



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



CLAUDIA REGINA BERNARDI BALDIN

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR
RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA NA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM
PLACAS DE FIBROCIMENTO**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO

2019

CLAUDIA REGINA BERNARDI BALDIN

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR
RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA NA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM
PLACAS DE FIBROCIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Civil.
Área de Concentração: Materiais de Construção Civil

Professor Orientador: Dr. José Ilo Pereira Filho

PATO BRANCO

2019

B177e Baldin, Claudia Regina Bernardi.
Estudo da influência da substituição parcial do cimento por resíduos de cerâmica vermelha na transferência de calor em placas de fibrocimento / Claudia Regina Bernardi Baldin. -- 2019.
116 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. José Ilo Pereira Filho
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pato Branco, PR, 2019.
Bibliografia: f. 96 - 105.

1. Cimento. 2. Cerâmica vermelha - Resíduos. 3. Análise térmica. I. Pereira Filho, José Ilo, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 624

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação n.º 33

“Estudo da Influência da Substituição Parcial do Cimento por Resíduo de Cerâmica Vermelha na Transferência de Calor em Placas de Fibrocimento”

por

Claudia Regina Bernardi Baldin

Dissertação apresentada às quatorze horas e trinta minutos, do dia sete de junho de dois mil e dezenove, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Pato Branco. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:

Prof. Dr. José Ilo Pereira Filho
(orientador)
UTFPR/PB

Prof^ª. Dr^ª. Geocris Rodrigues dos Santos
UTFPR/PB

Prof^ª. Dr^ª. Andrea Murillo Betioli
(participação à distância)
IFSC/FL

Prof. Dr. Murilo Cesar Lucas
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil - PPGEC/UTFPR

A via original deste termo, devidamente assinada, encontra-se arquivada na Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC-PB).

DEDICATÓRIA

Ao meu amado filho Vinícius pela compreensão, e
meu esposo Vitor, por todo amor e paciência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela imensa misericórdia e por seu amor incondicional.

Aos meus pais Jair Bernardi e Nair Teresinha Bernardi, por todo amor, carinho e cuidado comigo. Por terem priorizado em suas vidas, que eu e meus irmãos tivéssemos uma boa educação.

Ao meu filho pela paciência nos momentos que precisei me ausentar para os estudos, ao meu esposo Vitor Baldin pela sua grande compreensão, sempre proferindo palavras de incentivo, ânimo e amor.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Ilo Pereira Filho pela oportunidade, conhecimento transmitido e pela sua compreensão durante toda realização deste trabalho.

A professora Dra. Caroline Angulski da Luz por toda ajuda durante a realização desse trabalho, sempre solícita e dedicada.

À UTFPR Pato Branco, especialmente ao PPGEC e todos seus integrantes pela colaboração durante o período em que cursei o mestrado.

Aos colegas Andreza, Priscila, Mariana, Juneor, Camila, Jefferson, Guilherme, Elizandro e Janaína pela amizade durante esse tempo.

Aos estagiários do laboratório de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Pato Branco, Karoline do Amaral, Igor Lazaretti e a aluna de iniciação científica Alice Scalabrim, pelo auxílio na elaboração dos ensaios.

Ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM), localizado na Sede Centro do Câmpus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Ao laboratório de engenharia civil da Faculdade de Pato Branco (FADEP).

Ao Centro de Caracterização e Ensaio de Materiais (CCEM), da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

A todos que de alguma forma contribuíram, quero deixar meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O desempenho térmico de uma edificação está fortemente associado às propriedades dos materiais componentes de sua envoltória. O uso de placas em fibrocimento utilizadas em sistemas *Light Steel Framing (LSF)*, *Light Wood Frame (LWF)* e fachadas ventiladas vem se destacando dentre os novos elementos construtivos. Acredita-se que o aumento da resistência térmica dos componentes construtivos para o uso de fechamentos verticais contribua significativamente para a melhoria do conforto térmico, assim como para redução no consumo de energia das edificações. A utilização de resíduos sólidos provenientes da indústria de cerâmica vermelha (RCV) pode ser visto como uma boa opção devido suas propriedades de baixa condução térmica. Este trabalho teve como objetivo avaliar qual a influência da substituição parcial do cimento Portland por RCV na transferência de calor em placas de fibrocimento. O RCV foi oriundo da indústria de fabricação de blocos e telhas, situadas na região Sudeste do estado do Paraná. Foi avaliado o comportamento de duas formulações referência utilizando para uma delas o cimento CP V ARI e para a outra o CP II - F 32. Foram mantidas em toda as misturas adição do fíler calcário e fibras de celulose e polipropileno (PP) como reforço, substituindo o cimento pelo RCV moído em volume nos percentuais de 0%, 15%, 25% e 50%. O RCV foi caracterizado, analisando-se a sua absorção de água, massa específica, composição química e mineralógica. As amostras foram moldadas por meio de adaptações do processo industrial amplamente utilizado na fabricação de placas e telhas em fibrocimento, para produção em laboratório, o qual já vem sendo usado por outros pesquisadores. O desempenho físico e mecânico das placas de fibrocimento também foram avaliadas, por meio da análise de propriedades como absorção de água, densidade, porosidade e resistência a flexão, consideradas características importantes no emprego do material como componente construtivo. A fim de relatar as propriedades microestruturais, foram realizados ensaios de difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). As propriedades térmicas das amostras foram analisadas utilizando-se dados de condutividade térmica e atraso térmico, em ensaios realizados com amostras aos 28 dias de hidratação. Os resultados de resistência mecânica a flexão de todas as placas analisadas indicaram que o uso do resíduo de cerâmica vermelha moído obtiveram resultado satisfatório, atendendo a norma NBR 15498:2016 – Placas de fibrocimento sem amianto. As amostras apresentaram queda nos valores de densidade e aumento na porosidade, contribuindo com os resultados positivos alcançados no desempenho térmico. A substituição parcial do cimento portland em teores de 25% e 50% de RCV podem reduzir o coeficiente de condutividade térmica das placas em relação as amostras referência (0% de RCV) e em relação a placa comercial analisada. Dessa forma, evidenciando a contribuição do RCV no desempenho térmico de componetes construtivos aplicados em sistemas de vedações verticais extenos (SVVE), sem afetar significativamente a resistência mecânica à flexão das placas.

Palavras-chave: Placas de fibrocimento. Resíduo de cerâmica vermelha. Condutividade térmica.

ABSTRACT

The thermal performance of a building is strongly associated with the properties of the component materials of its wrap. The use of fiber cement boards used in Light Steel Framing (LSF), Light Wood Frame (LWF) systems and ventilated façades has been prominent among the new constructive elements. It is believed that the increase of the thermal resistance of the constructive components for the use of vertical closures contributes significantly to the improvement of the thermal comfort, as well as to the reduction of the energy consumption of the buildings. The use of solid waste from the red ceramic industry (RCV) can be seen as a good option due to its low thermal conduction properties. This work had as objective to evaluate the influence of the partial replacement of the Portland cement by RCV in the heat transference in fiber cement boards. The RCV was from the block and tile manufacturing industry, located in the Southeast region of the state of Paraná. The behavior of two reference structures was evaluated using for one of them CP V ARI cement and the other CP II - F 32. The addition of the limestone and cellulose and polypropylene (PP) fibers as reinforcement was maintained throughout the mixtures, replacing the cement by ground RCV in percentages of 0%, 15%, 25% and 50%. The RCV was characterized by the analysis of water absorption, specific mass, chemical and mineralogical composition. The samples were molded by means of adaptations of the industrial process widely used in the manufacture of boards and tiles in fiber cement for laboratory production, and which have already been used by other researchers. The physical and mechanical performance of the fiber cement boards was also evaluated by analyzing properties such as water absorption, density, porosity and flexural strength, considered important characteristics in the use of the material as a constructive component. In order to report the microstructural properties, x-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) tests were performed. The thermal properties of the samples were analyzed using thermal conductivity and thermal delay data in tests performed with samples at 28 days of hydration. The results of mechanical resistance to bending of all the analyzed plates indicated that the use of the ground red ceramic residue obtained a satisfactory result, according to the norm NBR 15498: 2016 - fiber cement boards. The samples showed a drop in the values of density and increase in the porosity, contributing with the positive results achieved in the thermal performance. The partial substitution of portland cement at 25% and 50% RCV contents can reduce the coefficient of thermal conductivity of the boards in relation to the reference samples (0% of RCV) and in relation to commercial boards analyzed. Thus, showing the contribution of the RCV in the thermal performance of constructive components applied in systems of external vertical seals (SVVE), without significantly affecting the mechanical resistance to the flexion of the boards.

Keywords: Fiber cement boards. Red ceramic residue. Thermal conductivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fachada executada em placa de fibrocimento	27
Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro	30
Figura 3 - Modos de transferência de calor	31
Figura 4 – Condição para transferência de calor	31
Figura 5 - Transferência de calor em uma parede	32
Figura 6- Máquina de Hatschek moderna.....	40
Figura 7 - Materiais empregados para produção de compósitos na construção civil	43
Figura 8 - Diagrama do planejamento experimental - Materiais.....	50
Figura 9 - Diagrama do planejamento experimental – Variáveis avaliadas	51
Figura 10 - Difração de raios-X do fíler Calcário	53
Figura 11 - Equipamento utilizado para ensaio de Fluorescência de raios X.....	54
Figura 12 - Difração de raios-X do RCV	54
Figura 13 – Curva de distribuição de tamanho de poros e volume acumulado de poros presente no RCV.....	55
Figura 14 - a) Fibra em celulose; b) Fibra PP	56
Figura 15 - RCV moído, passante na peneira 100 Mesh	58
Figura 16 – Misturador rotacional	60
Figura 17 – Forma em aço galvanizado.....	60
Figura 18 – Prensagem três placas	61
Figura 19 – Balança hidrostática	62
Figura 20 – Ensaio de flexão três pontos.....	63
Figura 21 – Equipamento de DRX	64
Figura 22 – Amostras de placas de fibrocimento preparadas com resina para ensaio de MEV	65
Figura 23 – (a) MEV Vega3, Tescan, Oxford;(b)MEV EVO, MA15.....	66
Figura 24 – Porta amostras do MEV Vega3, Tescan, Oxford.....	66
Figura 25 - Analisador de fisissorção de nitrogênio.....	67
Figura 26 - Estrutura para ensaio com Câmara “Prohélios”.....	68
Figura 27- DataLogger AKSO	68
Figura 28 - Multímetros ICEL.....	69
Figura 29- Sistema para o ensaio de transferência de calor	69

Figura 30 – Imagens das amostras aos 28 dias de hidratação, antes da realização dos ensaios térmicos	73
Figura 31 – Resistência à flexão placas em fibrocimento produzidas com CP II F 32.....	74
Figura 32 - Resistência à flexão placas em fibrocimento produzidas com CP V.....	74
Figura 33 – Resistência à flexão placas de fibrocimento CP II F 32, CP V ARI e Placa indústria, 28 dias de hidratação	76
Figura 34 - Difratoograma das amostras (placas) com CP II F 32	78
Figura 35- Difratoograma das amostras (placas) com CP V ARI.....	79
Figura 36 – (a) Morfologia geral das fibras de celulose de papel jornal; (b) Morfologia geral fibras PP.....	80
Figura 37 – MEV das placas com CP II F 32, 28 dias de hidratação, sendo: (a) e (b) PF;(c) e (d) PF15; (e) e (f) PF25; (g) e (h) PF50	81
Figura 38 – MEV das placas com CP V -ARI, 28 dias de hidratação, sendo: (a) e (b) PV;(c) e (d) PV15; (e) e (f) PV25; (g) e (h) PV50.....	82
Figura 39 - Gráfico do volume acumulado de poros nas amostras com CP II F 32.....	84
Figura 40- Gráfico do volume acumulado de poros nas amostras com CP V ARI.....	84
Figura 41 - Distribuição do tamanho de poros BET nas amostras com CP II F 32	86
Figura 42 - Distribuição do tamanho de poros BET nas amostras com CP V ARI.....	87
Figura 43 – Coeficiente de condutividade térmica obtidos para as amostras CP II F 32, CP V ARI e placa indústria, aos 28 dias de hidratação	88
Figura 44 – Coeficiente de condutividade térmica para as amostras CP II F 32 e placa indústria, aos 28 dias de hidratação	89
Figura 45 – Coeficiente de condutividade térmica para as amostras CP V ARI e placa indústria, aos 28 dias de hidratação	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios para avaliação de desempenho	29
Tabela 2 - Valores do coeficiente de convecção "h" para situações de convecção natural em edifícios (ar ↔ superfícies)	35
Tabela 3 - Emissividade de superfícies	36
Tabela 4 - Absortividade de cores e superfícies	37
Tabela 5 - Requisitos de resistência à flexão.....	41
Tabela 6- Percentual de perdas das indústrias de cerâmica vermelha.....	46
Tabela 7– Massa específica e permeabilidade aglomerantes	53
Tabela 8- Composição química do RCV por FRX.....	54
Tabela 9- Características físicas e mecânicas das fibras de PP	56
Tabela 10- Massa específica.....	56
Tabela 11 - Formulação empregada nas misturas	57
Tabela 12 - Nomenclatura adotada para as misturas empregadas no experimento	58
Tabela 13- Apresentação das equações para o cálculo das propriedades físicas.....	62
Tabela 14 – Valores médios (6 exemplares) das propriedades físicas das placas aos 28 dias, com desvio padrão entre parênteses.	72
Tabela 15 - Resultados médios obtidos da resistência à flexão 3 pontos (σ), com desvio padrão entre parênteses.....	75
Tabela 16 - Volume acumulado total de poros.....	86
Tabela 17 – Resultados dos ensaios do atraso térmico nas placas de fibrocimento	91
Tabela 18 - Resumo dos resultados obtidos aos 28 dias de hidratação	93
Tabela 19 - Absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente placas CP II F 32/106	
Tabela 20- Absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente placas CP V ARI 108	
Tabela 21 - Módulo de ruptura à flexão amostras CP II F 32, 7 e 28 dias de hidratação.....	110
Tabela 22 - Módulo de ruptura à flexão amostras CP V ARI, 7 e 28 dias de hidratação.....	111
Tabela 23 - Módulo de ruptura à flexão amostras placa indústria.....	111
Tabela 24 - Teste de significância placas CP II F 32, 28 dias de hidratação	112
Tabela 25 - Teste de significância placas CP V ARI, 28 dias de hidratação.....	112
Tabela 26- Teste de significância placas CP II F 32, CP V ARI e PI, 28 dias de hidratação	112
Tabela 27 - Teste Shapiro Wilk e teste de Levene's para as placas CP II F 32, CP V ARI e PI, 28 dias de hidratação	112

Tabela 28 - Teste Tukey para as placas com CP II F 32, CP V-ARI e PI, 28 dias de hidratação	113
Tabela 29 - Teste de significância placas CP II F 32, 28 dias de hidratação	114
Tabela 30- Teste de Dunn para as placas com CP II F 32.....	114
Tabela 31- Teste de significância placas CP V ARI, 28 dias de hidratação.....	114
Tabela 32 - Teste de Dunn para as placas com CP V-ARI	115
Tabela 33- Teste de significância placas CP II F 32, CP V-ARI e PI, 28 dias de hidratação	115
Tabela 34- Teste de Dunn para as placas com CP II F 32, CP V-ARI e PI	116

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Fluxo de calor transferido por condução (W).....	33
Equação 2 - Fluxo de calor transferido por convecção (W).....	34
Equação 3 - Fluxo de calor radiante (W).....	35
Equação 4 - Módulo de ruptura (Mpa).....	63
Equação 5 - Coeficiente de condutividade térmica (W/m.k).....	70

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ΔT	Diferença de temperatura superficiais das faces ($^{\circ}\text{C}$ ou K)
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
A	Área (m^2)
A/C	Água/cimento
ABCERAM	Associação brasileira de cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFt	Etringita
Al	Alumínio
Al_2O_3	Óxido de alumínio
ANICER	Associação nacional da indústria cerâmica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B	Largura do corpo-de-prova (mm)
BET	<i>Brunauer Emmett Teller</i>
C_3S	Fase anidra
CaCO_3	Calcita
Cc	Carbonato de cálcio
cc/g	Centímetro cúbico por grama
CCEM	Centro de Caracterização e Ensaaios de Materiais
CH	Hidróxido de Cálcio
cm^2/g	Centímetros quadrado por grama
CMCM	Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais
CO_2	Gás carbônico
CP	Cimento Portland
C_p	Corpos de prova
CP II F 32	Cimento com adição de materiais carbonáticos – fíler
CP III	Cimento de alto-forno
CP IV	Cimento pozolânico
CP V ARI	Cimento de alta resistência inicial

