



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



CAMILA DOS REIS ALVES

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO
DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE
BORRACHA DE PNEU E POLIESTIRENO EXPANDIDO
PARA APLICAÇÃO EM PAREDES DE CONCRETO**

Uberlândia, 2020

CAMILA DOS REIS ALVES

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO
DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE
BORRACHA DE PNEU E POLIESTIRENO EXPANDIDO
PARA APLICAÇÃO EM PAREDES DE CONCRETO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas e Construção Civil

Orientadora: Prof. Dra. Leila Aparecida de Castro Motta

Co-orientadora: Prof. Dra. Maria Cláudia de Freitas Salomão

Uberlândia, 2020

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A474 Alves, Camila dos Reis, 1994-
2020 Avaliação do comportamento higrotérmico de concretos produzidos com resíduos de borracha de pneu e poliestireno expandido para aplicação em paredes de concreto [recurso eletrônico] / Camila dos Reis Alves. - 2020.

Orientadora: Leila Aparecida de Castro Motta.
Coorientadora: Maria Cláudia de Freitas Salomão.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.358>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Motta, Leila Aparecida de Castro, 1970-, (Orient.). II. Salomão, Maria Cláudia de Freitas, 1986-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil			
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 250, PPGEC			
Data:	28 de fevereiro de 2020	Hora de início:	09h 00min	Hora de encerramento:
Matrícula do Discente:	11812ECV002			
Nome do Discente:	Camila dos Reis Alves			
Título do Trabalho:	Avaliação do comportamento higrotérmico de concretos produzidos com resíduos de borracha de pneu e poliestireno expandido para aplicação em paredes de concreto			
Área de concentração:	Estruturas e Construção Civil			
Linha de pesquisa:	Construção Civil			
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Reciclagem e sustentabilidade na construção civil			

Reuniu-se na Sala de Reuniões Prof. Márcio Antônio Ribeiro da Silva, bloco 1Y, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelas Professoras Doutoras: Janaide Cavalcante Rocha – ECV/UFSC, Eliane Betânia Carvalho Costa – FECIV/UFU e Leila Aparecida de Castro Motta - FECIV/UFU orientadora da candidata.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Dr. Leila Aparecida de Castro Motta, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Leila Aparecida de Castro Motta, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 11:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eliane Betânia Carvalho Costa, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 11:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Janaíde Cavalcante Rocha, Usuário Externo**, em 28/02/2020, às 11:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1860465** e o código CRC **647514E8**.

Dedico este trabalho a toda minha família
e amigos que sempre me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

À toda minha família em especial, meus pais Silvia e Roberto e minha irmã Amanda, pelo carinho e dedicação. Ao Vitor pelo estímulo e apoio permanente durante esta etapa.

Aos professores, mestres e doutores da Faculdade de Engenharia Civil da UFU, que compartilharam seus conhecimentos contribuindo para meu desenvolvimento, em especial às professoras Dra. Leila Aparecida de Castro Motta e Dra. Maria Cláudia de Freitas Salomão, que me orientaram e foram essenciais para a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Matheus Leoni Nascimento pelas contribuições no exame de Qualificação.

Ao técnico do Laboratório de Materiais e Construção Civil Wanderly Geraldo da Silva e à técnica do Laboratório de Estruturas Cristiane Pires, da Universidade Federal de Uberlândia, pela ajuda na execução dos ensaios.

À Universidade Federal de Uberlândia e a Faculdade de Engenharia Civil, pelo apoio à realização desta pesquisa. À Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos e Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela disponibilização do laboratório e equipamentos.

À CAPES, pelo apoio na forma de bolsa de estudos.

À Brasmix e a BASF, pelo fornecimento de materiais utilizados na pesquisa.

O meu mais sincero agradecimento também a todos os colegas de mestrado, em especial a Laís, por todo auxílio ao longo da pesquisa e conhecimento compartilhado. Às servidoras e servidores da FECIV.

As minhas amigas e amigos que sempre me apoiaram e me incentivaram. Aos meus companheiros e companheiras de militância que comigo compartilham um sonho de um mundo melhor.

RESUMO

O sistema construtivo de paredes de concreto tem sido amplamente utilizado, destacando-se entre as soluções construtivas adotadas em habitações de interesse social (HIS). No entanto, no que se refere ao desempenho térmico, verifica-se que este sistema, da forma como está sendo implementado, não é adequado para todas as zonas bioclimáticas brasileiras. Diante disso, esta pesquisa produziu um concreto referência (0% de substituição) e concretos com substituição parcial de agregados miúdos naturais por borracha de pneu (12,5% e 15% em volume) e agregados graúdos naturais por Poliestireno Expandido (EPS) reciclado e triturado (60% e 70% em volume), com o objetivo de avaliar o comportamento higrotérmico destes materiais alternativos para aplicação em paredes de concreto moldadas *in loco*. Foram analisadas as propriedades mecânicas e higrotérmicas destes materiais. As propriedades mecânicas foram avaliadas por meio de ensaios de compressão e tração. O transporte de umidade, água líquida e vapor de água, foram caracterizados por meio de ensaios de absorção, isotermas de dessorção, permeabilidade ao vapor de água e secagem dos concretos. A transferência de calor foi estudada por meio da condutividade térmica e de ensaio térmico com placas de concreto expostas à radiação solar. Em uma segunda etapa, as propriedades higrotérmicas dos concretos foram utilizadas como dados de entrada em simulação higrotérmica considerando o sistema construtivo de paredes de concreto. Os resultados obtidos mostraram que os concretos com resíduos, borracha de pneu e EPS, são mais porosos do que o de referência, apresentam características distintas de absorção, são mais permeáveis ao vapor de água, se comportam de maneira diferente na secagem e apresentam menor condutividade térmica. Porém, por meio dos resultados da simulação higrotérmica, foi possível concluir que os concretos com resíduos, ainda que apresentem propriedades higrotérmicas distintas, se comportam de forma semelhante quando aplicados ao sistema construtivo.

Palavras-chave: Propriedades higrotérmicas – Concreto com EPS – Concreto com borracha de pneu – Paredes de concreto – Comportamento térmico

ABSTRACT

The concrete wall construction system was widely used, standing out among the construction solutions adopted in social housing. However, when it comes to thermal performance of these system, it's verified that the construction system, as it's being implemented, isn't suitable for all Brazilian bioclimatic zones. Therefore, this research produced a concrete of reference (0% replacement) and concretes with partial replacement of natural small aggregates by tire rubber (12.5% and 15% by volume) and natural large aggregates by recycled and crushed expanded polystyrene (EPS) (60% and 70% by volume), in order to evaluate the hygrothermal behavior of these alternative materials for application on concrete walls. The mechanical and hygrothermal properties of these materials were analyzed. The mechanical properties were evaluated by means of compressive and tensile tests. The transport of moisture, liquid water and water vapor, was characterized by absorption tests, desorption isotherms, permeability to water vapor and drying of concretes. The heat transfer was studied by means of thermal conductivity and thermal testing with concrete plates exposed to solar radiation. In a second step, the hygrothermal properties of the concretes were used as input data in hygrothermal simulation considering the construction system of concrete walls. The results obtained showed that the concretes with residues, tire rubber and EPS, are more porous than the reference, have different absorption characteristics, are more permeable to water vapor, behave differently in drying and have less thermal conductivity. However, through the results of the hygrothermal simulation, it was possible to conclude that the concretes with residues, although presenting different hygrothermal properties, behave similarly when applied to the construction system.

Keywords: Hygrothermal properties – Concrete with EPS – Concrete whit tire rubber – Concrete walls - Thermal behavior

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escalas espaciais do clima no contexto de Uberlândia-MG	31
Figura 2 - Troca entre um ambiente real e o corpo e entre um ambiente imaginário e o mesmo corpo, por meio da temperatura radiante média.....	32
Figura 3 - Zonas bioclimáticas brasileiras.....	36
Figura 4 - Etapas de fixação de água por adsorção	43
Figura 5 – Curva típica de comportamento higroscópico de materiais de construção porosos em função da umidade relativa	44
Figura 6 - Condensação capilar em poros com diferentes diâmetros.....	46
Figura 7 - Balanço de tensões superficiais no menisco	47
Figura 8 - Curva típica de absorção de água	49
Figura 9 - Fases do processo de secagem.....	50
Figura 10 - Cinética da secagem.....	51
Figura 11 - Curva de secagem para materiais porosos	52
Figura 12 - Trocas de calor por radiação	55
Figura 13 - Componentes da radiação solar	57
Figura 14 - Trajetória do sol nos solstícios e equinócios e influência sobre a área da fachada.....	58
Figura 15 - Esquema etapa 1 do programa experimental	82
Figura 16 -Esquema etapa 2 do programa experimental	83
Figura 17 - Curva de distribuição granulométrica dos agregados miúdos naturais.....	86
Figura 18 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo natural	87
Figura 19 - EPS reciclado triturado	88
Figura 20 - Curva de distribuição granulométrica do EPS reciclado triturado	89
Figura 21 - Borracha proveniente da raspagem de pneus.....	90
Figura 22 - Curva de distribuição granulométrica da borracha de pneu	91
Figura 23 - Granulometria dos agregados do traço de referência.....	93
Figura 24 - Granulometria dos agregados dos traços com borracha de pneu.....	94
Figura 25 - Granulometria dos agregados dos traços com EPS triturado.....	94
Figura 26 – Moldagem dos corpos de prova de permeabilidade ao vapor (a) e secagem (b)	97

Figura 27 - Corpos de prova para ensaio de dessorção	97
Figura 28 - Moldagem de placa de concreto	98
Figura 29 - Extração de corpo de prova da placa (a), corpos de prova por traço (b), marcação para corte (c) e amostras utilizadas em ensaio de condutividade térmica (d)	99
Figura 30 - Recipientes utilizados no ensaio de isotermas de dessorção (a), termohigrômetro (b) e solução salina no nível inferior do recipiente superior (c).....	103
Figura 31 - Esquema de ensaio de permeabilidade	105
Figura 32 - Preparação de ensaio de permeabilidade ao vapor	105
Figura 33 - Montagem de ensaio de permeabilidade ao vapor de água	106
Figura 34 - Ensaio de secagem em andamento	107
Figura 35 - Seção transversal do esquema do ensaio térmico	108
Figura 36 - Ensaio térmico em andamento	109
Figura 37 - Equipamento DTC 300 da TA instruments utilizado no ensaio de determinação da condutividade térmica dos concretos	110
Figura 38 - Representação do sistema construtivo adotado com posições de monitoramento utilizadas	112
Figura 39 - Definição da altura da edificação.....	114
Figura 40 - Valores de resistência térmica superficial interna e externa, Tabela A.1 ..	115
Figura 41 - Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ε) para radiações a temperaturas comuns (ondas longas), Tabela B.2	116
Figura 42 - Síntese do arquivo climático adotado para Uberlândia	117
Figura 43 - Temperatura e umidade internas em relação à temperatura externa.....	117
Figura 44 - Ensaio de abatimento pelo tronco de cone do traço CB1	120
Figura 45 – EPS triturado	126
Figura 46 - Absorção de água por capilaridade em 1 hora	127
Figura 47 – Absorção de água por capilaridade em 72 horas.....	128
Figura 48 - Ascensão capilar média (a), seção longitudinal REF (b), seção longitudinal CB1 (c), seção longitudinal CB2 (d), seção longitudinal CEPS1 (e) e seção longitudinal CEPS2 (f).....	129
Figura 49 - Curva de dessorção de umidade dos concretos.....	131
Figura 50 - Curvas de dessorção para teor de umidade de até 65%	132
Figura 51 - Curvas de secagem dos concretos.....	135

Figura 52 - Curva de secagem (kg/m ² x √h)	137
Figura 53 - Cinética de secagem para primeira fase.....	139
Figura 54 - Cinética de secagem para segunda fase	139
Figura 55 - Cinética de secagem para terceira fase de secagem.....	140
Figura 56 - Temperatura na face externa.....	142
Figura 57 - Temperatura na face interna	143
Figura 58 - Temperatura no interior do compartimento	144
Figura 59 - Relação entre massa específica e resistência à compressão aos 28 dias de idade	147
Figura 60 - Relação do índice de vazios com o coeficiente de capilaridade	148
Figura 61 - Relação do conteúdo de umidade medido na dessorção com o índice de vazios	149
Figura 62 - Relação entre a resistência à difusão de vapor e o coeficiente de capilaridade	151
Figura 63 - Relação entre índice de secagem e coeficiente de capilaridade.....	153
Figura 64 - Relação entre taxa de secagem, coeficiente de capilaridade e resistência à difusão de vapor.	154
Figura 65 - Relação entre o conteúdo de umidade ao fim da secagem e o conteúdo de umidade medido na dessorção a UR=50%.....	155
Figura 66 - Relação entre massa específica e condutividade térmica	155
Figura 67 - Chuva dirigida - acumulada mensal (L/m ²)	158
Figura 68 - Média mensal da UR na superfície exterior das paredes de concreto (%) 159	
Figura 69 - Média mensal da UR no interior das paredes de concreto (%).....	160
Figura 70 - Média mensal da UR da superfície interior das paredes de concreto (%) . 161	
Figura 71 - Perfil de UR (%) para a (a) hora de maior chuva , (b) seis horas após a maior chuva, 12h após a maior chuva e (d) 24 horas após a maior chuva.....	162
Figura 72 - Perfil de UR (%) para a hora mais quente (a), 6h após a maior temperatura (b), 12h após a maior temperatura (c) e 24h após a maior temperatura (d).....	165
Figura 73 - Comportamento de umidade total: média mensal (kg/m ²)	168
Figura 74 - Temperatura média mensal da superfície externa do concreto REF para diferentes orientações	169
Figura 75 - Temperaturas médias mensais (°C) para superfície exterior (Norte)	169

Figura 76 - Temperaturas médias (°C) mensais para a superfície interior (Norte)	170
Figura 77 - Temperaturas médias mensais (°C) para superfície exterior (Oeste)	170
Figura 78 - Temperaturas médias mensais (°C) para superfície interior (Oeste)	171
Figura 79 - Perfil de temperatura (°C) para a hora de maior chuva (a), 6h após a maior chuva (b), 12h após a maior chuva (c) e 24h após a maior chuva.....	172
Figura 80 - Perfil de temperatura (°C) para a hora de maior temperatura (a), 6h após a maior temperatura, 12h após a maior temperatura e 24h após a maior temperatura.....	175
Figura 81 - Temperatura superficial observada no ensaio térmico	179
Figura 82 - Temperatura superficial observada na simulação higrotérmica	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de unidades habitacionais (UH) da faixa 1 do PMCMV construídas com paredes de concreto na cidade de Uberlândia-MG de 2009 a 2016	23
Tabela 2 - Exigências dos usuários de acordo com a ISO 6241:1984.....	28
Tabela 3 - Natureza dos agentes de degradação	29
Tabela 4 - Caracterização física do cimento Portland	85
Tabela 5 - Caracterização química do cimento Portland.....	85
Tabela 6 - Caracterização do agregado miúdo utilizado	86
Tabela 7 - Caracterização do agregado miúdo utilizado	87
Tabela 8 - Propriedades do EPS triturado	88
Tabela 9 - Ensaios para caracterização da borracha de pneu	90
Tabela 10 - Características do aditivo superplastificante	91
Tabela 11 - Consumo de materiais para produção de 1 m ³ dos concretos	93
Tabela 12 - Massa específica teórica para mistura de agregados por traço de concreto	95
Tabela 13 - Método de mistura por tipo de traço	95
Tabela 14 – Relação de quantidade e dimensões de corpos de prova para programa experimental	100
Tabela 15 - Soluções salinas e umidade relativa.	103
Tabela 16 - Resumo dos métodos utilizados na determinação das propriedades higrotérmicas	113
Tabela 17 - Propriedades higrotérmicas para os diferentes traços de concreto.....	113
Tabela 18 - Orientação definida pelos azimutes.....	114
Tabela 19 - Altura do edifício e respectivo coeficiente R2	114
Tabela 20 – Dados de saída WUFI.....	118
Tabela 21 – Abatimento pelo tronco de cone e massa específica no estado fresco.	120
Tabela 22 - Resultados ensaios de compressão e tração por compressão diametral	122
Tabela 23 - Resumo da análise de variância das propriedades mecânicas dos concretos	123
Tabela 24 - Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica dos concretos estudados no estado endurecido	124

Tabela 25 - Resumo de análise de variância da absorção por imersão e índice de vazios	126
Tabela 26 - Coeficiente de capilaridade para 1h e 72h de ensaio por traço de concreto.	128
Tabela 27 - Resumo da análise de variância para absorção capilar e ascensão capilar	130
Tabela 28 - Resumo dos dados das curvas de dessorção.....	132
Tabela 29 - Parâmetros relacionados a permeabilidade ao vapor de água	133
Tabela 30 - Resumo da análise de variância para permeabilidade ao vapor de água dos concretos.....	134
Tabela 31 - Índice de secagem para os concretos determinados pelas metodologias de Flores-Colen (2009) e da norma europeia EN 16322:2013.....	136
Tabela 32 - Resumo da análise de variância dos índices de secagem dos concretos ...	138
Tabela 33 - Taxa de secagem ao longo do ensaio [%m/ \sqrt{h}]	140
Tabela 34 - Condutividade térmica média dos concretos.....	141
Tabela 35 - Resumo da análise de variância para condutividade térmica	142
Tabela 36 - Relação entre maior temperatura e seu respectivo horário de registro.....	145
Tabela 37 - Valores de resistência e transmitância térmica dos concretos estudados..	156
Tabela 38 - Capacidade térmica e atraso térmico dos concretos estudados	157
Tabela 39 - Teor de umidade dos concretos estudados em período chuvoso e em período seco	167

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_{sl}	-Tensão superficial sólido-líquido
σ_{sg}	-Tensão Superficial sólido-gás
σ_{lg}	-Tensão superficial líquido-gás
P_c	-Pressão Capilar
P_{ar}	-Pressão do ar
$P_{água}$	-Pressão da água
$R1, R2$	-Raios de Curvatura
σ	-Tensão Superficial
θ_c	-Ângulo de contato
h	-Altura de equilíbrio
r	-Raio do menisco
α	-Absorção
ρ_{ref}	-Reflexão
τ	-Transmissão
Q_{rad}	-Taxa de fluxo de calor radiante
As	-Área da superfície
σ_{S-B}	-Constante de radiação de Stefan-Boltzmann
ε_1	-Emissividade da superfície 1
T_1	-Temperatura da superfície 1
T_2	-Temperatura da superfície 2
q_{cv}	-Fluxo de calor por convecção
hc	-Coeficiente de convecção
T_{ext}	-Temperatura externa
T_{sup}	-Temperatura da superfície
q_{cd}	-Fluxo de calor por condução
λ	-Condutividade térmica
T_{ext}	-Temperatura da superfície externa
T_{int}	-Temperatura da superfície interna
L	-Comprimento
ρ	-Massa específica

c_p	-Calor específico
Rt	-Resistência térmica
L_p	-Espessura da parede
A_{fluxo}	-Área perpendicular ao fluxo de calor
φ	-Atraso térmico
C	-Capacidade térmica
a/c	-Relação água cimento
f_{ck}	-Resistência característica
m_{seca}	-Massa seca
m_{imersa}	-Massa imersa
m_{sat}	-Massa saturada de superfície seca
A	-Absorção
I_v	-Índice de vazios
ρ_{sat}	-Massa específica saturada
ρ_{seca}	-Massa específica seca
ρ_{real}	-Massa específica real
UR	-Umidade relativa
W	-Conteúdo mássico da fase adsorvida
δ	-Permeabilidade ao vapor de água
P_{v1}, P_{v2}	-Pressões parciais de vapor
J_v	-Fluxo mássico de vapor de água
Sd	-Espessura de ar equivalente
μ	-Resistência à difusão do vapor de água
M_x	-Massa do corpo de prova durante o processo de secagem
M_l	-Massa do corpo de prova seco em estufa
M_3	-Massa do corpo de prova saturado
t_f	-Tempo final do ensaio de secagem.
W_f	-Umidade de saturação livre
W_{ref}	-Umidade do material à 80% de UR do ambiente
D_{ws}	-Coeficiente de transferência de água líquida de sucção
D_{ww}	-Coeficiente de transferência de água líquida de redistribuição
R_{WDR}	-Quantidade de chuva dirigida

R_h	-Intensidade de precipitação horizontal
R_1	-Coeficiente dependente do tipo de elemento construtivo
R_2	-Coeficiente dependente da localização da fachada
V_{10}	-Velocidade do vento de referência a 10 m acima do solo
θ	-Ângulo entre a direção do vento e à normal à parede
R_{se}	-Resistência superficial externa
R_{si}	-Resistência superficial interna
α	-Absortância

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	- American Society for Testing and Materials
CCA	-Concreto celular autoclavado
EVA	-Etileno Acetato de Vinila
EPS	-Poliestireno Expandido
FECIV	-Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia
FZEA	-Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos
GAB	-Guggenheim, Anderson & De Boer
HIS	-Habitação de interesse social
HFT	-Heat Flux Transducer
INMET	-Instituto Nacional de Meteorologia
ISO	- International Organization for Standardization
ONU	-Organização das Nações Unidas
PMCMV	-Programa Minha Casa Minha Vida
RTQ-R	-Regulamento Técnico de Qualidade
SVVIE	-Sistemas de vedações verticais internos e externos
TMY	-Typical Meteorological Year
UFU	-Universidade Federal de Uberlândia
UH	-Unidade Habitacional
UR	-Umidade Relativa
USP	-Universidade de São Paulo
VUP	-Vida útil de projeto
VUR	-Vida útil requerida
WUFI	-Wärme Und Feuchtetransport Instationär
ZBBR	- Zoneamento Bioclimático do Brasil

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
1.1 OBJETIVOS.....	25
1.1.1 Objetivo Geral.....	25
1.1.2 Objetivos específicos	26
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	26
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES	27
2.1.1 Condições de exposição	30
2.1.2 Desempenho térmico	35
2.1.3 Estanqueidade.....	37
2.1.4 Durabilidade	38
2.1.5 Métodos de avaliação de desempenho.....	38
2.2 TRANSPORTE HÍGRICO.....	42
2.2.1 Adsorção e Dessorção	42
2.2.2 Capilaridade.....	46
2.2.3 Secagem	49
2.2.4 Permeabilidade ao vapor de água	53
2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	54
2.3.1 Radiação	54
2.3.2 Convecção	58
2.3.3 Condução	59
2.4 COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DO CONCRETO.....	63
2.5 CONCRETO COM RESÍDUOS	67
2.5.1 EPS	69
2.5.2 Borracha de pneu.....	74
2.6 SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE PAREDES DE CONCRETO	78
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	82
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL	82
3.1.1 Etapa 1: propriedades mecânicas higrotérmicas.....	83
3.1.2. Etapa 2: simulação higrotérmica	84
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	84
3.2.1 Aglomerante: Cimento Portland	85

3.2.2	Agregado miúdo natural	86
3.2.3	Agregado graúdo natural	87
3.2.4	Poliestireno Expandido (EPS) reciclado	87
3.2.5	Borracha de pneu	89
3.2.6	Aditivo	91
3.3	MÉTODO	91
3.3.1	Exigências	92
3.3.2	Ensaios no estado fresco	96
3.2.2.1.	<i>Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone</i>	
	96	
3.2.2.2.	<i>Determinação da massa específica e teor de ar do concreto fresco</i>	96
3.3.3	Ensaios no estado endurecido	96
3.3.3.1.	<i>Moldagem e cura dos corpos de prova</i>	96
3.3.3.3.	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	101
3.3.3.4.	<i>Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica</i>	101
3.3.3.5.	<i>Absorção por capilaridade</i>	101
3.3.3.6.	<i>Isotermas de dessorção</i>	102
3.3.3.7.	<i>Permeabilidade ao vapor de água</i>	104
3.3.3.8.	<i>Secagem</i>	106
3.3.3.9.	<i>Ensaio térmico</i>	108
3.3.3.10.	<i>Condutividade térmica</i>	109
3.3.4	Simulação	110
3.3.4.1.	<i>Dados de entrada e processamento</i>	111
3.3.4.2.	<i>Dados de saída</i>	118
3.3.4.3.	<i>Pós-processamento</i>	118
4.	RESULTADOS E ANÁLISES: PROPRIEDADES MECÂNICAS E COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO	119
4.1	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	119
4.2	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	121
4.2.1	Propriedades mecânicas	121
4.2.2	Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica no estado endurecido	124
4.2.3	Absorção de água por capilaridade	127

4.2.4 Comportamento higroscópico	130
4.2.5 Permeabilidade ao vapor de água	133
4.2.6 Secagem	134
4.2.7 Condutividade térmica.....	140
4.2.8 Ensaio térmico	142
4.3 ANÁLISE COMPARATIVA: PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO, MECÂNICAS E FÍSICAS DOS CONCRETOS	146
5. RESULTADOS E ANÁLISES: SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA.....	158
5.1 PÓS-PROCESSAMENTO.....	158
5.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO TEOR DE UMIDADE E DA TEMPERATURA.....	176
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	181
6.1 CONCLUSÕES	181
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	185
REFERÊNCIAS	186

1. INTRODUÇÃO

O direito à moradia adequada foi reconhecido em 1948, com a Declaração Universal dos Direitos Humanos aprovada pela Assembleia Geral da ONU, sendo o Brasil um dos seus signatários. A declaração estabelece que “toda pessoa tem direito a um padrão de vida capaz de assegurar a si e à sua família saúde e bem-estar, inclusive alimentação, vestuário, moradia, cuidados médicos e os serviços sociais indispensáveis” (art. 25, §1º).

No Brasil, a Constituição Federal de 1988, no artigo 5º, parágrafo 2º, afirma que os direitos e as garantias expressos por ela "não excluem outros decorrentes do regime e princípios por ela adotados, ou dos tratados internacionais em que a República Federativa do Brasil seja parte". Portanto, abarca no conjunto dos direitos protegidos por ela aqueles enunciados nos tratados internacionais, incluindo os direitos humanos. Além disso, o direito à moradia está entre os direitos sociais assegurado constitucionalmente, em seu artigo 6º (OSÓRIO, 2003).

No entanto, embora o tema da moradia seja considerado extremamente importante no que diz respeito a preservação da dignidade humana, podemos observar no Brasil e em diversas partes do mundo altos índices de déficit habitacional, o que faz com que esta questão ainda seja um dos principais problemas sociais urbanos.

De acordo com pesquisa realizada pela Fundação João Pinheiro (2018), em 2015 no Brasil, o déficit habitacional estimado correspondia a 6,4 milhões de domicílios, em relação ao estoque de domicílios particulares permanentes e improvisados do país, este déficit corresponde a 9,3%. Na tentativa de reverter este problema, desde o processo de industrialização, uma série de planos e políticas habitacionais vem sendo adotadas, entre estes o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) que teve início em 2009 e foi responsável pela construção de mais de 3 milhões de habitações (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2013).

A produção de empreendimentos com um grande número de habitações permitiu ao setor da construção civil aprimorar e desenvolver novas técnicas construtivas capazes de reduzir custos, tempo de execução e promover obras mais limpas e racionalizadas. Dentre

os sistemas construtivos largamente utilizados em habitações de interesse social (HIS) destacam-se as paredes monolíticas de concreto moldadas no local, dados apontam que este sistema construtivo tem prevalecido no PMCMV, em 2014 estava presente em 36% das unidades habitacionais produzidas, a partir do segundo semestre de 2015 este percentual chegava a 52% (SANTOS, 2016). Em Uberlândia-MG, das 11.650 UH construídas por meio de empreendimentos faixa 1 do PMCMV, 7.376 utilizaram o sistema construtivo de paredes de concreto, o que representa a cerca de 63% do total. A Tabela 1 apresenta a relação dos empreendimentos multifamiliares e unifamiliares construídos pela faixa 1 em Uberlândia-MG.

Tabela 1 - Relação de unidades habitacionais (UH) da faixa 1 do PMCMV construídas com paredes de concreto na cidade de Uberlândia-MG de 2009 a 2016

UNIDADES HABITACIONAIS CONSTRUÍDAS COM PAREDES DE CONCRETO - FAIXA 1 (UBERLÂNDIA-MG)	
Empreendimentos multifamiliares verticais	UH
Córrego do Óleo lote 2	288
Córrego do Óleo lote 3	288
Córrego do Óleo lote 4	288
Córrego do Óleo lote 5	256
Residencial Córrego do Óleo I	192
Residencial Córrego do Óleo VI	288
Residencial Tocantins	288
Residencial Tocantins II	288
Empreendimentos unifamiliares horizontais	
Loteamento Residencial Pequis - GLEBA 2B3	425
Loteamento Residencial Pequis GLEBA 2A1 E 2A2	427
Loteamento Residencial Pequis GLEBA 2A4	304
Loteamento Residencial Pequis GLEBA 2A5	597
Loteamento Residencial Pequis GLEBA 2A6	401
Loteamento Residencial Pequis GLEBA 2B1	446
Loteamento Residencial Pequis GLEBA 2B2	286
Loteamento Residencial Pequis GLEBA 2B5	314
Residencial Monte Hebrom I	495
Residencial Monte Hebrom II	499
Residencial Monte Hebrom III Área 3C5 e 3C6	549
Residencial Monte Hebrom IV Área 3C7	457

Fonte: Caixa Econômica Federal, Elaboração Própria, 2019.

Apesar da grande quantidade de moradias construídas, um fator importante é que a produção seriada de uma mesma tipologia construtiva utilizando paredes de concreto vem sendo empregada em todo Brasil, sem levar em consideração as diferentes condições climáticas. Estudos relacionados ao desempenho térmico deste sistema construtivo apontam que há necessidade de modificações para atender as recomendações mínimas da norma de desempenho ABNT NBR 15575:2013 (SACHT, 2008; FERREIRA, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2015; CINTRA, 2017; OLIVEIRA e ALVES, 2019).

No que diz respeito ao estudo do material, o avanço tecnológico, o surgimento de aditivos e a utilização de novos materiais possibilitaram o desenvolvimento de concretos com propriedades e composição diferentes, contribuindo para aperfeiçoar e/ou substituir o concreto convencional. Um exemplo disto é a aplicação de concretos leves com incorporação de resíduos em paredes monolíticas de concreto moldadas no local.

Compósitos com incorporação de poliestireno expandido (EPS) e de borracha de pneu tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores, tem sido observado que estes materiais modificam as propriedades físicas, como a massa específica e trabalhabilidade, propriedades mecânicas e térmicas dos concretos (BABU, BABU e TIONG-HUAN , 2006; DEMIRBOGA e KAN, 2012; SHACKOW *et al.* 2014; SAYADI *et al.* 2016; XU *et al.* 2016; ALBUQUERQUE, 2009; PELISSER *et al.*, 2011; SILVEIRA *et al.*, 2016; THOMAS e GUPTA, 2016; CARDOSO e CABRAL, 2017; MEDINA *et al.*, 2017). Além disso, o uso destes resíduos representa um avanço do ponto de vista ambiental, pois, são materiais de difícil decomposição na natureza e têm uma grande contribuição no volume de resíduos sólidos. Outro aspecto importante é o econômico, por não consumir recursos significativos para produção dos agregados reciclados e ainda produzir concretos mais leves.

Neste sentido, destacam-se trabalhos realizados na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia-FECIV-UFU, como: análise de desempenho do sistema estrutural de paredes de concreto com ar incorporado (MAGALHÃES, 2016); análise da durabilidade do concreto com ar incorporado para uso em paredes estruturais

(CAMPOS, 2017); avaliação das propriedades térmicas de concretos com ar incorporado (CINTRA, 2017); estudo de concreto com poliestireno expandido reciclado (CARVALHO, 2017); análise das propriedades do concreto com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de borracha de pneus para aplicação em paredes de concreto (QUEIROZ, 2018); estudo das propriedades do concreto com substituição de parte do agregado graúdo por agregado reciclado de poliestireno expandido para aplicação em paredes de concreto (COSTA, 2018).

Embora a norma ABNT NBR 15575:2013 estejam contribuindo nas análises de desempenho e representem um avanço para o setor da construção civil no Brasil, verifica-se a ausência de requisitos e critérios que se relacionem ao comportamento higrotérmico. A avaliação do desempenho térmico dos materiais e componentes construtivos, por exemplo, se limita a suas características e propriedades térmicas desconsiderando os fenômenos de transporte de umidade. Uma vez que, a umidade é um dos principais agentes envolvidos nos processos de degradação de edificações e estes processos podem ser intensificados ou alterados pela ação da temperatura, é necessário que para projetos de edificações o comportamento higrotérmico seja levado em consideração.

Diante do que foi exposto, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da incorporação de EPS reciclado e borracha de pneu de recauchutagem no comportamento higrotérmico do concreto. Acredita-se que a partir desta análise seja possível, também, avaliar a influência destes concretos no comportamento sistemas construtivos de parede de concreto, considerando as condições climáticas reais da região de Uberlândia-MG.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é verificar se concretos produzidos com agregados reciclados de EPS e borracha de pneu apresentam propriedades mecânicas e higrotérmicas adequadas para serem utilizados no sistema construtivo de paredes estruturais de concreto nas condições climáticas de Uberlândia-Minas Gerais.

1.1.2 Objetivos específicos

- A. Analisar as propriedades higrotérmicas e mecânicas dos concretos com agregados reciclados;
- B. Analisar as propriedades físicas dos concretos com agregados reciclados;
- C. Avaliar, por meio de simulação, o comportamento das paredes construídas com os concretos em estudo, considerando os fenômenos de transporte de calor e umidade.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é constituído de três capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: dedicado à introdução;
- Capítulo 2: apresenta uma revisão bibliográfica sobre avaliação de desempenho, transporte hídrico, transferência de calor, comportamento higrotérmico do concreto, concreto com resíduos e sistemas construtivos de paredes de concreto;
- Capítulo 3: apresenta a metodologia para o estudo;
- Capítulo 4: apresenta os resultados e análises da primeira etapa do programa experimental;
- Capítulo 5: apresenta os resultados e análises da simulação higrotérmica;
- Capítulo 6: apresenta conclusões do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES

O desempenho de uma edificação está associado ao seu comportamento em uso ao longo de sua vida útil (BLACHERE, 1969). A vida útil é a métrica temporal da durabilidade, pois, corresponde ao período de tempo em que a edificação e suas partes ou seus componentes são capazes de manter o desempenho requerido, desde que as condições de uso, exposição e manutenção sejam atendidas (THOMAZ E DEL MAR, 2013). A ABNT NBR 15575:2013 traz outras duas definições sobre vida útil:

“Vida útil de projeto (VUP) – período de tempo em que um sistema é projetado para atender aos requisitos de desempenho estabelecidos nesta Norma, desde que cumprido o programa de manutenção previsto no manual de operação, uso e manutenção. Vida útil requerida para o edifício ou para os seus sistemas, pré-estabelecida na etapa do projeto.

Vida útil requerida (VUR) – vida útil definida para atender às exigências do usuário (a ser estabelecida em projeto ou em especificações de desempenho).”

Considerando as expectativas do usuário quanto a vida útil e a durabilidade de uma edificação, John e Sato (2006) ressaltam que a durabilidade não é uma propriedade inerente de um material ou componente, e sim o que resulta da interação entre ele e o ambiente que o cerca. Mehta e Monteiro (2008) apresentam que uma longa vida útil é considerada um sinônimo de durabilidade. A durabilidade é a expressão qualitativa da capacidade de uma edificação e seus componentes de desempenhar suas funções, ao longo do tempo de vida útil, quando expostos às condições normais de uso. Sendo assim, a variação do desempenho é uma das medidas da durabilidade da edificação ou de seus componentes (ABNT, 2013).

Segundo Borges (2008), embora o conceito de desempenho seja simples, sua aplicação prática na Construção Civil é difícil, pois, envolve questões técnicas complexas, interesses políticos e econômicos, com o objetivo de atender as exigências dos usuários de edificações que são subjetivas, variáveis, crescentes e de difícil mensuração.

A edificação deve ser tratada como um produto que deve apresentar determinadas características que o habilitem a cumprir objetivos e funções para os quais foi projetado, quando submetido a determinadas condições de exposição e uso. Ou seja, o desempenho de uma edificação pode ser definido como as condições mínimas de habitabilidade necessárias para que um ou mais indivíduos possam utilizar a edificação durante um período de tempo, como conforto térmico e acústico, higiene, segurança, entre outras (POSSAN; DEMOLINER, 2013; BORGES, 2008).

A ISO 6241 de 1984 é considerada um marco importante para a aplicação do conceito de desempenho, pois definiu uma lista de requisitos funcionais dos usuários de imóveis que serviu como base para a elaboração de normas de desempenho de edificações, todas relacionadas a três categorias: segurança, habitabilidade e sustentabilidade, Tabela 2. Embora existam outras normas, esse documento foi precursor na definição de desempenho.

Tabela 2 - Exigências dos usuários de acordo com a ISO 6241:1984

Exigências dos usuários		
a) Segurança	b) Habitabilidade	c) Sustentabilidade
1. Desempenho estrutural	4. Estanqueidade	12. Durabilidade
2. Segurança contra incêndio	5. Conforto térmico	13. Manutenabilidade
3. Segurança no uso e operação	6. Conforto acústico	14. Adequação ambiental
	12. Durabilidade	
	7. Conforto lumínico	
	13. Manutenabilidade	
	8. Saúde e higiene	
	14. Adequação ambiental	
	9. Funcionalidade e acessibilidade	
	10. Conforto tátil	
	11. Qualidade do ar	

Fonte: ISO 6241:1984 apud BS ISO 15686-2, 2012.

A primeira versão da norma brasileira de desempenho foi publicada em maio de 2008. No entanto, por dificuldades com relação à aplicabilidade foi cancelada e revisada, a nova versão da ABNT NBR15575 entrou em vigor em 2013 e também apresenta uma definição de desempenho mínimo obrigatório que sistemas construtivos devem apresentar durante a utilização, expressos em segurança, habitabilidade e sustentabilidade.

Posteriormente, a norma ISO 15686-2:2012 delimitou em seu texto uma classificação de agentes de degradação de acordo com a sua natureza (Tabela 3). As ações dos agentes de degradação, que podem acontecer de forma associada ou não, levam as edificações a diferentes condições de exposição.

Tabela 3 - Natureza dos agentes de degradação

Natureza	Classe
Agentes mecânicos	Gravidade Esforços e deformações impostas ou restrinidas Energia cinética Vibrações e ruídos
Agentes eletromagnéticos	Radiação Eletricidade Magnetismo
Agentes térmicos	Níveis extremos ou variações muito rápidas de temperatura
Agentes químicos	Água e solventes Agentes oxidantes Agentes redutores Ácidos Bases Sais Quimicamente neutros
Agentes biológicos	Vegetais e microrganismos Animais

Fonte: ISO 6241:1984 apud BS ISO 15686-2, 2012.

De acordo com Borges (2008), um dos maiores desafios na avaliação de desempenho na construção civil refere-se à interpretação correta das necessidades dos usuários. O desafio está na forma de mensurar essas necessidades de maneira objetiva, com requisitos e critérios que devem ser estabelecidos sob determinadas condições de exposição e uso, e que além disso, apresentem viabilidade técnica e econômica em que sejam consideradas a realidade de cada região. A quantificação das necessidades dos usuários em critérios objetivos envolve pesquisas sobre a resposta humana ao ambiente construído e compreende muitos aspectos físicos, funcionais, ambientais, econômicos e sociais (BORGES, 2008).

A ABNT NBR15575:2013 estabelece o desempenho de edificações a partir da definição de requisitos e critérios. No documento normativo os requisitos de desempenho são definidos como condições que expressam qualitativamente os atributos que a edificação habitacional e seus sistemas devem possuir, a fim de que possam satisfazer as exigências do usuário. Então, a avaliação do desempenho de uma edificação se dá por meio de critérios de desempenho, que se trata de especificações quantitativas dos requisitos de desempenho, expressos em termos de quantidades mensuráveis, a fim de que possam ser objetivamente determinados (ABNT NBR 15575-1, 2013).

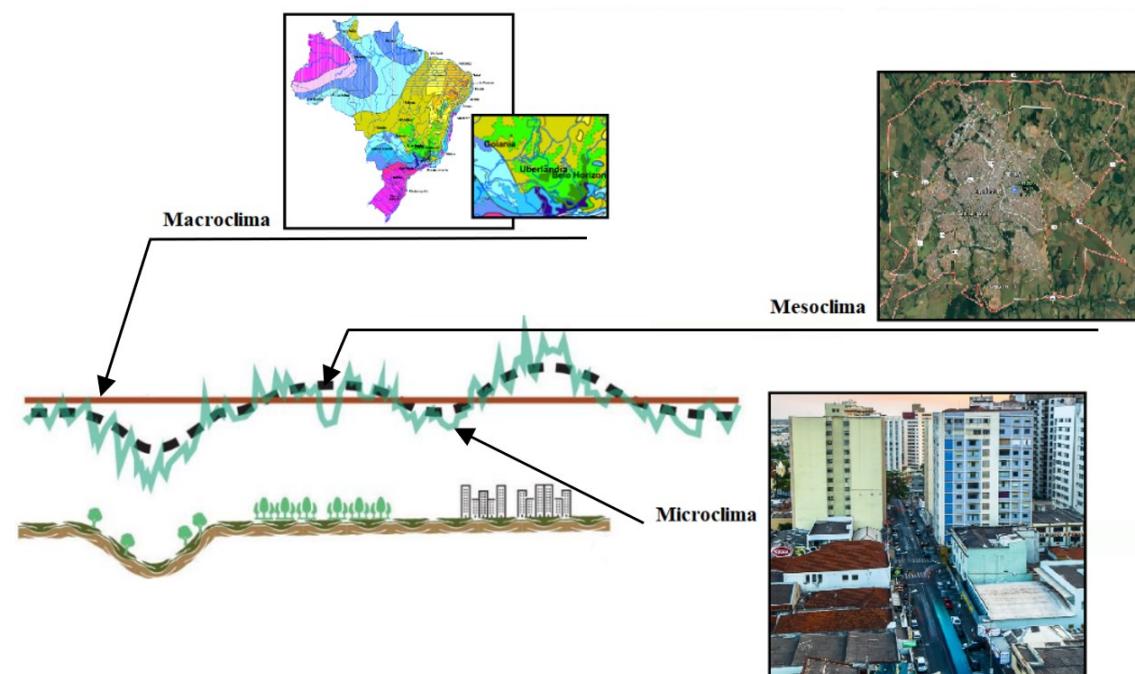
2.1.1 Condições de exposição

As condições de exposição as quais as edificações estão sujeitas constituem-se de um conjunto de ações que afetam sua durabilidade. Estas ações podem ter origem em agentes externos ou internos, de diferentes naturezas. As ações externas de origem climática estão entre os principais agentes de degradação que contribuem para reduzir o desempenho de uma construção ao longo do seu tempo de vida útil (JERNBERG *et al.*, 2004; BORGES, 2008; ABNT, 2013a).

Segundo Roriz (2008), o clima é definido como a integração do conjunto de condições atmosféricas típicas de um dado lugar. Geralmente, o conceito de clima é empregado em diferentes graus de abrangência podendo se referir tanto a um ponto específico de um bairro quanto à vastas regiões do planeta.

De acordo com Lamberts, Ghisi e Abreu (2016), a classificação das escalas do clima pode variar, mas em geral, considera-se o macroclima, o mesoclima e o microclima (Figura 1). No macroclima são observadas as características climáticas de uma região, normalmente obtidas por meio de estações meteorológicas. As normais climatológicas são uma série de dados padronizados pela Organização Meteorológica Mundial obtidos a partir de valores médios e extremos mensais de temperatura, umidade, precipitação, nebulosidade, horas de sol, entre outros medidos em estações climáticas disponíveis para centenas de cidades brasileiras. Na falta de dados mais precisos, estas são utilizadas para a análise climática do local do projeto.

Figura 1 - Escalas espaciais do clima no contexto de Uberlândia-MG



Fonte: Adaptado de Zanoni (2015).

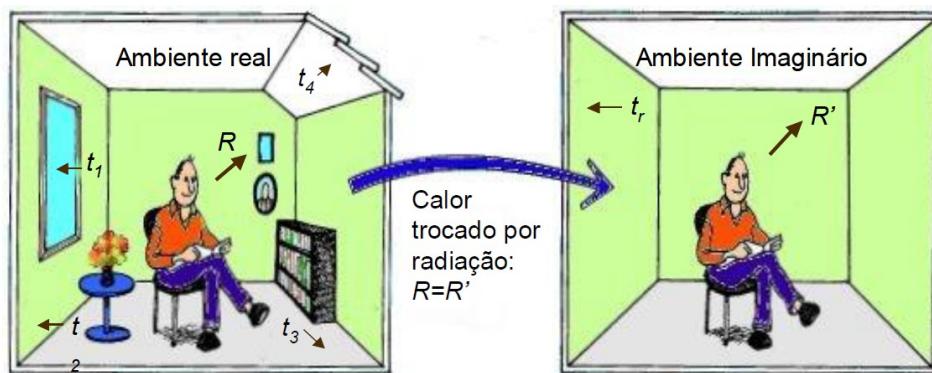
No mesoclima e no microclima alterações locais na temperatura do ar, radiação solar, vento e umidade relativa do ar são observadas. Por exemplo, em uma grande cidade, as condições do mesoclima podem ser alteradas pela poluição ou pela falta de vegetação. Enquanto o microclima, que está relacionado à escala da edificação e seu entorno, pode sofrer variações como consequência de outras escalas climáticas e pela interferência direta na propriedade onde a edificação está localizada (LAMBERTS; GHISI; ABREU, 2016).

Dentre os fatores que afetam o clima, a temperatura do ar é a indicação da quantidade de calor que existe no ar. Esta é a principal variável do conforto térmico, pois a sensação de conforto baseia-se na perda de calor do corpo pelo diferencial de temperatura entre a pele e o ar, complementada pelos outros mecanismos termorreguladores (ZANONI, 2015; CINTRA, 2017)

Embora o sol seja a principal fonte de calor da Terra, a temperatura do ar não é determinada diretamente pela radiação solar, mas sim resultado dos efeitos da radiação solar sobre as superfícies da Terra e do balanço energético. A radiação solar atinge o solo, parte dela é absorvida e a outra parte transformada em calor, então a temperatura do solo aumenta e aquece o ar por convecção (LAMBERTS; GHISI; ABREU, 2016).

De acordo com a ABNT NBR 15220:2005 – 1, a temperatura radiante média representa a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a troca de calor por radiação é igual ao ambiente real não uniforme, conforme Figura 2. Segundo Lamberts, Ghisi e Abreu (2016), com a determinação da temperatura de um termômetro específico com formato de globo, com variáveis em seu diâmetro, e da temperatura do ar é possível calcular a temperatura radiante média.

Figura 2 - Troca entre um ambiente real e o corpo e entre um ambiente imaginário e o mesmo corpo, por meio da temperatura radiante média



Fonte: Lamberts; Ghisi e Abreu (2016)

A umidade relativa do ar, por sua vez, é uma variável climática que corresponde a quantidade de vapor de água presente na atmosfera. A água está presente na atmosfera em três estados: sólido, líquido e gasoso. O vapor de água presente na atmosfera é o estado gasoso do elemento e apresenta-se misturado com o ar seco. A ABNT NBR 15220 – 1:2005 define a umidade relativa do ar como o quociente da umidade absoluta do ar pela umidade absoluta do ar saturado, para a mesma temperatura e pressão. Por sua vez, a umidade absoluta representa a massa de água contida em uma unidade de massa de ar (g/kg). A umidade relativa do ar é expressa em porcentagem podendo aumentar ou diminuir devido as mudanças de estado, ou seja, pode aumentar devido à evaporação, ou pode diminuir devido à condensação.

As partículas de água suspensas no ar têm a capacidade de se aquecerem ao receber o calor do sol. A umidade relativa do ar é regulada por processos evaporativos e de evapotranspiração e, por essa razão, é influenciada pelo regime de ventos, ciclo hidrológico, topografia, ocupação urbana, presença de vegetação, lagos, rios, mares, entre outros. Sendo assim, ao longo do dia, com a elevação da temperatura, a umidade relativa do ar fica mais baixa.

Outra variável climática importante são os ventos, definidos como movimentos do ar influenciados pelo movimento de rotação da Terra e, principalmente pelo aquecimento diferenciado da atmosfera, que causa diferenças de pressão. De acordo com Lamberts, Ghisi e Abreu (2016), este aquecimento desigual da Terra e de sua atmosfera gera uma energia potencial, parte desta energia transforma-se em energia cinética pela elevação do ar quente na região próxima ao equador, abrindo caminho para a entrada do ar frio que vem do norte e do sul. Além disso, o vento também é influenciado pela altitude, pela topografia e pela rugosidade do solo.

O regime de ventos pode ser estudado em várias escalas: escala planetária, escala local e escala do edifício (SILVA, 1999). Em uma escala menor, as edificações da cidade desviam, distribuem ou canalizam os ventos urbanos. Para climas quentes e úmidos, os ventos na cidade podem favorecer o conforto térmico. Diante disso, é importante que a ocupação das cidades avance se atentando para as principais direções do vento a fim de

obter benefícios aproveitando ou evitando estes ventos (LAMBERTS, GHISI e ABREU, 2016).

Um dos fatores que podem influenciar a durabilidade das edificações é a ação do vento pelo seu efeito na chuva dirigida, visto que a água pode penetrar na envoltória. Além disso, as pressões diferenciais fazem com que a incidência de chuva ocorra de maneira distinta ao longo da edificação (HAAGENRUD, 2004).

A chuva dirigida é, portanto, uma chuva projetada na superfície da fachada das edificações, decorrente da associação dos ventos e da precipitação. A posterior penetração da água da chuva na fachada dependerá de vários fatores que atuam em conjunto. Segundo Bauer (1987), a penetração desta umidade é condicionada ao comportamento de materiais porosos quando solicitados pela chuva e dos aspectos construtivos pertinentes à concepção e construção da envoltória. Apesar de ser uma das principais fontes de umidificação na envoltória dos edifícios, a chuva dirigida não é mencionada nas normas de desempenho brasileiras (ZANONI, 2015).

A chuva dirigida não é a única fonte de umidade a qual uma edificação está sujeita, a classificação da umidade em decorrência da origem da água pode ser agrupada em pelo seis tipos (GRATWICK, 1971; PEREZ, 1988; MORALES, 1995; ZANONI, 2015): umidade de obra originada da água utilizada nos processos de fabricação e construção, é o tipo de umidade própria de obras com materiais porosos; umidade de infiltração proveniente da água de chuva que se projeta sobre a envoltória edificada e penetra através dos seus elementos constituintes; umidade ascendente e capilaridade originada da absorção de água presente no solo; umidade de condensação proveniente da condensação do vapor de água, quando atinge a temperatura do ponto de orvalho, pode ser superficial ou intersticial; umidade accidental originada de vazamentos ou rompimento de instalações de água ou outros componentes da edificação; e umidade de uso e manutenção da edificação, por exemplo, águas de limpezas e lavagens.

2.1.2 Desempenho térmico

De acordo com Ribas (2013), o desempenho térmico está condicionado à combinação de vários fatores, dentre os quais: o posicionamento da edificação e suas dependências, a escolha dos materiais para a aplicação em paredes, pisos, tetos e esquadrias, e a especificação de equipamentos, com suas instalações, que são possíveis fontes de calor.

É importante frisar que desempenho térmico e conforto térmico são dois conceitos diferentes. A condição de conforto é definida a partir de uma relação que o ser humano estabelece com o ambiente. Portanto, as variáveis de conforto térmico são dependentes de variáveis ambientais, mas também de variáveis humanas (LAMBERTS; GHISI; ABREU, 2016).

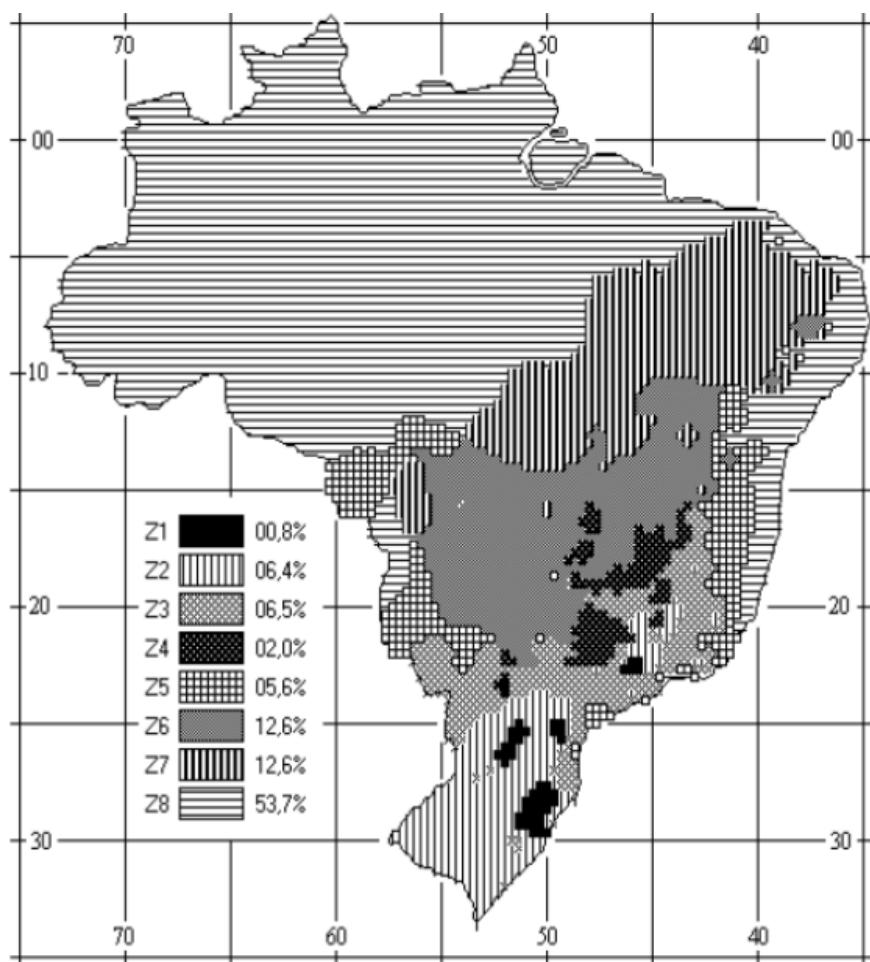
Além da escolha adequada do material de construção, um desempenho térmico adequado também pode ser obtido por meio de controle da influência de elementos climáticos. A ABNT NBR 15575: 2013 aponta que a edificação deve reunir características que atendam às exigências de conforto térmico dos usuários, considerando-se o seu entorno e as características bioclimáticas definidas na norma de desempenho térmico ABNT NBR 15220: 2005.

