e Zollo (2012) foi verificado que o resíduo, com formato irregular, apresenta uma perda de fluidez maior que as pérolas, uniformemente esféricas. Esta afirmação foi posteriormente confirmada através das publicações de Tamut et al. (2014), que usaram as pérolas em substituição parcial de até 30% do volume do agregado graúdo, obtendo-se melhorias no abatimento, e de Demirboga e Kan (2012), que obteve uma mistura cimentícia com aspecto borrachudo, áspero e com maior dificuldade de moldagem ao empregar os resíduos desse polímero. O uso de superplastificantes e a alteração do fator a/c contribuem para o alcance de níveis de trabalhabilidade aceitáveis e ameniza os outros problemas descritos anteriormente.

A resistência à compressão é uma das propriedades mais afetadas pela presença do EPS. É unânime, ao analisar os estudos publicados até hoje, que há uma relação inversamente proporcional entre a quantidade presente desse polímero no concreto e a resistência máxima alcançada (CUI et al., 2016), ao apresentar resultados inferiores a concretos incorporadores de outros agregados leves como a argila expandida e o xisto (MONTE; BAMONTE; GAMBAROVA, 2015). Essa consequência aumentou os esforços para reduzir os impactos negativos gerados por meio de novas pesquisas.

Alguns pesquisadores utilizaram pozolanas como meio de evitar a segregação (XU et al., 2012) e recuperar a resistência a longo prazo (acima de 28 dias), como o trabalho de Herki, Khatib e Negim (2013) que utilizou a cinza volante em substituição parcial do cimento.

A escolha da granulometria do EPS interfere, além da densidade, na resistência, pois se constatou que as menores dimensões foram responsáveis pelos maiores resultados (LIU; CHEN, 2014). Contudo, Ferrándiz-Mas; García-Alcocel (2012) verificaram por meio da redução do

consumo de água na mistura e o uso de superplastificante, melhorias da capacidade de carga desses concretos leves.

A resistência à tração e o módulo de elasticidade possuem comportamentos semelhantes aos encontrados para a resistência à compressão e densidade, isto é, há maior redução dessas propriedades quanto maior a presença de poliestireno expandido no concreto (TAMUT et al., 2014; LIU; CHEN, 2014). Vigas compostas por esse concreto leve geralmente apresentam deflexões superiores as encontradas nos concretos usuais, o que em algumas situações as tornam inutilizáveis.

Em contrapartida, Herki, Khatib e Negim (2013) e Xu et al. (2012) verificaram que em função da inserção do EPS no concreto, houve uma mudança na forma de ruptura dos corpos de prova que passaram do estado frágil para um em que se percebe ductilidade, aumentando a segurança de suas estruturas.

A substituição do agregado convencional pelo EPS permite que o concreto tenha variação volumétrica maior, o que contribui conseqüentemente para os efeitos da retração, principalmente por secagem, e da fluência. Segundo Tang, Cui e Tahmasbi (2014) há uma relação direta entre a quantidade de poliestireno inserido e a fluência (aumento acima de 60%) e outra inversamente proporcional quando se analisa a razão entre a fluência recuperada sobre a fluência total ocorrida.

No trabalho de Demirboga e Kan (2012) constatou-se que a retração por secagem de uma amostra com substituição completa dos agregados convencionais por poliestireno expandido reutilizado, apresentou valor superior ao dobro do encontrado em outra amostra com substituição parcial (25%). Os principais fatores que contribuíram para isso, de acordo com os autores, foram a alta compressibilidade e o baixo módulo do EPS em virtude da ausência de resistência para restringir as deformações produzidas pela matriz cimentícia. Os mesmos pesquisadores citam ainda que a cura (melhor hidratação do cimento) e a estocagem (controle da umidade) surgem como meios de diminuir os efeitos dessas deformações.

Ao exercer o papel de “poros incorporados”, o EPS contribui para o aumento do índice de vazios da matriz que, dependendo das condições de umidade ambiente e da geometria da estrutura de concreto, favorece a absorção de água (FERRÁNDIZ-MAS; GARCÍA-ALCOCEL, 2012), apesar de o poliestireno expandido possuir higroscopicidade inferior ao dos agregados tradicionais. Pelo fato de sua porosidade está intimamente ligada à densidade aparente do

concreto, há uma interferência direta nas propriedades de resistência mecânica e, segundo Sayadi et al. (2016), na capacidade de absorção de energia térmica.

A maioria dos polímeros entra em fusão a baixas temperaturas, assim como o poliestireno expandido que amolece a partir de 100 °C e decompõe-se entre 230 a 270 °C. Quando incorporados ao concreto, os mesmos apresentam reduções na resistência à compressão e no módulo de elasticidade quando submetidos a altas temperaturas assim como ocorre nos concretos convencionais, segundo afirmam Monte, Bamonte e Gambarova (2015), em virtude da maior perda de massa de água interna.

Contudo, os concretos com EPS apresentam comportamento mais dúctil a temperaturas próximas de 500 °C, o que favorece, de acordo com Sayadi et al. (2016), o aumento de sua resistência ao fogo (principalmente para os concretos densos), com menor deterioração em concretos que possuem na sua composição baixos percentuais de poliestireno expandido.

O estudo de Tang, Cui e Tahmabsi (2016) divide a análise em três períodos: o primeiro ocorre a baixas temperaturas (até 150 °C) e é caracterizado por uma melhoria nas propriedades das amostras com e sem EPS; no segundo, entre 150 e 800 °C, acontece uma queda desses valores, com declive maior para os corpos de prova de poliestireno expandido, e no último, para valores acima desta temperatura, o comportamento de ambos torna-se igual novamente, com acréscimo da energia necessária para a fratura dos concretos (correspondentes a valores superiores a 70% da energia necessária a temperatura ambiente).

Os resultados obtidos por Monte, Bamonte e Gambarova (2015) ainda verificaram a redução da condutividade térmica, pois a temperaturas acima de 300 °C os espaços inicialmente ocupados pelos grânulos ficaram vazios, aumentando a porosidade do concreto.

Xu et al. (2016) acrescentam que a condutividade é independente do fator a/c, obtendo o valor de 0,40 W/m.K para amostras que substituíram 40% dos agregados por pérolas de 3 mm de diâmetro com relação água/cimento de 0,45. Todavia, a composição granulométrica, o teor de umidade, a densidade, a temperatura, a cura e a compactação do concreto interferem nessa propriedade térmica.

Em função disso, Demirboga e Kan (2012) estabeleceram uma relação direta entre o teor de EPS utilizado no concreto e capacidade de isolamento térmica proporcionada a ele, com aumento de até 70% quando se empregou o poliestireno expandido na forma de resíduos modificados por tratamentos térmicos.

Ferrándiz-Mas e García-Alcofel (2012) analisaram o comportamento acústico de argamassas produzidas com poliestireno expandido, verificando uma sensível variação no coeficiente de absorção da incidência sonora em função do tipo de EPS (com ou sem reciclagem) e do percentual de incorporação adotados.

2.3.2 Aplicações do concreto com EPS

Oliveira (2013) e Liu e Chen (2014) citam aplicações do concreto leve com EPS, como:

- Regularização de lajes com inclinação para escoamento de água;
- Painéis de fechamento de galerias, para edifícios, casas e galpões;
- Estruturas militares enterradas e offshore (estruturas marinhas flutuantes);
- Fundações como painéis cortina e de revestimento;
- Elementos para confecção de bancos externos e em áreas de lazer;
- Bases para dispositivos de exercícios e montagem de móveis;
- Elementos pré-fabricados como pilares para muros, elementos decorativos de fachadas e jardins, lajes (Figura 2.8) e blocos vazados ou maciços.

Figura 2.8 - Laje maciça e pré-moldada com pérolas de EPS.



Fonte: CATÓIA (2012).

Os blocos de concreto com EPS serão detalhados no próximo item em função da escolha deste produto para o estudo desenvolvido e descrito nesta dissertação.

2.4 Blocos de concreto

Os blocos de concreto apresentam particularidades em relação à maioria dos compósitos cimentícios. De acordo com Tango (1994), por possuir consistência de “terra úmida”, esse tipo de concreto não obedece a Lei de Abrams, que estabelece uma relação inversamente proporcional entre o fator a/c e a resistência adquirida para uma dada trabalhabilidade.

A resistência à compressão é a principal propriedade a ser avaliada, pois segundo o autor, ela estabelece íntima relação com a absorção e a durabilidade da alvenaria composta pelos blocos de concreto.

A respeito do processo produtivo, é necessário cuidado com o transporte dos blocos, evitando choques e vibrações adicionais que acarretem em fissurações ou desmoronamento dos mesmos.

A cura é outra etapa importante, pois se consegue em determinadas situações economias de energia e de materiais com a aceleração do processo (a altas temperaturas com ou sem elevação da pressão), apesar da sua execução a condições ambientes, com a manutenção da umidade dos blocos, proporcionarem bons resultados.

O adensamento dos blocos apresenta diferenças em comparação aos concretos tradicionais, pois, de acordo com Tango (1984), essa etapa produtiva ocorre pela atuação de forças compressivas (pressão) e de vibrações durante a moldagem, e que variam segundo o equipamento utilizado.

A NBR 6136 (ABNT, 2014) classifica os blocos estruturais de concreto, do tipo vazado, de acordo com suas dimensões nominais (expressas no Anexo C). A NBR 12118 (ABNT, 2013), similar a ASTM C140/C140M (ASTM, 2014), destinada aos métodos de ensaios direcionados a esses blocos para alvenaria, define que o controle de qualidade de determinada amostragem passa obrigatoriamente pela identificação das suas dimensões características como largura, altura e comprimento.

Além dessas dimensões, são considerados o raio de curvatura das mísulas, a fôrma e o diâmetro dos furos existentes para definição da área líquida do bloco, visto que a NBR 6138 (ABNT, 2014), similar a ASTM C55 (ASTM, 2014) aceita somente ocupações volumétricas iguais ou inferiores a 75% do valor total de um bloco maciço com iguais dimensões.

2.4.1 Propriedades dos blocos vazados de concreto

As aplicações dos blocos de concreto relacionam-se diretamente a sua resistência à compressão, dividindo-os em dois grupos: os estruturais e os destinados a vedação. A NBR 6136 (ABNT, 2014) ainda subdivide estes grupos em três classes, que são:

- A: blocos usados em construções abaixo do nível do solo, com resistência à compressão axial superior a 8 MPa;
- B: blocos com resistência aos 28 dias situada entre 4 e 8 MPa, e utilizados em edificações com ou sem função estrutural acima do nível do solo;
- C: blocos que apresentem resistência característica igual ou superior a 3 MPa, e que dependem da sua largura para definição de sua aplicação (quanto menor a dimensão mais adequada a funções de vedação).

A aparelhagem, velocidade de ensaio e tipo de retificação dos corpos de prova (via capeamento ou torneamento) adotados influenciam na determinação dessa propriedade. Deste modo, deve-se atentar para as prescrições descritas na NBR 12118 (ABNT, 2013).

Em relação ao controle tecnológico, a norma acima estabelece o valor estimado de resistência característica à compressão dos blocos, referindo-se à área bruta e ao conhecimento do desvio padrão, pela equação 1.

$$f_{bk,est} = f_{bm} - 1,65DP \quad (1)$$

Onde:

$f_{bk,est}$ – resistência característica (MPa);

f_{bm} – resistência média das amostras (MPa);

DP – desvio padrão das amostras (MPa).

Conforme mencionado anteriormente, as propriedades de resistência mecânica e desempenho térmico estão relacionados à densidade, pois para um determinado volume é possível obter pesos distintos para o concreto, em função dos vazios internos existentes.

Outra influência da densidade dos blocos refere-se ao dimensionamento estrutural das alvenarias, mas especificamente das fundações necessárias para suportar com segurança a

supraestrutura. A ASTM C55 (ASTM, 2014), classifica os blocos em três tipos de densidade em função do peso seco do concreto, de acordo com a tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação das densidades dos blocos de concreto.

Classificação da densidade	Densidade do concreto seco (kg/m^3) – Média de 3 unidades
Leve	1680
Médio	1680-2000
Normal	2000 ou mais

Fonte: ASTM C55 (ASTM, 2014a).

As massas de água presentes nos estados seco, saturado e aparente são de fundamental importância para avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos blocos, pois afetam diretamente no cálculo da área líquida e na retração por secagem, apesar da determinação dessa deformação ser opcional, segundo a NBR 6138 (ABNT, 2014).

A absorção depende da classe do bloco e o tipo de agregado usado (normais e leves). A determinação desta propriedade é obtida pela NBR 12118 (ABNT, 2013).

A umidade relativa estabelece a relação entre a quantidade de água presente no bloco pouco antes de submetê-lo ao ensaio de resistência com a sua massa saturada, podendo invalidar o resultado obtido na compressão axial.

Logo, para análise dos blocos se faz necessário reservar ao menos três exemplares (blocos-testemunho) que passaram pelos mesmos procedimentos de produção das amostras submetidas ao ensaio de compressão, mas que não são rompidos em função da determinação das propriedades físicas mencionadas (análise dimensional, absorção, teor de umidade e densidade).

2.4.2 Dosagem empírica dos blocos

A produção dos blocos no Brasil não conta com uma metodologia científica própria para sua dosagem, visto que o principal estudo referente ao assunto, publicado por Tango em 1994, adaptou um dos procedimentos utilizados em concreto plásticos (IPT) para definição de traços econômicos para blocos estruturais em virtude das matérias-primas adotadas.

O autor sugere, de acordo com a resistência à compressão ($f_{bd,28}$) e o traço escolhido (pobre, médio ou rico), a relação entre os agregados e o cimento que deverá ser utilizada,

conforme mostra a tabela 2.2. A trabalhabilidade e o bom aspecto superficial dos blocos também são levados em consideração na escolha dessa razão.

Tabela 2.2 – Relação entre os traços das misturas secas e as resistências estimadas.

$f_{bd,28}$ (MPa)	Traço rico (kg/kg)	Traço médio (kg/kg)	Traço pobre (kg/kg)
5,0	6,6	8,6	10,6
7,0	5,6	7,6	9,6
9,0	4,6	6,6	8,6
11,0	4,1	6,1	8,1
13,0	3,5	5,5	7,5
15,0	3,0	5,0	7,0

Fonte: TANGO (1994).

Após a escolha da relação agregados/cimento, parte-se para determinação da razão entre os agregados utilizados na mistura, por meio do ensaio de maior massa unitária da mistura. A metodologia usada para esse ensaio é composta pelas seguintes etapas:

- 1) Primeiro pesa-se um cilindro de volume conhecido para posterior determinação da massa de agregado graúdo necessária para o seu preenchimento;
- 2) Retira-se todo agregado graúdo do cilindro, depositando-o em outro recipiente;
- 3) Acrescenta-se nesse recipiente o agregado miúdo gradativamente (em função dos percentuais da massa total do agregado graúdo aferida inicialmente) e misturam-se os dois tipos de agregado até a sua homogeneização;
- 4) Preenche-se novamente o cilindro com a mistura (Figura 2.9) e afere-se a variação do peso até o máximo valor encontrado, obtendo o teor ideal entre os materiais.

Figura 2.9 - Ensaio de maior massa unitária para mistura dos agregados.



A determinação do teor de umidade ótima, ainda de acordo com Tango (1994), consiste em descobrir, através da introdução de pequenas quantidades de água a mistura seca, uma consistência propícia a moldagem de uma pelota de massa na mão, sem sujá-la consideravelmente (excesso de água), estabelecendo assim o fator água/cimento ideal para os blocos.

2.4.3 Blocos de concreto com EPS

Há poucas publicações relacionadas ao emprego do EPS em blocos. Refin (2016) estudou a resistência à compressão axial e a dosagem ideal para o uso desse polímero na forma de resíduos remodelados com características físicas distintas as das pérolas.

Xu et al. (2012) analisaram também a resistência cisalhante, os fatores que afetam a densidade dos blocos (que foram o volume de EPS, fator a/c e o teor de cimento, descritos em ordem crescente de influência), e a relação entre essas propriedades (por meio do Método de Taguchi), identificando uma melhoria na isolação térmica, absorção sonora e redução do peso próprio do concreto em função da presença do poliestireno expandido na mistura seca.

O estudo de Hernández-Zaragoza et al. (2013) abordaram a pré-saturação do poliestireno reciclado para produção de blocos celulares, e da sua relação com a umidade existente no local de estudo, constatando-se que a umidade do EPS interferiu negativamente na resistência das amostras, aumentando a densidade e absorção (Figura 2.10). Os autores também verificaram que o tipo de fratura ocasionado pelos esforços de compressão e tração era igual ao encontrado nos blocos com agregados usuais. Em virtude dessas informações, concluíram que o mais indicado seria o emprego em ambientes secos para uma melhoria nas propriedades do concreto leve.

Moreira et al. (2017) estudaram além das propriedades dos blocos com substituições parciais (20 e 30%) de brita por resíduos de poliestireno expandido, os custos envolvidos numa possível produção, verificando uma redução de 5,5% para fabricação desses blocos vazados estruturais com a adoção do maior teor de substituição empregado no trabalho.

Figura 2.10 - Bloco de concreto maciço com EPS.



Fonte: HERNÁNDEZ-ZARAGOZA et al. (2013).

2.5 Alvenaria com blocos de concreto

A alvenaria de blocos de concreto apresenta funções estruturais ou apenas de vedação, ao caracterizar-se como um Sistema de Vedações Verticais Internas e Externas (SVVIE). Este sistema se distingue pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013), responsável pelos níveis de desempenho de uma edificação (relacionados à segurança, habitabilidade e sustentabilidade).

Os critérios de análise consideram a estanqueidade à água, isolamento térmica e acústica, resistência ao fogo, capacidade de suporte a esforços de uso e de fixação de peças suspensas, durabilidade e manutenibilidade (SILVA, 2014), além da não interferência em outros sistemas, elementos e componentes existentes.

A segurança estrutural, segundo o autor, deve seguir as prescrições da NBR 15575-2 (ABNT, 2013), ao exigir que a alvenaria:

- Não perca a estabilidade ou venha a ruir;
- Promova segurança aos usuários sob a ação de impactos, choques, vibrações e outras solicitações previstas (em projeto) em função do uso do imóvel;
- Não provoque sensação de insegurança aos usuários por deformações da edificação;
- Não permita estados inaceitáveis de fissuração de vedação e acabamentos;
- Não prejudique o trânsito de partes móveis (como portas e janelas) e nem interfira no funcionamento das instalações em virtude de suas deformações;

- Cumpra as disposições da ABNT quanto às interações com o solo e a vizinhança da construção.

Os estados limites de serviço e último são analisados, ao considerar as solicitações de carregamento de maior probabilidade de ocorrência (cargas permanentes), além da ação das cargas de vento, recalques diferenciais, de temperatura (cargas acidentais e variáveis) e a sua capacidade em transmitir aos outros elementos estruturais da edificação.

A norma responsável pelos procedimentos práticos para a construção de uma alvenaria que atenda todas as exigências destacadas é a NBR 15961 (ABNT, 2011), dividida em duas partes, sendo a primeira relacionada à concepção do projeto e a segunda responsável por definir as diretrizes para execução e controle das obras.

Destaca-se também a verificação das características térmicas desses elementos construtivos. A NBR 15575-4 (ABNT, 2013) avalia o desempenho térmico de uma edificação pela determinação de dois parâmetros: a transmitância e a capacidade térmica das paredes externas, pois são onde ocorre a incidência da radiação solar.

A ABNT define, de acordo com as equações da NBR 15220-2 (ABNT, 2005), que a transmitância térmica é a fração de energia passante por determinado elemento (e é inversamente proporcional a resistência suportada pela incidência de uma fonte de calor) que depende diretamente do sentido do fluxo, da espessura do elemento estudado, da inércia térmica e configuração dos materiais utilizados. As equações 2, 3 e 4 são utilizadas para determinação desta propriedade.

$$U = \frac{1}{R_t} \quad (2)$$

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (3)$$

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (4)$$

Onde:

U - transmitância térmica ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$);

R e R_t - resistências térmicas do material e da parede ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$);

R_a , R_b , R_n - resistência térmicas de superfície a superfície da parede ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$);

A_a , A_b , A_n - áreas de cada material que compõe a parede (m^2);

λ – condutividade térmica do material de uma camada da parede (W/m.K);

e – espessura da camada do material (m).

A capacidade térmica refere-se, ainda segundo a mesma norma, à energia necessária para que um corpo analisado eleve em uma unidade a sua temperatura e é determinada em função dos mesmos fatores que afetam a transmitância, além de considerar o calor específico e a densidade de massa aparente dos componentes envolvidos, sendo representada pela equação 5.

$$C_t = \sum_{i=1}^n \lambda_i R_i c_i \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i c_i \rho_i \quad (5)$$

Onde:

C_t - capacidade térmica (kJ/m² K);

R_i - resistência térmica do material (m²K/W);

c_i – calor específico do material (kJ/kg.K);

ρ_i – densidade de massa aparente do material (kg/ m³).

Além do desempenho térmico, a NBR 15575-1 (ABNT, 2013) recomenda a análise das variações térmicas presentes em ambos os lados das paredes, identificando assim o conforto térmico proporcionado pelos materiais que compõem as edificações.

2.6 Conforto térmico

O ser humano é influenciado pelo ambiente que o cerca, visto que o seu organismo estabelece um fluxo de absorção e perda de calor para o estabelecimento do equilíbrio térmico, ao exigir a ativação de sistemas de defesa contra as variações de temperatura ocorridas ao longo do dia (PEDRA, 2011). Essa interação depende de alguns fatores como a temperatura e velocidade do ar e a temperatura radiante e a umidade relativa de acordo com Martins (2017).

Pedra (2011) expõe, através de estudos relacionados ao tema, que o conforto térmico proporcionado por uma edificação afeta na produtividade das atividades desenvolvidas pelo homem em seu interior. A mais emblemática das pesquisas, feita pela Comissão Americana de Ventilação em 1916, afirmou que a mudança de 20 para 24 °C resultou numa queda de 15% no desempenho relacionado aos trabalhos físicos, e o acréscimo da temperatura para 30 °C, com

umidade situada em 80%, gerou uma queda no rendimento de 28% em relação ao mesmo referencial.

Assim, Martins (2017) afirma ser obrigatório o conhecimento do clima, dos mecanismos de troca de calor e dos materiais da construção civil para obtenção de soluções que proporcionem o maior conforto térmico, levando em consideração, por exemplo, a inércia térmica da edificação em decorrência da zona bioclimática em que a mesma está inserida.

A inércia térmica, segundo Pedra (2011) trata da capacidade de absorção e liberação de calor das edificações. Baixas razões entre os calores absorvidos e armazenados indicam uma proximidade entre as temperaturas externa e interna, enquanto um valor que tende ao infinito está relacionado à constância no ambiente interno. Esta propriedade, de acordo com a autora, é dependente da capacidade térmica dos materiais envolvidos e é empregada para mensurar o atraso e a diminuição dos picos de calor.

A incorporação de uma engenharia que visa condições ambientais internas agradáveis aos seus usuários não gera acréscimos nos custos durante o uso, pois haverá redução nas despesas relacionadas à energia elétrica, além das facilidades com a conservação dos imóveis (MARTINS, 2017). No Brasil, a partir da vigência da NBR 15220 (ABNT, 2005), houve um aumento no número de pesquisas voltadas ao tema segundo a autora referenciada, definindo os fatores preponderantes que influenciam as edificações em função do clima da região.

2.6.1 Mecanismos de troca de calor

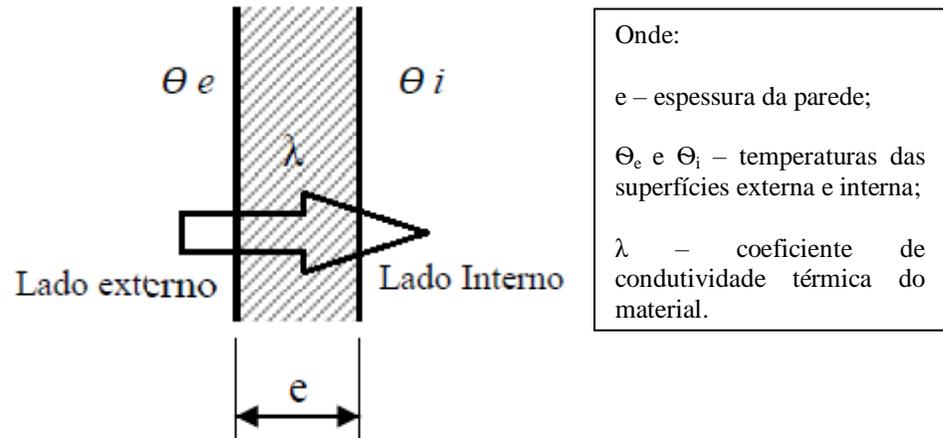
Antes de iniciar os projetos de edificações voltadas a fornecer uma resposta térmica ambiental, é necessário, segundo MARTINS (2017) o entendimento dos fenômenos de transferência de calor. Os principais mecanismos de troca de calor são: condução, convecção e radiação.