C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
D	Espessura do corpo-de-prova (mm)
DRX	Difração de Raio X
DTA	Análise térmica diferencial
EDS	Espectroscopia por dispersão de energia
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
FRX	Fluorescência de Raios-X
g/cm ³	Grama por centímetros cúbico
GPa	Giga Pascal
H	Coefficiente médio de transferência de calor por convecção (W/(m ² .K))
h _e	Coefficiente de convecção (8,0 W/m ² .K)
Hrs	Horas
I	Intermediário
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPT	Instituto de pesquisas Tecnológicas de São Paulo
k	Condutividade térmica do material (W/m. K)
Kn	Quilo Newtons
KPa	Quilo Pascal
L	Espessura (m)
l	Vão inferior entre cutelos (mm)
LAMIR	Laboratório de análises minerais e rochas
LSF	<i>Light Steel Framing</i>
LWF	<i>Light Wood Frame</i>
M	Mínimo
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
M _{im}	Massa imersa
Mm	Milímetro
MOR	Módulo de ruptura (Mpa)
MPa	MegaPascal
Ms	Massa seca
M _{sss}	Saturada superfície seca
N ₂	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira

OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
p	Carga máxima aplicada (N)
P	Portlandita
PF	Placa produzida com CP II F 32, 0% de substituição do cimento por RCV
PF15	Placa produzida com CP II F 32, 15% de substituição do cimento por RCV
PF25	Placa produzida com CP II F 32, 25% de substituição do cimento por RCV
PF50	Placa produzida com CP II F 32, 50% de substituição do cimento por RCV
PGRS	Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos
PI	Placa Comercial
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
PV	Placa produzida com CP V ARI, 0% de substituição do cimento por RCV
PV15	Placa produzida com CP V ARI, 15% de substituição do cimento por RCV
PV25	Placa produzida com CP V ARI, 25% de substituição do cimento por RCV
PV50	Placa produzida com CP V ARI, 50% de substituição do cimento por RCV
PVA	Poliacetato de vinila
Q_{cd}	Fluxo de calor transferido por condução (W)
Q_{cv}	Fluxo de calor transferido por convecção (W)
Q_{rd}	Fluxo de calor radiante (W)
RCV	Resíduo de cerâmica vermelha
RPM	Rotações por minute
S	Superior
s	Segundos
SVVE	Sistemas de vedação vertical externo

T_1	Temperatura da superfície 1 (°C ou K).
T_2	Temperatura da superfície 2 (°C ou K).
T_{se}	Temperatura externa de um ponto afastado da superfície (k)
UFPR	Universidade Federal do Paraná
USA	<i>United States of America</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
γ	Massa específica
E	Fator de emissividade da superfície (adimensional)
Σ	Constante da radiação, de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)
Φ	Atraso térmico (h)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	JUSTIFICATIVA.....	21
1.2	OBJETIVO GERAL.....	24
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1	DESEMPENHO E SISTEMAS DE VEDAÇÃO VERTICAL EXTERNO	26
2.1.1	NBR 15575:2013 – Edificações Habitacionais – Desempenho e NBR 15220:2005 – Desempenho Térmico de Edificações	28
2.2	TROCAS TÉRMICAS.....	30
2.2.1	Transferência de calor entre dois meios ou entre um meio e o ambiente construído.	31
2.2.1.1	Condução.....	32
2.2.1.2	Convecção	34
2.2.1.3	Radiação	35
2.2.2	Inércia térmica.....	37
2.2.3	Fatores que influenciam as propriedades térmicas dos materiais.....	39
2.3	PLACAS DE FIBROCIMENTO.....	40
2.3.1	Compósitos.....	42
2.4	CERÂMICA VERMELHA.....	44
2.4.1	Resíduo de cerâmica vermelha.....	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1	MATERIAIS.....	51
3.1.1	Aglomerantes.....	52
3.1.2	Fibras	55
3.1.3	Água	57
3.2	MÉTODOS.....	57
3.2.1	Definição das misturas	57
3.2.2	Métodos de preparo do resíduo de cerâmica vermelha	58
3.2.3	Produção das placas de fibrocimento	59
3.2.4	Caracterização das placas de fibrocimento	62
3.2.4.1	Propriedades físicas	62
3.2.4.2	Propriedades mecânicas	63

3.2.4.3	Difração de Raios-X (DRX).....	64
3.2.4.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	64
3.2.4.5	Porosidade	66
3.2.4.6	Condutividade térmica e atraso térmico	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1	PROPRIEDADES FÍSICAS.....	71
4.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	73
4.3	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	78
4.3.1	Avaliações pela técnica de Difração de Raios X (DRX).....	78
4.3.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	79
4.4	POROSIDADE.....	83
4.5	ANÁLISE TÉRMICA.....	87
4.5.1	Atraso térmico	91
4.6	RESUMO DOS RESULTADOS.....	92
5	CONCLUSÃO	94
	REFERÊNCIAS	96
	APÊNDICE A	106
	APÊNDICE B.....	110
	APÊNDICE C	114

1 INTRODUÇÃO

O desempenho térmico de uma edificação depende da combinação de vários elementos que fazem parte da sua composição. Dentre eles destacam-se as paredes, pisos, cobertura e esquadrias, além do posicionamento do edifício, equipamentos e instalações com possíveis fontes de calor. Entretanto, a condutividade térmica dos materiais utilizados nos edifícios é um dos principais fatores que afetam o transporte de calor ou frio (GALVÃO, 2014; MENDES, 2002; TASDEMIR; SENGUL; TASDEMIR, 2017).

Quanto maior for a condutividade térmica dos materiais que compõem um componente ou elemento construtivo, maiores serão as variações na temperatura dentro de um ambiente, por consequência tem-se o aumento do consumo de energia para o aquecimento ou arrefecimento, visando proporcionar condições de conforto térmico aos usuários. Com o objetivo de reduzir as variações de temperatura em ambientes e diminuir o consumo de energia, deve-se priorizar o uso de componentes construtivos que apresentem menor condutividade térmica, que possibilitem atender à critérios e requisitos mínimos exigidos em norma quanto ao desempenho das edificações (RIBAS, 2013).

Nos últimos anos, observou-se uma constante evolução nas regulamentações e normas, tanto internacionais como nacionais, direcionadas à concepção de edificações mais eficientes em relação ao consumo de energia. Um exemplo disso, pode-se citar a NBR 15575 -1 (ABNT, 2013), onde considera que o desempenho térmico das edificações depende do comportamento interativo entre fachadas, cobertura e piso, fixa critérios e requisitos mínimos a serem atendidos pelos elementos construtivos de edificações habitacionais quanto ao seu comportamento em uso.

Diante do avanço na implementação de normas brasileiras que regulamentam o desempenho das edificações, torna-se necessário o desenvolvimento de pesquisas a fim de melhorar as propriedades dos componentes construtivos, utilizados principalmente em sistemas de vedações verticais externos.

Com foco no uso de novas tecnologias, os sistemas industrializados LSF, LWF e fachadas ventiladas, vêm se destacando no mercado da construção civil. Em geral, formados por perfis em aço galvanizado, com revestimentos externos em placas de fibrocimento, tem como principais vantagens montagem rápida, estrutura leve e elevada resistência mecânica, com grande potencial de reciclagem e reutilização (SOARES *et al.*, 2017).

A escolha de materiais adequados representa um considerável desafio para melhorar o conforto térmico em edifícios. De acordo com Campello (2013) e Carvalho (2015), a indústria da construção civil busca estratégias para modernização do setor, racionalização nos processos construtivos, redução nos danos ao meio ambiente e edificações com maior eficiência energética. Para TISKATINE *et al.*, (2018), a utilização de materiais de construção eficientes não afeta apenas a demanda de energia, mas também a sustentabilidade.

Neste contexto, a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, regida pela Lei 12.305 de 2010, traz um importante avanço para o setor. Com isso, à obrigatoriedade da execução do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), que vão desde os resíduos sólidos municipais, estaduais e os industriais, onde o descarte realizado em aterros sanitários, apesar de ser possível e o mais usual, não é considerado o mais adequado. Segundo Azevedo (2018), o uso de resíduos sólidos com potencial para substituição parcial do cimento Portland no desenvolvimento de materiais compósitos, como placas de fibrocimento, representam uma solução mais econômica e ecologicamente mais aceitável.

Dentre os vários resíduos sólidos provenientes do ramo da construção civil, destaca-se os resíduos da indústria de cerâmica vermelha, que apresentam grande potencial de valorização. Sendo, no entanto, um dos resíduos sólidos mais comuns do setor cerâmico nacional, gerado após a etapa de queima, onde ocorre a alteração da estrutura cristalina das argilas por meio de transformações físicas e químicas, obtendo novas propriedades como porosidade, estabilidade dimensional, resistência mecânica (dureza), isolamento térmico (baixa condutibilidade térmica), entre outras (ABCERAM, 2004; NG; JELLE; STAEHLI, 2016; OLIVEIRA, 2009).

Considerando que poucas pesquisas tratam acerca da aplicabilidade do resíduo de cerâmica vermelha na fabricação de placas de fibrocimento, bem como, a influência desse resíduo no comportamento térmico desse material, esse trabalho anseia contribuir a respeito da transferência térmica das placas, avaliando o coeficiente de condutividade térmica, a resistência mecânica à flexão, propriedades físicas e químicas do componente.

1.1 JUSTIFICATIVA

Sabe-se que o emprego de construções industrializadas a seco, como os sistemas LSF, LWF e fachadas ventiladas é cada vez maior no mercado nacional. Visto que essas tecnologias ainda são recentes no Brasil, as placas e chapas planas utilizadas atualmente como componentes construtivos nesses sistemas, vêm sendo tema de pesquisas constantes, visando melhorias e

desenvolvimento, com foco na eficiência energética dos edifícios e redução dos impactos ambientais (SOARES *et al.*, 2017).

De acordo com Martins (2018), as placas de fibrocimento apresentam elevada inércia térmica e menor massa térmica, o que pode representar uma problemática em algumas condições, relacionadas ao conforto, causando maiores oscilações de temperatura e maior demanda de energia para aquecimento e arrefecimento. Por outro lado, autores como Ghavami, Toledo Filho e Barbosa (1999), citam algumas das principais propriedades que os compósitos cimentícios são capazes de melhorar, sendo: Resistência à tração e flexão, rigidez, resistência à fadiga, resistência à corrosão e resistência térmica.

Entretanto, as placas de fibrocimento são definidas como compósitos por apresentarem duas ou mais fases quimicamente diferentes e separadas por uma interface distinta (CALLISTER, 2011). Dessa forma, essas placas podem ter suas propriedades térmicas melhoradas com a adição de materiais com elevada resistência térmica, porém, com o cuidado de não afetar (prejudicar) o desempenho mecânico, obtendo assim, uma melhor combinação de suas propriedades. A busca por condições de conforto requer um melhor conhecimento do desempenho térmico dos materiais que formam as paredes de edifícios.

Nos últimos anos, o interesse no uso de matérias-primas alternativas para fabricação de compósitos vem aumentando consideravelmente. A reciclagem e a reutilização estão entre as principais alternativas na busca pelo desenvolvimento sustentável, visto que influenciam diretamente no consumo de recursos naturais e de energia. Com o objetivo de melhorar o desempenho térmico das placas, e com isso minimizar o consumo energético das edificações, busca-se avaliar a substituição parcial do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha (RCV) na fabricação de placas de fibrocimento.

De acordo com dados da ANICER (2015), no Brasil há aproximadamente 6.903 empresas produtoras de cerâmica vermelha, sendo responsável por mais de 90% das alvenarias e coberturas construídas no país, acarretando uma produção de 4,5 bilhões de blocos produzidos mensalmente e 1,3 bilhão de telhas, resultando em uma quantidade elevada de resíduos provenientes dessas indústrias. Estima-se que o volume de material descartado situa-se em média de 1,6 % a 10 % da produção total de cerâmica vermelha no país (CASTRO *et al.*, 2017; HANSEN *et al.*, 2015, PAIXÃO, 2011).

Os materiais cerâmicos de forma geral possuem propriedades características intrínseca como: elevada dureza, isolantes de eletricidade, isolantes de calor e, uma deformação plástica e elástica reduzida. Por apresentarem ligações iônicas e covalentes muito estáveis quimicamente, possuem elevada durabilidade (SOUZA *et al.*, 2016). No entanto, as cerâmicas

vermelhas, como blocos e telhas, fabricadas em grande escala no Brasil apresentam-se com elevada porosidade. Com isso, a grande quantidade de poros reduz a resistência e consequentemente a durabilidade, porém autores como Vivaldini *et al.*, (2014), afirmam que, quanto maior a porosidade de um material menor a sua condutividade térmica.

NG, Jelle e Staehli (2016), afirmam que quando o cimento Portland é substituído em parte por argila calcinada em compósitos fabricados com aerogel apresentam uma redução de até 20% na condutividade térmica.

Segundo a literatura, o resíduo de cerâmica vermelha moído finamente apresenta características de um material pozolânico, o que auxilia na redução do consumo de cimento e, consequentemente, minimiza a emissão de CO₂ na fabricação do cimento Portland (CASTRO *et al.*, 2017; GONÇALVES *et al.*, 2009; LEITE e MOLIN, 2002; RICHARD, 2015; TOLEDO FILHO *et.al.*, 2007).

Pesquisadores como Angulski da Luz *et al.*, (2005); El-Gamal *et al.*, 2017; Menezes *et al.*, (2009); Sabir; Wild e Bai (2001), estudaram o aproveitamento de resíduos provenientes da indústria da construção civil (resíduos de demolição) e indústria química (fosfogesso), como fonte alternativa de adição mineral e substituição parcial do cimento Portland, onde esses resíduos possibilitaram obter produtos com desempenho técnico semelhante àqueles produzidos com matérias-primas convencionais.

Além disso, Anjos, Ghavami e Barbosa (2003b), confirmam em seus estudos a viabilidade no uso de RCV como substituição parcial do cimento na fabricação de compósitos. Os autores investigaram a substituição parcial do cimento por resíduo de fábrica de blocos cerâmicos na produção de compósitos cimentícios, utilizando como reforço na matriz de cimento, polpa de bambu refinada. As substituições foram em percentagens de 0, 20, 30 e 40% de RCV em relação à massa de cimento. O estudo apresenta redução na densidade e aumento na absorção de água e na porosidade aparente conforme aumenta o teor de RCV. Em relação a resistência mecânica não houve alterações significativas para substituições até 30%. Dessa forma os resultados observados pelos autores Anjos, Ghavami e Barbosa (2003b), corroboram com os objetivos dessa pesquisa.

Embora pesquisadores tenham abordado o comportamento de resíduos de materiais cerâmicos na composição de matrizes cimentícias, pouco se conhece desse comportamento na fabricação de placas de fibrocimento e aspectos relacionados à transferência de calor.

Assim, o presente estudo justifica-se pela contribuição no desenvolvimento de placas de fibrocimento reforçadas com fibras para uso em sistemas de vedação vertical que visam

melhores propriedades térmicas, valorização de resíduos sólidos produzidos pelas indústrias de cerâmica vermelha, contribuindo também na redução do consumo de cimento.

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da substituição parcial do cimento Portland em volume por resíduo de cerâmica vermelha moído na transferência de calor e nas propriedades mecânicas em placas de fibrocimento.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar a composição química e características físicas do resíduo de cerâmica vermelha;
- Avaliar o efeito da substituição do cimento pelo RCV no comportamento das placas de fibrocimento quanto as suas propriedades físicas, resistência mecânica à flexão, porosidade e propriedades microestruturais;
- Avaliar o efeito da substituição do cimento pelo RCV na transferência de calor apresentada pelas placas de fibrocimento por meio do coeficiente de condutividade térmica;
- Abordar comparativamente as principais características apresentadas pelas placas de fibrocimento que efetivamente auxiliaram na redução da condutividade térmica.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Após este capítulo que aborda a introdução ao tema, justificativa apresentando trabalhos científicos de significativa importância, mostrando dessa forma o atual cenário sobre o tema abordado, hipótese, objetivos (geral e específicos), o texto organiza-se na seguinte maneira.

No Capítulo 2 realizou-se uma revisão bibliográfica dos principais temas abordados na dissertação, sendo eles: Desempenho térmico, sistemas de vedação vertical externo (SVVE), placas de fibrocimento, compósitos e resíduos provenientes da indústria de cerâmica vermelha.