Considerando que um mesmo sistema construtivo nem sempre é adequado para regiões com características climáticas diferentes, do ponto de vista do desempenho térmico é necessário verificar como este sistema construtivo se comporta nas condições climatológicas da região em que será construído. A ABNT NBR 15220-3:2005 divide o território brasileiro em oito zonas bioclimáticas. Para cada uma delas, é apresentado no documento normativo um conjunto de diretrizes construtivas relacionando aberturas, vedações externas e coberturas, a fim de otimizar o desempenho térmico das edificações para uma melhor adequação climática.

Conforme ilustrado na Figura 3, o estado de Minas Gerais engloba seis das oito zonas, e a cidade de Uberlândia, por exemplo, encontra-se nas fronteiras das zonas ZB3, ZB4 e ZB6. Em casos de cidades cuja zona bioclimática não está claramente representada no mapa, é possível utilizar de ferramentas computacionais como o programa ZBBR

(Zoneamento Bioclimático do Brasil), desenvolvido na Universidade de São Carlos e disponibilizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina. No caso da cidade de Uberlândia, de acordo com a metodologia empregada pelo programa, a cidade pertence a zona bioclimática 4.

Figura 3 - Zonas bioclimáticas brasileiras



Fonte: ABNT NBR 15220: 2005 – 3.

Em relação ao desempenho térmico, a ABNT NBR 15575-1 apresenta dois requisitos gerais: exigências de desempenho no verão, em que as edificações devem apresentar condições térmicas no interior do edifício habitacional melhores ou iguais às do ambiente externo; e exigências de desempenho no inverno, as edificações habitacionais devem apresentar condições térmicas no interior do edifício habitacional melhores que do ambiente externo.

Os sistemas de vedações verticais internas e externas (abordados na quarta parte da ABNT NBR 15575:2013) interferem na volumetria e da compartimentação dos espaços da edificação, e integram-se de forma muito estreita aos demais sistemas da construção, recebendo influências e influenciando o desempenho da edificação habitacional. A ABNT NBR 15575-4:2013 estabelece dois requisitos relacionados ao desempenho térmico dos Sistemas de Vedações Verticais Internos e Externos (SVVIE) que devem ser observados na avaliação de desempenho das edificações habitacionais: adequação de paredes externas, estabelecendo que estas devem apresentar transmitância térmica e capacidade térmica que proporcionem pelo menos desempenho térmico mínimo para cada ZB estabelecida na ABNT NBR 15220-3:2005; e aberturas para ventilação, em que as fachadas das habitações devem apresentar aberturas com dimensões adequadas para proporcionar a ventilação interna dos ambientes. O segundo requisito só se aplica aos ambientes de longa permanência como salas, cozinhas e dormitórios.

De acordo com Zanoni (2015), as exigências quanto ao desempenho térmico nas normas brasileiras são baseadas apenas nas características e propriedades térmicas dos materiais e sistemas construtivos, sem levar em consideração os fenômenos simultâneos relacionados ao transporte de massa (umidade) e a interdependência entre eles. Ainda que, as variações higrotérmicas estejam entre os principais mecanismos responsáveis pelo envelhecimento natural das edificações.

2.1.3 Estanqueidade

A ABNT NBR 15575-1:2013 traz como definição de estanqueidade a propriedade de um elemento, ou de um conjunto de componentes, de impedir a penetração ou passagem de fluidos através de si. O projeto e a construção de edificações habitacionais devem considerar a exposição à água de chuva, à umidade proveniente do solo e aquela proveniente do uso e operação (ABNT, 2013¹). A avaliação da estanqueidade dos materiais é um aspecto importante na avaliação do comportamento em uso dos sistemas construtivos, pois, é o único requisito da norma de desempenho de edificações relacionado ao transporte de umidade.

Em relação à estanqueidade, esse documento normativo apresenta dois requisitos gerais: assegurar estanqueidade a fontes de umidade externas à edificação e assegurar estanqueidade a fontes de umidade internas à edificação.

Na quarta parte do documento normativo, são propostos dois requisitos para SVVIE das edificações habitacionais: infiltração de água nos sistemas de vedações verticais externas (fachadas), em que estas devem ser estanques à água proveniente de chuvas incidentes ou de outras fontes, e umidade nas vedações verticais externas e internas decorrente da ocupação do imóvel, que está relacionado a estes sistemas não permitirem infiltração de água, através de suas faces, quando em contato com áreas molháveis e molhadas (ABNT, 2013³).

2.1.4 Durabilidade

De acordo com a ABNT NBR 15575-1:2013 a durabilidade de um produto se extingue quando ele deixa de cumprir as funções que lhe forem atribuídas, quer seja pela degradação que o conduz a um estado insatisfatório de desempenho, quer seja por obsolescência funcional. Entre os requisitos gerais para as edificações habitacionais, um deles é relacionada a durabilidade: vida útil de projeto do edifício e dos sistemas que o compõem.

Na parte dois da referida norma, que trata dos requisitos para os sistemas estruturais define como requisito a durabilidade do sistema estrutural. Quando se trata de SVVIE das edificações habitacionais são estabelecidos os seguintes requisitos: paredes externas-SVVE, em que devem ser limitados os deslocamentos, fissuração e falhas; e vida útil de projeto dos SVVIE, relacionado à manutenção da capacidade funcional e as características estéticas, ambas compatíveis com o envelhecimento natural dos materiais durante a vida útil de projeto.

2.1.5 Métodos de avaliação de desempenho

A ABNT NBR 15575:2013 propõe uma avaliação de desempenho baseada em um conjunto de instrumentos: análises teóricas, simulações, ensaios experimentais e inspeções técnicas; a fim de avaliar se os requisitos estabelecidos estão sendo atendidos. Nesse sentido, a ISO 15686:2012 indica que os dados sobre o envelhecimento dos

componentes de uma edificação podem ser obtidos por meio de quatro categorias, sendo elas: a exposição em estações de envelhecimento natural, a inspeção em edifícios, a exposição em edifícios experimentais, e a exposição nas condições de uso (uso intencional em condições normais, avaliando o comportamento a curto prazo).

Dentre os métodos utilizados para avaliar as condições de exposição e degradação estão os ensaios acelerados, e informações obtidas por meio de dados de degradação de componentes e/ou ambientes de uso semelhantes. No entanto, o ambiente controlado do laboratório de ensaios ou os estudos de campo podem ser insuficientes para uma avaliação de durabilidade, por essa razão, estudos conduzidos por meio de simulação computacional podem contribuir de forma complementar para que se amplie a compreensão dos fenômenos de degradação e as variáveis envolvidas (ZANONI; SÁNCHEZ; BAUER, 2016).

Para avaliar o desempenho térmico de edificações a ABNT NBR 15575:2013 apresenta três métodos de avaliação: o simplificado, medição real e simulação computacional. O método simplificado verifica o atendimento aos requisitos e critérios baseado nos valores da transmitância térmica (U) e capacidade térmica (C) das paredes de fachada e das coberturas. A medição *in loco* avalia o atendimento aos requisitos e critérios normativos, por meio da realização de medições em edificações existentes ou em protótipos construídos com essa finalidade. Por fim, na simulação computacional a norma determina a utilização do *software* Energy Plus 7 para os casos em que os valores obtidos para a transmitância térmica e/ou capacidade térmica se mostrarem insatisfatórios, o desempenho térmico global da edificação deve ser avaliado por simulação computacional.

Zanoni, Sánchez e Bauer (2016) ressaltam que a NBR 15575 desconsidera os fenômenos simultâneos relacionados ao transporte de calor e umidade e às condições de exposição das edificações associadas aos agentes climáticos de degradação e, portanto, as exigências quanto ao desempenho térmico estão restritas a características e propriedades térmicas dos materiais e sistemas construtivos. Ainda de acordo com os autores, no Brasil, as exigências normativas para os estudos do comportamento higrotérmico dos sistemas

construtivos de vedação vertical são mínimos e, usualmente, parte das propriedades higrotérmicas não são determinadas pelos laboratórios brasileiros, uma vez que não são exigências das normas nacionais.

Como foi mencionado anteriormente, o desempenho de edificações deve atender as exigências e as necessidades dos usuários, respeitando as condições de durabilidade, conforto, segurança das habitações. Nesse sentido, para avançar no estudo do desempenho de edificações, também é fundamental que as propriedades e o comportamento em uso de materiais de construção e sistemas construtivos sejam conhecidos.

Com o intuito de estudar estes aspectos, nas últimas décadas foram desenvolvidos alguns *softwares* e modelos de análise higrotérmica. Delgado *et al.* (2010) fizeram uma revisão dos modelos higrotérmicos usados em materiais de construção porosos e identificaram cinquenta e sete ferramentas de modelagem higrotérmica, estas utilizam diferentes modelos e propriedades para simulação do transporte de calor, ar, umidade e sais em uma ou mais dimensões. No entanto, apenas quatorze destas ferramentas estavam disponíveis para o público em geral. Então, os autores organizaram uma extensa revisão destas ferramentas com um levantamento do número de propriedades e condições de contorno consideradas em seus modelos. Desta análise destaca-se a ferramenta WUFI® por ser uma das que apresentam mais propriedades analisadas e consideradas em seu modelo.

O programa WUFI® PRO 6.3 (Wärme- Und Feuchtetransport Instationär - *Transient Heat and Moisture Transport*), desenvolvido pelo Instituto de Física das Construções de Fraunhofer (IBP), segue um modelo unidirecional de transporte de calor e umidade não estacionário, governado por equações diferenciais de equilíbrio de calor e de umidade e foi validado por meio de experimentos realizados pelos desenvolvedores e, também, por pesquisadores de diversos países que comprovaram a viabilidade da adoção do WUFI como uma ferramenta de estudos higrotérmicos (DÍAZ *et al.*, 2013; DANIOTTI *et al.*, 2014; ZANONI, 2015; NASCIMENTO, 2016; SANTOS *et al.*, 2018).

A metodologia adotada pelo *software* é baseada na DIN EN 15026:2007 - *Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation*. De acordo com as exigências da norma, os modelos de cálculo para simulação higrotérmica deverão englobar as seguintes variáveis:

- densidade de massa aparente;
- condutividade térmica da matéria seca e dependência com a umidade;
- calor específico;
- porosidade;
- coeficiente de absorção de água;
- permeabilidade ao vapor de água e dependência com a umidade;
- fator de resistência à difusão do vapor de água;
- teor de umidade de referência;
- teor de umidade de saturação livre;
- condutividade térmica complementar dependente da umidade;
- condutividade térmica complementar dependente da temperatura;
- curva de armazenamento de umidade: isoterma de adsorção e dessorção; e
- coeficiente de transferência de água líquida.

Em estudos recentes em que a simulação computacional tem sido empregada para análise do comportamento higrotérmico de materiais e elementos construtivos, observa-se que o WUFI® (<https://wufi.de/en/software/wufi-pro/>) tem sido bastante utilizado. Segundo Coelho e Henriques (2016) isto se deve principalmente a popularidade e facilidade de utilização do *software*. Zanoni (2015) utilizou o WUFI Pro 5.3® no estudo de diferentes sistemas de revestimentos argamassados em Brasília-DF. Nascimento (2016) estudou a degradação de fachadas de edifícios por meio de simulação higrotérmica fazendo uso da mesma ferramenta. Nascimento *et al.* (2016) estudaram a degradação em fachadas de edifícios por ação de agentes climáticos utilizando o WUFI Pro 5.3®. De Souza *et al.* (2016) também utilizaram esta versão do *software* no estudo de danos em regiões da fachada. Afonso, Brito e Akutsu (2018) utilizaram o WUFI-Plus® e WUFI-BIO® a fim de analisar a ocorrência de bolores em edificações com paredes de concreto. Santos *et al.* (2018) utilizaram o *software* WUFI PRO 5.3® em um estudo de caso sobre o desempenho higrotérmico de paredes de fachada. Vertal *et al.* (2018) utilizaram o WUFI para avaliar

a influência da água no substrato de telhados verdes durante o período do verão da Eslováquia Oriental.

2.2 TRANSPORTE HÍGRICO

De acordo com Freitas, Torres e Guimarães (2008), o transporte de água depende das condições de fronteira do elemento construtivo como a temperatura, a umidade relativa, a precipitação, a radiação solar, a pressão do vento e das características dos materiais. Além disso, o transporte de água nas fases líquida e vapor ocorre simultaneamente e as condições de fronteira variam com o tempo.

Outro fator determinante para o transporte de água nos materiais refere-se à sua porosidade. Os materiais porosos, em escala microscópica, são heterogêneos e anisotrópicos. Porém, as equações de transferência são descritas em escala macroscópica, considerando os materiais porosos como se fossem homogêneos e isotrópicos. Quando se trata de propriedades macroscópicas do material, em particular a difusão e o armazenamento de umidade, Berguer (2014) afirma que elas traduzem de maneira global o comportamento à escala microscópica.

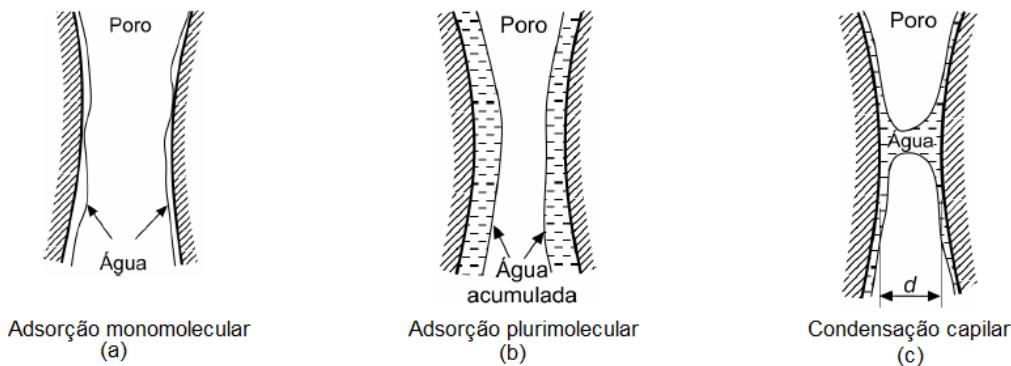
Em uma estrutura porosa podem ser considerados como mecanismos de fixação e transferência de umidade a adsorção, a condensação, a capilaridade e a evaporação. Freitas, Torres e Guimarães (2008) apresentam que na fase de vapor, o transporte da umidade está condicionado à difusão e movimentos convectivos, para a fase líquida, os condicionantes são a capilaridade, a gravidade e o efeito do gradiente de pressão.

2.2.1 Adsorção e Dessorção

De acordo com os princípios da primeira Lei de Fick, em difusão em regime estacionário o fluxo difusional acontece na direção contrária ao gradiente de pressão, ou seja, da maior para a menor concentração (CALLISTER; RETHWISCH 2008). Por essa razão, sempre que houver diferença da pressão de vapor de água, devido a diferença de concentração entre dois ambientes, ocorrerá um fluxo difusivo através do elemento poroso que os separa (SANTOS, 2009).

Grande parte dos materiais utilizados na construção civil tem características higroscópicas, isto é, tem a capacidade de fixar, em sua estrutura porosa, o vapor d'água presente no ar e dessorver de volta para a atmosfera. Portanto, se estes materiais estiverem em um ambiente em que a umidade relativa (UR) sofre uma variação, o teor de umidade deste também irá variar. O fenômeno da adsorção é condicionado pelas forças intermoleculares ou de Van der Waals, ligações físicas que atuam na interface sólido-líquido e faz com que as moléculas adsorvidas se mantenham fixas na superfície do substrato no interior dos poros. A adsorção acontece em três etapas, a primeira delas é chamada de adsorção monomolecular, em que ocorre a fixação de uma camada de moléculas de água na superfície interior dos poros. A segunda etapa trata da deposição de várias camadas de moléculas e, por isso, é denominada adsorção plurimolecular. Por fim, sendo o diâmetro do poro suficientemente pequeno ocorre a condensação capilar em que há junção das camadas plurimoleculares e formação do menisco (FREITAS, 1992). A Figura 4 representa as etapas de fixação de água por adsorção a nível de um poro.

Figura 4 - Etapas de fixação de água por adsorção



Fonte: Adaptado de Couasnet, 1989 *apud* Ramos (2007).

A condensação capilar do núcleo do poro ocorre quando a umidade relativa alcança o limite de condensação, definido como valor de UR mínima no qual ocorre condensação para dado poro de raio r . Pela lei de Kevin-Laplace o fenômeno de condensação capilar pode ocorrer em função dos diâmetros dos poros (Equação 1), ou seja, para um dado valor de umidade relativa haverá um valor crítico para o raio do poro (raio crítico). Os

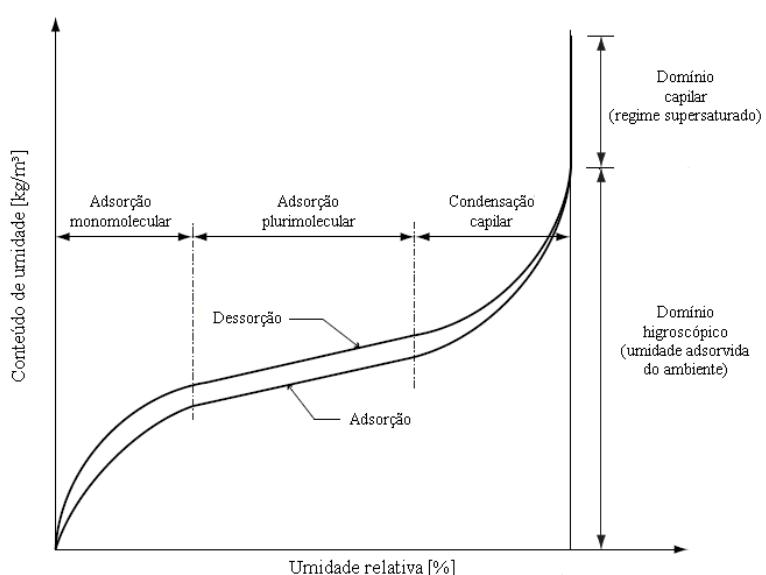
poros com raio com dimensões até o raio crítico apresentam água capilar (FERNANDES, 1990).

$$r_c = \frac{2.M.\sigma.\cos\alpha}{\rho.R.T.\ln UR} \quad (1)$$

Em que r_c é o raio crítico em metros; M é a massa molecular da água [g/mol]; σ é a tensão superficial da água [N/m]; α é o ângulo de contato entre a água e a superfície do poro [rad]; ρ é a densidade da água [kg/m³]; R é a constante universal dos gases [J/(mol x K)]; T é a temperatura [K]; UR é a umidade [0<UR<1].

A adsorção é um fenômeno reversível, quando a UR relativa sobe, há um aumento no teor de umidade do material (adsorção) e quando a UR cai o material perde umidade (dessorção). A uma determinada temperatura, a relação entre a UR e o teor de umidade do material é caracterizada pelas curvas higroscópicas, que representam os fenômenos de adsorção e dessorção, e são também conhecidas como isotermas de equilíbrio. Os materiais porosos utilizados na construção civil normalmente apresentam uma curva com forma semelhante a letra S, a Figura 5 apresenta o percurso típico de uma curva higroscópica (YUNES, 1992; RAMOS, 2007; ZANONI, 2015; SALOMÃO, 2016).

Figura 5 – Curva típica de comportamento higroscópico de materiais de construção porosos em função da umidade relativa



Fonte: Adaptado de Freitas; Torres e Guimarães (2008).

A isoterma de equilíbrio é composta de duas regiões, o domínio higroscópico, em que a água está presente principalmente em forma de vapor e, o domínio capilar, que representa a fase de condensação capilar. Nesta última, tem-se o início do regime supersaturado, a partir do qual a transferência de umidade nos poros acontece em fase líquida por meio das forças capilares. Teores de umidade superiores a 95% não são possíveis de serem obtidos unicamente por meio de adsorção de vapor. Em condições de alta umidade relativa do ar, os pequenos poros são preenchidos com água líquida devido à condensação capilar, por isso, esta região é caracterizada pela capilaridade (FREITAS, 1992; ZANONI, 2015; SALOMÃO, 2016).

Para uma dada condição de equilíbrio higrotérmico, o conteúdo de umidade é composto por uma parcela de água adsorvida e outra de água capilar. As isotermas de sorção permitem deduzir a capacidade de armazenamento de umidade dos diferentes concretos. Matematicamente, a capacidade de armazenamento é definida pela inclinação da isoterma de adsorção-dessorção (FERNANDES, 1990).

Segundo Ramos (2007), o comportamento dos materiais higroscópicos é frequentemente caracterizado pela não coincidência entre as curvas de adsorção e dessorção, normalmente com a curva de dessorção ocupando uma posição superior à de adsorção. Esta diferença entre as isotermas de adsorção e dessorção é chamada de histerese.

De acordo com Freitas; Torres e Guimarães (2008), apesar do fenômeno da higroscopicidade ter sido amplamente confirmado pela experiência, as questões ligadas à histerese não estão ainda completamente resolvidas.

Embora ainda não exista uma teoria que explique a histerese, normalmente, duas hipóteses são apresentadas. Uma delas diz respeito a diferença dos ângulos de contato da água com os poros na fase de condensação capilar. Na dessorção, o ângulo entre a superfície do poro e o menisco é inferior ao observado durante o fenômeno de adsorção. A segunda é conhecida como efeito “frasco de tinta” em que a umidade fica presa em grandes poros que, por sua vez, estão cercados de poros menores. Na adsorção, o

preenchimento do poro com maior seção é função do seu raio; na dessorção é o raio do poro menor quem define a velocidade da dessorção do vapor e, por essa razão, é mais lento e apresenta uma inclinação menos acentuada na zona de condensação capilar. (RAMOS, 2007; MAGALHÃES E VEIGA, 2007).

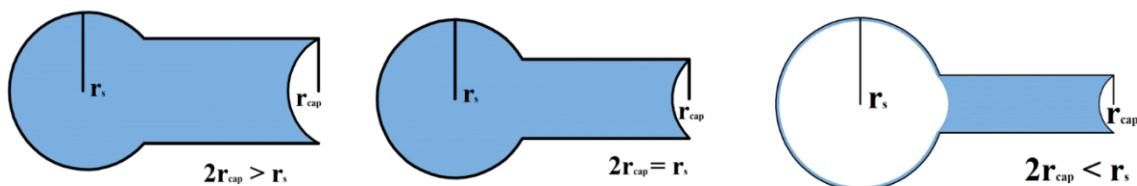
2.2.2 Capilaridade

Enquanto não existir um meio líquido contínuo, o transporte de água ocorre por difusão. Quando há formação de água condensada em quantidade suficiente para preencher o poro, passa a predominar o transporte de umidade na forma de água líquida, por capilaridade. De acordo com Mendes (1997), a fixação por capilaridade se inicia quando a espessura da camada de água adsorvida for grande o suficiente para que a força intermolecular seja mais importante que a força entre a fase líquida e a superfície sólida do poro.

Podem existir três casos distintos de condensação capilar a depender da relação entre os raios do capilar (r_{cap}) e do poro esférico (r_s). A Figura 6 ilustra esquematicamente os três casos.

- Caso $2r_{cap} > r_s$, a condensação começa na cavidade esférica;
- Caso $2r_{cap} = r_s$, a condensação tem início com o valor crítico de umidade que ocorre simultaneamente para os dois poros;
- Caso de $2r_{cap} < r_s$ a condensação terá início no capilar e o poro esférico será isolado do ambiente. Esses poros são conhecidos como poros tinteiros.

Figura 6 - Condensação capilar em poros com diferentes diâmetros.



Fonte: Adaptado de Salomão (2016).

O transporte da água para o interior do material ocorre devido às forças capilares que atuam em função do contato entre o poro e a fase líquida, sendo diretamente proporcional a tensão superficial do líquido e ao ângulo de contato (DULLIEN *et al.*, 1977). O ângulo

de contato é função da característica dos materiais, quando é inferior a 90° trata-se de um material hidrofilico e para ângulos entre 90° e 180° os materiais são chamados hidrofóbicos. Entre a parede dos poros e o menisco da água forma-se o ângulo de contato de molhagem, resultante do balanço entre as tensões superficiais sólido-líquido (σ_{sl}), sólido-gás (σ_{sg}) e líquido-gás (σ_{lg}) (Figura 7) (ASHRAE, 2009).

O mecanismo de transporte de água por capilaridade prevalece apenas nas camadas superficiais, que apresentam poros abertos e conectados (SATO; AGOPYAN, 2000). Os poros maiores têm uma capacidade maior de transporte de líquidos quando comparados com os menores. No entanto, os poros maiores serão preenchidos com água somente após a saturação dos menores, desde que estejam conectados entre si. Isto se deve ao fato de a sucção capilar ser maior em poros menores, então a água se desloca dos poros menores em direção aos maiores (DULLIEN *et al.*, 1977).

Figura 7 - Balanço de tensões superficiais no menisco



Fonte: Esquema geral adaptado de Salomão (2016).

De acordo com Freitas (1992), na interface líquido-gás estabelece-se um gradiente de pressões, chamado de pressão capilar que é função da tensão superficial, dos raios de curvatura principal e do ângulo de contato, conforme Equação 2.

$$P_c = P_{ar} - P_{água} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cos \theta_c \quad (2)$$

Em que: P_c Pressão capilar [N/m²]; P_{ar} Pressão do ar [N/m²]; $P_{água}$ Pressão da água [N/m²]; σ Tensão superficial [N/m]; θ_c Ângulo de contato [°]; R_1, R_2 Raios de curvatura [m].

Sendo um poro cilíndrico com menisco esférico, tem-se $R_1 = R_2 = r$ que é o raio do poro.

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \theta_c}{r} \quad (3)$$

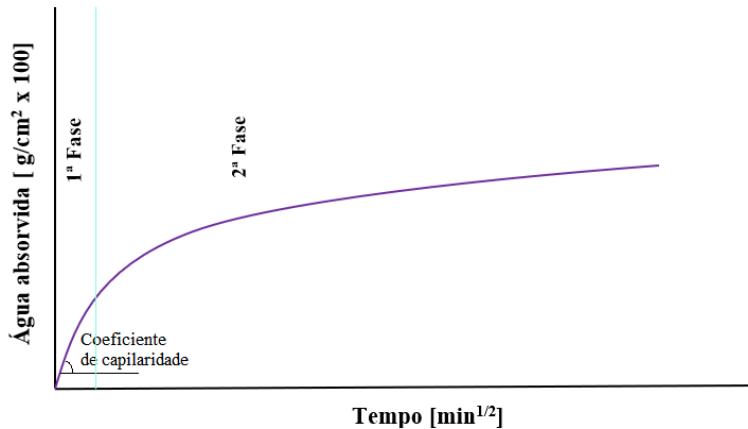
Quando há um equilíbrio entre a pressão capilar (P_c) e a pressão hidrostática, a ascensão capilar de água termina. Sendo assim, a altura de equilíbrio da coluna de água em um tubo é função do raio do poro (r).

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta_c}{r} \quad (4)$$

A tensão superficial (σ) varia com a temperatura e o raio do menisco (r) tem variação quando há alteração no teor de umidade, por essa razão, a pressão capilar é função da temperatura e do teor de umidade. Quanto maior for o teor de umidade menor será a sucção, para o teor de umidade máximo a sucção se anula (FREITAS, 1992).

O coeficiente de absorção de água ou de capilaridade representa a capacidade do material absorver água líquida, por sucção, em função do tempo. Este coeficiente é calculado a partir do coeficiente angular da reta formada pela relação de massa de água absorvida por área de material em contato com a água e a raiz quadrada do tempo, assim a maior inclinação da reta corresponde à maior velocidade de molhagem (NASCIMENTO, 2016; SALOMÃO, 2016).

Figura 8 - Curva típica de absorção de água



Fonte: Autora (2018).

A Figura 8 ilustra uma curva de absorção de água, em que podem ser observadas duas fases. O trecho linear da curva corresponde a primeira fase em que ocorre o preenchimento de poros conectados, o coeficiente de absorção de água é obtido neste trecho. A segunda fase se inicia quando a ascensão capilar máxima é atingida e a pressão de sucção é suficiente para que ocorra difusão de água na região saturada (PAES, 2004).

2.2.3 Secagem

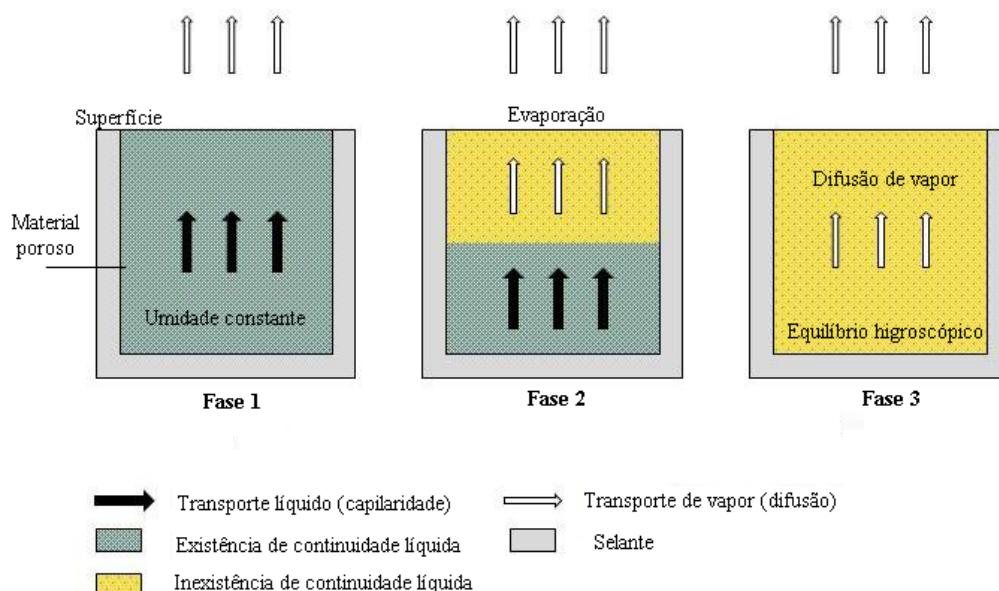
A secagem se refere ao processo de saída da água de um material poroso e envolve o transporte de água na fase líquida até à frente úmida, a evaporação da água, a migração do vapor de água através do material e, por fim, a propagação deste vapor para o ambiente (BRITO, 2009).

O processo de evaporação tem início na superfície do material saturado, em que o mecanismo de transporte que conduz a água até a superfície é baseado nas forças capilares. Este processo provoca um recuo da frente úmida, assim deixa de existir o domínio capilar iniciando-se a difusão de vapor no domínio higroscópico (PÁSCOA, 2012).

Segundo Freitas (1992), quando um material saturado é colocado em contato com um ambiente com temperatura e umidade relativa constantes, o processo de secagem pode ser dividido em três fases com velocidades características distintas. A Figura 9 apresenta esquematicamente estas fases.

Na primeira fase, a secagem é uniforme, o que significa que o teor de umidade é constante em qualquer parte do interior da parede. A água líquida, por meio das forças de capilaridade, é transportada até a superfície exterior onde começa a evaporação e, portanto, está localizada a frente de secagem. Com a evaporação, o teor de umidade diminui linearmente, este mecanismo consiste na passagem da fase líquida à fase de vapor da água presente no corpo sólido. Tal efeito, depende de alguns aspectos externos, como a umidade relativa, a temperatura, a velocidade do vento e agitação do ar (PÁSCOA, 2012). A partir do momento em que não há uma continuidade da fase líquida suficiente para alcançar a superfície, a frente de secagem avança para o interior do material. Diante disso, inicia-se a segunda fase em que o transporte de água desde a frente úmida até a superfície do material ocorre por difusão de vapor nos poros. Uma camada seca cada vez mais espessa de material é atravessada, consequentemente há uma diminuição da taxa de secagem do material e, esta fase termina quando não existir mais continuidade líquida atrás da frente de evaporação. A última fase é controlada apenas pela difusão de vapor, extremamente lenta, corresponde ao equilíbrio higroscópico (FREITAS, 1992; GONÇALVES, 2007; PÁSCOA, 2012).

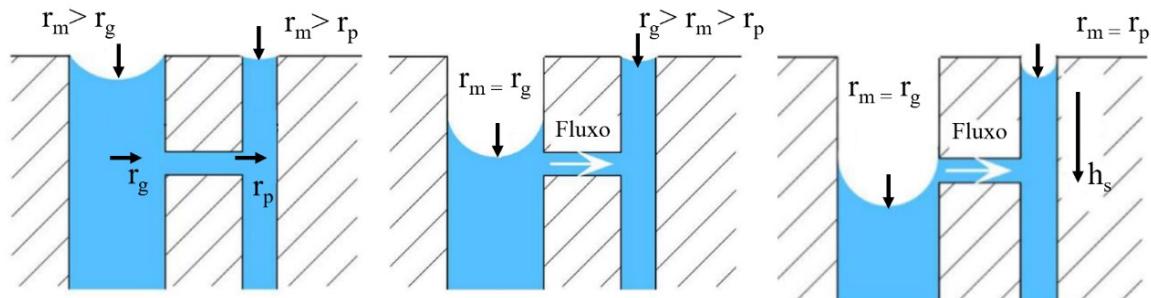
Figura 9 - Fases do processo de secagem



Fonte: Adaptado de Gonçalves (2007).

Ao se analisar a cinética da secagem nos poros observa-se que no momento em que a evaporação se inicia, a pressão capilar diminui e um menisco é formado em cada poro (Figura 10). À medida que a água evapora, independentemente do tamanho do poro, a curvatura do menisco deve ser a mesma, caso contrário, a pressão capilar provocaria um fluxo entre os poros até que o equilíbrio fosse instituído. A partir do momento que a umidade relativa for baixa o suficiente para que o raio do menisco seja menor que o raio do maior poro ocorrerá o escoamento do líquido do poro maior para o menor. Assim, conforme a frente de secagem se torna mais profunda nos poros de maior raio, os poros menores começam a secar. Conforme a frente de secagem vai se aprofundando há um aumento na umidade relativa próxima à superfície do menisco e, por essa razão, a velocidade de evaporação diminui. Quando a frente de secagem atinge uma profundidade crítica, a secagem passa a ocorrer majoritariamente por evaporação partindo do menor menisco para a superfície externa por meio da difusão de vapor.

Figura 10 - Cinética da secagem

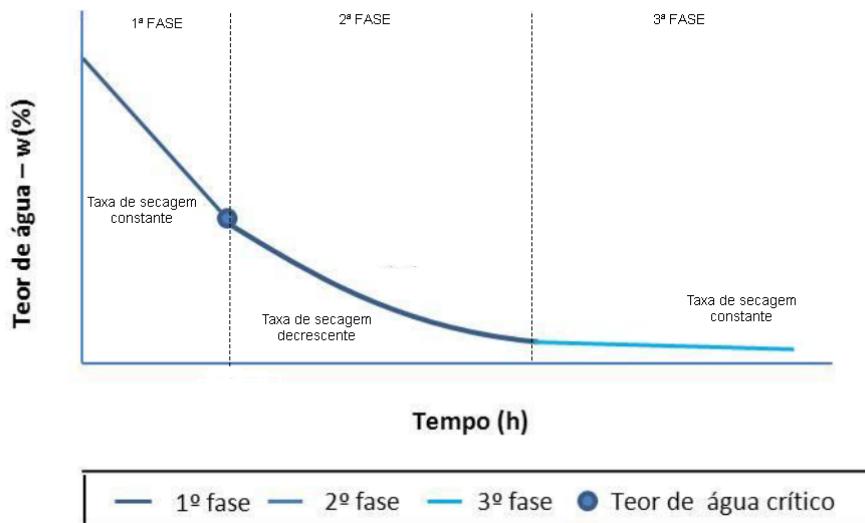


Fonte: Adaptado de Salomão (2016).

O processo de secagem pode ser representado graficamente pela curva de secagem do material, que representa o decaimento do teor de umidade ao longo do tempo (Figura 11). Na curva típica é possível distinguir três fases, a primeira corresponde ao trecho linear representando a diminuição do teor de umidade, o que significa que a taxa de secagem é praticamente constante. O ponto de inflexão da curva, entre a primeira e segunda fase, corresponde ao teor de umidade crítico a partir do qual a taxa de secagem passa a ser decrescente e, portanto, ocorre o decréscimo da velocidade de secagem. A transição da segunda para a terceira fase é indefinida, sendo que na terceira fase verifica-se um fluxo

constante e diz respeito a uma fase em que predomina o fenômeno da evaporação (PÁSCOA, 2012).

Figura 11 - Curva de secagem para materiais porosos



Fonte: Adaptado de Brito (2009).

De acordo com Magalhães (2007), o teor de umidade crítico representa o menor teor de umidade necessário para que se dê início ao transporte de umidade na fase líquida. Para valores abaixo do teor de umidade crítico, o transporte de umidade dá-se unicamente na fase de vapor. Em geral, para materiais com distribuição de tamanho de poros menos homogênea, o teor de umidade crítico apresenta valores elevados.

A contabilização de todo o processo de secagem é traduzida pelo índice de secagem que corresponde à variação do teor em água, em porcentagem, durante o processo de secagem, em relação ao teor em água existente na fase inicial da evaporação, também em porcentagem (FLORES-COLEN, 2009).

Ainda de acordo com Flores-Colen (2009), existe uma relação linear entre o índice de secagem e a porosidade aparente. Analisando argamassas convencionais e argamassas industrializadas observou-se que quanto maior a porosidade aparente da argamassa menor o índice de secagem, isto é, menor resistência à secagem.

2.2.4 Permeabilidade ao vapor de água

Especificamente sobre o transporte de vapor de água, uma propriedade importante para os fenômenos de transporte de umidade é a permeabilidade ao vapor. A permeabilidade de um material poroso está relacionada à passagem de água pela camada de material, a percolação da água pode acontecer no estado líquido ou de vapor. A permeabilidade ao vapor de água é definida como o fluxo de vapor de água que atravessa o material, em condições constantes de temperatura, diferenças de vapor entre ambientes com UR diferentes, por unidade de área da superfície, espessura do material e pressão de vapor (Schmid, 1988).

Então, considerando um material poroso de espessura (e) que divide dois ambientes 1 e 2 à uma temperatura constante (T), mas com pressões parciais de vapor diferentes, P_{v1} e P_{v2} , com $P_{v2} > P_{v1}$. Em um regime permanente, um fluxo mássico de vapor de água (J_v) será estabelecido, do ambiente 2 ao 1. A permeabilidade ao vapor (δ) a uma pressão parcial de vapor P_{v1} é definida como:

$$\delta = \lim_{P_{v2} \rightarrow P_{v1}} \left(\frac{J_v e}{P_{v2} - P_{v1}} \right) \quad (5)$$

De acordo com Baroghiel-Bouny (1994) a permeabilidade ao vapor é utilizada para avaliar os problemas de condensação de vapor em paredes de edificações. Segundo Silva; Brito e Veiga (2007) uma alta permeabilidade ao vapor de água é uma característica apreciável em argamassas de revestimento, uma vez que permite uma boa secagem da água que penetra nesta argamassa e facilitando a eliminação do vapor de água. Este fator pode influenciar positivamente outras características, como por exemplo, menor absorção por capilaridade ou uma menor permeabilidade à água sob pressão, sendo que estes fatores dependem da quantidade e do tamanho dos poros. Para Silva (2013) ao contrário da estanqueidade a água, é interessante que o revestimento de paredes externas seja o mais permeável possível ao vapor de água. Esta característica é fundamental para que a água da chuva absorvida pelas paredes possa ser mais tarde transmitida ao exterior, quando as condições atmosféricas permitirem.

Em estudos de caracterização do comportamento higrotérmico de materiais é mais comum a utilização do fator de resistência à difusão de vapor para caracterizar a permeabilidade ao vapor de água de materiais a base de cimento. Segundo Freitas e Pinto (1999), o coeficiente de resistência à difusão de vapor de água (μ), determinado pela relação adimensional entre permeabilidade ao vapor de água do ar e a permeabilidade ao vapor de água (δ) do próprio material, é um valor característico dos materiais que indica quantas vezes a resistência à difusão de um corpo de prova desse material é maior do que de uma camada de ar em repouso com mesma espessura e submetida às mesmas condições ambientais. Segundo Flores- Colen (2009), a permeabilidade ao vapor de água pode também ser expressa através da espessura (e) da camada de ar equivalente a 0,01 m do material (S_d), da seguinte maneira:

$$S_d = \mu \times e. \quad (6)$$

2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Quando existe diferença de temperatura entre duas regiões há o aparecimento de um fluxo de calor de uma para outra, no sentido da região mais quente para a mais fria. O conjunto de fenômenos que caracterizam este fluxo é chamado de transmissão de calor ou trocas térmicas. As trocas térmicas podem ocorrer de três formas, sendo elas, radiação, convecção e condução. No entanto, quando se trata de materiais porosos, em que há presença de água em diferentes fases, as transferências de calor e de umidade ocorrem simultaneamente e de forma interdependente. Portanto, os materiais estarão submetidos a gradientes de temperatura e de umidade (MENDES, 1997; FROTA; SCHIFFER, 2003).

2.3.1 Radiação

As trocas de calor por radiação ocorrem através da capacidade dos corpos em emitir e absorver energia térmica, toda matéria com temperatura acima de $-273,15^{\circ}\text{C}$ emite radiação térmica. A energia é transmitida por meio de ondas eletromagnéticas e, portanto, ocorre sem a necessidade de um meio para propagação. Esta natureza é distribuída em diferentes comprimentos de onda e segundo alguns princípios: todo corpo que tem energia interna, transforma parte da mesma em energia radiante; a troca de energia radiante entre corpos exige que o meio permita a passagem das radiações por eles emitidas, sendo o ar

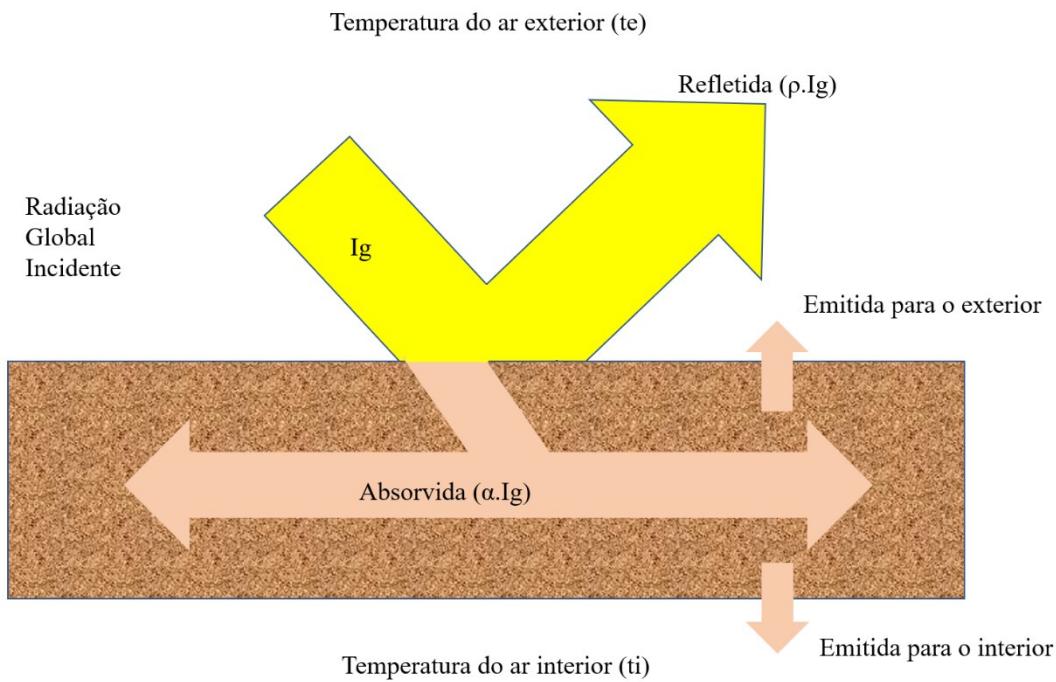
transparente a todos os comprimentos de onda; a energia radiante absorvida se transforma em calor (BEZERRA, 2003; FROTA; SCHIFFER, 2003).

Sendo assim, todos os corpos podem tanto transmitir, refletir ou absorver a radiação térmica incidente. Então, a soma da absorção (α), reflexão (ρ_{ref}), e a transmissão (τ) é igual a 100 % da radiação incidente, conforme mostrado na Equação (7).

$$\alpha + \rho_{\text{ref}} + \tau = 1 \quad (7)$$

A Figura 12 apresenta esquematicamente que parte da radiação incidente é refletida, enquanto a outra parte é absorvida pelo material que se aquece, diante disto, parte da energia absorvida é reemitida para o exterior e a outra parte para o ambiente interno. A quantidade de energia emitida por metro quadrado (W/m^2) dá-se o nome de irradiância.

Figura 12 - Trocas de calor por radiação



Fonte: Adaptado de Dornelles e Roriz (2007).

O coeficiente que expressa a fração da energia radiante absorvida é uma propriedade da superfície do material chamado coeficiente de absorção. De acordo com Lamberts *et al.*

(2013) os materiais porosos de construção são seletivos à radiação de onda curta e a cor superficial é determinante para definição da parcela absorvida da radiação incidente. Segundo Givoni (1976), a cor da superfície externa do edifício influencie, de forma significativa, o desempenho térmico do edifício, uma vez que determina a absorção de radiação solar. No entanto, o efeito da cor na temperatura interna depende de outros fatores, como a resistência ao calor e a capacidade térmica.

Outra propriedade importante da superfície do material é a emissividade que expressa a razão entre a energia emitida por uma superfície e a energia emitida por um corpo negro, em uma unidade de tempo, quando expostos a uma mesma condição de temperatura. Os valores de emissividade (ϵ) se encontram na faixa de $0 \leq \epsilon \leq 1$ e dependem fortemente do material da superfície e do seu acabamento (BEZERRA, 2003; ZANONI, 2015).

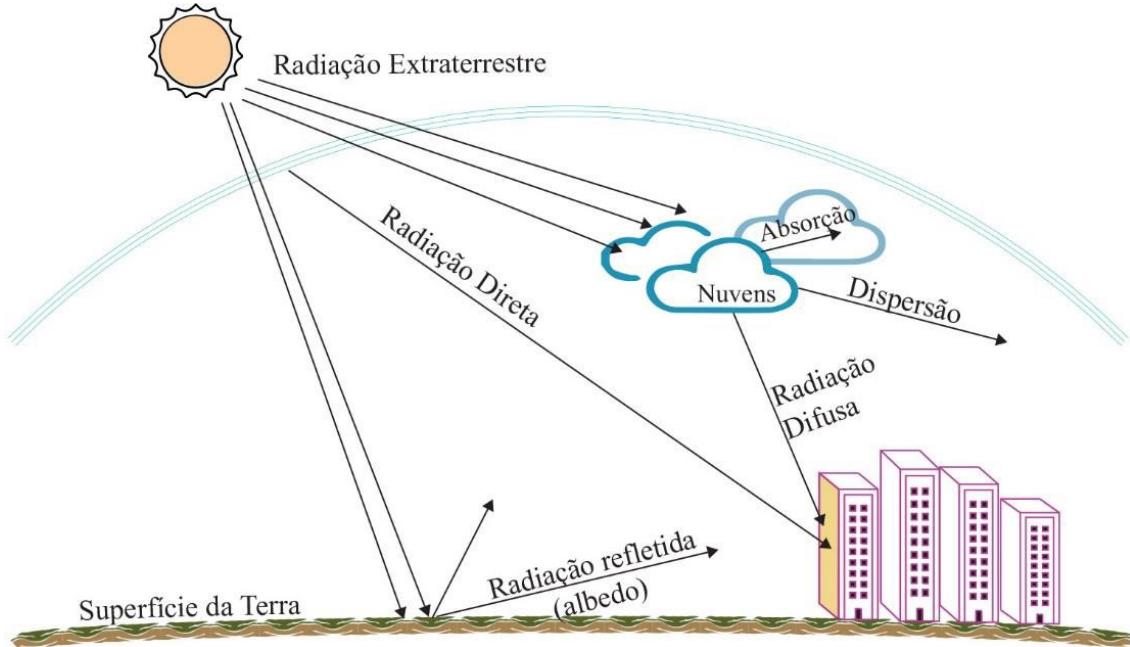
Todos os corpos na presença uns dos outros, estando em temperaturas diferentes, trocam calor por radiação. Diante disso, o fluxo de calor por radiação se traduz como a taxa líquida de energia trocada entre os corpos (Equação 8).

$$Q_{rad} = A_1 \cdot \sigma_{S-B} \cdot \epsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (8)$$

Em que: Q_{rad} é a taxa de fluxo de calor radiante [W]; A_1 é a área da superfície que participa do processo de transferência de calor; σ_{S-B} é a constante de radiação de Stefan-Boltzmann [$5,6 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$]; ϵ_1 é fator de emissividade da superfície; T_1 temperatura da superfície 1 e T_2 temperatura da superfície 2.

O sol é a principal fonte de energia radiante conhecida. A radiação solar pode ser dividida em três parcelas sendo elas, direta, difusa e refletida, conforme mostra a Figura 13. A radiação solar direta, vinda da parcela da radiação extraterrestre, atinge diretamente a terra e exerce maior influência nos ganhos térmicos de uma edificação. A parcela de radiação solar difusa sofre um espalhamento e, é tanto maior quanto mais nublado for o céu. Por sua vez, a radiação solar refletida representa a parcela recebida após a reflexão dos raios no solo e em superfícies adjacentes (BEZERRA, 2003; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2013; ZANONI, 2015).

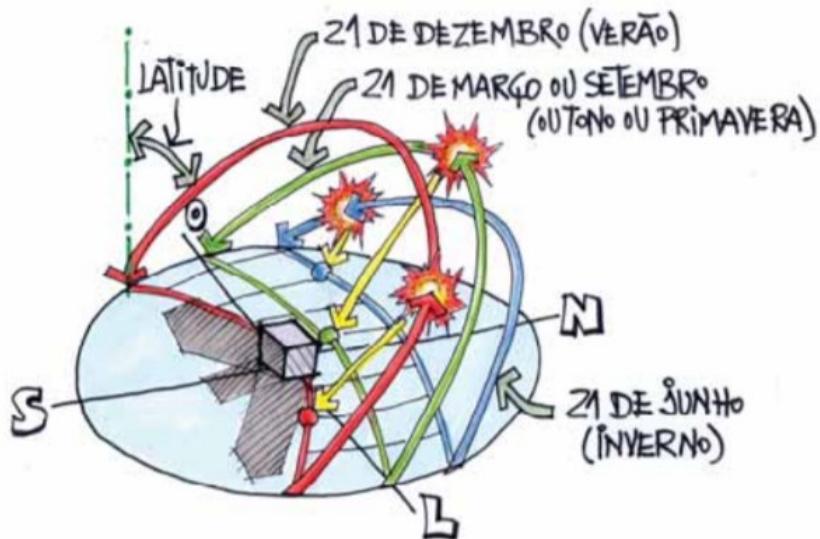
Figura 13 - Componentes da radiação solar



Fonte: Zanoni (2015).

Segundo Freitas (1992), a radiação solar é condicionada pela latitude, estação do ano, horário do dia, altitude e nebulosidade. Para o caso de analisar os efeitos da radiação solar nas edificações, a determinação da trajetória do sol e quantificação da radiação é importante para identificar quais fachadas recebem maior influência desta variável. No movimento de translação a Terra percorre uma trajetória elíptica em um plano inclinado de $23^{\circ}27'$ em relação a linha do Equador, o que faz com que os hemisférios recebam quantidades diferentes de radiação solar. Sendo assim, em determinadas épocas do ano um hemisfério receberá maior incidência de radiação que outro (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2013). As orientações mais críticas para o hemisfério Norte são Sul e Oeste, enquanto no hemisfério Sul são Norte e Oeste, pela Figura 14 é possível observar este efeito para determinadas épocas do ano no hemisfério Sul e nota-se a que a inclinação do sol influencia a fachada Norte da edificação.

Figura 14 - Trajetória do sol nos solstícios e equinócios e influência sobre a área da fachada



Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2013).

2.3.2 Convecção

Quando um fluido em repouso é aquecido, o gradiente de temperatura entre as suas regiões está associado a um gradiente de densidade, que por sua vez, provoca deslocamento da massa do fluido de forma cíclica. Este deslocamento dá origem as chamadas correntes convectivas (BEZERRA, 2003).

Sendo assim, a transferência de calor por convecção acontece quando os corpos estão em contato molecular, mas ao menos um é fluido. O fluxo de calor por convecção pode ser expresso pela Lei de Newton que é proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície e do ar, (Equação 9). Nos materiais porosos, o fluxo de calor convectivo corresponde à energia transportada pelo movimento da água líquida, do vapor e do ar.

$$q_{cv} = hc \cdot A_s \cdot (T_{sup} - T_{ext}) \quad (9)$$

Em que: q_{cv} é o fluxo de calor por convecção [W/m^2]; hc o coeficiente de convecção ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$); T_{sup} a temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$); T_{ext} a temperatura externa ($^{\circ}\text{C}$); A_s a área da superfície (m^2).

Bezerra (2003) apresenta que o coeficiente de transferência de calor por convecção depende do fluido que escoa pela superfície, da natureza do escoamento, da rugosidade da superfície e uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte de fluido.

As trocas térmicas por convecção favorecem a remoção do excesso de umidade por evaporação e, também, podem reduzir a temperatura devido ao consumo de calor pela mudança de fase. No entanto, podem produzir choques térmicos em consequência de quedas bruscas de temperatura. A intensidade do resfriamento de uma superfície depende da temperatura e da velocidade do ar, mas também depende da turbulência do fluxo de ar e da umidade relativa do ambiente (FROTA; SCHIFFER, 2003; ZANONI, 2015).