2.6.1.1 Condução

A condução está relacionada à transferência de energia de partículas mais agitadas para outras com menor quantidade energética em função da interação entre elas (MARTINS, 2017). Essa transferência pode se propagar em meio sólido ou fluido em níveis microscópicos. A

quantificação deste fenômeno é feita por equações ou taxas (energia transferida por unidade de tempo), de acordo com a autora, definidas através do conjunto em análise demonstrado na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Troca de calor por condução em uma parede.



Fonte: Adaptado de FROTA; SCHIFFER (2007).

O coeficiente de condutividade térmica é o avaliador do fluxo de calor constante para materiais isotrópicos e homogêneos, submetidos a um gradiente de temperatura de 1 K/m (NBR 15220-1, ABNT, 2005). Esse índice depende da densidade do material, da natureza química, da umidade e da temperatura e pressão para os gases (PEDRA, 2011; MARTINS, 2017).

De acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2005) e exposta na tabela 2.3, percebe-se que os metais são os maiores condutores de calor enquanto que o poliestireno expandido se adéqua no grupo dos isolantes térmicos.

Tabela 2.3 – Condutividade térmica dos materiais de construção.

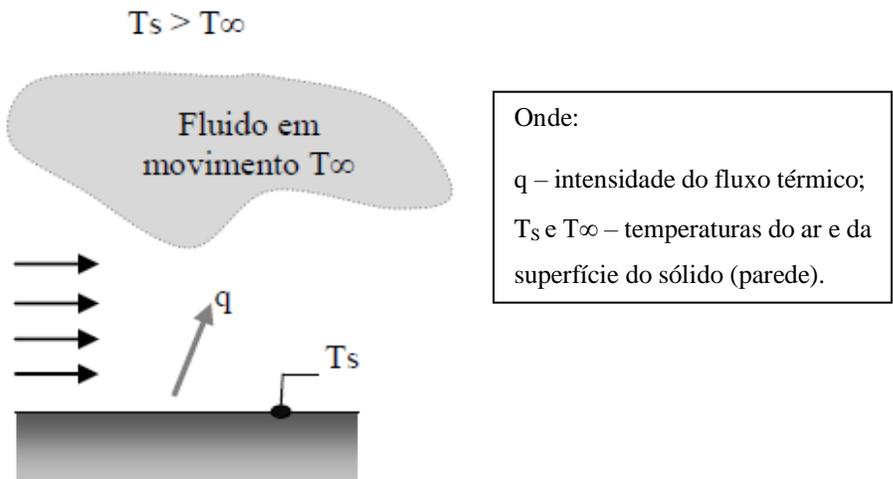
Material	λ [W/(m.K)]
Argamassa comum	1,15
Compensado	0,15
Tijolos e telhas de barro	0,7 a 1,05
Concreto com agregado de pedra	1,4 a 1,75
Areia seca	0,3
Isolantes térmicos – Poliestireno expandido moldado	0,04
Aço, ferro fundido	55
Brita ou seixo	0,7
Vidro comum	1

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

2.6.1.2 Convecção

A convecção ocorre pela troca de calor entre uma superfície (com maior temperatura) e um fluido em movimento com temperatura constante. São dois os mecanismos de transferência de energia: por movimento molecular aleatório, mais conhecido por difusão, ou pelo movimento global do fluido (PEDRA, 2011; MARTINS, 2017). A Figura 2.12 esquematiza essa troca.

Figura 2.12 – Troca de calor por convecção.



Fonte: INCROPERA; DEWWIT (2008).

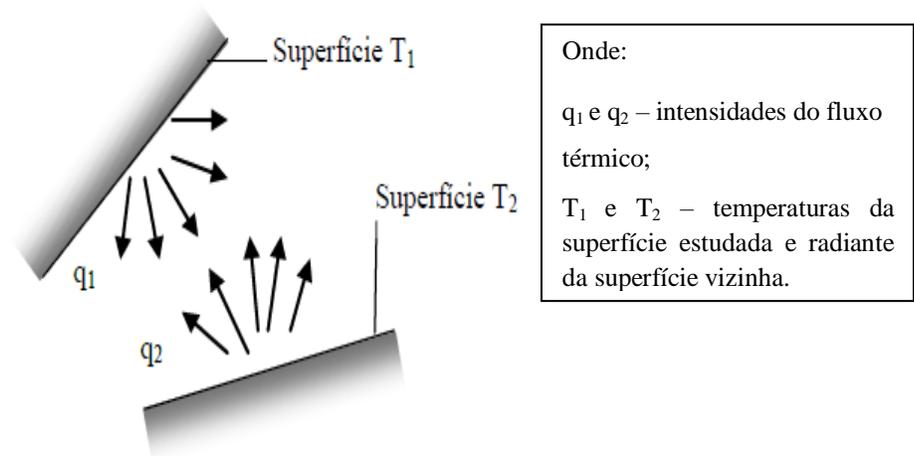
Caso o objeto estudado se encontre na vertical, as trocas de calor ocorrem em função do ar e considera-se como uma convecção forçada. Se a transferência ocorrer em um plano horizontal, são determinados valores médios de convecção entre os dois corpos devido à interferência dos fluxos ascendentes e descendentes das massas de ar (PEDRA, 2011). Martins (2017) afirma que a densidade, viscosidade, condutividade térmica e calor específico do fluido também interferem na convecção.

2.6.1.3 Radiação

A radiação é um fenômeno de transporte de energia que não necessita de meios específicos de propagação e ocorre instantaneamente, ao contrário do que é encontrado na condução e convecção, devido à emissão de ondas eletromagnéticas por superfícies com temperaturas diferentes de zero (MARTINS, 2017).

A radiação térmica é processada em duas etapas: uma parte do calor do corpo com maior temperatura transforma-se em energia radiante e atinge outro objeto com menor temperatura, que absorve certa quantidade dessa energia (dependendo de sua superfície de contato), e a converte em calor novamente. Ela pode ser gerada por uma fonte natural, como o sol, ou por outras superfícies que cercam a superfície estudada, artificialmente (PEDRA, 2011). A troca de calor por radiação entre dois corpos é mostrada na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Troca de calor por radiação térmica.



Fonte: INCROPERA; DEWITT (2008).

O coeficiente de trocas térmicas por radiação é influenciado, além da temperatura, pelos aspectos físicos e principalmente pela emissividade térmica da superfície, de acordo com a autora citada acima.

A radiação possui quatro formas de troca de calor que são: a emissão, referente à liberação de energia pela fonte; a absorção que trata da retenção dessas ondas eletromagnéticas pelo objeto de interesse; a reflexão, que compreende a reflexão sob a sua superfície da energia incidente e; a transmissão que indica sobre o transpasse de energia (PEDRA, 2011). Oliveira (2013) afirma que, para determinado comprimento de onda que chega a um material com certa transparência, a soma das frações absorvida (absortância), refletida (refletância) e transmitida (transmitância) será igual a uma unidade.

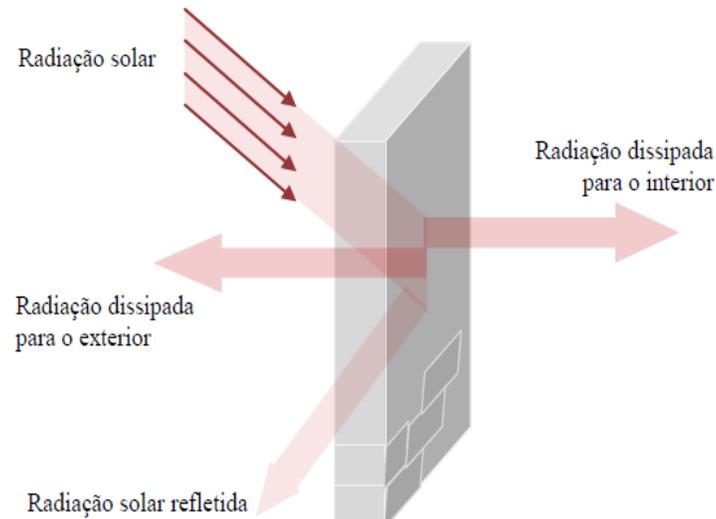
A capacidade de absorção de energia do corpo será a idêntica para emissão de sua própria transmissão de radiação infravermelha (ondas de comprimentos inferiores ao espectro visível formadas pela junção dos campos elétrico e magnético que se propagam no vácuo transportando energia) conhecida como emissividade (OLIVEIRA, 2013; PEDRA, 2011). A

emissividade de um material, segundo os autores, é comparada a de um corpo negro para uma dada temperatura, pois considera esse objeto como o ideal e com valor igual a 100%.

2.6.2 Detecção de variações térmicas em paredes opacas

Pedra (2011) afirma que as alvenarias quase sempre são compostas por materiais opacos (tijolos cerâmicos ou blocos de concreto), expostas a radiação solar e possuem diferenças de temperatura nos ambientes externo e interno que favorecem o surgimento dos mecanismos de transferência de calor, com parte da energia refletida e outra absorvida, resultando no aumento da temperatura da superfície externa e propiciando a emissão interna por transmissão na parede por condução (Figura 2.14). Essas trocas dependem da intensidade de radiação incidente e das características térmicas dos componentes atingidos por esta fonte de energia, conforme dito anteriormente.

Figura 2.14 – Mecanismo de troca de calor em uma parede opaca.



Fonte: FROTA; SCHIFFER (2007).

As interações térmicas entre os ambientes interno e externo servem para avaliação do desempenho térmico proporcionado por uma edificação (MARTINS, 2017). Destacam-se duas metodologias de análise desse estudo: a simulação computacional e a termografia infravermelha.

2.6.2.1 Simulação computacional

A NBR 15575-1 (ABNT, 2013) recomenda a avaliação do desempenho térmico da edificação como um todo pelo método da simulação computacional, quando os resultados individuais encontrados para os materiais que compõem os sistemas de vedação não atendem os limites impostos pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013). A simulação é validada mediante o emprego de programas computacionais específicos validados pela ASHRAE.

Os fatores considerados para avaliação são:

- Localização geográfica e dados climáticos correspondentes aos dias típicos de projeto de verão e inverno;
- Admissão de zona térmica específica para cada ambiente da edificação, tornando-se necessário o conhecimento das propriedades térmicas dos seus componentes (via ensaios laboratoriais ou pelos cálculos da NBR 15220-2 (ABNT, 2005)), caso os mesmos sejam considerados para a análise;
- Aferição das trocas de calor entre os ambientes da unidade habitacional, principalmente os dormitórios e salas. Adota-se para os recintos adjacentes, oriundos de paredes de geminação ou entrepisos, a mesma condição térmica da área simulada;
- Seleção da unidade com maior número de paredes expostas à radiação solar para conjuntos habitacionais de edificações térreas. Em edifícios multipisos seleciona-se o último andar, se o mesmo possuir cobertura exposta.

A unidade habitacional com as condições mais críticas do ponto de vista térmico será escolhida como a característica para implantação da edificação em função da sua orientação, obedecendo aos critérios limitados pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013) quanto às temperaturas nos ambientes internos em dias de verão e inverno típicos, aberturas de ventilação, obstrução da ação solar e do vento, e absorvância das paredes.

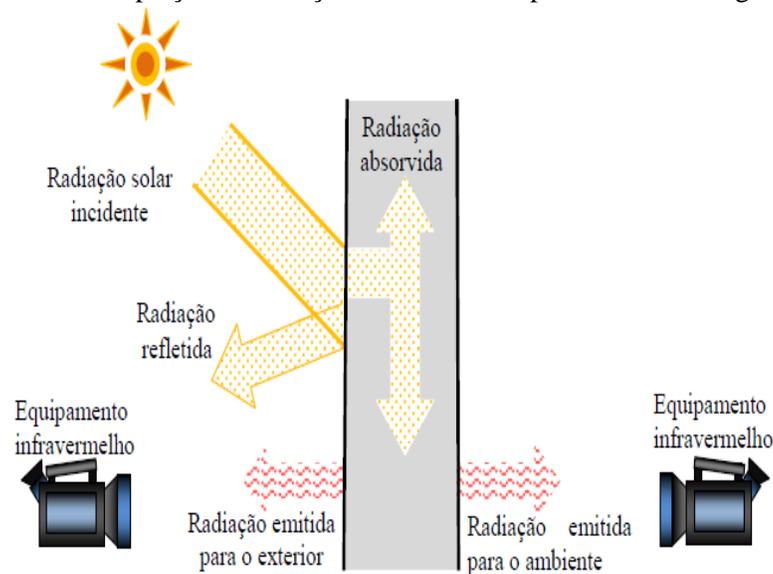
Caso não se chegue aos resultados adequados, será necessário fazer uma nova simulação com obediência às prescrições descritas no subitem 11.5.2 da referida norma.

2.6.2.2 Termografia infravermelha

A termografia opera na faixa de espectro invisível aos olhos humanos por meio de equipamentos (analógicos ou digitais) dotados de detectores radioativos, amplificadores de sinais e processadores, que transformam a energia emitida pelas superfícies analisadas em imagens térmicas. Os detectores captam a radiação térmica e a converte em sinais elétricos baixos e proporcionais ao fluxo radioativo, que são amplificados, lidos e processados por meio de softwares, transformando-os em termogramas (PEDRA, 2011; OLIVEIRA, 2013).

Os detectores são as câmeras termográficas que possuem, de acordo com os autores, lentes intercambiáveis que decodificam a radiação infravermelha em tons claros e escuros, conforme demonstrado na Figura 2.15.

Figura 2.15 – Captação de radiação infravermelha por câmera termográfica.



Fonte: FROTA; SCHIFFER (2007).

A termografia depende da aplicação e dos objetos estudados e, de acordo com Pedra (2011) e Oliveira (2013), é dividida em três segmentos distintos:

- Qualitativa: produz informações resultantes da análise de diferenças dos padrões de distribuição térmica em um único material;
- Quantitativa: analisa as medições diretas das temperaturas relacionadas aos padrões de distribuição observados em um objeto por intervalos definidos;

- Analítica: dedica-se a melhoria da metodologia de inspeções, tratamento estatístico dos resultados e associação em termos econômicos e de conforto proporcionados.

A captação da imagem pode ocorrer com ou sem a presença de mecanismos que resfriem ou aqueçam o corpo analisado para emissão de radiação (OLIVEIRA, 2013). Quanto à forma de estimulação, o autor classifica as técnicas termográficas em passiva e ativa.

A termografia passiva não conta com estimulações artificiais (tendo o calor do sol como fonte de calor) e apenas analisa, de acordo com Oliveira (2013), a temperatura do objeto estudado em relação ao ambiente em que o mesmo se encontra (e que geralmente possui temperatura superior a superfície analisada). Pedra (2011) afirma que essa técnica é usada para avaliação de estruturas prediais em função do estudo das fachadas, conforto ambiental, inspeções de deteriorações, defeitos e delaminações em concreto.

A termográfica ativa necessita do emprego de fontes artificiais de energia que proporcionem diferenças relevantes de temperatura (OLIVEIRA, 2013). Aplica-se essa técnica, segundo Pedra (2011), na busca por valores quantitativos, onde a forma de estimulação usada possui características e limitações próprias, direcionadas ao tipo de informação a ser pesquisada, sendo dois os tipos mais usados: pulsada e modulada.

A estimulação pulsada consiste, segundo a autora, na aplicação de pulsos curtos de energia térmica na superfície do objeto, que podem aquecê-lo ou resfriá-lo, no intuito de gerar gradiente de temperatura entre a fonte e o objeto. A autora também relata que a estimulação modulada fornece aquecimento oscilante com ondas térmicas atenuadas e dispersivas.

Oliveira (2013) atenta que sempre se deve considerar a distância do objeto analisado quando a termografia é empregada em ambientes externos, visto que para medições efetuadas a distâncias superiores a 10 m são necessárias correções. Existem ainda, segundo o autor, outros fatores que influenciam a medição dos ensaios termográficos como as variações da pressão atmosférica, a incidência solar, a umidade relativa, a temperatura ambiente, vento, as correntes de ar e a presença de luzes artificiais.

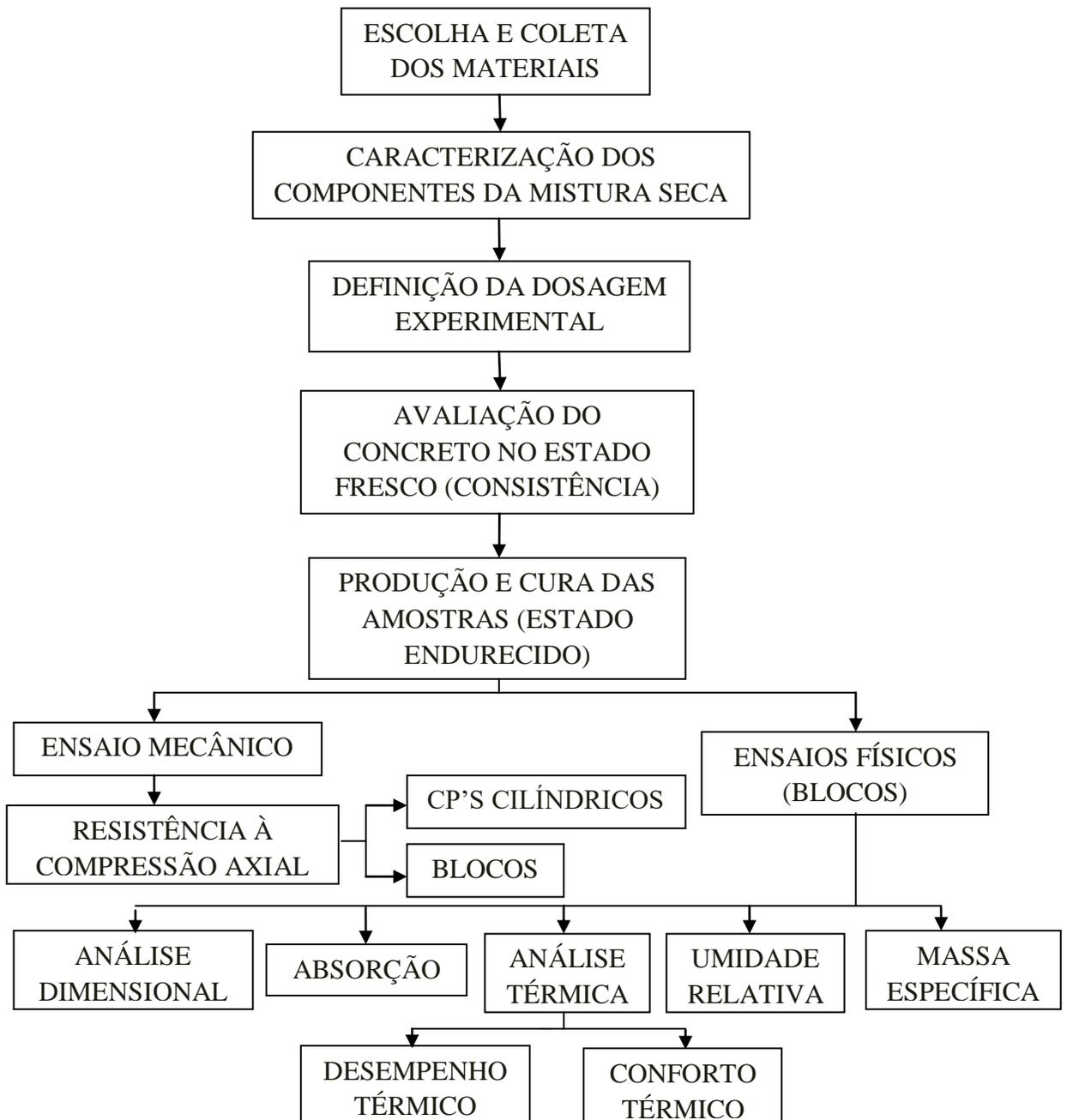
Além das aplicações descritas anteriormente, o autor indica o emprego da termografia em testes de eficiência energética. Há poucos estudos no Brasil relacionados ao conforto térmico devido, as condições climáticas e aos custos envolvidos nesse tipo de análise térmica (PEDRA, 2011). Contudo, os autores acreditam esta técnica de análise térmica é promissora e terá uma grande aceitação para a manutenção das futuras edificações.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Programa experimental

As atividades desenvolvidas durante a parte prática da pesquisa foram organizadas de acordo com o fluxograma da Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma do programa experimental.



3.2 Escolha e coleta dos materiais

Os blocos produzidos tiveram como componentes para a mistura seca:

- Cimento Portland comum (CP I-S 40);
- Areia natural de rio peneirada (malha com abertura de 2,36 mm);
- Brita de origem granítica;
- Grânulos de EPS reciclados¹ (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Amostras de EPS reciclado.



O cimento utilizado foi escolhido em função de sua composição (baixos teores de adições/aditivos), além de ser um dos aglomerantes hidráulicos mais consumidos em Manaus. A respeito do agregado graúdo, foi empregada a brita, em virtude de sua resistência à compressão, granulometria e seu formato que favorece a boa aderência mecânica com a matriz cimentícia. Contudo, geralmente se emprega na região o agregado conhecido como areião² para preenchimento dos vazios nos blocos juntamente com a areia de rio.

A coleta dos resíduos de EPS (produzidos no Pólo Industrial de Manaus) no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LaMAC) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), foi procedida de uma a pré-avaliação visual das amostras para identificação de possíveis contaminações que inviabilizasse a sua caracterização.

¹ Há desconhecimento do tipo de reciclagem mecânica (parcial ou completa) empregado por falta de comunicação com a empresa responsável pelo seu processo produtivo.

² O areião é o produto do peneiramento do seixo rolado, com granulometria superior a da areia e inferior a brita 0. É utilizado também em serviços de perfuração de poços artesianos e fabricação de pisos *korodur*.

A análise dos aspectos superficiais das amostras de EPS reciclado (Figura 3.2) mostrou uma heterogeneidade em relação às usuais pérolas, com grânulos divididos em dois tipos: aqueles que conservaram a textura original do polímero e outros que sofreram vitrificação. Na classificação das partículas também surgiram diferenças, pois os grânulos do poliestireno expandido reciclado se apresentavam em dois formatos: angulosos e lamelares, segundo as definições de Neville (2016), enquanto que nas pérolas a forma era regular (esférico).

Os outros materiais foram adquiridos posteriormente em centros comerciais (areia e cimento) e em um depósito de uma empresa exploradora de uma jazida localizada em Presidente Figueiredo (brita), sem análises preliminares as suas respectivas caracterizações.

3.3 Caracterização dos componentes do concreto

3.3.1 Cimento Portland

3.3.1.1 Composição química

Existem diversas técnicas para a determinação da composição química do cimento. O exame microscópico do pó por meio do índice de refração e a difração por raios X são meios muito utilizados para esta análise. Porém, segundo Neville (2016), existem processos mais sofisticados e mais rápidos como a fluorescência de raios X (FRX).

Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM), em um espectômetro de dispersão de energia de raios X, modelo Epsilon 3 XL, da marca PANalytical (Figura 3.3), adotando os seguintes parâmetros:

- Elemento do ânodo do tubo: Ródio;
- Espessura da janela do tubo: 50 μm ;
- Número de amostras ensaiadas: 10;
- Tensão máxima: 50 kV;
- Corrente máxima: 3 mA.

Figura 3.3 – Espectômetro usado para ensaio de fluorescência.



Em alguns países, segundo Neville (2016), verifica-se também o fator de saturação de cal por meio da equação 6, para suposição do comportamento do concreto.

$$FSC = \frac{1,0(CaO) - 0,7(SO_3)}{2,8(SiO_2) + 1,2(Al_2O_3) + 0,65(Fe_2O_3)} \quad (6)$$

Onde:

FSC – fator de saturação de cal;

CaO – óxido de cálcio;

SO₃ – trióxido de enxofre;

SiO₂ – dióxido de silício;

Al₂O₃ – óxido de alumínio;

Fe₂O₃ – óxido de ferro (iii).

3.3.1.2 Índice de Finura

A determinação da finura do cimento para identificação de possíveis grãos hidratados presentes no lote utilizado e que poderiam interferir na avaliação de outras propriedades, principalmente a resistência à compressão, motivaram a realização deste ensaio, obedecendo a NBR 11579 (ABNT, 2012), empregando a peneira n° 200.