Apresentando a importância dos SVVE no desempenho das edificações, com foco no desempenho térmico, sustentável e requisitos mínimos a serem atendidos segundo a NBR 15575 (2013) e NBR 15220 (2005).

Definição e uso de placas cimentícias com reforço em fibras. Definição de material compósito. Em seguida, apresenta-se o panorama geral da indústria de cerâmica vermelha no país e no estado do Paraná. A geração de resíduos, com enfoque especial na gestão e utilização como matéria-prima, apresentando dados de sua produção, características e aspectos de sua disponibilidade e valorização.

No Capítulo 3, apresenta-se a descrição dos materiais e métodos empregados na etapa experimental, possibilitando em alguns momentos a execução de um dos objetivos (caracterização do RCV) deste estudo .

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos no programa experimental da pesquisa, todos os resultados são precedidos das respectivas discussões. Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões a respeito do estudo realizado nesta pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DESEMPENHO E SISTEMAS DE VEDAÇÃO VERTICAL EXTERNO

As edificações são compostas por um conjunto de sistemas, definidos pela NBR 15575 (ABNT, 2013), “como a maior parte funcional do edifício”. Fazem parte desse conjunto de sistemas as fundações, estruturas, instalações hidrossanitárias e elétrica, cobertura, vedações verticais, entre outras. De acordo com Carvalho (2015), Fontenelle (2012) e Oliveira (2009), é possível afirmar que dentre os subsistemas que compõem um edifício à fachada possui relação de extrema importância, com responsabilidade de criar condições de habitabilidade e ainda exercer grande influência no consumo energético da edificação.

Os sistemas de vedação vertical externo (SVVE) têm a função de proteger o homem e suas atividades dos agentes externos, o que determina grande parte do desempenho do edifício (CARVALHO, 2015). No entanto, os materiais que compõem esses elementos possuem características que devem ser analisadas, a fim de contribuir para atender aos requisitos mínimos de uma edificação conforme especificado pela NBR 15220 (ABNT, 2005), sendo desempenho estrutural, segurança contra incêndio, segurança no uso e operação, estanqueidade, desempenho acústico, durabilidade, impacto ambiental e desempenho térmico.

De acordo com Fontenelle (2012), os materiais que compõem os sistemas de envoltória das edificações são responsáveis pela estética e fatores importantes relacionados à habitabilidade, pois influenciam na valorização do imóvel e no desempenho da edificação em relação ao conforto do usuário.

Nesse sentido, aspectos como uso ou não de condicionamento artificial dos ambientes internos podem influenciar na sustentabilidade de um edifício durante toda sua vida útil, sendo responsável por até 40% dos gastos energéticos das edificações (CARVALHO, 2015; OLIVEIRA, 2009; SANTIAGO, 2007).

Segundo Miranda (2011), o desempenho térmico depende das características dos materiais que compõem os elementos construtivos de uma edificação, assim como o ganho de calor externo por meio da circulação do ar pelos ambientes, além da influência do uso e ocupação da edificação.

As fontes de calor podem ser de origem natural ou artificial. Atividades humanas e equipamentos em uso são exemplos de fontes de calor artificiais, que geram aumento na temperatura nos ambientes internos. Já a principal fonte de calor natural é a radiação do sol. A

fim de amenizar as variações de temperatura nas edificações que causam desconforto aos seus usuários, soluções arquitetônicas são aplicadas, considerando, principalmente, a zona bioclimática em que a edificação será realizada, direção dos ventos, localização geográfica em relação ao sol, dimensões e modelos das aberturas, assim como os materiais que compõem os elementos utilizados para os fechamentos (MARTINS, 2018).

Agopyan e John (2011), afirmam que a utilização de componentes construtivos com menor densidade é uma das principais estratégias do setor da construção civil para adequar suas demandas à necessidade dos usuários e capacidade de sustentação do planeta. Dessa forma, atualmente, há uma tendência na industrialização do setor, assim como o uso de sistemas construtivos a seco, do tipo *Steel frame* e *Wood frame*, utilizando-se placas de fibrocimento (Figura 1).



Figura 1 - Fachada executada em placa de fibrocimento
Fonte: Escola Engenharia (2019)

Para Crasto (2005), as principais vantagens relacionadas ao uso desses sistemas construtivos industrializados está na agilidade de execução das obras, e questões que envolvem sustentabilidade ambiental, visto que possibilitam a redução no consumo de matérias-primas naturais e energia. Em particular, a busca por materiais recicláveis que possibilitem um baixo valor da condutividade térmica é desejável devido a sua habilidade de propiciar um bom isolamento térmico (XU e CHUNG, 2000).

De acordo com Martins (2018), as propriedades dos materiais utilizados na fabricação de componentes que fazem parte dos SVVE das edificações interferem diretamente no comportamento termo acústico, resistência ao fogo, bem como, o consumo energético. Diante

disso, é possível afirmar a necessidade de estudos com foco na condutividade térmica dos componentes construtivos aplicados em SVVE, buscando a valorização de resíduos sólidos.

Com ênfase no desempenho térmico das edificações em relação aos materiais utilizados em sua envoltória, se faz necessário ainda, o entendimento dos requisitos e diretrizes especificados nas normas em vigor atualmente no país, que são apresentados a seguir.

2.1.1 NBR 15575:2013 – Edificações Habitacionais – Desempenho e NBR 15220:2005 – Desempenho Térmico de Edificações

A NBR 15575 (ABNT, 2013) e a NBR 15220 (ABNT, 2005), têm juntas o objetivo de estabelecer diretrizes construtivas, requisitos mínimos de desempenho, métodos e critérios de avaliação para um maior controle de qualidade no setor da construção civil, procurando atender às exigências dos usuários, em habitações de forma geral (NBR 15575 - 2013) e habitações unifamiliares de interesse social (NBR 15220 - 2005).

Para verificação do desempenho térmico de uma edificação, aplica-se a norma de desempenho brasileira NBR 15575 (ABNT, 2013), e a norma americana ANSI/ASHRAE, (2014), as quais trazem parâmetros de conforto térmico para as edificações com base em condições naturais de insolação e ventilação, visando proporcionar o mínimo de conforto a seus usuários.

A NBR 15575-1 (ABNT, 2013), estabelece que as condições térmicas no interior do edifício sejam melhores ou iguais às do ambiente externo, à sombra, para o dia típico de projeto de verão, e as condições térmicas no interior do edifício sejam melhores que do ambiente externo, no dia típico de projeto de inverno. Sendo recomendado ainda, os níveis mínimo (M), intermediário (I) e superior (S) apresentados na Tabela 1, de acordo com a distribuição das zonas bioclimáticas brasileira (Figura 2).

Frota e Schiffer (2001) observaram que a arquitetura tem a função de minimizar as sensações de desconforto, geradas pelas variações climáticas, bem como o excesso de calor, frio ou vento, propiciando aos ambientes internos um clima confortável tanto quanto um espaço ao ar livre em uma temperatura amena.

Tabela 1 - Critérios para avaliação de desempenho

	Nível de desempenho	Zonas Bioclimáticas	
		Zonas 1 a 7	Zona 8
Condições de verão	Mínimo	$T_{i_{max}} \leq T_{e_{max}}$	$T_{i_{max}} \leq T_{e_{max}}$
	Intermediário	$T_{i_{max}} \leq (T_{e_{max}} - 2^{\circ}\text{C})$	$T_{i_{max}} \leq (T_{e_{max}} - 1^{\circ}\text{C})$
	Superior	$T_{i_{max}} \leq (T_{e_{max}} - 4^{\circ}\text{C})$	$T_{i_{max}} \leq (T_{e_{max}} - 2^{\circ}\text{C})$ e $T_{i_{min}} \leq (T_{e_{min}} + 1^{\circ}\text{C})$
Condições de inverno	Nível de desempenho	Zonas 1 a 5	Zonas 6, 7 e 8
	Mínimo	$T_{i_{min}} \geq (T_{e_{min}} + 3^{\circ}\text{C})$	Nestas zonas este critério não precisa ser verificado.
	Intermediário	$T_{i_{min}} \geq (T_{e_{min}} + 5^{\circ}\text{C})$	
	Superior	$T_{i_{min}} \geq (T_{e_{min}} + 7^{\circ}\text{C})$	

$T_{i_{max}}$ - é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus centígrados;

$T_{e_{max}}$ - é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus centígrados;

$T_{i_{min}}$ - é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus centígrados;

$T_{e_{min}}$ - é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus centígrados.

NOTA: Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3 (ABNT, 2005c)

Fonte: NBR 15575-1 - ABNT (2013)

Conforme descrito na norma internacional Standard 55 (ANSI/ASHRAE, 2004), *conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve o usuário*. Entretanto, variações fisiológicas e psicológicas, alteram de pessoa para pessoa, o que torna difícil satisfazer a todos em um mesmo espaço.

As condições ambientais necessárias para o conforto diferem entre cada pessoa. Deste modo, pode-se citar dois fatores que devem ser considerados no projeto de uma edificação:

- a) Melhores condições de conforto térmico aos moradores de forma geral e;
- b) Eficiência energética da habitação, isso, considerando a “Arquitetura bioclimática”.

A Arquitetura bioclimática pode ser definida como sendo a compreensão das variáveis climáticas existentes na região da edificação a ser construída, como o sol, o vento, e as chuvas, analisando qual será o consumo de energia através de simulações, buscando conforto com baixo consumo de energia (FALLIS, 2011; LAMBERTS; DUTRA e PEREIRA, 2014).

Com o objetivo de avaliar o desempenho de habitações unifamiliares térreas, atualmente, a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), divide o território brasileiro em oito zonas bioclimáticas, a partir de uma relativa homogeneidade bioclimática (Figura 2). Esta distribuição foi uma adaptação da Carta Bioclimática proposta por Givone (1992). Foram utilizados dados

das normas climatológicas de 330 cidades (dados do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET) brasileiras, as quais foram aplicadas, através de interpolação, para estimar o clima das demais cidades. A relação das 330 cidades cujos climas foram classificados em oito zonas bioclimática que estão apresentadas no anexo A da NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

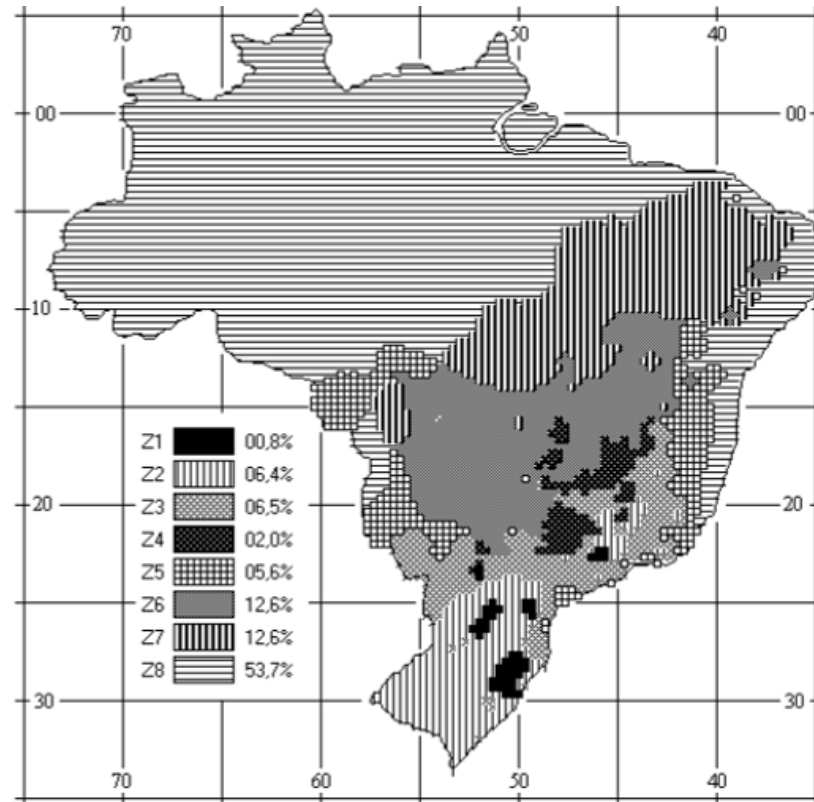


Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro
 Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

2.2 TROCAS TÉRMICAS

Para análise de transferência de calor em placas de fibrocimento, sob a ótica do conforto térmico, é essencial um estudo de revisão dos principais conceitos relacionados às trocas térmicas que podem ocorrer entre ambientes internos e externos, especialmente relacionado aos materiais constituintes desses elementos.

O desempenho térmico dos elementos construtivos tem a função de melhorar as condições de conforto térmico dentro do edifício, além das suas propriedades físicas e mecânicas necessárias para o desempenho da estrutura. O desempenho térmico de um material é diretamente relacionado à transferência de calor permitida por ele. Essa transferência de calor

pode ocorrer de três modos, sendo eles, condução, convecção e radiação térmica, conforme ilustrado na Figura 3 (BERGMAN *et al.*, 2014).

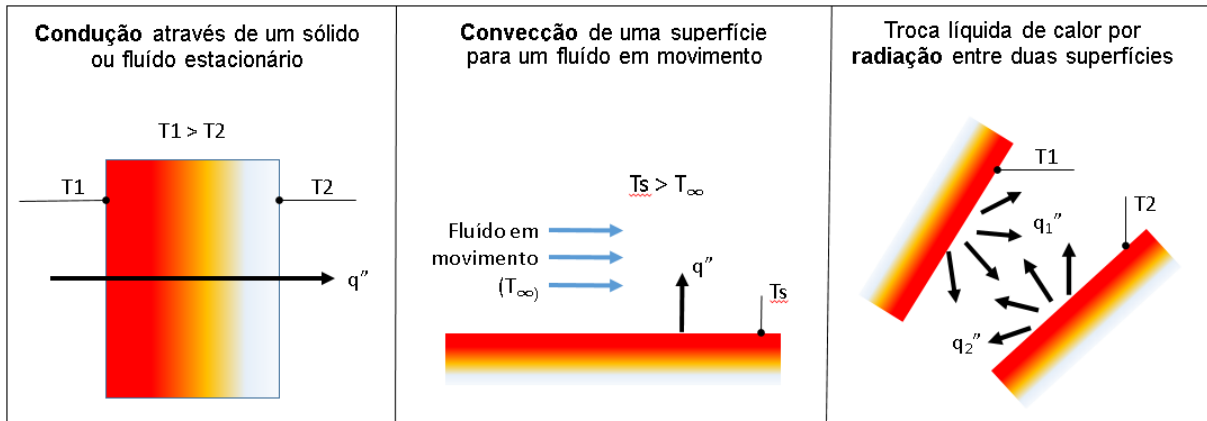


Figura 3 - Modos de transferência de calor

Fonte: BERGMAN *et al.*, (2014)

2.2.1 Transferência de calor entre dois meios ou entre um meio e o ambiente construído

Quando há um gradiente de temperatura entre um meio, ou dois meios, sempre haverá uma transferência de calor, até que se atinja o equilíbrio térmico, sendo transferido do meio mais quente para o mais frio. No caso de dois corpos, onde o corpo A (T_1) cede parte da sua energia térmica para o corpo B (T_2), que ao assimilar esta energia térmica, aumentará sua temperatura até que a temperatura dos dois corpos se equiparem ($T_1=T_2$) (Figura 4). Na Figura 5 observa-se o sentido do fluxo de calor, que atravessa a parede, em função da diferença de temperatura entre os meios externo e interno (LAMBERTS e DUARTE, 2016).



Figura 4 – Condição para transferência de calor

Fonte: Lamberts, Duarte (2016)

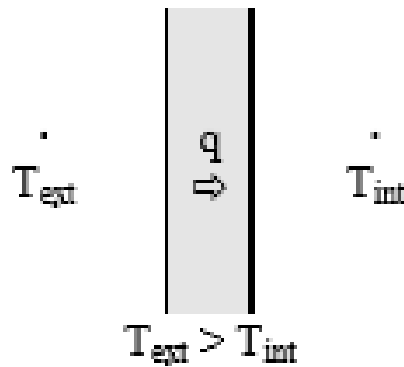


Figura 5 - Transferência de calor em uma parede
Fonte: Lamberts, Duarte (2016)

Entende-se por propriedade térmica o desempenho que um material oferece à aplicação de calor. As propriedades térmicas de um material ou componente construtivo podem ser analisadas pelo coeficiente de condutividade térmica, a difusividade térmica, calor específico, resistência térmica e atraso térmico, dentre outras. No entanto, primeiramente se faz necessário o entendimento dos três princípios de trocas térmicas que podem ocorrer entre ambientes internos e externos, sendo eles, condução, convecção e radiação térmica, que estão apresentados nos itens a seguir.