2.3.3 Condução

A transferência de calor por condução acontece devido ao contato molecular dos corpos e está diretamente relacionado à atividade atômica, molecular e eletrônica. O transporte de energia da região de maior temperatura para a região com temperatura inferior é condicionado pelo movimento cinético, cujas moléculas se encontram em movimento vibratório e, por choque, as de maior temperatura cedem energia para as de menor temperatura. O mecanismo de transferência de calor por condução pode ser expresso pela Lei de Fourier, o fluxo térmico é proporcional a superfície por onde o calor passa e ao gradiente de temperatura, conforme descrito pela Equação 10 (BEZERRA, 2003; ZANONI, 2015).

$$q_{cd} = \lambda \cdot A_s \cdot \frac{T_{int} - T_{ext}}{L} \quad (10)$$

Em que: q_{cd} é o fluxo de calor por condução [W/m^2]; λ condutividade térmica [W/m.K]; T_{ext} temperatura da superfície externa [$^{\circ}\text{C}$]; T_{int} temperatura da superfície interna [$^{\circ}\text{C}$]; L o comprimento [m]; A_s a área da superfície [m^2].

A condutividade térmica é uma propriedade física que expressa a capacidade de um material homogêneo e isótropo em conduzir maior ou menor quantidade de calor por

unidade de tempo. Em um sistema construtivo, o coeficiente de condutividade térmica depende principalmente do material, de sua espessura e da diferença de temperatura entre suas faces.

Os materiais usados como isolantes térmicos apresentam condutividade térmica baixíssima, principalmente pela quantidade de ar incorporado na estrutura interna, o poliestireno expandido, por exemplo, tem condutividade térmica de 0,04 W/m.K. Nos materiais metálicos a condutividade é alta, com valores entre 20 e 700 W/m.K, devido a presença de elétrons livres. Os materiais sólidos não metálicos não permitem a livre movimentação de elétrons. Nestes, os valores de condutividade térmica estão entre 0,5 e 30 W/m.K. No concreto convencional a condutividade térmica é de aproximadamente 1,75 W/m.K (ORDENES; LAMBERTS; GÜTHS, 2008).

De acordo com Santos (2009), quando se trata de um meio poroso é necessário considerar três fases presentes, sólida, líquida e gasosa. Sendo o ar um bom isolante, a condutividade térmica em um meio seco é baixa. No entanto, a medida que o meio vai se tornando mais úmido há um aumento na condutividade térmica, pois, a água facilita a transmissão de calor. Outro ponto importante, apresentado por Alves, Pietrobon e Pietrobon (1999) e Lamberts *et al.* (2013), é a influência da densidade de massa aparente do material, quanto menor for esta densidade menor será a sua condutividade térmica, o ar confinado no interior dos poros dificulta a transferência de calor.

Mendes *et al.* (2001) apresentam que a condutividade térmica efetiva é importante para avaliar a transferência de calor e umidade através de elementos construtivos porosos, pois, permite que os fluxos de calor de condução possam ser calculados com precisão. Este coeficiente de transporte de calor em um material poroso pode ser descrito em termos de condutividade da matriz sólida e fases fluidas e suas quantidades, fenômenos de mudança de fase e organização espacial das fases.

Kim *et al.* (2003) realizaram testes térmicos em amostras de concreto a fim de analisar a dependência da condutividade térmica com relação a parâmetros como idade, relação água/cimento, adição de escória e cinzas volantes, quantidade de agregado graúdo,

volume de agregados miúdos, temperatura e condições de umidade. Observou-se que a idade de cura do concreto dificilmente afeta a condutividade térmica. Com relação à quantidade de agregados graúdos foi verificado que, independente do estado de umidade das amostras, o incremento do volume destes agregados fez com que a condutividade térmica aumentasse linearmente, o que se justifica no fato destes elementos serem os melhores condutores térmicos dentre os componentes da mistura do concreto. A partir dessa análise as dosagens com maiores frações de agregados apresentaram condutividades crescentes.

Ainda de acordo com os resultados apresentados por Kim *et al.* (2003), constatou-se que a condutividade térmica das amostras de concreto diminuiu à medida que suas temperaturas aumentaram. Das amostras de concreto com maior grau de saturação foram obtidas medições de condutividade térmica com valores mais elevados, quando comparados aos das amostras secas, mudança atribuída ao preenchimento dos vazios com água. A quantidade de cimento foi outro fator relevante, as amostras com baixa relação água/cimento apresentaram maiores valores de condutividade térmica, no entanto, em amostras onde parte do cimento foi substituída por cinzas ou escórias estes valores foram menores.

Demirboğa (2007), ao realizar um estudo sobre a condutividade térmica para períodos de cura de 28 e 120 dias, concluiu que a substituição parcial de cimento Portland por escória e cinzas volantes no concreto contribuiu para a redução da condutividade térmica do material. Esta redução acontece, pois, há redução da densidade de pastas e argamassas quando estas adições minerais são incorporados à mistura.

Para Frota e Schiffer (2003), outra característica importante a ser observada no fechamento das edificações é a inércia térmica. Dois fenômenos relevantes para o comportamento térmico de edifício estão relacionados à inércia térmica são eles, o amortecimento e o atraso da onda de calor, devido ao resfriamento ou aquecimento dos materiais. A inércia térmica está sujeita as características térmicas dos componentes construtivos, e é função da densidade, da condutividade térmica e da capacidade

calorífica. Sendo assim, uma elevada inércia térmica permite diminuir a amplitude de variação da temperatura no interior das edificações.

A capacidade calorífica, ou capacidade térmica, consiste na quantidade de calor necessário para variar em uma unidade a temperatura de um sistema por unidade de área. Esta propriedade é utilizada quando se deseja avaliar a capacidade de um sistema em reter mais ou menos calor (LAMBERTS *et al.*, 2013). A capacidade térmica pode ser definida como a capacidade do material de estocar calor e é função do calor específico e massa específica aparente do material (Equação 11).

$$C = e \cdot c \cdot \rho \quad (11)$$

Em que C é a capacidade térmica [J/K]; e a espessura da camada de material [m]; c calor específico do material [J/(kg.K)] e ρ massa específica aparente [kg/m³].

Segundo Bezerra (2003), ao se analisar o desempenho térmico de fechamentos, outras duas propriedades térmicas são importantes, a difusividade térmica e a resistência térmica. A difusividade térmica está relacionada à propagação do calor em um meio, no decorrer das variações de temperatura em função do tempo, e é função da condutividade térmica, massa específica e calor específico do material (Equação 12). Quanto maior a difusividade térmica mais rápida será a difusão de calor no meio.

$$Dt = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (12)$$

Onde: Dt é a difusividade térmica [m²/s]; λ condutividade térmica, ρ a massa específica do material [kg/m³]; c o calor específico do material [J/kg·K].

A resistência térmica representa a maior ou menor facilidade com que se dá o fluxo de calor em determinada direção e depende da espessura e condutividade térmica do material (Equação 13).

$$R_t = \frac{L_p}{\lambda \cdot A_{fluxo}} \quad (13)$$

Onde: R_t é a resistência térmica [K/W]; L_p a espessura da parede [m]; λ a condutividade térmica [W/m·K] ; A_{fluxo} a área perpendicular ao fluxo de calor [m^2].

O tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um determinado componente construtivo é definido pela ABNT NBR 15220:2005 como atraso térmico. O atraso térmico (φ) depende da capacidade térmica (C) e da ordem que as camadas do componente construtivo estão dispostas e pode ser descrito pela Equação 14.

$$\varphi = 0,7284 \cdot \sqrt{R_t \cdot C} \quad (14)$$

2.4 COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DO CONCRETO

No que se refere ao comportamento higrotérmico do concreto, diversas pesquisas estabeleceram relação entre a estrutura porosa e constituintes do material com o transporte de calor e umidade. Paulon (2000) apresenta que os mecanismos de transporte de umidade no concreto dependem da estrutura dos poros (tipo, tamanho e distribuição); do grau de umidade do concreto e da temperatura. Reinhardt *et al.* (1994) afirmam que o fator mais relevante no transporte de umidade no concreto é a absorção capilar e que o grau de saturação dos poros tem enorme influência nos resultados.

Nesse sentido, Guimarães (1997) reitera que a difusão pura ou a permeabilidade pura só acontecem em estruturas saturadas onde não há atuação das forças capilares e, estando o concreto seco ou não saturado, a sucção capilar é o fenômeno predominante. Frizzo (2001) destaca que a absorção capilar do concreto aumenta quando a relação água/cimento aumenta e depende do grau de compactação do concreto. Outra observação importante é a de que uma elevada quantidade de finos inertes aumenta a absorção capilar.

O comportamento da umidade no concreto foi investigado por Künzel, Holm e Krus (2008) por meio de testes experimentais e simulações higrotérmicas. Os resultados

apontaram algumas diferenças do concreto com relação a absorção de água líquida, em contrapartida, os processos de sorção e difusão de vapor parecem ser semelhantes aos de outros materiais de construção.

O efeito da temperatura na isoterma de dessorção do concreto foi investigado por Poyet (2009), foram determinadas isotermas de dessorção do concreto para temperaturas de 30°C e 80°C, para tal foram utilizadas soluções salinas saturadas com umidade relativa entre 3% e 100%. Observou-se que, para as duas temperaturas, os padrões são semelhantes: a cinética de perda de massa é máxima nos primeiros dias; e é então continuamente reduzida à medida que o processo de dessorção prossegue e o equilíbrio é alcançado.

Ainda segundo a autora, para a temperatura de 80°C o tempo necessário para alcançar o equilíbrio foi muito menor, evidenciando a aceleração da dessorção e o aumento da velocidade das propriedades de transferência de água com o aumento da temperatura. Para umidade relativa a 100% o conteúdo de umidade a 30°C foi de aproximadamente 5,4%, a 80°C houve uma redução e o conteúdo de umidade foi de 4,6%.

No que se refere ao transporte de massa e propriedades microestruturais, Wu, Wong e Buenfeld (2017) analisaram uma variedade de pastas, argamassas e concretos que foram ensaiados após serem submetidos a vários regimes de secagem e reumidificação durante um período de três anos. Os autores observaram que a secagem pode alterar as propriedades de transporte devido a uma combinação de fatores, tais como: esvaziamento de poros (capilares, géis, intercamadas), aumento da porosidade acessível ao gás, alterações na microestrutura e microfissuração por retração. A microfissuração aumenta quando a relação a/c e a dimensão dos agregados também aumentam. A histerese ocorre em toda faixa de umidade relativa (0 a 100%).

Em estudo sobre materiais cimentícios, Issaadi *et al.* (2015) avaliaram a isoterma de adsorção e a permeabilidade ao vapor. Foi observado que a taxa de adsorção e dessorção da pasta de cimento e argamassa diminuiu com o aumento da idade do material e é influenciada pela relação a/c. Os autores notaram que há histerese nas isotermas de sorção

em toda a faixa de umidade relativa. Além disso, a capacidade de armazenamento de umidade é menor para teores de umidade mais baixos, é constante entre os teores de 10% e 80% de UR (mesma inclinação da isoterma) e, para a zona higroscópica superior ($UR > 80\%$), observa-se um aumento na capacidade de armazenamento de umidade (maior inclinação da isoterma).

Ainda segundo Issaadi *et al.* (2015), verifica-se um efeito contraditório do agregado sobre a difusão do vapor de água. Por um lado, pela sua baixa permeabilidade, os agregados afetam esta difusão reduzindo a capacidade de armazenamento de umidade, no entanto, introduzem uma zona de transição em que a porosidade é maior que a da pasta de cimento. Portanto, a difusão de vapor de água será maior nesta zona de transição e o armazenamento de umidade será menos importante.

De acordo com Wu, Wong e Buenfeld (2017), a quantidade de água retida após o equilíbrio para uma determinada UR é semelhante para pastas, argamassas e concretos produzidos com mesmo aglomerante, relação a/c e idade de cura. Diante disso, apontam que os agregados e a zona de transição pouco influenciam no teor de umidade de equilíbrio e nas propriedades de transporte de umidade. Resultado semelhante foi apresentado por Baroghel-Bouny (2007), em que foram estudadas uma ampla gama de pastas e concretos de cimento endurecido normal e de alto desempenho, foi verificado que a presença de agregados não influencia as curvas de adsorção e dessorção.

Bennai *et al.* (2017) realizaram uma caracterização experimental das propriedades térmicas e higrícas de concreto com fibra de cânhamo e observaram um aumento significativo na capacidade de armazenamento de umidade para altas umidades relativas ($< 80\%$), para idades avançadas houve uma redução na capacidade de armazenamento. Outra observação foi o aumento da permeabilidade ao vapor de água com o aumento do grau de saturação do material, ou seja, a permeabilidade ao vapor de um material úmido é maior que a do material seco.

O comportamento de adsorção e dessorção de pasta de cimento endurecido e concreto foram estudados em detalhes por Burgh e Foster (2017) em temperaturas de 23°C a 80°C.

Os resultados apontaram que qualquer estudo de transporte de umidade em materiais cimentícios, por meio de cinética de não-equilíbrio, que envolva períodos de horas a semanas provavelmente sofrerá impactos substanciais da cinética não-Fickiana.

Em uma avaliação sobre os efeitos da temperatura e do conteúdo de umidade no transporte higrotérmico e propriedades de armazenamento de materiais de construção porosos, Ferroukhi *et al.* (2018) analisaram diferentes materiais: bloco de concreto, gesso, compensado e bloco cerâmico. O estudo analisou condutividade térmica, capacidade de calor específica, permeabilidade ao vapor de água e capacidade de armazenamento de umidade e o impacto das condições hídrica e térmica sobre estas propriedades. Verificaram que a natureza microestrutural do material tem influência direta no comportamento higrotérmico, especialmente em materiais heterogêneos como o bloco de concreto, o que pode explicar o fenômeno de aprisionamento de moléculas de água durante a dessorção que acentua o fenômeno da histerese e modifica as propriedades higrotérmicas.

Dependendo da natureza do material, a medição das isotermas pode ser um processo muito longo. Então, são utilizados métodos para previsão do teor de água higroscópica de acordo com as condições do ambiente. Na literatura existem vários modelos para o cálculo de isotermas de sorção. O modelo GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) tem sido amplamente utilizado. Estudos anteriores isotermas de sorção para concreto foram obtidas pelo modelo GAB e demonstraram boa aproximação com dados experimentais (POYET, 2009; ISSAADI *et al.*, 2015; BENNAI *et al.*, 2017).

Com relação a condutividade térmica de concretos Bazant e Kaplan (1996) apresentam que os agregados exercem grande influência nesta propriedade. A maioria dos agregados naturais tem condutividade térmica maior que a da pasta de cimento Portland saturada. Ou seja, quanto maior o volume de agregados, maior será a condutividade térmica do concreto.

Outros fatores também influenciam esta propriedade. Segundo Ferreira (2011), nos concretos, a condutividade térmica é influenciada pelo teor de umidade, mineralogia dos

agregados, massa específica e temperatura (FERREIRA, 2011). Segundo o autor como a condutividade térmica do ar é muito menor que a da água, com o início da secagem de um meio inicialmente saturado, a tendência é que com o aumento da temperatura a condutividade térmica do concreto diminua. Porém, ao investigar a influência dos gradientes de temperatura e umidade nesta propriedade, Jerman *et al.* (2012) apresentaram conclusões diferentes. Ao analisar blocos de concreto celular com relação as propriedades hídricas e térmicas, notou-se que a condutividade térmica aumentou com o teor de umidade, até seis vezes em comparação com o estado seco. A dependência da condutividade térmica na temperatura foi menos pronunciada do que no teor de umidade, mas na faixa de temperatura de 2° C a 40° C, o aumento foi de 50%.

Segundo Neville (2016), no concreto convencional, a massa específica não influencia significativamente a condutividade, no entanto, devido à baixa condutividade térmica do ar, nos concretos leves há variação com a massa específica. Ainda de acordo com o autor; o grau de saturação do concreto é o principal influente, no caso de concretos leves; por exemplo, um aumento de 10% no teor de umidade aumenta a condutividade em cerca de 50%. Por outro lado, como a condutividade da água é menor que a da pasta de cimento hidratada, quanto menor for a quantidade de água da mistura, maior será a condutividade térmica do concreto endurecido.

A influência do teor de umidade do material nas suas propriedades térmicas também foi observada por Bennai *et al.* (2017). Ao analisar a condutividade térmica e capacidade térmica de concretos com fibras de cânhamo, notaram um aumento de 125% na condutividade térmica entre os estados seco e saturado do concreto.

2.5 CONCRETO COM RESÍDUOS

Concretos com menor massa específica que os concretos com agregados convencionais são definidos como concretos leves. A redução da massa específica pode ser obtida pela substituição dos agregados tradicionais por agregados leves, pela incorporação de ar ou pela retirada dos finos (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2005).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o concreto leve, com massa específica menor que 2000 kg/m³, pode conter somente agregados leves ou uma combinação de leves e normais é comum a utilização de areia com densidade normal como agregado miúdo e agregados graúdos leves. São classificados como leves, os agregados de origem natural ou artificial com massa específica unitária menor que 1120kg/m³.

Existe uma grande variedade de agregados leves, de origem natural ou sintéticos, incluindo os subprodutos e rejeitos industriais. Sendo assim, muitos materiais podem ser utilizados como agregados leves, como por exemplo, a argila expandida, cinzas, a escória sintetizada, o poliestireno expandido (EPS) reciclado e em pérolas, resíduos de etileno-acetato de vinila (EVA), borracha de pneu, malha de lã de vidro, cortiça, pedra-pomes e resíduos da própria indústria da construção civil (DANTAS, 2003; GUIDIO *et al.*, 2014; UCHÔA *et al.*, 2015).

A absorção do agregado também influencia a zona de transição na interface matriz-agregado. No caso de agregados com elevada absorção, durante o processo de mistura do concreto podem absorver uma grande quantidade de água e partículas de cimento, se utilizados na condição seca ou sem qualquer tratamento superficial, enfraquecendo a zona de transição e, consequentemente, diminuição da resistência mecânica (BUTTLER, 2003). Por outro lado, em misturas com agregados previamente saturados, em um segundo momento a água de pré-molhagem torna-se disponível dentro mistura podendo hidratar partículas de cimento não hidratado o que contribui para a formação de uma menor zona de transição (CABRAL, 2007).

Em uma análise sobre desempenho Angelin (2014) avaliou o desempenho físico, térmico, mecânico e microestrutural de concretos leves estruturais, em que se variou a proporção de agregados leves, argila expandida, nos traços de cada concreto produzido. Os resultados apontaram que os valores da condutividade térmica são diretamente influenciados pelo valor da massa específica do concreto, especificamente pelo teor de argila expandida.

De acordo com Cassa, Carneiro e Brum (2001), o volume de resíduos produzidos diariamente afeta a qualidade de vida nos centros urbanos, o que também está relacionado à falta de áreas adequadas para deposição destes resíduos. Nesse sentido, para combater estes problemas, a reaproveitamento é uma das propostas que mais ganham estímulo, e a construção civil se apresenta como o ramo com melhores resultados no reaproveitamento de resíduos industriais, com a utilização de escória de alto forno, cinzas e sílica ativa, por exemplo, mas diversas pesquisas sobre outros resíduos estão sendo realizadas (BEZERRA, 2003). Diante disso, a utilização de poliestireno expandido (EPS) reciclado e de resíduos de borracha de pneus como novos materiais para substituição de agregado na confecção de concretos leves vem sendo estudados, espera-se que com esta alternativa, um volume maior desses resíduos possa ser reaproveitado.

2.5.1 EPS

O Poliestireno Expandido (EPS- *Expanded Polystyrene*) é um plástico celular rígido que pode se apresentar sob diversas formas geométricas e pode desempenhar uma infinidade de aplicações (MANO, 1999). A matéria prima do EPS é poliestireno (PS) um polímero de estireno obtido, a partir do petróleo, por meio de diversas transformações químicas. O poliestireno apresenta-se sob a forma de pequenos grânulos capazes de expandir cerca de 50 vezes o seu volume inicial. O penteno (C_5H_{12}) é empregado como agente expansor na transformação em poliestireno expandido. Por ser composto somente por átomos de carbono e hidrogênio, o penteno se deteriora facilmente devido reação fotoquímica realizada pelos raios solares (ABRAPEX, 2017).

No Brasil, o EPS é muito utilizado nas embalagens de eletrodomésticos, máquinas, equipamentos, entre outros. Por se tratar de um material leve seus resíduos ocupam um volume grande. Quando o EPS está limpo, separado de metais, papeis e outros contaminantes, pode ser reciclado. No processo de reciclagem o EPS é triturado e reduzido mecanicamente para a forma de pérolas, podendo ser utilizado desta maneira ou, então, fundido retornando ao estado inicial, como poliestireno. Assim, pode ser utilizado na fabricação de diferentes objetos. A produção de concreto leve com EPS utilizando esse tipo de resíduo implica não somente no caráter ambiental, mas também

econômico, por não despesar recursos significativos para produção de agregados leves, e ainda produzir concretos mais leves que os disponíveis no mercado (CATOIA, 2012).

De acordo com Souza (2002), o EPS possui características que permitem uma grande versatilidade na sua utilização, sendo elas: baixa condutividade térmica; material leve com massa específica entre 10 e 30 kg/m³; baixa absorção de água e resistência mecânica razoável variando entre 0,29 e 0,39 MPa. A utilização do EPS na construção civil pode proporcionar uma economia significativa nos projetos estruturais das obras, contribui na redução do desperdício e colabora no reaproveitamento de resíduos, pois, há a possibilidade de utilização do EPS reciclado.

Ao analisar as propriedades do concreto com EPS no estado fresco, Catoia (2012) observou que as pérolas de EPS, em substituição ao agregado gráudo, aumentaram a fluidez do concreto e analisou que há potencialidade para produção de concreto auto adensável. Trussoni, Hays e Zollo (2012) compararam concretos produzidos com pérolas de EPS e com EPS reciclado, os traços em que foram utilizadas pérolas apresentaram melhor trabalhabilidade.

Quando se trata da massa específica do concreto leve com EPS, SAYADI *et al.* 2016 observaram que esta reduz à medida que se aumenta a concentração de EPS na mistura. Os concretos leves sem EPS produzidos apresentaram massa específica variando de 1200 kg/m³ a 800 kg/m³, enquanto amostras preparadas com uma variação do volume de EPS de 45%, 67,4%, 73,1% e 82,2% têm massa específica entre 400 kg/m³ e 150 kg/m³. Neste estudo o EPS foi utilizado como agregado leve.

Em uma comparação entre concretos produzidos com EPS em pérolas e EPS triturado, Carvalho (2017) verificou que a massa específica obtida era menor ao utilizar o EPS em pérolas. Os concretos com substituição de 100% do volume de agregado gráudo por EPS em pérola ou triturado, apresentaram massa específica de 1650 kg/m³ e 1590 kg/m³.

Em relação às propriedades mecânicas Tang *et al.* (2008) e Sayadi *et al.* (2016) verificaram que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade reduzem com o

aumento da concentração de EPS nos concretos leves em que este é utilizado em substituição ao agregado natural.

Alguns trabalhos avaliaram a influência do tamanho das partículas de EPS na resistência à compressão do concreto. Parant e Le Roy (1999), Babu e Babu (2002), Miled, Sab e Le Roy (2006) observaram que a diminuição do tamanho das partículas de EPS provoca um aumento significativo na resistência à compressão em comparação aos concretos com partículas maiores.

Ainda sobre as propriedades mecânicas Xu *et al.* (2012) fizeram um estudo das com concreto leve com EPS. O material foi utilizado em substituição ao agregado natural para fabricar blocos de concreto. Os valores de resistência mecânica e resistência ao cisalhamento foram satisfatórios para execução de alvenaria com blocos vazados de concreto com EPS, com resistência à compressão entre 7,85 MPa e 20,77 MPa.

Lajes maciças pré-moldadas com concreto leve com pérolas de EPS foram estudadas por Catoia (2012). Analisou-se a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a resistência à tração na compressão diametral e na flexão, a retração e a fluência. Os resultados mostram que o concreto leve com pérolas de EPS é resistente o suficiente para aplicação em lajes maciças pré-moldadas com resistência mínima na ordem de 17 MPa. Trussoni, Hays e Zollo (2012) investigaram a diferença entre o uso de EPS em pérolas e do EPS reciclado triturado em substituição a uma parte do agregado natural fino no concreto. As misturas com esferas apresentaram melhores resultados para resistência à compressão e a tenacidade.

Carvalho (2017) analisou concretos com EPS reciclado triturado e em pérola para aplicação em paredes estruturais de concreto. Foram utilizados dois teores diferentes de EPS, reciclado e em pérolas, constatou-se que a resistência à compressão dos concretos com adição de EPS apresentaram resultados inferiores na faixa de 34 a 50% em relação ao concreto de referência, o concreto que apresentou melhor resistência à compressão foi o concreto com menor teor de EPS em pérolas.

Em estudo sobre a interface entre matriz e agregado Laukaitis, Surauskas e Kerien (2005) descreveram interações entre três tipos diferentes de partículas de poliestireno, incluindo EPS reciclado triturado mecanicamente. As imagens obtidas por meio de microscópio eletrônico revelam que o EPS triturado têm forma e superfície irregular, grande parte de sua área superficial é composta de cavidades “favo de mel” separadas por películas finas que são danificadas em grande extensão. De acordo com os autores, os agregados de EPS secos não aderem bem à pasta de cimento devido a sua característica hidrofóbica e superfície carregada estaticamente, estes fatores prejudicam a homogeneidade e enfraquecem a coesão, o que influencia negativamente a resistência. Neste mesmo estudo, a avaliação da interface entre a matriz cimentícia e o EPS, pós procedimento de hidrofilização, os autores verificaram contato próximo, sem microfissuras e fraturas. Observaram ainda que a coesão entre matriz e EPS depende do tamanho e forma das partículas. As pérolas de maior dimensão e o EPS triturado apresentaram melhor adesão a matriz.

Com o intuito de avaliar a influência do agregado de EPS na resistência e durabilidade do concreto auto adensável, Ranjbar e Mousavi (2013) estudaram diferentes traços com variação da relação a/c (0,38 e 0,44) e teor de EPS nas proporções de 10, 15, 22,5 e 30%. Foram utilizados EPS em duas granulometrias diferentes que substituíram os agregados naturais graúdo e miúdo em volume. Foi observada uma queda na resistência à compressão do concreto com o aumento de teor de substituição de EPS. Os autores relacionaram este comportamento à baixa resistência do agregado de EPS e a baixa resistência de aderência interfacial do agregado de EPS comparada ao agregado convencional. A zona de transição foi examinada por meio de microscópio eletrônico de varredura. Observou-se uma baixa resistência de ligação interfacial que de acordo com os autores pode ser atribuída a rugosidade e/ou textura superficial do agregado EPS.

Em uma avaliação sobre a retração em concretos com agregado de EPS Chen, Liu e Chen (2010) observaram que o aumento da fração volumétrica de EPS, em substituição aos agregados naturais, provoca um aumento na tensão de retração. Dois dos fatores afetam a retração do concreto e estão relacionados ao grau de restrição do agregado, isto é, suas propriedades elásticas e a proporção volumétrica da pasta na mistura. As esferas de EPS

oferecem pouco impedimento a retração da pasta. Portanto, à medida que a proporção volumétrica do EPS é aumentada, a retração também aumenta.

Em relação às propriedades hídricas, Babu, Babu e Tiong-Huan (2006) analisaram o efeito do tamanho do agregado de poliestireno nas características de migração de umidade do concreto leve. Os concretos com maior volume de EPS e os que continham agregados de maior dimensão, apresentaram maior migração e absorção de umidade. Segundo os autores este comportamento pode ocorrer devido a microfissuras na matriz causadas pela maior retração apresentada nestes concretos.

Para melhorar a interface matriz agregado de concretos com EPS, Laukaitis, Surauskas e Kerien (2005) usaram solução surfactante para hidrofilização. Neste processo, verificaram que para o EPS reciclado, a hidrossaturação é de 3,5 a 4 vezes maior que o EPS em pérolas. Ainda sobre a absorção do EPS, Bouchonneau *et al.* (2010) ensaiaram placas de EPS com dimensões 50 mm x 50 mm x 20 mm e observaram uma absorção de 160% após 12 semanas de ensaio em água destilada.

Sadr momtazi *et al.* (2012) produziram concreto em que substituíram parte dos agregados naturais por EPS, parte do cimento por sílica ativa e casca de arroz e adicionaram fibras de polipropileno residual e observaram que a absorção de água foi maior para maiores quantidades de EPS. Schackow *et al.* (2014) chegaram a conclusões semelhantes sobre a relação entre absorção de água e a quantidade de EPS, ao comparar concretos leves com vermiculita e EPS reciclado.

Chen, Liu e Chen (2010) verificaram que os concretos com EPS apresentaram absorções de água mais baixas do que os concretos de referência. Além disso, as amostras com maior volume de EPS apresentaram menor absorção de água no estágio inicial em comparação a amostras com menor volume de EPS para volume de substituição de até 60%. Quando o volume de substituição é igual ou maior que 60% a absorção é muito maior que das outras amostras. Ranjbar e Mousavi (2013) observaram que concretos com agregado de EPS apresentaram absorção de água mais baixa que a da maioria dos concretos com agregados leves, o que foi atribuído a natureza não absorvente do material.

Também foi observado um aumento na absorção de água com o incremento de EPS, a este efeito os autores indicaram duas possíveis causas, o fato de que o EPS pode ter sido afetado pela retração durante o processo de secagem e a característica hidrofóbica do material que teria provocado um maior volume de ar aprisionado, resultando num maior volume de vazios permeáveis.

Carvalho (2017) pontuou que o incremento de EPS ao concreto provocou um aumento na absorção de água por imersão e no índice de vazios, isto vale para EPS em pérola e triturado. No entanto, por meio dos resultados relacionados à absorção por capilaridade observou uma tendência do EPS, principalmente em teores maiores, provocar uma diminuição da absorção capilar. Quanto ao tipo de EPS, o concreto de EPS triturado apresentou absorção capilar maior que o concreto com pérolas de EPS.

Com relação a permeabilidade ao ar de concretos com EPS foi observado que o aumento no teor de EPS no traço do concreto provoca um aumento desta propriedade (BABU e BABU, 2004; RANJBAR e MOUSAVI, 2013).

No que diz respeito as propriedades térmicas Bouvard *et al.* (2007) propuseram uma modelagem para prever as propriedades do concretos com EPS em comparação ao concreto celular autoclavado – CCA e afirmaram que para o concreto com EPS atingir valores menores que 0,15 W/mK (condutividade térmica do CCA), sua densidade relativa deverá ser menor que 0,25. A condutividade térmica em concretos leves com EPS depende da densidade do concreto e do volume de EPS utilizado como agregado. Baixas densidades e grandes volumes de partículas de EPS causam reduções substanciais na condutividade térmica dos concretos (DEMIRBOGA e KAN, 2012; SHACKOW *et al.* 2014; SAYADI *et al.* 2016; XU *et al.* 2016). Carvalho (2017) analisou as propriedades térmicas dos concretos com EPS em pérolas e reciclado e verificou que a incorporação do EPS nos concretos resultou em maior atraso térmico, considerando uma espessura de 5 cm.

2.5.2 Borracha de pneu

As borrachas que são utilizadas na fabricação de pneus são compostas por polímeros elastoméricos. Estas borrachas são obtidas a partir de uma mistura monofásica de

elastômeros naturais como o homopolímero de isopreno, conhecido também como látex, e elastômeros sintéticos como é o caso do copolímero aleatório de estireno e butadieno ou homopolímero de butadieno. A esta mistura é incorporado o negro de fumo que posteriormente é submetida ao processo conhecido como vulcanização, a fim de adquirir as propriedades de resistência e rigidez requeridas para aplicação em pneumáticos (ALBUQUERQUE, 2009).

Ao longo dos anos milhões de pneus foram produzidos, utilizados e descartados, sendo considerado um dos resíduos de mais difícil decomposição pela natureza. Sendo assim, a primeira alternativa para destinação do pneu usado é a recauchutagem, em que ocorre uma raspagem e substituição da banda de rodagem do pneu, mas quando isto não é possível recomenda-se a remoldagem, que é a substituição da banda de rodagem, ombros e toda a superfície dos flancos do pneu (CONAMA, 2009). Segundo Ribeiro (2005), se as condições do pneu usado não permitirem processos como a recauchutagem e remoldagem, ele passa a ser considerado inservível.

Na construção civil, existe uma variedade de alternativas para utilização de pneus e fragmentos destes, o que representa um importante esforço para a resolução do problema ambiental e de saúde pública ligados ao descarte de pneus inservíveis e dos resíduos de pneu gerados pela raspagem mecânica no processo de recauchutagem. Segundo Akasaki *et al.* (2001), o uso de partículas de borracha de pneu no concreto contribui para que este resíduo possa ser tratado como um material alternativo a ser empregado com sucesso na construção civil.

De acordo com Santos (2004), o resíduo de recauchutagem apresenta uma forma fibrilar numa relação comprimento/diâmetro médio de 8 a 10, indicando uma fibra curta, e por isso pode ser adicionada ao concreto. Albuquerque (2009) verificou que o aproveitamento de partículas de pneus inservíveis no concreto pode melhorar propriedades como a tenacidade e isolamento térmico e acústico.

A avaliação de concretos com adição de borracha no estado fresco indicou que a incorporação do resíduo altera a trabalhabilidade provocando uma redução na fluidez com

o aumento do teor e do tamanho das partículas de borracha de pneu. Outro fator que afeta a trabalhabilidade dos concretos é o teor de ar aprisionado, foi observado que quanto menor for a partícula e maior for a quantidade de borracha de pneu utilizada maior teor de ar aprisionado (ALBUQUERQUE *et al.*, 2004; ALBANO *et al.*, 2005; SUKONTASUKKUL e CHAIKAEW, 2006).

Segundo Albuquerque (2009) para que não haja um prejuízo considerável das propriedades mecânicas o teor ideal de partículas de borracha, em substituição parcial do volume de areia, é de 10%. Pelisser *et al.* (2011) produziram concretos com substituição de 10% de areia por borracha de pneu reciclado e verificaram uma redução do módulo de elasticidade e da resistência à compressão, embora os valores da resistência tenham sido de 25 a 50 MPa. Silveira *et al.* (2016) também observaram redução nos valores da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em comparação ao concreto convencional. Resultados semelhantes foram encontrados por Cardoso e Cabral (2017), Medina *et al.* (2017), Eiras *et al.* (2014), Granzotto e Souza (2013), em que o incremento de borracha de pneu provocou uma redução da resistência à compressão.

Tem sido observado que o principal problema da combinação da borracha de pneu com a matriz do concreto está relacionado a fraca aderência entre os materiais e a formação de uma zona de transição fraca, afetando a resistência do compósito, tendência que tende a se agravar com o aumento da quantidade de borracha incorporada (ALBUQUERQUE, 2009).

Embora a tendência de redução da resistência mecânica tenha sido confirmada, Thomas e Gupta (2015) chegaram a concretos com resistência de 30 MPa. Para concretos com cimento de alta resistência e com até 10% de borracha, Thomas e Gupta (2016) encontraram resistência acima de 60 MPa. Nos testes de flexão, os concretos de controle apresentaram ruptura frágil e se dividiram em duas partes imediatamente após a fissuração; as amostras contendo borracha apresentaram deformação sem desintegração completa.

Concretos com adição de borracha de pneu com granulometria similar a da areia foram avaliados por Cardoso e Cabral (2017), a resistência à compressão diminuiu com o aumento no teor de borracha de pneu. Em imagens obtidas com microscópio eletrônico de varredura foi observado que não há uma homogeneização total entre os elementos da matriz com a borracha de pneu o que influencia na redução das propriedades mecânicas do material. Foi observado também que nos corpos de provas com adição de borracha de pneu há a presença de espaços vazios o que provoca diminuição da resistência à compressão.

No que se refere as propriedades hídricas de concretos com incorporação de borracha de pneu Eiras *et al.* (2014) não notaram mudanças significativas na absorção de água com o aumento do teor de resíduo de borracha. No entanto, em amostras em que foi utilizado agente incorporador de ar observaram que a absorção de água aumentou com o incremento do teor de borracha. Thomas e Gupta (2015) observaram uma tendência decrescente para absorção de água em misturas contendo até 7,5% de borracha de pneus descartados, porém, além de 7,5% de borracha houve um incremento na absorção de água do concreto. Para concretos com borracha utilizando cimento de alta resistência Thomas e Gupta (2016) verificaram que houve uma redução na absorção de água para misturas com até 12,5% de borracha, a partir deste teor de substituição foi observado um aumento gradual. A profundidade de penetração de água aumentou para maiores quantidades de borracha, 4 mm para o traço sem substituição e 13 mm para o traço com 20% de borracha de pneu. Queiroz (2018) observou resultados semelhantes, ao produzir concreto com substituição parcial de 10% do agregado miúdo e verificou-se uma tendência ao aumento dos valores de absorção por imersão e redução dos valores da absorção por capilaridade.

Em relação as propriedades térmicas, Albuquerque (2009) observou que o concreto com 10% de partículas de borracha apresenta valores equivalentes para coeficiente de expansão térmica e calor específico, enquanto os valores encontrados para condutividade térmica e difusividade são menores. Eiras *et al.* (2014) também verificaram que a condutividade térmica diminuiu com o aumento da incorporação de borracha. Esta tendência foi confirmada nas verificações de Medina *et al.* (2017). Queiroz (2018) realizou testes térmicos em concretos com incorporação de borracha de duas

granulometrias diferentes e verificou que o concreto com borracha de granulometria maior apresentou maior atraso térmico.

2.6 SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE PAREDES DE CONCRETO

A ABNT NBR 16055: 2012 traz a definição destas paredes como “elemento estrutural autoportante moldado no local, com comprimento maior que dez vezes sua espessura e capaz de suportar carga no mesmo plano da parede”. Ainda segundo a norma a espessura da parede deve ser igual ou maior que 10 cm para altura de até 3 m, salvo situações especificadas no item 13.1 em que é permitida espessura mínima de 8cm apenas para paredes internas de edificações de até dois pavimentos e, as paredes com alturas maiores, devem obedecer a relação comprimento equivalente/30. As paredes podem estar submetidas a cargas axial, com ou sem flexão e devem ser concretadas com todos os elementos que farão parte da construção final. Sendo assim, todas as paredes do trecho, contendo tubulações, eletrodutos e vãos das portas e janelas, são concretadas de uma só vez.

As paredes de concreto, além da função de vedação, também suportam a carga estrutural da edificação, por essa razão, são construídas com armadura de ligação e armadura para resistir aos esforços, de forma monolítica. Magalhães (2016) ressalta que os requisitos referentes à qualidade e durabilidade da estrutura devem ser os mesmos que para outras estruturas de concreto armado, seguindo, portanto, as recomendações da ABNT NBR 6118:2014.

A ABNT NBR 6118:2014 apresenta a resistência mínima de 20 MPa para concretos estruturais, a ABNT NBR 16055:2012 não traz especificações para o concreto, a não ser a de que deve ter f_{ck} menor ou igual a 40 MPa. Para Sacht (2008) as características do concreto empregado nas paredes de concreto, em especial a trabalhabilidade é fundamental na execução e no desempenho do sistema construtivo. Para Misurelli e Massuda (2009), é recomendável que o concreto seja auto-adensável.

A aplicação das paredes monolíticas de concreto moldadas no local gera um custo inicial elevado, porém o investimento é compensado quando as vantagens são analisadas

(OLIVEIRA *et al.*, 2016). Diante disso, o sistema é recomendado para empreendimentos que necessitam de uma produção seriada em grande escala. Por essa razão, o método construtivo está cada vez mais presente na construção civil, e vem sendo utilizado principalmente em conjuntos habitacionais e em obras onde se deseja reduzir o prazo de execução (MAGALHÃES, 2016).

Sacht (2008) desenvolveu uma pesquisa com concretos destinados a painéis monolíticos moldados *in loco*, analisou requisitos técnicos de trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade e a influência das características dos painéis no conforto térmico das habitações. Por meio de simulações computacionais, utilizando o *software* ARQUITROP 3.0, avaliou painéis de espessuras (8, 10 e 12 cm), e massas específicas dos concretos (1600, 1800, 2000, 2200 e 2400 kg/m³) utilizando como parâmetro a norma ABNT NBR 15575, foi utilizada como referência a primeira versão da norma publicada em 2008. A autora concluiu que dentre as tipologias analisadas, o uso de painéis de massa específica 2400 kg/m³ e espessura de 12 cm apresentou um melhor desempenho térmico. Além disso, observou que o aumento da massa específica dos concretos influenciou pouco os resultados e que característica determinante é a espessura.

Oliveira *et al.* (2014) estudaram o desempenho térmico da envoltória de habitação multifamiliar, estruturado em paredes de concreto moldada *in loco* com 10 cm, para as oito Zonas Bioclimáticas brasileiras, foram considerados os requisitos das normas ABNT NBR 15220:2005 e ABNT NBR15.575:2013, o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) e Selo Casa Azul. Foi verificado que os valores limites indicados são distintos em cada norma o que evidencia falta de uniformização na legislação brasileira. Além disso, todas as prescrições apontaram a necessidade de isolamento térmico para um melhor desempenho do sistema construtivo de paredes de concreto.

Almeida, Silvoso e Brasileiro (2018) fizeram uma análise do desempenho termo-energético de uma HIS multifamiliar de quatro pavimentos do PMCMV para a cidade do Rio de Janeiro, foram avaliados diferentes materiais opacos na composição do sistema de vedações verticais. Simulações e avaliações foram realizadas segundo método proposto

pelo RTQ-R. Para o estudo, as Orientações 2 e 4 eram críticas, pois, as maiores superfícies da edificação estavam voltadas para Leste e Oeste, recebendo maior carga térmica. Os autores observaram que o sistema construtivo de paredes maciças de concreto, foi o que apresentou os piores resultados para a edificação analisada, obtiveram classificação média “D” em todos os pavimentos da Orientação 2 e para a Orientação 4, classificação “D” nos três primeiros pavimentos e classificação “E” no último pavimento.

Afonso, Brito e Akutsu (2018) analisaram a ocorrência de bolores em edificações com paredes de concreto para a cidade de Campinas/SP. De acordo com os autores, o crescente uso de paredes de concreto evidenciou a presença de patologias possivelmente associadas a este sistema, dentre elas, a ocorrência de bolores nas habitações. Foram realizadas simulações computacionais, utilizando o *software* WUFI-Plus®, para obtenção das condições higrotérmicas sobre as superfícies da parede; para prever a ocorrência de bolores nas edificações foi utilizado o *software* WUFI-BIO®. Foram avaliados apartamentos térreos, em contato com o solo, para paredes de concreto maciças com 10 cm de espessura e paredes de tijolos cerâmicos maciços têm 23 cm, sendo 19 cm do tijolo e 2 cm de argamassa em ambas as faces. Para as condições analisadas, os autores concluíram que sistema construtivo com paredes de concreto apresentou maior potencial para desenvolvimento de bolores, em comparação às paredes de tijolos cerâmicos maciços.

Oliveira e Alves (2019) avaliaram o desempenho térmico de uma HIS unifamiliar construída com paredes de concreto moldado *in loco* na cidade de Uberlândia/MG, foi utilizado o *software* Energy Plus para simulação de um projeto real aprovado após a publicação da ABNT NBR 15575:2013 durante as 8760 horas do ano. Foram feitos dois tipos de comparação: as temperaturas internas da edificação com as externas, e as internas com as temperaturas estabelecidas como dia típico, para o inverno e o verão. Para o verão, o desempenho mínimo somente foi atingido quando se utilizou o critério do dia típico e não seria atingido para o critério da comparação entre as temperaturas internas e externas. As autoras fazem uma crítica quanto aos critérios normativos para desempenho térmico, apresentaram que podem ser determinados diferentes níveis de desempenho para uma

mesma edificação a depender do critério escolhido, enquanto deveriam convergir para resultados similares.

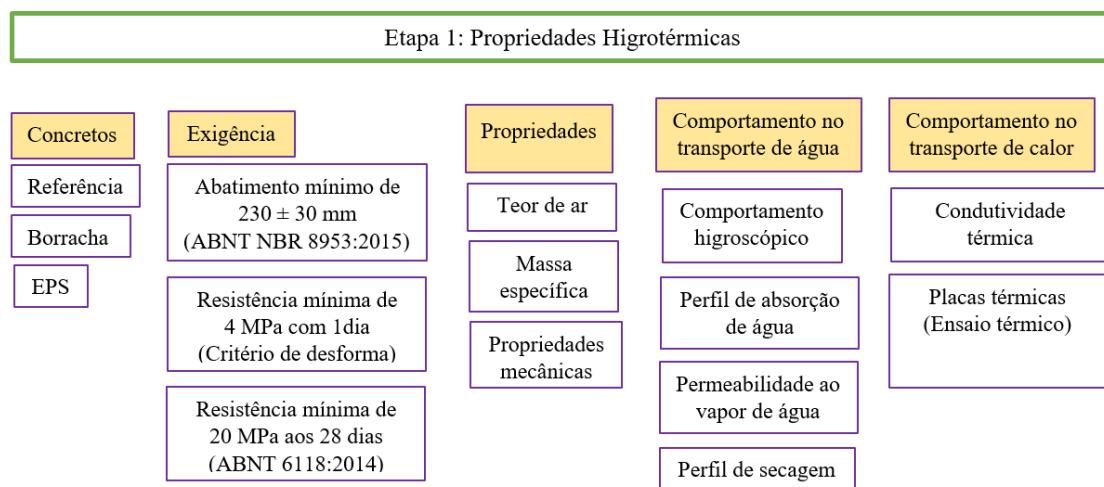
Sendo assim, embora o sistema construtivo de paredes de concreto tenha se popularizado e seja amplamente utilizado na construção de HIS, questões relacionadas ao desempenho precisam de maiores estudos, principalmente em relação ao conforto térmico e a durabilidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

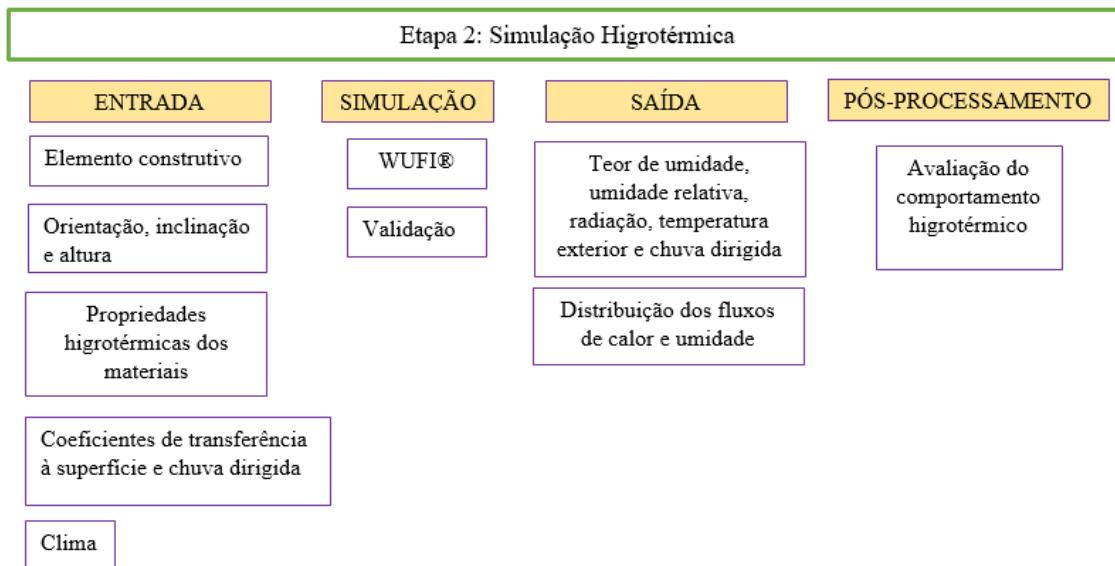
Em conformidade com os objetivos da pesquisa e no intuito de auxiliar a organização do programa experimental foram definidas duas etapas. A primeira etapa está relacionada a verificação da possibilidade de aplicação de concretos de agregados reciclados, de EPS e de borracha de pneu, em sistemas construtivos de paredes de concreto. Para tal, foi necessário verificar se as recomendações normativas relacionadas à trabalhabilidade e resistência são suficientes para este sistema construtivo. Além disto, nesta etapa também investigou-se as propriedades higrotérmicas destes concretos, em que foram fundamentais a definição de suas propriedades físicas, bem como a análise do comportamento no transporte de água e na transferência de calor. A segunda se etapa trata de uma simulação higrotérmica do sistema construtivo para condições climáticas da cidade de Uberlândia-MG. A síntese das etapas pode ser observada nas Figuras 15 e 16 e nas descrições dos itens 3.1.1 e 3.1.2.

Figura 15 - Esquema etapa 1 do programa experimental



Fonte: Autora (2019).

Figura 16 -Esquema etapa 2 do programa experimental



Fonte: Autora (2019).

3.1.1 Etapa 1: propriedades mecânicas higrotérmicas

Concretos: Foram definidos um concreto de referência com 0% de substituição do agregado natural, e quatro traços de concretos com substituição do agregado natural por de resíduos, dois com EPS reciclado triturado e dois com borracha de pneu. O resíduo de EPS substituindo o agregado graúdo com teores de 60% e 70% e o resíduo de borracha de pneu substituindo o agregado miúdo com teores de 12,5% e 15%, estes teores de substituição foram definidos com base nas pesquisas de Queiroz (2018) e Costa (2018).

Exigências: Os concretos foram produzidos buscando atender as recomendações normativas no que diz respeito a trabalhabilidade e a resistência mínima. A ABNT NBR 8953:2015 recomenda que, para paredes de concreto, a consistência seja mais fluida, com abatimento superior a 160 mm, enquanto a ABNT NBR 6118:2014 recomenda f_{ck} mínimo de 20 MPa para elementos estruturais de concreto aos 28 dias. Como resistência mínima de desforma adotou-se o valor de 4 MPa com 1 dia, comumente adotado como referência nos projetos na cidade de Uberlândia.

Propriedades: avaliação das propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido. No estado fresco foram avaliadas a consistência e a massa específica. No estado

endurecido foram determinadas a massa específica, índice de vazios e as propriedades mecânicas de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral.

Comportamento no transporte de água: Avaliação do transporte da água na estrutura porosa do concreto em processos de dessorção em condições isotérmicas, definição de um perfil de absorção de água por capilaridade e por imersão; caracterização da permeabilidade ao vapor de água; e avaliação do índice de secagem do concreto.

Comportamento no transporte de calor: determinação da condutividade térmica, inércia térmica e atraso térmico.

3.1.2. Etapa 2: simulação higrotérmica

Entrada: os dados de entrada se relacionam às propriedades higrotérmicas dos materiais, as características do sistema construtivo empregado na edificação, as variáveis dependentes do clima interior e exterior e do período de simulação.

Simulação: simulação higrotérmica realizada por meio do *software* WUFI® (<https://wufi.de/en/software/wufi-pro/>).

Saída: dados sobre as distribuições dos fluxos de temperatura e calor, com variação horária por um período de três anos; o conteúdo de umidade, umidade relativa, distribuições de fluxos de umidade, também considerando variação horária.

Pós-processamento: Os dados obtidos pela simulação higrotérmica possibilitam avaliação das respostas do elemento construtivo em termos de temperatura e umidade. Avaliação comparativa dos dados obtidos com os requisitos de desempenho térmico, estanqueidade e durabilidade da norma de desempenho.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta seção são apresentadas as caracterizações dos materiais utilizados nessa pesquisa para a produção de concretos com borracha de pneu e de EPS reciclado triturado. Os materiais foram selecionados observando sua disponibilidade na região do Triângulo

Mineiro e a partir de informações obtidas na revisão bibliográfica em trabalhos anteriores em que foram empregados este tipo de resíduo (ALBUQUERQUE, 2009; PELISSER *et al.*, 2011; CATOIA, 2012; SAYADI *et al.*, 2016; XU *et al.* 2016; CARVALHO, 2017; CARDOSO e CABRAL, 2017)

3.2.1 Aglomerante: Cimento Portland

Como aglomerante foi utilizado o cimento do tipo Portland de alta resistência inicial, CP V ARI, este material é amplamente utilizado em paredes de concreto devido à necessidade de desforma rápida. O cimento em questão foi produzido pela fábrica CNC (Companhia Nacional de Cimento), localizada na região metropolitana de Belo Horizonte - MG. Os ensaios para a caracterização das propriedades físicas do cimento estão apresentados na Tabela 4 e consideram a determinação da massa específica, finura, tempos de início e fim de pega e resistência à compressão. A caracterização química do cimento foi fornecida pelo fabricante e está apresentada na Tabela 5.

Tabela 4 - Caracterização física do cimento Portland

CIMENTO			
Propriedades Físicas		CPV ARI RS	Limites
Massa específica (g/cm ³)		3,0393	-
Área específica (Blaine) (m ² /kg)		427,5055	≥ 300
Tempo de pega (min)	Início de pega (min)	222	≥ 60
	Fim de pega (min)	248	≤ 600
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	21,61	≥ 14
	3 dias	30,6	≥ 24
	7 dias	34,61	≥ 34

Fonte: Autora (2019).