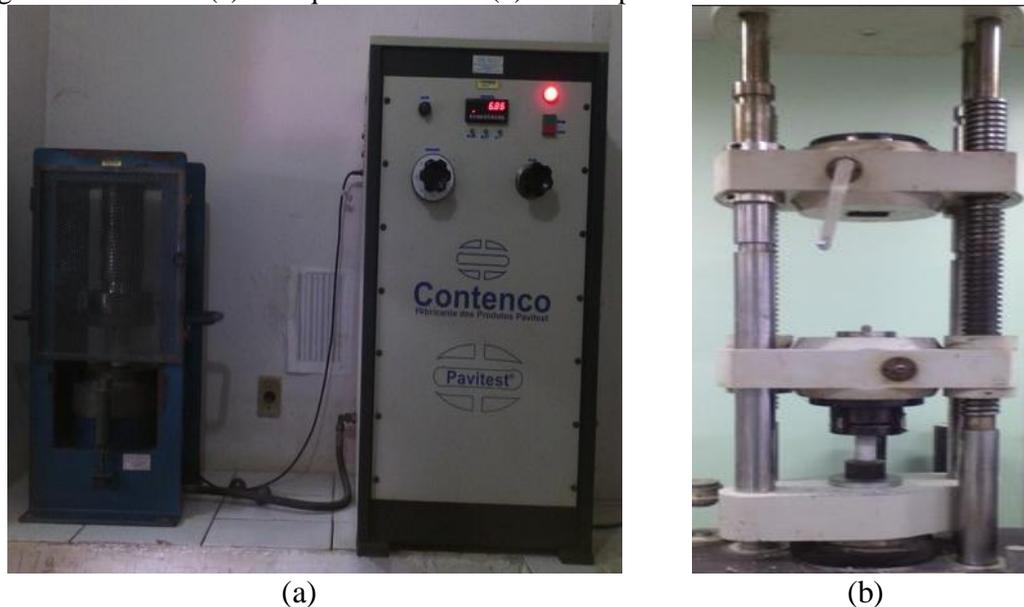
3.3.1.3 Tempo de pega

O ensaio adotado para determinação do tempo de pega baseou-se nos procedimentos descritos inicialmente pela norma brasileira e MERCOSUL (NBR NM) 43 (ABNT, 2002), para determinação da consistência normal da pasta, e parcialmente na NBR NM 65 (ABNT, 2003) devido a ausência da agulha responsável pela medição do início da pega no Laboratório de Dosagens, necessitando de adaptações para validação do experimento.

3.3.1.4 Resistência mecânica

A norma adotada para a resistência à compressão do cimento foi a NBR 7215 (ABNT, 1996). Os equipamentos usados foram uma prensa elétrica (Figura 3.4.a) da empresa Usemix, e uma máquina universal (Figura 3.4.b) pertencente à Universidade do Estado do Amazonas (UEA), ambas da marca Contenco e com capacidade de carga de 100 toneladas. O ensaio foi repetido mais duas vezes em função dos resultados obtidos inicialmente.

Figura 3.4 – Prensa (a) e máquina universal (b) usados para ensaio de resistência do cimento.



3.3.1.5 Massa específica

De acordo com Formagini (2005), para definição do melhor empacotamento de misturas secas para concretos é obrigatório o conhecimento da massa específica dos materiais envolvidos.

Para o caso do cimento e outros pós há equipamentos como o picnômetro (adotado no subitem 3.3.2.1) que são utilizados para determinação desta propriedade. Contudo, com a publicação da NBR NM 23 (ABNT, 2001), utilizou-se o frasco de Le Chatelier (Figura 3.5) para determinação deste índice físico.

Figura 3.5 – Frasco de Le Chatelier.



3.3.1.6 Granulometria a laser

Ainda de acordo com Formagini (2005), há também obrigatoriedade do conhecimento da distribuição granulométrica dos componentes dos blocos, realizando-se com isso a granulometria por difração a laser no cimento, em circunstância de sua granulometria ser muito fina, o que dificultaria o emprego de outras técnicas.

Para a realização da análise granulométrica, as amostras de cimento foram inseridas em um béquer com 800 ml de álcool etílico (e com 95% de pureza), para posteriormente serem transportadas para o granulômetro (atingindo uma obscuridade de 6,23%). O ensaio foi executado na Companhia de Pesquisa de Recursos Mineirais (CPRM) em um equipamento da marca Malvern, modelo Mastersize 2000 (Figura 3.6) com as seguintes características:

- Índice de refração da partícula: 1,36;
- Índice de absorção de partícula: 0,1;
- Índice de refração do dispersante: 1,36.

Figura 3.6 – Equipamento utilizado para granulometria do cimento.

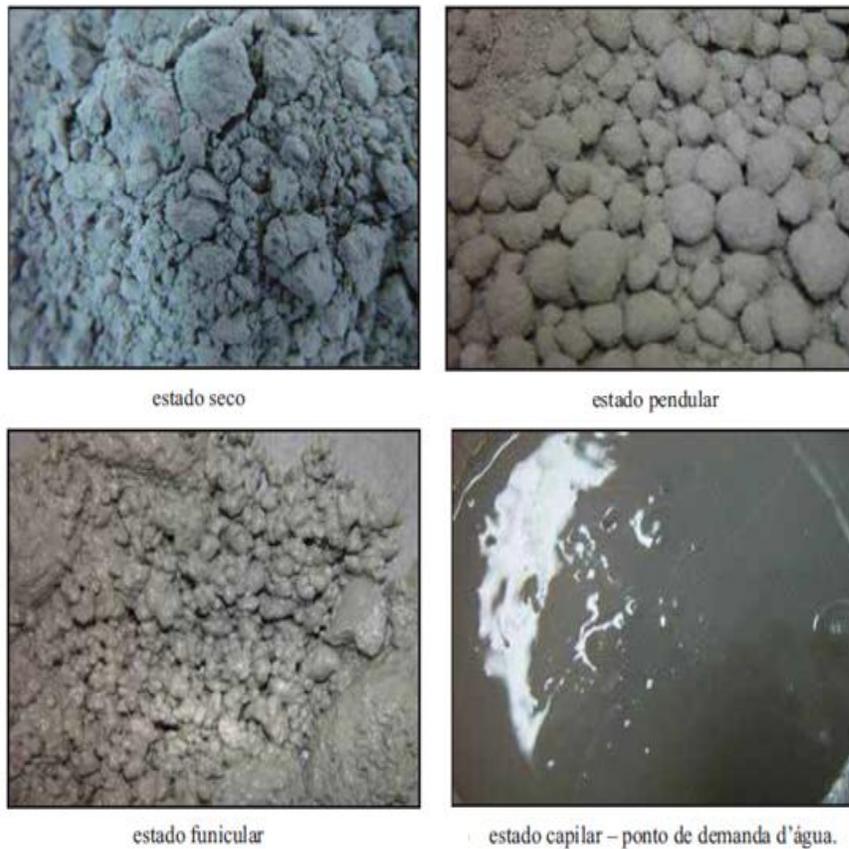


3.3.1.7 Demanda de água

A compacidade de um material está relacionada à ocupação do volume de suas partículas em relação ao volume unitário. Para a utilização do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), é fundamental descobrir a compacidade do material fino ($d < 100 \mu\text{m}$) utilizado na mistura. De Larrard (1999) verificou que adicionando água ao cimento até surgir uma pasta homogênea, com preenchimento de todos os vazios presentes entre os seus grãos e que proporcionasse a fluidez e mobilidade dos mesmos, obteria o melhor método de empacotamento (com índice de compactação $K_c = 6,7$) para este material, o que originou, segundo Formagini (2005), o ensaio de demanda de água.

O cimento, de acordo com De Larrard (1999), possui quatro estados que se distinguem justamente pela quantidade de água em contato com o mesmo: seca, pendular, funicular e capilar (Figura 3.7). O objetivo do ensaio de demanda de água é chegar ao início do último estado, pois é quando se atinge o ponto de saturação, ou seja, incrementos de água a partir deste ponto produzirão afastamento entre os grãos e favorecerão a diminuição da compacidade e o aumento da fluidez da pasta. A mudança de um estado para outro varia, segundo Formagini (2005), em função da geometria dos grãos, da distribuição granulométrica, da interação do material com o líquido e de outras propriedades físicas e químicas.

Figura 3.7 – Estados de umidade do cimento.



Fonte: FORMAGINI (2005).

A execução deste ensaio, de acordo com Formagini (2005), consiste nas seguintes etapas:

- Pesar 350 g do material completamente seco em uma balança com precisão de 0,01 gramas;
- Colocar todo o material no misturador de bancada (Figura 3.8) e adicionar metade da água prevista para atingir o ponto de saturação;
- Ligar o misturador em velocidade média e adicionar uma pequena quantidade de água em intervalos pré-estabelecidos de um minuto até se formarem “aglomerados” de cimento;
- Deixar a mistura repousar por 30 segundos, aproveitando este tempo para raspar o recipiente com a espátula;
- Religar o misturador em velocidade alta por aproximadamente 1 minuto e ir adicionando água;

- Terminar o ensaio quando uma pasta homogênea e adensada se formar no fundo do recipiente, anotando-se o consumo total de água necessária para atingir este estado.

Figura 3.8 – Misturador e pisete usado para demanda de água.



De posse do consumo total de água, determina-se a compacidade por meio da equação 7.

$$C = \frac{1}{1 + m_e \cdot \frac{M_{H_2O}}{M}} \quad (7)$$

Onde:

C – compacidade experimental do cimento;

m_e – massa específica do material (g/cm^3);

M_{H_2O} – massa de água total na mistura (g);

M – massa do material (g).

3.3.2 Agregados

3.3.2.1 Densidade real e massa específica aparente

Pelo fato do poliestireno expandido ser um material leve, de pequenas dimensões e não possuir uma normatização quanto à determinação da sua massa específica, a densidade e o

volume real do EPS reciclado foram obtidos por meio do uso de um picnômetro, modelo Ultracycrometer 1000 da fabricante Quantachrome, analisando-se cinco amostras.

A análise da densidade real foi desenvolvida sob as seguintes condições de operação do equipamento e de ensaio:

- Temperatura do condicionador de ar: 25 °C;
- Preparação das amostras: 14 h em estufa ventilada à 60 °C;
- Volume da célula: 149,11 cm³;
- Volume de referência: 87,95 cm³;

A equação 8 foi adotada para a determinação do volume das amostras.

$$V_a = \frac{V_c - V_r}{\frac{P_1}{P_2} - 1} \quad (8)$$

Onde:

P_1 – pressão medida depois da pressurização do volume de referência (psi);

P_2 - pressão medida depois de incluída V_c (psi);

V_a – volume da amostra (cm³);

V_c – volume da porta da amostra (cm³);

V_r – volume de referência (cm³).

As determinações das massas específicas dos outros agregados utilizados na mistura obedeceram às orientações da NBR NM 52 (ABNT, 2009) para a areia, e da NBR NM 53 (ABNT, 2009) para a brita.

3.3.2.2 Distribuição granulométrica dos agregados

A montagem das curvas granulométricas, com identificação dos percentuais retidos em cada peneira, a dimensão máxima característica (DMC) e o módulo de finura (MF) foram obtidas por meio do ensaio de peneiramento das amostras, obedecendo às principais diretrizes impostas pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Figura 3.9 – Conjunto de peneiras para granulometria dos agregados.



O conjunto (Figura 3.9) utilizado era composto pelas peneiras da série normal a partir da abertura de malha de 19,1 mm (ou $\frac{3}{4}$ "), incluindo a de abertura de 12,5 mm (ou $\frac{1}{2}$ "") da série intermediária.

3.3.2.3 Índice de Forma

Para agregados graúdos de dimensão máxima característica (DMC) superior a 9,5 mm empregados em estruturas de concreto, torna-se obrigatório determinar o seu índice de forma através do método do paquímetro, seguindo quase todos os procedimentos prescritos pela NBR 7809 (ABNT, 2006), com exceção da amostragem adotada (análise de 65 grânulos ao invés de 200 conforme estipula a norma). A pré-análise visual destacada no item 3.2 também contribuiu para execução do ensaio.

3.3.2.4 Teor de absorção

A avaliação dos teores de absorção da areia, brita e do poliestireno reciclado pela comparação com os limites recomendados na revisão de literatura (capítulo 2), ocorreu em verificação à possível necessidade de compensar a água de amassamento devido a excessos de absorção por parte dos agregados adotados.

Para a determinação dos resultados adotou-se a NBR NM 30 (ABNT, 2001) para o agregado miúdo que trata apenas da umidade superficial, enquanto que a NBR NM 53 (ABNT, 2009) destinou-se ao estabelecimento do teor de umidade total presente nos agregados graúdos.

3.3.2.5 *Massa unitária e índice de vazios*

O ensaio referente a estas propriedades está descrito na NBR NM 45 (ABNT, 2006). O recipiente (Figura 3.10) onde as amostras foram ensaiadas possuía 25,5 cm de diâmetro médio por 36 cm de altura, resultando num volume aproximado de 18 dm³, atendendo a norma citada. A execução desse ensaio referiu-se à provável influência da reciclagem na alteração dos vazios internos presentes nas amostras de EPS.

Figura 3.10 – Cilindro metálico usado para massa unitária.



3.3.2.6 *Teor de umidade*

A norma que regulamento o ensaio de teor de umidade para os agregados miúdos é a NBR 9775 (ABNT, 2011), enquanto que para os agregados graúdos é a NBR 9939 (ABNT, 2011). Nesta análise utilizou-se a estufa da marca Fanem, modelo 315 SE, com capacidade de aquecimento de 300 °C.

A determinação do teor de umidade total no EPS reciclado necessitou das seguintes modificações em relação ao que preconiza a NBR 9939 (ABNT, 2011):

- I. Redução da temperatura da estufa para valores abaixo de 100 °C devido ao seu baixo ponto de fusão, pois a temperaturas próximas de 200 °C verificou-se que o material começou a amolecer (Figura 3.11);
- II. Utilização de amostras com massa inferior ao mínimo exigido em função da capacidade da estufa;
- III. Redução do tempo de análise da massa constante para 1 h em relação às duas primeiras amostras e 30 min. para última devido às mesmas explicações ditas no primeiro item.

Figura 3.11 – Aspecto do EPS reciclado a uma temperatura acima de 200 °C.



3.3.2.7 Teor de materiais deletérios ao concreto

Segundo Neville (2016) a presença de torrões de argila e materiais friáveis em teores acima do recomendado pela NBR 7211 (ABNT, 2009) afeta diretamente a resistência do concreto, além da alta demanda de água. A norma responsável é a NBR 7218 (ABNT, 2010).

Quanto à presença de materiais pulverulentos e impurezas orgânicas, o autor destaca que há interferência na consistência do concreto, na aderência da pasta com o agregado graúdo, na pega e no seu endurecimento. As normas que tratam dos procedimentos de ensaio para a determinação dos teores presentes nos agregados são a NBR NM 46 (ABNT, 2003), enquanto que a NBR NM 49 (ABNT, 2001) avalia o grau de impureza presente.

Os ensaios responsáveis pela determinação dos índices de materiais prejudiciais ao concreto não foram executados no EPS reciclado devido às seguintes justificativas:

- I. Por se tratar de um produto artificial, o mesmo não possuía contato com impurezas orgânicas ou torrões de argila, conforme pré-análise visual descrita no item 3.2;
- II. Em relação ao teor de materiais friáveis ou pulverulento, a NBR 7211 (ABNT, 2009) estabelece um limite máximo na situação mais desfavorável de 3% em relação à massa da amostra ensaiada. Porém da análise granulométrica (capítulo 4), constatou-se que o percentual acumulado no fundo era muito inferior a este limite.

3.3.2.8 Compacidade experimental

A determinação do melhor empacotamento para partículas com dimensões acima ou igual a 100 μm foi realizado por meio de um experimento que utiliza energia de prensagem e vibração, ao fornecer um índice de compactação superior ao descrito no subitem 3.3.1.7 ($K_c = 9$). O ensaio consiste basicamente em inserir certa quantidade dos agregados separadamente (3 kg para areia e 7,5 kg para a brita) em um cilindro metálico padronizado (com diâmetro de 160 mm por 305 mm de altura), submetendo-os em um determinado intervalo de tempo, a ação de pressão (por meio de um pistão) e vibração constantes. Baseado no ensaio executado por Formagini (2005), as etapas para o procedimento experimental foram:

- Inserir a massa do material seco ao cilindro acoplado sobre uma mesa vibratória;
- Introduzir no cilindro um pistão maciço com peso aproximado de 200 N para provocar uma pressão de 10 kPa sobre o material (Figura 3.12);
- Fazer a leitura da posição inicial do pistão por intermédio de um paquímetro ou outro instrumento de medição;
- Submeter o cilindro a vibração na mesa vibratória por 3 minutos, a uma frequência de 68 Hz;
- Após a vibração, medir novamente a altura do pistão, referente à camada final do material compactado.

Figura 3.12 – Equipamentos para compactação real.



Ao determinar o tamanho da camada compactada do material em estudo, determinou-se a sua compactação real com o emprego da equação 9.

$$C = \frac{4M_s}{\pi D_c^2 h \rho_s} \quad (9)$$

Onde:

C – compactação do agregado;

M_s – massa do material seco (g);

D_c – diâmetro interno do cilindro (cm);

h – altura final da camada compactada (cm);

ρ_s – densidade do material (g/cm^3).

As amostras de EPS reciclado não foram submetidas a esse ensaio devido sua fragilidade e pelo experimento ter sido desenvolvido apenas para os outros agregados, sem registros referentes à adaptação de massa (em circunstância do peso específico do poliestireno expandido reciclado ser diferente do encontrado na brita) que deveria ser usada para fornecer resultados confiáveis.

3.1.1 Água de amassamento

A água empregada para as diversas misturas realizadas nesta pesquisa era da rede de abastecimento do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM), que tem sua origem em um poço artesiano localizado no Campus Universitário. Como a NBR 15900-1 (ABNT, 2009) permite a utilização de água potável para utilização em concretos, não foram realizados ensaios para sua caracterização, verificando apenas se haviam evidências de materiais orgânicos ou outras substâncias nocivas aos blocos de concreto por meio de inspeção visual durante as etapas de dosagem e mistura.

Dosagem experimental dos blocos

3.1.2 Definição da mistura seca do concreto

Inicialmente definiu-se o consumo dos materiais secos do compósito pelo MEC, empregado tradicionalmente em concretos de alta resistência. Como outrora mencionado, essa metodologia foi desenvolvida por De Larrard (1999) e visa, segundo Formagini (2005), à máxima compactidade de grãos de tamanhos distintos em função de dois segmentos: um oriundo de equações destinadas a descobrir o melhor agrupamento dos grãos (empacotamento virtual) e; outro por procedimento físico de compactação dependente da granulometria trabalhada (vibração, pilonamento, entre outros), relacionando-os por meio de um índice de compactação (K_c).

O MEC, de acordo com Formagini (2005), pode ser empregado para a determinação das frações volumétricas ou em massa que apresentem o maior empacotamento das partículas de “M” materiais compostos por “n” classes cada um. Para isso, considera-se que a quantidade de classes (faixas de tamanhos das partículas) será fixa para todos os componentes, preenchidas por composições distintas devido às diferentes granulometrias que cada elemento possui. De posse desses dados calcula-se a compactidade virtual por meio da equação 10.

$$\gamma^{(m,i)} = \frac{\beta_{mi}}{1 - \sum_{k=1}^M \left\{ \sum_{j=1}^i \left[1 - \beta_{mi} + b_{ij} \beta_{mi} \left(1 - \frac{1}{\beta_{kj}} \right) p_k y_{kj} \right] + \sum_{j=i+1}^n \left[1 - a_{ij} \left(\frac{\beta_{mi}}{\beta_{kj}} \right) p_k y_{kj} \right] \right\}} \quad (10)$$

Onde:

γ – compacidade virtual da mistura;

y - fração volumétrica da classe;

i – classe adotada;

m, k - materiais utilizados;

β – compacidade virtual de classe;

a - coeficiente do efeito de afastamento entre os grãos de classe distinta;

b - coeficiente do efeito de parede entre os grãos de classe distinta.

Os coeficientes mencionados na equação 10 se relacionam ao efeito de afastamento dos grãos, que são os deslocamentos dos grãos maiores em função da inserção de partículas menores, causando um “afrouxamento da vizinhança”, e ao efeito de parede, que é uma perturbação causada pela introdução de grãos maiores em locais onde há predominância de grão com tamanhos inferiores, ocasionando vazios na interface de contato entre eles.

As funções que melhor apresentam ajustes em relação aos valores práticos para essas interações estão expressas nas equações 11 e 12.

$$a_{ij} = \sqrt{\left[1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1,02}\right]} \quad (11)$$

$$b_{ij} = \sqrt{\left[1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^3\right]} \quad (12)$$

Onde:

d – dimensão das partículas;

i, j – classes de interação.

Formagini (2005) afirma que a compacidade virtual do agregado graúdo (β) sofre a influência do efeito de parede do cilindro utilizado para o ensaio de compacidade real, mesmo que a razão entre o diâmetro do recipiente e o DMC da brita seja superior a cinco (Figura 3.13). Logo, para consideração deste efeito, calculou-se o volume perturbado (V_p) que abrange uma

distância igual à metade da dimensão médio do agregado ($d/2$), de acordo com a equação 13.

$$V_p = 1 - \left[\left(1 - \frac{d}{h}\right) \left(1 - \frac{d}{D_c}\right)^2 \right] \quad (13)$$

E com isso, a compacidade virtual do volume perturbado em função do volume total foi calculada pela equação 14.

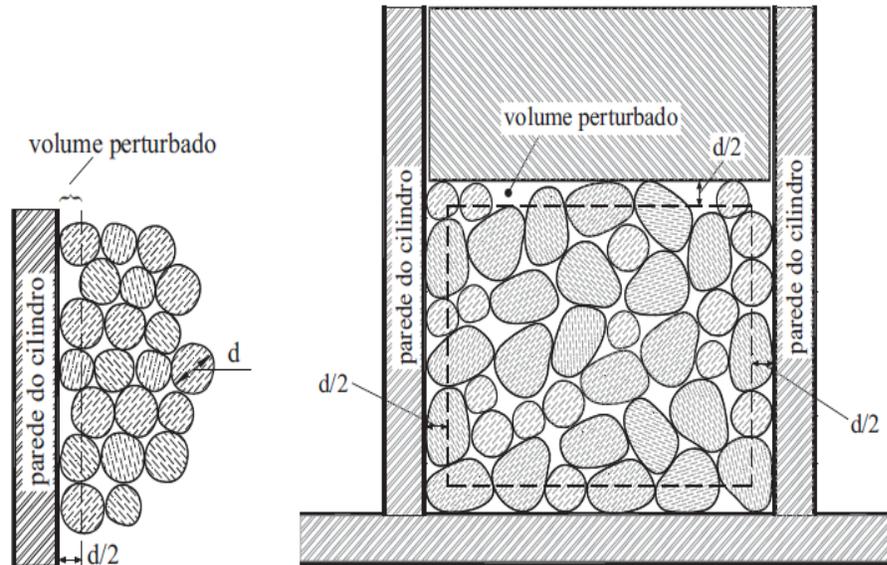
$$\bar{\beta} = (1 - V_p)\beta + V_p k_w \beta = [1 - (1 - k_w)V_p]\beta \quad (14)$$

Onde:

$\bar{\beta}$ - compacidade virtual média de empacotamento;

k_w - coeficiente do efeito de parede em função da forma dos grãos.

Figura 3.13 – Efeito de parede sobre os grãos.



Fonte: FORMAGINI (2005).

As compacidades reais dos materiais (com exceção do EPS) foram obtidas pelos procedimentos práticos descritos nos subitens 3.3.1.7 e 3.3.2.8. Contudo, Formagini (2005) destaca que para misturas polidispersas (com mais de duas classes granulométricas), a equação 15 é adotada para a função dessa propriedade.

$$f(\phi) = \sum_{i=1}^M \sum_{m=1}^M \frac{p_{mi} y_{mi}}{\phi - \frac{1}{\gamma^{(i)}}} - K_c = 0 \quad (15)$$

Sendo que para calcular o índice que correlaciona as duas compacidades e que depende do tamanho das partículas dos componentes utilizados, emprega-se a equação 16.

$$K_c = \sum_{i=1}^M \sum_{m=1}^M \frac{\frac{p_m y_{mi}}{\beta_{mi}}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\gamma^{(i)}}} = 0 \quad (16)$$

Onde:

ϕ – compacidade real;

K_c – índice de compactação;

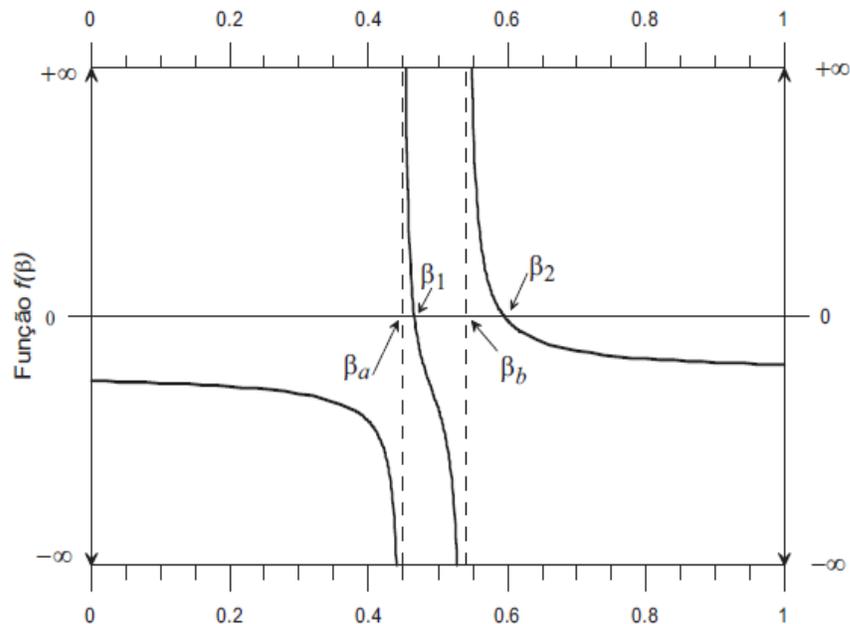
M – número de materiais.