2.2.1.1 Condução

A condução é um meio de transferência de calor que ocorre entre dois pontos de um mesmo sólido, entre dois sólidos em contato direto ou um fluido em repouso, devido a uma variação de temperatura. A condução de calor acontece de uma área com uma temperatura elevada para uma área de baixa temperatura por meio de um contato direto.

Segundo Gomes (2015), cada material possui uma capacidade específica de transmitir calor que varia em função da sua estrutura atômica ou molecular. Assim, os materiais maus condutores de calor, considerados isolantes térmicos, possuem seus elétrons externos, firmemente ligados em seus átomos. Os materiais fibrosos e orgânicos são conhecidos como isolantes térmicos, por possuírem uma estrutura cristalina menos organizada que dificultam o fluxo de calor. Os metais propiciam melhor fluxo de calor por dispor em sua estrutura, elétrons externos livres, capaz de conduzir melhor energia elétrica e calor. Essa propriedade física dos materiais que permite a condução de calor é denominada de condutividade térmica.

A condutividade térmica (k) é uma propriedade que determina o fluxo de calor sobre um material em função dos níveis de temperaturas aplicadas, sendo um dos parâmetros mais importantes para o estudo da transferência de calor (GALVÃO, 2014).

Para o estudo da transferência de calor Ozisik (1993), descreve a lei básica denominada Lei de Fourier, onde estabelece que o calor transferido por condução é diretamente proporcional a área, a condutividade térmica do material e a diferença de temperatura, é inversamente proporcional ao comprimento (ou espessura) do material, sendo expresso conforme a Equação 1:

$$q_{cd} = \frac{k \cdot A}{L} \Delta T \quad (1)$$

onde:

q_{cd} = fluxo de calor transferência por condução (W);

k = condutividade térmica do material (W/m. K);

A = área (m²);

L = espessura (m);

ΔT = diferença de temperatura superficiais das faces (K).

A condutividade térmica de um compósito cimentício pode variar em função da sua densidade e umidade, obtida utilizando-se da adição ou substituição de seus componentes por materiais porosos de menor peso específico. Geralmente, os materiais mais porosos apresentam uma fração de espaço vazio no material, onde o vazio pode conter ar ou água. Esses poros podem ainda apresentar características específicas, como serem ou não interligados (MENDES, 2002).

A NBR 15220-3 (ABNT, 2005), apresenta valores indicativos de condutividade térmica para placas de fibrocimento utilizadas em sistemas de fechamento vertical externo como *wood frame* e *stell frame*, para placas com densidade entre 1800 a 2200kg/m³, a condutividade térmica indicada é de 0,95W/(m.K), no entanto para densidade entre 1400 a 1800kg/m³, a condutividade térmica apresentada é de 0,65W/(m.K).

2.2.1.2 Convecção

Para Frota e Schiffer (2001); Lamberts e Duarte (2016), a convecção pode ser verificada quando ocorre o contato molecular entre dois corpos, onde pelo menos um deles, é um fluido, estando os dois a diferentes temperaturas. A transferência de calor por convecção pode ser classificada como natural ou forçada. Dessa forma, se o fluido escoar sobre uma superfície sólida e a movimentação for decorrente somente pela diferença de densidade, tem-se a convecção natural. De outro modo, a convecção forçada é originada por meios externos, quando o escoamento do fluido é causado por exemplo por um ventilador, uma bomba, ou mesmo, devido a velocidade do vento.

O coeficiente de calor por convecção varia de acordo com a velocidade, densidade do fluido, assim como a forma e a rugosidade da superfície, além de uma série de propriedades termodinâmicas do fluido (ORDENES; LAMBERTS e GUTHS, 2008).

A Equação 2 pode ser utilizada para calcular a taxa de transferência de calor por convecção, independentemente da natureza específica do processo (BERGMAN *et al.*, 2014; BEZERRA, 2003; FROTA e SCHIFFER, 2001; GOMES, 2015).

$$q_{cv} = h(\Delta T) \quad (2)$$

onde:

q_{cv} = fluxo de calor por convecção (W/m²);

h = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/(m².K));

ΔT = diferença de temperatura entre a superfície e o fluido (K).

Para Incropera (2007), o coeficiente de transferência de calor por convecção (h) pode ser determinado, pois o estudo da convecção “se reduz a um estudo de procedimentos”. Segundo Boabaid (2010), o coeficiente de transmitância térmica por convecção (h), utilizado para mensurar o fluxo de calor (q), depende de vários fatores, porém pode ser mensurado quando considerado o tipo de convecção, se forçada ou natural, estado físico da matéria, líquido ou gás, ou ainda se há uma substância em mudança de fase. A Tabela 2 apresenta valores de coeficiente de transferência de calor para casos de convecção natural, onde a pesquisa envolve a transferência de calor em ambientes condicionados.

Tabela 2 - Valores do coeficiente de convecção "h" para situações de convecção natural em edifícios (ar ↔ superfícies)

Situação	h (W/m ² .K)
Paredes internas	8,0
Forros internos	6,0
Pisos internos	10,5
Paredes externas (sem vento)	25,0
Superfícies horizontais externas (sem vento)	29,0

Fonte: Boabaid (2010)

2.2.1.3 Radiação

A radiação térmica é um meio de troca de calor entre dois corpos, separados pelo vácuo ou por uma superfície transparente, há uma distância qualquer, através de sua capacidade de emitir e de absorver energia térmica. A energia do campo de radiação é transmitida na forma de ondas eletromagnéticas, que ao ser absorvida provoca efeitos térmicos.

Toda matéria com temperatura diferente de zero emite calor por radiação. O fluxo máximo de calor que é emitido por um corpo, é chamado de corpo negro (radiador ideal). Entretanto, os corpos reais também emitem e absorvem calor radiante, porém com menos intensidade. Na Equação 3 é possível observar a descrição do fenômeno de fluxo de calor que ocorre entre pelo menos dois corpos (BERGMAN et al., 2014; BEZERRA, 2003; FROTA e SCHIFFER, 2001).

$$q_{rd} = A\sigma\varepsilon (\Delta T^4) \quad (3)$$

Onde:

q_{rd} = fluxo de calor radiante (W)

A = área (m²)

σ = constante da radiação, de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$ W/m².K⁴)

ε = fator de emissividade da superfície (adimensional)

ΔT = diferença de temperatura entre a superfície 1 e a superfície 2 (K)

A emissividade (ε) é uma propriedade que expressa a capacidade de uma superfície de emitir calor, sendo dependente do tipo de material e de seu acabamento, com valores que variam

entre 0 e 1, sendo apresentado na Tabela 3 a emissividade de superfícies para alguns materiais segundo a NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

Tabela 3 - Emissividade de superfícies

Tipo de superfície	ε
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,12
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)	0,25
Ciação nova	0,90
Concreto aparente	0,85 / 0,95
Telha de barro	0,85 / 0,95
Tijolo aparente	0,85 / 0,95
Reboco claro	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico	0,90 / 0,98
Vidro comum de janela	0,90 / 0,95
Pintura:	
Branca	0,90
Amarela	0,90
Verde claro	0,90
“Alumínio”	0,50
Verde escuro	0,90
Vermelha	0,90
Preta	0,90

Fonte: NBR 15220-2 - ABNT (2005)

Entretanto, a emissividade está relacionada às ondas longas (fonte de baixa temperatura), porém para as propriedades das superfícies expostas à radiação de onda curta (fonte de alta temperatura), como por exemplo a radiação solar, essas são representadas pela absorvidade (α). Desta forma, para algumas regiões do Brasil, a radiação solar é o principal fator de ganho térmico em um ambiente, sendo, imprescindível a análise de desempenho técnico dos materiais utilizados para o fechamento da envoltória das edificações. A Tabela 4 apresenta a absorvidade para alguns materiais utilizados na construção civil e algumas cores, de acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

Tabela 4 - Absortividade de cores e superfícies

Tipo de superfície	ϵ
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,15
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)	0,25
Caiação nova	0,12 / 0,15
Concreto aparente	0,65 / 0,80
Telha de barro	0,75 / 0,80
Tijolo aparente	0,65 / 0,80
Reboco claro	0,30 / 0,50
Revestimento asfáltico	0,85 / 0,98
Vidro comum de janela	(0,1 - 0,5)
Pintura:	
Branca	0,20
Amarela	0,30
Verde claro	0,40
“Alumínio”	0,40
Verde escuro	0,70
Vermelha	0,74
Preta	0,97

Fonte: NBR 15220-2 - ABNT (2005)

A capacidade de absorver e emitir radiação dos materiais que compõem a envoltória das edificações, interferem no comportamento térmico do ambiente construído. As características térmicas desses materiais têm grande influência na inércia térmica dos edifícios, sendo apresentado a seguir uma revisão e entendimento dos principais conceitos relacionados a esse fenômeno.

2.2.2 Inércia térmica

Frota & Schiffer (2001), afirmam que a inércia térmica depende das características térmicas dos elementos que compõem a envoltória da edificação e dos componentes construtivos internos. Geralmente os materiais que compõem a envolvente de uma edificação

retêm parte do calor que flui entre suas faces interna ou externa, dependendo de onde o ar tiver maior temperatura.

Dois fenômenos de grande significado para o comportamento térmico de um edifício, compõem juntos a inércia térmica, definidos como amortecimento e atraso de uma onda de calor, gerados através das oscilações de temperaturas externas e o ambiente interno. A inércia térmica varia em função da densidade, da condutividade e da capacidade calorífica que constitui um componente construtivo (BEZERRA, 2003; GOMES, 2015; LAMBERTS; DUTRA e PEREIRA, 2014). Por exemplo: Os componentes construtivos que fazem parte dos elementos construtivos de fechamento, como paredes e cobertura, possuem elevada inércia térmica, permitem assim reduzir a amplitude do pico na variação da temperatura no interior de uma edificação, diminuindo as sensações de desconforto do usuário devido ao excesso de “calor” ou “frio”.

Tiskatine *et al.*, (2018), define a inércia térmica como sendo o tempo gasto por um fluxo de calor para atravessar uma parede de espessura determinada, sendo uma característica que requer atenção especial na avaliação do desempenho térmico de uma edificação, uma vez que influencia diretamente no conforto térmico.

Considerando o efeito da inércia térmica um fator importante no conforto térmico dos usuários, a definição do uso de alta ou baixa inércia térmica dependerá da localização onde está inserida a edificação, em relação ao clima e variação de temperatura. Uma baixa inércia térmica pode ocasionar menor atraso térmico, possibilitado a ocorrência de oscilações nas temperaturas externas e internas com maior frequência.

O atraso térmico (Φ) é definido como tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor. Sua unidade é dada em horas (GOMES, 2015; NBR15220-2, 2005).

No caso do Brasil, onde o clima é predominantemente tropical, as construções não devem ter materiais com inércia muito elevada, isso dificulta a troca térmica dos ambientes internos e externos, sendo necessário prever uma inércia de média à leve, porém com elementos isolantes nas aberturas para impedir que parte do calor ou frio atravesse a construção e gere desconforto térmico em demasia. Neste sentido, é notável o crescimento no uso de placas de fibrocimento no país pela indústria da construção civil.

2.2.3 Fatores que influenciam as propriedades térmicas dos materiais

O conhecimento dos fatores que influenciam as propriedades térmicas dos materiais utilizados em componentes construtivos constitui-se como ponto de referência para o entendimento da transferência de calor através desses elementos. Assim, definindo-se corretamente os materiais a serem utilizados, pode-se chegar a concepção de componentes construtivos que tenham capacidade de reduzir/amenizar a carga térmica que é transmitida para o interior das edificações.

Segundo Bezerra (2003) e Silva (2010), a diminuição da carga térmica transferida para o interior das edificações implica em economia de energia elétrica necessária para a climatização dos ambientes e conforto térmico dos usuários.

O desempenho térmico de um material compósito dependerá dos materiais que compõem a sua estrutura, sendo que as propriedades térmicas desses elementos podem ser influenciadas pelas características físicas, químicas e dimensionais de cada material. Os principais fatores que podem influenciar a condutividade térmica de compósitos cimentícios são porosidade (quantidade e distribuição de poros), umidade, massa específica, relação água cimento, dentre outros (BEZERRA, 2003; KIM *et al.*, 2003).

A porosidade total de uma matriz cimentícia depende de muitos fatores e normalmente aumenta com o acréscimo da relação água/cimento e diminui com o tempo de cura; além disso, o tipo de cimento desempenha um papel importante neste vetor (EL-DIADAMONY *et al.*, 2016). A porosidade é maior imediatamente após a mistura com água. À medida que a hidratação prossegue, os produtos de hidratação preenchem uma parte do volume dos poros e, conseqüentemente, a porosidade diminui, permanecendo com poucas alterações após os primeiros dez dias de hidratação (RIBEIRO e VASCONCELOS, 2018).

Everett (1972), estabelece uma classificação segundo a dimensão dos poros apresentados em um material sólido, onde os microporos possuem diâmetros menores que 2,0nm (20Å), os macroporos superiores a cerca de 50nm (500Å), e os poros de tamanho intermediário aos citados são definidos como mesoporos. Os macroporos influenciam mais fortemente na resistência e na permeabilidade, enquanto que os mesoporos, assim como os microporos caracterizam a porosidade da matriz, ocorrendo “interações eletrostáticas entre as paredes dos poros e o líquido permanente, bloqueando o transporte de fluido através destes poros” (RODRIGUES, 2004).

De forma geral, Cintra (2017), Galvão (2014) e Silva (2010), explicam que a condutividade térmica de um material cimentício diminui expressivamente à medida que a

porosidade na matriz aumenta, independentemente da localização dos poros, o que representa uma característica fundamental para um bom isolante térmico.

Com foco no uso de sistemas industrializados, a seguir, são apresentadas as placas planas de fibrocimento, produzidas por meio do método Hatschek. Amplamente utilizadas nos fechamentos verticais externos das edificações em sistemas *Light Steel Frame*, *Wood Frame* e fachadas ventiladas. Essas placas destacam-se por possibilitar agilidade, economia e estratégias mais racionais, bem como reduzir o consumo de insumos e energia, com o uso de materiais recicláveis. Atualmente, seguem características técnicas definidas pela norma NBR 15498 (ABNT, 2016), a qual estabelece requisitos e métodos de ensaios para adequação dos produtos fornecidos ao setor da construção civil no Brasil.

2.3 PLACAS DE FIBROCIMENTO

No final do século XIX iniciou-se o processo de fabricação de compósitos cimentícios, desenvolvido pelo austríaco Ludwig Hatschek, método patenteado em 1902 e atribuído o nome do seu inventor. Desde então, o processo Hatschek tem sido submetido a constantes avanços, com o objetivo de melhorar seu desempenho e aumentar o rendimento (DIAS, 2011).



Figura 6- Máquina de Hatschek moderna
Fonte: Martins (2018)

Mantendo-se o princípio básico de fabricação Hatschek, inicialmente ocorre a filtração de uma suspensão diluída de cimento e fibras por uma peneira cilíndrica rotativa. A fina camada obtida por filtração é então transferida e acumulada em prensa cilíndrica até atingir a espessura e forma desejada. As placas são então cortadas conforme especificações de uso (Figura 6 –

Máquina Hatschek). Atualmente, este processo é amplamente utilizado, totalizando aproximadamente 85% dos produtos vendidos no mundo (IKAI *et al.*, 2010; SAVASTANO; WARDEN e COUTTS, 2000).

Fontenelle (2012), cita algumas características apresentadas pelas placas de fibrocimento fornecidas pela maioria das indústrias no Brasil que utilizam como método de produção o processo Hatschek. As placas são fornecidas com largura média de 1,2m e comprimento de 2,40m, podendo chegar até 3,0m. Essas placas apresentam espessura de 6mm, 8mm, 10mm e 12mm, no entanto, a densidade varia entre 1,4 a 1,7g/cm³ e absorção de água de aproximadamente 30%. Essas propriedades variam de acordo com cada fabricante, sendo responsável por apresentar as características físicas e mecânicas do seu produto, bem como a classificação em relação a NBR 15498 (ABNT, 2016).

Segundo a NBR 15498 (ABNT, 2016), as placas de fibrocimento são classificadas em duas classes, A e B, sendo divididas em outras quatro categorias, de acordo com a resistência a tração na flexão, conforme apresentado na Tabela 5. A classe A se caracteriza como placas para uso em ambientes externos, expostas à insolação direta, calor, umidade e chuvas. Já as placas classe B, são indicadas para ambientes internos e/ou ambientes externos, porém protegidas da insolação direta e intempéries.