Tabela 5 - Caracterização química do cimento Portland

CIMENTO - Ensaio Químicos				
Ensaios	Resultado (%)	Desv. Pad.	Limites	Metodologia
Resíduo Insolúvel - RI	1,77	0,42	-	ABNT NBR NM 15
Perda ao fogo - PF	2,61	0,53	≤ 6,5	ABNT NBR NM 18
Óxido de Magnésio - MgO	1,36	0,05	-	ABNT NBR 14656
Trióxido de Enxofre - SO ₃	3,04	0,19	≤ 4,5	ABNT NBR 14656
Óxido de Sódio - Na ₂ O	0,09	0,01	-	ABNT NBR 14656
Óxido de Potássio - K ₂ O	0,83	0,03	-	ABNT NBR 14656
Equivalente Alcalino	0,64	0,02	-	Na ₂ O + 0,658*K ₂ O

3.2.2 Agregado miúdo natural

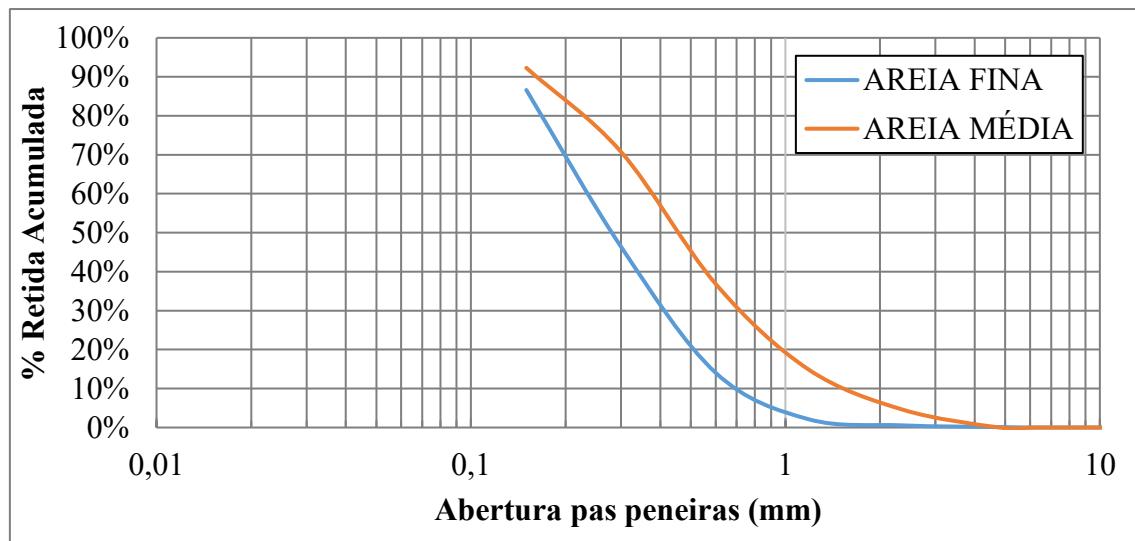
Em relação ao agregado miúdo foram selecionadas areias naturais, de granulometria média e fina, provenientes da região do Triângulo Mineiro em Minas Gerais. Na Tabela 6 estão relacionadas as propriedades dos agregados miúdos com as respectivas normas técnicas seguidas em sua determinação. A distribuição granulométrica das areias está apresentada na Figura 17, e foi obtida em conformidade com os procedimentos descritos na ABNT NBR NM 248:2003.

Tabela 6 - Caracterização do agregado miúdo utilizado

AGREGADO MIÚDO NATURAL			
Ensaios realizados	Resultados		Método de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	A. Fina	2,46	ABNT NBR NM 52:2009
	A. Média	2,53	
Dimensão máxima característica (mm)	A. Fina	1,18	ABNT NBR NM 248:2003
	A. Média	2,36	
Módulo de finura	A. Fina	1,50	ABNT NBR NM 248:2003
	A. Média	2,2	

Fonte: Autora (2019).

Figura 17 - Curva de distribuição granulométrica dos agregados miúdos naturais



Fonte: Autora (2019).

3.2.3 Agregado graúdo natural

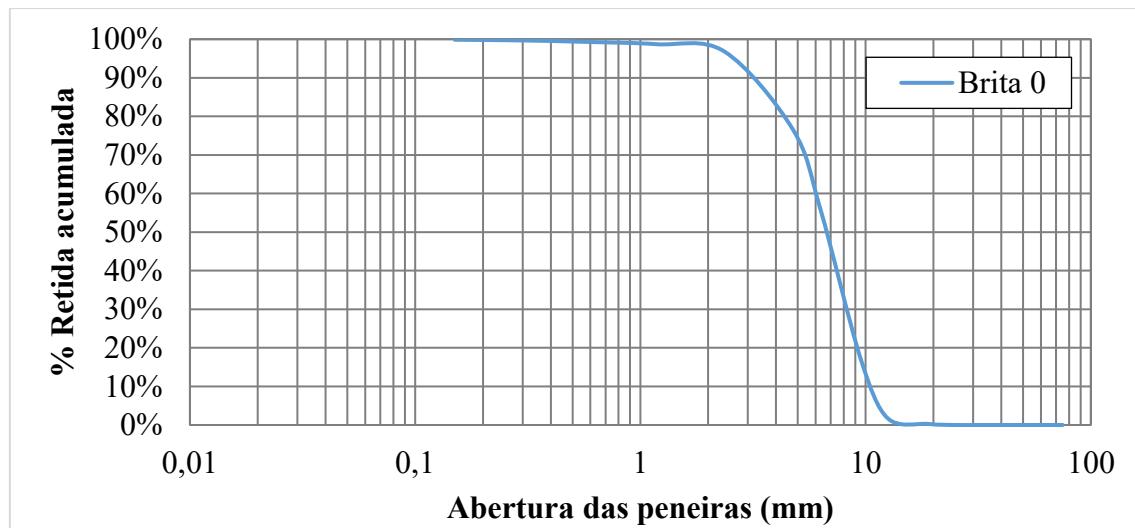
Como agregado graúdo foi utilizado agregado natural britado de origem basáltica, classificado comercialmente como brita 0, zona granulométrica de 4,8 a 12,5 mm. Na Tabela 7 há a relação das propriedades dos agregados graúdos e normas técnicas seguidas em sua determinação. A distribuição granulométrica do agregado graúdo natural está apresentada na Figura 18, e foi obtida de acordo com os procedimentos descritos na ABNT NBR NM 248:2003.

Tabela 7 - Caracterização do agregado miúdo utilizado

AGREGADO GRAÚDO NATURAL		
Ensaios Realizados	Resultados	Método de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,95	ANBT NBR NM 53
Absorção (%)	1,28	ANBT NBR NM 53
Dimensão máxima característica (mm)	12,5	ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de finura	5,88	ABNT NBR NM 248:2003

Fonte: Autora (2019).

Figura 18 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo natural



Fonte: Autora (2019).

3.2.4 Poliestireno Expandido (EPS) reciclado

O Poliestireno Expandido (EPS) selecionado foi do tipo reciclado. No processo de reciclagem as peças de EPS passam por um procedimento de Trituração mecânica que resulta em partículas de EPS de tamanho variado, conforme mostrado na Figura 19. O EPS utilizado nesta pesquisa foi recebido triturado.

Figura 19 - EPS reciclado triturado



Fonte: Autora (2019).

De acordo com a ABNT NBR 10004:2004, os resíduos de plásticos polimerizados – Código de Identificação A007 são classificados como não perigosos, desde que não contaminados por produtos considerados perigosos. Sendo assim, o EPS é enquadrado como resíduo classe II B – não perigosos e inertes, uma vez que, em presença de água destilada, à temperatura ambiente, mantém sua integridade e não solubiliza seus constituintes.

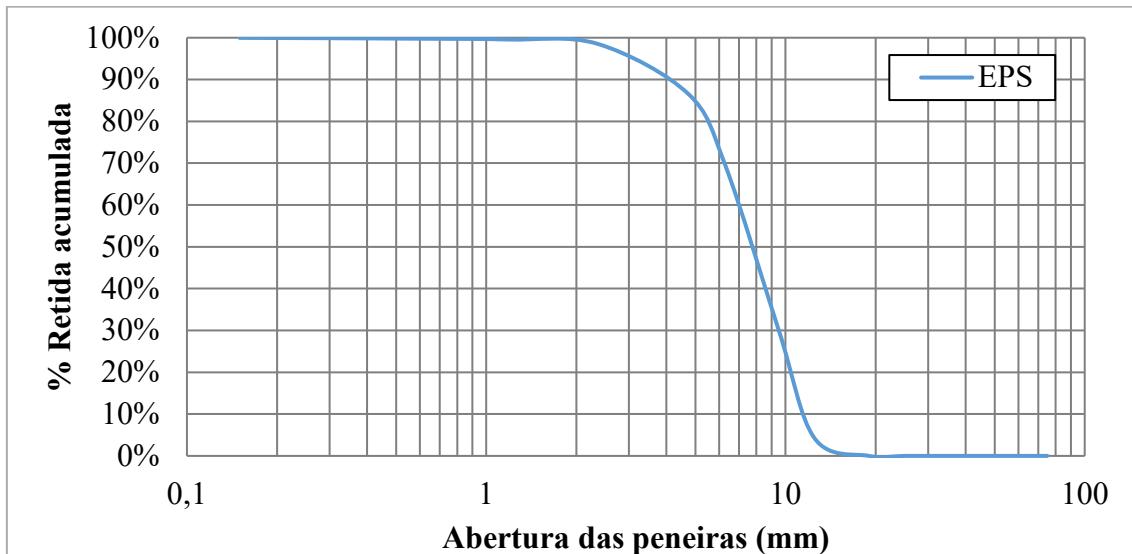
Foram realizados ensaios para obtenção da curva granulométrica e massa específica. A Tabela 8 mostra a relação entre as propriedades e o método utilizado na determinação das mesmas, na Figura 20 está apresentada a curva de distribuição granulométrica do EPS reciclado.

Tabela 8 - Propriedades do EPS triturado

AGREGADO RECICLADO – EPS		
Ensaios realizados	Resultados	Método de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	0,0135	Adaptado da ABNT NBR 9776:1987
Dimensão máxima característica (mm)	12,5	ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de finura	6,14	ABNT NBR NM 248:2003
Absorção (%)	300	Adaptado de Bouchonneau <i>et al.</i> (2010)

Fonte: Autora (2019).

Figura 20 - Curva de distribuição granulométrica do EPS reciclado triturado



Fonte: Autora (2019).

A absorção de água do EPS triturado foi determinada por meio de testes gravimétricos. As amostras foram imersas em água destilada por 96 horas a uma temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$, foram realizadas quatro repetições. A absorção total de água foi determinada com base em Bouchonneau *et al.* (2010), sendo a relação entre a massa de água absorvida e a massa inicial (seca ao ar) e expressa em porcentagem. O EPS triturado apresentou absorção média de 300% e um desvio padrão de 0,93.

3.2.5 Borracha de pneu

A borracha de pneu utilizada é proveniente da raspagem de pneus, uma etapa do processo de recauchutagem dos mesmos (Figura 21). Conforme a ABNT NBR 10004:2004 o rejeito da borracha é classificado como resíduo classe II - B, por não conter metais pesados, não sofrer lixiviação e não ser solúvel em água.

Foram realizados ensaios para determinação da distribuição granulométrica e massa específica. A Tabela 9 indica a relação entre propriedade e método utilizado para caracterização da borracha de pneu, na Figura 22 está apresentada sua curva de distribuição granulométrica.

Figura 21 - Borracha proveniente da raspagem de pneus



Fonte: Autora (2019).

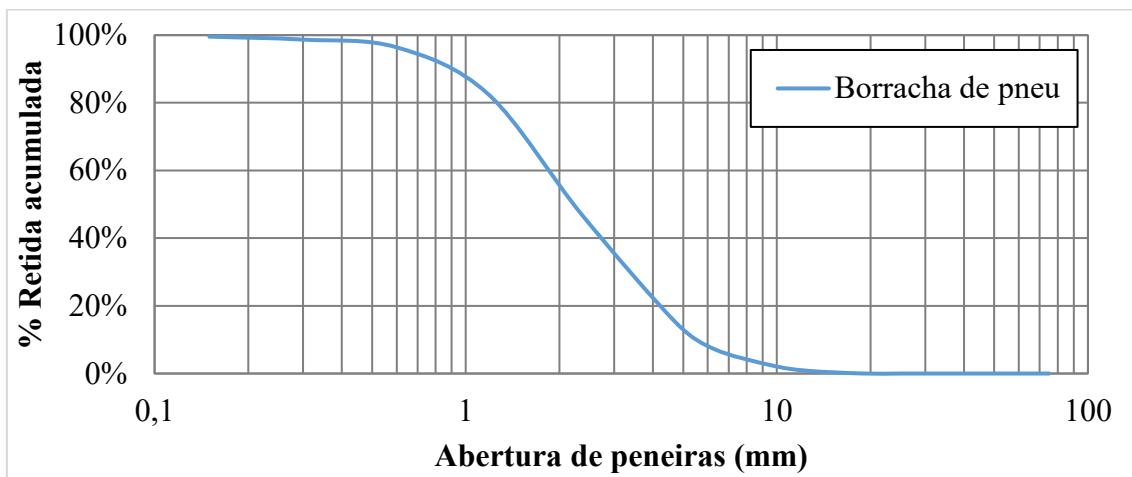
A absorção de água da borracha de pneu foi determinada por meio de testes gravimétricos. As amostras foram imersas em água destilada por 96 horas a uma temperatura de $20\pm3^{\circ}\text{C}$, foram realizadas quatro repetições. A absorção total de água foi determinada pela relação entre a massa de água absorvida e a massa inicial (seca ao ar) e expressa em porcentagem. A borracha de pneu apresentou absorção média de 0,1% e um desvio padrão de 0,04.

Tabela 9 - Ensaios para caracterização da borracha de pneu

AGREGADO RECICLADO - BORRACHA DE PNEU		
Ensaios realizados	Resultados	Método de ensaio
Massa específica (g/cm^3)	1,0504	Adaptado da ABNT NBR 9776:1987
Dimensão máxima característica (mm)	6,3	ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de finura	4,42	ABNT NBR NM 248:2003
Absorção (%)	0,1	Adaptado de Bouchonneau <i>et al.</i> (2010)

Fonte: Autora (2019).

Figura 22 - Curva de distribuição granulométrica da borracha de pneu



Fonte: Autora (2019).

3.2.6 Aditivo

Como aditivo será utilizado o superplastificante MasterGlenium 3500 da BASF, cujas características obtidas com o fabricante estão apresentadas na Tabela 10. De acordo com as instruções para uso presentes na Ficha técnica MasterGlenium 3000 – BASF (2019), a dosagem adequada é de 0,2% a 1,2% em relação ao peso do cimento. Para esta pesquisa a quantidade de aditivo foi ajustada durante a mistura para que fosse possível atingir o abatimento desejado.

Tabela 10 - Características do aditivo superplastificante

PROPRIEDADE	RESULTADO
Aspecto	Líquido
Base química	Éter policarboxilato
Consumo sobre massa de cimento (%)	0,20-1,00
Cor	Amarelado
Massa específica (g/cm ³)	1,10 – 1,14
Odor	Leve
pH	7 – 9

Fonte: Ficha técnica MasterGlenium 3000 – BASF (2019).

3.3 MÉTODO

Após a etapa de caracterização dos materiais, o passo seguinte foi a produção dos concretos, neste processo foram coletadas amostras imediatamente submetidas aos ensaios de caracterização no estado fresco. Posteriormente, foram moldados corpos de

prova que passaram por ensaios no estado endurecido. Nesta seção, os métodos de ensaios serão descritos.

3.3.1 Exigências

Na construção de paredes de concreto moldadas no local, há a necessidade de que a consistência do concreto seja fluida o suficiente para que este seja bombeado. Segundo a ABNT NBR 8953:2015, os concretos cuja aplicação típica seja elementos estruturais com lançamento bombeado deverão ter classificação de consistência de classe S160, ou seja, com abatimento superior a 160 mm.

Nesse sentido, o traço para o concreto de referência, assim como os traços com substituição parcial, do agregado miúdo natural por borracha de pneu e do agregado graúdo natural por EPS, foram adotados com base em estudo de dosagem desenvolvido na FECIV-UFU e empregados em trabalhos experimentais anteriores como de Queiroz (2018), Costa (2018) que tomaram como referência um traço comercial de concreto utilizado na região. Considerando a aplicação em paredes de concreto, foi fixado para todos os traços o abatimento de 230 ± 30 mm e resistência mínima à compressão de 20 MPa aos 28 dias. Ademais, para trabalhabilidade adequada utilizou-se aditivo superplasticificante e a relação água cimento (a/c) de 0,54 a Tabela 11 apresenta o consumo dos materiais dos concretos. A nomenclatura adotada para cada tipo de concreto é a seguinte:

- REF: concreto referência com 100% de areia natural e 100% de brita 0;
- CB1: concreto com substituição de 12,5% do volume de areia média por borracha de pneu;
- CB2: concreto com substituição de 15% do volume de areia média por borracha de pneu;
- CEPS1: Concreto com substituição de 60% do volume de brita 0 por EPS reciclado triturado;
- CEPS2: Concreto com substituição de 70% do volume de brita 0 por EPS reciclado triturado.

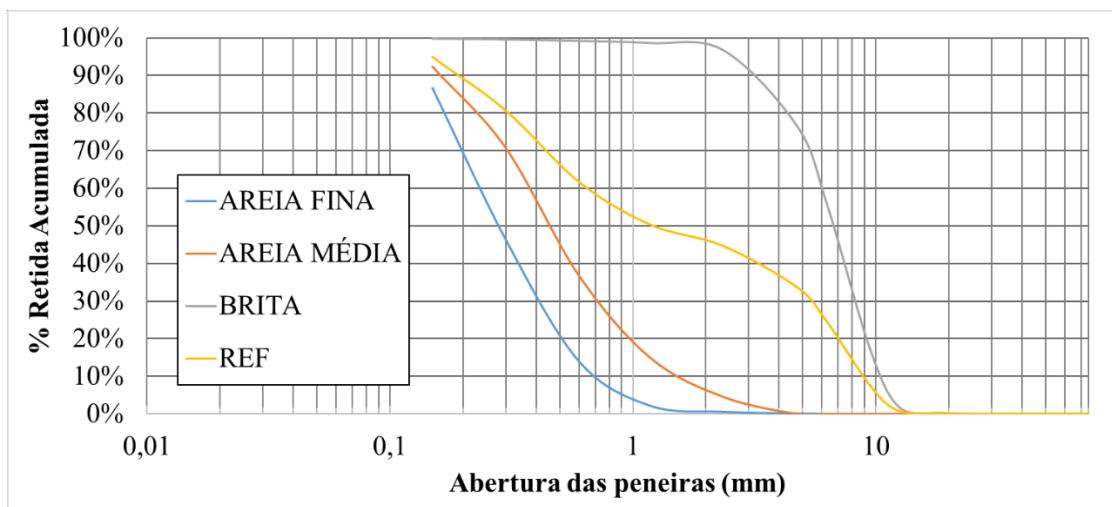
Tabela 11 - Consumo de materiais para produção de 1 m³ dos concretos

Tipo de Resíduo	Traço	Cimento (kg)	Areia Fina (kg)	Areia média (kg)	Brita 0 (kg)	Resíduo (kg)	Água (kg)
-	REF	384,60	199,99	799,97	769,20	0,00	207,60
BORRACHA DE PNEU	CB1	384,60	199,99	699,97	769,20	43,86	207,60
	CB2	384,60	199,99	679,97	769,20	52,64	207,60
EPS RECICLADO	CEPS1	384,60	199,99	799,97	307,68	1,93	207,60
	CEPS 2	384,60	199,99	799,97	230,76	2,25	207,60

Fonte: Autora (2019).

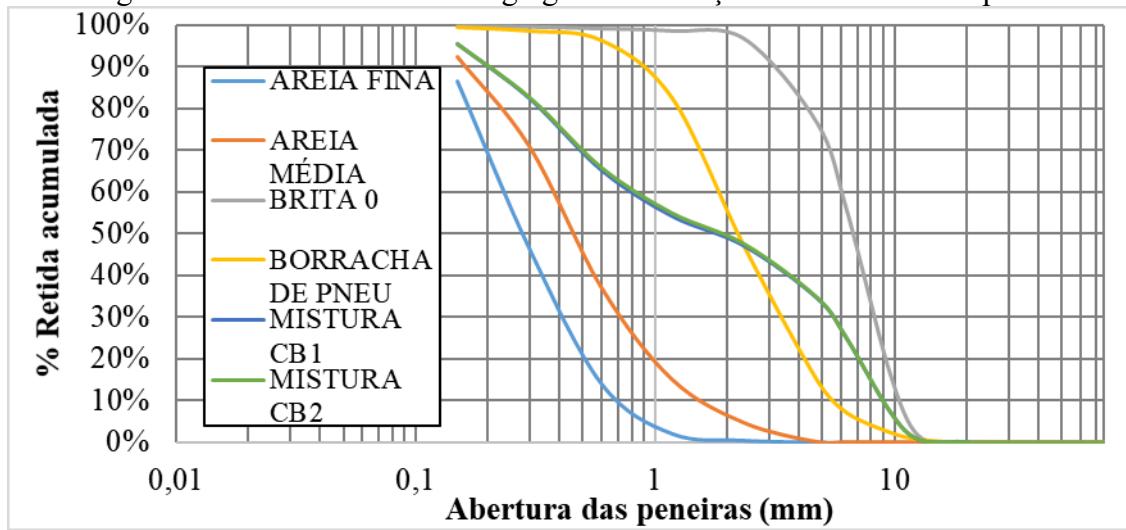
A Figuras 23, 24 e 25 apresentam as curvas de distribuição granulométrica, incluindo a curva granulométrica da mistura dos agregados, para os traços de referência, com substituição do agregado miúdo natural por borracha e com substituição do agregado graúdo natural por EPS triturado, respectivamente.

Figura 23 - Granulometria dos agregados do traço de referência



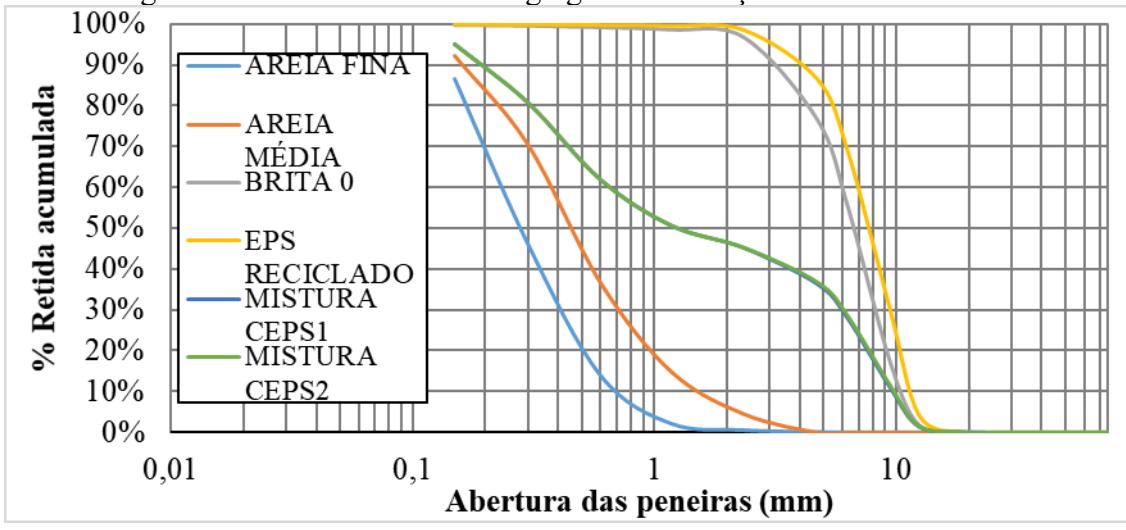
Fonte: Autora (2019).

Figura 24 - Granulometria dos agregados dos traços com borracha de pneu.



Fonte: Autora (2019).

Figura 25 - Granulometria dos agregados dos traços com EPS triturado.



Fonte: Autora (2019).

Como se trata de substituição por volume real, a massa foi calculada com base nas massas específicas dos agregados, na Tabela 12 estão relacionados os valores teóricos para massa específica da mistura de agregados para cada um dos traços, calculados a partir da massa específica seca dos agregados determinadas na caracterização.

Antes da etapa de produção do concreto os materiais foram pesados, separados, e a betoneira imprimada com o traço 1:2:3 (cimento: areia média: brita 1). O tempo de mistura e a ordem de inserção dos materiais na betoneira foram definidos levando em consideração a necessidade de uma boa dispersão dos materiais e permitindo a completa ação do aditivo.

Tabela 12 - Massa específica teórica para mistura de agregados por traço de concreto

Tipo	Massa específica da mistura de agregados (g/cm³)
REF	2,6876
CB1	2,5987
CB2	2,5810
CEPS1	1,9656
CEPS2	1,8730

Fonte: Autora (2019).

Na Tabela 13 é apresentada a sequência da inserção dos materiais, observa-se que o método de mistura para os traços com EPS triturado segue ordem diferente. Devido massa específica reduzida do EPS optou-se por um processo de mistura que evitasse perda do material. O tempo de mistura foi de 5 minutos, na sequência foi realizado o ensaio de consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone conforme descrição do item 3.3.2.1, nos casos em que a consistência não atingiu o valor especificado houve incremento de aditivo e mais dois minutos de mistura.

Tabela 13 - Método de mistura por tipo de traço

Referência	CB1 e CB2	CEPS1 e CEPS2
1. Brita	1. Brita	1. Brita
2. Metade da água e aditivo	2. Metade da água e aditivo	2. Cimento
3. Cimento	3. Cimento	3. EPS
4. Areia	4. Areia e borracha	4. Metade da areia
5. Metade da água e aditivo	5. Metade da água e aditivo	5. Metade da água e aditivo
		6. Metade da areia
		7. Metade da água e aditivo

Fonte: Autora (2019).

3.3.2 Ensaios no estado fresco

3.2.2.1. *Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone*
 Logo após a sua mistura, os concretos foram submetidos ao ensaio de consistência pelo abatimento do troco de cone, de acordo com a ABNT NBR NM 67:1998, para verificar se abatimento estava de acordo com as exigências apresentadas anteriormente no item 3.3.1: abatimento de 230 ± 30 mm.

3.2.2.2. *Determinação da massa específica e teor de ar do concreto fresco*

A massa específica e o teor de ar foram determinados pelo método gravimétrico realizado conforme a norma ABNT NBR 9833:2008. O método consiste na determinação da massa específica do concreto pela relação entre sua massa e seu volume pós adensamento, considerando neste volume o ar retido ou propositalmente incorporado. O teor de ar é obtido pela diferença entre o volume real de concreto, considerando o ar, e o volume real teórico, calculado com base nas massas específicas dos componentes, tendo desconsiderado o ar. Este teor é expresso em porcentagem do volume total.

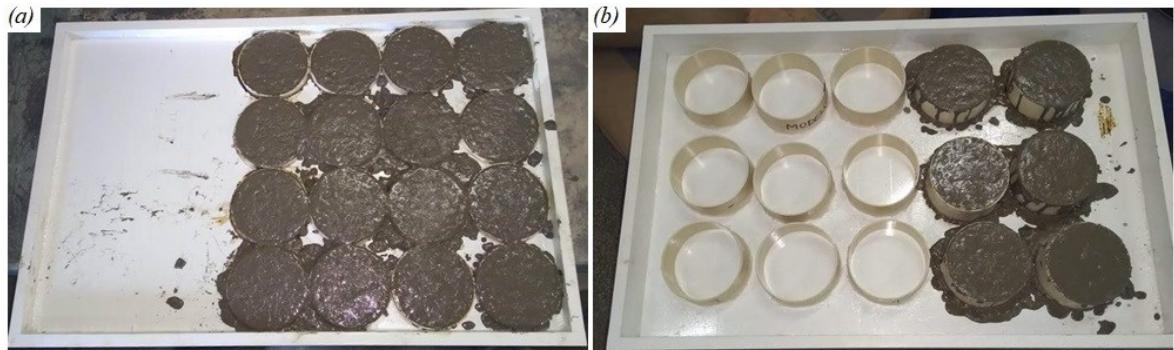
3.3.3 Ensaios no estado endurecido

3.3.3.1. *Moldagem e cura dos corpos de prova*

As misturas de concreto foram moldadas em corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura em conformidade com a ABNT NBR 5738:2015. Como o abatimento dos concretos foi superior a 160 mm a forma cilíndrica foi preenchida em uma camada única adensada por 12 golpes aplicados com haste metálica. Estes corpos de prova foram moldados para realização dos seguintes ensaios: resistência à compressão; resistência à tração por compressão diametral; massa específica; índice de vazios; absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade.

Para os ensaios de permeabilidade ao vapor de água e secagem foram moldadas amostras cilíndricas com 10 cm de diâmetro e alturas de 1 cm e 4 cm, respectivamente (Figura 26).

Figura 26 – Moldagem dos corpos de prova de permeabilidade ao vapor (a) e secagem (b)



Fonte: Autora (2019).

Os corpos de prova para as isoterma de dessorção foram obtidos a partir de corte realizado em amostras cilíndricas de 10 cm de diâmetro e altura de 1 cm, conforme ilustrado na Figura 27

Figura 27 - Corpos de prova para ensaio de dessorção



Fonte: Autora (2019).

Para avaliação das propriedades térmicas foram moldadas placas de concreto com dimensões (30 cm x 30 cm), com 10 cm de espessura (Figura 28). As placas foram moldadas em formas de madeira e adensadas em mesa vibratória, conforme descrito em Carvalho (2017).

Figura 28 - Moldagem de placa de concreto



Fonte: Autora (2019)

Para determinação da condutividade térmica as amostras com dimensões de 50 mm de diâmetro e 25 mm de altura foram extraídas das placas de concreto e posteriormente cortadas para atingir estas dimensões, utilizou-se amostras da parte central do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 29.

Depois de moldados, os corpos de prova cilíndricos e as placas foram submetidos a câmara úmida durante um período aproximado de 24 horas. Posteriormente, foram desmoldados e submersos em água saturada com cal até a idade de 28 dias, com exceção dos corpos de prova submetidos a ensaio de compressão com 1 dia. Na Tabela 14 estão apresentadas as quantidades e dimensões dos corpos de prova necessários para cada ensaio.

Figura 29 - Extração de corpo de prova da placa (a), corpos de prova por traço (b), marcação para corte (c) e amostras utilizadas em ensaio de condutividade térmica (d)



Fonte: Autora (2019)

Tabela 14 – Relação de quantidade e dimensões de corpos de prova para programa experimental

Ensaio	Quantidade de corpos de prova (por traço)	Dimensões dos corpos de prova
Resistência à compressão (concreto com 1dia e 28 dias de idade)	8	100 mm x 200 mm – cilíndrico
Resistência à tração por compressão diametral (concreto com 28 dias de idade)	4	100 mm x 200 mm – cilíndrico
Massa específica / Índice de vazios / Absorção por imersão (Início: concreto com 28 dias de idade)	3	100 mm x 200 mm – cilíndrico
Absorção por capilaridade (Início: concreto 28dias de idade)	3	100 mm x 200 mm – cilíndrico
Isotermas de dessorção (Início: concreto com idade entre 39 e 49 dias)	15	~20 mm x 20 mm x 10 mm
Permeabilidade ao vapor de água (Início do ensaio: concreto 28 dias de idade)	3	100 mm x 10mm - cilíndrico
Secagem (Início do ensaio: concreto com 28 dias de idade)	4	100 mm x 40 mm - cilíndrico
Placas térmicas (Início do ensaio: concreto com idade entre 145 e 154 dias)	2	300 mm x 300 mm x 5 mm - placa
Condutividade térmica (concreto com idade entre 154 e 163 dias)	3	50 mm x 25 mm - cilíndrico

Fonte: Autora (2019).

3.3.3.2. Resistência à compressão

O ensaio de compressão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 5739: 2018. O rompimento ocorreu nas idades de 1dia e 28 dias, sendo quatro corpos de prova para cada traço de concreto analisado, em cada idade. Antes da execução do ensaio as faces transversais dos corpos de prova passaram por regularização com retífica. O ensaio foi realizado em máquina universal de ensaios, marca Instron modelo UTM-

HYD NS 1000DXU1182. O carregamento do ensaio foi aplicado continuamente e sem choques com uma velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s.

3.3.3.3. *Resistência à tração por compressão diametral*

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral os corpos de prova foram rompidos aos 28 dias, sendo quatro corpos de prova para cada traço de concreto. O ensaio foi realizado em máquina universal de ensaios, marca Instron modelo UTM-HYD NS 1000DXU1182, com velocidade de carregamento de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s conforme as recomendações da ABNT NBR 7222:2011.

3.3.3.4. *Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica*

Em acordo com as especificações da ABNT NBR 9778:2005, para determinação da absorção, do índice de vazios, da massa específica seca, da massa específica saturada e da massa específica real, foram ensaiados, aos 28 dias, três corpos de provas para cada traço de concreto, moldados e curados como apresentado em 3.3.3.1.

As amostras foram submetidas à fervura durante 5 horas; posteriormente, quando a temperatura retornou a $23 \pm 2^\circ\text{C}$, registrou-se as massas imersas dos corpos de prova por meio de balança hidrostática (m_{imersa}) e, também, a massa saturada de superfície seca (m_{sat}). Após estes procedimentos foram levadas à estufa com temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até atingirem constância de massa para que fosse possível determinar a massa seca (m_{seca}). Então, de posse destes dados, foram realizados os cálculos indicados pela ABNT NBR 9778:2005.

3.3.3.5. *Absorção por capilaridade*

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado em três corpos de prova para cada traço de concreto, aos 28 dias, moldados e curados conforme 3.3.3.1. O procedimento foi uma adaptação da ABNT NBR 9779:2012.

As laterais das amostras foram pintadas com tinta epóxi a base de água, fazendo com que o fluxo de água absorvida por capilaridade ocorresse de forma unidirecional. Após a estabilização de massa em condição natural, os corpos de prova foram secos em estufa, a

uma temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$, até atingirem a constância de massa. Então, foram resfriados até a temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e pesados.

Posteriormente, os corpos de prova foram dispostos sobre suporte em um recipiente preenchido com água até a altura de 5 ± 1 mm, o nível de água foi mantido constante durante todo o ensaio. A aferição de massa ocorreu em intervalos de tempo de 1h nas seis primeiras horas e, em seguida, às 12h, 24 h, 48 h e 72 h de ensaio. A massa de água absorvida por capilaridade ao longo do tempo é a diferença entre as massas medidas ao longo do tempo e a massa seca em estufa.

Após a última aferição de massa, os corpos-de-prova foram rompidos por compressão diametral, com a finalidade de mensurar a altura da ascensão capilar com auxílio de um paquímetro digital. A absorção de água por capilaridade é expressa em g/cm^2 e calculada dividindo o aumento de massa pela área da seção transversal da superfície do corpo-de-prova em contato com a água e o coeficiente de capilaridade é calculado a partir do coeficiente angular da reta formada pela relação da absorção de água por capilaridade e a raiz quadrada do tempo.

3.3.3.6. *Isotermas de dessorção*

As isotermas são curvas higroscópicas que, para uma temperatura constante, fornecem o teor de água do material em função da umidade relativa do ar. O método de ensaio para a obtenção das isotermas de dessorção foi baseado em ASTM C1498:2005 e ISSO 12571:2000, em que as amostras foram armazenadas em recipientes com umidades relativas variadas até atingirem o equilíbrio de massa. Foram ensaiadas três amostras para cada ponto das curvas e para cada teor de umidade, as dimensões das amostras foram definidas no item 3.3.3.1.

Com o intuito de criar as diferentes condições de umidade, necessárias para realização do ensaio, foram utilizadas soluções salinas na condição saturada (Tabela 15). Os recipientes utilizados no ensaio dispõem de dois níveis separados por uma superfície perfurada (Figura 30). No nível inferior dos recipientes foram preparadas e armazenadas as soluções salinas. Após estabilização da umidade criada pelas soluções salinas, as amostras

saturadas por imersão foram colocadas no nível superior dos recipientes. O ensaio foi conduzido em ambiente climatizado com umidade relativa de 50% e temperatura ambiente de 20°C. A quantidade de água dessorvida, para os diferentes valores de umidade relativa no estado de equilíbrio, foi obtida por meio do método gravimétrico.

Figura 30 - Recipientes utilizados no ensaio de isoterma de dessorção (a), termohigrômetro (b) e solução salina no nível inferior do recipiente superior (c)



Fonte: Autora (2019).

Tabela 15 - Soluções salinas e umidade relativa.

Soluções Salinas	Umidade relativa à 20°C
Cloreto de Cálcio	0%
Cloreto de Magnésio	33%
Brometo de Sódio	59%
Cloreto de Sódio	75%
Cloreto de Bário	91%

Fonte: Autora (2019).

O comportamento das isotermas de dessorção foi ajustado ao modelo matemático de GAB (Guggenheim, Anderson & De Boer), descrito por Santos (2006) (Equação 15).

$$W = \frac{UR}{A \times UR^2 + B \times UR + C} \quad (15)$$

Em que: UR é a umidade relativa (%) e W é o conteúdo mássico da fase adsorvida (%).

$$A = \frac{k' \times (1 - c')}{c' \times W_m} \quad (16)$$

$$B = \frac{1}{c' \times W_m} \quad (17)$$

$$C = \frac{k' \times (1 - c')}{c' \times W_m \times k'} \quad (18)$$

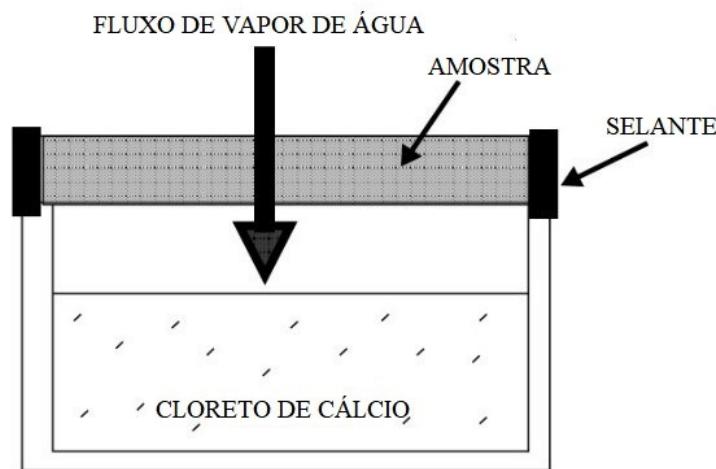
Os parâmetros A, B e C, são determinados por regressão quadrática a partir dos pontos experimentais, sendo que:

- W_m é o conteúdo mássico correspondente à formação de uma camada de moléculas, recobrindo toda a superfície sólida;
- c' é a constante relacionada com a diferença entre energia molar de ligação das moléculas da primeira camada à parede sólida e a energia latente de vaporização;
- k' é a constante relacionada com a diferença entre a energia latente de vaporização e energia de adsorção para todas as moléculas que não as da primeira camada.

3.3.3.7. Permeabilidade ao vapor de água

A avaliação da permeabilidade ao vapor de água se dá pela quantificação do vapor de água permeado através da espessura de um determinado corpo de prova. Nesta pesquisa foi utilizado o método conhecido como “tina seca”, em que o fluxo de vapor de água se dá do exterior para o interior da célula de medição (Figura 31), o procedimento de ensaio foi baseado nas normas ISO 12572:2001 e EN 1015-19:2000.

Figura 31 - Esquema de ensaio de permeabilidade



Fonte: adaptado de Páscoa (2012).

Para cada traço de concreto foram ensaiadas três amostras em formato de cilíndrico com espessura de 1 cm, produzidas de acordo com item 3.3.3.1. As laterais das amostras foram pintadas com tinta epóxi a base de água, para impor que o fluxo de vapor fosse unidirecional e secas em estufa a 90°C por 24h. Posteriormente, foram encaixadas e seladas nos moldes de ensaio, conforme Figura 32. De acordo com a ISO 12572:2001, os moldes devem estar preenchidos com um sal capaz de induzir a umidade relativa a valores próximo a 0%. Portanto, foi utilizado o dessecante cloreto de cálcio anidro.

Figura 32 - Preparação de ensaio de permeabilidade ao vapor



Fonte: Autora (2019).

O ensaio foi realizado em caixas seladas dispostas em ambiente de temperatura controlada e com umidade relativa de 70% alcançada com solução salina de cloreto de cálcio, a Figura 33 ilustra as etapas de montagem do ensaio. A aferição da variação de massa dos corpos de prova foi realizada por meio de balança analítica adaptada com gancho de

pesagem, para que pudesse ser realizada sem que as amostras fossem retiradas do ambiente controlado.

As medidas foram realizadas até o momento em que a quantidade do vapor de água passando pelo corpo de prova de concreto fosse constante, a Figura 33 ilustra as etapas de montagem do ensaio. De posse dos dados do ensaio foi possível calcular a permeabilidade ao vapor de água (δ) em $\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$, a espessura de ar equivalente (S_d) em metros, e o fator de resistência à difusão do vapor de água (μ) (ISO 12572:2001).

Figura 33 - Montagem de ensaio de permeabilidade ao vapor de água



Fonte: Autora (2019).

3.3.3.8. Secagem

O ensaio de secagem foi uma adaptação da norma europeia EN 16322:2013 que consiste na determinação do comportamento de secagem de materiais inorgânicos porosos saturados com água e submetidos a secagem controlada. Foram ensaiadas quatro amostras cilíndricas, conforme item 3.3.3.1, para cada traço de concreto.

Antes de iniciar o procedimento os corpos de prova foram lavados, a superfície das amostras foi seca e todas as faces, exceto a superfície teste, foram seladas, como recomenda a EN 16322:2013, a selagem foi feita com tinta epóxi a base de água. Com a pintura seca as amostras foram saturadas por imersão até a constância de massa.

Os corpos de prova foram colocados em ambiente climatizado com temperatura e umidade relativa controlada (20°C e 50%, respectivamente) de tal forma que a secagem ocorresse através da superfície superior (Figura 34). O comportamento de secagem foi registrado por meio de aferição periódica de massa.

Figura 34 - Ensaio de secagem em andamento



Fonte: Autora (2019).

Com os dados do ensaio foram construídas curvas de secagem para cada concreto. A partir da inclinação da curva de secagem em função da raiz do tempo foi possível avaliar as taxas de secagem ao longo do ensaio. O índice de secagem (I_s) descrito por Flores-Colen (2009) foi calculado conforme a Equação 19.

$$I_s = \frac{\int_{t_0}^{t_f} f \left(\frac{M_x - M_1}{M_1} \right) dt}{\left(\frac{M_3 - M_1}{M_1} \right) \times t_f} \quad (19)$$

Onde M_x é a massa do corpo de prova durante o processo de secagem (g); M_1 é a massa do corpo de prova seco em estufa (g); M_3 a massa do corpo de prova saturado (g) que corresponde à massa inicial do processo de secagem; e o t_f é o tempo final do ensaio de secagem.

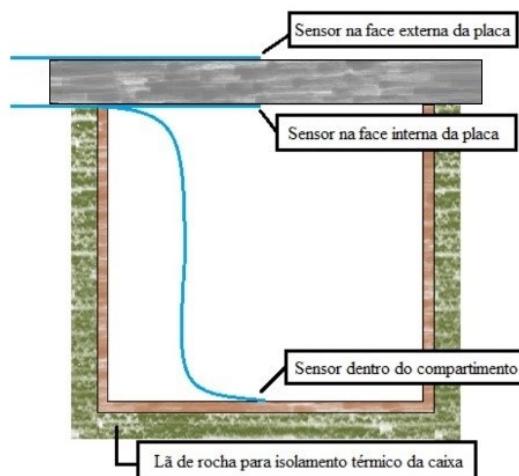
Além das curvas de secagem e do Is também foi determinado o índice de secagem (DI). A norma europeia EN 16322:2013 define o DI como sendo a área sob a curva de secagem que pode ser obtida graficamente ou por métodos matemáticos. No DI a área sob a curva é obtida com a massa estabilizada ao fim do ensaio, diferente do IS que considera a massa seca em estufa. Para efeito de comparação entre os diferentes concretos, os índices IS e DI foram obtidos para o mesmo tempo de ensaio.

3.3.3.9. *Ensaio térmico*

Os testes térmicos foram executados a partir de uma adaptação do método utilizado por Carvalho (2017). Foram produzidos cinco moldes cúbicos de compensado de madeira, com dimensões de 25 cm x 25 cm x 30 cm, envolvidos com lã de rocha para isolamento térmico. O ensaio ocorreu com idades entre 145 e 154 dias, as placas foram moldadas e curadas de acordo com o item 3.3.3.1.

No topo de cada compartimento foi colocada uma placa de concreto e em cada um dos compartimentos foram instalados três termopares, um na face externa da placa, outro na face interna da placa de concreto e o terceiro no interior do compartimento de madeira, conforme Figura 35.

Figura 35 - Seção transversal do esquema do ensaio térmico



Fonte: Adaptado de Carvalho (2017).

As amostras foram colocadas em um espaço sem sombras ou obstruções em um dia ensolarado. Os sensores conectados a um sistema de aquisição de dados e as temperaturas foram registradas em um período de 24 horas (Figura 36). A partir deste procedimento foi possível analisar a diferença de calor entre os três termopares de cada amostra e avaliar a variação da temperatura e atraso térmico no interior das caixas para os concretos ensaiados.

Figura 36 - Ensaio térmico em andamento



Fonte: Autora (2020).

3.3.3.10. *Condutividade térmica*

A determinação da condutividade térmica dos concretos foi realizada por meio de procedimento descrito na norma ASTM E1530 – 11, com o equipamento DTC-300 da TA *instruments* (Figura 37). O ensaio foi realizado em concretos com idades entre 154 e 163 dias na Universidade de São Paulo (USP) – Campus Pirassununga – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA-USP). As amostras cilíndricas, com 50 mm de diâmetro e 25 mm de altura foram extraídas das placas térmicas utilizadas no item 3.3.3.9.

Inicialmente, no procedimento de ensaio, uma pasta de transdutor de fluxo de calor (*Heat Flux Transducer* – HFT) foi aplicada nas faces transversais das amostras. Em seguida,

foram colocadas entre duas placas metálicas em diferentes temperaturas, a superior com 55°C e a inferior com 25°C, de forma a produzir um fluxo de calor com temperatura média de 40°C. A fim de garantir a reproduzibilidade da resistência térmica nas áreas de contato das faces da amostra foi preciso a aplicação e manutenção de uma pressão de 0,28 MPa no cilindro pneumático do aparelho

As temperaturas das superfícies em contato com a amostra foram medidas por meio de termopares, enquanto o calor foi mensurado por meio do transdutor HFT. Segundo a lei de Fourier, o calor medido é proporcional à resistência térmica da amostra nas interfaces com as placas metálicas do aparelho DTC 300. Esta proporcionalidade pode ser obtida por meio de uma calibração do sistema com amostras de condutividade térmica conhecidas.

Figura 37 - Equipamento DTC 300 da TA instruments utilizado no ensaio de determinação da condutividade térmica dos concretos



Fonte: Cintra (2017).

3.3.4 Simulação

No intuito de analisar o comportamento higrotérmico de materiais e elementos construtivos, cada vez mais, *softwares* baseados em modelos numéricos de discretização de espaço e tempo vem sendo utilizados, o que se justifica na facilidade de utilização e por serem adaptáveis à aspectos regionais e particularidades. Diante disto, esta pesquisa apresenta uma contribuição ao estudo do comportamento higrotérmico de paredes

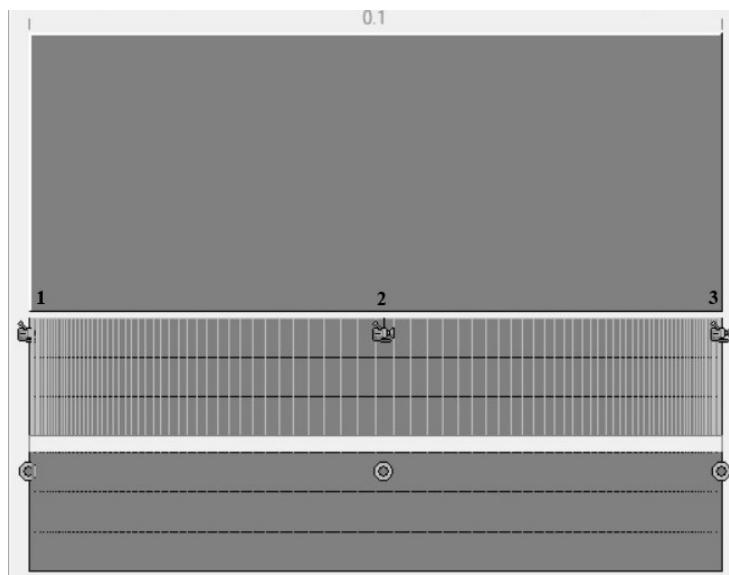
estruturais de concreto com agregados recicláveis, de EPS e borracha de pneu, considerando os aspectos climáticos da região de Uberlândia-MG, com a utilização do software WUFI® Pro 6.3 (*Wärme- Und Feuchtetransport Instationär - Transient Heat and Moisture Transport*) como ferramenta para este estudo.

3.3.4.1. Dados de entrada e processamento

Os dados de entrada são fatores necessários para a realização da simulação e são definidos de acordo com o local de estudo e fundamentados na EN 15026:2007. Os fatores mais fundamentais para a simulação higrotérmica são: configurações do elemento construtivo, orientação, inclinação e altura; propriedades higrotérmicas dos materiais que integram o componente construtivo; condições de fronteira, coeficientes de transferência à superfície do clima interior e exterior; condições iniciais, período de simulação e parâmetros numéricos de controle.

Elemento construtivo: paredes estruturais de concreto são objeto da análise proposta nesta etapa de simulação, visto que, este sistema construtivo vem sendo amplamente empregado na construção de HIS. Considerando as recomendações da ABNT NBR 16055:2012 que trata dos requisitos e procedimentos para construção de edificações em paredes de concreto moldada no local, foi considerada uma camada única com espessura de 10 cm. Portanto, foram consideradas três posições de monitoramento sendo uma na superfície externa, uma na posição central e uma na superfície interna, onde será possível obter dados de temperatura e umidade do sistema (Figura 38).

Figura 38 - Representação do sistema construtivo adotado com posições de monitoramento utilizadas



Fonte: Adaptado de WUFI (2020).

Propriedades higrotérmicas dos materiais: o banco de dados do WUFI® apresenta uma gama de dados e propriedades de materiais e componentes de construção, no entanto, este banco de dados é limitado, uma vez que retrata condições típicas de outros países. Diante disto, foram consideradas as propriedades definidas na etapa experimental descrita em 3.3.3, as propriedades básicas para a simulação higrotérmicas são: massa específica aparente; porosidade (neste estudo utilizou-se os valores de índice de vazios); resistência à difusão de vapor de água; coeficiente de capilaridade, curva higroscópica e condutividade térmica. De posse destes valores, do teor de umidade de saturação livre (W_f) (obtido a partir da saturação realizada para o ensaio de secagem), e da umidade do material à 80% de UR do ambiente (W_{ref}) (obtida a partir da curva higroscópica de dessorção), o WUFI® calcula automaticamente dois coeficientes de transferência de água líquida, denominados de sucção (D_{ws}) e de redistribuição (D_{ww}). O D_{ws} traduz a absorção capilar, quando a superfície absorvente está totalmente úmida, dominada pelos capilares maiores, o D_{ww} descreve a fase de secagem, onde há difusão da água adsorvida e não há mais molhagem, dominada pelos capilares menores (WUFI, 2013). Na prática, D_{ws} representa a chuva molhando as fachadas e D_{ww} pode ser traduzido como o momento após a chuva onde há a secagem. A Tabela 16 apresenta um resumo dos métodos utilizados na etapa 1 para determinação das propriedades higrotérmicas. Na Tabela 17 é apresentada a relação das propriedades higrotérmicas dos concretos utilizadas como dados de entrada.

Tabela 16 - Resumo dos métodos utilizados na determinação das propriedades higrotérmicas

Propriedade Higrotérmica	Método de obtenção das propriedades higrotérmicas utilizadas como dados de entrada no WUFI Pro 6.3	Unidade
Massa específica aparente	Determinada pelo método da ABNT NBR 9778:2005, resultados apresentados em 4.2.2 (conversão de unidade de g/cm^3 para kg/m^3)	kg/m^3
Porosidade	Determinada pelo método da ABNT NBR 9778:2005 (Índice de vazios), resultados apresentados em 4.2.2 (conversão de unidade de % de massa para m^3/m^3)	m^3/m^3
Calor Específico	Valor definido pela ABNT NBR 15220-2:2005	$J/kg.K$
Condutividade térmica	Determinada pelo método da ASTM E1530 – 11, resultados apresentados em 4.2.7	$W/m.K$
Fator de resistência à difusão de vapor de água	Determinado por método baseado em ISO 12572:2001 e EN 1015-19:2000, resultados apresentados em 4.2.5	-
Teor de umidade de referência	Determinada a partir da curva higroscópica de dessorção, apresentada em 4.2.4, para $UR=80\%$	kg/m^3
Umidade de saturação livre	Determinada a partir da saturação realizada para o ensaio de secagem, cujos resultados estão apresentados em 4.2.6	kg/m^3
Coeficiente de absorção de água	Determinada por método baseado em ABNT NBR 9779:2012, resultados apresentados em 4.2.3 (conversão de unidade de g/cm^2 para $kg/m^2.\sqrt{s}$)	$kg/m^2.\sqrt{s}$

Fonte: Autora (2020).

Tabela 17 - Propriedades higrotérmicas para os diferentes traços de concreto.

	Massa específica aparente	Porosidade	Calor Específico	Condutividade térmica	Fator de resistência à difusão de vapor de água	Teor de umidade de referência	Umidade de saturação livre	Coeficiente de absorção de água
Símbolo	ρ	ξ	c	λ	μ	Wref	Wf	Avalor
Unidade	kg/m^3	m^3/m^3	$J/kg.K$	$W/m.K$	-	kg/m^3	kg/m^3	$kg/m^2.\sqrt{s}$
REF	2228	0,1518	1000	1,457	172	132,04	139,77	0,01455
CB1	1908	0,1667	1000	0,977	60	110,44	136,03	0,00908
CB2	1744	0,2047	1000	0,927	55	124,9	136,82	0,00891
CEPS1	1844	0,1705	1000	1,223	90	138,18	164,2	0,01945
CEPS2	1790	0,1745	1000	1,028	87	139,78	168,9	0,01947

Fonte: Autora (2020).

Orientação, inclinação, altura e chuva dirigida: as informações sobre orientação, inclinação e altura são condicionantes para a incidência de agentes de radiação e chuva dirigida. Para a orientação foi adotada a metodologia proposta por Silva (2014) em que

as amostras poderão ser agrupadas em quatro quadrantes definidos pelos azimutes, conforme Tabela 18.