Onde a compacidade virtual de cada classe granular (β) é determinada pela equação 17.

$$f(\beta) = \frac{\frac{y_1}{\beta}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\gamma^{(1)}}} + \frac{\frac{y_2}{\beta}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\gamma^{(2)}}} - K_c = 0 \quad (17)$$

Formagini (2005) destaca ainda que para misturas binárias (compostas somente por duas classes granulares) as raízes da função são obtidas adotando a condição $\beta \in [0,1]$ para valores arbitrários de K_c , ϕ e γ , conforme mostrado na Figura 3.14, onde β_1 e β_2 são as raízes enquanto que β_a e β_b são as descontinuidades da função. Para misturas polidispersas adotam-se processos iterativos para encontrar os valores que satisfazem a equação acima.

Figura 3.14 – Comportamento da função $f(\beta)$ para uma mistura binária.



Fonte: FORMAGINI (2005).

Logo, a partir desse modelo de empacotamento, obtém-se a dosagem ideal com as melhores propriedades nos estados fresco e endurecido de diversos tipos de concretos, como os de alto desempenho, jateados, compactados a rolo, com pós reativos, autoadensáveis e de resistência normal (FORMAGINI, 2005).

As composições das misturas secas dos blocos foram determinadas inicialmente pelo uso de um software de dosagens para concretos³, que considera, além dos parâmetros físicos citados, as densidades dos materiais envolvidos, obtendo uma composição inicial para a produção de um metro cúbico do concreto (Apêndice B). As quantidades (em quilogramas) dos componentes foram divididas em quatro tipos conforme a tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dosagem experimental dos blocos de concreto moldados, com valores em kg/m³.

Material Tipo	Cimento	Areia	Brita	EPS
BREF	266,41	741,86	1279,19	-
B5	266,41	741,86	1143,34	50,03
B10	266,41	741,86	1007,49	100,06
B15	266,41	741,86	871,64	150,09

Onde:

BREF – Bloco de referência (sem a presença de EPS reciclado);

B5 – Bloco com substituição parcial de 5% da brita por EPS reciclado;

B10 – Bloco com substituição parcial de 10% da brita por EPS reciclado;

B15 – Bloco com substituição parcial de 15% da brita por EPS reciclado.

Todavia, após a primeira tentativa de moldagem dos blocos com este traço experimental, verificou-se que os mesmos não apresentavam um acabamento satisfatório em decorrência da razão entre os agregados, que era de aproximadamente 37% para a areia e 63% para a brita. Para contornar esse problema foi consultado o trabalho de Silva, Sousa e Lima (2012), que aplicou a metodologia sugerida por Tango (1994) para determinação desta relação, definindo a maior massa unitária obtida da combinação dos dois agregados. A nova composição volumétrica obtida deste ensaio possuía um percentual de 45% para a areia e 55% para a brita, apresentando uma massa unitária de 1845 kg/m³, enquanto que para razão inicial o valor era de 1778 kg/m³.

³ Por questões de direitos autorais, não é possível mencionar o nome do software utilizado na pesquisa.

Novamente foram moldados os blocos, os quais apresentaram visualmente uma melhoria no acabamento que ratificou o emprego desta dosagem corrigida. Com isso, a composição da mistura seca adotada para a pesquisa está discriminada na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Dosagem corrigida dos quatro tipos de blocos de concreto, com valores em kg/m³.

Material Tipo	Cimento	Areia	Brita	EPS
BREF	241,78	829,30	1013,06	-
B5	241,78	829,30	962,41	9,38
B10	241,78	829,30	911,76	18,76
B15	241,78	829,30	861,12	28,14

3.1.3 Determinação do fator a/c

A determinação da umidade ideal para atingir a consistência seca (ou “terra úmida”), foi obtida pela metodologia de Tango (1994) descrita no capítulo anterior, ao misturar pequenas quantidades de água, dispostas em tubos de ensaio e relacionadas ao consumo de cimento adotado na mistura seca até atingir o ponto de pelota de mão (Figura 3.15). Por ser um procedimento empírico, houve a avaliação da consistência dos blocos por meio do ensaio da NBR NM 67 (ABNT, 1998), empregado para determinação da consistência em concretos plásticos.

Figura 3.15 – Ponto de pelota de mão para umidade ideal dos blocos.



3.2 Produção e cura dos blocos de concreto

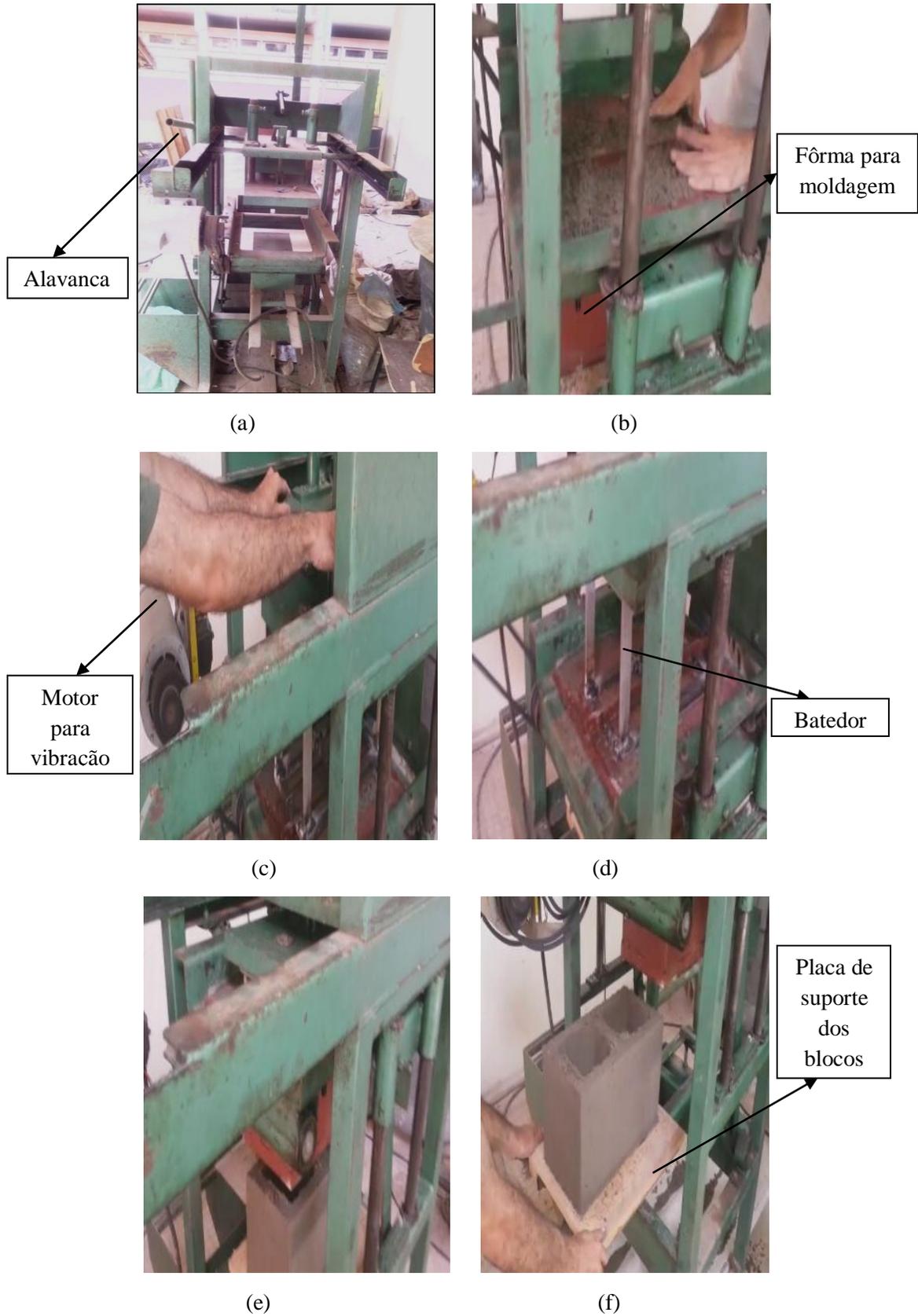
Os componentes utilizados (e discriminados no item 3.2) foram pesados em uma balança hidrostática com precisão de cinco gramas, de acordo com a dosagem estimada pelas metodologias descritas no item anterior.

Após a pesagem, os componentes foram misturados em uma betoneira com capacidade de carga nominal de 400 l, da fabricante Herf, por aproximadamente cinco minutos, com a retirada de parte da mistura aderida a sua parede, durante este intervalo, para correta homogeneização dos materiais. Destaca-se também que não foi identificada a necessidade da utilização de aditivos químicos que melhorassem a aderência do EPS reciclado com a matriz cimentícia.

Após a retirada do concreto da betoneira, utilizou-se uma vibroprensa da fabricante Atlântica Maq (Figura 3.16.a), modelo 321 Industrial, para a produção dos blocos, de acordo com as seguintes etapas:

- 1) Colocar a massa em uma fôrma estrutural de dois furos, com dimensões de 19 cm x 39 cm x 19 cm, até o seu preenchimento (Figura 3.16.b);
- 2) Acionar o motor elétrico para vibração da máquina em virtude do adensamento do concreto;
- 3) Após estabilização da altura da mistura, desligar o motor e preencher novamente a fôrma em virtude do rebaixamento ocasionado;
- 4) Repetir as duas etapas anteriores até a total ocupação volumétrica da mistura na fôrma (com máxima redução de vazios internos), para posterior execução do nivelamento de sua superfície (Figura 3.16.c);
- 5) Destruar o batedor, situado na parte superior da vibroprensa (Figura 3.16.d) para melhoria do acabamento superficial por pressão e otimização do adensamento ocorrido anteriormente;
- 6) Acionar a alavanca situada ao lado do motor ainda em funcionamento (desligando-o imediatamente), para desmoldagem dos blocos apoiados em placas de madeira (Figura 3.16.e);
- 7) Por fim, retirar os blocos da parte inferior da vibroprensa para o início de sua cura ao ar (Figura 3.16.f).

Figura 3.16 – Vista frontal da vibroprensa (a) e etapas de produção dos blocos (b a f).



Os blocos recém-moldados foram estocados em salas próximas a vibroprensa (Figura 3.17), seguindo as recomendações de Tango (1984), para evitar a movimentação excessiva dos mesmos, além de serem locais livres da circulação de ar, exposição direta do sol e possuir temperaturas abaixo da encontrada no ambiente, proporcionando assim a cura seca dos quatro tipos de blocos moldados.

Figura 3.17 – Cura ao ar dos blocos em ambiente fechado.



3.3 Ensaio nos blocos

3.3.1 Ensaio mecânico

3.3.1.1 Resistência à compressão axial

O capeamento (Figura 3.18) adotado para regularização das superfícies de contato com os pratos da máquina de ensaio foi feito com argamassa de traço 1:3 (cimento: areia), e executado sobre placas de vidro (com o uso de desmoldante a base de silicone), considerando a resistência mínima imposta pela NBR 6136 (ABNT, 2014).

Figura 3.18 – Capeamento em cima de placas de vidro (a) e aspecto superficial dos blocos (b).



O equipamento utilizado para o ensaio de compressão foi uma prensa hidráulica (Figura 3.19), da fabricante Tokyo Testing Machine, com capacidade de carga de 100 toneladas, a uma velocidade aproximada de 0,02 MPa/s, no Laboratório de Ensaios Mecânicos.

Conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007), moldaram-se também corpos de prova cilíndricos para as quatro composições dos blocos, além dos teores de substituição de 30 e 50%, para comparação dos resultados com Vieira et al. (2016), que empregaram o EPS para a mesma finalidade, mas com uma dosagem experimental distinta. A escolha desse percentual máximo foi em decorrência da redução do fator a/c e do aumento do consumo de cimento em até 10%, segundo Gomes et al. (2016), para a mesma resistência do concreto referencial.

Figura 3.19 - Prensa hidráulica para rompimento por compressão axial.



3.3.2 Ensaio físicos

3.3.2.1 *Análise dimensional*

A análise dimensional consistiu na determinação da espessura das paredes, da altura, comprimento e largura por meio de um paquímetro, obedecendo a NBR 12118 (ABNT, 2013).

3.3.2.2 *Absorção e umidade relativa*

As aferições dos pesos seco, saturado e referente as condições do blocos submetidos ao rompimento por compressão ocorreram pelo uso de uma balança hidrostática com precisão de 5 g (Figura 3.20), para determinação, de acordo com a NBR 12118 (ABNT, 2013), dos teores de absorção e umidade relativa.

Figura 3.20- Medição da massa seca do bloco após 24 h na estufa.



3.3.2.3 *Análise Térmica*

Além da determinação das propriedades térmicas normatizadas e descritas no capítulo 2 por meio do roteiro de cálculo sugerido pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005), complementou-se esse estudo com a determinação do conforto térmico da alvenaria. Tal experimento foi baseado

em Krüger et al. (2009), que empregaram um procedimento para identificação das diferenças de temperatura das paredes internas e externas em duas caixas térmicas com 1 m^2 . Para a pesquisa, foi construída uma caixa com blocos BREF e outra com o tipo B15.

Essas caixas foram formadas por paredes de blocos vazados e vedadas por uma base de concreto (com traço 1:4:0,5 – cimento: areia: brita) e um conjunto composto (de cima para baixo) por telhas de fibrocimento, folhas de compensado (4 mm de espessura) e placas de EPS (de 15 mm de espessura) com a função de isolamento térmico na parte superior (Figura 3.21). A argamassa de assentamento dos blocos possuía o traço de 1:6 (cimento: areia), com a presença de aditivo plastificante.

Figura 3.21 – Montagem do experimento: base de concreto (a); paredes de alvenaria (b); parte superior composta pelo conjunto compensado, EPS e telhas de fibrocimento (c); caixa térmica (d).



(a)



(b)



(c)

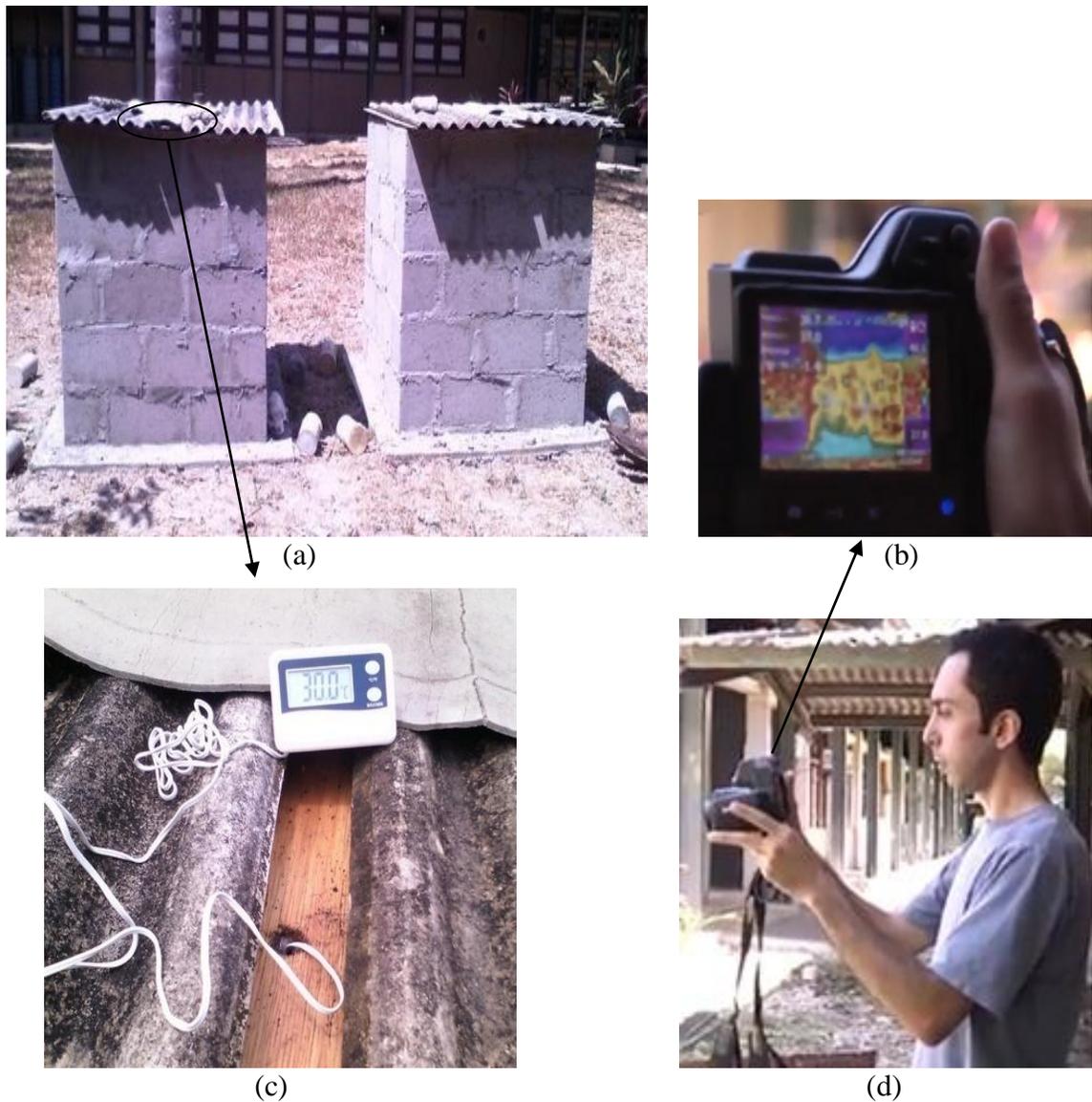


(d)

As variações térmicas das paredes internas e do ambiente foram medidas por um termômetro digital, da fabricante Incoterm com precisão de 1°C, instalado acima das caixas (Figura 3.22.c) enquanto que as variações externas da alvenaria foram obtidas pela utilização de uma câmera termográfica (Figura 3.22.b), da marca Flir, modelo T62101.

A aquisição das temperaturas interna e externa diária ocorreu durante 6 horas (das 9:00 até às 15:00 h) entre os dias 14 e 18 de agosto de 2017 (verão amazônico). O software de leitura e interpretação de dados da câmera termográfica foi o Flir Tools, versão 5.1.15036.1001.

Figura 3.22 - Leitores das variações térmicas das caixas térmicas (a): câmera termográfica para as leituras externas (b e d) e; termômetro digital para a temperatura interna (c).



CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Componentes da mistura seca

4.1.1 Caracterização específica do cimento

A análise por FRX apresentou a composição química do cimento, na forma de óxidos, de acordo com os teores expressos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Descrição e quantificação estimada dos óxidos cimentícios.

Óxido	Porcentagem (%)
CaO	59,42
SiO ₂	23,25
Al ₂ O ₃	6,68
Fe ₂ O ₃	3,23
SO ₃	3,09
MgO	2,59
K ₂ O	0,76
TiO ₂	0,35
P ₂ O ₅	0,29
Outros	0,34

A Tabela 4.1 mostra inicialmente que os percentuais de MgO e de SO₃ atenderam as exigências da NBR 5732 (ABNT, 1991), segundo expresso no Anexo A.

Ao substituir os teores da Tabela 4.1 na equação 6 do capítulo 3, encontrou-se um valor igual a 0,76 e situado próximo ao limite inferior (0,66) que, segundo Neville (2016), afetaria negativamente o desenvolvimento da resistência inicial, o que na prática não se confirmou.

Ao analisar os resultados dos ensaios de finura, tempo de pega e resistência mecânica, descritos na Tabela 4.2, por meio da comparação com os limites impostos pela NBR 5732 (ABNT, 1991), verificou-se que:

Tabela 4.2 – Índice de finura, tempo de pega e resistência específica do cimento.

Propriedade	Resultado (médio)	CV (%)
Índice de finura (%)	0,36	21,94
Tempo de pega inicial (h)	2,67	-
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	8,23
	7 dias	10,92
	28 dias	3,01

- A finura do cimento escolhido foi muito inferior ao limite máximo de 10% descrito pela norma, sugerindo um maior consumo de água de amassamento na dosagem e que a amostra estava livre de grãos hidratados prejudiciais ao seu uso;
- A adoção de um fator a/c igual a 0,3 para o ensaio de pega, ocorrida por 3h 50 min. após a sua mistura da água no cimento, atendeu o tempo mínimo para início da perda de fluidez da pasta (Anexo A);
- A partir da comparação dos valores médios obtidos do ensaio de resistência do cimento com as especificações da NBR 5732 (ABNT, 1991), constatou-se que houve o atendimento dos limites mínimos somente para as amostras com 3 e 7 dias de idade, pois aos 28 dias percebeu-se que a resistência média ficou abaixo do exigido, apesar de o ensaio ter sido repetido mais duas vezes com lotes distintos (Apêndice A). As pequenas concavidades presentes nos moldes e possíveis falhas no capeamento, conforme demonstrado na Figura 4.1, podem ser uma das causas para os valores médios encontrados na idade característica.

Figura 4.1 – Corpos de prova rompidos aos 28 dias de idade com falhas no capeamento.



4.1.2 Caracterização específica dos agregados

Os resultados obtidos para as propriedades físicas dos agregados estão mostrados na Tabela 4.3, que pelas respectivas normas referentes aos ensaios executados, esclareceram que:

Tabela 4.3 – Índices de forma e de vazios, massas unitárias, teores de umidade e de materiais deletérios dos agregados.

Propriedade		Resultado (médio)	CV (%)
Índice de forma do EPS		1,76	38,75
Massa unitária solta (g/cm ³)	EPS	0,33	0,43
	Brita	1,50	0,57
	Areia	1,55	1,03
Índice de vazios (%)	EPS	67,38	0,21
	Brita	44,64	0,71
	Areia	41,59	1,45
Teor de umidade (%)	EPS	0	-
	Brita	0,45	24,36
	Areia	1,69	1,13
Absorção (%)	EPS	4,79	5,80
	Brita	0,48	16,40
	Areia	0,31	35,26
Materiais pulverulentos (%)	Brita	1,60	-
	Areia	2,04	-
Torrões de argila e materiais friáveis (%)	Brita	0,30	-
	Areia	2,85	-
Impurezas orgânicas da areia		Mais escura	-

- A média para o índice de forma do EPS reciclado viabilizou, segundo a NBR 7809 (ABNT, 2006), o seu emprego em compósitos de matriz cimentícia ($IF \leq 3$). A predominância por partículas mais próximas do formato cúbico que lamelar foi outra característica importante, pois, de acordo com Gomes et al. (2015), reduz a má aderência com a matriz cimentícia e a trabalhabilidade no concreto;
- A massa unitária solta do EPS reciclado foi equivalente a aproximadamente um quinto do valor médio da brita. Contudo, acreditou-se que a redução do índice de vazios em comparação ao encontrado nas pérolas (aproximadamente 31%) apresentaria uma redução mais branda na resistência mecânica se os mesmos fossem empregados no lugar do poliestireno expandido sem reciclagem;
- Ainda sobre o índice de vazios médio do polímero (cerca de 50% acima da brita), estimou-se que o compósito necessitaria de um consumo maior de pasta para preenchimento dos vazios presentes, o que de acordo com Neville (2016), é típico dos concretos leves;
- Os teores de umidade do EPS para as três amostras ensaiadas foram nulos devido à conservação de sua natureza hidrofóbica;

- Supõe-se também pela execução do ensaio de umidade total, que o poliestireno expandido reciclado utilizado na pesquisa apresenta um ponto de fusão igual ou superior ao encontrado nas pérolas, pois o material não se deteriorou imediatamente a uma temperatura próxima de 100 °C;
- Em relação à brita, identificou-se que a umidade superficial foi a responsável pela maior parte de água presente nas suas partículas, ao apresentar comportamento contrário ao do EPS reciclado. Quanto ao agregado miúdo, percebeu-se que o seu teor médio foi o maior encontrado, diferentemente do observado na absorção;
- A respeito da absorção do poliestireno expandido, constatou-se que a sua média foi superior a encontrada normalmente para as pérolas (Anexo A). Porém este valor foi determinado por uma norma distinta à NBR 7973 (ABNT, 2007), apresentando maior dificuldade na retirada da água superficial. Contudo, mesmo com esse aumento, admitiu-se que o material estava situado dentro do intervalo preconizado para defini-lo como um agregado adequado para o uso em concreto, pois evitou a necessidade de ajustes no fator a/c, além de apresentar um valor muito parecido ao obtido por Dermigoba e Kan (2012) e inferior a Herki, Khatib e Neguim (2013);
- Pelas imposições da NBR 7211 (ABNT, 2009), identificou-se que o teor de materiais pulverulentos da brita ficou quase 0,6% acima do recomendado inicialmente (Anexo A). Todavia, a própria norma tolera um percentual de até 2% quando a absorção do material é inferior a 1%;
- No ensaio de impurezas orgânicas, a coloração da solução com areia (Apêndice A) apresentou uma tonalidade um pouco mais escura do que a verificada para solução padrão definida pela NBR NM 49 (ABNT, 2001), o que não restringiu a sua aplicação em concretos, pois a NBR 7211 (ABNT, 2009) recomenda adotar a NBR 7221 (ABNT, 2012) para definição da viabilidade do seu emprego. Em virtude da pequena diferença de coloração encontrada e dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão do cimento, essa verificação foi desprezada.