Tabela 5 - Requisitos de resistência à flexão

Categoria	Placas da Classe A	Placas da Classe B
1	-	4
2	4	7
3	7	10
4	13	16
5	18	22

*Resistência em MPa

Fonte: NBR 15498 - ABNT (2016)

Para Soares (2012), a indústria da construção civil vem caminhando para uma escassez progressiva de recursos energéticos e minerais, onde a busca por matérias-primas renováveis, tem sido um fator de significativa importância em pesquisas.

Segundo Stroeven e Hu (2007), as propriedades microestruturais, como a porosidade e a distribuição de poros em compósitos cimentícios, podem ser quantificados e controlados de forma a obter-se a resistência pretendida, reduzindo a transferência de calor entre ambientes

internos e externos. Com isso, a adequação das placas de fibrocimento aos requisitos mínimos exigidos por norma em relação à propriedades físicas e mecânicas, tornam-se necesssárias, no caso de substituição parcial do aglomerante para estudo do desempenho térmico do produto.

Martins (2018), analisou o desempenho térmico de placas de fibrocimento à base de oxido de magnésio, importadas da China, no uso em sistemas LSF. O objetivo geral do trabalho foi um estudo comparativo entre as placas produzidas com cimento magnesiano e as placas de fibrocimento Portland nacionais. Sendo que, as placas à base de cimento magnesiano apresentaram resultados mais vantajosos em relação à transferência de calor para o ambiente interno, menores valores de temperaturas superficiais e absorbância térmica. Assim, pode-se concluir que as placas alternativas magnesianas por possuírem menor massa específica e maior índice de vazios, possuem maior quantidade de ar aprisionado em seu interior, favorecendo o isolamento térmico.

As placas de fibrocimento denominadas também como um material compósito, são produzidas a partir de um composto a base de cimento, fibras e adições minerais, onde a matriz (cimento mais adições minerais) envolve as fibras, que atuam como reforço, melhorando a resistência à tração, flexão, ductilidade e tenacidade (KUDER e SHAH, 2010; MARTINS, 2018). Sendo apresentado a seguir alguns conceitos relacionados aos materiais compósitos e suas principais propriedades.

2.3.1 Compósitos

Os materiais compósitos são definidos de forma geral, como sendo qualquer material multifásico, composto por duas ou mais fases, as quais são quimicamente diferentes e devem estar separados por uma interface distinta, obtendo, no entanto, uma melhor combinação de suas propriedades (CALLISTER JR, 2011; JONES, 1999).

A fabricação de um material compósito é constituída de no mínimo duas fases, onde uma delas é a matriz, chamada de fase contínua, que envolve a outra fase (reforço), chamada de fase dispersa. Isso resulta na origem de uma nova geração de materiais, na qual combina e melhora as características mecânicas, tais como a tenacidade, rigidez e desempenho a condições climáticas. As propriedades dos compósitos variam em função do tipo e da quantidade relativa das fases constituintes, além da geometria dos componentes dispersos (JONES, 1999; KAW, 2006).

De acordo com Callister Jr. (2011), os materiais compósitos são classificados em três divisões principais: Compósitos particulado, reforçados com fibra e estruturais. Os compósitos particulados apresentam partículas com dimensões pariformes em todas as direções, diferente dos compósitos reforçados com fibra, o qual apresentam relações entre comprimento e diâmetro das fibras. Por fim, nos estruturais ocorre a combinação entre compósitos e materiais homogêneos.

Na engenharia civil, as matrizes mais utilizadas são as poliméricas e as cerâmicas. Dentre as matrizes cerâmicas, destacam-se as cimentícias, empregadas tradicionalmente na produção de pastas, argamassas e concretos. Tecnicamente, os compósitos mais importantes são aqueles reforçados com fibras, sejam elas, de origem natural ou artificial. Apresenta-se na Figura 7 os principais tipos de compósitos com seus respectivos tipos de matriz e fibras a serem incorporadas.

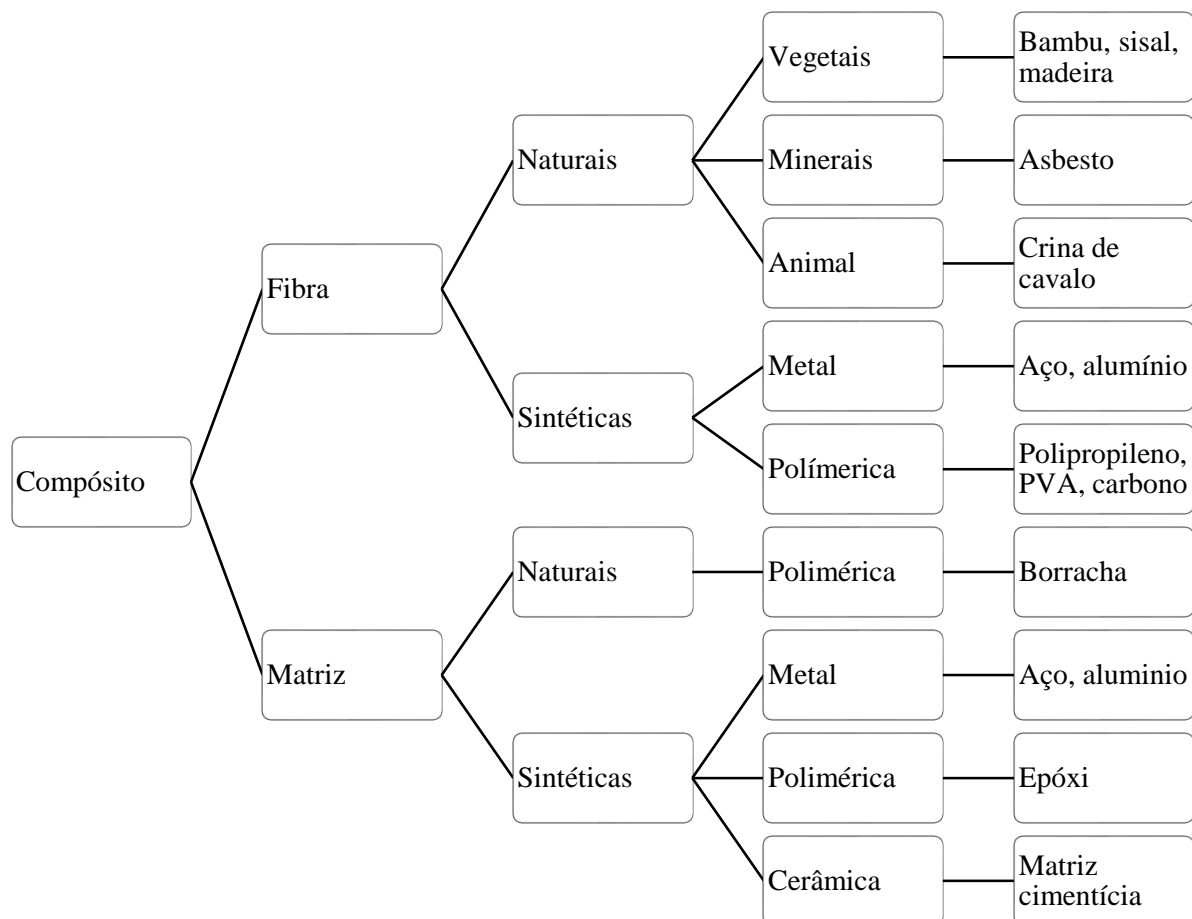


Figura 7 - Materiais empregados para produção de compósitos na construção civil
 Fonte: Anjos (2002)

Atualmente, há um interesse crescente no desenvolvimento de materiais compósitos, incluindo a preocupação ambiental e econômica, utilizando-se de recursos recicláveis, a partir do uso de resíduos gerados pela própria indústria da construção civil e reduzindo o consumo energético (MARTINS, 2018).

Caracterizadas como compósitos, as placas de fibrocimento, apresentam baixa densidade, elevada resistência mecânica à flexão, durabilidade e agilidade na execução, porém segundo Martins (2018), esses componentes proporcionam baixo desempenho térmico, principalmente em relação ao calor, devido sua alta absorção solar e inércia térmica.

Materiais pozolânicos tem influência, tanto no comportamento mecânico como nas propriedades físicas, considerando que esses materiais reagem com o hidróxido de cálcio, produzindo C-S-H (silicato de cálcio hidratado), esse material apresenta-se com maior resistência e mais estável, em uma reação mais lenta, que favorece a durabilidade dos compósitos, melhorando a resistência e a impermeabilidade do sistema devido ao processo de refinamento dos poros (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O resíduo de cerâmica vermelha, também caracterizado como um material de elevada porosidade, pode influenciar no aumento da porosidade aberta ou fechada de um material compósito. Neville (1997), afirma que o volume de poros influencia diretamente na resistência do material, enquanto que a permeabilidade é afetada pela intercomunicabilidade entre eles. Entretanto, materiais com elevado volume de poros, porém não interligados (porosidade fechada), podem apresentar baixa absorção de água, durabilidade e menor condutividade térmica, contribuindo na resistência térmica do componente.

A seguir, apresenta-se um breve histórico da cerâmica vermelha no Brasil, assim como as principais propriedades apresentadas pelos resíduos gerados, por essa indústria que ainda é responsável por um percentual elevado de construções em alvenaria e coberturas das edificações.

2.4 CERÂMICA VERMELHA

No Brasil, os materiais cerâmicos são classificados segundo a Associação Brasileira de Cerâmica e está dividida em subsetores em conformidade com a área de aplicação, propriedades ou matéria-prima. Desta forma, têm-se as seguintes divisões: Cerâmica Branca, Cerâmica Vermelha, Materiais Refratários, Materiais e revestimentos, Isolantes Térmicos, Abrasivos, Fitas e Corantes; Vidro, Cimento e Cal, Cerâmica de Alta Tecnologia/Cerâmica Avançada. A

indústria de cerâmica vermelha denomina-se pela fabricação de blocos, telhas, tijolos, ladrilhos, tubos, elementos vazados entre outros (OLIVEIRA, 2009).

As matérias-primas utilizadas nesta indústria são constituídas por argilas plásticas, com alto teor de óxido de ferro. Sua fabricação utiliza-se de processos manuais ou mecânicos de moldagem, podendo ser pelo método de prensagem ou extrusão. A temperatura de queima pode oscilar entre 500 e 900 °C, definida por meio do tipo de argila, produto a ser produzido e o forno utilizado para queima (CASTRO *et al.*, 2017; SANTOS, 1989).

O setor de cerâmica vermelha no Brasil representa 90% das alvenarias e coberturas construídas, contando com aproximadamente 7.000 fábricas distribuídas pelo país. As principais regiões produtoras de cerâmica vermelha estão localizadas no sul, sudeste e nordeste, sendo responsável por gerar um faturamento anual de R\$ 18 bilhões, decorrente da produção média de 1,7 bilhões de peças. Para essa produção o consumo de argila (matéria-prima) supera os 5 milhões de toneladas/mês (ANICER, 2015).

A indústria de cerâmica vermelha no Brasil gera elevada quantidade de resíduos, chegando a 6,5 milhões de toneladas, com vantagens potenciais para uso em matrizes cimentícias (GARCIA *et al.*, 2014). Segundo Anjos; Ghavami e Barbosa(2003b), a substituição do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha como material pozolânico, em materiais compósitos, representa uma economia no custo do produto final.

No estado do Paraná, estima-se que mais de 1.000 empresas atuam na área de fabricação de produtos cerâmicos de queima vermelha. A indústria de cerâmica vermelha na região metropolitana de Curitiba e norte do Paraná tem uma produção média mensal estimada em 26.058 milheiros de peças de cerâmicas/mês (tijolos de 6 furos, tijolos maciços, capa de laje, bloco estrutural e telha). Prudentópolis é uma das cidades que mais se desenvolvem nesse ramo, tem com o principal matéria-prima disponível o taguá ou argila de barranco, responsável pela maior concentração de investimentos na produção de blocos (MILANEZ, 2017; MINEROPAR, 2007).

Apesar da elevada produtividade no setor de cerâmica vermelha no estado, o perfil das empresas é em sua maioria de pequeno e médio porte, ou ainda microempresas familiares, onde grande parte utiliza processos produtivos arcaicos, com tecnologias desenvolvidas há mais de 50 anos. Nesse contexto, a indústria de cerâmica vermelha destaca-se, por apresentar um volume considerável de resíduos em seu processo de fabricação (FERREIRA, 2012, MINEROPAR, 2002).

2.4.1 Resíduo de cerâmica vermelha

A perda que ocorre na produção de cerâmica vermelha queimada no Brasil varia de acordo com alguns fatores, tais como: Matéria-prima, tecnologia utilizada na fabricação e o controle de qualidade adotado pelas indústrias. Estima-se que as perdas variam entre 1,6 a 10%, podendo ultrapassar esses valores, chegando em alguns casos à 30%, dependendo da gestão de qualidade da indústria. Os valores dessas perdas são estimados em 3,9 a 6,5 milhões de toneladas ano em todo o Brasil (GARCIA *et al.*, 2014). Segundo dados apresentados por Hansen *et al.* (2015), as quantidades desses resíduos são muito divergentes, como pode ser observado na Tabela 6, onde apresenta-se estudos e os respectivos percentuais.

Autores	Geração de resíduo cerâmico calcinado (%)
Dias (2004)	30
Vieira, Souza e Monteiro (2004)	10
Viera (2005)	10
Saboya (2000) apud Désir <i>et al.</i> (2005)	10
Gonçalves (2005)	30
Senthamarai e Monaharan (2005)	30
Sindicer/RS (2008)	15
EELA (2013)	20
Sales e Alferes Filho (2014)	1,6

Fonte: Hansen *et al.*, (2015)

Dentre os principais fatores que influenciam nas perdas, podem ser citadas as trincas ou quebras apresentadas no final do processo de queima, que são influenciadas principalmente pelo tipo e proporcionamento inadequado das argilas, elevado teor de umidade na fabricação, carregamento ou descarregamento de fornos e caminhões transportadores, queima em excesso, ou ainda pelo modelo de forno utilizado no processo de queima (FERREIRA, 2012).

Os resíduos provenientes da indústria cerâmica de queima vermelha podem eventualmente retornar ao processo, após trituração, entretanto é um processo pouco aplicado devido à redução na plasticidade da massa e geralmente ser prejudicial à resistência mecânica das peças com incorporações acima de 5%, pois suas partículas inertes dificilmente conformar-se à matriz gerando pontos de concentração de tensão (VIEIRA, TEIXEIRA e MONTEIRO, 2009). Atualmente, a disposição de grande parte desses resíduos é feita em aterros, lixões ou diretamente nas vias públicas não pavimentadas, entretanto essa prática pode ser evitada, com

a utilização do mesmo em matrizes cimentícias, obtendo dessa forma a sua valorização (ZACCARON e LUCIANO, 2014, VIEIRA, SOUZA e MONTEIRO, 2004).

A NBR 10004 (ABNT, 2005), estabelece critérios de classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco à saúde e ao meio ambiente, que podem ser classificados em dois grupos - perigosos e não perigosos, sendo ainda este último grupo subdividido em não inerte e inerte. O resíduo de cerâmica vermelha é classificado como não perigoso, Classe II A, Inerte ou Não-Inerte. Além da NBR 10004 (ABNT, 2005), conta-se também com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos instituída pela Lei n. 12305/2010, que determina que nenhum tipo de resíduo deve ter destinação final efetuada de forma irregular.

O primeiro uso de RCV com cimento Portland foi registrado na Alemanha (1860) para a fabricação de produtos de concreto, mas o primeiro uso significativo de RCV como agregados em concreto foi registrado para reconstrução após a Segunda Guerra Mundial (ALIABDO, ABD-ELMOATY e HASSAN, 2014).

O uso do RCV como substituição parcial do cimento Portland pode influenciar as propriedades dos compósitos de duas maneiras: Pelo efeito fíler ou também pela ação pozolânica. Ou seja, promove um melhoramento da matriz através de um melhor empacotamento produzido pelos finos grãos do resíduo moído e pela redução de hidróxido de cálcio por meio da reação pozolânica, cujos produtos hidratados irão ocupar os espaços vazios (GONÇALVES, 2005).