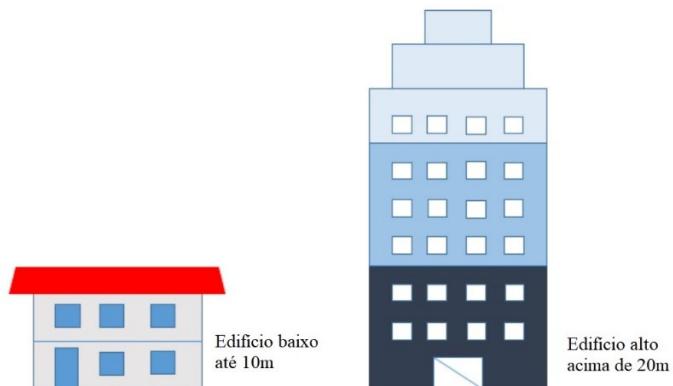
Tabela 18 - Orientação definida pelos azimutes.

Norte	entre os azimutes 315° e 44°
Leste	entre os azimutes 45° e 134°
Sul	entre os azimutes 135° e 224°
Oeste	entre os azimutes 225° e 314°

Fonte: Autora (2019)

A inclinação e a altura são fundamentais na determinação dos coeficientes R_1 e R_2 utilizados no cálculo da quantidade de chuva dirigida, a Equação 18 mostra a fórmula de cálculo utilizada pelo *software*., Tendo em vista que o estudo trata de paredes de concreto, utilizou-se a inclinação de 90°, sendo assim, $R_1=0$. O coeficiente R_2 depende da altura, determinado de acordo com a Figura 39 e a Tabela 19 (WUFI, 2013).

Figura 39 - Definição da altura da edificação



Fonte: Adaptado de WUFI (2013).

Tabela 19 - Altura do edifício e respectivo coeficiente R_2 .

Altura	Coeficiente R_2
Edifício baixo até 10m	0,07
Edifício alto intervalo até 10m	0,05
Edifício alto intervalo entre 10 m e 20m	0,1
Edifício alto intervalo acima de 20m	0,2

Fonte: Adaptado de Nascimento (2016).

No caso deste estudo considerou-se para a simulação edificações com altura até 10m, portanto, o coeficiente $R_2 = 0,07$. Por fim, ainda é atribuído ao valor calculado um fator de redução (F_r) de 0,7. Este fator, recomendado para superfícies verticais, considera que 70% da água fica disponível para absorção da superfície e a outra parcela é perdida (KÜNZEL, 1995).

$$R_{WDR} = R_h(R_1 + R_2 \cdot V_{10} \cdot \cos \theta) \quad (20)$$

Em que: R_{WDR} é a quantidade de chuva dirigida (mm/h ou L/m²); R_h a intensidade de precipitação horizontal (mm/h); R_1 o coeficiente dependente do tipo de elemento construtivo; R_2 é o coeficiente dependente da localização da fachada (s/m); V_{10} a velocidade do vento de referência a 10 m acima do solo e θ ângulo entre a direção do vento e à normal à parede (°).

Coeficientes de transferência à superfície: parâmetros de transferência à superfície, tais como, resistência superficial externa (R_{se}) e interna (R_{si}), absorção (α) e refletividade foram definidos segundo recomendações e padrões estabelecidos pelo *software* e pela ABNT NBR 15220:2005.

A resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção é definida pela ABNT NBR 15220-1 como resistência superficial (Figura 40). Portanto, para R_{se} e R_{si} , foram adotados os valores 0,04 e 0,13 m²K/W; respectivamente.

Figura 40 - Valores de resistência térmica superficial interna e externa, Tabela A.1

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: ABNT NBR 15220 (2005).

O *software* define o parâmetro α como absorção da radiação solar de onda curta, definido na ABNT NBR 15220:2005 como absorção de radiação solar (ondas curtas) e

representa a taxa de radiação absorvida pela superfície, tendo como uma das dependentes a cor, foram adotados valores apresentados na “Tabela B.2” da norma (Figura 41). A refletividade do solo é a quantidade de radiação proveniente da atmosfera que é refletida para o edifício, foi adotado o valor padrão estabelecido pelo *software* (0,2).

Figura 41 - Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiações a temperaturas comuns (ondas longas), Tabela B.2

Tipo de superfície	α	ϵ
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,15	0,12
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)	0,25	0,25
Caiação nova	0,12 / 0,15	0,90
Concreto aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Telha de barro	0,75 / 0,80	0,85 / 0,95
Tijolo aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Reboco claro	0,30 / 0,50	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico	0,85 / 0,98	0,90 / 0,98
Vidro incolor	0,06 / 0,25	0,84
Vidro colorido	0,40 / 0,80	0,84
Vidro metalizado	0,35 / 0,80	0,15 / 0,84
Pintura:		
Branca	0,20	0,90
Amarela	0,30	0,90
Verde clara	0,40	0,90
“Alumínio”	0,40	0,50
Verde escura	0,70	0,90
Vermelha	0,74	0,90
Preta	0,97	0,90

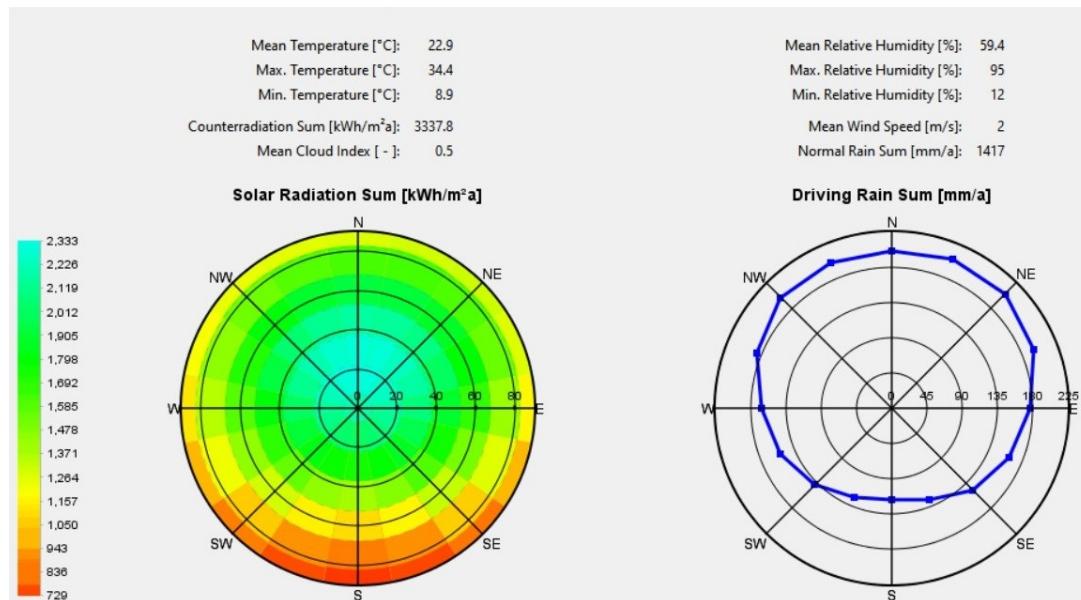
Fonte: ABNT NBR 15220 (2005).

Clima: por meio do *software*, o clima interior foi obtido com base na norma DIN EM 15026: 2007, que estabelece as equações para serem usadas nos cálculos de transferência de calor e umidade em regime não estacionário. A norma estabelece uma simplificação para temperatura e umidade interiores em função das exteriores. Para o clima exterior foi utilizado o arquivo climático *Typical Meteorological Year* (TMY) com base na medição da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Uberlândia-MG entre os anos de 2000 e 2010. Segundo Zanoni (2015), o arquivo TMY é composto por uma seleção dos meses sem extremos de temperaturas, e desta forma o ano representativo obtido contém meses de diferentes anos, totalizando 8760 dados, uma síntese da análise do clima para Uberlândia pode ser visto na Figura 42.

Observa-se que a maior incidência de irradiância ocorre para a orientação Norte, seguida pelas orientações Oeste, Leste e Sul. Com relação à chuva dirigida esta mesma sequência

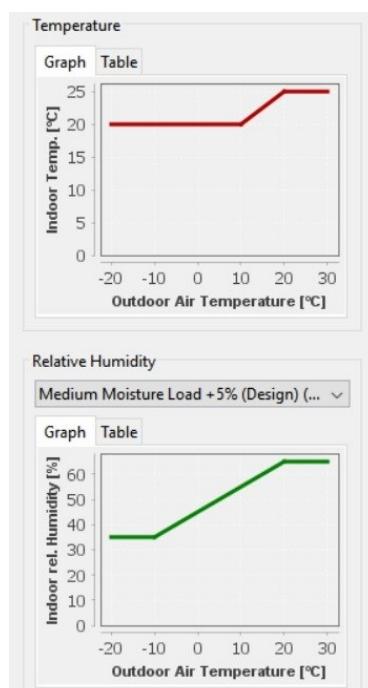
é observada, apresentando um total de 1417 mm/ano para todas as orientações. As curvas relacionadas a simplificação para o clima interior da edificação estão apresentadas na Figura 43.

Figura 42 - Síntese do arquivo climático adotado para Uberlândia



Fonte: WUFI (2020).

Figura 43 - Temperatura e umidade internas em relação à temperatura externa



Fonte: WUFI (2020).

Condições de fronteira: foi realizada simulação para um período de três anos, pois observou-se que a partir deste intervalo houve estabilização dos dados. Foram definidas, conforme estabelece a ANSI/ASHRAE 160: 2009, a condição inicial de temperatura de 20°C e a umidade inicial de 80% de UR, que corresponde à umidade de construção.

3.3.4.2. *Dados de saída*

Os dados de saída fornecidos pelo programa WUFI® Pro 6.3 também são fundamentados na EN 15026:2007 e são apresentados na forma de relatório de dados os resultados das simulações, de acordo com o passo de tempo selecionado pelo usuário e no período de tempo desejado (ZANONI, 2015). Para este estudo, os dados de saída utilizados na análise do comportamento higrotérmico foram irradiação solar na superfície; precipitação; fluxos de temperatura e umidade; e teor de umidade. Na Tabela 20 estão relacionados os parâmetros de saída extraídos do programa.

Tabela 20 – Dados de saída WUFI

Dados de saída para análise do comportamento higrotérmico (por orientação)
Irradiação Solar nas superfícies (clima exterior)
Precipitação (Chuva dirigida)
Fluxo de temperatura (superfícies/posição de monitoramento)
Fluxo de umidade (superfícies/posição de monitoramento)
Teor de umidade (por posição de monitoramento)

Fonte: Autora (2019).

3.3.4.3. *Pós-processamento*

Segundo a EN 15026: 2007 a fase pós-processamento se refere a aplicação dos resultados da simulação nos estudos. No caso desta pesquisa, o estudo pós-processamento terá como foco as condições de exposição aos agentes climáticos e a análise da resposta higrotérmica do sistema construtivo de paredes de concreto de agregado reciclado, de EPS e borracha de pneu, para a partir disto fazer uma comparação com os requisitos de desempenho térmico, estanqueidade e durabilidade da norma de desempenho ABNT NBR 15575:2013.

4. RESULTADOS E ANÁLISES: PROPRIEDADES MECÂNICAS E COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios referentes a primeira etapa do programa experimental desta dissertação. Nesta etapa, foram realizados ensaios para o concreto no estado fresco, determinação de abatimento e da massa específica, e no estado endurecido, em que foram investigadas a resistência mecânica e algumas propriedades físicas importantes para a caracterização das propriedades higrotérmicas dos concretos, tais como a massa específica, absorção por imersão, índice de vazios, absorção por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água, secagem, isotermas de adsorção e dessorção, ensaio térmico e condutividade térmica.

4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Conforme descrito no item 3.3.1, foram produzidos concretos com a consistência fluída, uma vez que, para o sistema construtivo de paredes de concreto normalmente são utilizados concretos auto adensáveis. Sendo assim, o teor de aditivo foi ajustado no momento da concretagem para que o abatimento estivesse em um intervalo de 230 ± 30 mm com a relação a/c fixada em 0,54. No que diz respeito ao aditivo, o fabricante recomenda a utilização de um teor entre 0,2% e 1,2% de aditivo sobre a massa de cimento. A Figura 44 ilustra a realização do ensaio de abatimento pelo troco de cone para o traço CB1. A Tabela 21 apresenta os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone e massa específica no estado fresco, bem como os teores de aditivos utilizados.

Para todos os traços os valores dos abatimentos apresentados ficaram dentro do intervalo esperado de (230 ± 30) mm, além disso, durante a realização do ensaio foi possível observar alguns aspectos importantes nas misturas, como: homogeneidade, boa trabalhabilidade, ausência de segregação e de exsudação.

Figura 44 - Ensaio de abatimento pelo tronco de cone do traço CB1



Fonte: Autora (2019).

A substituição parcial de agregados naturais por EPS e borracha de pneu reduziu a massa específica dos concretos frescos. O traço que apresentou maior redução em relação a referência foi o CEPS2 com valor 20% mais baixo, um comportamento esperado já que a massa específica dos agregados naturais é significativamente maior que dos resíduos.

Tabela 21 – Abatimento pelo tronco de cone e massa específica no estado fresco.

Concreto	Abatimento (mm)	Massa específica (kg/m ³)	Teor de aditivo*
REF	230	2331,08	0,56
CB1	225	2033,78	0,41
CB2	215	1939,19	0,35
CEPS1	215	1945,95	0,39
CEPS 2	210	1864,86	0,46

* % sobre a massa de cimento

Para que atingissem a consistência necessária, nos traços com borracha de pneu foi utilizada uma quantidade menor de aditivo superplastificante. Entre os dois traços com este resíduo observa-se que para o traço CB2 foi necessária uma quantidade menor de aditivo. A borracha é um material hidrofóbico, este fato pode ter influenciado a redução da necessidade de aditivo. Além disso, a borracha de pneu tem granulometria maior que da areia média substituída e, portanto, há uma redução da área superficial que também influencia nesta demanda.

Nos traços com EPS triturado também houve uma redução na quantidade de aditivo quando comparados ao traço REF. No entanto, entre os traços CEPS1 e CEPS2 houve um aumento da demanda de aditivo para o traço com maior teor de incorporação de EPS. Como se trata do EPS triturado, há ocorrência de partículas maiores formadas por um aglomerado de pequenas pérolas e que, por isso, tem muitas cavidades o que pode ter favorecido a demanda de aditivo devido ao aumento da superfície específica.

4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Nesta seção serão apresentados os resultados relativos às características e propriedades dos concretos no estado endurecido, que envolvem a determinação da resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção, índice de vazios, massa específica, absorção capilar, dessorção, secagem, permeabilidade ao vapor, condutividade térmica e ensaio térmico.

Com o intuito de verificar se os concretos estudados são estatisticamente diferentes entre si, realizou-se análise de variância (ANOVA) para os resultados das propriedades físicas dos concretos no estado endurecido e da condutividade térmica, considerando um erro de 5%. Fez-se a análise com os resultados de todos os traços de concreto estudados, a comparação entre o concreto de referência e cada traço com resíduo e, também, a comparação entre os traços com o mesmo tipo de substituição. Estes resultados também serão apresentados nesta seção.

4.2.1 Propriedades mecânicas

Na Tabela 22 estão apresentados os resultados médios dos ensaios de compressão para as idades de 1 e 28 dias, de tração por compressão diametral aos 28 dias de idade e os valores dos desvios padrão. No ensaio de compressão, de uma maneira geral, observou-se uma diminuição da resistência com a incorporação de resíduos.

Os valores apresentados para a idade de 1 dia mostram que todos os traços atingiram valores maiores que 4 MPa, critério mínimo de desforma adotado, e dentre os traços com incorporação de resíduo o CB1 apresentou maior resistência. Os resultados para a idade

de 28 dias mostram que os dois traços com substituição parcial do agregado miúdo natural por borracha de pneu não alcançaram o valor mínimo recomendado para concretos estruturais, de 20 MPa. Houve uma queda de 60,94%, 72,93%, 51,78% e 49,51% para os traços CB1, CB2, CEPS1 e CEPS2 respectivamente, em relação ao REF. Para o ensaio de tração o comportamento foi semelhante, a redução foi de 41,39%, 59,33%, 47,13% e 38,04% para os traços CB1, CB2, CEPS1 e CEPS2 respectivamente, em relação ao REF. Diante disto, o traço CEPS2 que possui maior teor de substituição de EPS apresentou os melhores resultados mecânicos, enquanto o traço CB2 com maior teor de substituição de borracha de pneu apresentou os piores resultados.

Tabela 22 - Resultados ensaios de compressão e tração por compressão diametral

Concreto	Resistência à compressão média (MPa)		Resistência à tração média (MPa)
	1 dia	28 dias	
REF	24,8 (0,552)	44,1 (1,825)	4,18 (0,272)
CB1	10,5 (0,257)	17,2 (0,65)	2,45 (0,103)
CB2	6,72 (0,13)	11,9 (0,522)	1,70 (0,108)
CEPS1	8,93 (0,198)	21,3 (0,65)	2,21 (0,32)
CEPS2	8,94 (0,293)	22,3 (0,626)	2,59 (0,164)

(Desvio Padrão)

Fonte: Autora (2019).

Ao relacionar a resistência à tração e a resistência à compressão observa-se que no traço REF a resistência à tração equivale a cerca de 9,5% da resistência à compressão. Para os traços com borracha de pneu esta relação equivale a 14,2% para CB1 e 14,3% para CB2, este resultado indica que o resíduo de borracha pode estar trabalhando como uma fibra e favorecendo a resistência à tração. Isto pode ser observado após a ruptura dos corpos de prova por compressão diametral, em que as duas metades permanecem unidas pela ação dos resíduos de borracha. Nos traços CEPS1 e CEPS2 a resistência à tração equivale a

aproximadamente 10,4% e 11,6% da resistência à compressão, respectivamente, valores pouco maiores que o traço de referência.

A Tabela 23 apresenta um resumo da análise de variância das propriedades mecânicas. Na análise da variância para o ensaio de resistência à compressão com 1 dia de idade, rejeitou-se igualdade dos concretos com resíduos e o traço de referência. Nas comparações entre traços com o mesmo tipo de substituição rejeitou-se igualdade entre CB1 e CB2, enquanto para CEPS1 e CEPS2 obteve-se resultados estatisticamente iguais. O mesmo comportamento é verificado nos ensaios de resistência à compressão e de resistência à tração por compressão diametral, ambos realizados aos 28 dias de idade.

Tabela 23 - Resumo da análise de variância das propriedades mecânicas dos concretos

Análise de variância: resistência à compressão (1 dia)				
COMPARAÇÃO	F	valor-P	F crítico	IGUALDADE?
OS 5 TRAÇOS	258,73409	0,00000	3,05557	NÃO
REF/CB1	202,00831	0,00001	5,98738	NÃO
REF/CB2	339,40030	0,00000	5,98738	NÃO
CB1/CB2	705,94443	0,00000	5,98738	NÃO
REF/CEPS1	255,21806	0,00000	5,98738	NÃO
REF/CEPS2	251,50464	0,00000	5,98738	NÃO
CEPS1/CEPS2	0,00320	0,95675	5,98738	SIM
Análise de variância: resistência à compressão (28 dias)				
COMPARAÇÃO	F	valor-P	F crítico	IGUALDADE?
OS 5 TRAÇOS	404,91878	0,00000	3,05557	NÃO
REF/CB1	696,96569	0,00000	5,98738	NÃO
REF/CB2	1148,71705	0,00000	5,98738	NÃO
CB1/CB2	78,27645	0,00012	5,98738	NÃO
REF/CEPS1	490,11555	0,00000	5,98738	NÃO
REF/CEPS2	385,08403	0,00000	5,98738	NÃO
CEPS1/CEPS2	0,86390	0,38851	5,98738	SIM
Análise de variância: resistência à tração (28 dias)				
COMPARAÇÃO	F	valor-P	F crítico	IGUALDADE?
OS 5 TRAÇOS	77,25547	0,00000	3,05557	NÃO
REF/CB1	143,03971	0,00002	5,98738	NÃO
REF/CB2	288,24503	0,00000	5,98738	NÃO
CB1/CB2	99,49497	0,00006	5,98738	NÃO
REF/CEPS1	88,24583	0,00008	5,98738	NÃO
REF/CEPS2	101,20712	0,00006	5,98738	NÃO
CEPS1/CEPS2	4,36860	0,08158	5,98738	SIM

4.2.2 Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica no estado endurecido

Os ensaios para determinação da absorção por imersão, índice de vazios e massa específica foram realizados nos concretos com 28 dias de idade, os resultados estão descritos na Tabela 24.

Tabela 24 - Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica dos concretos estudados no estado endurecido

	REF	CB1	CB2	CEPS1	CEPS2
Absorção por imersão	6,81% (0,001)	8,74% (0,001)	11,81% (0,011)	9,25% (0,006)	9,75% (0,001)
Índice de vazios por traço	15,18% (0,001)	16,67% (0,004)	20,47% (0,004)	17,05% (0,003)	17,45% (0,003)
Massa específica aparente amostra seca (g/cm ³)	2,23 (0,018)	1,91 (0,047)	1,74 (0,177)	1,84 (0,013)	1,79 (0,012)
Massa específica amostra saturada (g/cm ³)	2,38 (0,017)	2,07 (0,051)	1,95 (0,179)	2,01 (0,023)	1,96 (0,013)
					(Desvio Padrão)

Fonte: Autora (2019).

Foi observado que a absorção de água por imersão aumenta com o incremento de resíduos nos concretos, tanto para os traços com uso de borracha de pneu, quanto para os traços com EPS. Essa tendência, confirmada pelo índice de vazios, indica que maiores teores de substituição aumentam a absorção e a porosidade. Os resultados obtidos demonstraram que dentre os traços com resíduos, o CB1 apresentou os menores valores de absorção e índice de vazios, e o traço CB2 os maiores, diferente dos resultados para os traços com incorporação de EPS que apresentaram valores muito próximos para a absorção de água por imersão e índice de vazios.

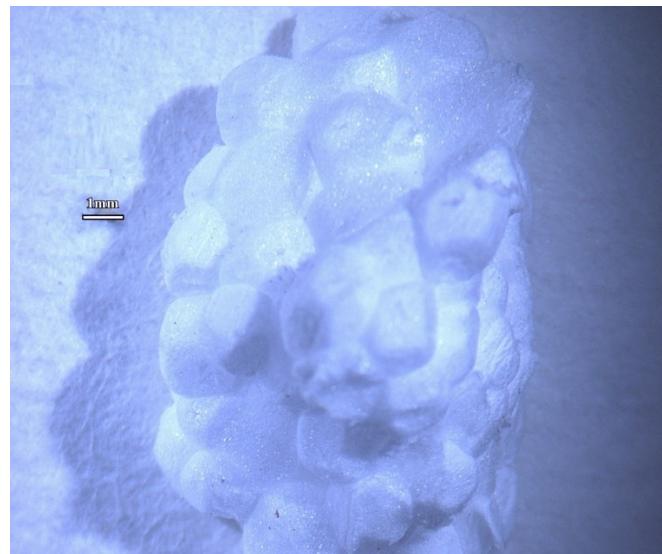
Quanto à relação entre as massas e os volumes dos concretos, foi observado que os traços com resíduos apresentaram menores valores que a referência como era esperado, pois a massa específica dos agregados naturais é significativamente maior do que dos resíduos. Embora a massa específica da borracha de pneu seja muito maior que a do EPS, não houve diferença expressiva entre as massas específicas dos concretos, por meio de uma análise

das curvas granulométricas da mistura de agregados para cada traço (seção 3.3.1) e nos valores teóricos de massa específica da mistura de agregados esperava-se que os traços com EPS apresentassem os menores valores para massa específica. No entanto, foi o traço CB2 que apresentou os menores valores de massa específica para a amostra seca e saturada superfície seca. De acordo com a ABNT NBR 8953:2015, os traços CB1, CB2, CEPS1 e CEPS2 podem ser considerados concreto leve, pois têm massa específica aparente inferior a 2000 kg/m³.

Os resultados para o índice de vazios dos traços CB1 e CB2 indicam um volume maior de poros permeáveis por água líquida. O aumento no volume de poros pode indicar que o incremento de resíduo de borracha de pneu favoreceu a incorporação de ar, uma vez que este traço apresentou um valor baixo para a massa específica no estado fresco, mas também pode indicar que a característica hidrofóbica do resíduo e sua forma alongada resultam em uma maior zona de transição.

Nos traços com resíduo de EPS triturado o aumento no volume de poros permeáveis a água líquida pode estar relacionado ao fato de que, apesar da granulometria do resíduo ser semelhante à da brita 0, o EPS triturado apresenta uma maior área superficial. A maior área superficial seria consequência da irregularidade e rugosidade características do EPS reciclado triturado (Figura 45). Além disso, estudos anteriores em que o EPS foi utilizado em substituição parcial ao agregado natural indicaram que para elevados teores de EPS o concreto apresenta maiores tensões de retração por secagem, com esta retração a matriz pode sofrer microfissuras o que causa maiores migrações de umidade (BABU, BABU e TIONG-HUAN, 2006; Chen, Liu e Chen , 2010)

Figura 45 – EPS triturado



A Tabela 25 apresenta um resumo da análise de variância para absorção por imersão e índice de vazios. Com relação aos resultados de absorção por imersão os traços CEPS1 e CEPS2 apresentaram respostas estatisticamente iguais entre si. Para os demais resultados, em comparação ao traço REF e entre CB1 e CB2, rejeitou-se igualdade. Para o índice de vazios, apenas as relações entre REF e CEPS1, e entre CEPS1 e CEPS2 apresentaram igualdade na análise de variância.

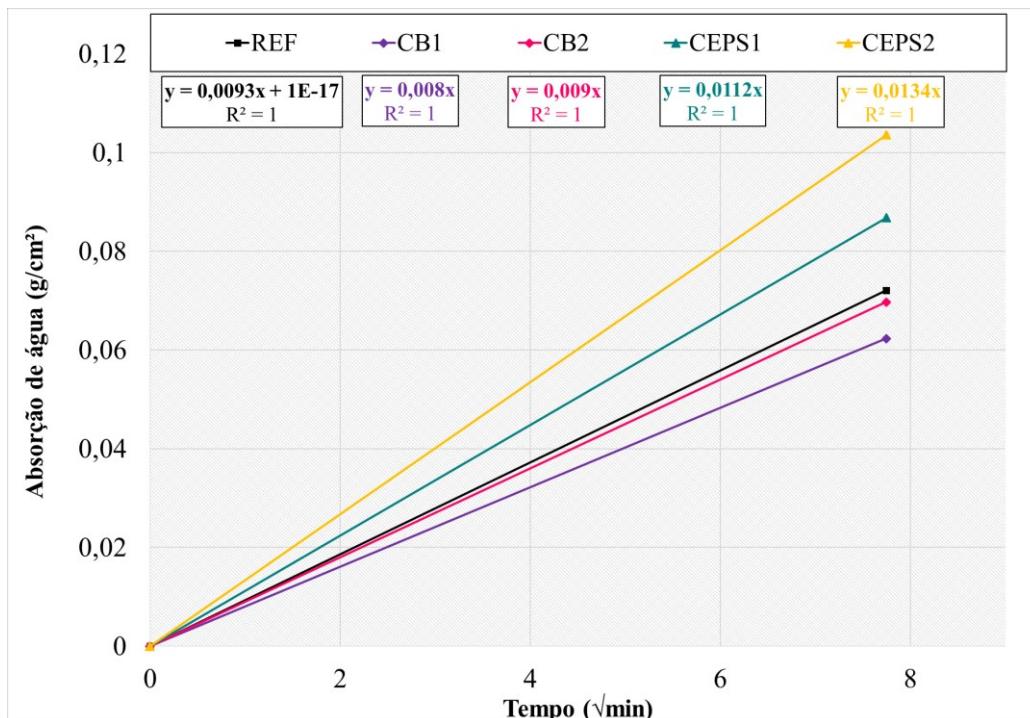
Tabela 25 - Resumo de análise de variância da absorção por imersão e índice de vazios

Análise de variância: absorção por imersão				
COMPARAÇÃO	F	valor-P	F crítico	IGUALDADE?
OS 5 TRAÇOS	31,60171	0,00001	3,47805	NÃO
REF/CB1	806,98046	0,00001	7,70865	NÃO
REF/CB2	66,58872	0,00123	7,70865	NÃO
CB1/CB2	25,14259	0,00742	7,70865	NÃO
REF/CEPS1	43,42956	0,00275	7,70865	NÃO
REF/CEPS2	1666,66812	0,00000	7,70865	NÃO
CEPS1/CEPS2	1,85219	0,24516	7,70865	SIM
Análise de variância: índice de vazios				
COMPARAÇÃO	F	valor-P	F crítico	IGUALDADE?
OS 5 TRAÇOS	28,19915	0,00002	3,47805	NÃO
REF/CB1	43,40402	0,00275	7,70865	NÃO
REF/CB2	297,70161	0,00007	7,70865	NÃO
CB1/CB2	104,71135	0,00051	7,70865	NÃO
REF/CEPS1	6,85698	0,05889	7,70865	SIM
REF/CEPS2	320,04669	0,00006	7,70865	NÃO
CEPS1/CEPS2	0,29782	0,61426	7,70865	SIM

4.2.3 Absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção por capilaridade foram realizados nos concretos com 28 dias de idade, as Figuras 46 e 47 apresentam as curvas de absorção de água por capilaridade para a primeira hora e após 72h de ensaio, respectivamente. Na Tabela 26 estão relacionados os valores para o coeficiente de capilaridade em 1h e 72h de ensaio, para cada traço de concreto, este parâmetro é definido pela inclinação da curva de absorção por capilaridade.

Figura 46 - Absorção de água por capilaridade em 1 hora

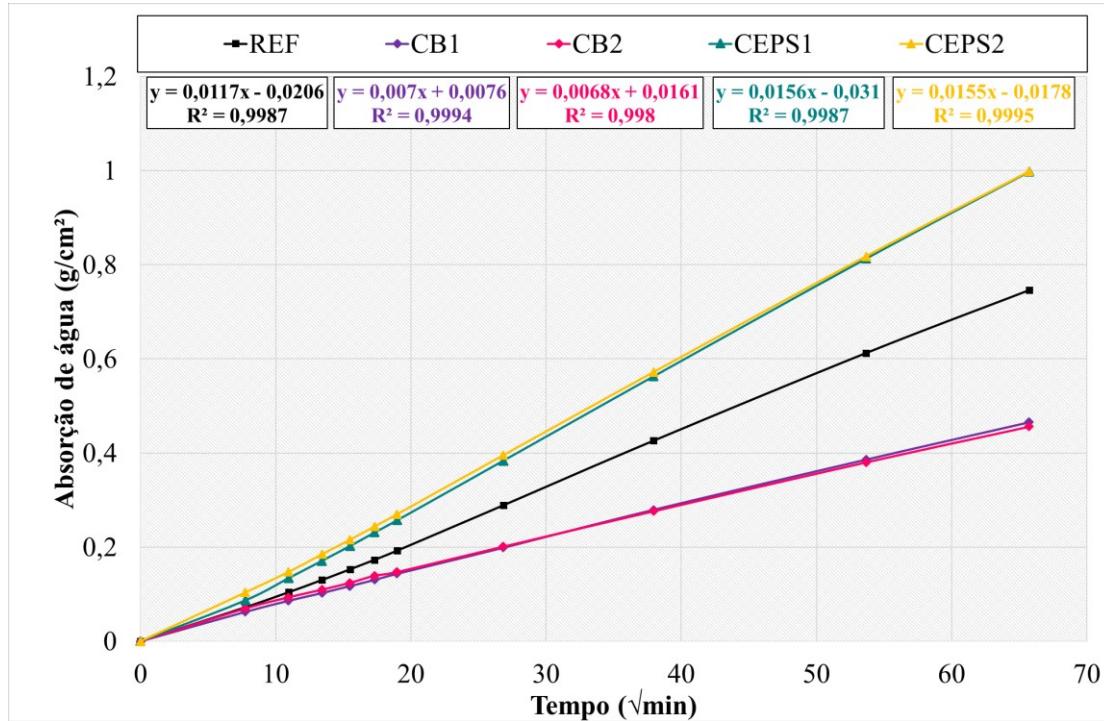


Por meio das curvas de absorção de água por capilaridade foi possível observar um comportamento similar dos concretos com o mesmo tipo de substituição, os concretos com borracha de pneu apresentaram menor absorção capilar, os concretos com EPS maior absorção capilar e o concreto de referência resultados intermediários entre os dois anteriores. A Figura 46 mostra que na primeira hora de ensaio há uma diferença entre a absorção de CEPS1 e CEPS2, os traços com borracha de pneu tem comportamento mais próximo ao do traço REF.

Avaliando a absorção por capilaridade após 72h de ensaio para os traços CB1 e CB2 houve uma redução de 40,2% e 41,9%, respectivamente, em relação ao concreto de

referência. No entanto, para os traços CEPS1 e CEPS2 houve um incremento de 33,3% e 32,5%.

Figura 47 – Absorção de água por capilaridade em 72 horas



No que diz respeito ao coeficiente de capilaridade, os resultados indicaram que os traços com borracha, CB1 e CB2, tiveram os menores coeficientes (curvas com menor inclinação), em contrapartida, os coeficientes dos traços CEPS1 e CEPS2 (curva com maior inclinação) superaram o valor obtido para o traço de referência. Além disso, percebe-se que entre os traços com o mesmo tipo de substituição os coeficientes têm valores muito próximos.

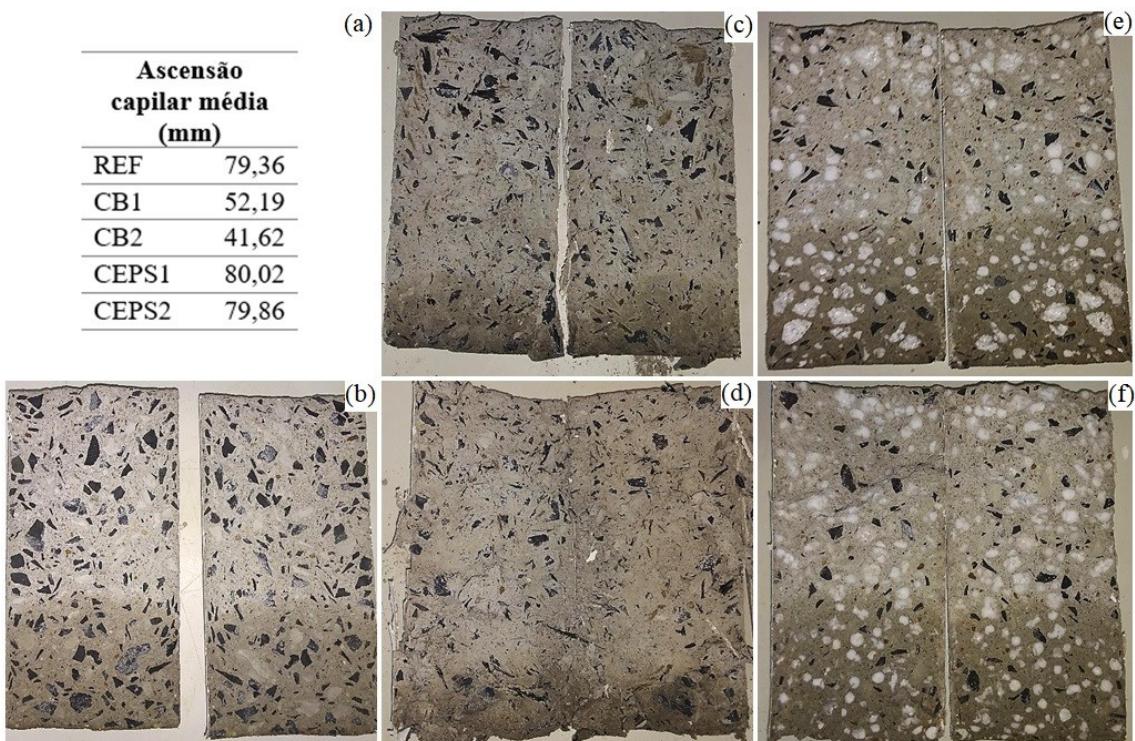
Tabela 26 - Coeficiente de capilaridade para 1h e 72h de ensaio por traço de concreto.

	REF	CB1	CB2	CEPS1	CEPS2
Coeficiente de capilaridade em 1h [g/(dm².min^{0,5})]	0,093	0,080	0,090	0,112	0,134
Coeficiente de capilaridade em 72h [g/(dm².min^{0,5})]	1,029	0,750	0,782	1,350	1,425

Os corpos de prova foram rompidos na longitudinal após a última aferição de massa para que fosse possível a medição da altura de ascensão capilar interna (Figura 48). Os traços

com borracha de pneu apresentaram menor absorção capilar e menor altura para ascensão capilar média. Este comportamento pode ser justificado pelo fato da capilaridade ser função da tensão superficial do líquido e do ângulo de contato, sendo assim a borracha de pneu estaria se comportando como uma barreira devido a sua hidrofobicidade.

Figura 48 - Ascensão capilar média (a), seção longitudinal REF (b), seção longitudinal CB1 (c), seção longitudinal CB2 (d), seção longitudinal CEPS1 (e) e seção longitudinal CEPS2 (f)



Por sua vez, nos traços CEPS1 e CEPS2 foi observada maior absorção capilar, mas altura de ascensão capilar muito semelhante à do traço REF. Este comportamento pode indicar que os traços com EPS tem um maior volume de poros, e por essa razão o volume de água absorvido é maior. Na caracterização dos materiais, foi observado que o EPS triturado absorve uma quantidade considerável de água, que pode contribuir para um maior volume de poros.

No entanto, é provável que os concretos CEPS1 e CEPS2 possuam distribuição do tamanho de poros e conectividade diferente do concreto REF, o que interfere na cinética da capilaridade e por isso as alturas de ascensão capilar dos dois tipos de concreto são

semelhantes. Embora a altura de ascensão capilar seja maior em poros menores devido à pressão capilar, a velocidade de absorção é maior nos poros de maior dimensão (DULLIEN *et al.*, 1977).

A Tabela 27 apresenta resumo da análise de variância para absorção capilar ao fim do ensaio e ascensão capilar dos concretos estudados. Nos ensaios de absorção de água por capilaridade, fez-se análise da variância para absorção capilar ao fim do ensaio (72h) e ascensão capilar. Para os resultados de absorção capilar, obteve-se respostas iguais estatisticamente para as comparações entre CB1 e CB2 e CEPS1 e CEPS2. Com relação à altura de absorção capilar as respostas em que se verificou igualdade se referem as comparações entre CB1 e CB2, REF e CEPS1, REF e CEPS2 e CEPS1 e CEPS2.

Tabela 27 - Resumo da análise de variância para absorção capilar e ascensão capilar

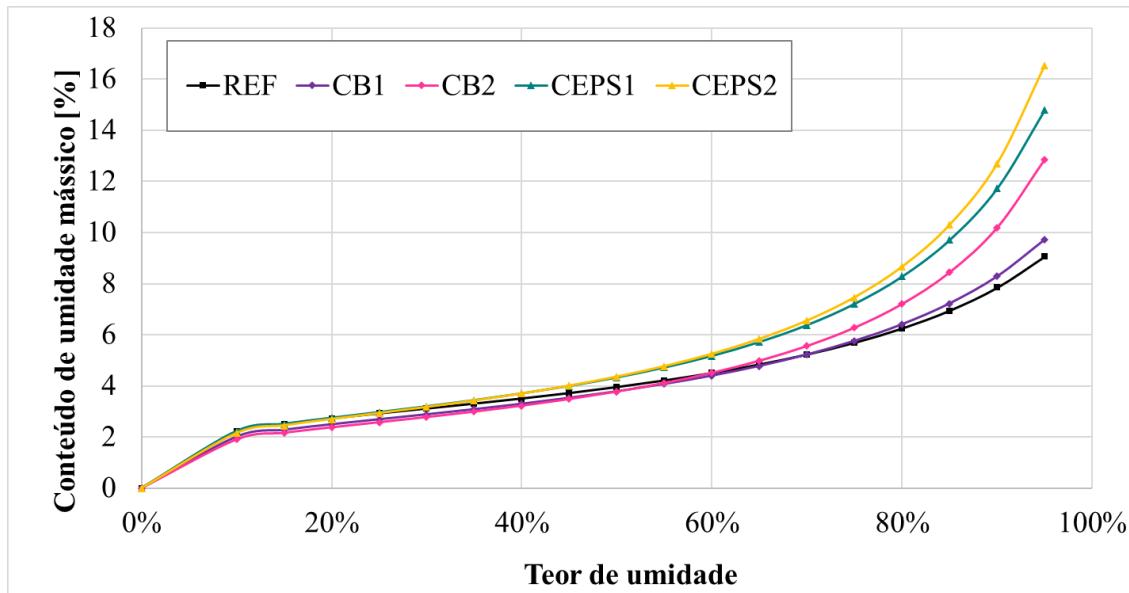
Análise de variância: absorção capilar (72h)				
COMPARAÇÃO	F	valor-P	F crítico	IGUALDADE?
OS 5 TRAÇOS	143,85573	0,00000	3,47805	NÃO
REF/CB1	50,09387	0,00210	7,70865	NÃO
REF/CB2	69,83919	0,00112	7,70865	NÃO
CB1/CB2	0,19984	0,67799	7,70865	SIM
REF/CEPS1	37,82868	0,00354	7,70865	NÃO
REF/CEPS2	39,24209	0,00331	7,70865	NÃO
CEPS1/CEPS2	0,00148	0,97120	7,70865	SIM
Análise de variância: ascensão capilar				
COMPARAÇÃO	F	valor-P	F crítico	IGUALDADE?
OS 5 TRAÇOS	31,33939	0,00001	3,47805	NÃO
REF/CB1	16,61990	0,01514	7,70865	NÃO
REF/CB2	39,57870	0,00326	7,70865	NÃO
CB1/CB2	5,21410	0,08447	7,70865	SIM
REF/CEPS1	0,01366	0,91260	7,70865	SIM
REF/CEPS2	0,00824	0,93205	7,70865	SIM
CEPS1/CEPS2	0,00871	0,93014	7,70865	SIM

4.2.4 Comportamento higroscópico

As isotermas de dessorção de umidade para os diferentes traços são representadas na Figura 49. Conforme descrito no item 3.3.3.6, a partir dos pontos experimentais foram

obtidos os coeficientes A, B e C da quadrática queajusta estes dados ao modelo GAB, bem como os coeficientes de correlação (r^2) que neste estudo variam de 0,89 a 0,98.

Figura 49 - Curva de dessorção de umidade dos concretos

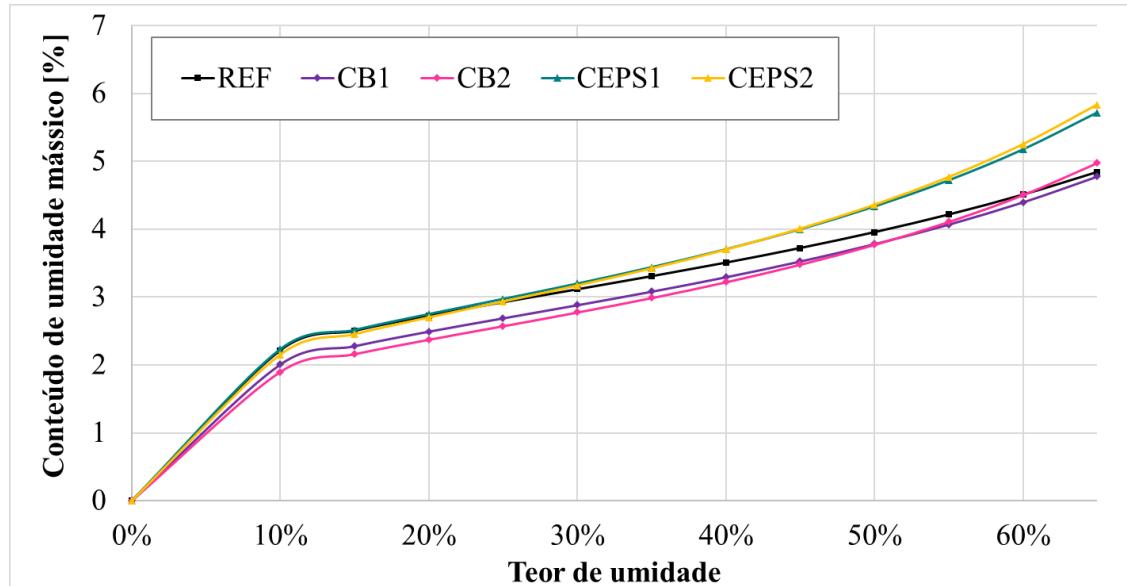


Observa-se que a substituição de agregados naturais por resíduos, de uma maneira geral, alterou o comportamento higroscópico do concreto, em umidades elevadas o traço de referência apresentou o menor conteúdo de umidade. As curvas indicam que os traços com resíduos retêm mais água e por essa razão são mais desfavoráveis a dessorção de umidade. A inclinação acentuada da curva é um indício de que o material é fortemente higroscópico e apresenta um maior volume de pequenos poros (MAGALHÃES e VEIGA, 2007). Isto corrobora com os resultados que indicaram maior absorção capilar dos CEPS1 e CEPS2.

As isotermas de dessorção para os traços com borracha de pneu, quando comparados ao traço de referência, apresentaram menor conteúdo de umidade mássico para teores de umidade abaixo de 60% (Figura 50). Para umidades mais elevadas o traço de referência passa a ter menor conteúdo de umidade mássico, o traço CB1 ligeiramente superior, enquanto o CB2 apresentou uma diferença mais acentuada (Figura 49).

Os concretos com EPS triturado, em baixas umidades, tem comportamento semelhante ao traço de referência. Para teores de umidade acima de 30% os traços CEPS1 e CEPS2 apresentaram maior conteúdo de umidade mássico (Figura 49), sendo a curva do CEPS2 a mais acentuada.

Figura 50 - Curvas de dessorção para teor de umidade de até 65%



A Tabela 28 apresenta um resumo dos pontos ajustados que foram utilizados nas curvas (Figura 49).

Tabela 28 - Resumo dos dados das curvas de dessorção

Teor de umidade:		10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
Conteúdo de umidade mássico (%)	REF	2,22	2,51	2,73	2,93	3,12	3,31	3,51	3,72	3,96
	CB1	2,01	2,28	2,50	2,69	2,88	3,08	3,30	3,53	3,78
	CB2	1,90	2,16	2,38	2,58	2,78	2,99	3,22	3,48	3,77
	CEPS1	2,23	2,52	2,75	2,97	3,20	3,44	3,71	4,00	4,34
	CEPS2	2,15	2,46	2,70	2,94	3,17	3,43	3,70	4,01	4,36
Teor de umidade:		55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
Conteúdo de umidade mássico (%)	REF	4,22	4,51	4,84	5,23	5,69	6,25	6,95	7,85	9,07
	CB1	4,07	4,40	4,78	5,23	5,76	6,41	7,23	8,28	9,72
	CB2	4,11	4,51	4,98	5,56	6,28	7,20	8,44	10,19	12,86
	CEPS1	4,72	5,18	5,72	6,38	7,21	8,28	9,71	11,73	14,80
	CEPS2	4,77	5,25	5,84	6,56	7,47	8,67	10,31	12,71	16,55

4.2.5 Permeabilidade ao vapor de água

Na Tabela 29 estão relacionados os resultados de caracterização do comportamento quanto à permeabilidade ao vapor de água para os concretos estudados. Os resultados apontam para um aumento da permeabilidade ao vapor (δ) com a incorporação de resíduos, os maiores valores são dos traços com borracha de pneu com $3,27 \times 10^{-12}$ [kg/(m.s.Pa)] para CB1 e $3,56 \times 10^{-12}$ [kg/(m.s.Pa)] para CB2, para os traços CEPS1 e CEPS2 os valores também foram próximos, $2,17 \times 10^{-12}$ [kg/(m.s.Pa)] e $2,24 \times 10^{-12}$ [kg/(m.s.Pa)] respectivamente. No entanto, devido a ordem de grandeza desta propriedade, é possível afirmar que todos os traços têm valores muito próximos para permeabilidade ao vapor.

Tabela 29 - Parâmetros relacionados a permeabilidade ao vapor de água

Tipo	δ [(10^{-12}) kg/(m.s.Pa)]	Sd [m]	μ
REF	1,13	1,910	171,719
CB1	3,27	0,656	59,518
CB2	3,56	0,660	54,739
CEPS1	2,17	1,071	89,573
CEPS2	2,24	0,965	86,609

δ : permeabilidade ao vapor de água;
Sd: espessura de ar equivalente;
 μ : fator de resistência à difusão de vapor de água

A espessura de ar equivalente (Sd) indica que, em termos de permeabilidade, o uso destes concretos equivale a adoção de uma camada de ar com espessura variando entre 0,656 m e 1,910 m, barrando a passagem do vapor de água. O traço REF apresentou o maior valor de espessura de ar equivalente, os traços CB1 e CB2 tem comportamento muito próximos com espessura de ar equivalente de 0,656 m e 0,660 m, respectivamente. Para os traços com EPS observa-se que o traço com maior teor de substituição o CEPS2 apresentou um valor maior para a espessura de ar equivalente, de 1,071 m, que o traço CEPS1 com 0,965 m.

O fator de resistência à difusão do vapor de água (μ) é uma outra maneira de expressar estes resultados. O traço REF apresentou maior resistência à passagem do vapor de água, com fator de resistência de 171,719, entre os traços com borracha de pneu o CB2 tem

menor fator de resistência à difusão de vapor, sendo o traço CB1 ligeiramente superior. Para os traços com EPS triturado o traço CEPS1 apresentou um fator de resistência um pouco maior que o traço CEPS2. Diante destes resultados é possível afirmar que os traços com borracha de pneu são mais permeáveis ao vapor de água e o traço REF é o menos permeável.

A Tabela 30 apresenta o resumo da análise de variância para a permeabilidade ao vapor de água entre os concretos estudados. Rejeitou-se igualdade para todas as comparações com o concreto REF, enquanto os concretos com o mesmo tipo de substituição apresentam respostas estatisticamente iguais.

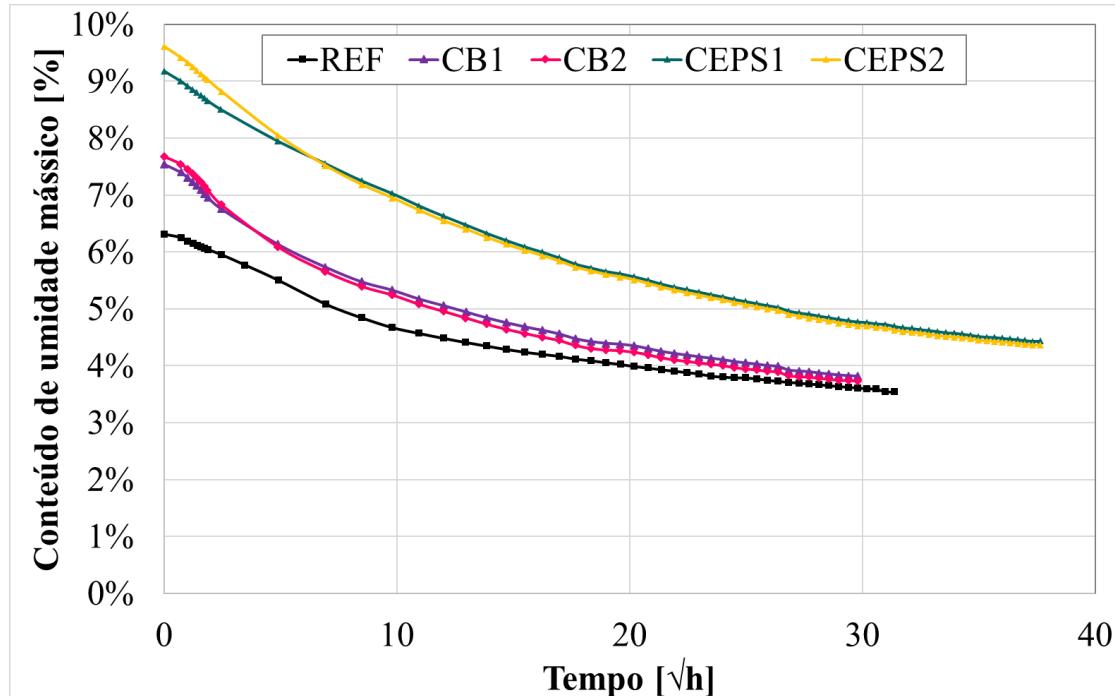
Tabela 30 - Resumo da análise de variância para permeabilidade ao vapor de água dos concretos

Análise de variância: permeabilidade ao vapor de água				
COMPARAÇÃO	F	valor-P	F crítico	IGUALDADE?
OS 5 TRAÇOS	75,8087	0,00000	3,47805	NÃO
REF/CB1	323,367	0,00006	7,70865	NÃO
REF/CB2	158,133	0,00023	7,70865	NÃO
CB1/CB2	1,76039	0,25525	7,70865	SIM
REF/CEPS1	103,711	0,00052	7,70865	NÃO
REF/CEPS2	1036,22	0,00001	7,70865	NÃO
CEPS1/CEPS2	0,40659	0,55838	7,70865	SIM

4.2.6 Secagem

As curvas de secagem dos concretos estão apresentadas na Figura 51. Ao se observar o valor inicial das curvas é possível perceber que o traço de referência apresenta o menor conteúdo de umidade mássico (teor de água) cerca de 6,3%, logo em seguida estão os traços CB1 e CB2 com conteúdos de umidade semelhantes 7,54% e 7,67%, respectivamente. Os traços com EPS apresentaram os maiores valores, sendo 9,18% para o traço CEPS1 e 9,61% para o CEPS2.

Figura 51 - Curvas de secagem dos concretos



Ao fim do ensaio o traço REF apresentou um conteúdo de umidade mássico de 3,55%. Os traços com borracha de pneu continuaram se comportando de forma semelhante, sendo o valor de 3,82% para CB1 e 3,74% para CB2. Os traços com EPS triturado finalizaram o ensaio com conteúdo de umidade mássico de 4,43% e 4,36% para CEPS1 e CEPS2, respectivamente.

Observa-se uma tendência semelhante para os dois tipos de resíduo, nos dois casos os traços com maior teor de substituição, CB2 e CEPS2, começam o ensaio com conteúdo de umidade mássico mais elevado, mas ao longo do ensaio perdem água mais rapidamente o que faz com que ao fim do ensaio apresentem conteúdo mássico de umidade menor que os traços com menor teor de substituição, CB1 e CEPS1.