4.1.3 Caracterização para dosagem experimental

A Tabela 4.4 apresenta os resultados da massa específica e compacidade real dos materiais que foram empregados para a dosagem experimental via MEC, identificando que:

Tabela 4.4 – Massas específicas, teores de absorção e compacidades médias.

Propriedade		Resultado médio	CV (%)
Massa Específica (kg/m ³)	EPS	1006¹	0,14
	Brita	2717	0,30
	Areia	2617	2,62
	Cimento	3055	0,37
Compacidade real	Brita	0,62	0,13
	Areia	0,74	1,23
	Cimento	0,56	0,94

- A massa específica do EPS reciclado possuía um valor muito superior aos grupos definidos pela NBR 11579 (ABNT, 2007) e expressos no Anexo A, mas inferior ao agregado convencional, o que ainda o caracteriza como um agregado artificial leve. A causa para este baixo valor refere-se à maior presença de vazios internos;
- Foi possível confirmar a tese de que o tamanho e a composição granulométrica das partículas que compõe determinado material ou mistura seca influenciam diretamente na sua compacidade, pois ao comparar os valores encontrados com os de Vargas (2008), que dividiu em duas classes cada um de seus agregados, os resultados médios corresponderam a acréscimos de aproximadamente 12% e 18%, para a brita e a areia, respectivamente (Anexo B);
- Em relação ao ensaio de demanda de água, verificou-se que a compacidade obtida para o cimento (sem a presença de aditivos superplastificantes) apresentou média muito próxima das obtidas por Formagini (2005), apesar dos dois tipos de cimentos Portland adotados pelo autor serem distintos ao da pesquisa (Anexo B).

As composições granulométricas dos agregados estão na Tabela 4.5, enquanto que as suas curvas granulométricas estão expressas nas Figuras 4.2 e 4.3, respectivamente.

¹ O ensaio foi realizado na data de 24 de julho de 2012 na USP de Pirassununga por Douglas Marangoni, um dos autores do artigo de VIEIRA et al. (2016).

Tabela 4.5 – Distribuições granulométricas dos agregados graúdos e miúdo.

Abertura da Peneira (mm)	EPS / Brita		Abertura da Peneira (mm)	Areia	
	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)		Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
19,1	0 / 0	0 / 0	4,76	0,08	0,08
12,5	1,63 / 0,06	1,63 / 0,06	2,38	0,90	0,97
9,52	23,21 / 0,30	24,84 / 0,36	1,19	3,50	4,48
4,76	72,67 / 63,09	97,51 / 63,44	0,6	11,89	16,37
2,38	2,37 / 26,72	99,88 / 90,16	0,297	23,27	39,63
1,19	0,04 / 3,00	99,91 / 93,15	0,149	56,60	96,23
Fundo	0,09 / 6,85	100 / 100	Fundo	3,77	100
DMC = 12,5 mm / 9,52 mm			DMC = 1,19 mm		MF = 2,58

Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos.

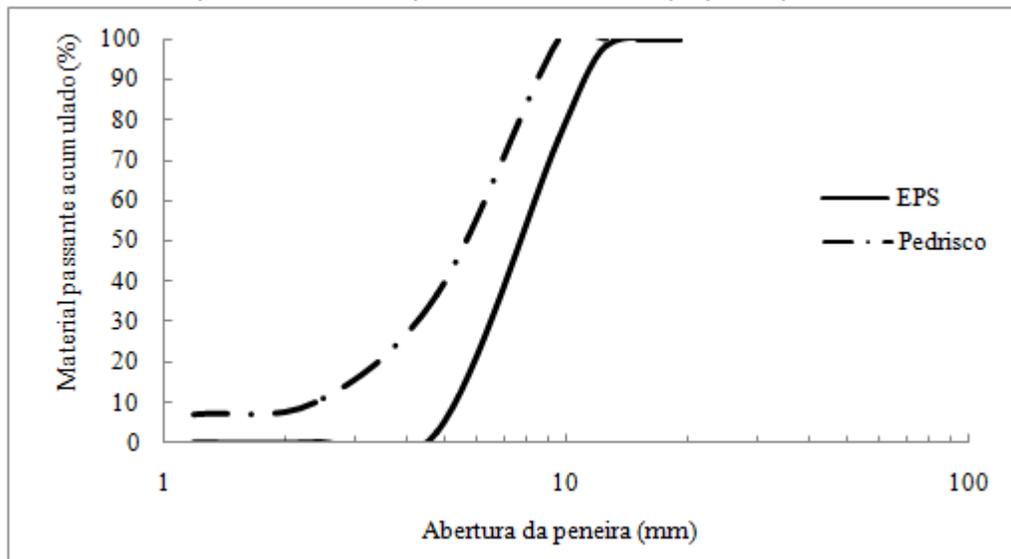
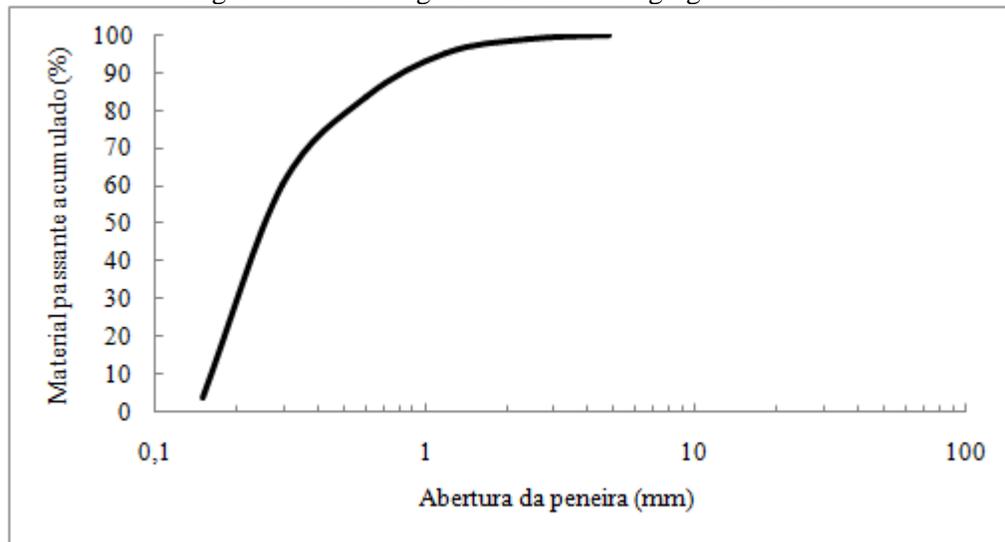
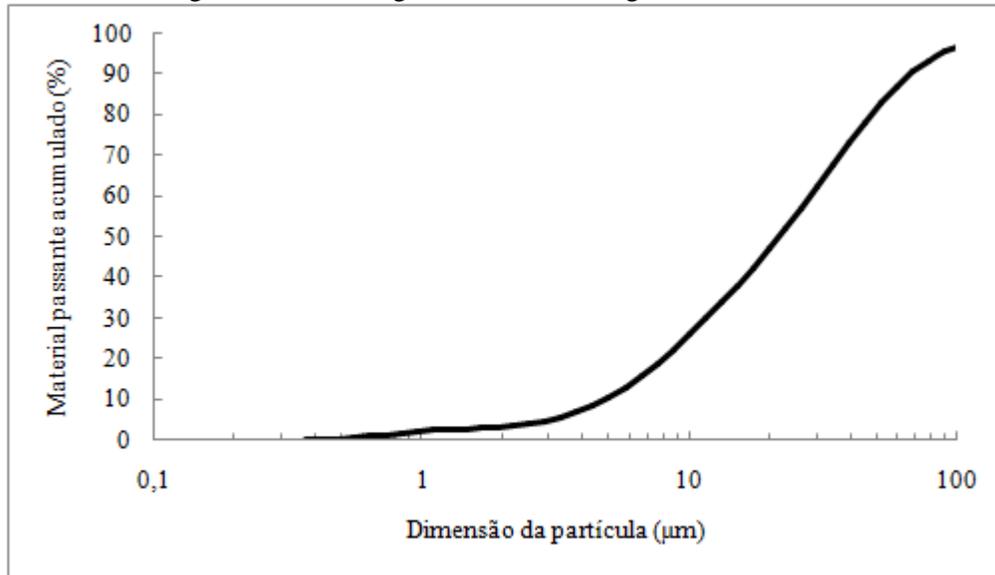


Figura 4.3 – Curva granulométrica do agregado miúdo.



A curva granulométrica do cimento está expressa na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Curva granulométrica do aglomerante hidráulico.



A análise granulométrica identificou que o EPS britado (com d_{50} igual a 6,94 mm), possuía dimensões que o classificavam, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), como um agregado graúdo, visto que mais de 70% de todas as amostras ensaiadas ficaram retidas na peneira de abertura 4,76 mm, indo de encontro à definição direcionada aos agregados miúdos, que define como todos os materiais passantes com percentual superior a 90% por essa malha. Percebeu-se também que composição granulométrica (relação d/D), em termos de percentual de massa retida acumulada, do agregado leve estava mais de acordo com as faixas percentuais descritas da norma citada (Anexo A) do que a brita e a areia (com d_{50} iguais a 5,75 mm e 0,18 mm respectivamente).

Ao relacionar a dimensão máxima característica do poliestireno expandido reciclado com as dos agregados usualmente adotados (brita 0 ou o areião), verificou-se a distinção nos percentuais referentes às menores malhas. Contudo, a NBR 6136 (ABNT, 2014) viabilizou o emprego do polímero ao definir como DMC a metade da menor espessura da parede encontrada, conforme demonstrado posteriormente na análise dimensional dos blocos (item 4.2.3). Na amostra de cimento foram verificados os percentuais retidos de 10, 50 e 90% para as dimensões de 4,85, 21,76 e 67,60 µm respectivamente, com área de superfície específica igual a 0,68 cm²/g.

Quanto ao módulo de finura da areia, o mesmo encontrava-se dentro da zona ótima descrita pela NBR 7211 (ABNT, 2009), expressa no Anexo A.

4.2 Blocos de concreto

4.2.1 Dosagem Experimental

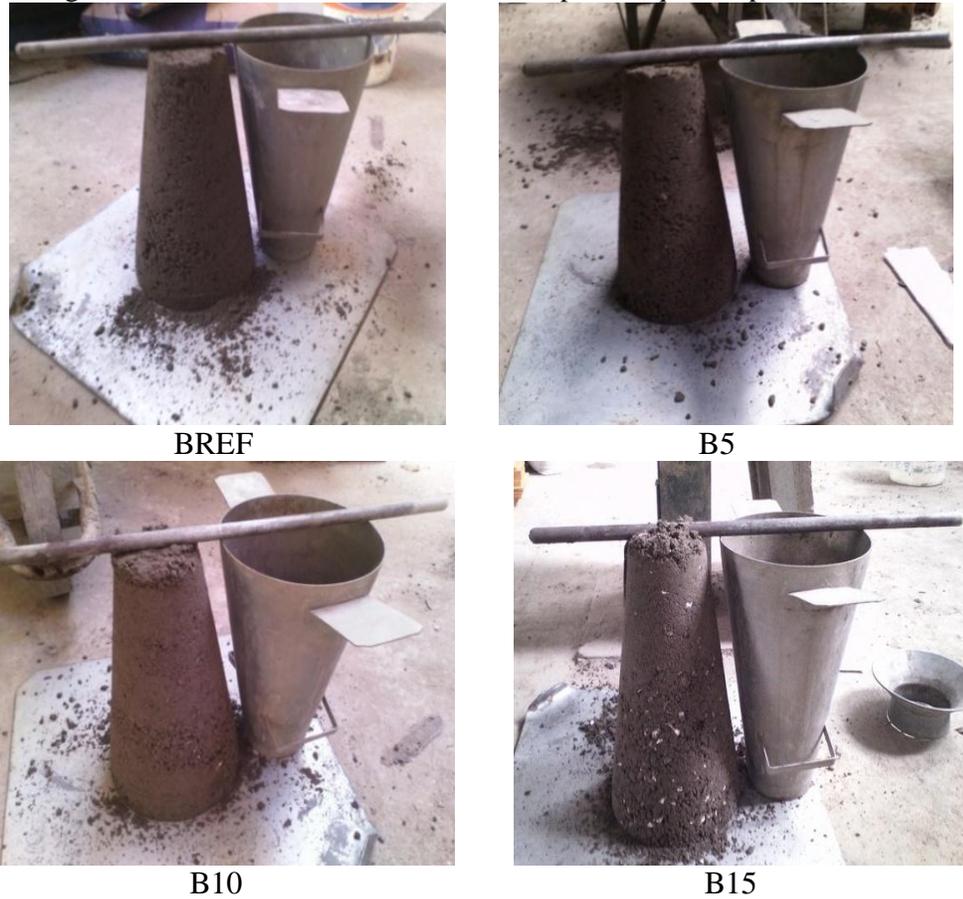
De acordo com Tango (1994), a razão entre o aglomerante e os agregados obtida por meio do software e preservada mesmo após a correção do traço (1 kg de cimento para 7,6 kg de agregados) seria equivalente ao traço médio para estimar uma resistência característica à compressão de 7 MPa aos 28 dias de idade, classificando-o como um bloco estrutural de classe B, segundo a NBR 6136 (ABNT, 2014) e verificada no Anexo B.

A quantidade de água adotada para determinação da umidade ótima dos blocos referenciais (BREF) foi de 50 ml para 100 g de cimento. Ao empregar este mesmo teor para as outras misturas (com a presença de EPS), verificou-se uma pequena variação, com o fator situado entre 0,50 e 0,55. Contudo, constatou-se que na etapa de moldagem dos blocos, a incorporação do poliestireno expandido não afetou a quantidade de água de amassamento, mantendo o teor obtido inicialmente.

Identificou-se também que a incorporação do EPS reciclado na mistura interferiu na conformação das paredes do compósito (estabelecendo uma relação direta entre o aumento do percentual de substituição do agregado graúdo e a perda do acabamento), sem ocasionar, contudo, mudanças no processo de mistura dos materiais, evitando-se, desta forma, a necessidade da utilização de aditivos que favorecessem a sua aderência com a argamassa e que contribuíssem para alterações nos resultados da análise das propriedades do concreto.

Ainda durante a moldagem dos blocos, observou-se que a variação da altura de abatimento do slump test das quatro misturas no estado fresco foi nula (Figura 4.5), comprovando a consistência “muito firme” e viabilizando a adoção da técnica empírica de Tango (1994) para identificação do fator a/c . Soto (2017) ratifica esta análise ao afirmar que para uma variação do abatimento entre 0 e 25 mm, o concreto poderia ser conformado por extrusão, vibrocompactado ou poderia ser classificado como concreto compactado a rolo.

Figura 4.5 – Abatimentos de tronco de cone para os quatro tipos de blocos.



4.2.2 Resistência à compressão axial

As resistências características obtidas no ensaio de compressão simples dos corpos de prova dos quatro tipos de blocos ensaiados estão inseridas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resistência à compressão axial dos blocos.

Tipo	Resistência à compressão axial (MPa)	CV (%)
BREF	3,95	14,18
B5	4,02	17,02
B10	2,59	14,85
B15	2,25	18,31

Pela classificação da NBR 6136 (ABNT, 2014), as amostras do tipo BREF pertenceriam à classe C, com função estrutural para edificações de no máximo cinco pavimentos, construídas acima do nível do solo, ou somente para vedação. Os blocos B5 pertenceriam à classe B, com

função estrutural, enquanto que os blocos B10 e B15 não atenderam a exigência da norma, invalidando o seu uso para qualquer tipo de alvenaria.

De uma forma geral, estes resultados apresentaram valores abaixo dos apresentados nos estudos adotados como referenciais. Contudo, deve-se atentar que:

1. No trabalho de Xu et al. (2012) e Ling e Teo (2013), o consumo de cimento por metro cúbico foi superior ao adotado na pesquisa (mínimo de 340 kg/m^3);
2. Os tamanhos dos EPS usados por Xu et al. (2012) e Hernández-Zaragoza et al. (2013) eram mais uniformes e muito inferiores ao utilizado na pesquisa (diâmetro médio de 3 mm), o que segundo Liu e Chen (2014), favoreceria uma resistência superior quando comparada com o emprego dos grânulos de maiores tamanhos;
3. A substituição do poliestireno expandido ocorreu na pesquisa de Xu et al. (2012), em relação ao agregado miúdo (areia), preservando a composição volumétrica do agregado graúdo usual, que notoriamente possuía a maior resistência na mistura seca;
4. O fator a/c adotado no trabalho de Hernández-Zaragoza et al. (2013) foi de 0,4, abaixo do escolhido para a pesquisa (melhor trabalhabilidade), ratificando o que Trussoni, Hays e Zollo (2012) e Dermigoba e Kan (2012) haviam afirmado em seus respectivos estudos sobre o uso de EPS reutilizável em detrimento das pérolas;
5. Ling e Teo (2013) afirmam que a cura ao ar fornece resultados inferiores aos obtidos por amostras submetidas à cura úmida para uma mesma dosagem.

Ao analisar as comparações entre as tensões médias obtidas no ensaio, percebeu-se um ligeiro aumento com a presença de 5% de EPS na composição dos blocos, que estatisticamente pode ser desprezado uma vez que o desvio padrão para o tipo B5 foi de 0,95 MPa enquanto que para BREF foi de 0,73 MPa. No entanto, esse comportamento também foi observado no trabalho de Moreira et al. (2017), onde os blocos com 20% de substituição da brita pelo poliestireno expandido apresentaram um acréscimo de 5% (6,87 MPa) na resistência à compressão em comparação ao referencial, enquanto que com 30% houve uma redução de 4% (6,28 MPa).

Ao comparar os resultados com o estudo de Vieira et al. (2016), que também definiu o teor de substituição de 5% como o ideal para blocos de pavimentação, percebeu-se que a resistência característica encontrada na pesquisa apresentou um valor inferior ao estimado pelos

autores (Tabela 4.7). Os fatores que contribuíram para esta distinção são praticamente os mesmos enumerados anteriormente, com exceção do fator a/c que foi o mesmo adotado na pesquisa.

Tabela 4.7 – Resistência à compressão axial dos corpos de prova cilíndricos.

Tipo	Resistência à compressão axial (MPa)	Relação bloco/cilindro
BREF	5,17	0,76
B5	3,94	1,02
B10	4,04	0,64
B15	3,86	0,58

A partir da mudança do teor do EPS reciclado para 10 e 15% em relação à composição volumétrica pertencente à brita foi verificada a queda da resistência mecânica em função da própria capacidade resistiva do material, além do aumento do índice de vazios agregados a esta substituição. As reduções foram de 33,89 e 40,44% respectivamente, situando-se acima das perdas encontradas no trabalho de Xu et al. (2012). Todavia, se for levado em consideração à razão entre o peso do polímero em função do seu volume de ocupação no concreto, identifica-se que os autores utilizaram aproximadamente uma relação de $4,5 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, frente ao emprego mínimo de $9,4 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ da pesquisa.

Em suma, às dispersões estatísticas de maneira geral apresentaram percentuais superiores aos encontrados nas Tabelas 4.2 e 4.7, justificada provavelmente pelos formatos diferentes dos blocos em relação aos corpos cilíndricos e pela utilização de equipamentos distintos para realização do ensaio. Porém, os coeficientes de variação da Tabela 4.8 estiveram próximos (mas superiores) aos discriminados por Hernández-Zaragoza et al. (2013).

A respeito do rompimento dos corpos de prova submetidos à compressão axial, identificou-se um comportamento similar para todas as amostras analisadas, com o maior aparecimento de trincas na direção paralela ao comprimento, o que segundo Hernández-Zaragoza et al. (2013), referem-se a tensões puramente de cisalhamento, enquanto que as poucas fissuras inclinadas surgem pela presença de trações localizadas (Figura 4.6).

Comparando-se com os mesmos referenciais, percebeu-se uma distinção no caminho preferencial das aberturas, onde se concluiu, pela análise visual, que existem zonas de má coesão situadas principalmente nas extremidades dos blocos, que favoreceriam essas ocorrências e que provavelmente podem ser corrigidas se forem seguidas as recomendações de Tango (1984), com ajustes no processo de mistura dos componentes e no tempo de vibração durante a etapa de moldagem.

Figura 4.6 – Fissuração típica dos blocos submetidos às cargas compressivas.



4.2.3 Análise Dimensional

Os valores médios da largura, altura e das paredes (transversais e longitudinais) dos blocos moldados encontram-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Dimensões reais dos blocos-testemunho.

Tipo	Parede longitudinal (mm)	Parede transversal		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
		Paredes (mm)	Espessura equivalente (mm/m)			
BREF	$31,6 \pm 0,4$	$32,0 \pm 0,5$	246,2	$390,3 \pm 0,2$	$190,9 \pm 1,5$	$202,3 \pm 0,7$
B5	$31,3 \pm 0,2$	$31,3 \pm 0,6$	240,8	$389,6 \pm 0,1$	$190,0 \pm 0,1$	$200,8 \pm 0,2$
B10	$31,0 \pm 0,1$	$31,2 \pm 0,6$	240,0	$389,7 \pm 0,0$	$190,5 \pm 0,6$	$198,4 \pm 1,7$
B15	$31,1 \pm 0,4$	$31,1 \pm 0,4$	239,5	$389,6 \pm 0,3$	$191,0 \pm 0,9$	$199,2 \pm 2,7$

Ao analisar os resultados específicos de cada tipo de bloco, foi verificada uma redução, através da comparação entre os blocos referenciais e os com 5% de substituição do agregado tradicional, das dimensões das paredes transversais e das espessuras equivalentes (que consiste na razão entre o somatório das paredes transversais pelo comprimento) com o aumento do EPS reciclado na mistura seca. Todavia, ambos atenderam satisfatoriamente aos limites estabelecidos pela NBR 6136 (ABNT, 2014), que exige como limites mínimos 25 mm e 188 mm/m para a classe B e 18 mm e 135 mm/m para a classe C, conforme expresso no Anexo C.

Em relação à parede longitudinal, os blocos BREF também atenderam a norma mencionada, com valor superior a 18 mm, enquanto que o limite inferior de 32 mm (para a classe B) não foi atingido pelos blocos B5. Porém, há uma tolerância sobre essa dimensão de -1 mm para cada leitura individual que foi obedecida por este tipo, conforme demonstrado no Apêndice C. Quanto à altura, comprimento e largura, não houve imposições que restringissem os seus resultados. As variações dimensionais encontradas entre as amostras, apesar da utilização da mesma fôrma de moldagem, estão relacionadas ao processo produtivo.

As dimensões dos furos e das mísulas, apesar de não aparecerem na Tabela 4.7, também atenderam as exigências da norma, pois o menor diâmetro encontrado (130 mm) para o furo se situava acima do limite mínimo (110 mm) imposto para blocos com largura nominal de 190 mm, enquanto que o raio da mísula era superior a 40 mm (valor mínimo para as classes A e B) em todas as amostras, devido à geometria da fôrma utilizada para a moldagem. Os blocos B10 e B15 também atenderiam parcialmente a norma citada, caso pertencessem a uma das classes definidas no capítulo 2.

4.2.4 Umidade relativa e absorção

Os teores de umidade e absorção detectados nos blocos-testemunho estão expressos na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Umidade relativa e absorção dos blocos.