Gonçalves *et al.*, (2009), observaram aumento na porosidade total em argamassas ao substituir o cimento Portland por resíduo cerâmico de queima vermelha em percentuais de 20%, 30% e 40%, mantendo a relação água/material cimentício igual a 0,5. Os maiores percentuais de porosidades foram resultantes das substituições de 20% e 30%, sendo provavelmente associadas ao menor volume total de hidratos formados em comparação à matriz referência. Gonçalves *et al.*, (2009), explicam que para teores de 30% e 40% de RCV ocorreu a estabilidade da porosidade total, sendo decorrente da maior dificuldade de penetração de água provocado pelo efeito físico do resíduo. Além disso, com o aumento da porosidade total, os hidratos presentes na mistura contendo 20% de RCV, juntamente com as partículas de resíduo não-hidratadas, promoveram uma redução na proporção de macroporos na mistura, resultando em uma estrutura porosa mais fina

As pozolanas são por definição, substâncias constituídas de materiais silicosos e sílico-aluminosos que, em presença de água, reagem como hidróxido de cálcio presente em matrizes cimentícias, formando compostos de propriedades aglomerantes. Dentre os materiais pozolânicos, pode-se citar: as rochas vulcânicas, as cinzas volantes, cinza de casca de arroz,

sílica ativa, cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, argilas submetidas a altas temperatura desde que essa temperatura seja inferior ao início da fusão (BARROSO, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Para que as argilas possam apresentar alguma atividade pozolânica, é necessário um processo de queima em temperaturas entre 500°C e 900°C, com posterior moagem, visando à redução da sua granulometria. Quando utilizado como adição mineral em cimentos é capaz de manter ou elevar a resistência de argamassas, pastas e concretos, isso pode ser explicado pela atividade pozolânica do material ou pelo efeito fíler (CASTRO *et al.*, 2017; GARCIA *et al.*, 2014; LEITE e MOLIN, 2002; MURRAY, 2007; PACHECO-TORGAL e JALALI, 2010).

Mehta & Monteiro (1994), também citam como uma das alternativas de aproveitamento de resíduos cerâmicos a substituição parcial do cimento Portland no concreto como uma adição mineral e pozolânica, a fim de trazer benefícios ambientais (redução da emissão de gases poluente) e econômicos.

Raval; Patel e Pitroda (2013), com base em investigações experimentais e análise econômica, afirmam que a utilização de resíduos de cerâmica na confecção de argamassas e concretos é uma alternativa para a eliminação segura desses resíduos. Os autores produziram misturas de concreto convencional com substituição do cimento comum por pó de resíduo cerâmico nas proporções de 10%, 20%, 30% 40% e 50% em peso de cimento, com o objetivo de analisar a resistência a compressão aos 7, 14 e 28 dias de cura. Como resultado, a resistência a compressão mínima desejada foi atingida nas misturas com até 30% de substituição.

De acordo com Anjos; Ghavami e Barbosa(2003a), a resistência à flexão de compósitos é inferior quando ocorre a substituição parcial do cimento Portland por sílica ativa em comparação ao uso de resíduos de blocos cerâmicos. Os melhores resultados de resistência à flexão foram apresentados em compósitos com substituição de até 20% de cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha.

Dobias e Pokorny (2017), investigaram o uso de bloco cerâmico moído em níveis de substituição de cimento em 10%, 20%, 30% e 40% em massa, com objetivo de verificar mudanças nas propriedades físicas, químicas e nas características estruturais dos poros em argamassas. Os autores constataram que substituições entre 10% e 20% não afetam negativamente a resistência à flexão ou à compressão dos corpos de prova das argamassas, sendo que em alguns casos essas argamassas chegaram a atingir maior resistência. Com a utilização de 10% de bloco cerâmico como substituto do cimento Portland ocorreu uma redução na porosidade total, enquanto que substituições de 40% teve aumento em comparação com a amostra referência.

Além disso, Arcaro *et al.*, (2016) asseguram que a condutividade térmica pode variar em função da composição química e da estrutura de poros de um material. A porosidade de um material é apresentada pela fração de espaço vazio, onde este vazio pode conter ar ou água. Os materiais podem apresentar vários graus de porosidade, poros fechados, abertos ou interconectados.

A porosidade aberta refere-se a um material que permite que um fluido se mova de uma superfície para outra através da ligação entre os poros e a porosidade fechada são os poros que foram selados dentro da estrutura do grão, características essas apresentadas pelo material cerâmico de queima vermelha (RICHARD, 2015).

Estudos realizados por Tasdemir; Sengul e Tasdemir (2017), verificaram que a principal característica de um material com baixa densidade é a maior porosidade o que pode contribuir para o controle da condutividade térmica. No entanto, as propriedades mecânicas e físicas podem ser afetadas, porém o uso adequado de matérias primas que apresentem baixa densidade, reduzindo a condutividade térmica de um componente construtivo, podem ser viável econômica e ecologicamente em uma estrutura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com a finalidade de estudar a influência da substituição parcial em volume do cimento Portland pelo resíduo de cerâmica vermelha nas propriedades físicas, químicas, mecânicas e na transferência de calor em placas de fibrocimento, as Figuras 8 e 9 apresentam um resumo das etapas a serem seguidas neste estudo, indicando os materiais e as variáveis a serem analisadas.

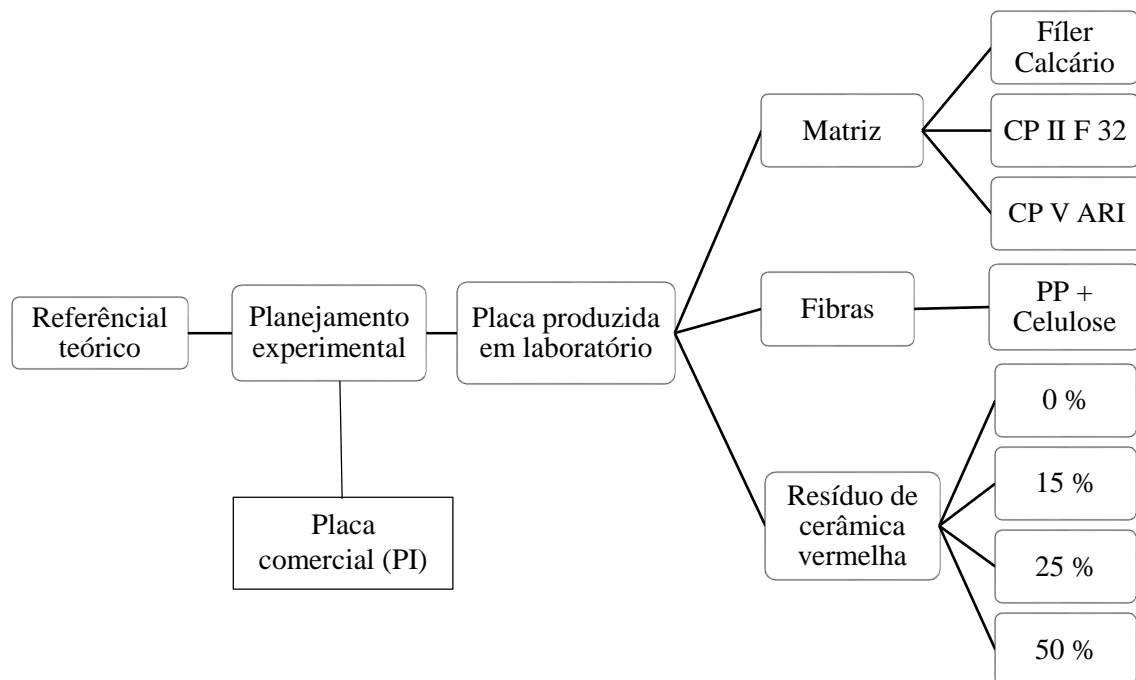


Figura 8 - Diagrama do planejamento experimental - Materiais
 Fonte: Autora (2018)

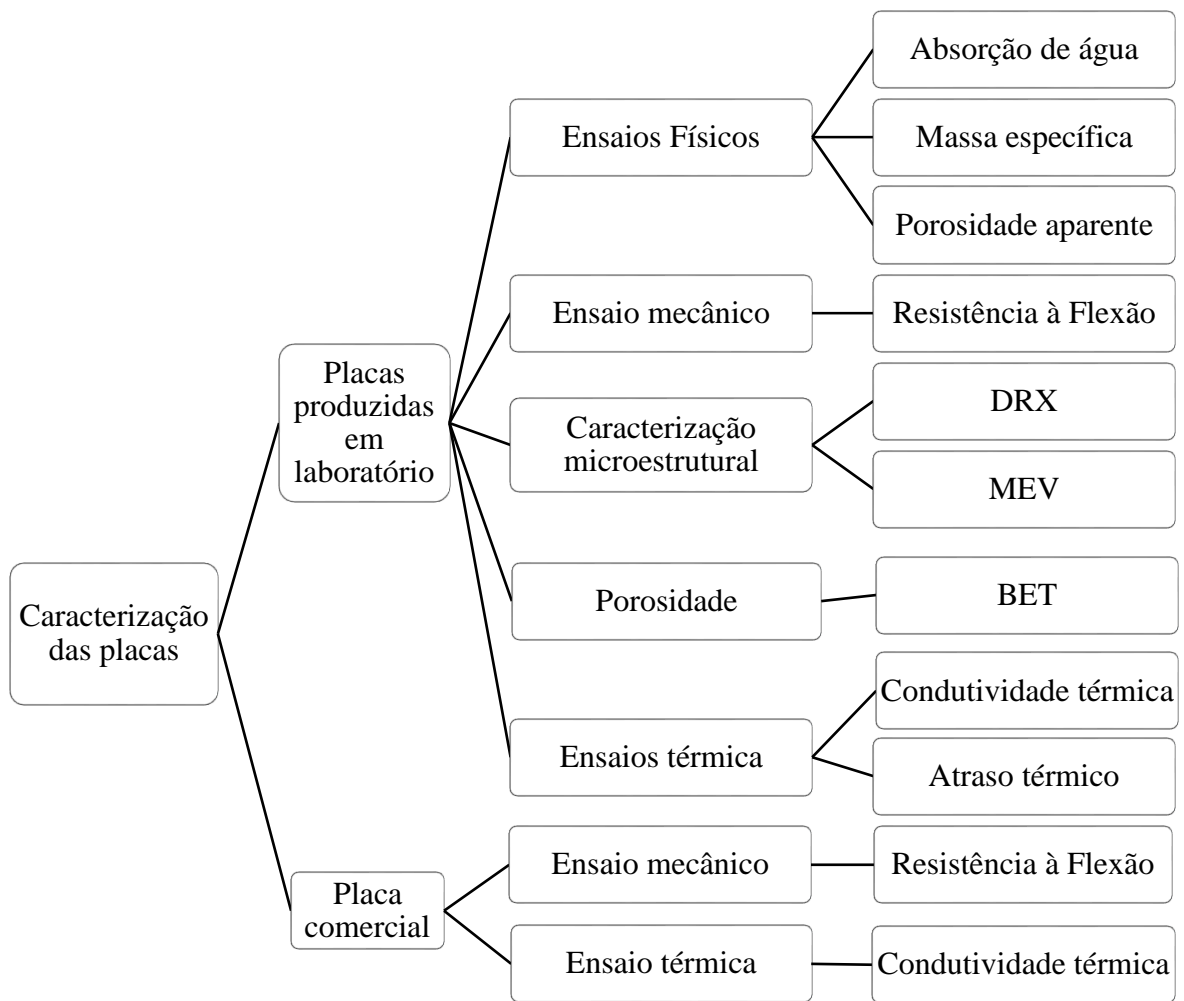


Figura 9 - Diagrama do planejamento experimental – Variáveis avaliadas
Fonte: Autora (2018)

3.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados como aglomerantes o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) e cimento Portland com adição de fíler (CP II F 32), sendo os dois tipos de cimento mais aplicados pela indústria de placas de fibrocimento no Brasil. Além disso foi utilizado o fíler calcário como material inerte na mistura. O RCV utilizado foi coletado na indústria de cerâmica vermelha, localizada na região Centro-sul do estado do Paraná, considerado o Polo da indústria de cerâmica vermelha do estado. As fibras curtas de origem vegetal (celulose) e fibras de polipropileno (PP) com comprimento nominal máximo 12,0mm, utilizadas como reforço.

Os materiais foram selecionados segundo às tendências atuais de pesquisas para fabricação de placas de fibrocimento, onde procuram aliar aumento no desempenho e valorização de resíduos sólidos (AZEVEDO, 2018; DIAS, 2011; URREA-CEFERINO *et al.*, 2017).

A seguir apresentam-se de forma individual e detalhada as matérias-primas empregadas, bem como sua caracterização.

3.1.1. Aglomerantes

Dentre os aglomerantes selecionados, o cimento CP V ARI contém um maior teor de clínquer dentre os cimentos disponíveis e, assim, consiste em um cimento “mais puro” em termos de adições minerais, além de apresentar uma moagem mais fina que o torna mais reativo. O cimento CP II F 32 possui menor quantidade de adições que cimentos do tipo CP III e CP IV. Foi utilizado com o objetivo de produzir uma matriz com baixo teor de hidróxido de cálcio, quimicamente compatível com as fibras de celulose e PP (SANTOS; FONTES e LIMA, 2017).

O fíler calcário foi utilizado como material inerte ou não reativo na fabricação dos compósitos cimentícios. Sua principal função é atuar como fíler ou material de preenchimento a fim de melhorar as características de empacotamento das partículas, reduzir as propriedades de retração por molhagem, secagem e custos (KUNITZ, 2017).

O resíduo de cerâmica vermelha foi recolhido a partir do descarte no processo de fabricação de blocos e telhas com temperatura de queima entre 500 a 800 °C. A substituição do cimento pelo RCV como material fino, contribui na redução do consumo de cimento, por apresentar características de um material pozolânico, além de possibilitar alteração na porosidade do material, o que visa influenciar na transferência de calor (CASTRO *et al.*, 2017; TIRONI *et al.*, 2012; TOLEDO FILHO *et al.*, 2007).

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de área superficial, realizado com base na NBR 16372 (ABNT, 2015), e massa específica aparente, conforme NBR 16605 (ABNT, 2017).

Tabela 7– Massa específica e permeabilidade aglomerantes

Material	Massa específica (g/cm³)	Blaine (cm²/g)
CP V - ARI	3,09	4451
CP II F 32	3,08	3296
Fíler Calcário	2,70	4576
RCV	2,61	12182

Fonte: Autora (2018)

A composição química para o fíler calcário foi realizada por meio da análise mineral qualitativa, através do ensaio de DRX (Figura 10), onde pode-se observar picos relativos a calcita (CaCO₃) como sendo o principal constituinte mineralógico dos calcários e mármore com elevada pureza.

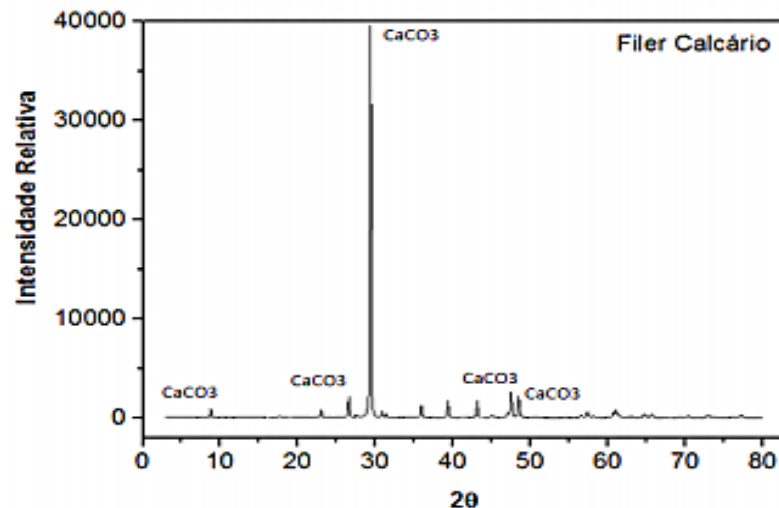


Figura 10 - Difração de raios-X do fíler Calcário
Fonte: Autora (2018)

Para identificação e composição química do RCV foi empregada a técnica de Fluorescência de Raios X, no Laboratório de análises minerais e rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná, o equipamento empregado foi o “Panalytical, modelo Axios Max: tubo Ródio 4 kv”, apresentado na Figura 11. A técnica foi empregada para relatar a composição química do material onde observa-se a presença majoritária do óxido de silício (SiO₂), do óxido de alumínio (Al₂O₃) e do óxido de ferro (Fe₂O₃) (Tabela 8). A composição química do resíduo cerâmico moído indica que o mesmo possui um teor de Al₂O₃+SiO₂+Fe₂O₃ de 93,55%, atendendo aos limites da NBR 12653 (2015) para o uso como material pozolânico em misturas com cimento Portland.