Outra observação importante está relacionada a duração do processo de secagem, o traço de referência atingiu o estado de equilíbrio higroscópico após cerca de 984 horas de ensaio, os traços CB1 e CB2 entraram em equilíbrio mais rápido com 888 horas de ensaio, em contrapartida, os traços CEPS1 e CEPS2 precisaram de um período maior para atingir a condição de equilíbrio higroscópico, 1416 horas de ensaio.

O índice de secagem está relacionado a facilidade da saída da água, nos estados líquido e de vapor, dos poros do concreto. Foram determinados dois índices, com metodologias diferentes o IS foi determinado conforme Equação 14, metodologia proposta por Flores-Colen (2009), e o DI foi determinado de acordo com a metodologia na norma europeia EN 16322:2013, na Tabela 31 estão apresentados os resultados obtidos para os diferentes traços. Considerando que os traços atingiram o equilíbrio higroscópico em intervalos de tempo diferentes, para efeito de comparação os índices IS e DI foram calculados para a duração de 888 horas.

Tabela 31 - Índice de secagem para os concretos determinados pelas metodologias de Flores-Colen (2009) e da norma europeia EN 16322:2013.

TIPO	IS- Índice de secagem [Flores-Colen (2009)]	DI- <i>Drying index</i> [EN 16322:2013]
REF	0,65	0,20
CB1	0,59	0,18
CB2	0,57	0,16
CEPS1	0,63	0,28
CEPS2	0,59	0,25

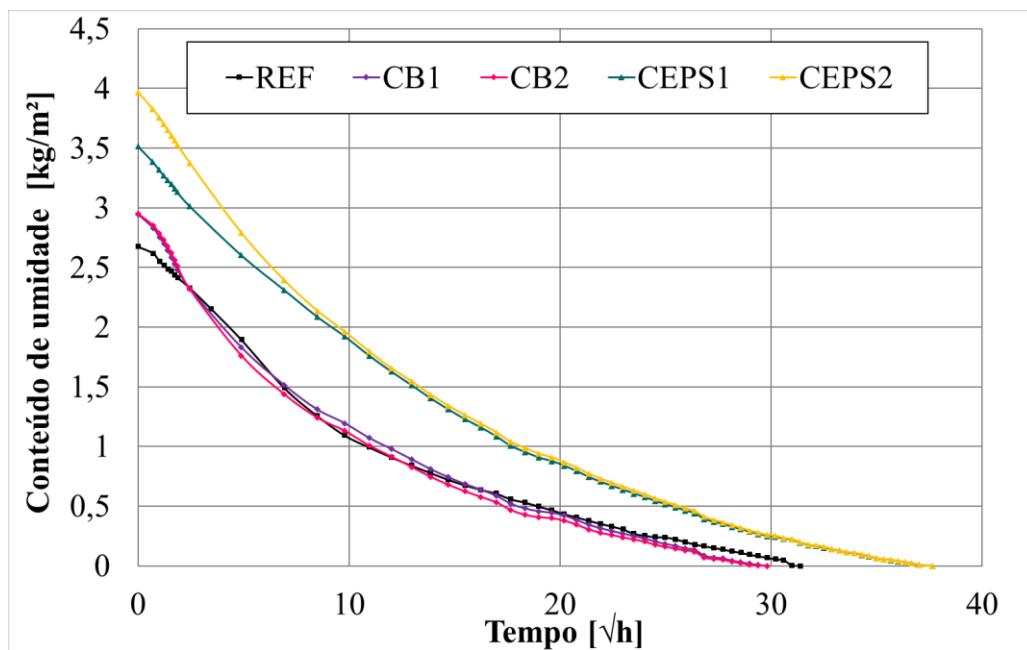
A diferença entre os valores obtidos para IS e DI está relacionado a diferença nos métodos de cálculo. Conforme foi apresentado pela Equação 14 no item 3.3.3.8, o IS é calculado pela razão entre integral da curva de secagem (% de água x $\sqrt{\text{tempo}}$ em horas, considerando a massa final do ensaio como a massa seca em estufa) e o teor de água inicial ao longo do ensaio. Enquanto o DI é obtido pela diretamente pela integral da curva de secagem (kg/m^2 de água x $\sqrt{\text{tempo}}$ em horas, considerando a massa final do ensaio como a massa estabilizada em condições controladas de temperatura e umidade).

Comparando as curvas de secagem (Figura 51 e 52), percebe-se que as integrais das curvas dos de EPS resultam em maiores valores comparadas à curva do traço REF. No entanto, o IS é calculado pela razão entre esta integral e o produto entre o teor de umidade inicial com o tempo de ensaio. Então, ainda que as curvas de secagem (Figura 51) dos traços com EPS triturado estejam acima da curva para o traço REF, ou seja, a integral

resulta em um maior valor, o valor de IS é maior, pois, o teor de umidade inicial do REF é menor. Como o DI é calculado apenas pela integral da curva de secagem (Figura 52), o traço REF apresenta menor DI que os traços com EPS pois o conteúdo de umidade para estes traços é maior.

Menores valores do índice de secagem indicam nesses sistemas maior facilidade de secagem. Entre os traços com borracha de pneu o traço CB2 possui menor índice de secagem que o traço CB1, para os traços com EPS triturado o traço CEPS2 possui menor índice que o CEPS1. No conjunto dos traços, REF tem o maior IS (0,65) e CB2 o menor (0,57). O índice determinado pela metodologia da norma (DI) apresenta resultados parecidos para o mesmo tipo de substituição, o índice atribuído ao traço REF está entre os valores verificados para os traços com borracha e EPS com valor de 0,20. A tendência entre os traços com o mesmo tipo de resíduo se confirma, os traços CB2 e CEPS2 têm maior facilidade de secagem que os traços CB1 e CEPS1.

Figura 52 - Curva de secagem ($\text{kg/m}^2 \times \sqrt{\text{h}}$)



A Tabela 32 apresenta o resumo dos resultados da análise de variância para os índices de secagem dos concretos estudados. Os resultados de IS apresentam igualdade para as

relações CB1 e CB2, REF e CEPS1 e CEPS1 e CEPS2. Para os resultados de DI obtém-se igualdade apenas para a comparação entre as respostas dos traços CEPS1 e CEPS2.

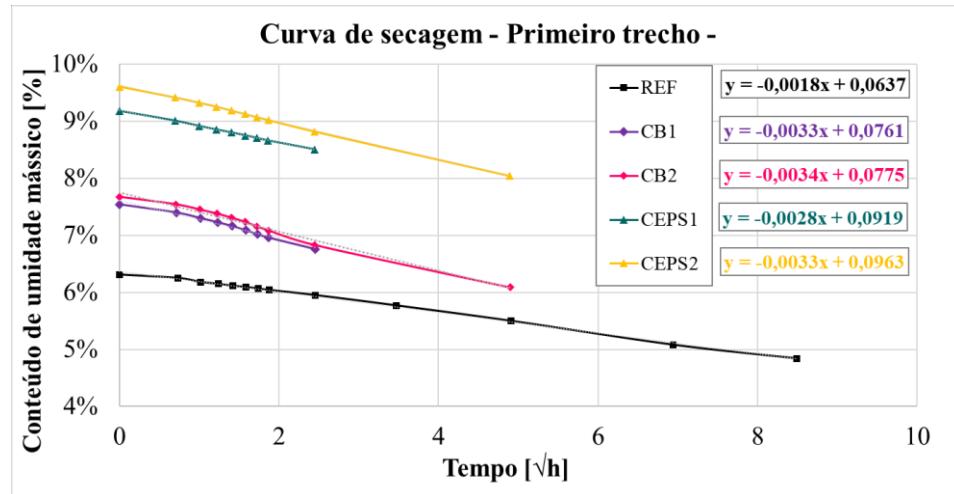
Tabela 32 - Resumo da análise de variância dos índices de secagem dos concretos

Análise de variância: DI				
COMPARAÇÃO	F	valor-P	F crítico	IGUALDADE?
OS 5 TRAÇOS	27,0988	0,00000	3,05557	NÃO
REF/CB1	62,3111	0,00022	5,98738	NÃO
REF/CB2	71,3945	0,00015	5,98738	NÃO
CB1/CB2	10,0144	0,01945	5,98738	NÃO
REF/CEPS1	21,4508	0,00357	5,98738	NÃO
REF/CEPS2	14,9948	0,00824	5,98738	NÃO
CEPS1/CEPS2	1,18159	0,31876	5,98738	SIM
Análise de variância: IS				
COMPARAÇÃO	F	valor-P	F crítico	IGUALDADE?
OS 5 TRAÇOS	12,3958	0,00012	3,05557	NÃO
REF/CB1	33,0574	0,00120	5,98738	NÃO
REF/CB2	189,622	0,00001	5,98738	NÃO
CB1/CB2	4,58051	0,07613	5,98738	SIM
REF/CEPS1	5,23676	0,06208	5,98738	SIM
REF/CEPS2	18,6684	0,00498	5,98738	NÃO
CEPS1/CEPS2	4,09895	0,08933	5,98738	SIM

Com o intuito de avaliar a cinética de secagem dos concretos, as curvas de secagem foram divididas em trechos lineares a partir da observação de mudança de inclinação das mesmas, cada trecho corresponde a uma fase do processo de secagem. (Figuras 53, 54, 55). A velocidade de secagem dos concretos é indicada pelo coeficiente angular das linhas de tendência lineares.

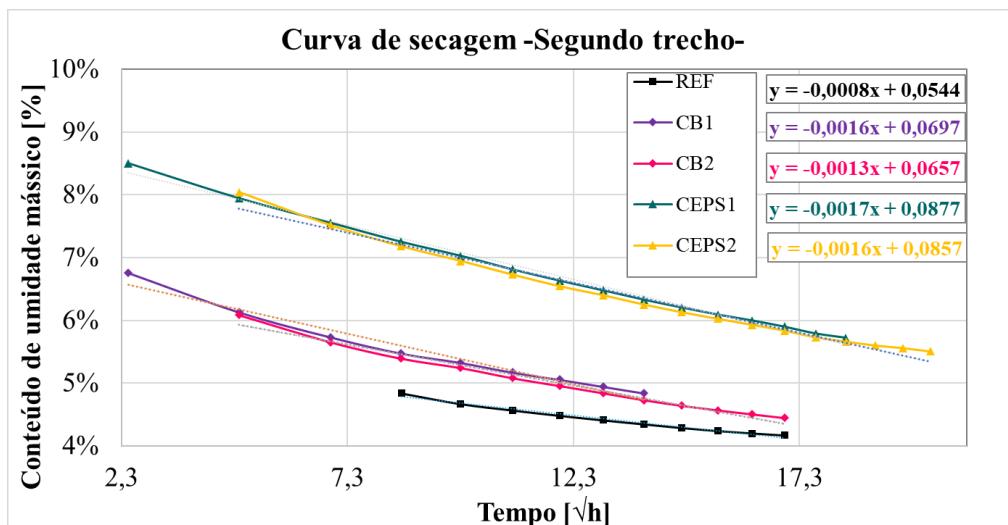
As primeiras horas da secagem correspondem ao período em que a água chega à superfície por capilaridade. Entre os concretos estudados a primeira fase foi a que apresentou maior velocidade de secagem, o traço REF apresentou a menor velocidade em comparação aos demais traços, com perda de água em torno de 0,0018 %/h. Entre os traços com borracha de pneu o CB1 apresentou praticamente a mesma velocidade que o traço CB2. Nos traços com EPS triturado o CEPS2 tem velocidade ligeiramente superior ao traço CEPS1.

Figura 53 - Cinética de secagem para primeira fase



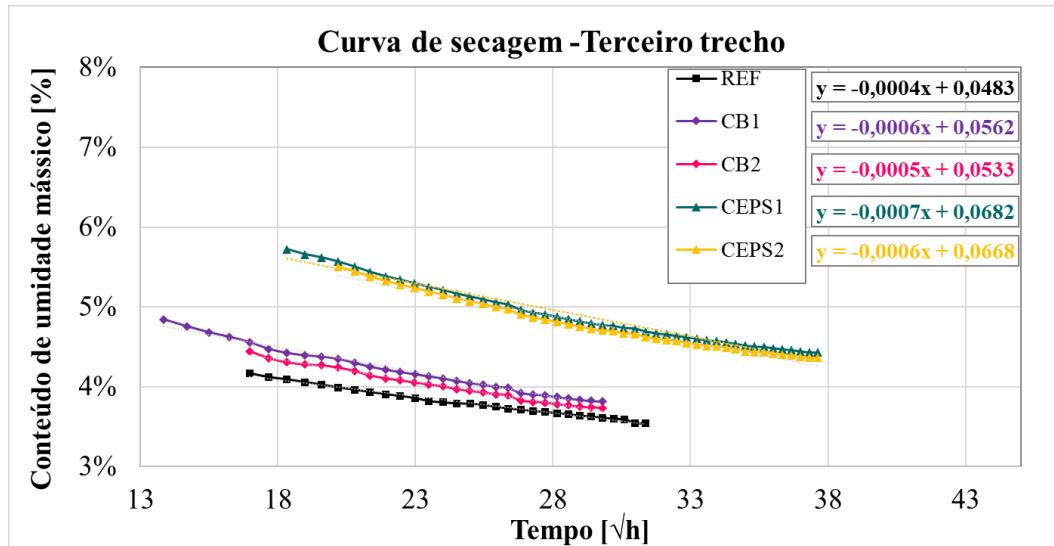
Da primeira para a segunda fase há um decaimento na velocidade de secagem, o traço de referência continua apresentando a menor taxa ($0,0008\%/\sqrt{h}$). Para os traços com borracha de pneu as velocidades de secagem se mantêm muito próximas, o traço CB2 tem velocidade um pouco menor ($0,013\%/\sqrt{h}$) que o traço CB1. Para os traços com EPS as velocidades são praticamente iguais.

Figura 54 - Cinética de secagem para segunda fase



Na terceira fase de secagem observa-se que há uma redução na taxa, nesta fase os concretos se encaminham para o equilíbrio higroscópico e todos os traços apresentam valores muito próximos.

Figura 55 - Cinética de secagem para terceira fase de secagem



A Tabela 33 apresenta o teor de umidade crítico, ou seja, o ponto de inflexão da curva de secagem entre a primeira e segunda fase, além da relação das taxas de secagem (%m/v h) dos trechos selecionados e a duração de cada fase.

Tabela 33 - Taxa de secagem ao longo do ensaio [%m/v h]

TIPO	Teor de umidade crítico (%)	FASE 1		FASE 2		FASE 3	
		Taxa de secagem	Duração (h)	Taxa de secagem	Duração (h)	Taxa de secagem	Duração (h)
REF	4,84	0,0018	72	0,0008	216	0,0004	696
CB1	6,76	0,0033	6	0,0016	186	0,0006	696
CB2	6,09	0,0034	24	0,0013	264	0,0005	600
CEPS	8,5	0,0028	6	0,0017	330	0,0007	1080
CEPS	8,04	0,0033	24	0,0016	384	0,0006	1008

4.2.7 Condutividade térmica

Os valores médios de condutividade térmica dos concretos estudados são apresentados na Tabela 34. De uma maneira geral, contatou-se que a condutividade térmica dos concretos

com substituição de agregados naturais por resíduos de borracha de pneu e EPS triturado foi menor que a condutividade térmica do concreto de referência.

Tabela 34 - Condutividade térmica média dos concretos

TIPO	Condutividade térmica (W/m.K) T=20°C	Desvio Padrão
REF	1,457	0,03
CB1	0,977	0,03
CB2	0,927	0,02
CEPS1	1,223	0,04
CEPS2	1,028	0,07

Entre os traços com mesmo tipo de resíduo observa-se que para os maiores teores de substituição a condutividade térmica é menor. Isto ocorre, pois, a borracha de pneu e o EPS triturado são materiais menos condutores que os agregados naturais, areia e brita.

A ABNT NBR 15220-2:2005 apresenta valores de condutividade térmica para alguns materiais utilizados na construção civil, para concreto são estipulados dois valores: 1,75 W/m.K para concreto normal (massa específica entre 2200 e 2400 kg/m³) e de 1,4 W/m.K para concreto cavernoso (1700 e 2100 kg/m³). Os resultados obtidos para os concretos estudados são mais baixos que os valores apresentados como referência no documento normativo. O mesmo foi observado nos trabalhos de Barbar (2016) e Cintra (2017).

A Tabela 35 apresenta o resumo dos resultados da análise de variância para a condutividade térmica dos concretos. A análise foi aplicada primeiramente para os resultados obtidos de todos os concretos em estudo, neste caso rejeitou-se igualdade entre os traços de concreto. Outra análise comparando a condutividade térmica do traço REF aos traços com substituição de resíduos foi realizada, em que nenhuma comparação apresentou respostas estatisticamente iguais. Entre os traços com mesmo tipo de substituição CB1 e CB2 apresentaram respostas iguais, mas rejeita-se igualdade entre CEPS1 e CEPS2.

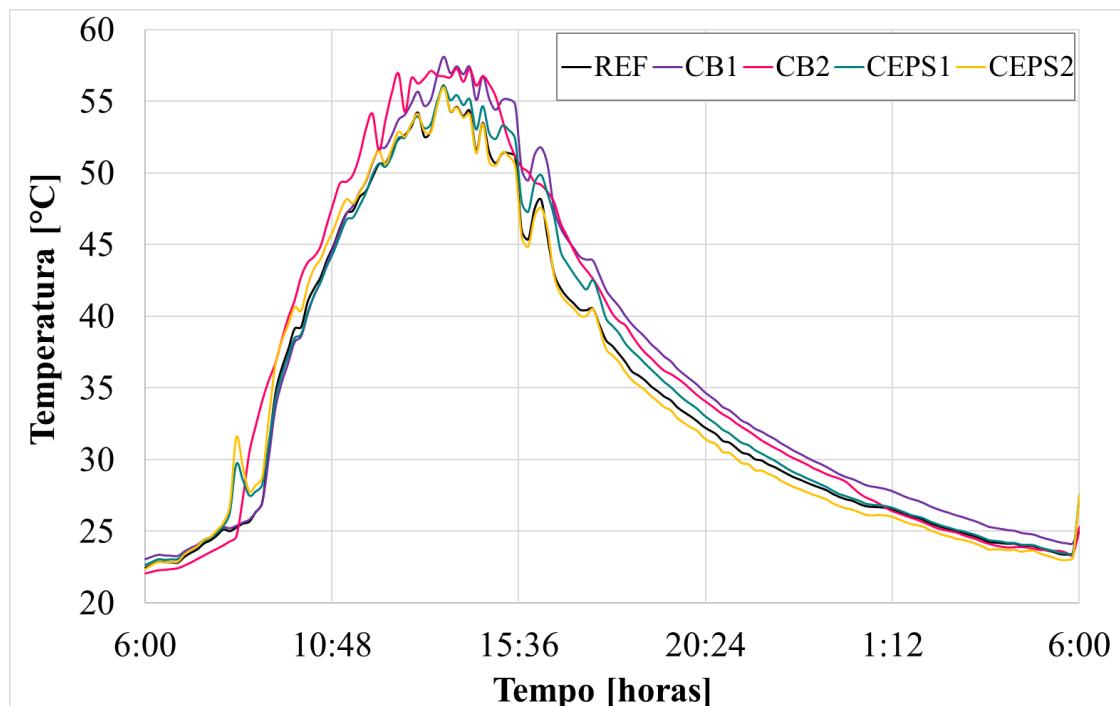
Tabela 35 - Resumo da análise de variância para condutividade térmica

Análise de variância: condutividade térmica				
COMPARAÇÃO	F	valor-P	F crítico	IGUALDADE?
OS 5 TRAÇOS	81,7142	0,000000	3,4780497	NÃO
REF/CB1	381,2855	0,000041	7,7086474	NÃO
REF/CB2	815,7528	0,000009	7,7086474	NÃO
CB1/CB2	4,735845	0,095148	7,7086474	SIM
REF/CEPS1	74,10662	0,001001	7,7086474	NÃO
REF/CEPS2	98,73409	0,000576	7,7086474	NÃO
CEPS1/CEPS2	17,47562	0,013914	7,7086474	NÃO

4.2.8 Ensaio térmico

As temperaturas para a face externa, face interna e no interior do compartimento de ensaio foram medidas por 24 horas conforme procedimento descrito em 3.3.3.9. As Figuras 56, 57 e 58 apresentam as temperaturas nos diferentes termopares para os concretos estudados.

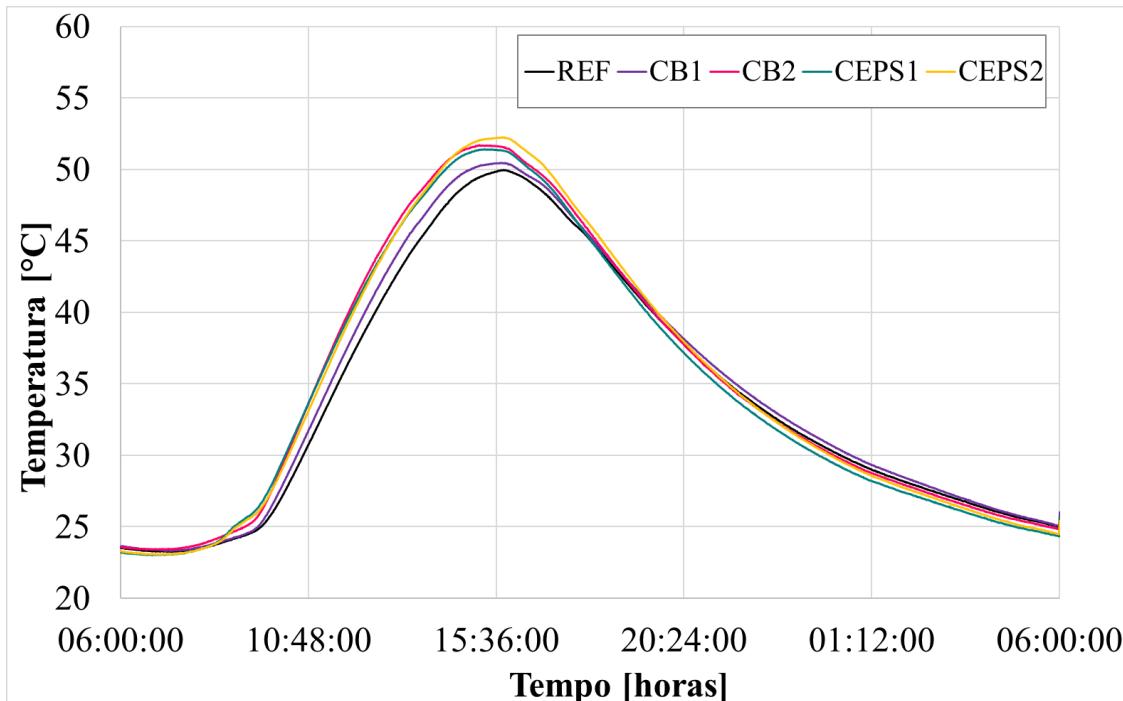
Figura 56 - Temperatura na face externa



A Figura 56 mostra as temperaturas nas faces exteriores das diferentes placas de concreto. Os traços CB1 e CB2 atingem as maiores temperaturas, este comportamento pode ser

resultado da cor mais escura destes concretos devido à presença das fibras de borracha de pneu. No período de aumento de temperatura, entre 9:00 às 15:50, o comportamento dos demais traços é semelhante.

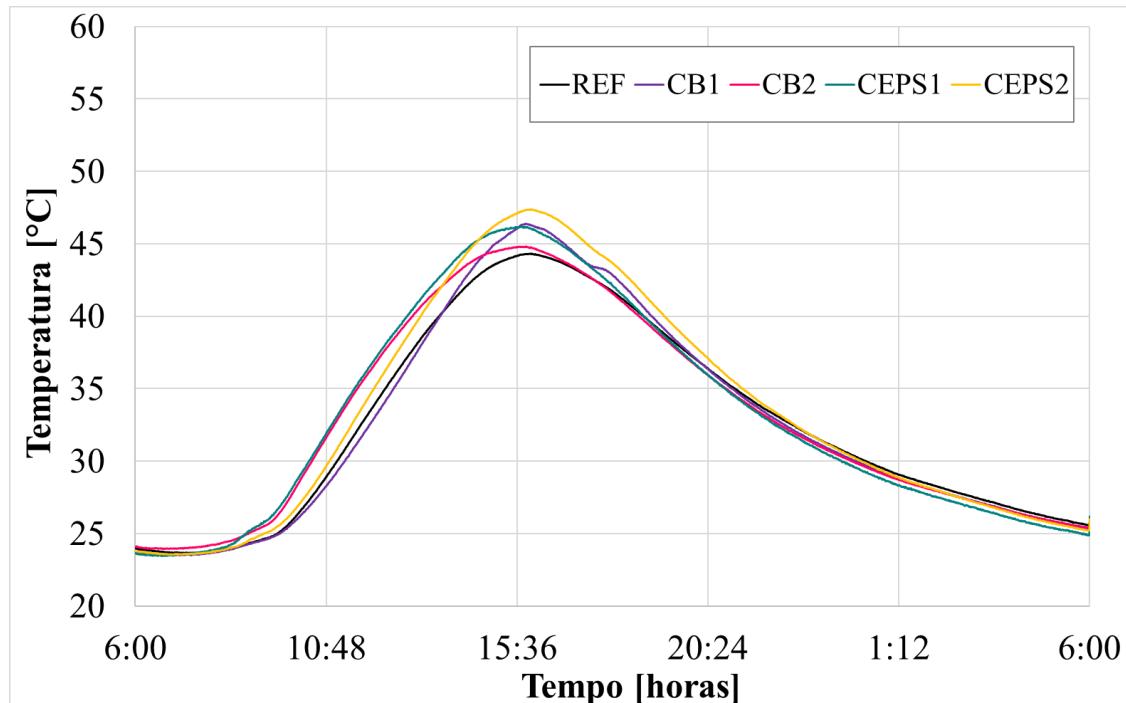
Figura 57 - Temperatura na face interna



Pela Figura 57 verifica-se que, na face interior das amostras, para o intervalo do dia com as maiores temperaturas, o traço REF foi o que apresentou menor temperatura entre os traços. O CEPS2 registrou o maior pico de temperatura. CEPS1 e CB1 apresentaram temperaturas parecidas. O traço CB2 se aproximou dos valores do traço REF. A maior diferença de temperatura aconteceu às 12:31, entre as placas CB2 e REF, no valor de 3,67°C.

Em uma comparação entre os traços com o mesmo tipo de substituição percebe-se que, para o período de aumento de temperatura, a superfície inferior da placa CB2 registrou temperatura média 1,72°C mais elevada que o traço CB1. Com relação ao traço REF a diferença de temperatura média é de 2,68°C para CB2 e de 0,96°C para CB1. Entre os traços com EPS triturado as placas apresentaram média de temperatura muito semelhantes, com diferença de 0,03°C entre elas. Com relação ao traço REF foi observada uma diferença de 2,50°C e 2,46°C para CEPS1 e CEPS2, respectivamente.

Figura 58 - Temperatura no interior do compartimento



Observa-se na Figura 58 que, no termopar localizado no fundo do compartimento de ensaio, o comportamento é semelhante ao observado no termopar da face inferior. Os traços REF e CB2 registraram as menores temperaturas. Os traços CB1 e CEPS1 apresentaram temperaturas de pico próximas, mas o traço CB1 apresenta um certo atraso na elevação de temperatura. O traço CEPS2 apresenta a maior temperatura de pico. A maior diferença de temperatura em relação ao traço REF acontece às 11:20 para a placa CEPS1, no valor de 3,23 °C.

O traço CB2 apresentou maior capacidade de isolamento em relação ao traço CB1. Apesar de CB2 registrar maior média de temperatura no período de aquecimento, entre 9:00 e 15:50, o pico de temperatura de CB1 é mais elevado. Comportamento semelhante é observado entre os traços com EPS triturado, o traço CEPS1 apresenta maior temperatura média no período de aquecimento, mas é o CEPS2 que registra o maior pico de temperatura.

A Tabela 36 apresenta uma relação das temperaturas máximas registradas pelos termopares e em qual horário este registro ocorreu.

Tabela 36 - Relação entre maior temperatura e seu respectivo horário de registro

TRAÇO	SENSOR	T (°C)	Hora
REF	T. face externa	56,64	13:48:00
	T. face interna	49,97	15:47:10
	T. interior caixa	44,33	15:57:10
CB1	T. face externa	58,57	13:48:00
	T. face interna	50,47	15:43:00
	T. interior caixa	46,42	15:48:50
CB2	T. face externa	57,95	14:01:20
	T. face interna	51,69	15:10:30
	T. interior caixa	44,84	15:49:40
CEPS1	T. face externa	56,67	13:48:00
	T. face interna	51,38	15:28:00
	T. interior caixa	46,21	15:43:50
CEPS2	T. face externa	56,77	13:43:00
	T. face interna	52,24	15:48:00
	T. interior caixa	47,36	15:56:20

A presença de resíduos em substituição ao agregado natural influenciou o comportamento térmico dos concretos. A maior diferença de temperaturas máximas registradas pelo termopar da face superior em comparação ao termopar do fundo do compartimento de ensaio foi observada na placa de traço CB2 (13,11°C). Em sequência decrescente, REF com 12,31°C; CB1 com 12,15°C; CEPS1 com 10,46°C e CEPS2 com 9,40°C. O maior intervalo de tempo entre o registro das maiores temperaturas registradas na superfície interna e no fundo do compartimento de ensaio foi observado no traço CEPS2, com um atraso de 2 h 13 min.

A partir de uma comparação entre os resultados dos traços com borracha de pneu e o REF, percebe-se que o traço CB2 apresentou maior capacidade de isolamento que o traço de referência (Tabela 36). No entanto, o mesmo comportamento não foi verificado para CB1. Com relação ao intervalo de tempo registrado entre o pico de temperatura na face exterior e interior o concreto REF apresentou maior atraso que os traços com borracha de pneu (1 h 59 min). CB1 apresentou um intervalo de 1h 55min, maior que o observado em CB2 (1h 9min).

Quando se trata dos traços com EPS triturado, observa-se que o REF apresentou melhor isolamento térmico que CEPS1 e CEPS2. Porém, o CEPS2 apresentou maior atraso que REF (2 h 05 min). Entre os dois traços com EPS, o CEPS1 apresentou maior capacidade de isolamento que CEPS2, mas registrou um menor atraso (1h 40 min).

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA: PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO, MECÂNICAS E FÍSICAS DOS CONCRETOS

Nesta seção será apresentada uma análise das propriedades mecânicas e a relação entre as propriedades físicas para a caracterizar o comportamento higrotérmico dos diferentes concretos com base nos resultados apresentados nas seções anteriores.

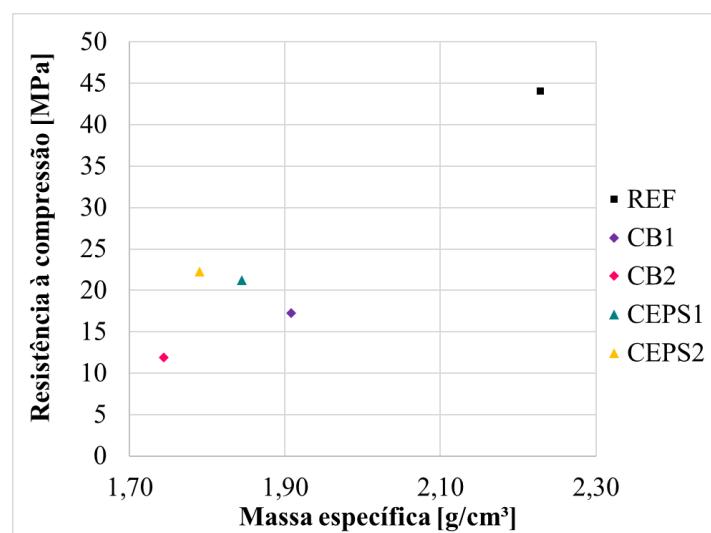
A partir dos resultados obtidos para os concretos no estado fresco observa-se que a trabalhabilidade foi influenciada pela incorporação de resíduos. Entre os traços com borracha de pneu não foi observada redução na fluidez com o aumento do teor de incorporação ao contrário do verificado por Albuquerque *et al.* (2004); Albano *et al.* (2005); Sukontasukkul e Chaikaew (2006). Entre os traços com EPS triturado não foi observada grande diferença na fluidez entre um traço e outro.

Os resultados relacionados a resistência mecânica foram semelhantes aos encontrados na literatura, em que traços com substituição de borracha de pneu e EPS apresentaram redução de resistência à compressão e à tração. Este comportamento é resultado de uma série de fatores, como por exemplo: a baixa resistência mecânica dos resíduos empregados como agregados, o enfraquecimento da zona de transição e o aumento do teor de ar aprisionado (ALBUQUERQUE, 2009; PELISSER *et al.*, 2011; SILVEIRA *et al.*, 2016; THOMAS e GUPTA, 2016; CARDOSO e CABRAL, 2017; MEDINA *et al.*, 2017; TANG *et al.*, 2008; SAYADI *et al.* 2016; BABU e BABU, 2002; MILED, SAB e LE ROY, 2006; BABU, BABU e TIONG-HUAN, 2006; RANJBAR E MOUSAVI, 2013; CARVALHO 2017).

Na Figura 59 estão relacionados os resultados de massa específica e resistência à compressão. Observa-se que para os traços CB1 e CB2 a tendência de redução da resistência para menores valores de massa específica foi confirmada. Nota-se que o traço

CB2, com 15% de partículas de borracha, apresentou massa específica muito menor que a do traço CB1, com 12,5% de borracha de pneu. Estudos anteriores indicam que concretos com borracha de pneu tendem a sofrer uma drástica redução da massa específica com o aumento do teor de partículas de borracha, resultado da diferença entre as massas específicas dos materiais e do aumento do teor de ar incorporado (ALBANO *et al.*, 2005; ALBUQUERQUE, 2009).

Figura 59 - Relação entre massa específica e resistência à compressão aos 28 dias de idade

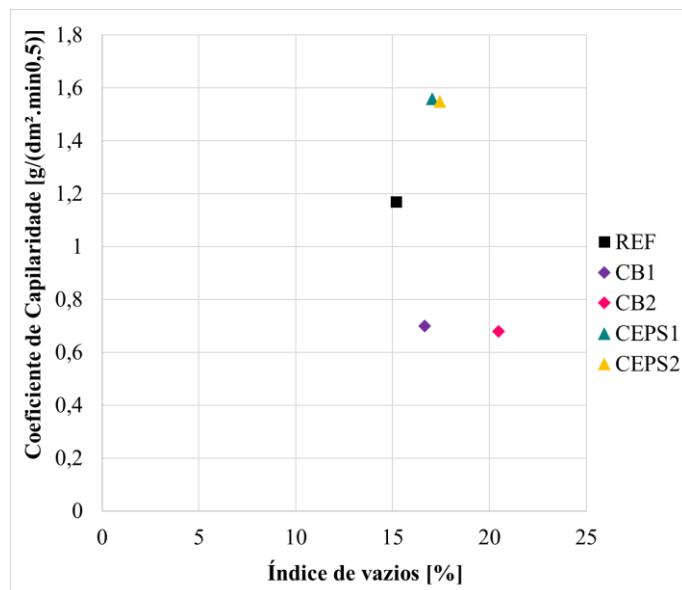


Entre os traços CEPS1 e CEPS2 não foi observada a mesma tendência. Embora a massa específica do traço com maior volume de EPS tenha sido menor, os resultados para resistência à compressão são praticamente iguais, contrariando resultados encontrados na literatura em que a resistência foi menor para maiores teores de incorporação de EPS (BABU e TIONG-HUAN, 2006; RANJBAR e MOUSAVI, 2013).

Analizando os traços CB1 e CB2, que não atingiram a resistência mínima, nota-se que o incremento de 2,5% de substituição provocou uma redução de 30% na resistência à compressão. A partir destes resultados entende-se que ajustes no traço relacionados ao teor de substituição, relação a/c e teor de aditivo poderiam resultar em dosagens que utilizem este tipo de resíduo com resistência suficiente para aplicação em paredes de concretos.

Nesta pesquisa, o estudo da porosidade se limitou ao volume global de poros permeáveis a água líquida, indicado pelo índice de vazios dos materiais. Observa-se que o traço CB1 tem volume de poros menor que o CB2, enquanto os traços CEPS1 e CEPS2 possuem volume de poros muito semelhantes (Figura 60). O traço REF por sua vez apresenta o menor índice de vazios.

Figura 60 - Relação do índice de vazios com o coeficiente de capilaridade



Não foi observada uma relação direta entre o índice de vazios e o coeficiente de capilaridade. O concreto REF apresentou coeficiente de capilaridade intermediário entre os traços com borracha de pneu e os traços com EPS triturado. Os concretos com borracha de pneu apresentaram coeficiente de capilaridade semelhantes, mesmo com índice de vazios distintos. Os concretos com EPS tem comportamento parecido para ambas propriedades. O comportamento independente entre o índice de vazios e o coeficiente de capilaridade evidencia que o transporte de água depende da dimensão, conectividade, distribuição dos poros dos materiais constituintes e não somente do volume de poros.

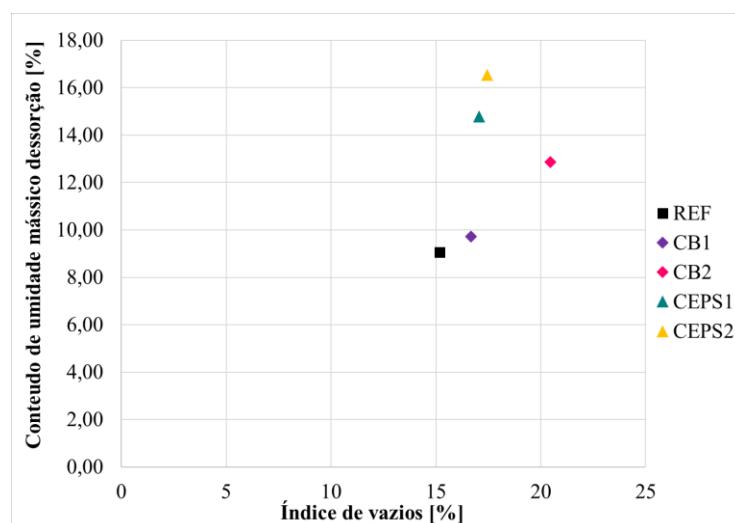
Os resultados de absorção capilar dos concretos com borracha de pneu, comparados ao concreto de referência, confirmam tendência observada nos estudos de Thomas e Gupta (2016), em que foi observada uma redução na absorção de água para misturas com borracha. Estudos anteriores apontaram maior migração e absorção de umidade para

maiores volumes de EPS em concretos (BABU, BABU E TIONG-HUAN, 2006; SADMOMTAZI *et al.* 2012; SCHACKOW *et al.*, 2014). Embora a diferença de absorção de água por capilaridade entre os dois traços de EPS tenha sido muito pequena, os resultados corroboram com os trabalhos de Chen, Liu e Chen (2010).

Além disso, estudos relacionados a retração no concreto com EPS apontaram que um incremento de EPS no concreto provoca um aumento na retração, causando microfissuras no concreto, principalmente para teores de substituição mais elevados ($>60\%$) (BABU, BABU e TIONG-HUAN, 2006; CHEN, LIU e CHEN, 2010; RANJBAR e MOUSAVI, 2013). A presença destas microfissuras pode influenciar a absorção capilar destes concretos.

Em relação à higroscopicidade, ainda que não seja possível definir a dimensão dos poros a partir do índice de vazios, observou-se que entre traços com o mesmo resíduo aqueles que apresentaram o maior conteúdo de umidade higroscópica para $UR=95\%$ (CB2 e CEPS2) são também os que têm maiores índices de vazios. O traço REF apresentou menor conteúdo de umidade e menor índice de vazios (Figura 61).

Figura 61 - Relação do conteúdo de umidade medido na dessorção com o índice de vazios



O comportamento global das isotermas de sorção está diretamente ligado à estrutura porosa do material, ou seja, à distribuição de superfícies e volumes dos poros em função de seus raios (FERNANDES, 1990). Como a distribuição e as dimensões dos poros não foram definidas neste estudo, as isotermas de dessorção dos concretos são aqui analisadas de forma qualitativa. Nas curvas apresentadas no item 4.2.4 é possível distinguir três regiões:

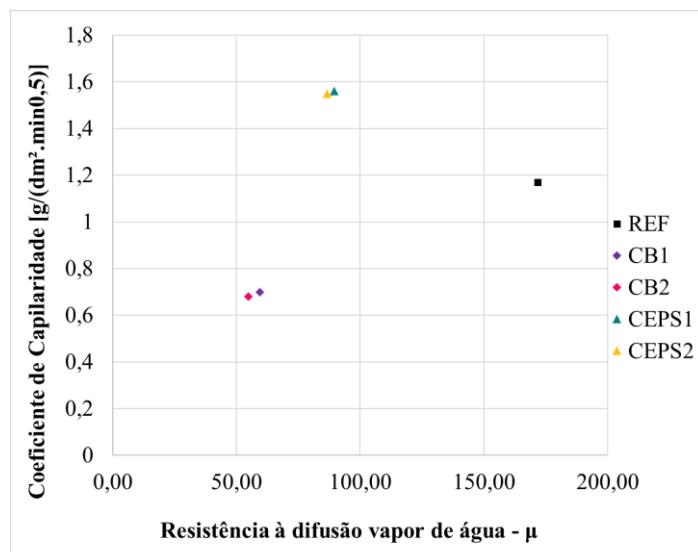
- I- Equivale à fase em que a transferência de umidade é governada principalmente pela difusão de vapor de água, o crescimento no conteúdo de umidade corresponde a um aumento na espessura da camada de água adsorvida e não depende do tamanho dos poros. Por essa razão todos os traços avaliados se comportam de forma semelhante, e esta região está localizada entre 0 e 16% de umidade relativa;
- II- Nesta fase, dois modos de transferência de umidade ocorrem simultaneamente: condensação capilar e difusão de vapor de água. A condensação capilar ocorre em alguns poros, mas existem outros que são suficientemente grandes para que se observe apenas o aumento da camada adsorvida. Nos concretos estudados, esta região está localizada entre 16% e aproximadamente 80% de umidade relativa;
- III- Em umidades relativas acima de 80% a transferência de umidade nos concretos avaliados neste estudo, é governada principalmente pela condensação capilar;

Na região das curvas em que está localizada a segunda fase (Figura 50) é possível observar que, para umidade relativa próxima a 60%, a inclinação das curvas dos traços CB1 e CB2 se alteram e estes traços passam a apresentar maior conteúdo de umidade que o traço de referência. Como nesta fase já ocorre a condensação capilar, este resultado indica que a maior capacidade de armazenamento de umidade dos traços com borracha pode ser consequência de um maior volume de poros. Tendência semelhante é observada entre os traços CEPS1 e CEPS2.

A partir da inclinação das curvas na região III (Figura 49) é possível deduzir que os traços CB1 e REF têm menor capacidade de armazenamento de umidade, pois, apresentam curvas com inclinação menos acentuada. O comportamento dos traços CB2, CEPS1 e CEPS2 dão indícios de maior higroscopicidade.

Assim como no transporte de água líquida, a difusão de vapor de água depende da porosidade e conectividade entre os poros (RATO, 2006). Então, para concretos convencionais (com agregados naturais e sem aditivos hidrofugantes), uma menor permeabilidade à água líquida corresponde a uma menor permeabilidade ao vapor de água. Na Figura 62 são relacionados os valores de resistência à difusão de vapor de água e coeficiente de capilaridade.

Figura 62 - Relação entre a resistência à difusão de vapor e o coeficiente de capilaridade



Em uma comparação com o traço de referência nota-se que os traços CB1 e CB2 são mais permeáveis ao vapor de água, no entanto, estes concretos tem os menores coeficientes de capilaridade. Este comportamento reforça a hipótese de que, devido a sua característica hidrofóbica, as partículas de borracha de pneu reduzem a absorção capilar funcionando como uma espécie de barreira que impede a ascensão da água líquida.

Quando esta análise comparativa é aplicada aos traços com EPS triturado, percebe-se que estes concretos são mais permeáveis ao vapor de água e possuem maiores coeficientes de capilaridade que o traço REF. Neste caso, apesar do EPS ser um material de baixa hidrofilicidade, as cavidades presentes no interior dos grãos podem estar facilitando a absorção capilar. Outro fator que pode estar influenciando a maior absorção capilar dos traços com EPS é a absorção de água observado no próprio EPS triturado (300%).

A permeabilidade ao vapor e a absorção de água também podem ser relacionadas a secagem, pois as duas propriedades envolvem transporte de água líquida e vapor (PÁSCOA, 2012). Uma maior quantidade de poros pequenos dificulta a permeabilidade ao vapor de água, e a evaporação da água condensada nesses poros.

No ensaio de secagem, os traços atingiram o equilíbrio higroscópico em intervalos de tempo diferente, os traços de borracha levaram o menor tempo, seguido do traço de referência, os traços com EPS triturado precisaram de um período maior. Diante disso, para efeito de comparação o índice de secagem foi calculado tomando como referência o menor tempo de estabilização entre os concretos estudados.

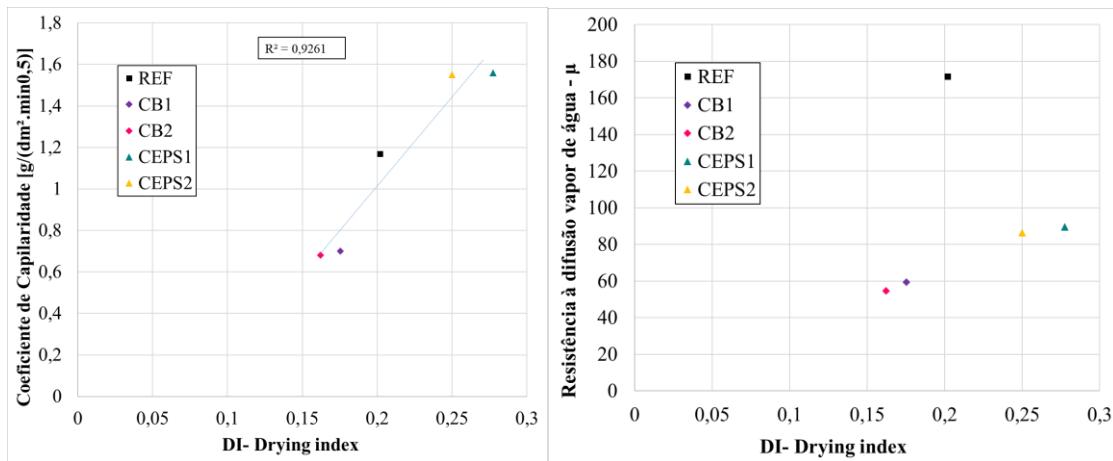
Em uma relação entre o índice de secagem, o coeficiente de capilaridade e a resistência à difusão de vapor (Figura 63), observou-se que, entre os concretos estudados, os traços com borracha de pneu que obtiveram menores valores de DI, portanto maior facilidade de secagem. O transporte de água líquida por capilaridade é fundamental para o processo de secagem, porém estes concretos também apresentaram os menores coeficientes de capilaridade. Nos traços com EPS triturado, ainda que apresentem a maior absorção capilar, os valores de DI são maiores que o do traço de referência. Assim percebe-se que os valores encontrados contrariam o fenômeno esperado em concretos convencionais: maior capilaridade resulta em menor DI.

Quando o índice de secagem é comparado à permeabilidade ao vapor de água percebe-se que os traços mais permeáveis ao vapor (CB2 e CB1) apresentaram menores índices de secagem. O traço REF com maior resistência à difusão de vapor apresentou menor índice de secagem que os traços CEPS1 e CEPS2. O que indica que a permeabilidade ao vapor

de água tem grande influência no processo de secagem destes concretos, mas a relação entre a secagem e a permeabilidade ao vapor não é direta.

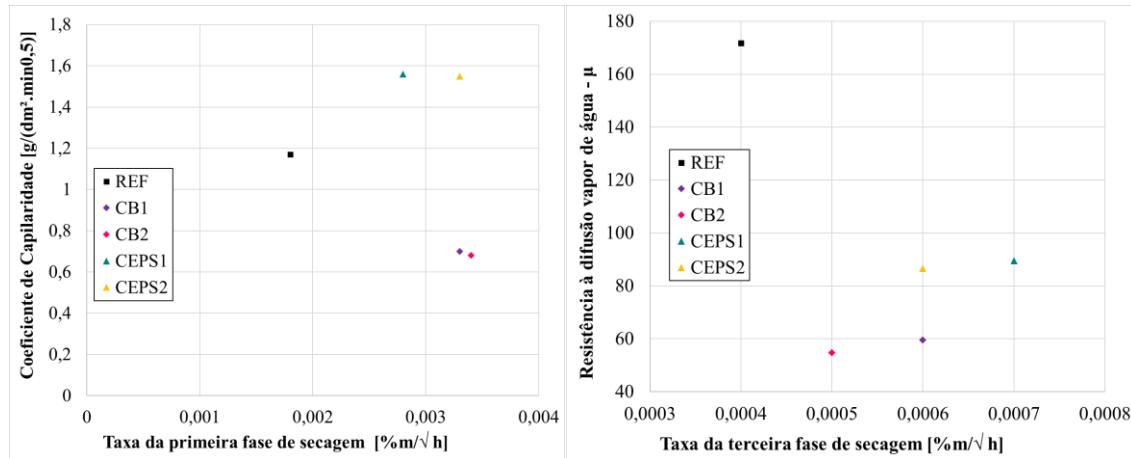
Nestes concretos o comportamento no fenômeno de secagem depende da capilaridade e da permeabilidade ao vapor, mas trata-se de uma combinação destas propriedades e de outras características dos materiais como a estrutura porosa, higroscopicidade dos agregados e das condições de temperatura e umidade. A borracha de pneu tem característica hidrofóbica, percebe-se que os concretos com este resíduo são permeáveis ao vapor, tem baixa absorção capilar, mas o fenômeno de secagem ocorre mais facilmente nestes concretos. Os concretos com EPS triturado, apesar da alta capilaridade e da permeabilidade ao vapor de água, tem maior dificuldade na secagem. Neste caso a característica do resíduo também pode estar influenciando, como foi verificado anteriormente, o EPS triturado absorve água.

Figura 63 - Relação entre índice de secagem e coeficiente de capilaridade



Não foi possível estabelecer uma relação direta entre a taxa de secagem inicial e o coeficiente de capilaridade, apesar de ambos representarem o transporte de água líquida. Observa-se que, nos concretos com borracha de pneu, no processo de molhagem (absorção capilar), partindo da condição seca, a borracha desempenha uma função de barreira hidrofóbica, dificultando a ascensão capilar. No entanto, no processo de secagem que parte da condição saturada, mas também depende do transporte de água líquida por capilaridade, não foi observada uma dificuldade imposta pela borracha de pneu.

Figura 64 - Relação entre taxa de secagem, coeficiente de capilaridade e resistência à difusão de vapor.

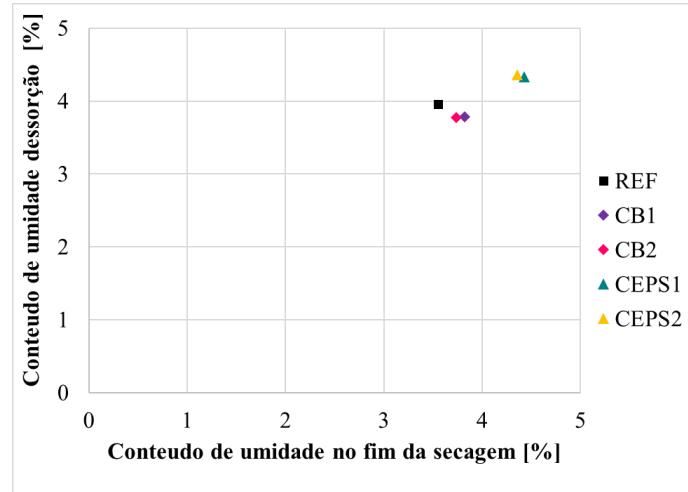


Então, embora os traços com borracha de pneu e EPS triturado tenham comportamento diferente para absorção capilar, as taxas de secagem são muito próximas. O traço de REF apresenta menor velocidade de secagem que os traços com resíduo (Figura 64). Na relação entre a taxa de secagem da terceira fase do ensaio e o fator de resistência à difusão de vapor (Figura 64), de um modo geral as velocidades nesta fase são muito parecidas. Ainda assim, observa-se que o concreto REF tem a menor permeabilidade ao vapor de água e menor velocidade de secagem. Os concretos com borracha de pneu e EPS são mais permeáveis e apresentam maiores velocidades.

A quantidade de umidade retida ao final do ensaio de secagem (equilíbrio higroscópico) depende da estrutura dos poros dos concretos e da umidade relativa em que o ensaio é realizado. Para um ambiente com $UR=50\%$, o conteúdo de umidade mássico é maior em concretos com poros de menor dimensão, a Figura 65 apresenta a relação entre o conteúdo de umidade ao fim do ensaio de secagem e o conteúdo de umidade higroscópico para o ponto de $UR=50\%$ da isoterma de dessorção.

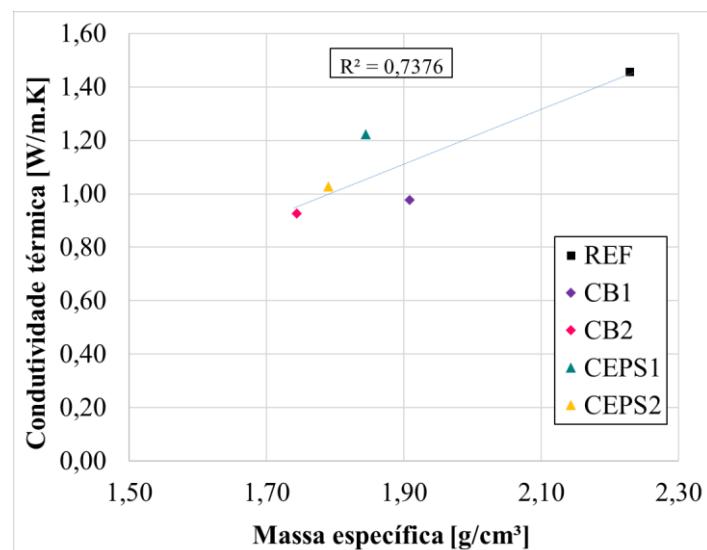
A proximidade entre os valores experimentais do fim da secagem e conteúdo de umidade da isoterma ajustada pelo modelo GAB, amplamente utilizado na literatura, permite concluir que os métodos empregados nos ensaios de secagem e dessorção são adequados para o estudo de concretos.