Tipo	Umidade relativa (%)	CV (%)	Absorção (%)	CV (%)
BREF	30,49	3,41	5,91	4,95
B5	27,88	12,07	6,33	10,96
B10	26,56	8,81	7,07	2,82
B15	25,24	3,98	8,69	4,40

A respeito dos teores de umidade relativa e da absorção, constatou-se que todos os blocos atenderam as exigências da NBR 12118 (ABNT, 2013), que determina, para resistências inferiores a 8 MPa, uma variação percentual de 10 a 40% para a umidade, enquanto que para a absorção o valor máximo aceito é de 9%, segundo a emenda de 2016 da NBR 6136 (ABNT, 2014), direcionada as amostras pertencentes à classe C com a presença somente de agregados normais (Anexo C).

Se comparado aos resultados de absorção de Hernández-Zaragoza et al. (2013), foi identificado que as faixas de variação foram similares, pois os dois tipos de blocos produzidos pelos autores possuíam um percentual de 4,3% para o com menor teor de EPS, e 9,3% para o com uma quantidade de 600 gramas de polímero por bloco. No estudo de Moreira et al. (2017), para substituições de 20 e 30% do agregado graúdo pelo EPS, obtiveram-se teores em torno de 6%, obedecendo a mesma relação diretamente proporcional.

As relações entre o aumento do teor de poliestireno expandido reciclado e as duas propriedades referentes à massa de água presente nos blocos apresentaram proporcionalidades opostas. A redução da umidade relativa ocorreu em circunstância do aumento da água livre presente na mistura, que evapora com maior facilidade em detrimento do equilíbrio térmico, devido à hidrofobia do EPS adotado.

Quanto à absorção, o seu acréscimo aconteceu em decorrência do aumento do índice de vazios resultante, favorecendo a diminuição do peso do concreto e permitindo que os blocos incorporassem maiores quantidades de fluidos, ao apresentar um comportamento, segundo Moreira et al. (2017), comum e esperado.

Destaca-se, contudo, que as análises destas propriedades físicas não levaram novamente em consideração o fato dos blocos B10 e B15 possuírem resistências abaixo da mínima imposta pela NBR 6136 (ABNT, 2014). As variações encontradas entre os pesos dos blocos (conforme discriminado no Apêndice C), ocorridas provavelmente pelos mesmos motivos destacados no item 4.2.2, também são outros fatores de relevância, apesar das pequenas diferenças encontradas na massa específica dos tipos de concreto produzidos.

4.2.5 Massa específica

Ao considerar a metodologia de cálculo da ASTM C140/C140M (ASTM, 2014), foram obtidas as massas específicas secas que estão apresentadas na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Massa específica seca dos blocos.

Tipo	Massa específica seca (kg/m ³)	Redução (%)
BREF	2035,66	-
B5	1956,47	3,89
B10	1910,79	6,13
B15	1878,68	7,71

Identificou-se, pela análise da ASTM C55 (ASTM, 2014), que nenhuma das amostras foi classificada como concreto leve, designando-se os blocos B5, B10 e B15 como concretos de peso médio, enquanto que o tipo BREF se situava próximo ao limite inferior dos blocos normais. Os teores de EPS na mistura seca não interferiram sensivelmente nos pesos dos blocos, situando-se numa faixa de valores semelhantes aos obtidos por Xu et al. (2012) e Ling e Theo (2013), mas inferiores a Hernández-Zaragoza et al. (2013), que usaram outras dosagens. Contudo, estas distinções afetaram nos resultados da resistência à compressão axial e de desempenho térmico.

Ao considerar que a NBR 9778 (ABNT, 2005) utiliza o mesmo cálculo da norma citada anteriormente para determinação deste parâmetro físico, poder-se-iam estimar as massas específicas dos blocos com teores acima de 15% (expressos na Tabela 4.11) pela aferição dos corpos de prova cilíndricos que empregaram a mesma dosagem, supondo que para obtenção de um concreto leve necessitar-se-ia adotar percentuais de substituição iguais ou acima de 50%.

Tabela 4.11 – Massa específica estimada para blocos com teores acima de 15%.

Tipo	Massa específica (kg/m ³)	Redução (%)
B30	1765,70	13,26
B50	1554,62	23,63

4.2.6 Desempenho térmico

4.2.6.1 Análise via NBR 15575

Pelo roteiro de cálculo da NBR 15220-2 (ABNT, 2005) foram determinadas as propriedades térmicas normatizadas e descritas nas Tabelas 4.12 e 4.13.

Tabela 4.12 – Propriedades térmicas dos blocos moldados.

Tipo	Transmitância térmica “U” (W/m ² .K)	Capacidade térmica “C” (kJ/m ² .K)
BREF	2,79	154,14
B5	2,79	146,08
B10	2,79	141,63
B15	2,79	139,34

Tabela 4.13 – Propriedades térmicas estimadas para teores acima de 15%.

Tipo	Transmitância térmica “U” (W/m ² .K)	Capacidade térmica “C” (kJ/m ² .K)
B30	2,79	131,90
B50	2,59	116,13

Para a comparação dos resultados encontrados com os valores normatizados, primeiramente identificou-se que a região amazônica, segundo a terceira parte da norma mencionada, pertence à zona 8 (Anexo C). De posse dessa informação, verificou-se que para paredes externas em sistemas de vedação vertical, não há requisitos relacionados à capacidade térmica de acordo com a NBR 15575-4 (ABNT, 2013), expressa no Anexo C, o que possibilitaria o uso de todos os blocos para essa finalidade neste local.

Os valores encontrados, no entanto, foram superiores a capacidade de 115 kJ/m².K obtida por Pedra (2011), que utilizou blocos vazados de concreto tradicionais com preenchimento de seus vazios por pérolas de EPS com 2 mm de diâmetro, apesar do teor de 50% apresentar um valor aceitável para ser empregado em todas as outras zonas bioclimáticas existentes no país ($C \geq 130$ kJ/m².K).

Em relação à transmitância térmica, constatou-se uma constância no resultado obtido independentemente do acréscimo de EPS na mistura até 30% de substituição, preocupando-se quanto à forma de utilização dos blocos, pois quando empregados aparentemente (sem acabamento), os mesmos possuem uma absorvância superior a 0,6, de acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2005), impedindo-os de usá-los para este fim, pois somente seriam permitidos, segundo a NBR 15575-4 (ABNT, 2013), valores iguais ou inferiores a 2,5 W/m².K, o que não foi identificado para nenhum tipo de bloco.

Contudo, acredita-se, segundo as definições da NBR 15220-2 (ABNT, 2005), que se a alvenaria for pintada com uma coloração clara (como branco, amarelo ou verde claro), a sua absorvância reduziria para um índice abaixo do valor mencionado anteriormente, ocasionando o

aumento da transmitância máxima para $3,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e permitindo com isso a sua utilização, conforme o atendimento do nível mínimo de desempenho imposto pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013), expresso no Anexo C.

Ao comparar novamente com os resultados obtidos com os de Pedra (2011), identificou-se que os valores foram inferiores ao encontrado pela autora ($3,12 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), aproximando-se mais do resultado pertencente aos tijolos cerâmicos ($2,24 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Logo, em circunstância das suposições estabelecidas e desprezando novamente os valores obtidos em 4.2.2, adotou-se o experimento prático descrito no final do capítulo 3 para verificar se haveria alguma eficácia na substituição do agregado tradicional pelo EPS reciclado, através de resultados reais relacionados ao conforto térmico proporcionado.

4.2.6.2 Experimento prático de variação térmica na alvenaria de blocos

As temperaturas médias obtidas referentes aos cinco dias do ensaio estão presentes na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Temperaturas médias horárias das caixas de alvenaria e do ambiente.

Horário (h)	BREF		B15		Temperatura Ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
	T _{interna} ($^{\circ}\text{C}$)	T _{externa} ($^{\circ}\text{C}$)	T _{interna} ($^{\circ}\text{C}$)	T _{externa} ($^{\circ}\text{C}$)	
9:00	30,6	32,8	30,7	34,2	35,6
10:00	31,7	38,3	32,1	37,9	36,5
11:00	32,7	40,9	32,9	40,5	37,9
12:00	34,5	42,5	34,5	43,1	38,6
13:00	36,2	43,3	36,6	45,0	39,4
14:00	37,4	42,7	37,6	46,1	38,8
15:00	37,7	41,9	38,3	44,9	38,7

Inicialmente percebeu-se que as temperaturas internas das caixas apresentaram o mesmo valor ao meio-dia, e foram semelhantes quando comparadas nos outros horários, com divergência máxima de $0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ às 15:00h, diferença essa inferior ao erro tolerável pelo equipamento usado para aferição, podendo considerar essas variações desprezíveis.

Uma das hipóteses levantadas a respeito das temperaturas internas das caixas apresentarem valores semelhantes refere-se à transmitância térmica apresentada por ambas, confirmando os resultados obtidos em 4.2.6.1. O fenômeno de convecção ocorrido nas câmaras de ar, que favorecem a maior transferência térmica devido à alta umidade presente, foi

provavelmente o principal responsável por essa igualdade, visto que Krüger et al. (2009) sugeriram a aplicação de placas do seu compósito sem a presença de vazios entre elas.

Callister Júnior e Rethwisch (2016) afirmam que há também uma relação proporcional entre a transferência por radiação e a condutividade térmica, ou seja, as altas temperaturas externas da caixa contribuem para facilidade na transmissão de calor, anulando praticamente a diferença da capacidade térmica encontrada nos dois blocos, o que também justificaria essa igualdade nos fluxos de calor passantes para o ambiente interno das alvenarias.

Compartilhando o raciocínio de Barbosa (2016), supõe-se que provavelmente a granulometria do EPS também influenciou nas variações térmicas obtidas. Ainda sobre o uso do poliestireno expandido reciclado, identificou-se na prática que o teor de 15% não foi suficiente para obtenção de melhorias neste tipo de característica térmica nos blocos vazados, comprovando o que foi definido anteriormente por meio da NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

Verificou-se também que as diferenças encontradas em relação à temperatura ambiente aferida durante o mesmo horário mostraram a eficiência do emprego deste tipo de material para a redução do calor interno, com os decréscimos de 5,2 e 5 °C (para as alvenaria compostas por blocos BREF e B15 respectivamente) às 11:00h.

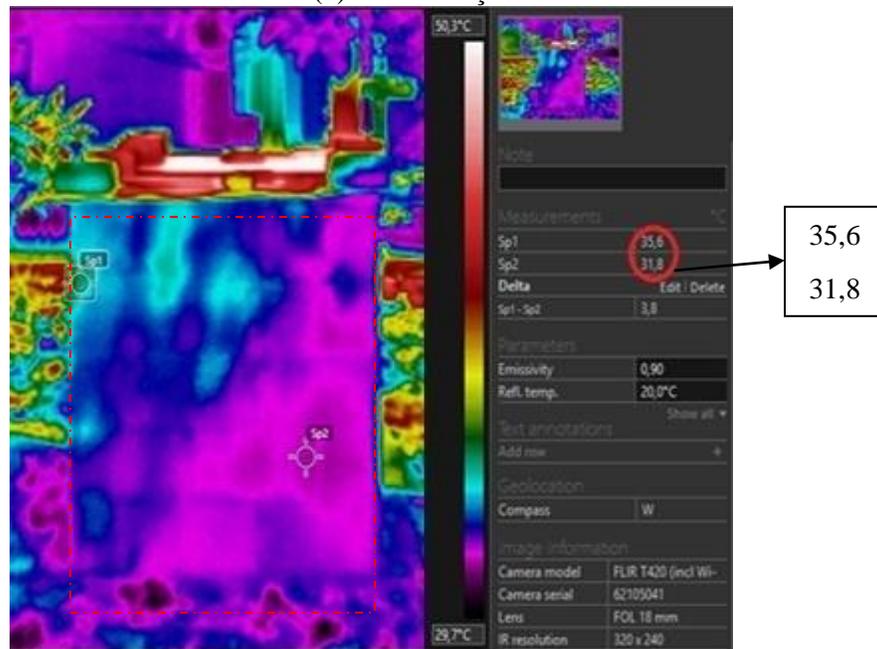
Outro ponto a ser destacado foi devido ao comportamento das variações térmicas internas ocorridas nos dois tipos de blocos ao longo do dia, com o aumento de suas temperaturas até o final do ensaio (acréscimos médios horários de 1,2 e 1,3 °C para BREF e B15 respectivamente), mesmo com a redução da temperatura ambiente a partir das 13:00h, demonstrando um atraso térmico para ambas as alvenarias.

Ao partir para a análise das variações externas das paredes, notou-se que, apesar das variáveis presentes no ensaio devido a sua execução em um local aberto, a interferência do sombreamento em faces sob mesma orientação, mas pertencentes a caixas distintas, pouco interferiu na diferença de 1,4 °C encontrada às 9:00h, pois ao comparar as temperaturas de uma parede com blocos BREF, coberta totalmente pela sombra em relação à face correspondente da parede com os blocos B15, verificou-se que as menores temperaturas e variações foram encontradas para os blocos com a presença de 15% de substituição parcial da brita (Figura 4.7 referente ao dia 15 de agosto).

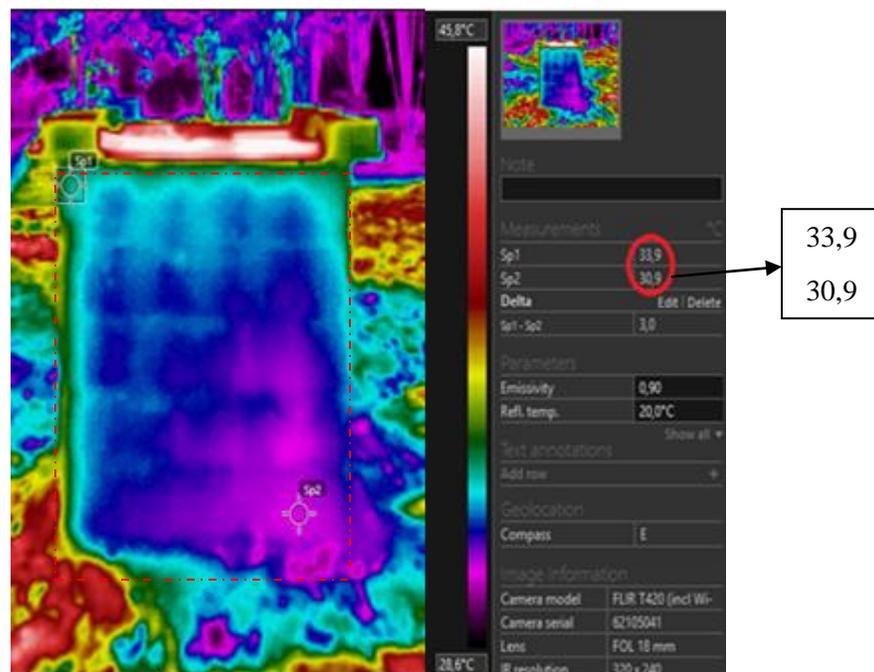
O mesmo argumento pode ser aplicado em função das alterações do ângulo de incidência do sol devido a sua movimentação ao longo do dia, pois foi percebido que às 15:00h a

diminuição da temperatura média dos blocos B15 (mais ao leste) foi sensivelmente superior a do referencial, com uma redução horária de 1,2 °C e 0,8 °C respectivamente. Quanto à influência da direção e velocidade das correntes de ar não se pode avaliar a sua possível interferência nas faixas térmicas em ambos os ambientes e blocos por falta de instrumentos específicos de análise.

Figura 4.7 – Termogramas das faces da parede sombreada dos blocos BREF (a) e da correspondente para os blocos B15 (b) sob total ação do sol.



(a)

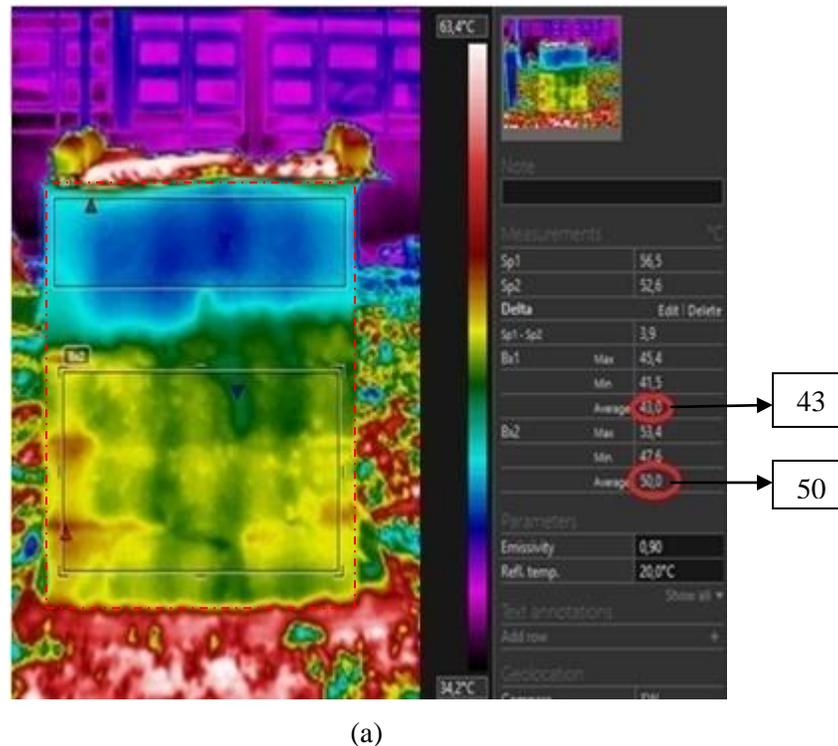


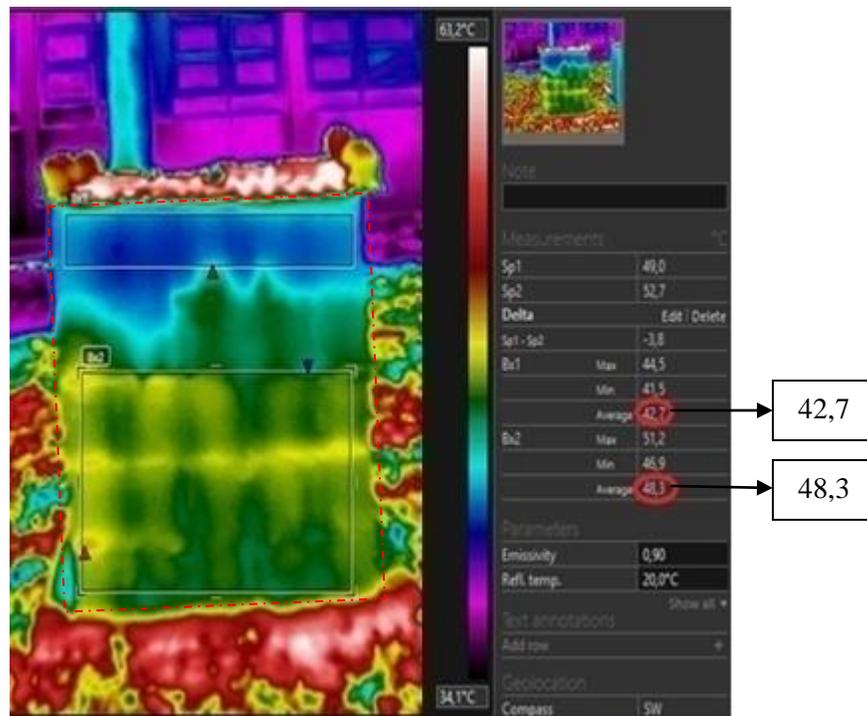
(b)

Contudo, ao estudar a mesma face de uma parede (a Figura 4.8 trata de duas imagens obtidas às 12:00h do dia 16 de agosto em faces sob o mesmo direcionamento) composta por uma área sombreada (em função da cobertura) e outra exposta diretamente ao sol, encontraram-se diferenças pontuais próximas a 4 °C (como mostrado na Figura 4.7), e médias superficiais de 5,5 a 7,5 °C entre as partes superior e inferior (sendo as maiores distinções encontradas mais frequentemente nos blocos B15), que serviram como justificativa para as diferentes absorções de calor encontrada nas duas alvenarias.

Ressalta-se ainda que as maiores temperaturas identificadas na parte superior de ambas as caixas estão relacionadas aos materiais empregados para isolamento (telhas de fibrocimento e folha de compensado) e também porque, de acordo com Pedra (2011), as extremidades do elemento construtivo são os pontos mais propícios para o estabelecimento do equilíbrio térmico com o ambiente.

Figura 4.8 – Termogramas das paredes, sob mesmo direcionamento, dos blocos B15 (a) e BREF (b) com sombreamento da cobertura.





(b)

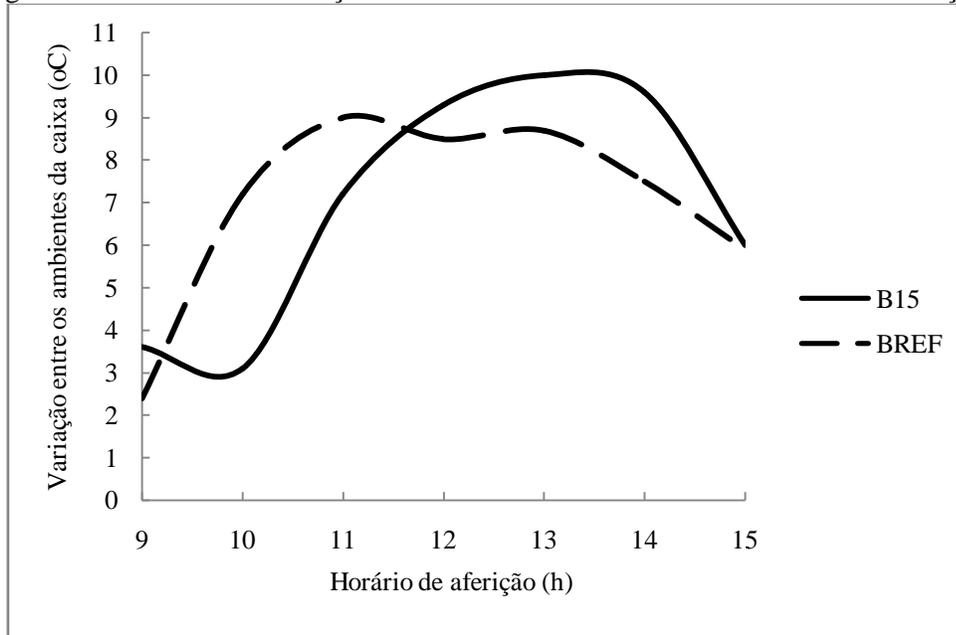
A interpretação dos valores médios de temperatura presentes no lado externo das paredes (segundo a Tabela 4.14), mostrou a maior emissão de energia dos blocos B15 em relação aos blocos referenciais nos horários mais quentes, com temperatura (às 14:00h) 7,3 °C e 3,4 °C acima das encontradas no ambiente e na alvenaria BREF respectivamente, apresentando um comportamento semelhante ao obtido por Ribeiro (2016), que estudou o desempenho térmico de placas cimentícias com e sem a presença de resíduos madeireiros na dosagem dos compósitos.

Essa característica indica também maior refletividade de radiação incidente (BARBOSA, 2016). Em função disso, comprovou-se a menor transferência de calor nos blocos B15, pois conforme destacado, as suas temperaturas internas foram praticamente às mesmas das aferidas para caixa sem poliestireno expandido.

Essa dificuldade de transmissão interna de calor é típica de materiais que apresentam maior isolamento térmico, comprovando que a mudança ocasionada pela incorporação do EPS na mistura do concreto não alterou drasticamente sua característica cerâmica (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2016). Pedra (2011) observou um comportamento semelhante, identificando as maiores temperaturas na superfície oposta ao fluxo de calor em blocos sem EPS em comparação aos que apresentavam o poliestireno expandido em seus vazios.

O gráfico das variações entre os ambientes internos e externos da caixa ao longo do tempo (Figura 4.9), mostrou que as diferenças para os blocos B15 chegaram a 10 °C no horário de pico de calor no ambiente, enquanto que para os blocos BREF a diferença máxima encontrada foi de 8,7 °C, ou seja, a presença do EPS reciclado produziu um aumento na isolamento térmica de aproximadamente 15,51%, sendo que às 14:00h obteve-se um valor de 27,57% superior a este mesmo referencial.

Figura 4.9 – Gráfico das variações entre os ambientes da caixa e o horário de medição.



Comparando-se esses percentuais com os resultados obtidos por Ribeiro (2016), que utilizou fontes artificiais de calor localizadas nos interiores de suas caixas térmicas, verificou-se que os blocos apresentaram menor variação térmica entre os ambientes internos e externos em relação aos painéis cimentícios com os resíduos de madeira utilizados pelo autor.

Da Figura 4.9, percebeu-se ainda comportamentos distintos para os dois tipos de blocos estudados, pois:

- 1) Próximo de 11:00h obtiveram-se as maiores diferenças de temperaturas entre os lados externos e internos das paredes para os blocos BREF (7,2 °C contra 3,1 °C das paredes do B15), enquanto que após este horário as diferenças sofreram uma queda (apesar da oscilação entre às 12:00 e 13:00h);

- 2) Para os blocos B15 houve uma contínua elevação até aproximadamente às 13:00h, com acentuado declive que o equiparou a curva da alvenaria referencial ao final do ensaio (6 °C à 5,9 °C para as paredes com blocos BREF).