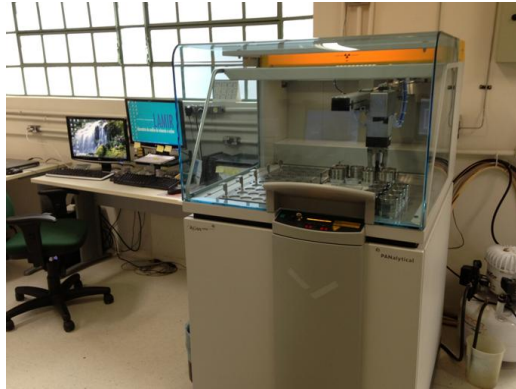


Figura 11 - Equipamento utilizado para ensaio de Fluorescência de raios X
Fonte: Lamir (2018)

Tabela 8- Composição química do RCV por FRX

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)	*P.F. (%)	Soma (%)
RCV	70,87	18,11	4,57	0,06	1,07	1,85	0,07	0,71	0,05	0,05	3,13	100,53

*P.F. = Perda ao fogo

Fonte: Autora (2018)

Como a composição química do RCV apresentou 70,87% de óxido de silício, utilizou-se a difração de raios-X para avaliar a presença da sílica cristalina no material. Conforme observado na Figura 12 o difratograma de raios-X confirma a presença de sílica cristalina (quartzo).

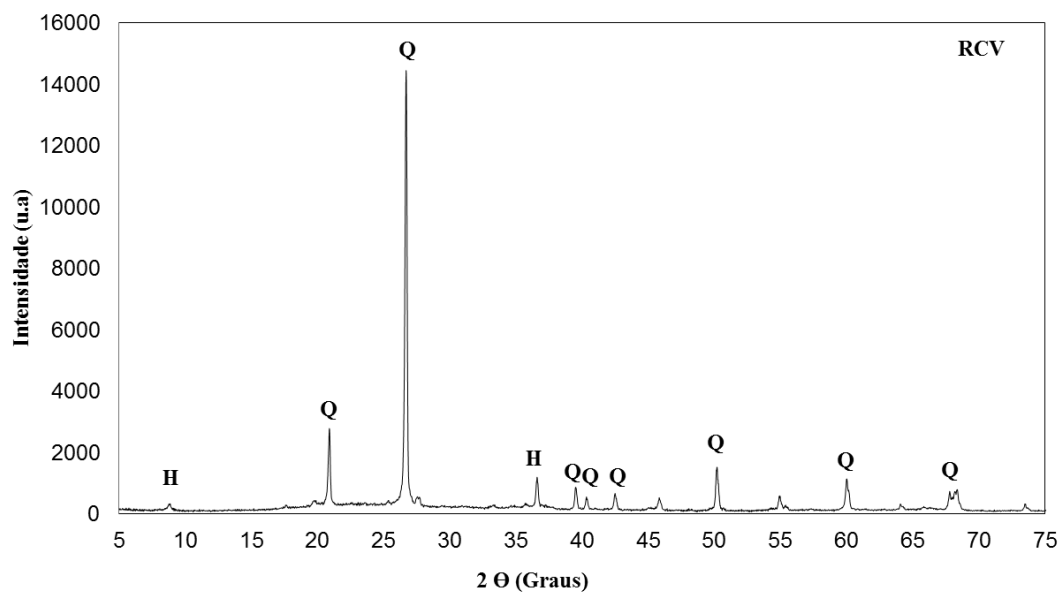


Figura 12 - Difração de raios-X do RCV
Fonte: Autora (2019)

Por meio do ensaio de porosidade BET realizado no material RCV moído e passante na peneira 0,15mm foi possível observar um volume total de poros de 0,028cc/g. Conforme a Figura 13, constatou-se que as partículas apresentam uma porosidade intragranular, com raio do poro predominantemente na faixa de 16 – 150 Angstrom (Å).

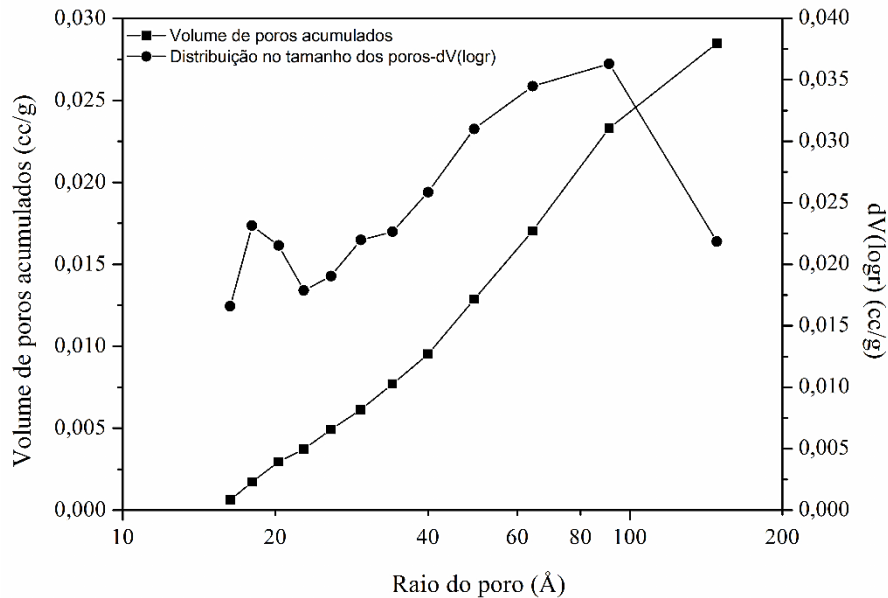


Figura 13 – Curva de distribuição de tamanho de poros e volume acumulado de poros presente no RCV
Fonte: Autora (2019)

3.1.2 Fibras

As fibras de celulose utilizadas foram de origem vegetal, originárias do mercado nacional. Segundo o fabricante foram obtidas através de moagem a seco de material reciclado. Apresentam uma coloração acinzentada, com cargas minerais, sendo 5% de carbonato de cálcio, 3,5% de magnésio e 1,5% de caulim, essas cargas minerais não são agregadas ao processo, elas constituem a base original das fibras e o processo produtivo do papel e seus aditivos.

As fibras de PP utilizadas são responsáveis por grande parte da resistência à flexão das placas por apresentarem multifilamentos, o que proporciona um reforço multidirecional em uma matriz cimentícia. À vista disso, a Tabela 9 apresenta algumas das características físicas e propriedades mecânicas dessas fibras. Esses dados foram disponibilizados pela empresa Camargo Química, situada em Blumenau, Santa Catarina, que disponibilizou o material.

Tabela 9- Características físicas e mecânicas das fibras de PP

Propriedade	Referência
Diâmetro do Filamento	18 microm
Cor	Branca
Densidade	0,94 g/cm ³
Comprimento da Fibra	12 mm
Resistência a Tração	80 MPa
Alongamento	5 GPa
Resistência a álcalis	Excelente
Condutividade térmica	Baixa
Incorporação de ar no concreto	Sem efeito

Fonte: Camargo Química (2018)

A massa específica aparente foi determinada em laboratório para as fibras PP e celulose (Figura 14), conforme resultados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10- Massa específica

Tipo	Massa específica aparente (g/cm³)
Fibra PP	0,82
Fibra de celulose	0,50

Fonte: Autora (2018)

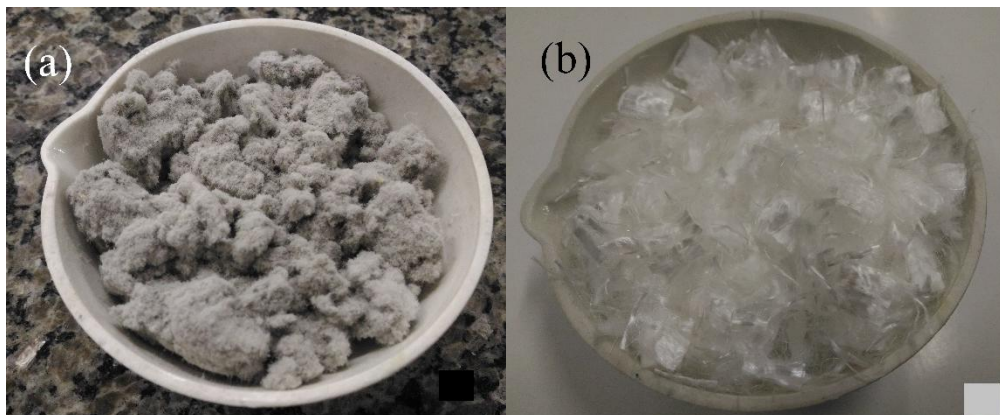


Figura 14 - a) Fibra em celulose; b) Fibra PP
Fonte: Autora (2018)

3.1.3 Água

A água empregada na produção das placas foi proveniente do sistema de distribuição pública de água da concessionária local (SANEPAR). Segundo a NBR 15900 (ABNT, 2009), sua utilização é recomendada para produção de concretos e argamassas.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Definição das misturas

A definição nos teores de substituição do cimento Portland (CP V ARI e CP II F 32) pelo RCV foi dado em volume, devido à diferença significativa de massa específica de cada material. Os teores de fibras a serem empregados nas misturas são de 1,5 a 3% em relação à massa total de materiais secos.

A Tabela 11 apresenta a formulação de referência, definida com base em estudos já realizados por Dias (2011) e Kunitz (2017), conforme composição típica para telhas e placas em fibrocimento. As misturas utilizadas no experimento, juntamente com a nomenclatura adotada para sua identificação estão expressas na Tabela 12.

Tabela 11 - Formulação empregada nas misturas

Material	Fração em massa (%)
Cimento Portland (CP II F 32 e CP V ARI)	33,5 - 68,5
RCV	0 - 35
Fíler calcário	27
Fibras curtas de celulose	3,0
Fibras de PP	1,5

Fonte: Autora (2018)

Tabela 12 - Nomenclatura adotada para as misturas empregadas no experimento

Aglomerante	Substituição do cimento Portland por RCV em volume (%)			
	0	15	25	50
CP II F 32	PF	PF15	PF25	PF50
CP V – ARI	PV	PV15	PV25	PV50

Fonte: Autora (2018)

Em todas as misturas foi mantido a concentração de sólidos (materiais finos mais fibras) em relação à quantidade de água utilizada no processo. Determinou-se um percentual de 70% (± 5) de água, de forma a permitir a perfeita dispersão das fibras e melhor distribuição no interior das placas, além de viabilizar a moldagem. Seguindo recomendações dos autores Betioli; John e Pilleggi (2011); Caldas e Silva; Savastano Jr. e John (2009).

3.2.2 Métodos de preparo do resíduo de cerâmica vermelha

O material coletado foi inicialmente seco em estufa durante 24 horas, em temperatura controlada de 105°C. Em seguida passou pelo processo de britagem em britador de mandíbula, da marca ECO Soluções, obtendo-se uma granulometria entre 2,4mm e 25mm. Posteriormente, foi submetido à moagem em moinho de bolas da marca Servitech, modelo CT 242 para obter um material de granulometria fina, sendo peneirado e recolhido somente o material passante na peneira 0,15mm (Figura 15). Em cada moagem eram utilizados aproximadamente 600 gramas de RCV e 1,1013 gramas de esferas de cerâmica.



Figura 15 - RCV moído, passante na peneira 100 Mesh
Fonte: Autora (2018)

Além disso, realizou-se o ensaio de atividade pozolânica, normatizado pela NBR 5752 (ABNT, 2014) e constatou-se que o RCV apresenta um índice de pozolanidade maior que 75%, sendo considerado reativo.

3.2.3 Produção das placas de fibrocimento

O processo para produção das placas cimentícias com reforço em fibras foi realizada utilizando-se o método de drenagem a vácuo, similar ao empregado por Betioli; John e Pileggi (2011); Caldas e Silva (2002); Urrea-Ceferino (2016). Esse processo, visa, simular em laboratório o método conhecido como Hatschek. O uso deste método em laboratório se justifica, considerando que apenas uma empresa no Brasil tem posse de uma mini máquina para realização de testes em produtos desta natureza (KUNITZ, 2017).

Foram moldados corpos de prova (CP) de formato prismático nas dimensões aproximadas de 200mm x 200mm x 10mm. Suas principais etapas de realização foram: Mistura dos materiais, moldagem, drenagem, adensamento, prensagem, cura e corte.

A definição do processo de homogeneização das misturas foi com base em estudos realizados por Caldas e Silva (2002). Sendo, no entanto, utilizado uma argamassadeira de eixo vertical com tambor fixo, potência de 830 rpm, com duas opções de rotação. A argamassadeira foi adaptada com um misturador rotacional apresentado na Figura 16, para garantir a dispersão das fibras e homogeneização da suspensão (mistura da massa total de materiais sólidos mais líquido).

Inicialmente as fibras de celulose são dispersas em água mantidas em repouso por um minuto e mais dois minutos sob alta rotação. Posteriormente, são adicionadas as fibras de PP e misturadas sob alta rotação por mais 2 minutos. Com a argamassadeira em velocidade baixa, os aglomerantes são adicionados e misturados por dois minutos em velocidade baixa e mais dois minutos e velocidade alta.



Figura 16 – Misturador rotacional
Fonte: Autora (2018)

Finalizado o processo de mistura, o material é lançado em uma fôrma galvanizada de aço, com dimensões internas de 200 x 200mm, acoplada por uma base inferior e uma bomba de vácuo para sucção do excesso de água da suspensão. Na base inferior da fôrma é utilizado uma chapa metálica perfurada, sobre a qual foi utilizado um papel filtro com gramatura de 80g, de forma a evitar a perda de material sólido com a extração da água (Figura 17),(ANJOS; GHAVAMI e BARBOSA, 2003b; CALDAS e SILVA, 2002).



Figura 17 – Forma em aço galvanizado
Fonte: Autora (2018)

A mistura de consistência fluída é vertida na fôrma e, a partir de então, a bomba de subpressão é acionada por 2 minutos com pressão manométrica negativa entre 50kPa e 70kPa, sendo assim retirado o excesso de água. Em seguida, com a bomba desligada é realizado o adensamento manual, por meio de 30 golpes de um soquete metálico de base retangular 50 x 75mm e altura de 220mm, pesando 1098g. Após o adensamento manual, a bomba é acionada

novamente por mais 3 minutos e em seguida a fôrma é aberta e a placa retirada, colocada sobre uma placa metálica para posteriormente ser prensada com outras duas da mesma série.

O equipamento usado para prensagem é uma máquina de ensaio universal EMIC, modelo DL 30000. Logo após a moldagem, o grupo de três peças de uma mesma série, são colocadas na prensa, intercaladas com chapas metálicas e telas de drenagem, sendo submetidas à uma carga de 3,2 MPa (Figura 18), conforme recomendação em estudo realizado por Caldas e Silva; Savastano Jr. e John (2009). A velocidade de deslocamento da prensa foi estabelecida em 10mm/min, até atingir a carga pré-estabelecida, permanecendo comprimidas por 5 minutos. Em seguida a tensão é aliviada de forma lenta, a fim de evitar variações bruscas. A prensagem das peças tem como objetivo retirar o excesso de água ainda presente nas placas, ou que tenha sido absorvida pelas fibras, além de aumentar a compactidade.

Após a prensagem as placas foram pesadas para determinação da relação água/cimento (A/C), ainda que de forma estimativa por meio da diferença entre massa seca inicial e massa úmida final. Essa relação pode influenciar nas propriedades físicas e mecânicas das placas. Onde o aumento da relação A/C, pode contribuir para redução na resistência mecânica e influenciar na porosidade do material (CALDAS e SILVA, 2002).



Figura 18 – Prensagem três placas
Fonte: Autora (2018)

Depois de finalizado o processo de prensagem as placas foram armazenadas em sacos plásticos selados por um período de 24 horas, a fim de manter a umidade constante em torno de 95%. Após a desforma permaneceram em cura submersa por 6 dias, sendo em seguida retiradas da água e mantidas em local úmido com temperatura controlada em $23 \pm 1^\circ\text{C}$, até a data dos seus respectivos ensaios. Com exceção das amostras submetidas ao ensaio térmico, o corte das peças foi realizado com uma serra mármore de disco diamantado e aspersor de água para obtenção das dimensões finais planejadas 160 x 40 x 10mm.

3.2.4 Caracterização das placas de fibrocimento

3.2.4.1 Propriedades físicas

A determinação da absorção de água nas placas, massa específica e porosidade aparente, foram realizadas de acordo com as recomendações da ASTM C 948-81 (2009), obtidas pela média dos valores de, no mínimo, seis corpos de prova, aos 28 dias de hidratação.