Figura 65 - Relação entre o conteúdo de umidade ao fim da secagem e o conteúdo de umidade medido na dessorção a UR=50%.



A Figura 66 apresenta uma relação entre a massa específica dos concretos estudados com os valores de condutividade térmica. O traço REF apresenta os maiores valores de massa específica e de condutividade térmica. O traço CB2 tem menor massa específica e menor condutividade térmica. Diante disto, percebe-se que a tendência encontrada na literatura foi confirmada, a redução da massa específica influencia os valores de condutividade térmica que também diminuem (PIETROBON E PIETROBON, 1999; DEMIRBOGA, 2007; LAMBERTS *et al.*, 2013). Esta tendência foi observada entre os traços com o mesmo tipo de substituição.

Figura 66 - Relação entre massa específica e condutividade térmica



Com os resultados obtidos no ensaio de condutividade térmica e a espessura usual de paredes de concreto construídas na região de Uberlândia (0,10 m), foi obtida a resistência térmica de superfície a superfície (R_t). Então, somados os valores de resistências superficiais externas e internas, com os valores normativos de 0,04 m².K/W e 0,17 m².K/W (Figura 40) foram determinadas a resistência térmica total (R_T) e, a partir deste valor, a transmitância térmica (Tabela 37), conforme ABNT NBR 15220:2005.

Tabela 37 - Valores de resistência e transmitância térmica dos concretos estudados

TIPO	R _t (m ² .K/W)	R _T (m ² .K/W)	U (W/m ² .K)
REF	0,07	0,28	3,59
CB1	0,10	0,31	3,20
CB2	0,11	0,32	3,15
CEPS1	0,08	0,29	3,43
CEPS2	0,10	0,31	3,25

O requisito de desempenho térmico para sistema de vedação externas de edificações que trata da adequação de paredes externas estabelece que estas paredes devem proporcionar pelo menos desempenho térmico mínimo de transmitância térmica para cada zona bioclimática. Os valores obtidos estão de acordo com as especificações para uma absorção (α) $\leq 0,6$ e ZB de 3 a 8, menores que 3,7 W/m².K. Porém, para uma absorção (α) $> 0,6$ esses valores não atendem às normas, pois, são maiores que 2,5 W/m².K.

De acordo com a Tabela B.2 da ABNT NBR 15220:2005 os valores de absorção do concreto aparente estão entre 0,65/0,80. Diante disto, é possível afirmar que, para os concretos estudados, o sistema construtivo de paredes de concreto, sem uma camada de pintura exterior de cor clara, não atenderia ao requisito de adequação de paredes externas da ABNT NBR 15575-4.

Diante dos valores de condutividade térmica dos concretos estudados, era esperado que os concretos com menor condutividade térmica apresentassem melhor desempenho com

relação ao isolamento térmico. Porém, este comportamento não foi observado nos resultados do ensaio térmico. Apesar de o traço CB1 apresentar baixa condutividade térmica e maior diferença entre os picos de temperaturas da superfície externa e interna do compartimento ($8,10\text{ }^{\circ}\text{C}$), a mesma relação não foi observada nos outros traços. O traço REF apresenta a segunda maior diferença de ($6,66\text{ }^{\circ}\text{C}$), mas é o concreto mais condutor. Entre os traços com EPS triturado o CEPS1 tem maior condutividade térmica e registrou uma diferença de temperatura maior ($5,29\text{ }^{\circ}\text{C}$) que o traço CEPS2 ($4,53\text{ }^{\circ}\text{C}$).

A ABNT NBR 15220-2:2005 apresenta valores de calor específico para intervalos de massa específica de alguns materiais de construção civil. O valor de calor específico para o concreto é de $1,00\text{ [kJ/(kg.K)]}$. Com este dado, foi possível calcular a capacidade térmica (C) e o atraso térmico (ϕ) para os concretos estudados (Tabela 32), conforme ABNT NBR 15220:2005.

Quanto ao atraso térmico, o intervalo de tempo entre as maiores temperaturas registradas nas superfícies externas e internas das placas de concreto do ensaio térmico não apresentou uma relação direta com o atraso térmico calculado pela metodologia proposta pela ABNT NBR 15220:2005 (Tabela 38). Observa-se que traços com borracha, de menor condutividade térmica, tem maior atraso térmico e, portanto, apresentam melhor desempenho térmico entre os concretos.

Tabela 38 - Capacidade térmica e atraso térmico dos concretos estudados

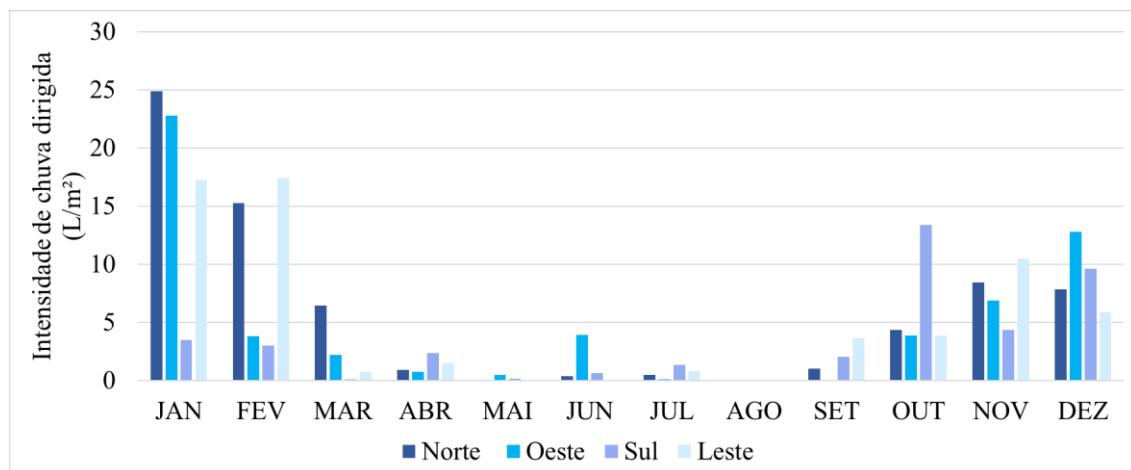
TIPO	Massa específica (kg/m^3)	C ($\text{kJ/m}^2\text{.K}$)	ϕ (horas)	Δ Tempo (horas)	Ensaio térmico
				Δ Tempo (horas)	
REF	2229	223	1,35	1,98	
CB1	1908	191	1,56	1,92	
CB2	1744	174	1,53	1,15	
CEPS1	1844	184	1,39	1,67	
CEPS2	1790	179	1,48	2,08	

5. RESULTADOS E ANÁLISES: SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA

5.1 PÓS-PROCESSAMENTO

O teor de umidade dos materiais é resultado de ação da água líquida e na forma de vapor. Então, a chuva dirigida e a umidade relativa são duas fontes de umidade externas importantes para o comportamento de paredes de concreto. A intensidade de chuva incidente em cada orientação está apresentada na Figura 67. Estes valores foram obtidos a partir dos dados de saída da simulação e correspondem ao total acumulado mensal, baseado no arquivo climático TMY inserido no programa WUFI como dado de entrada nas simulações higrotérmicas.

Figura 67 - Chuva dirigida - acumulada mensal (L/m^2)

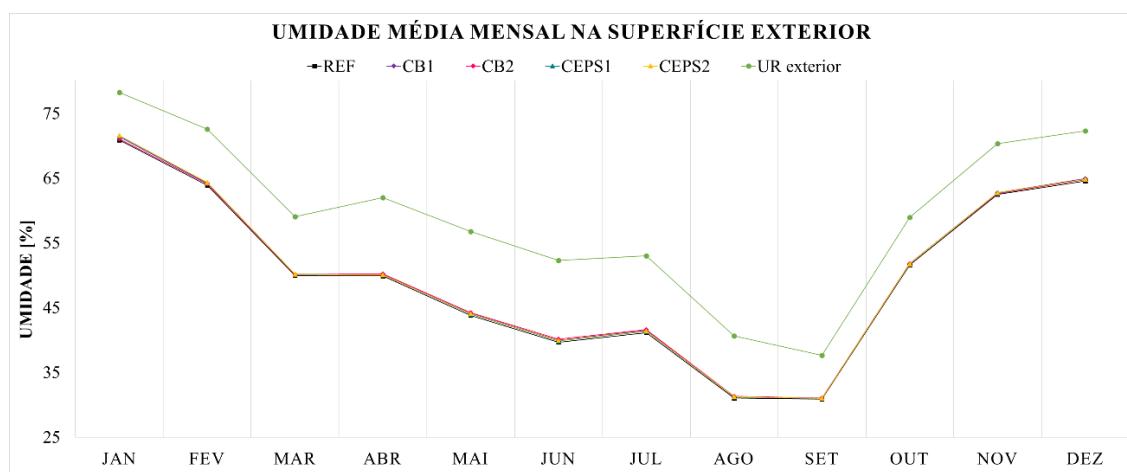


É possível identificar dois períodos distintos, um que ocorre de abril a setembro caracterizado como seco e outro chuvoso de outubro a março. Em relação ao total anual de chuva dirigida a orientação Norte apresenta maior incidência ($70,09 \text{ L/m}^2$) e pode ser considerada como a orientação crítica. Diante disto, são apresentados os resultados obtidos para a orientação Norte para os diferentes concretos estudados.

Nos dados de saída, a umidade registrada nas posições de monitoramento (Figura 38) são dadas em termos de umidade relativa (%) no material. A condição de umidade no interior dos poros satisfaz a uma dada condição de equilíbrio, tendo em vista sua exposição à UR do ar. Portanto, a umidade monitorada corresponde a UR do ar presente nos poros dos materiais para aquele ponto (WUFI, 2013).

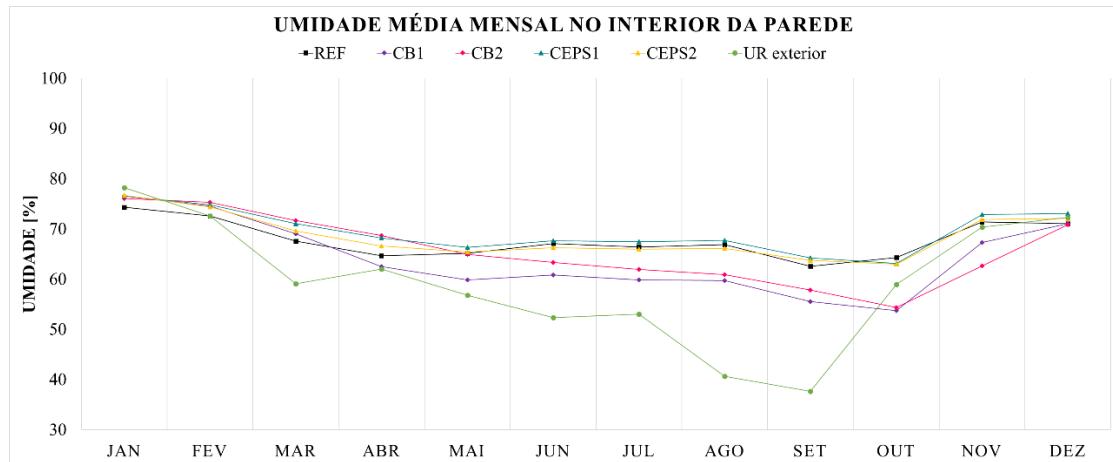
A comparação entre a UR do ar exterior e a umidade observada na superfície exterior para os diferentes traços é apresentada na Figura 68. A umidade da superfície exterior se refere aos valores de umidade relativa observados na posição de monitoramento 1 (Figura 38) para os diferentes traços. Observa-se um comportamento muito semelhante entre os diferentes traços que acompanha a tendência da UR do ar exterior. Em todos os meses a umidade na superfície exterior das paredes de concreto é menor que a UR do ar.

Figura 68 - Média mensal da UR na superfície exterior das paredes de concreto (%)



Os valores de UR da posição de monitoramento 2, localizada na posição central da parede de concreto, são comparados à UR do ar (Figura 69). Neste caso, percebe-se a umidade no interior da parede de concreto REF é maior que a UR do ar ao longo do ano, com exceção dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Para os traços CB1 e CB2, nos meses de janeiro, outubro, novembro e dezembro, a UR do ar foi superior à observada no interior das paredes de concreto. Nos traços CEPS1 e CEPS2, a UR do ar exterior é maior que a do interior da parede de concreto apenas em janeiro.

Figura 69 - Média mensal da UR no interior das paredes de concreto (%)

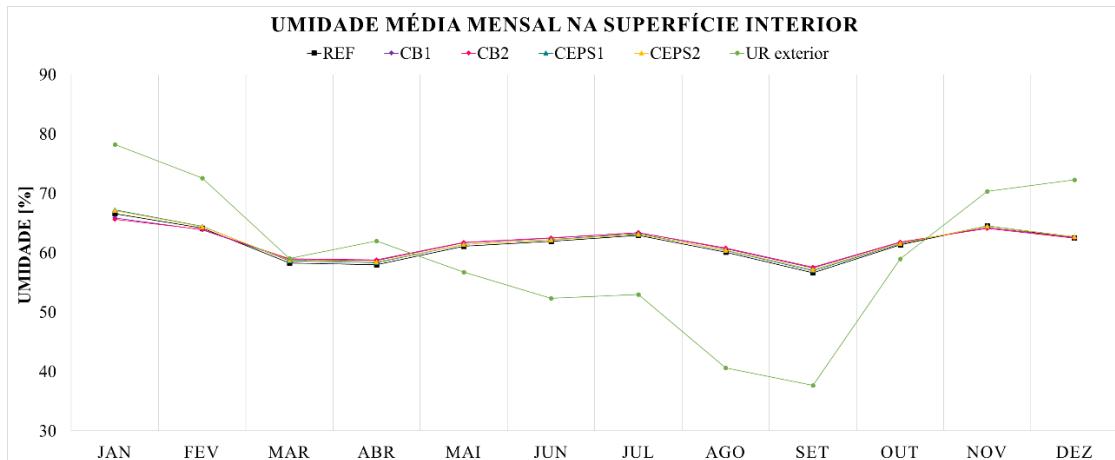


Entre os traços com o mesmo tipo de substituição é possível notar que no maior período do ano a parede com concreto CB2 tem umidade mais elevada que CB1, com exceção dos meses de janeiro, novembro e dezembro. Os traços CEPS1 e CEPS2 tem comportamento muito parecido, mas os maiores valores de umidade são observados no CEPS1.

Outra observação importante é a de que, ao longo do ano, as paredes de concreto com borracha de pneu registram os menores valores de umidade em seu interior. Com exceção dos meses de janeiro e fevereiro em que os menores valores apresentados se referem a paredes com concreto de referência.

Para a superfície interior das paredes de concreto (posição de monitoramento 3) observou-se que comportamento dos traços é semelhante entre eles (Figura 70). No período entre maio e outubro, a umidade da superfície interior é maior que a UR do ar exterior. Ressalta-se que para as simulações higrotérmicas o clima interior é resultado de uma simplificação feita pelo programa a partir do clima exterior, desconsiderando temperatura e umidade provenientes do uso e ocupação. Por esta razão, as comparações foram realizadas a partir da UR do ar exterior.

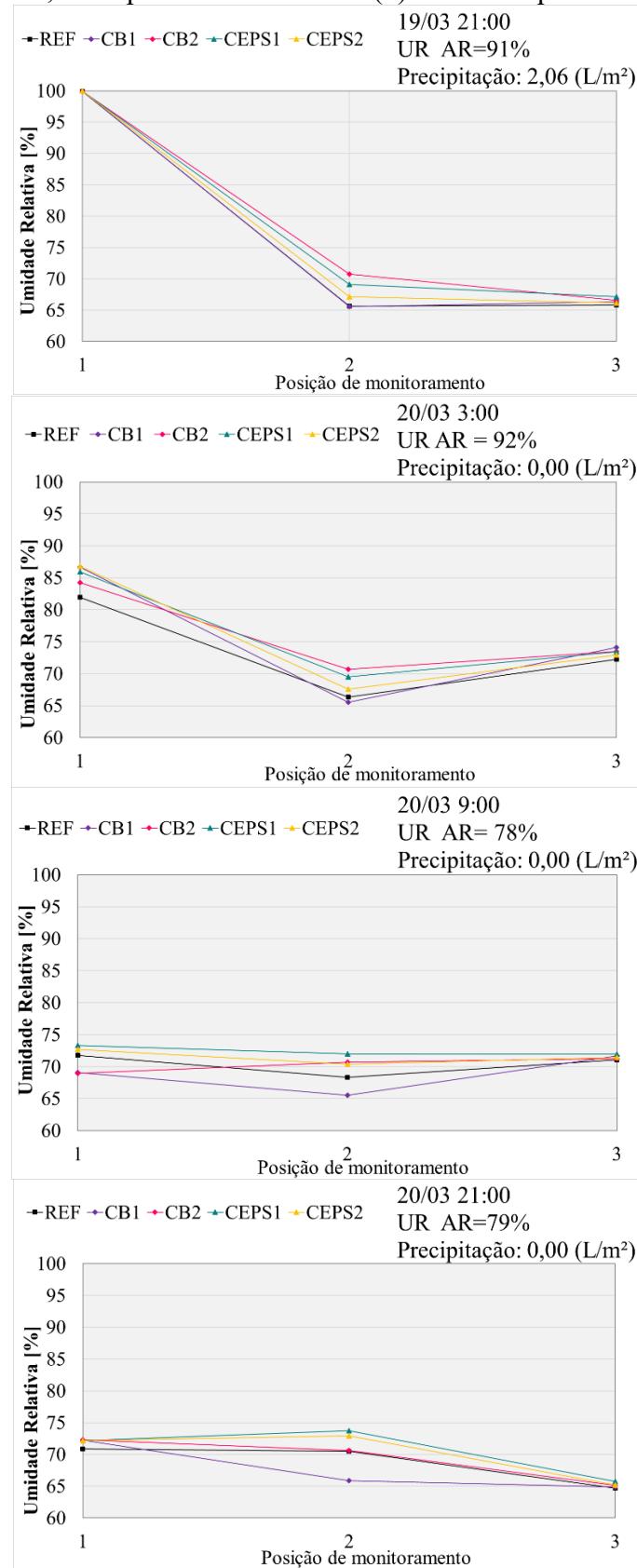
Figura 70 - Média mensal da UR da superfície interior das paredes de concreto (%)



A Figura 71 apresenta os perfis de umidade para paredes com os diferentes concretos no dia mais chuvoso para a hora de maior chuva, 6 h, 12h e 24h depois da hora de maior chuva (orientação Norte). De acordo com a simulação 19/03 é o dia com maior chuva (5,71 L/m²).

O perfil de umidade na hora da chuva (Figura 71-a) mostra que na superfície externa quase não há diferença entre os concretos, as umidades registradas estão entre 99,91% (REF) e 99,97% (CEPS1 e CEPS2). Na posição de monitoramento 2 (interior da parede) a parede de concreto CB2 foi a que apresentou maior umidade (70,74%), seguida dos concretos CEPS1 (69,12%) e CEPS2 (67,17%). No interior das paredes, o comportamento dos concretos REF e CB1 é muito parecido, com umidade de 65,63% e 65,58%, respectivamente. Na superfície interna também não foi observada grande diferença de umidade entre os concretos. O concreto CEPS1 apresenta maior umidade (67,12%) e o REF a menor (65,86%).

Figura 71 - Perfil de UR (%) para a (a) hora de maior chuva , (b) seis horas após a maior chuva, 12h após a maior chuva e (d) 24 horas após a maior chuva



Após seis horas (Figura 71-b), percebe-se uma mudança na umidade dos concretos na superfície exterior. O concreto REF tem menor umidade (81,94%), logo acima CB2 apresenta uma umidade de 84,26% seguido de CEPS1 com 85,92%. Os traços CB1 e CEPS2 tem umidades muito próximas, de 86,68 % e 86,79% respectivamente. A umidade no interior das paredes não é muito diferente daquela observada na hora da chuva, mas entre os traços REF e CB1 surge uma diferença um pouco maior, pois há um pequeno acréscimo em REF (66,34%). A umidade na superfície interna aumenta em todas as paredes de concreto. Os concretos com os menores valores são REF (72,24%) e CEPS2 (72,92%). Observam-se umidades semelhantes entre as paredes de concreto CB2 (73,47%) e CEPS1 (73,44%). O concreto CB1 apresentou a maior umidade (74,14%).

No perfil traçado 12h após a hora da chuva (Figura 71-c) nota-se que na superfície externa há uma mudança. Os concretos CB1 e CB2 apresentam os menores valores de umidade, de 69,07% e 68,93%, nesta ordem. O concreto REF tem maior umidade que os concretos com borracha de pneu e menor que os concretos com EPS triturado, 71,78%. CEPS1 e CEPS2 apresentam as maiores umidades, 73,31% e 72,70%, respectivamente. A tendência observada para a posição de monitoramento no interior da parede não é a mesma para todos os concretos. Nota-se um pequeno aumento na umidade em comparação aos perfis anteriores (Figura 71-a) e (Figura 71-b) para o traço REF, com umidade de 68,32%. A umidade nos concretos CB1 e CB2 é praticamente a mesma observada em (Figura 71-b), 65,54% e 70,68%, respectivamente. Nos concretos com EPS triturado também há acréscimo na umidade, CEPS1 (71,99%) e CEPS2 (70,38%). Percebe-se uma redução na umidade na superfície interior para todos os concretos, os valores observados são muito próximos, entre 71,05% (REF) e 71,97% (CEPS1).

No perfil (Figura 71-d), 24 h após a chuva, há um aumento na umidade da superfície externa das paredes de concreto, com exceção do concreto REF (70,90%), os demais apresentam umidades parecidas entre 72,17% (CEPS2) e 72,33% (CB2). Para a posição de monitoramento no interior das paredes o concreto CB1 tem a menor umidade (65,85%). As paredes de concreto REF e CB2 apresentam umidade semelhantes no seu interior, de 70,52% e 70,63%, respectivamente. Entre os concretos com EPS triturado o

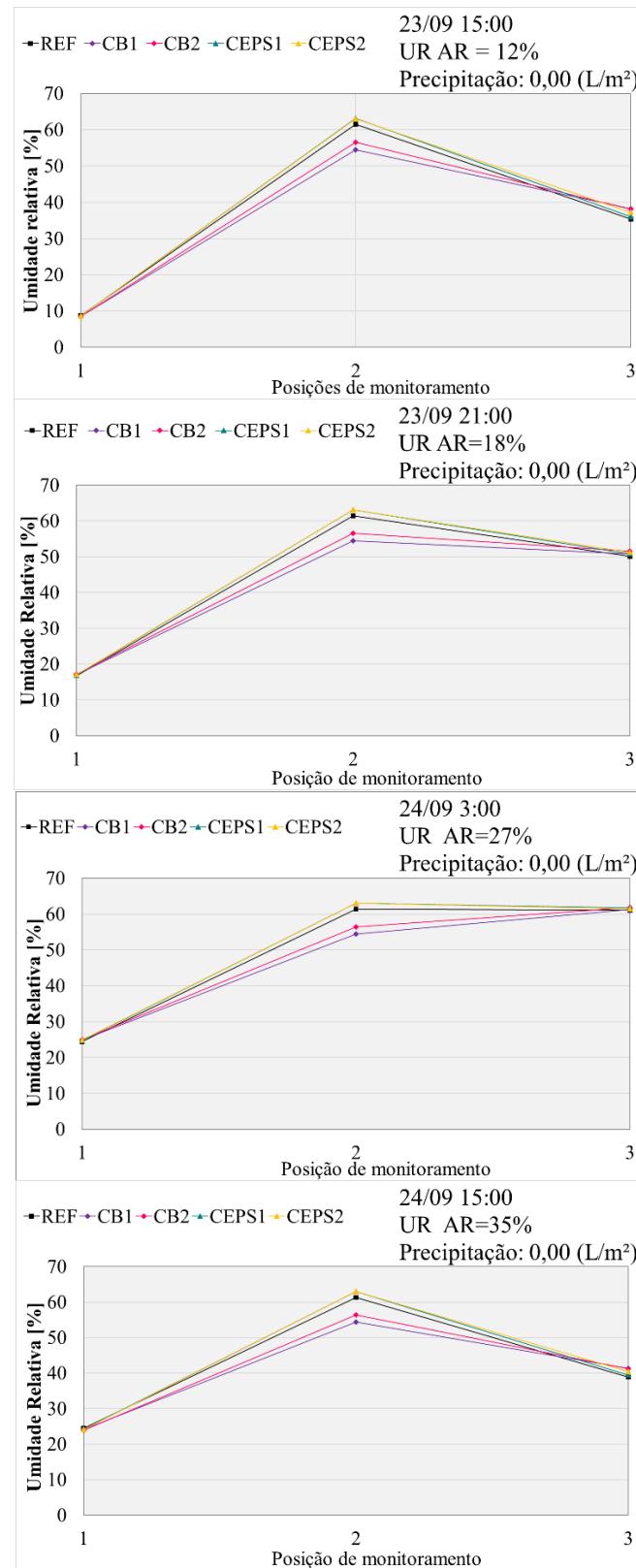
CEPS1 apresenta maior umidade (73,71%), CEPS2 (72,91%). Na superfície interna, a diferença de umidade é pequena, variando entre 64,70% (REF) e 65,76% (CEPS1).

Diante dos diferentes perfis de umidade apresentados na Figura 71, percebe-se que uma pequena diferença no interior de paredes de concretos com borracha de pneu e EPS triturado. Observa-se que os concretos CEPS1 e CEPS2 demoram um pouco mais a perder água, enquanto os concretos CB1 e CB2 secam mais rápido. No geral, as paredes com os diferentes concretos estudados apresentam comportamento muito semelhante.

Os perfis apresentados na Figura 71 representam o comportamento dos concretos no período chuvoso. Para que fosse possível uma avaliação no período seco, foram obtidos os perfis de umidade para o dia em que foi registrada a maior temperatura do ano. A Figura 72 apresenta quatro perfis, a hora mais quente, 6h, 12h e 24h após. De acordo com a simulação a maior temperatura (34,40 °C) ocorre no dia 23/09.

O perfil de umidade para a hora de maior temperatura (Figura 72-a) mostra que a umidade na superfície externa dos concretos é muito próxima, entre 8,55% (CB1) e 8,73% (REF). Para o ponto de monitoramento 2, no interior das paredes, observa-se que os concretos com borracha de pneu tem as menores umidades. O concreto CB1 tem a menor umidade (54,50%) em CB2 é um pouco maior (56,55%). O concreto REF tem 61,52%. Os concretos com EPS triturado são os mais úmidos, 63,16% (CEPS1) e 63,08% (CEPS2). Na superfície interna das paredes os concretos com maior umidade são CB1 (38,24%) e CB2 (38,09%). Os concretos com EPS triturado tem 36,03% (CEPS1) e 37,21% (CEPS2). O concreto REF apresenta menor umidade (35,38%).

Figura 72 - Perfil de UR (%) para a hora mais quente (a), 6h após a maior temperatura (b), 12h após a maior temperatura (c) e 24h após a maior temperatura (d)



Após seis horas (Figura 72-b), há um aumento na umidade observada na superfície externa. A parede com concreto REF tem a menor umidade (16,65%). Os concretos CB1 e CEPS1 apresentam umidades parecidas, de 16,99% e 16,96%, respectivamente. As maiores umidades foram verificadas em CB2 (17,10%) e CEPS2 (17,02%). No interior das paredes a umidade é muito parecida com aquela observada no perfil (Figura 72-a), entre 54,46% (CB1) e 63,12% (CEPS1). Para superfície interna nota-se aumento na umidade. Entre os concretos com borracha de pneu, CB2 apresenta maior umidade (51,52%) que CB1 (50,75%). Os concretos com EPS triturado tem 50,79% (CEPS1) e 51,19% (CEPS2). O concreto REF apresenta menor umidade (50,06%).

Assim como no perfil (Figura 72-b), nos perfis (Figura 72-c) e (Figura 72-d) não são observadas mudanças expressivas no comportamento dos diferentes concretos. Há uma variação nos valores de umidade para as superfícies externa e interna, que acompanham mais rapidamente as mudanças da UR do ar. No entanto, no interior das paredes o comportamento é muito parecido para todos os perfis. Os concretos com borracha de pneu apresentam as menores umidades, com CB2 mais úmido que CB1. Os concretos com EPS tem as maiores umidades, muito próximas. O traço REF tem umidade maior que os concretos com borracha de pneu e menor que os concretos com EPS.

Diante dos resultados apresentados na Figura 72, observa-se que no período seco a diferença de comportamento entre as paredes para os diferentes concretos é mais acentuada que no período chuvoso (Figura 71). Os concretos CB1 e CB2 apresentam a menor umidade no interior das paredes em todos os perfis. No interior das paredes de concreto com CEPS1 e CEPS2 são observadas as maiores umidades. Além disso, observa-se comportamento muito próximos entre REF e os concretos com EPS triturado.

Nos dados de saída da simulação higrotérmica, os resultados de teor de umidade (ou conteúdo de umidade) são apresentados em kg/m^3 , sendo assim representam a massa de água (kg) presente em 1m^3 do volume do concreto analisado. No teor total do sistema a unidade é dada pela massa de água (kg) em 1m^2 de área do sistema (parede de concreto). A Tabela 39 apresenta a relação do teor de umidade e do teor de umidade total para os

concretos estudados. Estão tabulados os valores para a hora de maior chuva do ano e para a hora mais quente do ano.

Tabela 39 - Teor de umidade dos concretos estudados em período chuvoso e em período seco

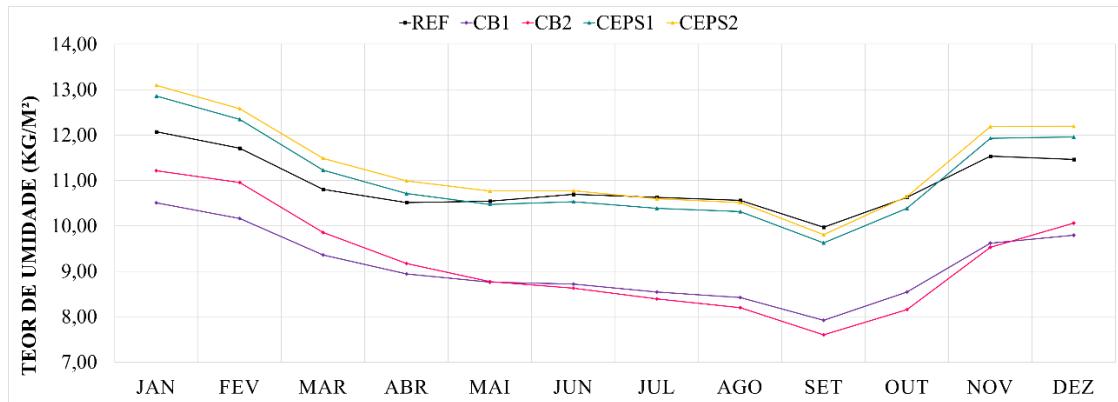
HORA DE MAIOR CHUVA (19/03 21h)		
	Teor de umidade no interior da parede (kg/m ³)	Teor de umidade total (kg/m ²)
REF	112,80	11,28
CB1	97,35	9,73
CB2	101,99	10,20
CEPS1	119,42	11,94
CEPS2	122,26	12,23
HORA DE MAIOR TEMPERATURA (23/09 15h)		
	Teor de umidade no interior da parede (kg/m ³)	Teor de umidade total (kg/m ²)
REF	96,45	9,64
CB1	76,13	7,61
CB2	72,46	7,25
CEPS1	92,46	9,25
CEPS2	93,97	9,40

No período chuvoso, na tabela representado pela hora de maior chuva no dia mais chuvoso (19/03), os traços CB1 e CB2 apresentam os menores conteúdos de umidade 97,35 kg/m³ e 101,99 kg/m³, respectivamente. O traço REF tem menor que o conteúdo de umidade (112,80 kg/m³) que os traços CEPS1 e CEPS2 que apresentaram 119,42 kg/m³ e 122,26 kg/m³, nesta ordem. O traço com menor CEPS2 tem maior teor de umidade entre os traços.

Para a hora mais quente (período seco), os traços CB1 e CB2 também apresentam os menores teores de umidade 76,13 kg/m³ e 72,46 kg/m³, neste caso o CB2 tem menor conteúdo de umidade entre os traços com borracha de pneu. O traço REF tem o maior teor de umidade entre os traços 96,45 kg/m³. Entre os traços com EPS triturado o CEPS2 tem conteúdo de umidade ligeiramente superior que o de CEPS1.

O comportamento médio mensal do teor de umidade total (kg/m²) de cada concreto estudado, para a orientação Norte, é apresentado na Figura 73.

Figura 73 - Comportamento de umidade total: média mensal (kg/m^2)



Entre os traços estudados, os concretos com borracha de pneu apresentaram menor conteúdo de umidade ao longo do ano. É possível observar uma mudança de comportamento das curvas CB1 e CB2 nos períodos chuvoso e seco. O traço CB1 tem menor conteúdo de umidade no período de dezembro a maio, nos outros meses apresenta maior conteúdo de umidade que o traço CB2.

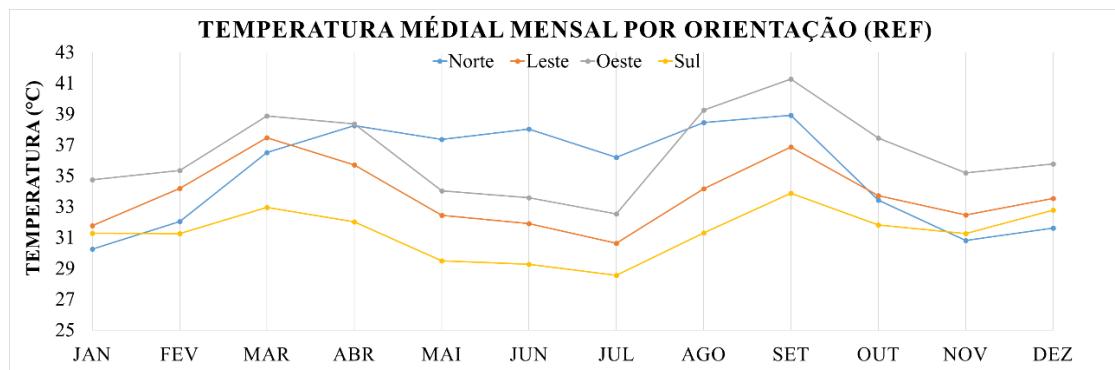
De novembro a março a parede com concreto REF apresenta teor de umidade intermediário, maior que CB1 e CB2, e menor que CEPS1 e CEPS2. No período de maio a outubro, o teor de umidade em REF é próximo aos dos concretos com EPS. Entre os traços CEPS1 e CEPS2, o CEPS2 tem maior conteúdo de umidade em todos os meses do ano.

Para avaliar a influência da temperatura em paredes de concreto, determinou-se a temperatura média para a superfície externa levando em consideração as diferentes orientações (Figura 74). Esta determinação foi feita para o concreto de referência, com o objetivo de estabelecer qual orientação crítica.

Analizando a Figura 74 percebe-se que no período chuvoso a orientação Oeste registra as maiores temperaturas mensais. No período seco, as maiores temperaturas ocorrem na orientação Norte. As orientações Sul e Leste registram as menores temperaturas ao longo do ano. A síntese do arquivo climático (Figura 42) mostra que fachadas na orientação Norte recebem maior irradiação solar, mas também recebem a maior incidência de chuva, o que pode influenciar a queda de temperatura observada no período chuvoso. Sendo

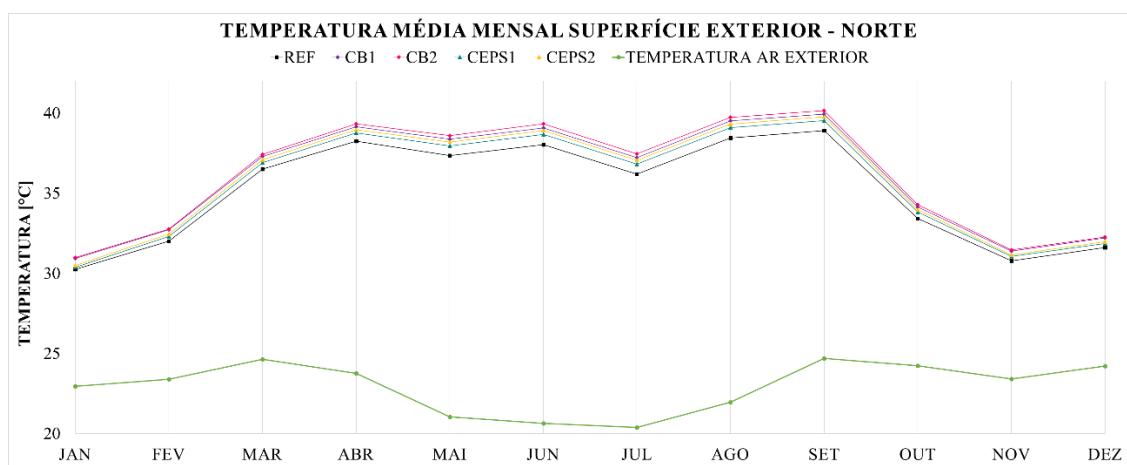
assim, para avaliação da influência de temperatura os resultados apresentados se referem as orientações Norte e Oeste.

Figura 74 - Temperatura média mensal da superfície externa do concreto REF para diferentes orientações



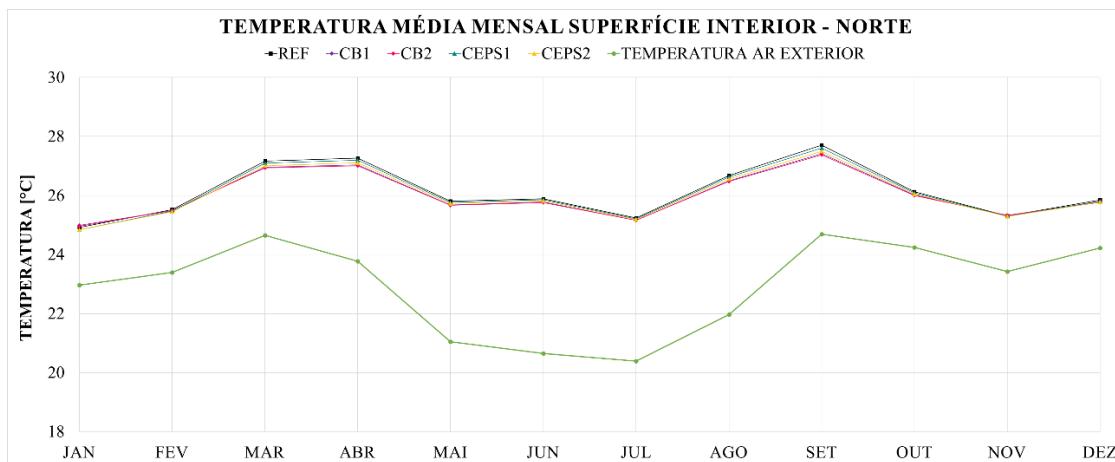
A Figura 75 apresenta as temperaturas médias mensais da superfície exterior das paredes para os diferentes concretos estudados para a orientação Norte. Os concretos têm comportamento parecido. A parede de concreto REF apresenta as menores médias mensais para a temperatura da superfície externa. Os concretos com EPS triturado têm maiores temperaturas que o REF, mas menores que CB1 e CB2. As maiores temperaturas foram apresentadas pelo traço CB2. Todos os concretos têm temperatura superficial maior que a temperatura do ar exterior.

Figura 75 - Temperaturas médias mensais (°C) para superfície exterior (Norte)



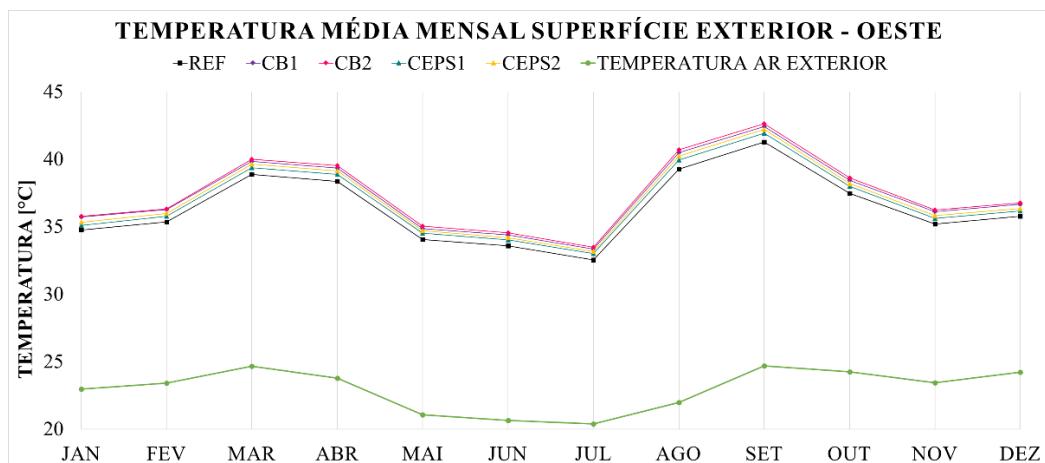
Com relação a temperatura da superfície interna, observa-se que os traços apresentam valores muito próximos para as médias mensais. Todos eles são superiores à média da temperatura exterior (Figura 76).

Figura 76 - Temperaturas médias ($^{\circ}\text{C}$) mensais para a superfície interior (Norte)



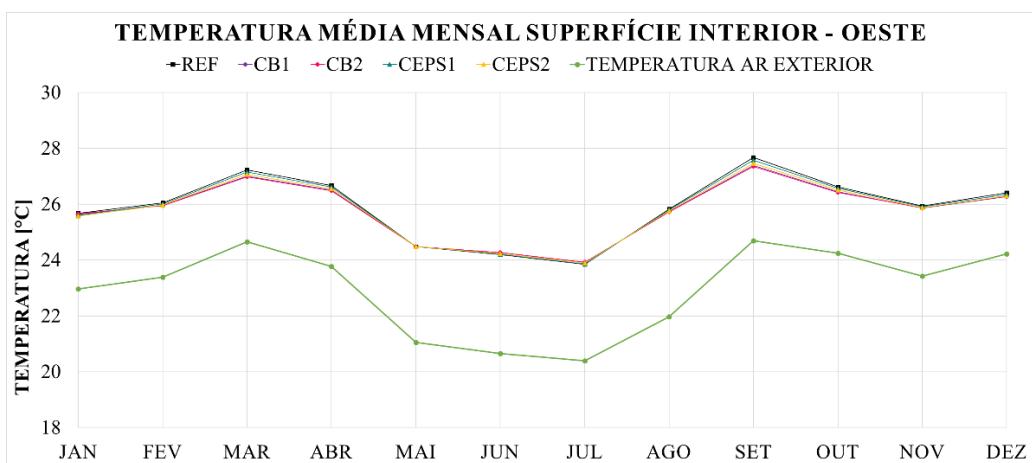
A Figura 77 mostra os valores médios mensais para temperatura da superfície externa das paredes de concreto na orientação Oeste. Todos os concretos apresentaram temperaturas superficiais mais elevadas que a temperatura do ar. Assim como na orientação Norte (Figura 76) a parede de concreto REF apresenta as menores médias. Os concretos com EPS triturado têm maiores temperaturas que o REF, mas menores que CB1 e CB2. O concreto CB2 apresenta as maiores temperaturas para a superfície exterior.

Figura 77 - Temperaturas médias mensais ($^{\circ}\text{C}$) para superfície exterior (Oeste)



A Figura 78 mostra as médias mensais para temperatura na superfície interior das paredes de concreto. Todos os concretos apresentaram temperatura superior à temperatura do ar exterior. Os concretos apresentam temperatura média mensal muito semelhantes entre si. Como era esperado, para a orientação Oeste, tanto na superfície externa quanto na interna, os concretos apresentaram temperaturas mais elevadas nos meses mais chuvosos.

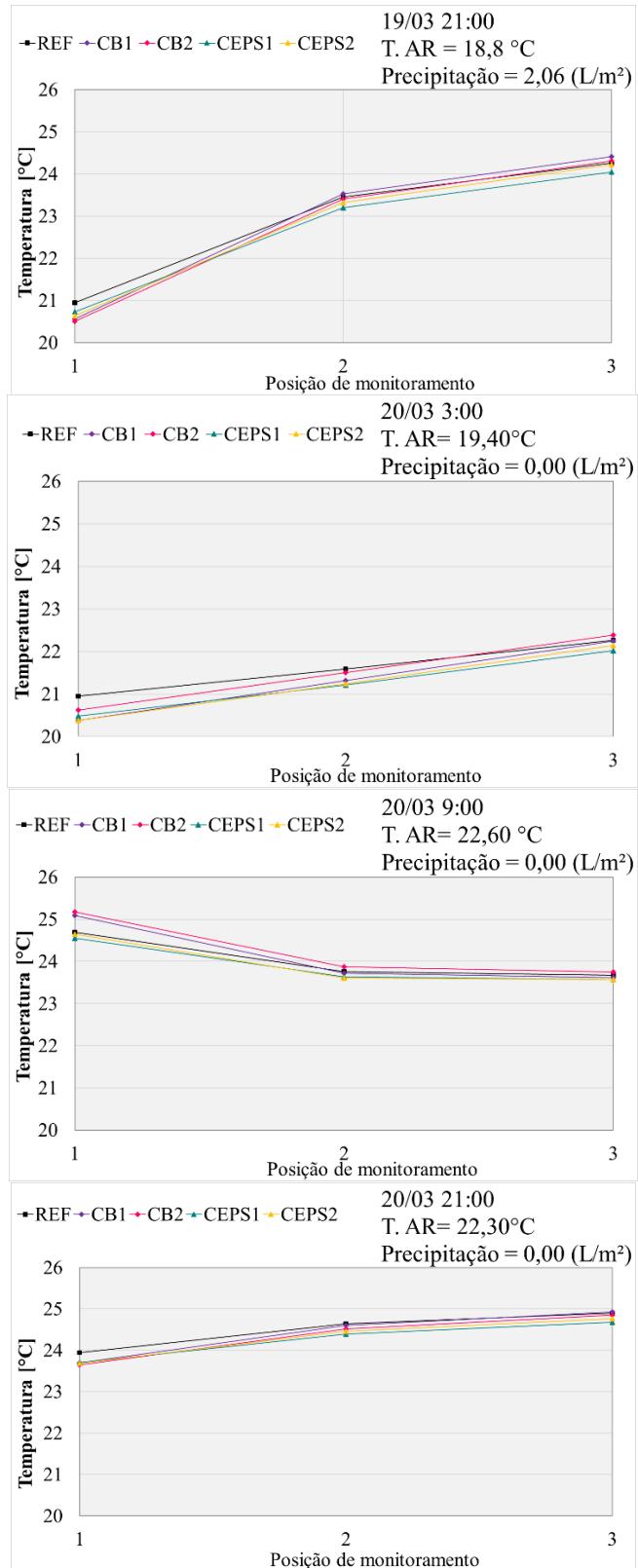
Figura 78 - Temperaturas médias mensais ($^{\circ}\text{C}$) para superfície interior (Oeste)



Assim como na avaliação da umidade, os dias dia mais chuvoso (19/03) e o dia da maior temperatura (23/09) foram adotados como referência na avaliação do perfil de temperatura, representando duas condições diferentes: período chuvoso e período seco. Figuras 79 e 80 apresentam os perfis de temperatura para paredes com os diferentes concretos na hora de maior chuva e na hora mais quente do ano e as condições para 6h, 12h, e 24 h depois. São mostradas as temperaturas para as diferentes posições de monitoramento da simulação higrotérmica referentes a orientação Norte.

Durante a chuva, perfil (Figura 79-a), a temperatura na superfície externa para todos os concretos é muito parecida, entre 20,50°C (CB2) e 20,95°C (REF). Para a posição de monitoramento 2, interior da parede, as temperaturas são mais elevadas ($\approx 3^{\circ}\text{C}$) que as da superfície externa, mas ainda são semelhantes entre os diferentes concretos, entre 23,20°C (CEPS1) e 23,53°C (CB1). Na superfície interior são observadas as maiores temperaturas. O concreto CEPS1 apresenta menor temperatura interna (24,05°C). As temperaturas dos concretos REF e CEPS2 são parecidas, 24,26°C e 24,23°C, respectivamente. Os concretos com borracha de pneu, CB1 e CB2, apresentaram 24,41°C e 23,31°C, nesta ordem.

Figura 79 - Perfil de temperatura (°C) para a hora de maior chuva (a), 6h após a maior chuva (b), 12h após a maior chuva (c) e 24h após a maior chuva



Após seis horas (Figura 79-b) a temperatura da superfície externa do traço REF é a mesma da observada no perfil (a) de 20,95°C. Percebe-se um decréscimo de 0,2°C para o concreto CB1 (20,37°C) e um pequeno acréscimo de 0,13°C para CB2 (20,63°C). Nos concretos com EPS triturado verifica-se temperaturas de 20,48°C (CEPS1) e 20,38°C (CEPS2). No interior das paredes observa-se que as menores temperaturas são dos concretos CEPS1 (21,22°C) e CEPS2 (21,24°C). Os concretos com borracha de pneu apresentam temperaturas de 21,32°C (CB1) e 21,50°C (CB2). A maior temperatura é verificada no concreto REF. Para a superfície interna o concreto CB2 apresenta a maior temperatura 22,38°C. Os concretos REF e CB1 tem temperaturas muito próximas de 22,26°C e 22,24°C, respectivamente.

O perfil (Figura 79-c), 12h após a chuva, apresenta que as maiores temperaturas superficiais externas são observadas nas paredes de concreto com borracha de pneu, 25,09°C (CB1) e 25,17°C (CB2). Os traços REF e CEPS2 apresentam temperaturas semelhantes, 24,69 °C e 24,65°C, respectivamente. No interior das paredes, nota-se que CB2 tem maior temperatura (23,87°C). Os concretos REF e CB1 tem comportamento parecido com temperaturas de 23,76°C e 23,72°C, nesta ordem. As menores temperaturas são verificadas nos concretos com EPS, 23,63°C (CEPS1) e 23,61°C (CEPS2). Na superfície interna a parede com maior temperatura é a de concreto CB2 (23,75°C). Os concretos REF e CB1 apresentam temperaturas parecidas de 23,67°C e 23,61°C, nesta ordem. Os concretos com EPS triturado tem a mesma temperatura para superfície interna (23,57°C).

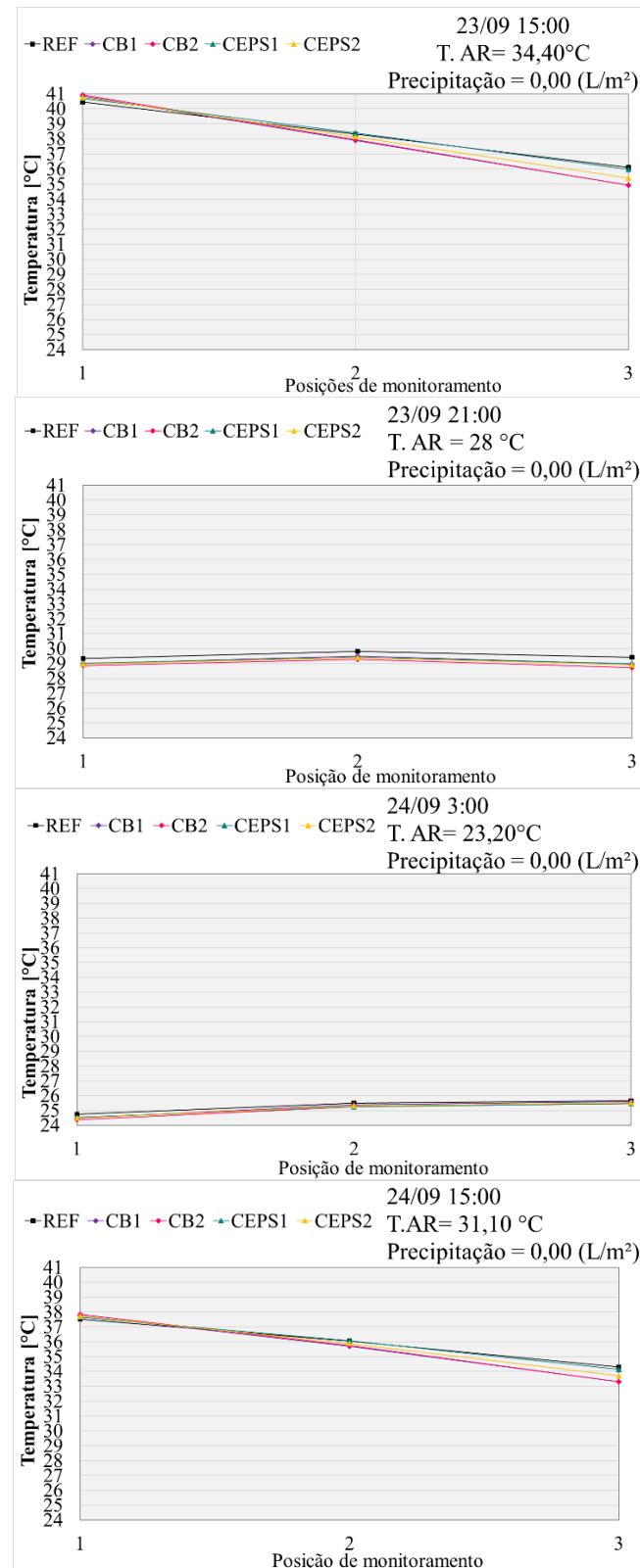
Após 24h da hora da chuva (Figura 79-d), verifica-se que o concreto REF apresenta a maior temperatura para a superfície externa (23,95°C). Os concretos CB1 e CEPS2 têm mesma temperatura (23,69°C). O CB2 apresenta menor temperatura de 23,65°C, e o concreto CEPS1 apresentou temperatura mais elevada entre os concretos com resíduo, 23,71°C. Na posição de monitoramento 2, interior da parede, o concreto REF apresenta maior temperatura 24,64°C, seguido dos traços com borracha de pneu 24,61°C (CB1) e 24,52°C (CB2). Os concretos com EPS têm as menores temperaturas, 24,40°C (CEPS1) e 24,46°C (CEPS2). Na superfície interna as maiores temperaturas foram observadas nos concretos REF (24,90°C) e CB1 (24,93°C), seguidos do concreto CB2 (24,85°C). As

paredes de concreto com EPS triturado têm as menores temperaturas na superfície interna, 24,68°C (CEPS1) e 24,77°C (CEPS2).