Concluindo que:

- As paredes de alvenaria dos blocos B15 mostraram maior inércia térmica nos horários de maior temperatura, embora o conforto térmico tenha sido o mesmo obtido na caixa com blocos BREF;
- Apesar das altas temperaturas externas dos blocos B15, os mesmos demoraram mais tempo a transmitir este calor em comparação aos blocos BREF, ou seja, apresentaram um atraso térmico maior durante esse mesmo período.

Logo, admitiu-se que esses resultados surgiram em função da redução das densidades dos blocos pelo aumento de vazios enclausurados de ar seco no concreto, responsáveis por atrasar, segundo Callister Júnior e Rethwisch (2016), a propagação de calor de uma extremidade a outra da parede.

Ao comparar os resultados oriundos das relações entre as diferenças das temperaturas máximas e mínimas internas e externas de ambas as alvenarias ($\Delta_{int}/\Delta_{ext}$) com os descritos por Krüger et al. (2009), constatou-se que os valores apresentaram fatores de acréscimo iguais a 1,8 para o BREF e 2,0 para o B15, enquanto que para os autores, que empregaram placas cimentícias com rejeitos da indústria madeireira, foram encontrados fatores de decréscimos de 0,84 e 0,97 para as estações de inverno e verão do local onde foi realizado o experimento prático (em um ambiente aberto situado na cidade de Curitiba-PR).

Isso, de acordo com os mesmos autores, reflete a necessidade de ajustes nos processos construtivos e arquitetônicos para diminuir a sensibilidade perante as maiores faixas de temperaturas no meio externo, ratificando o que já havia sido concluído no item 4.2.6.1.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Conforme a análise dos resultados apresentada no capítulo anterior, pode-se estabelecer as seguintes conclusões:

- O Modelo de Empacotamento Compressível mostrou-se eficiente para definição da relação cimento-agregado, enquanto que a razão entre os agregados foi obtida pela metodologia experimental de Tango;
- A metodologia utilizada para a determinação da umidade ideal dos blocos comprovou-se eficaz ao apresentar um resultado semelhante ao sugerido pelo MEC e condizente com a consistência característica dos blocos;
- As condições especificadas para a propriedade mecânica dos blocos foram atendidas apenas para os tipos BREF e B5, visto que as amostras B10 e B15 não alcançaram a resistência mínima exigida para fins estruturais ou de vedação;
- A resistência mecânica apresentou uma relação inversamente proporcional à presença do EPS para teores acima de 5% de substituição da brita, reduzindo em até 40% a sua capacidade resistiva. As principais causas estão relacionadas ao tamanho dos grânulos, ao baixo consumo de cimento e ao processo produtivo empregado;
- Os teores de absorção apresentaram uma relação inversamente proporcional ao percentual volumétrico de poliestireno expandido reciclado nos blocos, indo ao encontro do esperado em função do aumento da porosidade no concreto. Os valores obtidos também se situaram abaixo do limite mínimo imposto pela NBR 6136 (ABNT, 2014);
- As umidades relativas dos blocos-testemunho estiveram dentro da faixa de variação imposta pela NBR 12118 (ABNT, 2013). Em comparação ao teor de EPS adotado, foi possível estabelecer uma razão diretamente proporcional entre esses dois percentuais;
- A redução da densidade com a presença do EPS resultou em um decréscimo da capacidade térmica de 9,6% para os blocos B15, comprovado através do

experimento prático que apresentou uma diferença, entre as paredes internas e externas da caixa, 27,6% superior a proporcionada pela alvenaria composta pelos blocos BREF no horário de pico, resultando em maiores inércia e atraso térmico;

- As paredes dos blocos com 15% de substituição da brita pelo EPS reciclado apresentaram uma transmissão de calor inferior à encontrada nas paredes compostas pelos blocos referenciais nos horários mais quentes, proporcionando maior isolamento térmico em função da maior parcela de reflexão e absorção de calor observada durante esse período;
- A incorporação de 15% do EPS reciclado não proporcionou conforto térmico devido às transmitâncias térmicas dos blocos estudados serem iguais, a temperatura por radiação dos blocos B15 serem superior a de BREF e pelas razões entre as variações das temperaturas internas e externas das caixas dos dois tipos estarem acima do recomendado.

Logo, conclui-se que teores de substituição volumétrica do agregado convencional por EPS reciclado iguais ou abaixo de 5% seriam os ideais para a produção de blocos vazados de concreto com a dosagem e tecnologia utilizadas na pesquisa.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

As contribuições para o desenvolvimento de novos trabalhos relacionados ao tema da pesquisa estão relacionadas às seguintes sugestões:

- Empregar pozolanas como substitutos parciais do cimento para manutenção ou aumento da resistência mecânica dos blocos, permitindo a incorporação de maiores teores de EPS reciclado;
- Comparar as propriedades físicas e mecânicas de blocos com o uso do areião (material típico da região) em relação aos blocos produzidos com a brita 0;
- Estudar mais especificamente o fator a/c (com desenvolvimento de uma metodologia mais científica que a utilizada nesse trabalho) para aferição da influência da umidade nas propriedades dos blocos e na sua microestrutura;
- Desenvolver ensaios de desempenho ou conforto térmico em ambientes fechados (com a presença de fontes de calor artificiais) para comparação dos resultados

obtidos na pesquisa. Metodologias voltadas para o estudo do desempenho acústico também seriam de grande relevância;

- Executar ensaios de envelhecimento e de resistência ao fogo para verificação da durabilidade obtida nos blocos;
- Empregar o EPS tanto na forma de pérolas quanto de grânulos reciclados para substituição parcial dos agregados (miúdo e graúdo), em virtude de obter uma melhor distribuição granulométrica da mistura seca. A substituição em termos do volume total do concreto também pode ser outra fonte de estudo;
- Produzir, em moldes com *design* e geometria diferentes, blocos com as misturas obtidas pela dosagem experimental adotada para verificação da influência dos parâmetros dimensionais nas suas propriedades;
- Avaliar os custos dos insumos para a produção dos blocos, determinando a viabilidade econômica da incorporação do EPS reciclado no concreto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6136**: blocos vazados de concreto para alvenaria simples – requisitos. Rio de Janeiro, 2014 (Emenda 2016).

_____. **NBR 7211**: agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7215**: cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 7218**: agregados – determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 7221**: agregados – índice de desempenho de agregado miúdo contendo impurezas orgânicas – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 7809**: agregado graúdo – determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 7973**: poliestireno expandido para isolamento térmico – determinação de absorção de água. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 9775**: agregado miúdo – determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 9939**: agregado graúdo – determinação do teor de umidade total – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 11579**: cimento Portland – determinação do índice de finura por meio de peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 11752**: materiais celulares de poliestireno para isolamento térmico na construção civil e em câmaras frigoríficas. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 12118**: blocos vazados de concreto simples para alvenaria – métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15220-1**: desempenho térmico de edificações. parte 1: definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15220-2:** desempenho térmico de edificações. parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15220-3:** desempenho térmico de edificações. parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575-1:** edificações habitacionais — desempenho parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15575-2:** edificações habitacionais — desempenho parte 2: requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15575-4:** edificações habitacionais — desempenho parte 4: sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15900-1:** água para amassamento de concreto – parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 15961-1:** alvenaria estrutural — blocos de concreto: projeto. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 15961-2:** alvenaria estrutural — blocos de concreto: execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR NM 23:** cimento Portland e outros materiais em pó — determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 30:** agregado miúdo — determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 43:** cimento Portland — determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 45:** agregados — determinação da massa unitária e índices de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46:** agregados — determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 49:** agregado fino — determinação das impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52:** agregado miúdo — determinação da massa específica e massa aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53:** agregado graúdo — determinação da massa específica, massa aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 65:** cimento Portland — determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 67:** concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248:** agregados — determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 211.2:** standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete. 1998.

_____. **ACI 213R:** guide for structural lightweight aggregate concrete. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **ASTM C55:** standard specification for concrete building brick. West Conshohocken, 2014.

_____. **ASTM C140/C140M:** standard specification for sampling and testing concrete masonry units and related units. West Conshohocken, 2014.

ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural – Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais.** 2014. 98p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014. Disponível em <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/267702>> Acesso em 01 de fev. 2018.

BARBOSA, A. M. **Compósitos poliméricos com resíduo de açaí para mitigação de efeitos térmicos como estratégias eco-alternativas em habitações na Amazônia.** 2016. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resoluções do CONAMA: Resoluções vigentes publicadas entre setembro de 1984 e janeiro de 2012.** Brasília, 2012. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/61AA3835/LivroConama.pdf>> Acesso em 31 de out. 2016.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010.** Disponível em <<http://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>> Acesso em 22 de ago. 2017.

CALLISTER JÚNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 9ª Ed. Brasil: LTC. 2016.

CATÓIA, T. **Concreto ultraleve estrutural com perolas de EPS: Caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes.** 2012. 154p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola

de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em <www.teses.usp.br/teses/...19122012.../2012DO_ThiagoCatoia.pdf> Acesso em 27 de out. 2016.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON AND FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE. **Lightweight aggregate concrete – Manual of design and technology**. London: The Construction Press, 1977.

COOK, D. J. Expanded polystyrene beads as lightweight aggregate for concrete. **Precast Concrete**, vol. 4, n. 12, p. 691-693, 1973.

CRUZ, T. T. **Uso da avaliação do ciclo de vida para determinação na redução de emissões de gases do efeito estufa e do consume de energia associados a reciclagem de EPS**. 2015. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/127968>> Acesso em 05 de fev. 2018.

CUI, C. et al. Stress–strain relationship in axial compression for EPS concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 105, p.377-383, 2016. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815308291>> Acesso em 31 de out. 2016.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: A scientific approach**. Modern Concrete Technology Series, vol. 9. Londres: E&FN SPON, 1999.

DEMIRBOGA, R.; KAN, A. Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes. **Construction and Building Materials**, vol. 35, p.730-734, 2012. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812003078>> Acesso em 8 de jul. 2016.

DISSANAYAKE, D. M. K. W.; JAYASINGHE, C.; JAYASINGHE, M. T. R. A comparative embodied energy analysis of a house with recycled expanded polystyrene (EPS) based foam concrete wall panels. **Energy and Buildings**, vol. 135, p.85-94, 2017. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816315985>> Acesso em 16 de jan. 2018.

FERRÁNDIZ-MAS, V.; GARCÍA-ALCOCEL, E. Physical and mechanical characterization of Portland cement mortars made with expanded polystyrene particles addition (EPS). **Materiales de Construcción, Alicante**, vol. 62, n. 308, p.547-566, 2012. Disponível em <<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewArticle/747>> Acesso em 31 de out. 2016.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. 2005. 259p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em <http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1041:sidiclei-formagini&catid=149&Itemid=154&lang=pt-br> Acesso em 20 de fev. 2017.

- FROTA, A.B.; SCHIFFER, S.R. **Manual do conforto térmico**. 2007. 3 fotografias.
- GOMES, P. C. C. et al. Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. **Ambiente Construído**, vol. 15, n. 3, p.31-46, 2015. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1678-86212015000300031&script=sci_arttext&tlng=es> Acesso em 13 de jan. 2018.
- GROTE, Z. V; SILVEIRA, J. L. **Análise energética e exergética de um processo de reciclagem de poliestireno expandido (isopor)**. 2 fotografias.
- HERKI, B. A.; KHATIB, J. M.; NEGIM, E. M. Lightweight concrete made from waste polystyrene and fly ash. **World Applied Sciences Journal**, vol. 21, n. 9, p.1356-1360, 2013. Disponível em <[http://idosi.org/wasj/wasj21\(9\)13/14.pdf](http://idosi.org/wasj/wasj21(9)13/14.pdf)> Acesso em 17 de ago. 2016.
- HERNÁNDEZ-ZARAGOZA, J. B. et al. Cellular concrete bricks with recycled expanded polystyrene aggregate. **Advances in Materials Science and Engineering**, vol. 2013, 5p., 2013. Disponível em <<https://www.hindawi.com/journals/amse/2013/160162/abs/>> Acesso em 17 de set. 2016.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 2008. 2 fotografias.
- KAYA, A.; KAR, F. Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. **Construction and Building Materials**, vol. 105, p.572-578, 2016. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815308485>> Acesso em 15 de jan. 2018.
- KRÜGER, E. L. et al. Thermal analysis of wood–cement panels: Heat flux and indoor temperature measurements in test cells. **Construction and Building Materials**, n. 23, p. 2299-2305, 2009.
- LING, I. H.; TEO, D. C. L. EPS RHA concrete bricks: A new building material. **Jordan Journal of Civil Engineering**, vol.7, n. 4, p.361-370, 2013. Disponível em <<http://platform.almanhal.com/Reader/Article/86109>> Acesso em 15 de jan. 2018.
- LIU, N.; CHEN, B. Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 68, p.227-232, 2014. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814006813>> Acesso em 28 de out. 2016.
- _____. A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, vol. 44, p.691-698, 2013. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813003012>> Acesso em 16 de jan. 2018.

MANAUS. Secretaria Municipal de Limpeza Urbana. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Manaus (PMGIRSM)**. Manaus, 2015.

MANDLIK, A. et al. Lightweight concrete using EPS. **International Journal of Science and Research**, vol. 4, n. 3, p.2007-2010, 2015. Disponível em <<http://www.ijsr.net/archive/v4i3/SUB152576.pdf>> Acesso em 20 de jun. 2016.

MARTINS, M. C. **O tratamento da resistência térmica superficial nas normas técnicas brasileiras e seu impacto no consumo energético estimado para edifícios**. 2017. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em <<http://www.periodicos.ufpr.br/handle/1884/49397>> Acesso em 04 de fev. 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 4^a ed. McGraw-Hill Professional Publishing, 2013.

MONTE F. L.; BAMONTE, P.; GAMBAROVA, P. G. Physical and mechanical properties of heat-damaged structural concrete containing expanded polystyrene synthesized particles. **Fire and Materials**, vol.39, p.58-71, 2015. Disponível em <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fam.2230/full>> Acesso em 15 de out. 2016.

MOREIRA, L. S. et al. Reutilização de RCC e EPS na fabricação de blocos de concreto estrutural. **Revista Infinity**, vol. 2, n.1, 2017. Disponível em <<http://revista.faifaculdades.edu.br:8080/index.php/infinity/article/view/296>> Acesso em 13 de jan. 2018.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, L. S. **Reaproveitamento de resíduos de poliestireno expandido (isopor) em compósitos cimentícios**. 2013. 75p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2013. Disponível em <http://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/LIVIA_SOUZA_DE_OLIVEIRA.pdf> Acesso em 27 de out. 2016.

OLIVEIRA, G. F. P. **Potencialidades da termografia para o diagnóstico de patologias associadas à humidade**. 2013. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2013. Disponível em <https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub_geral.show_file?pi_gdoc_id=400303> Acesso em 03 de fev. 2018.

PEDRA, S. A. **Potencialidades na termografia infravermelha aplicada ao design do conforto térmico de alvenaria estrutural**. 2011. 100p. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em <<http://www.ppgd.uemg.br/wp-content/uploads/2012/08/Solange-Andere-Pedra.pdf>> Acesso em 15 de mar. 2017.

PINTO, J. et al. Corn cob lightweight concrete for non-structural applications. **Construction and Building Materials**, vol. 34, p. 346-351, 2012. Disponível em

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812001201>> Acesso em 28 de out. 2016.

REFIN, N. A. B. M. **Experimental study on the prism strength of expanded polystyrene lightweight brick**. 2016. 35p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil e Recursos da Terra, Universidade Malaysia Pahang, Pahang, 2016. Disponível em <<http://umpir.ump.edu.my/13009/1/FKASA%20-%20NOR%20ATIQA%20MAT%20REFIN%20-%20CD%209757.pdf>> Acesso em 1 de nov. 2016.

RIBEIRO, U. G. **Desempenho térmico, acústico e mecânico de compósitos cimentícios produzidos com resíduos da indústria madeireira de Porto Velho**. 2016. 76p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

SADRMOMTAZI, A.; SOBHANI, J.; MIRGOZAR, M.A. Modeling compressive strength of EPS lightweight concrete using regression, neural network and ANFIS. **Construction and Building Materials**, vol. 42, p.205-216, 2013. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813000792>> Acesso em 8 de set. 2016.

SANTOS, C. G. et al. Poliestireno expandido na construção civil. **Revista do Centro Universitário Newton Paiva**, n.8, p. 114-118, 2013. Disponível em <<http://blog.newtonpaiva.br/pos/wp-content/uploads/2013/11/E8-ENG18.pdf>> Acesso em 29 de out. 2016.

SANTOS, T. P. S. **Reciclagem do poliestireno expandido: compósito com fibras de algodão para confecção de placas de circuito impresso**. 2013. 55p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013. Disponível em <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/121051>> Acesso em 01 de fev. 208.

SARTORTI, A. L. **Comportamento dinâmico de lajes maciças de concreto leve com pérolas de EPS**. 2015. 251p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/...14082015.../2015DO_ArturLenzSartorti.pdf> Acesso em 01 de jan. 2018.

SAYADI, A. A. et al. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 112, p.716-724, 2016. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816302756>> Acesso em 3 nov. 2016.

SILVA, C. A. **Manual de desempenho - Alvenaria com blocos de concreto**. São Paulo: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE BLOCOS DE CONCRETO, 2014. 39p. Disponível em <<http://www.blocobrasil.com.br/>> Acesso em 30 de mar. 2017.

SILVA, M. O.; SOUSA, J. G. G.; LIMA, L. C. Estudo de dosagem para produção de blocos de concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS,

20^a ed., 2012, Joinvile. **Artigo.** Joinvile, 2012. 9p. Disponível em <<http://www.metallum.com.br/20cbecimat/trabalhos-completos-cbecimat.php>> Acesso em 24 de jan. 2017.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO AMAZONAS. **Saldo de emprego na construção civil do Amazonas fica estável em outubro.** Disponível em <<http://www.sindicatodaindustria.com.br/noticias/2017/11/72,118999/saldo-de-empregos-na-construcao-civil-do-amazonas-fica-estavel-em-outubro.html>> Acesso em 02 de fev. 2017.

SOTO, N. T. A. **Avaliação do uso de agregado de resíduo de construção civil nas propriedades do concreto *no slump* para fabricação de artefatos de concreto.** 2017. 171p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em < <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2569>> Acesso em 02 de fev. 2018.

SOUZA, R. J. Q. **Validação tecnológica do caroço do fruto do açaí como material alternativo na pavimentação de baixo volume de tráfego.** 2013. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos da Amazônia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013. Disponível em <<http://www.ppgcem.ufam.edu.br/attachments/article/4/2013%20-%20Reginaldo%20Jos%C3%A9%20Queiroz%20de%20Souza.pdf>> Acesso em 01 fev. 2018.

TAMUT, T. et al. Partial replacement of coarse aggregates by expanded polystyrene beads in concrete. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, vol. 3, n. 2, p.238-241, 2014. Disponível em <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.678.5015&rep=rep1&type=pdf>> Acesso em 2 de nov. 2016.

TANG, W.; CUI, H.; TAHMASBI, S. Fracture properties of polystyrene aggregate concrete after exposure to high temperatures. **Materials**, vol. 9, n. 630, 13p, 2016. Disponível em < <http://www.mdpi.com/1996-1944/9/8/630/htm>> Acesso em 27 de out. 2016.

TANG, W. C.; CUI, H. Z.; WU, M. Creep and creep recovery properties of polystyrene aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 51, p.338-343, 2014. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813010143>> Acesso em 30 de set. 2016.

TANGO, C. E. S. Blocos de concreto: Produção, dosagem e controle de qualidade. **A Construção**, n. 1890, p. 11-18, 1984.

_____. Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES, 5th ed., 1994, Florianópolis. **Anais.** Florianópolis, 1994. p.21-30. Disponível em <http://www.infohab.org.br/acervos/advanced-search?advancedSearch=tango&Buscar=Buscar&opcoes=NOME_AUTOR&tipoDocumento=0&tipoOrdenacao=>> Acesso em 13 de nov. 2016.

TORKAMAN J.; ASHORI, A.; MONTAZI, A. S. Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. **Construction and Building Materials**, vol. 50, p.432-436, 2014. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813008842>> Acesso em 28 de out. 2016.

TRUSSONI, M.; HAYS, C. D.; ZOLLO, R. F. Comparing lightweight polystyrene concrete using engineered or waste materials. **American Concrete Institute Materials Journal**, vol. 109, n. 1, p.101-107. 2012. Disponível em <<http://web.a.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=0889325X&AN=70548762&h=vTT4ltJzhbiHz30dmjgBCoRLTR0%2ftRA30RZ2WqbxZsNNbi2DMbjjjNaC4ZyWG9QZtdc4tJ1fdENYtITr9WgdKQ%3d%3d&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLocal=ErrCrINotAuth&crlhashurl=login.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26authtype%3dcrawler%26jrnl%3d0889325X%26AN%3d70548762>> Acesso em 13 de ago. 2016.

VARGAS, R. V. **Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: Propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas**. 2008. 349p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2008). Disponível em <http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1125:reila-vargas-velasco&catid=152&Itemid=154&lang=pt-br> Acesso em 20 de fev. 2017.

VIEIRA, R. K. et al. Optimization of expanded polystyrene lightweight aggregate in pre-cast concrete blocks by a completely random experimental design (CRED) with mixture and process variables. **Open Journal of Statistics**, vol. 6, p.594-604, 2016.

XU, Y. et al. Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. **Construction and Building Materials**, vol. 27, p.32-38, 2012. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811004636>> Acesso em 17 de set. 2016.

_____. Experimental study and modeling on effective thermal conductivity of EPS lightweight concrete. **Journal of Thermal Science and Technology**, vol.11, n. 2, 13p, 2016. Disponível em <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jtst/11/2/11_2016jtst0023/_article> Acesso em 30 de out. 2016.

APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E CIMENTO

A.1 – Resistência à compressão do cimento

Tabela Ap.1 – Resistência à compressão das amostras de cimento.

Amostra	Resistência 3 dias (MPa) ¹	CV (%)	Resistência 7 dias (MPa)	CV (%)	Resistência 28 dias (MPa)	CV (%)
1	-		31,17		34,99	
2	-		31,02	0,33	32,09	4,81
3	-	-	31,27		34,84	
4	-		31,12		28,16*	
5	21,80		26,13		31,53	
6	23,94	6,95	25,77	6,44	30,66	5,70
7	21,14		23,17		34,17	
8	20,42		19,05*		23,89*	
9	24,92		30,17		31,89	
10	24,57	1,42	28,77	3,43	33,56	3,54
11	24,52		28,72		33,21	
12	24,07		27,77		31,10	

*Valores descartados.

A.2 - Materiais Deletérios

Figura Ap.1 – Comparação das soluções para ensaio de impurezas orgânicas na areia.



¹ Constam somente 8 resultados para idade de 3 dias pois, na primeira vez em que o ensaio foi realizado, as amostras foram rompidas no quarto dia de idade devido a problemas com a máquina de compressão.