Na hora com maior temperatura (Figura 80-a), as paredes de concreto com borracha têm as maiores temperaturas para a superfície externa, 40,84°C (CB1) e 40,92°C (CB2). Os concretos CEPS1 e CEPS2 apresentam, respectivamente, 40,69°C e 40,76°C. No interior das paredes observa-se que o concreto CEPS1 tem a temperatura mais elevada (38,38°C), em ordem decrescente de temperatura aparecem REF (38,32°C) e CEPS2 (38,12°C). As menores temperaturas são observadas em CB1 (37,89°C) e CB2 (37,95°C). Na superfície interna, observa-se que a parede com concreto REF tem a maior temperatura (36,12°C). Os concretos CB1 e CB2 apresentam as menores temperaturas de 34,91°C e 34,92°C, nesta ordem. Os concretos com EPS triturado têm temperaturas de 35,96°C (CEPS1) E 35,40 (CEPS2).

No perfil (Figura 80-b), seis horas após a maior temperatura, observa-se que as paredes com concreto REF tem a maior temperatura superficial externa (29,35°C). Os concretos com borracha de pneu apresentam temperaturas de 28,99°C (CB1) e 28,85°C (CB2). Para CEPS1 e CEPS2 são observadas temperaturas de 29,02°C e 28,96°C, respectivamente. No interior das paredes, verifica-se que a maior temperatura é a do concreto REF (29,82°C), em ordem decrescente aparecem CB1 (29,50°C), CEPS1 (29,42°C), CEPS2 (29,40°C) e a menor temperatura é apresentada pelo concreto CB2 (29,29°C). Na superfície interna das paredes a maior temperatura ainda é a do concreto REF (29,41°C). Nas paredes de concreto com borracha são observadas temperaturas de 28,95°C (CB1) e 28,73°C (CB2). CEPS1 e CEPS2 apresentam, respectivamente temperaturas de 29,00°C e 28,90°C.

Figura 80 - Perfil de temperatura (°C) para a hora de maior temperatura (a), 6h após a maior temperatura, 12h após a maior temperatura e 24h após a maior temperatura



No perfil (Figura 80-c), 12 horas após a maior temperatura, verifica-se o comportamento parecido com o observado no perfil (b) para a parede de concreto REF, com temperatura da superfície externa de 24,75°C. Os concretos CB1 e CEPS2 apresentam a mesma temperatura (24,47°C). A temperatura de 24,52°C é atribuída a CEPS1 e o concreto CB2 apresenta menor temperatura 24,38°C. No interior das paredes o concreto REF tem maior temperatura (25,49°C), seguido por CB1 com 25,40°C, CEPS2 com 25,30°C, CB2 com 25,27°C e CEPS1 com 25,26°C. Na superfície interna as maiores temperaturas observadas são 25,67°C (REF) e 25,61°C (CB1). CEPS1 tem uma temperatura de 25,46°C e as menores temperaturas superficiais internas se referem aos concretos CB2 (25,48°C) e CEPS1 (25,46°C).

No perfil (Figura 80-d) o comportamento é muito semelhante ao perfil (a) a diferença nos valores de temperatura ocorre devido a temperatura exterior ser mais baixa.

O comportamento das paredes de concreto no período chuvoso (Figura 79) e no período seco (Figura 80) evidenciam como a condição de umidade dos diferentes concretos influenciam as transferências de calor. No geral, para os perfis de temperatura no mês de março (período chuvoso) o comportamento dos concretos é muito semelhante. Nos perfis de temperatura no mês de setembro (período seco) é possível diferenciar o comportamento das paredes com concretos diferentes, verifica-se que os traços com resíduos apresentam menores temperaturas na superfície interna das paredes.

5.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO TEOR DE UMIDADE E DA TEMPERATURA

A simulação higrotérmica para o sistema construtivo de paredes de concreto foi realizada com base nas propriedades higrotérmicas dos diferentes concretos, estudados na etapa 1 do programa experimental. Por meio dos resultados apresentados no pós-processamento, verifica-se que apesar das propriedades higrotérmicas distintas observadas nos concretos, as paredes de concreto simuladas para estes materiais têm comportamento bastante semelhante.

Conforme esperado, foi observado para todos os concretos estudados, que os maiores teores de umidade correspondem aos meses mais chuvosos, quando a umidade relativa do ar também é maior. O concreto REF apresenta menor porosidade (índice de vazios) entre os concretos simulados. Sua capilaridade é maior que a dos traços com borracha de pneu e menor que a dos traços com EPS triturado. Nos meses chuvosos armazena uma quantidade menor de umidade que os traços CEPS1 e CEPS2. Mas, nos meses mais secos o comportamento é muito semelhante aos concretos com EPS. Por meio das médias mensais para o teor de umidade do concreto REF verifica-se, que mesmo no período com menor intensidade de chuva, não ocorre uma grande diminuição do conteúdo de umidade deste concreto. Este comportamento está relacionado ao maior fator de resistência à difusão de vapor de água, à menor velocidade de secagem e à menor capilaridade. Essas características dificultam o processo de secagem que depende do transporte de água líquida e facilidade de evaporação.

Os traços CB1 e CB2 apresentam os menores teores de umidade. Apesar da elevada porosidade, principalmente do traço CB2, estes concretos tem uma baixa resistência à difusão de vapor e menor absorção de água líquida por capilaridade. Estas propriedades oferecem a estes concretos alta capacidade de secagem pela facilidade e rapidez da evaporação de água. Uma observação importante é a de que o concreto mais poroso (CB2) armazena maior conteúdo de umidade nos meses chuvosos, mas devido à facilidade de secagem, perde mais água que CB1 e apresenta os menores teores nos meses mais secos.

Os concretos CEPS1 e CEPS2 são os traços que armazenam maior conteúdo de umidade nos meses chuvosos. Isto ocorre devido à sua alta porosidade, mas principalmente, pela maior absorção capilar. Como os traços apresentam propriedades higrotérmicas semelhantes, o comportamento na simulação também foi parecido. O traço CEPS2 tem maior capilaridade ($1,425 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$) que CEPS1 ($1,350 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$), maior porosidade (17,45% e 17,05%) e, portanto, apresenta os maiores teores de umidade.

Com relação estanqueidade de paredes de concretos com borracha de pneu e EPS triturado, é possível afirmar que todas os sistemas avaliados são estanques a fontes de umidade externa às edificações. Portanto, em acordo com o requisito geral da

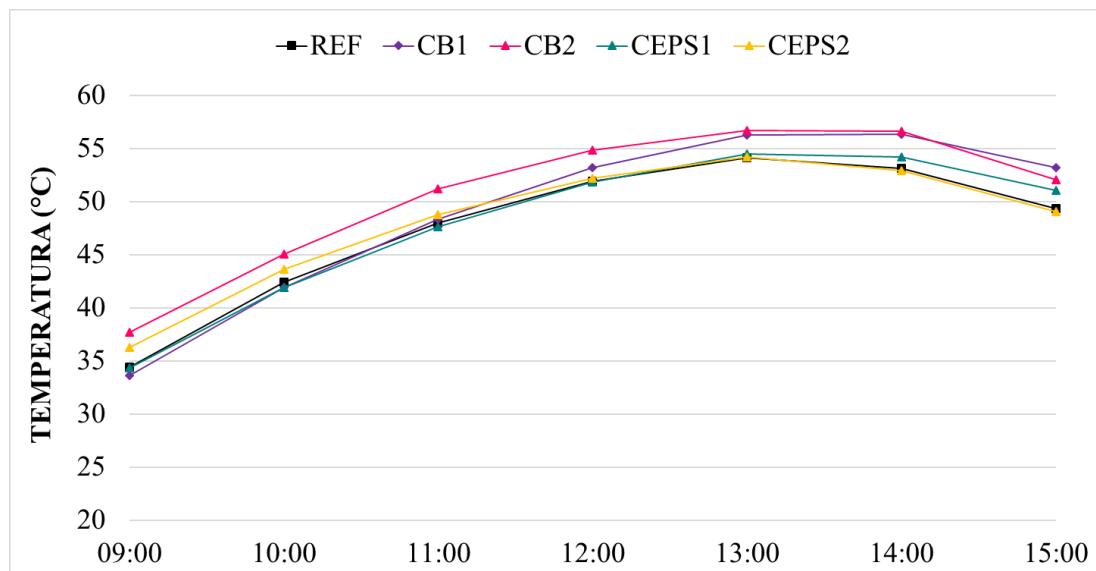
ABNT NBR 15575-1:2013 que trata de fontes externas e ao requisito para os sistemas de vedações verticais externos. Observa-se que na orientação mais crítica quanto à intensidade de chuva dirigida (Norte) as maiores umidades verificadas na superfície interior das paredes são em torno de 80%.

As maiores temperaturas da superfície externa observadas na simulação higrotérmica não podem ser associadas a cor superficial, como foi pontuado na análise do ensaio térmico. Na simulação o dado de entrada de absorção foi o mesmo para todos os traços (0,70). Os traços CB1 e CB2 que apresentaram as maiores médias de temperatura superficial externa, são os traços com menor condutividade térmica e, consequentemente, menores valores de transmitância térmica, $CB1 = 3,20 \text{ W/m}^2\text{.K}$ e $CB2 = 3,15 \text{ W/m}^2\text{.K}$. São também aqueles com menor absorção capilar.

O traço REF apresentou as menores temperaturas superficiais externas, é o traço com maior condutividade térmica ($1,457 \text{ W/m.K}$), a maior transmitância térmica entre os traços ($3,59 \text{ W/m}^2\text{.K}$) e capilaridade alta ($1,029 \text{ g/dm}^2\text{.min}^{0,5}$). Por sua vez, os concretos CEPS1 e CEPS2 têm os maiores valores de absorção capilar, e valores de transmitância térmica entre os traços CBs e o REF, $CEPS1 = 3,43 \text{ W/m}^2\text{.K}$ e $CEPS2 = 3,25 \text{ W/m}^2\text{.K}$.

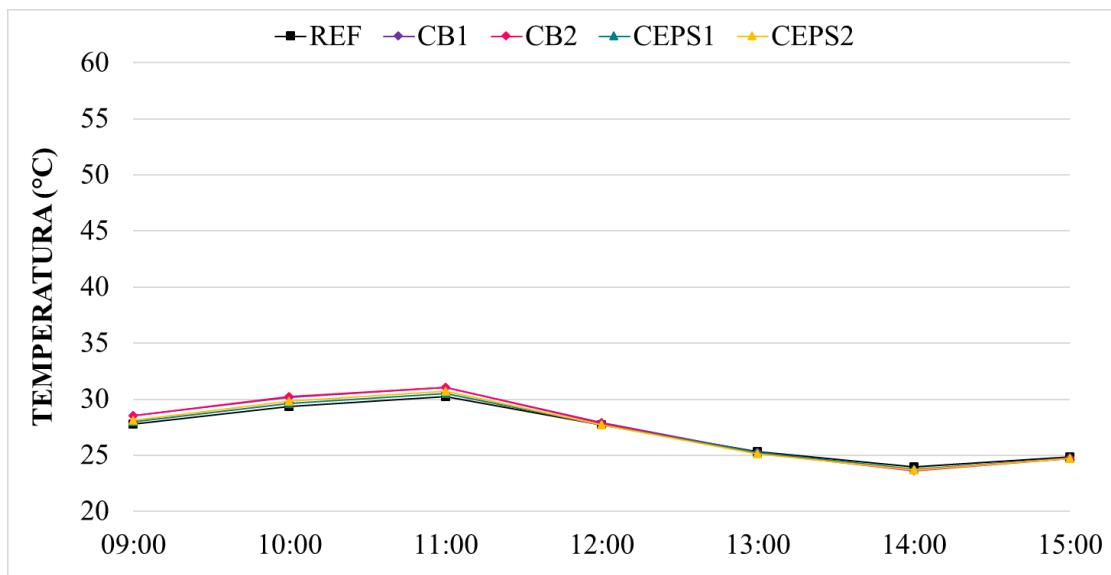
Para uma comparação do comportamento térmico, são apresentadas as temperaturas (média horária) da face externa das placas de concreto no período de aquecimento (9h às 15h) obtidas no ensaio térmico (Figura 81) e as temperaturas superficiais das diferentes paredes de concreto (Figura 82) obtidas pela simulação higrotérmica (orientação Norte). Os resultados para a simulação são referentes ao dia 21/01, pois este dia apresentou condições climáticas parecidas com as observadas no dia em que o ensaio térmico foi realizado.

Figura 81 - Temperatura superficial observada no ensaio térmico



Ressalta-se que a incidência solar no ensaio térmico, em que as placas estão dispostas na horizontal, é diferente da incidência verificada na simulação higrotérmica, que considera o elemento à 90° de inclinação e leva em consideração a orientação da fachada. Por essa razão, verifica-se um comportamento diferente das curvas, diferentes temperaturas e horários de pico.

Figura 82 - Temperatura superficial observada na simulação higrotérmica



Observa-se que, para as duas situações representadas (Figuras 81 e 82), os concretos CB1 e CB2 apresentam as maiores temperaturas de pico. No ensaio térmico as temperaturas dos concretos REF, CEPS1 e CEPS2 são muito semelhantes, já na simulação higrotérmica verifica-se comportamento mais próximo entre CEPS1 e CEPS2 e o concreto REF aparece com temperaturas um pouco mais baixas.

Entende-se que estas diferenças existem pelas diferenças na incidência solar e, também, pelo fato de que a simulação faz o uso de um arquivo climático que não representou a exata condição do local no dia do ensaio térmico. Porém, as similaridades nos comportamentos mostram a potencialidade da ferramenta de simulação computacional (WUFI PRO 6.3) mesmo com as simplificações do modelo.

No que se refere ao desempenho térmico de edificações, verificou-se que a temperatura média da superfície interna das paredes de concreto ao longo de todo ano é superior à temperatura do ar exterior. Este comportamento foi observado para todos os concretos. Desta forma, não satisfaz o requisito geral de desempenho térmico no verão de que condições térmicas no interior do edifício habitacional devem ser melhores ou iguais às do ambiente externo.

As simulações higrotérmicas não são suficientes para uma avaliação da durabilidade de paredes de concreto com os materiais estudados, mas algumas considerações podem ser feitas. As paredes de concretos com resíduos de borracha de pneu e EPS triturado são mais porosas que a de concreto REF, o que pode favorecer o ingresso agentes de degradação ao longo da vida útil da edificação. Por outro lado, verifica-se que nos concretos CB1 e CB2 a profundidade da água por absorção capilar é menor, o que pode ser considerado um ponto positivo. Com relação ao teor de umidade, observa-se que os concretos com EPS triturado retém mais água no interior das paredes, o que a longo prazo pode afetar a durabilidade do elemento construtivo, uma vez que, a umidade é um dos principais agentes de degradação de edificações.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões a respeito do comportamento higrotérmico dos concretos estudados nesta dissertação e considerações sobre a aplicação destes materiais em paredes de concreto na cidade de Uberlândia-MG. O capítulo foi dividido em duas partes: conclusões e sugestões para trabalhos futuros

6.1 CONCLUSÕES

O sistema construtivo com paredes de concreto tem sido amplamente utilizado na construção de habitações de interesse social. Porém, este sistema vem sendo empregado em todo o território brasileiro sem levar em consideração as diferentes condições climáticas, o que muitas vezes resulta em habitações com baixo desempenho térmico.

Outra consideração importante é a de que o comportamento térmico de elementos e sistemas construtivos não depende exclusivamente das propriedades térmicas dos materiais empregados. Os fenômenos de transferência de calor e umidade são dependentes um do outro, por esta razão, se faz necessário considerar em projetos de edificações o comportamento higrotérmico dos materiais, bem como o dos elementos e sistemas construtivos.

Diante disto, este trabalho avaliou os efeitos da substituição parcial de agregados naturais por resíduos, borracha de pneu de recauchutagem e de Poliestireno Expandido (EPS) reciclado e triturado, nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. A partir desta análise, os concretos foram caracterizados com relação ao comportamento higrotérmico. Então, a influência destes concretos no comportamento do sistema construtivo de parede de concreto foi avaliada por meio de simulação, considerando os fenômenos de transporte de calor e umidade para as condições climáticas de Uberlândia-MG.

Apesar da relevância dos mecanismos de transferência de umidade e calor para questões relacionadas ao desempenho dos materiais de construção civil, o comportamento higrotérmico de concretos ainda é um assunto pouco estudado. Com a utilização do material concreto em sistemas construtivos de vedação o conhecimento do desempenho higrotérmico dos materiais é fundamental, pois, interfere diretamente no comportamento

térmico, na durabilidade e na estanqueidade. O estudo do comportamento higrotérmico dos concretos desenvolvido nesta pesquisa permitiu avaliar de forma eficiente as respostas destes materiais em relação aos fenômenos de transporte de calor e umidade e revelaram que os métodos utilizados nesta avaliação foram adequados para este tipo de material.

Quanto as propriedades mecânicas dos concretos com resíduos, os resultados obtidos confirmaram a tendência de trabalhos anteriores, houve redução das resistências à compressão e à tração. Os concretos com substituição parcial de agregado miúdo natural por borracha de pneu não alcançaram a resistência mínima de 20MPa, isto pode ter acontecido por influência de uma combinação complexa de fatores como o teor de substituição (12,5% e 15%), granulometria dos resíduos, aumento na incorporação de ar e enfraquecimento da zona da transição. Apesar de grande redução na resistência, os concretos com substituição parcial de agregado graúdo natural por EPS triturado atingiram a resistência mínima. Mesmo com teores diferentes de substituição (60% e 70%) o comportamento dos dois concretos foi bastante semelhante.

Como era esperado, houve redução na massa específica dos concretos com resíduos. Nos dois tipos de concreto o resíduo contribuiu para o aumento no índice de vazios. Porém, foi possível notar que o incremento do teor de substituição da borracha de pneu teve maior influência no índice de vazios que o incremento no teor de substituição do EPS triturado. Os concretos com borracha de pneu apresentaram índices de vazios distintos, já nos concretos com EPS triturado os valores entre os dois traços foram próximos.

Na absorção de água por capilaridade o comportamento dos concretos com diferentes tipos de substituição também foi diferente. Os resultados para os concretos com borracha de pneu mostraram uma redução na absorção capilar e na profundidade de penetração da água líquida. Os concretos com EPS triturado apresentaram absorção capilar alta e penetração de água semelhante ao concreto sem substituição de agregados naturais.

O maior teor de substituição de borracha de pneu conferiu ao concreto maior capacidade de armazenamento de umidade, confirmada pela inclinação da isoterma de dessorção em

umidades altas e pelo teor de saturação observado no ensaio de secagem. As curvas de dessorção dos concretos com EPS triturados mostraram maior higroscopidez que os concretos com borracha de pneu e concreto sem substituição.

Os concretos com borracha de pneu são mais permeáveis ao vapor de água e secam com maior facilidade e rapidez. A substituição do agregado natural por EPS também aumenta a permeabilidade ao vapor de água em relação ao concreto convencional. No entanto, estes concretos apresentaram um processo de secagem mais demorado, o que a longo prazo pode levar ao acúmulo de umidade higroscópica.

Embora não tenha sido realizado um estudo detalhado da estrutura porosa dos materiais, uma avaliação qualitativa destas propriedades confirmou uma relação quanto ao volume, dimensão e distribuição dos poros. Aparentemente, o EPS triturado provoca um aumento no volume de poros pequenos.

A substituição de agregados naturais por resíduos resultou na redução da condutividade térmica dos concretos. Foi observada uma redução maior nos concretos com borracha de pneu em comparação aos concretos com EPS triturado. Contudo, no ensaio térmico o concreto CB2 apresentou a maior capacidade de isolamento, o CEPS2 o maior atraso térmico, mas o concreto de referência, contrariando tendências observadas em outros estudos, apresentou maior capacidade de isolamento e maior atraso térmico que os concretos CB1 e CEPS1. O que pode estar relacionado a ausência de uma padronização das condições iniciais das placas ensaiadas com relação ao teor de umidade.

Os resultados obtidos com a simulação higrotérmica de paredes de concreto demonstraram que os parâmetros higrotérmicos definidos na etapa experimental, bem como o arquivo climático utilizado na simulação foram adequados. Apesar da diferença de comportamento higrotérmico dos concretos estudados, o sistema construtivo de paredes de concreto com a aplicação destes materiais apresentou comportamento semelhante. Por meio dos perfis de umidade e temperatura, em diferentes condições climáticas, foi possível concluir que os resíduos beneficiam o desempenho higrotérmico no período seco, mas não tem muita efetividade no período chuvoso.

Por meio dos resultados analisados no pós-processamento, conclui-se que o teor de umidade afeta a condutividade térmica dos materiais aumentando a transmitância térmica dos concretos. Com relação a temperatura superficial externa das paredes de concreto, observou-se que paredes de concretos com borracha de pneu apresentaram as maiores temperaturas. Os concretos CB1 e CB2 têm menor transmitância térmica, então, como estes materiais transferem menor quantidade de calor para o interior das paredes apresentam temperaturas superficiais mais elevadas.

Quanto a temperatura superficial interna, não foram observadas temperaturas mais baixas que a temperatura do ar. Assim, embora a condensação superficial seja um problema recorrente neste sistema construtivo, para as condições climáticas de Uberlândia, este fenômeno não foi observado.

Em síntese, a borracha de pneu aumenta a porosidade do concreto conferindo às paredes de concreto alguns aspectos negativos com relação à durabilidade e baixa resistência mecânica, mas influencia positivamente no isolamento térmico. A hidrofobicidade deste resíduo faz com que a borracha funcione como uma barreira no fenômeno de absorção capilar. Esta característica é um ponto positivo para o sistema construtivo de parede de concreto, uma vez que, a chuva dirigida é a principal forma de ingresso de umidade neste sistema. Além disso, as paredes de concreto com borracha acumulam menor quantidade de água no seu interior devido à rapidez e facilidade de secagem deste material.

Por sua vez, o EPS reciclado e triturado aumenta a porosidade, mas aparentemente há um grande volume de poros pequenos, esta porosidade influencia negativamente a durabilidade e à resistência mecânica de paredes de concreto. No entanto, provoca um maior atraso térmico e, no período seco, melhora o isolamento. Apesar de apresentar maior absorção capilar que o concreto de referência, a profundidade de penetração de água líquida é muito similar ao concreto REF, o que corrobora com a hipótese da presença de poros de menor dimensão. Esta característica não piora a entrada de água nas paredes de concreto, em termos de profundidade de penetração, mas dificulta o processo de secagem o que pode levar a um acúmulo de água nas paredes de concreto.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros levam em consideração lacunas percebidas ao longo do estudo e os avanços necessários para a continuidade da pesquisa:

- Aprofundar a caracterização dos resíduos (borracha de pneu e EPS triturado);
- Estudos sobre a microestrutura de concretos com borracha de pneu e EPS triturado para avaliação da influência destes resíduos na zona de transição;
- Com base nos estudos desta dissertação, avançar na caracterização do comportamento higroscópico com determinação de isotermas de adsorção e análise da estrutura porosa com realização de porosimetria;
- Construir um banco de dados com propriedades higrotérmicas com materiais usuais no Brasil para ser utilizado em simulações computacionais;
- Aplicar a metodologia desta dissertação para caracterizar comportamento higrotérmico de paredes de concreto e outros sistemas construtivos em outras cidades brasileiras.

REFERÊNCIAS

ABRAPEX - Associação Brasileira do Poliestireno Expandido. **O EPS na construção civil.** Disponível em <<http://www.abrapex.com.br>>. Acesso em: 15 de outubro 2018.

AFONSO, T., BRITO, A. C., AKUTSU, M., Análise da ocorrência de bolores em edificações com paredes de concreto. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

AKASAKI, J.L., NIRSCHL, G.C., FIORITI, C.F. Análise experimental da resistência à compressão do concreto com adição de fibras de borracha vulcanizada. In: Congresso Brasileiro do concreto, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2001.

ALBANO, C., CAMACHO, N., REYES, J., FELIU, J.L., HERNÁNDEZ, M. **Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: destructive and non-destructive testing.** Composites Structures, vol.71, pp. 439-446, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.09.037>

ALBUQUERQUE, A. C. **Estudo das Propriedades de Concreto Massa com Adição de Partículas de Borracha de Pneu.** 2009. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

ALBUQUERQUE, A. C. ; ANDRADE, M. A. S. ; ANDRADE, W. P. ; SILVA, O. C. ; MARTINS, W. **Adição da Borracha de Pneu ao Concreto Compactado Com Rolo.** In: Anais do 46o Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, 2004.

ALMEIDA, T.; SILVOSO, M.; BRASILEIRO, A. Influência dos Materiais das Vedações Verticais no Desempenho Termo-energético de uma Habitação de Interesse Social. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

ALVES, S.M.; PIETROBON, C.L.R.; PIETROBON, C. E. Determinação da condutividade térmica de materiais da construção civil e sua variação com umidade e densidade. In: Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2, Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 5, Fortaleza, CE, 1999. **Anais...** Fortaleza, CE, 1999

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **C1498: Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials.** ASTM International, West Conshohocken, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM.E1530 – 11: Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique. West Conshohocken, 2016.

ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural** - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais. 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, 2014.

ANSI/ASHRAE - American National Standards Institute & American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers. **ANSI/ASHRAE 160 - Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings**. Atlanta, 2009.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Handbook 2009 - Fundamentals. Atlanta, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15220-3**. Desempenho Térmico de Edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. ABNT, 2005.

_____. **NBR 16055**. Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 10004**. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 11579**. Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 15220-1**. Desempenho Térmico de Edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. ABNT, 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: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 16605**. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16607**. Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739**. Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

- _____. **NBR 7222.** Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- _____. **NBR 7809.** Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.
- _____. **NBR 8953.** Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 9778.** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 9779.** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 9833** Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR NM 248.** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR NM 47.** Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.
- _____. **NBR NM 52.** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR NM 53.** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 6118.** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR NM 67** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- BABU, D. S.; BABU, K. G.; TIONG-HUAN, W. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 28, n. 6, p.520-527, jul. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.018>
- BABU, K.G., BABU, D.S.: Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. **Cement And Concrete Research**. 2249, 1–8, 2002.
- BARBAR, J. S. **Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados.** Tese de doutorado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, Campus São Carlos – SP, 2016.

BAROGLIEL-BOUNY, V. **Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons: methods, analyse, interprétations.** Laboratoire Central des Pont et Chaussées – Section des Publications, 1994

BAROGHEL-BOUNY, Véronique. Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 37, n. 3, p.414-437, mar. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.019>

BAUER, E. **Resistência a penetração da chuva em fachadas de alvenaria de materiais cerâmicos: uma análise de desempenho.** 1987. 188 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1987.

BAZANT, Z. P., KAPLAN, M. F., **Concrete at High Temperatures.** Pearson Education, 1996.

BENNAI, F. et al. Experimental characterization of thermal and hygric properties of hemp concrete with consideration of the material age evolution. **Heat And Mass Transfer**, [s.l.], v. 54, n. 4, p.1189-1197, 16 nov. 2017. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2221-2>

BERGER, J. **Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments : Application des méthodes de réduction de modèle.** (Tese de doutorado), Université de Grenoble, França, 2014.

BERTOLLO, S. A. M.; FERNANDES Júnior, J. L.; VILLAVERDE, R. B.; MIGOTTO Filho. Pavimentação asfáltica: uma alternativa para a reutilização de pneus usados. **Revista de Limpeza Pública.** São Paulo. ed. 54. p. 23- 30.2000.

BEZERRA, L. A. C. **Análise do desempenho térmico de sistema construtivo de concreto com EPS como agregado gráudo.** 2003. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003.

BLACHÈRE, G. (1969). **Savoir bâtir:** habitabilité, durabilité, économie des bâtiments. Disponível em: <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uc1.b4321525>. Acesso em: 24 de agosto 2018.

BORGES, C.A.M. **O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil.** 2008. 246 f. (Dissertação)- Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BOUCHONNEAU, N. et al. Análise da absorção de água em dois polímeros expandidos: desenvolvimento do módulo de flutuabilidade de um mini-robô submarino. **Polímeros**, v. 20, n. 3, p. 181-187, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282010005000032>

BOUVARD, D., CHAIX, J.M., DENDIEVEL, R., FAZEKAS, A., LÉTANG, J.M., PEIX, G., QUENARD, D. Characterization and simulation of microstructure and

properties of EPS lightweight concrete. **Cement And Concrete Research**. 37(12):1666–73, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.028>

BRASIL. Constituição Federal do Brasil. 1988. Presidência da República.

BRITO, V. P. **Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte**. 2009. 119 f. (Dissertação). Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2009.

BS ISO BRITISH STANDARD INSTITUTION. **ISO 15686-2** Buildings and constructed assets — Service life planning. Part 2: Service life prediction procedures. London, 2012.

BURGH, J. M.; FOSTER, S.J. Influence of temperature on water vapour sorption isotherms and kinetics of hardened cement paste and concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 92, p.37-55, fev. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.11.006>

BUTTLER, A.M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto-influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. 187p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CABRAL, A.E.B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 248p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos – Doutor em ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, 2007.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. LTC, v. 7^a ed. 2008

CAMPOS, L. C. **Análise da durabilidade do concreto com ar incorporado para uso em paredes estruturais**. 2017. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

CARDOSO, G.N.;CABRAL, R.F. Produção e caracterização de compósitos de concreto com adição de pneus automotivos. **Revista Tecen**. 2017 Jun/Dez.; 10 (2): 18-23. <https://doi.org/10.21727/tecen.v10i2.1157>

CARDOSO, J. C. M. **Estratégias visando eficiência energética e conforto térmico incorporados aos projetos de edificações residenciais em Maringá-PR**. 225 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

CARVALHO, C. H. R. **Estudo de concreto com poliestireno expandido reciclado** 60 f. (Qualificação de Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. **Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção** – Projeto Entulho Bom. Salvador: Editora da UFBA, 2001. 311p;

CATOIA, T. **Concreto Ultraleve estrutural com pérolas de EPS**: Caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes. 2012. 154 f. Tese (Doutorado)-Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 16322: Conservation of Cultural Heritage - Test methods - Determination of drying properties**. 2013

_____. **EN ISO 12571**: Hydrothermal Performance of Building Materials and Products – Determination of Hygroscopic Sorption Properties. 2000.

_____. **EN ISO 12572**: Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties. 2001.

_____. **EN 1015 - 19**: Métodos de ensaio de argamassas para alvenaria - Parte 19: Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas. Bruxelas, 2008.

CHEN, B.; LIU, J.; CHEN, L. Experimental study of lightweight expanded polystyrene aggregate concrete containing silica fume and polypropylene fibers. **Journal Of Shanghai Jiaotong University (science)**, [s.l.], v. 15, n. 2, p.129-137. <https://doi.org/10.1007/s12204-010-9550-3>

CINTRA, L. B. **Avaliação das propriedades térmicas de concretos com ar incorporado**. 144f. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

COELHO, G. B. A.; HENRIQUES, F. M. A. Influence of driving rain on the hygrothermal behavior of solid brick walls. **Journal of Building Engineering**, v. 7, p. 121–132, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.06.002>

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA n. 416**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>> Acesso em: 07 outubro 2018.

CORSINI, R. Paredes Normalizadas. **Revista techne**, São Paulo, ano 20, n. 183, p. 40-46, jun. 2012.

COSTA, M. M. **Estudo das propriedades do concreto com substituição de parte do agregado graúdo por agregado reciclado de poliestireno expandido para aplicação em paredes de concreto**. 2018. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

DANTAS, F. A. S. **Agregados leves e concretos alternativos**. In: FREIRE, W. J. BERALDO, A. L. (coord.). **Tecnologias e materiais alternativos de construção**, Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2003.

DELGADO, J. M. P.Q.; RAMOS, N. M. M.; BARREIRA, E.; FREITAS, V. P. A Critical Review of Hygrothermal Models Used in Porous Building Materials. **Journal of Porous Media**. 2010. 13-3. 221-234. <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v13.i3.30>

DEMIRBOĞA, R. Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures. **Building And Environment**, [s.l.], v. 42, n. 7, p.2467-2471, jul. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.010>

DEMIRBOGA, R.; KAN, A. Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 35, p.730-734, out. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.105>

DÍAZ, J. J. C. et al. Hygrothermal properties of lightweight concrete: Experiments and numerical fitting study. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 40, p.543-555, mar. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.045>

DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. EN 15026: Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation. CEN, Brussels, Belgium, 2007.

DANIOTTI, B.; RE CECCONI, F.; PAOLINI, R.; COCCHETTI, G.; GALLIANO, R.; CORNAGGIA, A. Multi-physics modelling for durability evaluation of ETICS. In: XIII International Conference on Durability of Building Materials and Components. **Proceedings**... São Paulo, 2014.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Influência das tintas imobiliárias sobre o desempenho térmico e energético de edificações. X Congresso Internacional de Tintas. **Anais**...São Paulo. 2007.

DULLIEN, F. A. L.; EL-SAYED, M. S.; BATRA, V. K. Rate of Capillary Rise in Porous Media with Nonuniform Pores. **Journal of Colloid and Interface Science**, Vol. 60, No. 3, 1977. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(77\)90314-9](https://doi.org/10.1016/0021-9797(77)90314-9)

EIRAS, J.N., SEGOVIA, F., Borrachero, M.V., Monzo, J., Bonilla, M., Paya, J. Physical and mechanical properties of foamed Portland cement composite containing crumb rubber from worn tires. **Materials & Design**, [s.l.], v. 59, p.550-557, jul. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.021>

FERNANDES, C. P. **Estudo dos processos de condensação e migração de umidade em meios porosos consolidados. Analise Experimental de uma argamassa de cal e cimento.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1990.

FERNANDO, P. L. N.; JAYASINGHE, M.T.R.; JAYASINGHE, C. Structural feasibility of Expanded Polystyrene (EPS) based lightweight concrete sandwich wall panels. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 139, p.45-51, maio 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.027>

FERREIRA, A. **Modelagem dos Fenômenos de Transporte Termo-hídricos em Meios Porosos Submetidos a Temperaturas Elevadas: Aplicação a uma Bicamada Rocha-**

Concreto. 122 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011.

FERREIRA, C. C.; PEREIRA, I. M. Avaliação de desempenho térmico de habitação de interesse social de acordo com a NBR 15.575, para as diversas zonas bioclimáticas. XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, p. 3590-3595. Juiz de Fora, out. 2012.

FERROUKHI, M.Y.; BELARBI, R.; LIMAM, K.; SI LARBI, A.; NOUVIAIRE, A. Assessment of the effects of temperature and moisture content on the hygrothermal transport and storage properties of porous building materials. **Heat And Mass Transfer**, [s.l.], v. 55, n. 6, p.1607-1617, 15 dez. 2018. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-02550-5>

FLORES-COLEN, I. **Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictiva.** (Tese). Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

FREITAS, V.P. **Transferência de humidade em paredes de edifícios-** análise do fenómeno de interface. 254 f. Tese (Doutorado). Porto: FEUP, 1992.

FREITAS, V. P.; PINTO, P. **Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção - Condensações Internas.** Informação Técnica NIT 002 - LFC 1998. Porto: Laboratório de Física das Construções, 56p, 1999.

FREITAS, V.P.; TORRES, M.I.; GUIMARÃES, A.S. **Humidade Ascensional.** FEUP edições. 1^a ed. 2008.

FRIZZO, B. T. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto.** 158 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

FROTA, A.; SCHIFFER, S.R. **Manual de conforto térmico.** São Paulo: Studio Nobel, 2003.

Fundação João Pinheiro – FJP. Centro de Estatística e Informações. Déficit habitacional no Brasil 2015. Belo Horizonte (2018).

GIVONI, B. **Man, Climate and Architecture.** Londres: Applied Science Published Ltd, 1976.

GONÇALVES, T.C.D. **Salt crystallization in plastered or rendered walls.** 215 f. Tese (PhD). Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.

GRANZOTTO, L.; SOUZA, R. A. Mechanical properties of structural concrete with partial replacement of fine aggregate by tire rubber. **Acta Scientiarum. Technology**, [s.l.], v. 35, n. 1, p.39-44, 30 jan. 2013. Universidade Estadual de Maringá. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v35i1.11283>

GRATWICK, R. T. **La humedad en la construcción: sus causas y remedies**. Barcelona, Editores Técnicos Associados, 1971.

GUIDIO, B. P.; NUNES, P. M., CAMPOS, C. F. S., ALTRAN, D. A. Análise das propriedades físicas e mecânicas do concreto produzido com poliestireno expandido (EPS). **Colloquium Exactarum**, [s.l.], v. 6, n. 4, p.40-48, 20 dez. 2014. Associação Prudentina de Educação e Cultura (APEC). <https://doi.org/10.5747/ce.2014.v06.n4.e098>

GUIMARÃES, E.A. **Avaliação da capacidade protetora da resina de óleo de mamona contra a penetração de agentes agressivos no concreto**. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 1997.

HAAGENRUD, S. Factors Causing Degradation: Part II. In: Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Buildings and Components. CIB Publication 295, p.1.2-104. CIB, Rotterdam, March 2004.

ISAIA, G. C. **Carbonatação do concreto: uma revisão**. Santa Maria, março 1999. Polígrafo

ISO 6241 Performance Standards in building – Principles for their preparation and factors to be considered (Normalização e Desempenho dos Edifícios. Princípios de sua preparação e fatores a serem considerados). 1984

ISSAADI, N. NOUVIAIRE, A. BELARBI, R. AÏT-MOKHTAR, A. Moisture characterization of cementitious material properties: Assessment of water vapor sorption isotherm and permeability variation with ages. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 83, p.237-247, maio 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.030>

JERMAN, Miloš; KEPPERT, Martin; VÝBORNÝ, Jaroslav; ČERNÝ, Robert. Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 41, p.352-359, abr. 2013. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.036>

JERNBERG, P.; SJÖSTRÖM, C.; LACASSE, M. A.; BRANDT, E.; SIEMES, T. Service life and durability research. In: Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Buildings and Components. CIB Publication 295, p.11-59. CIB, Rotterdam, 2004.

JOHN, V.M.; SATO, N.M.N. Durabilidade de componentes da construção. In: SATTLER, Miguel Aloysio; PEREIRA Fernando Oscar Ruttke (Ed.). **Coletânia Habitare: Construção e Meio Ambiente**, v.7. p. 21-57. Porto Alegre: ANTAC, 2006.

KIM, K.; JEON, S.; KIM, J.; YANG, S. An experimental study on thermal conductivity of concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 33, n. 3, p.363-371, mar. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00965-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00965-1)

KÜNZEL, H. M., HOLM, A. H., KRUS, M. **Hygrothermal Properties and Behaviour of Concrete**. WTA-Almanach, pp. 161-181. 2008.

KÜNZEL, H.M. **Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters.** IRB Verlag. 1995.

LAMBERTS, R. GHISI, E.; DE ABREU, A. L. P. **Desempenho térmico de edificações: Conforto.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência Energética na Arquitetura.** 3.ed. Rio de Janeiro: Eletrobras Procel Edifica, 2013.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A.; GOULART, S.; DE VECCHI, R. (2013). **Conforto e Stress Térmico.** Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Conforto%20T%C3%A9rmico%202013_0.pdf. Acesso em: 10 outubro 2018.

LAUKAITIS, A.; ŠURAUSKAS, R.; KERIENė, J. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 27, n. 1, p.41-47, jan. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.09.004>

LORENZI, L.S. **Análise Crítica e Proposições de Avanço nas Metodologias de Ensaios Experimentais de Desempenho à Luz da ABNT NBR 15575 (2013) para Edificações Habitacionais de Interesse Social (HIS) Térreas.** 2013. 245 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

MAGALHÃES, A. C., VEIGA, M. R. **Caracterização da higroscopicidade de argamassas com base em cal.** Relatório 201/2007 - NRI. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia, 42p. 2007.

MAGALHÃES, R. M. **Análise de desempenho do sistema estrutural de paredes de concreto com ar incorporado.** 118 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

MANO, E.B., **Polímeros como materiais de engenharia**, Edgard Blucher, São Paulo – SP, 1999.

MEDINA, N. F., MEDINA D. F., HERNÁNDEZ-OLIVARES, F., NAVACERRADA, M.A.. Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 144, p.563-573, jul. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.196>

MEHTA, Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENDES, N. **Modelos para Previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações.** 248 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1997.

MENDES, N., FERNANDES, C.P., PHILIPPI, P. C., LAMBERTS, R. Moisture content influence on thermal conductivity of porous building materials. In: **SEVENTH**

INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 7., 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** . Rio de Janeiro: Ibpsa, 2001. p. 957 - 964.

MILED, K., SAB, K., LEROY, R. Particle Size Effect on EPS Lightweight Concrete Compressive Strength: Experimental Investigation and Modeling. **Mechanics of Materials**, V. 39, p. 222-240, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2006.05.008>

MINISTÉRIO DAS CIDADES, Brasília, DF, 4 out. 2011. Seção 1. Disponível em: <<http://www.cbic.org.br/sites/default/files/PORTARIA%20465%20MCIDADES%2003102011%20COMPACTADA.pdf>>. Acesso em: 05 set. 2013.

MISURELLI, H.; MASSUDA, C.; **Como construir Paredes de concreto**. In: Téchne, 2009. Edição 147, ano 17, p. 74-80.

MORALES, S.G. **Metodología de diagnóstico de humedades de capilaridad ascendente y condensación higroscópica, en edificios históricos**. Tesis. Escuela Técnica Superior de Arquitectura da Universidad Politécnica de Madrid, 1995.

NASCIMENTO, M. L. M. **Aplicação da simulação higrotérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios**. 173f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

NASCIMENTO, M. L. M.; BAUER, E. ; Souza, J. S. ; ZANONI, V. A. G. . STUDY OF DEGRADATION IN BUILDING FAÇADES BY CLIMATIC AGENTS. In: REHABEND, 2016, Burgos, Spain. REHABEND 2016 Euro-American Congress on Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management, 2016. v. 1. p. 650-657. <https://doi.org/10.1007/s41024-016-0006-5>

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ed. São Paulo: Bookman, 2016. 887p.

OLIVEIRA, C. P. et al. Avaliação do sistema construtivo de paredes de concreto moldado no local à luz das normas de desempenho. In: 58 Congresso Brasileiro do Concreto, 58., 2016, Belo Horizonte. 58º Congresso Brasileiro do Concreto, 2016. v. 1. p. 1-9.

OLIVEIRA, R. B.; ALVES, C. R. Desempenho térmico de uma HIS com paredes de concreto em Uberlândia-MG: uma comparação entre resultados obtidos e requisitos existentes. In: 2º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos, 2019, São Paulo. **Anais**, 2019. v. II. p. E0190XXX - 1-E0190XXX - 6.

OLIVEIRA, R. D.; VILELA, C.T. S.; SOUZA, R.V.G.; SILVA, R. M. Análise do desempenho térmico de envoltórias em concreto no Brasil. XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, p. 1655–1664. Maceió, nov. 2014.

OLIVEIRA, R. D; SOUZA, R.V.G; MAIRINK, A. J.M.; RIZZI, M. T. G.; SILVA, R. M. Concrete walls thermal performance analysis by Brazilian Standards. **Energy Procedia**, v. 78, p. 213–218, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.383>

ONU. BRASIL. Declaração Universal dos Direitos Humanos, 1948. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/direitoshumanos/declaracao/>>. Acesso em 19 de mai. de 2019.

ORDENES, M.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. **Transferência de calor na envolvente da edificação.** Centro Tecnológico do Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

OSÓRIO, L. Direito à moradia no Brasil. São Paulo: Fórum de Reforma Urbana, 2003.

PAES, I. N. L. **Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassas nos momentos iniciais de pós-aplicação.** Tese (Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade de Brasília, 2004.

PARANT, E.; LE ROY, R. **Optimisation des bétons de densité inférieure à 1.** Tech. rep., Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1999.

PÁSCOA, L.S. N. **Índice de secagem como parâmetro em serviço dos rebocos aplicados em paredes exteriores.** Dissertação. Engenharia Civil. Orientadora: Inês dos Santos Flores Barbosa Colen. UTI- Técnico de Lisboa, 2012.

PAULON, V. A. Um estudo comparativo da influência da adição de nanosílica e sílica ativa na permeabilidade dos concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40., 2000, Fortaleza. **Anais...** Artigo III D – 041. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo, 2000.

PELISSER, F., ZAVARISE, N., LONGO, T.A., BERNARDIN, A. M. Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 19, n. 6-7, p.757-763, abr. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.014>

PEREZ, A. R. **Umidade nas Edificações: Recomendações para a Prevenção da Penetração de Água pelas Fachadas.** Tecnologia de Edificações (1^a e 2^a partes). São Paulo, PINI, IPT-Divisão de Edificações, 1988. p. 571-578.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C.A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: ABORDAGEM GERAL. **Revista Técnico Científica**, v. 1, n. 1, 2013.

POYET, Stéphane. Experimental investigation of the effect of temperature on the first desorption isotherm of concrete. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 39, n. 11, p.1052-1059, nov. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.06.019>

QUEIROZ, I. C. C. **Análise das propriedades do concreto com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de borracha de pneus para aplicação em paredes de concreto.** 2018. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

RAMOS, N. M. M. **A importância da inercia higroscópica no comportamento higrotérmico dos edifícios.** Tese (Doutorado). FEUP, Porto, 2007.

RAMOS, N. M. M.; DELGADO, J.M.P.Q.; BARREIRA E.; FREITAS V.P. Hygrothermal Numerical Simulation : Application in Moisture Damage Prevention. In: Numerical Simulations - Examples and Applications in Computational Fluid Dynamics. p. 97–122. 2007.

RANJBAR, Malek Mohammad; MOUSAVID, S. Yasin. Strength and durability assessment of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. **Materials And Structures**, [s.l.], v. 48, n. 4, p.1001-1011, 6 nov. 2013. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0210-6>

RATO, V. **Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas.** Dissertação de mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2006

REINHARDT, H. W., SOSORO, M., AUFRECHT, M. Development of HPC in germany with special emphasis on transport phenomeno. In: INTERNATIONAL WHORKSHOP ON HIGH PERFORMACE CONCRETE. Bangkok, 1994. Proceeding. American Concrete Institute. p. 177-192 (SP-159-12).

RIBAS, R. A. J. **Método para avaliação do desempenho térmico e acústico de edificações aplicado em painéis de fechamento industrializados.** Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, 2013.

RIBEIRO, C. M. C. **Gerenciamento de pneus inservíveis: Coleta e destinação final.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro Universitário SENAC. São Paulo, 2005.

RORIZ, M. **Conforto térmico e desempenho térmico de edificações.** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, 2008.

ROSSIGNOLO, J. A. e AGNESINI, M.V.C. (2005). Concreto estrutural leve. In: ISAIA, G. C. (Org.). Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. Vol. 2, p. 1331-1362.

SACHT, H. M. **Painéis de vedação de concreto moldados in loco:** Avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos. Dissertação (Mestrado)-Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2008.

SADMOMTAZI, A. SOBHANI, J., MIRGOZAR, M.A., NAJIMI, M. Properties of multi-strength grade EPS concrete containing silica fume and rice husk ash. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 35, p.211-219, out. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.049>

SALOMÃO, M. C. F. **Estudo da estrutura das argamassas de revestimento e sua influência nas propriedades de transporte de água.** 248 f. Tese (Doutorado)-Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DT-06A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016

SANTOS, A. C., OLIVEIRA, L. A., BECERE, O. H., SOUZA, J. C. S. Análise do desempenho higrotérmico de paredes de fachada por meio de simulação computacional – estudos de caso. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17, 2018, Foz do Iguaçu. *Anais...* Porto Alegre: ANTAC, 2018.

SANTOS, A. **Paredes de concreto já dominam Minha Casa Minha Vida.** 2016. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/paredes-de-concreto-minha-casa-minha-vida/>>. Acesso em: 11 de dezembro de 2018.

SANTOS, G. H. **Transferência de calor, ar e umidade através de elementos porosos de edificações.** 112 f. Tese (Doutorado). Orientador Paulo C. Philippi; Co-Orientador Nathan Mendes. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** 161 f. Dissertação (Mestrado) - Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

SANTOS, S.B. **Uma Contribuição ao Estudo do Comportamento Termomecânico de Estruturas Maciças de Concreto.** Modelagem Viscoelástica Linear e Aplicações. 279 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, 2004.

SATO, N. M. N., AGOPYAN, V. Influência da porosidade no transporte de água em concretos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, 2000, Salvador. *Anais...* Porto Alegre: ANTAC, 2000.

SAYADI A. A., TAPIA, J. V., NEITZERT, T. R., CLIFTON, G. C. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 716–724, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.218>

SCHACKOW, Adilson; EFFTING, Carmeane; FOLGUERAS, Marilena V.; GÜTHS, Saulo; MENDES, Gabriela A.. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 57, p.190-197, abr. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.009>

SCHMID, E. V. Exterior durability of organic coatings. Surrey: **FMJ International Publications Limited**, 334p, 1988.

SILVA, J.; BRITO, J.; VEIGA, M. R. **Avaliação do comportamento à água de argamassas com incorporação de agregados cerâmicos.** Rio Grande: Ed. Dunas, Revista Teoria e prática na engenharia civil, n.28, p. 37-45, 2007.

SILVA, J. M. B. **Estudo da durabilidade do revestimento de paredes exteriores.** 2013. 188 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.

SILVA, L. C. F. **Análise das propriedades mecânicas e térmicas de tijolos solo-cimento com e sem adição do pó da fibra de coco.** 148 f. Dissertação (Mestrado) -

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1999.

SILVA, M. N. B. **Avaliação quantitativa da degradação e vida útil de revestimentos de fachada – aplicação ao caso de Brasília/DF.** 198 f. Tese (Doutorado)- Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2014.

SILVA, O. J. C. **Critérios para Seleção de Ecoprodutos:** uma visão crítica acerca do emprego de materiais de construção sustentáveis no Brasil - o caso da madeira plástica. 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Engenharia Urbana, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SILVEIRA, P. M., ALBUQUERQUE, M.C. F. CASSOLA, S., BORTOLUCCI, A.A., PAULLI, L., VILLA, F. M. D. Estudo do comportamento mecânico do concreto com borracha de pneu. **Matéria (Rio de Janeiro),** [s.l.], v. 21, n. 2, p.416-428, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160002.0039>

SOUZA, L.G.M. **Viabilidades térmica, econômica e de materiais da utilização de tubos de PVC como elementos absorvedores em coletores de um sistema de aquecimento de água por energia solar.** Tese (Doutorado)-Programa de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais da UFRN, Natal – RN, 2002.

DE SOUZA, J. S. ; BAUER, E. ; NASCIMENTO, M. L. M. ; CAPUZZO, V. M. S. ; ZANONI, V. A. G. . Study of damage distribution and intensity in regions of the facade. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation,** v. 1, p. 3, 2016. <https://doi.org/10.1007/s41024-016-0003-8>

SUKONTASUKKUL, P., CHAIKAEW, C. Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. **Construction and Building Materials,** v. 20, n.7, p.450-457, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.040>

TANG, W.C.; LO, Y.; NADEEM, A. Mechanical and drying shrinkage properties of structural graded polystyrene aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites,** v. 30, p. 403 – 409, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.002>

THOMAS, B. S., GUPTA, R. C. Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber. **Journal Of Cleaner Production,** [s.l.], v. 102, p.78-87, set. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.072>

THOMAS, B. S., GUPTA, R. C. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. **Journal Of Cleaner Production,** [s.l.], v. 113, p.86-92, fev. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.019>

THOMAZ, E.; DEL MAR, C. P. Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

TRUSSONI, M., HAYS, C. D., ZOLLO, R. F. Comparing Lightweight Polystyrene Concrete Using Engineered or Waste Materials. **ACI Materials Journal,** [s.l.], v.109, p. 101-107, fev. 2012. <https://doi.org/10.14359/51683575>

UCHÔA, S. B. B., TONHOLO, J., ARRUDA, T. H. S. V., GOMES, P. C. C.; MORAES, K. A. M. Prospecção tecnológica: painéis de vedação utilizando concreto leve e materiais reciclados. **Cadernos de Prospecção**, [s.l.], v. 8, n. 4, p.786-796, 30 dez. 2015. <https://doi.org/10.9771/S.CPROSP.2015.008.087>

VIEIRA, C. C. **Desempenho térmico de painéis de concreto leve**. São Paulo: USP. Monografia apresentada à disciplina SAP 5820 A utilização de novos materiais na tecnologia do concreto. Departamento de Arquitetura e Planejamento – EESC, Universidade Federal de São Paulo, 2005.

VERTAL, Marián et al. Hygrothermal initial condition for simulation process of green building construction. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 167, p.166-176, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.004>.

WU, Z.; WONG, H.s.; BUENFELD, N.r.. Transport properties of concrete after drying-wetting regimes to elucidate the effects of moisture content, hysteresis and microcracking. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 98, p.136-154, ago. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.04.006>

WUFI Pro 5.3. IBP - Fraunhofer Institute for Building Physics. Holzkirchen, Germany, 2013.

XU, Y. JIANG, L., LIU, J., ZHANG, Y. XU, J. HE, G. Experimental study and modeling on effective thermal conductivity of EPS lightweight concrete. **Journal Of Thermal Science And Technology**, [s.l.], v. 11, n. 2, p.1-13, 2016. <https://doi.org/10.1299/jtst.2016jtst0023>

XU, Y., Jiang, L., Xu, J., Li, Y. Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 27, n. 1, p.32-38, fev. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.030>

YUNES, P. R. **Estudo da microestrutura de uma argamassa usando as isotermas de adsorção e microscopia eletrônica**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.

ZANONI, V. SÁNCHEZ, J.M. BAUER, E. Desafios e contribuições: estudo de degradação das edificações por meio de simulação higrotérmica. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2016.

ZANONI, V.A.G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília**. 313 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UnB, Brasília, DF, 2015.