A.3 - Granulometria do cimento

Tabela Ap.2 – Distribuição granulométrica do cimento

Cimento Comum CP I-S					
Diâmetro (μm)	Volume Retido Acumulado (%)	Diâmetro (μm)	Volume Retido Acumulado (%)	Diâmetro (μm)	Volume Retido Acumulado (%)
239,883	100	26,303	56,9	2,884	4,70
208,93	99,86	22,909	51,83	2,512	4,04
181,97	99,61	19,953	47,01	2,188	3,58
158,489	99,24	17,378	42,42	1,905	3,26
138,038	98,75	15,136	38,06	1,66	3,01
120,226	98,03	13,183	33,88	1,445	2,79
104,713	96,98	11,482	29,86	1,259	2,57
91,201	95,46	10	26,01	1,096	2,31
79,433	93,35	8,71	22,34	0,955	2,01
69,183	90,54	7,586	18,91	0,832	1,67
60,256	87,02	6,607	15,76	0,724	1,30
52,481	82,82	5,754	12,95	0,631	0,93
45,709	78,07	5,012	10,53	0,55	0,58
39,811	72,92	4,365	8,5	0,479	0,30
34,674	67,57	3,802	6,88	0,417	0,10
30,2	62,18	3,311	5,63	0,363	0,01

APÊNDICE B - DOSAGEM DOS BLOCOS**B.1 – Composição da Mistura Seca Ideal**

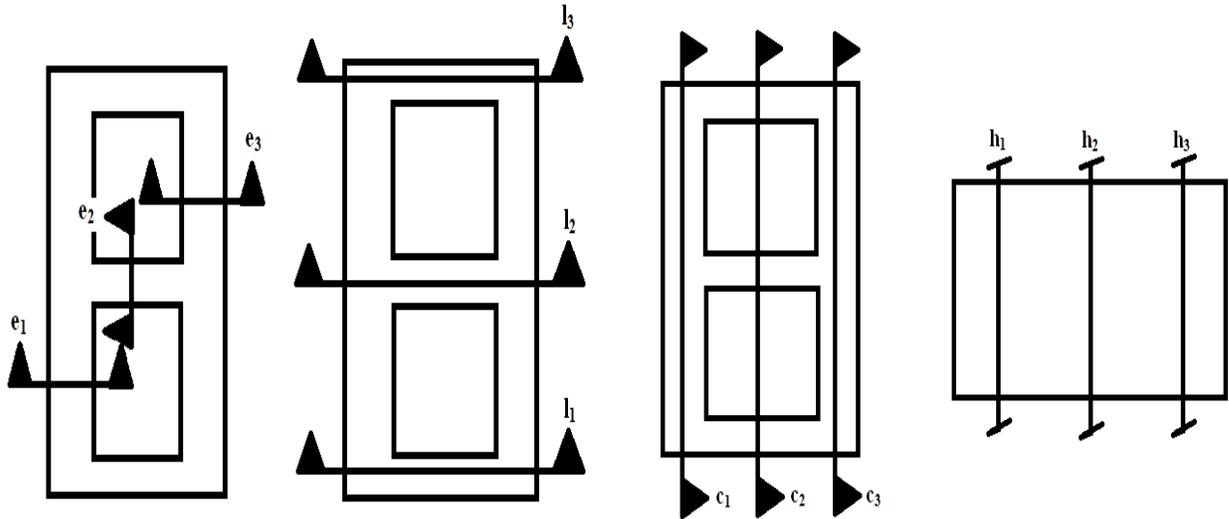
Tabela Ap.3 – Proporção ideal dos materiais secos pelo MEC.

Material	Percentual Volumétrico (%)	Percentual em Massa (%)
Brita	47,08	52,73
Areia	28,35	30,58
Cimento	8,72	10,98

APÊNDICE C - PROPRIEDADES NORMALIZADAS DOS BLOCOS

C.1 – Análise Dimensional

Figura Ap.2 – Descrição dos locais aferidos nos blocos.



Onde:

$$e_t = e_2 ; \quad e_c = \frac{e_1 + e_3}{2} ; \quad l_{\text{médio}} = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{3} ; \quad c_{\text{médio}} = \frac{c_1 + c_2 + c_3}{3} ; \quad h_{\text{médio}} = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3}$$

Tabela Ap.4 – Dimensões reais dos blocos-testemunho.

Tipo	Amostra	Espessura transversal "e _t " (cm)	Espessura longitudinal média "e _c " (cm)	Largura média "l" (cm)	Comprimento médio "c" (cm)	Altura média "h" (cm)
BREF	1	3,15	3,13	19,00	39,05	20,18
	2	3,25	3,15	19,01	39,01	20,19
	3	3,21	3,21	19,26	39,03	20,31
B5	1	3,10	3,11	19,00	38,95	20,06
	2	3,09	3,13	18,98	38,95	20,10
	3	3,19	3,15	18,99	39,00	20,15
B10	1	3,07	3,11	19,00	38,97	20,02
	2	3,09	3,10	19,00	39,00	19,90
	3	3,07	3,10	19,07	39,00	20,00
B15	1	3,07	3,15	19,14	39,00	20,13
	2	3,11	3,08	19,17	39,00	19,21
	3	3,15	3,11	19,15	38,90	19,82

C.2 – Absorção e umidade relativa

Tabela Ap.5 – Pesos, teor de absorção e umidade dos blocos vazados.

Tipo	Amostra	Peso normal (g)	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Absorção (%)	DP (%)	Umidade Relativa (%)	DP (%)
BREF	1	17800	17485	18480	5,69	1,04	31,66	0,29
	2	17445	17145	18140	5,80		30,15	
	3	17045	16735	17780	6,24		29,67	
B5	1	15460	15180	16245	7,02	3,37	26,29	0,69
	2	16590	16325	17360	6,34		25,60	
	3	17090	16790	17315	5,63		31,75	
B10	1	15940	15670	16770	7,02	2,34	24,55	0,20
	2	15220	14920	15950	6,90		29,13	
	3	15580	15290	16405	7,29		26,01	
B15	1	14275	13975	15220	8,91	1,00	24,10	0,38
	2	13885	13575	14785	8,91		25,62	
	3	14055	13760	14895	8,25		25,99	

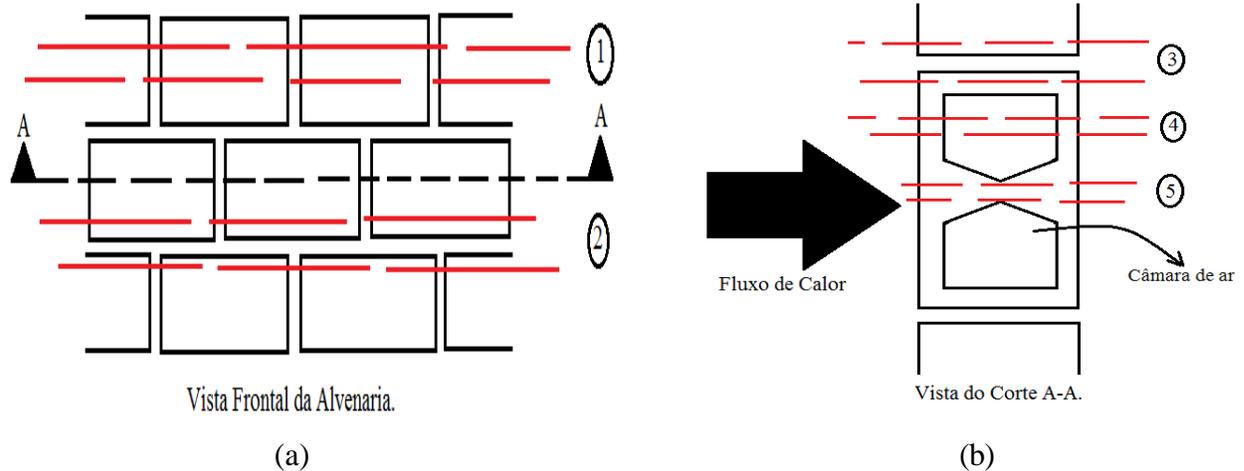
C.3 – Resistência à compressão

Figura Ap.3 – Fissurações nos corpos de prova cilíndricos.



APÊNDICE D - DESEMPENHO TÉRMICO DOS BLOCOS

Figura Ap.4 – Vistas frontal (a) e de corte (b) dos blocos para análise térmica.



Crítérios gerais:

- Desprezou-se a argamassa de assentamento de acordo com exemplificação da NBR 15220-2 (ABNT, 2005), desconsiderando-se a seção 2 e subseção 3 para o cálculo das propriedades térmicas. A análise se concentrou no fluxo de calor que passou na seção 1 e suas variações (subseções 4 e 5);
- Para as câmaras de ar presentes nos blocos, adotou $R_{ar} = 0,17 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$ (NBR 15220-2, ABNT, 2005 – Anexo C);
- As resistências internas e externas foram iguais a 0,13 e 0,04 $\text{(m}^2 \cdot \text{K)/W}$, respectivamente (NBR 15220-2, ABNT, 2005 – Anexo C);
- A espessura adotada para o cálculo foi tomada como a média das paredes longitudinais e transversais;
- Desprezou-se a capacidade térmica das câmaras de ar presentes nos vazios dos blocos de acordo com a mesma norma;
- Para as estimativas referentes às substituições de 30 e 50%, consideraram-se as médias das dimensões das paredes dos quatros tipos anteriores.

Cálculos para as propriedades de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (Ct)

D.1 Cálculo para BREF:

$$\rho = 2035,66 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 1,40 \text{ W/(m.K)} \text{ (NBR 15220-2, ABNT, 2005 – Anexo C)}$$

D.1.1 Resistência e transmitância térmica da parede na Seção 1:

a) Subseção 5 (concreto):

$$A_5 = 0,0316 \times 0,2023 = 0,00639 \text{ m}^2$$

$$R_5 = \frac{l}{\lambda} = \frac{0,1909}{1,40} = 0,1364 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$$

b) Subseção 4 (concreto + câmara de ar + concreto)

$$A_4 = 0,1476 \times 0,2023 = 0,02986 \text{ m}^2$$

$$R_4 = \frac{2 \cdot e}{\lambda} + R_{ar} = \frac{2 \cdot 0,0317}{1,40} + 0,17 = 0,2153 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$$

Logo:

$$R_t = \frac{3 \cdot A_5 + 2 \cdot A_4}{\frac{3 \cdot A_5}{R_5} + \frac{2 \cdot A_4}{R_4}} = 0,1887 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$$

Logo, a resistência térmica total será:

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} = 0,13 + 0,1877 + 0,04 = 0,3587 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$$

A transmitância térmica será:

$$U = \frac{1}{R_T} = \mathbf{2,789 \text{ W/(m}^2\text{.K)}}$$

D.1.2 Capacidade Térmica da parede na seção 1:

Subseção 5:

$$C = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{concreto}} = 0,1909 \cdot 1,00 \cdot 2035,66 = 388,608 \text{ kJ/(m}^2\text{.K)}$$

Subseção 4 :

$$C = \sum_{i=1}^3 (e_i \cdot c_i \cdot \rho_i) = 2 \cdot (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{concreto}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{ar}} = 2 \cdot 0,0317 \cdot 1,00 \cdot 2035,66 + 0 = 129,061 \text{ kJ/(m}^2\text{.K)}$$

Logo, a resistência térmica total será:

$$C_T = \frac{3 \cdot A_5 + 2 \cdot A_4}{\frac{3 \cdot A_5}{C_5} + \frac{2 \cdot A_4}{C_4}} = \mathbf{154,135 \text{ kJ/(m}^2\text{.K)}}$$

D.2 Cálculo para B5:

$$\rho = 1956,47 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 1,40 \text{ W/(m.K)} \text{ (Anexo C - NBR 15220-2, ABNT, 2005)}$$

A transmitância térmica será:

$$U = \mathbf{2,791 \text{ W/(m}^2\text{.K)}}$$

E a resistência térmica total será:

$$C_T = 146,082 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

D.3 Cálculo para B10:

$$\rho = 1910,79 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\lambda = 1,40 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \text{ (NBR 15220-2, ABNT, 2005 – Anexo C)}$$

A transmitância térmica será:

$$U = 2,790 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

E a resistência térmica total será:

$$C_T = 141,63 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

D.4 Cálculo para B15:

$$\rho = 1878,68 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\lambda = 1,40 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \text{ (NBR 15220-2, ABNT, 2005 – Anexo C)}$$

A transmitância térmica será:

$$U = 2,789 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

E a resistência térmica total será:

$$C_T = 139,34 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

D.5 Cálculo para B30:

$$\rho = 1765,70 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\lambda = 1,40 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \text{ (NBR 15220-2, ABNT, 2005 – Anexo C)}$$

A transmitância térmica será:

$$U = 2,790 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

E a resistência térmica total será:

$$C_T = 131,90 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

D.6 Cálculo para B50:

$$\rho = 1554,62 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 1,05 \text{ W/(m.K)} \text{ (NBR 15220-2, ABNT, 2005 – Anexo C para dosagem de cimento com } > 300 \text{ kg/m}^3 \text{)}$$

A transmitância térmica será:

$$U = 2,592 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

E a resistência térmica total será:

$$C_T = 116,13 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

D.5 – Conforto Térmico

Tabela Ap.6 – Variações térmicas horárias das paredes de alvenaria e do ambiente.

Dia de ensaio – 14 de agosto de 2017					
Horário (h)	BREF		B15		T _{ambiente} (°C)
	T _{interna} (°C)	T _{externa} (°C)	T _{interna} (°C)	T _{externa} (°C)	
9:00	30,0	31,7	30,2	33,6	36,5
10:00	30,9	37,6	31,1	37,3	37,0
11:00	32,8	40,9	33,0	40,3	38,3
12:00	34,7	42,3	34,3	42,7	38,1
13:00	37,1	42,1	37,4	44,1	39,5
14:00	37,6	42,6	38,3	46,4	39,3
15:00	38,1	42,5	38,8	47,7	39,1

(a)

Dia de ensaio – 15 de agosto de 2017					
Horário (h)	BREF		B15		T _{ambiente} (°C)
	T _{interna} (°C)	T _{externa} (°C)	T _{interna} (°C)	T _{externa} (°C)	
9:00	30,2	32,2	30,3	33,4	36,1
10:00	30,9	37,1	31,0	37,3	36,2
11:00	32,7	41,0	32,9	40,2	37,7
12:00	33,8	42,5	33,9	43,0	38,2
13:00	35,9	44,0	36,5	45,5	41,0
14:00	38,9	44,8	38,5	49,1	39,7
15:00	37,4	43,1	38,7	45,7	37,9

(b)

Dia de ensaio – 16 de agosto de 2017					
Horário (h)	BREF		B15		T _{ambiente} (°C)
	T _{interna} (°C)	T _{externa} (°C)	T _{interna} (°C)	T _{externa} (°C)	
9:00	31,3	34,8	31,3	35,6	31,8
10:00	31,8	38,2	31,8	37,7	37,5
11:00	33,1	40,9	32,9	40,7	39,0
12:00	35,5	44,0	36,5	44,0	38,1
13:00	36,2	43,1	38,1	45,1	38,6
14:00	37,4	42,0	38,3	44,8	38,9
15:00	38,0	41,2	38,1	42,7	38,2

(c)

Dia de ensaio – 17 de agosto de 2017					
Horário (h)	BREF		B15		T _{ambiente} (°C)
	T _{interna} (°C)	T _{externa} (°C)	T _{interna} (°C)	T _{externa} (°C)	
9:00	30,8	32,6	31,1	34,0	34,9
10:00	32,1	39,5	32,0	39,1	34,5
11:00	32,9	40,1	32,6	40,3	34,8
12:00	34,4	40,4	34,2	42,0	39,2
13:00	36,3	42,3	36,2	44,0	36,6
14:00	36,3	39,2	36,2	41,4	35,3
15:00	36,9	39,3	37,1	41,4	38,3

(d)

Dia de ensaio – 18 de agosto de 2017					
Horário (h)	BREF		B15		T _{ambiente} (°C)
	T _{interna} (°C)	T _{externa} (°C)	T _{interna} (°C)	T _{externa} (°C)	
9:00	30,5	33,0	30,6	34,4	38,9
10:00	32,8	38,9	34,8	38,2	37,3
11:00	32,1	41,8	33,3	40,8	39,8
12:00	34,2	43,1	33,8	43,6	39,3
13:00	35,5	44,9	35,0	46,5	41,1
14:00	36,7	44,9	36,5	48,8	40,8
15:00	38,0	43,5	38,9	47,2	39,9

(e)

ANEXO A - CONTROLE DE QUALIDADE DOS COMPONENTES DO CONCRETO

A.1 – Composição química do cimento

Tabela An.1 – Exigência química do cimento CPI-S.

Determinações químicas	Limites (% da massa)
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)	≤ 4,0
Anidrido carbônico (CO ₂)	≤ 3,0

Fonte: NBR 5732 (ABNT, 1991).

A.2 – Propriedades físicas e mecânicas do aglomerante hidráulico

Tabela An.2 – Exigências físicas e mecânicas do cimento comum.

Características e propriedades		Unidade	Limites do CPI-S 40
Finura	(Resíduo na peneira 75µm)	%	≤ 10,0
Tempo de início de pega		h	≥ 1
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	≥ 15,0
	7 dias de idade	MPa	≥ 25,0
	28 dias de idade	MPa	≥ 40,0

Fonte: NBR 5732 (ABNT, 1991).

A.3 – Principais normatizações e propriedades do EPS

Tabela An.3 – Metodologias e características referentes as pérolas de EPS.

Propriedades	Método de Ensaio	Unidade	Classe P			Classe F		
			I	II	III	I	II	III
Tipo de Material								
Massa específica aparente	NBR 11949	kg/m ³	13-16	16-20	20-25	13-16	16-20	20-25
Absorção de água	NBR 7973	g/cm ³ x 100	≤ 1					

Fonte: SANTOS et al. (2013).

A.4 – Distribuições granulométricas dos agregados

Tabela An.4 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada	
	Zona granulométrica d/D	
	4,75/12,5	9,5/25
75 mm	-	-
63 mm	-	-
50 mm	-	-
37,5 mm	-	-
31,5 mm	-	-
25 mm	-	0 – 5
19 mm	-	2 – 15
12,5 mm	0 – 5	40 – 65
9,5 mm	2 – 15	80 – 100
6,3 mm	40 – 65	92 – 100
4,75 mm	80 – 100	95 – 100
2,36 mm	95 – 100	-

Fonte: NBR 7911 (ABNT, 2009).

Tabela An.5 – Limites da composição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	-	-	-	-
6,3 mm	-	-	-	7
4,75 mm	-	-	5	10
2,36 mm	-	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Nota – O módulo de finura ótimo varia de 2,20 a 2,90.

Fonte: NBR 7911 (ABNT, 2009).

A.5 – Materiais deletérios nos agregados

Tabela An.6 – Limites de concentração de materiais deletérios para os agregados graúdos.

Determinação	Método de ensaio	Quantidade máxima relativa à massa do agregado graúdo (%)	
Torrões de argila e materiais friáveis	NBR 7218	Concreto aparente	1,0
		Concreto sujeito a desgaste superficial	2,0
		Outros concretos	3,0
Material pulverulento	NBR NM 45		1,0

Fonte: NBR 7911 (ABNT, 2009).

Tabela An.7 – Limites de concentração de materiais deletérios para o agregado miúdo.

Determinação	Método de ensaio	Quantidade máxima relativa à massa do agregado miúdo (%)	
Material pulverulento	NBR NM 46	Concreto sujeito a desgaste superficial	3,0
		Concreto protegido do desgaste superficial	5,0
Torrões de argila e materiais friáveis	NBR 7218		3,0
Impurezas orgânicas	NBR NM 49		A solução obtida no ensaio deve ser mais clara que a solução padrão

Fonte: NBR 7911 (ABNT, 2009).

ANEXO B - REFERÊNCIAS DE DOSAGEM DE CONCRETOS PELO MEC

B.1 - Compacidade real dos agregados

Tabela An.8 – Compacidade experimental dos agregados por faixa granulométrica.

Agregados	Frações	Compacidade
Miúdo	< 850 μm	0,627
	> 850 μm	0,595
Graúdo	< 4,8 mm	0,560
	< 4,8 mm	0,542

Fonte: VARGAS (2008).

B.2 - Compacidade experimental do cimento

Tabela An.9 – Compacidade experimental dos cimentos sem superplastificante.

Material	Compacidade (ϕ) sem dispersante
Cimento CII E 32	0,529
Cimento CIII 40	0,539

Fonte: FORMAGINI (2005).

Tabela An.10 – Compacidades experimentais do cimento e das pozolanas.

Materiais	Compacidade experimental	
	Sem superplastificante	Com superplastificante
Cimento	0,528	0,609
Sílica ativa	0,405	0,418
Cinza volante	0,564	0,614

Fonte: VARGAS (2008).

ANEXO C - CONTROLE DE QUALIDADE E CARACTERÍSTICAS DOS BLOCOS DE CONCRETO

C.1 – Propriedades mecânicas e físicas

Tabela An.11 – Classificação dos blocos vazados pelas dimensões nominais.

Família		20 x 40	15x40	15x 30	12,5 x 40	12,5 x 25	12,5 x 37,5	10 x 40	10 x 30	7,5 x 40	
Medida Nominal (mm)	Largura	190	140		115			90		65	
	Altura	190	190	190	190	190	190	190	190	190	
	Comprimento	Inteiro	390	390	290	390	240	365	390	290	390
		Meio	190	190	140	190	115	-	190	140	190
		2/3	-	-	-	-	-	240	-	190	-
		1/3	-	-	-	-	-	115	-	90	-
		Amarração “L”	-	340	-	-	-	-	-	-	-
		Amarração “T”	-	540	440	-	365	-	-	290	-
		Compensador A	90	90	-	90	-	-	90	-	90
		Compensador B	40	40	-	40	-	-	40	-	40
		Canaleta inteira	390	390	290	390	240	365	390	290	-
Meia canaleta	190	190	140	190	115	-	190	140	-		

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2014).

Tabela An. 12 - Requisitos para resistência à compressão, absorção e retração.

Classificação	Classe	Resistência característica a compressão axial (MPa)	Absorção (%)				Retração (%) – Ensaio facultativo
			Agregado normal		Agregado leve		
			Individual	Média	Individual	Média	
Com função estrutural	A	$f_{bk} \geq 8,0$	$\leq 9,0$	$\leq 8,0$	$\leq 16,0$	$\leq 13,0$	$\leq 0,065$
	B	$4,0 \leq f_{bk} \leq 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 9,0$			
Com ou sem função estrutural	C	$f_{bk} \geq 3,0$	$\leq 11,0$	$\leq 10,0$			

Fonte: Emenda 2016 da NBR 6136 (ABNT, 2014).

Tabela An.13 – Requisitos quanto as dimensões dos blocos-testemunho.

Classe	Largura nominal (mm)	Paredes longitudinais (mm)	Paredes transversais (mm)	
			Paredes (mm)	Espessura equivalente (mm)
A	190	32	25	188
B	190	32	25	188
C	190	18	18	135

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2014).

C.2 – Propriedades térmicas

Tabela An.14 – Limites para a transmitância térmica de paredes externas.

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 ≤ 2,5	U ≤ 2,5

Fonte: NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

Tabela An.15 – Limites para a capacidade térmica de paredes externas.

Capacidade térmica CT (kJ/ m ² .K)	
Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7	Zona 8
≥ 130	Sem requisito

Fonte: NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

Tabela An.16 – Resistência térmica superficial interna e externa.

R _{si} (m ² .K)/W			R _{se} (m ² .K)/W		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

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

Tabela An.17 – Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura.

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

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

Tabela An.18 – Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiações a temperaturas comuns (ondas longas).

Tipo de superfície	α	ϵ
Concreto aparente	0,65/0,80	0,85/0,95
Pintura : Branca	0,2	0,9
Amarela	0,3	0,9
Verde Clara	0,4	0,9

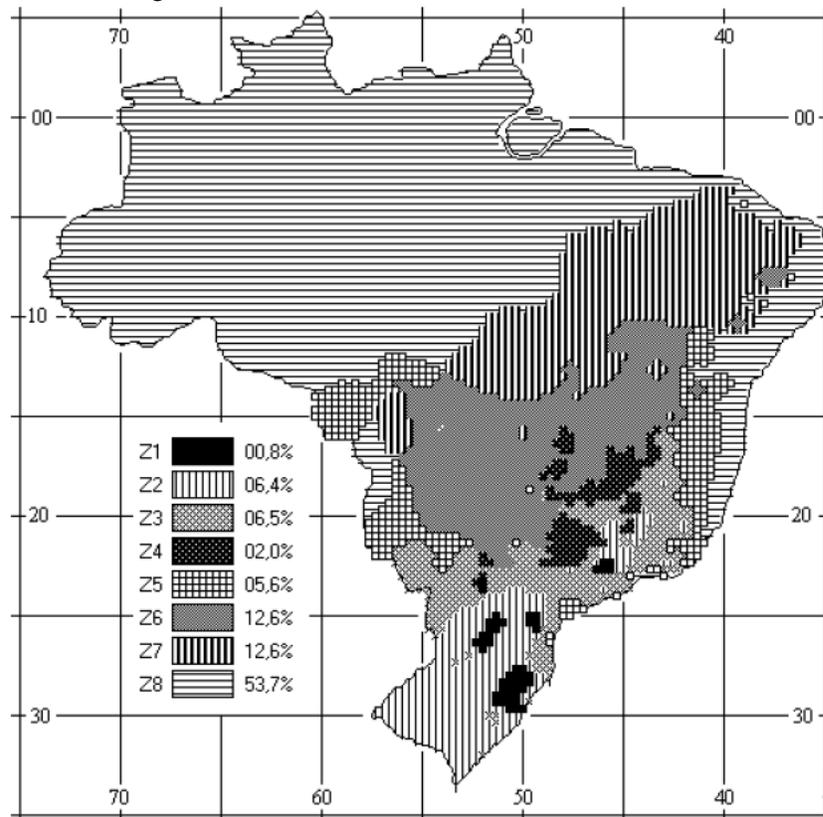
Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

Tabela An.19 – Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) do concreto.

Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/(m.k))	c (kJ/(kg.K))
Concreto (com agregados de pedra)			
Concreto normal	2200 – 2400	1,75	1,00
Concreto cavernoso	1700 – 2100	1,40	1,00

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

Figura An.1 – Zoneamento bioclimático brasileiro.



Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005).