As amostras foram colocadas imersas em água, por no mínimo 24 horas ou até obterem constância de massa. Em seguida pesadas em balança digital com dispositivo hidrostático, sensibilidade de 0,01g e assim determinada suas massas imersa (M_{im}) e saturada com superfície seca (M_{sss}) (Figura 19). Para determinação das massas seca (M_s) foram colocadas na estufa por no mínimo 24h, ou até obterem a constância de massa à temperatura de 105°C. Através da correlação entre a média dos índices obtidos, foram determinadas as propriedades físicas citadas, utilizando a forma de cálculo apresentado na Tabela 13.



Figura 19 – Balança hidrostática
Fonte: Autora (2018)

Tabela 13- Apresentação das equações para o cálculo das propriedades físicas

Propriedade	Fórmula	Unidade
Massa específica (seca)	$M_s / (M_s - M_{im})$	g / cm^3
Absorção de água	$(M_{sss} - M_s / M_s) * 100$	(%)
Porosidade aparente	$(M_{sss} - M_s / (M_{sss} - M_{im})) * 100$	(%)

Fonte: Autora (2018)

As propriedades físicas avaliadas possibilitam a avaliação e compreensão da influência nas substituições de RCV nas amostras, bem como obter indicativos de como a densidade e a porosidade influenciam na transferência de calor dos compósitos.

3.2.4.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas foram determinadas aos 7 e 28 dias de hidratação, por meio do ensaio de flexão à três pontos na máquina universal de ensaio AROTEC, modelo WDW-100E, célula de carga de 100kN, com velocidade de deslocamento de 5,0mm/min., conforme NBR 15498 (ABNT, 2016). A Figura 20 apresenta o desenho esquemático do ensaio de flexão conforme descrito.

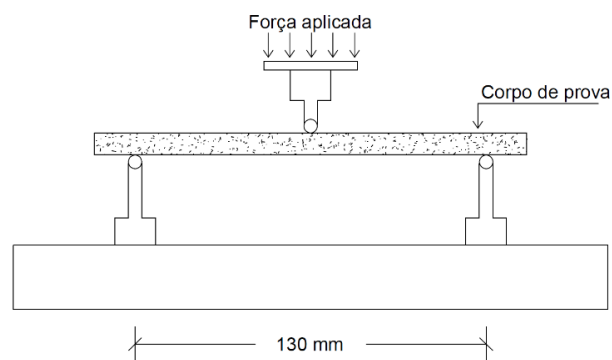


Figura 20 – Ensaio de flexão três pontos
Fonte: Autora (2018)

O ensaio foi realizado empregando-se quatro CPs por série, a fim de obter um número representativo de amostras para determinação do módulo de ruptura (MOR) calculado por meio da Equação 4, considerando a carga máxima obtida no ensaio.

$$\text{MOR} = \frac{3pl}{2bd^2} \quad (4)$$

onde:

MOR = módulo de ruptura (MPa);

P = carga máxima aplicada (N);

l = vão inferior entre cutelos (mm);

b = largura do corpo-de-prova (mm);

d = espessura do corpo-de-prova (mm).

As dimensões de cada CP foram verificadas pela média aritmética de três medidas, lembrando que cada série será composta de quatro CPs com comprimento de 160mm. A largura verificada com paquímetro digital da marca *MITUTOYO*, precisão de 0,01mm e a espessura através de um micrometro da marca *INSIZE*, precisão de 0,001mm.

3.2.4.3 Difração de Raios-X (DRX)

A análise por difração de raios X foi realizada nas amostras com 28 dias de hidratação. O objetivo do uso dessa técnica é a identificação da composição mineralógica dos materiais e verificar os compostos hidratados que são formados durante as reações de hidratação das misturas com os cimentos CP II F 32 e CP V – ARI, bem como, identificar as alterações de fases que podem ocorrer dependendo da quantidade de resíduo presente nas misturas.

Fragmentos das placas foram moídas manualmente em aparato apropriado no laboratório de materiais, e em seguida encaminhadas a Central de Análises, localizada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco para realização dos ensaios no equipamento da marca Rigaku, modelo Mini Flex (Figura 21).



Figura 21 – Equipamento de DRX
Fonte: Central de análises (2018)

3.2.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Segundo Dedavid; Gomes e Machado (2007), o princípio utilizado pela técnica de microscopia eletrônica de varredura consiste na emissão de um feixe de elétrons de pequeno diâmetro, concentrado e controlado por um sistema de bobinas de deflexão, que incide sobre a

superfície da amostra, ponto a ponto, transmitindo uma série de sinais por meio de uma tela catódica, relacionados entre o feixe de elétrons incidente e a amostra. Considerada uma importante ferramenta que permite a visualização da microestrutura em materiais sólidos.

As amostras foram preparadas previamente com impregnação em resina epóxi (Figura 22), em seguida polidas manualmente em uma máquina lixadeira politriz, modelo PLF – Fortel, usando papel abrasivo de carboneto de silício com granulometria sequencial de 400, 600 e 12000 por aproximadamente 3min. cada granulometria, usando álcool isopropílico (99,8% de pureza) como lubrificante.

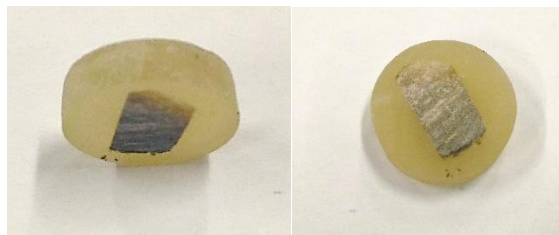


Figura 22 – Amostras de placas de fibrocimento preparadas com resina para ensaio de MEV
Fonte: Autora (2018)

Os ensaios de MEV foram realizados no Centro de Caracterização e Ensaio de Materiais (CCEM) da PUCPR e no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais - CMCM, do Câmpus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

A visualização da microestrutura na superfície das placas foi por meio de um detector de imagem de elétrons retroespalhamento, operado a 15 Kv, utilizando-se do equipamento *Vega3, Tescan e Oxford INCAx-act, resolution at 5.9 Ke* (Figura 23a) no laboratório CCEM da PUCPR. No laboratório CMCM da UTFPR foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura, *EVO, MA15*, com filamento de tungstênio e câmara para amostras de até 250mm de diâmetro e massa de 500g com movimento total do estágio (XYZ e inclinação) (Figura 23b). Todas as amostras foram preparadas com uma camada superficial de recobrimento em ouro (Figura 24), e as imagens tiveram uma ampliação entre 100 até 5000x.

O MEV teve por objetivo verificar de maneira visual a porosidade das placas, as fases hidratadas, assim como a impregnação das fibras na matriz em amostras com 28 dias de hidratação.

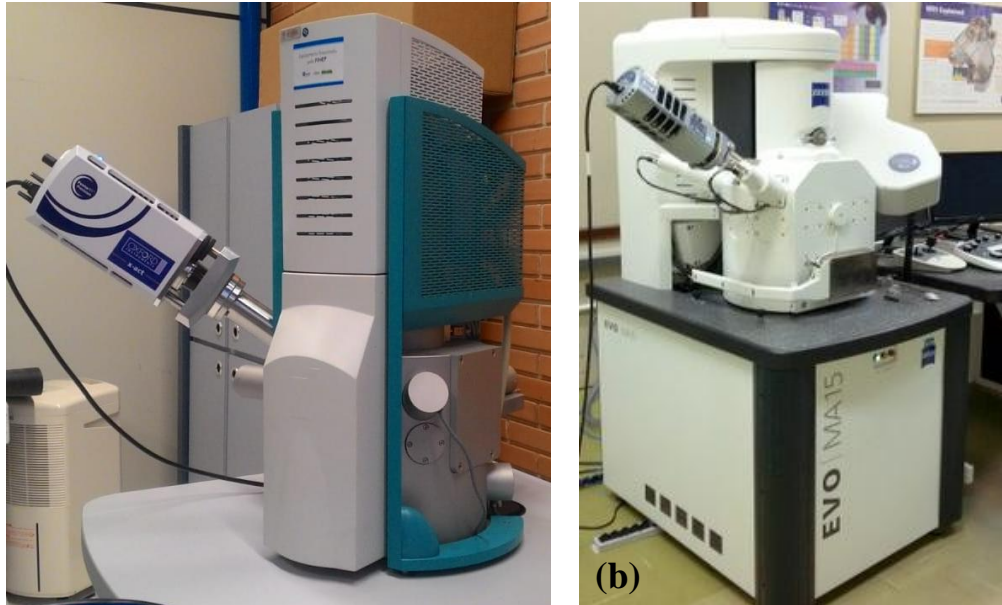


Figura 23 – (a) MEV Vega3, Tescan, Oxford; (b) MEV EVO, MA15
Fonte: Autora (2018)



Figura 24 – Porta amostras do MEV Vega3, Tescan, Oxford
Fonte: Autora (2018)

3.2.4.5 Porosidade

A técnica de análise conhecido pelo nome de *Brunauer Emmett Teller* (BET) é utilizada para medição da área superficial específica de um material sólido. Esse método foi desenvolvido pelos pesquisadores Brunauer, Emmett e Teller e publicado em 1938.

As análises foram realizadas no Laboratório de Catálise e Produção de Biocombustíveis da Universidade Federal do Paraná – UFPR – Palotina, com o objetivo de mensurar uma indicação da porosidade total do material. Com as amostras previamente secas em estufa por pelo menos 24 horas a 105°C, as mesmas foram submetidas a um pré-tratamento a 75°C por 3h, sob vácuo para retirar toda umidade e espécies adsorvidas da superfície do material. Em

seguida, foram caracterizadas através das isotermas de adsorção/dessorção foram registadas na temperatura do nitrogênio líquido utilizando o equipamento Nova 2000e da Quantachrome (Figura 25).



Figura 25 - Analisador de fisissorção de nitrogênio
Fonte: Laboratório de catálise e produção de biocombustíveis UFPR (2018)

3.2.4.6 Condutividade térmica e atraso térmico

A fim de viabilizar os ensaios térmicos, foi construído um protótipo com a finalidade de propiciar um ambiente para realização das medições referente às variações de temperatura ao longo do tempo. Sendo confeccionado uma câmara, nas dimensões de 80cm x 60cm x 60cm, (Figura 26), externamente toda em chapa *Oriented Strand Board* (OSB), com 14mm de espessura, revestida internamente com uma manta de cerâmica. A tampa, com lateral para encaixe na altura de 10cm, revestida de maneira que ao fechar ocorra uma vedação perfeita no interior da caixa.

A câmara “*Prohélios*” foi desenvolvida com base na metodologia utilizada para estudos de transferência térmica, adotada pelos autores: Borges (2009), Silva (2010) e Oliveira *et. al.*, (2015). Onde o experimento demonstrou ser empregado com índices de resultados confiáveis, utilizando-se de temperatura máxima de aproximadamente 40°C, temperatura essa adotada nos ensaios realizados nesta pesquisa.



Figura 26 - Estrutura para ensaio com Câmara “Prohélios”.
Fonte: Autora (2018)

A transferência de calor das placas, foi analisada a partir da definição de uma diferença de temperatura entre as duas superfícies, inferior e superior da amostra em regime permanente, por meio de um termômetro com *Datalogger* e dois termopares com a função de registrar a sequência de temperaturas no sistema.

O equipamento para medição da variação da temperatura e umidade, no lado oposto da carga térmica, foi um *DataLogger*, marca AKSO, modelo AK174 (Figura 27), que opera na faixa de -30°C a 85°C , precisão de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ e umidade de 0 a 100% UR, com precisão de $\pm 3\%$. Para as medições de temperatura na superfície inferior e superior da placa foi utilizado dois multímetros, marca ICEL, modelo MD-6510 (Figura 28), com entrada USB e dois sensores termopar tipo K, fixados na superfície da placa com pasta térmica, a fim de obter maior precisão nas leituras de temperatura. A calibração das medições foi realizada durante o período de 1 horas após a entrada do regime permanente. Todas as variações de temperatura foram armazenadas a cada 5 minutos.

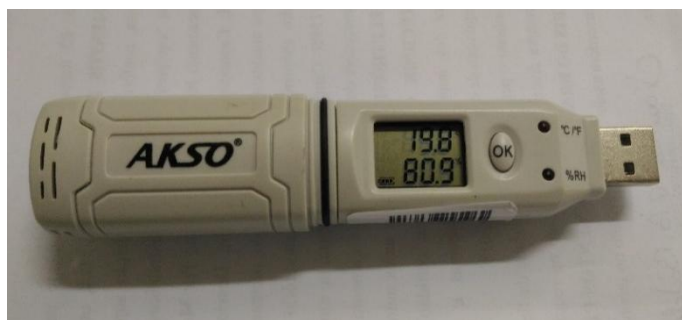


Figura 27- DataLogger AKSO
Fonte: Autora (2018)



Figura 28 - Multímetros ICEL
Fonte: Autora (2018)

Para cada ensaio de transferência de calor, uma placa de fibrocimento era fixada no centro da câmara *Prohélios* (Figura 29), entre duas bases fabricadas em OSB revestida com manta cerâmica, de modo a evitar a transferência de calor que não fosse por meio da amostra.

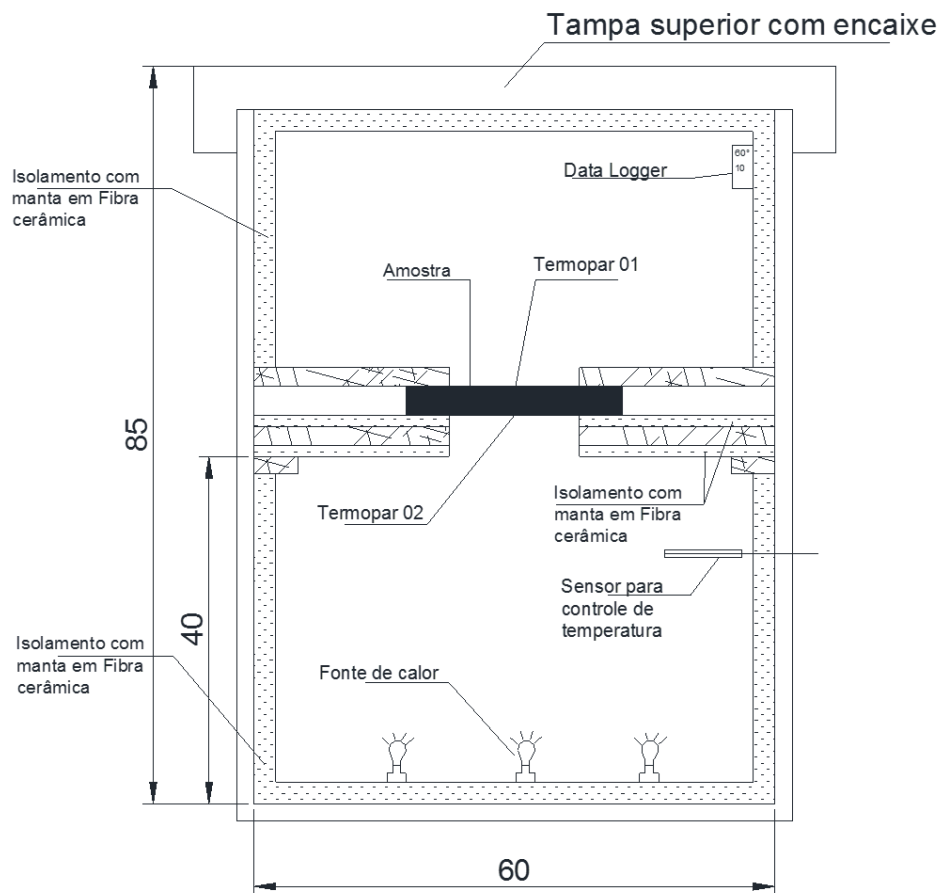


Figura 29- Sistema para o ensaio de transferência de calor
Fonte: Autora (2018)

De acordo com Oliveira *et al.* (2015), o coeficiente de condutividade térmica k está relacionado com a natureza do material. Entretanto, foi determinado através da Equação 5:

$$k = \frac{h_e \cdot L(T_1 - T_{SE})}{(T_2 - T_1)} \quad (5)$$

onde:

k = coeficiente de condutividade térmica (W/m.K);

h_e = coeficiente de convecção, sendo: 8,1 W/m².K;

L = espessura da amostra (m);

T_1 = temperatura superfície termopar 01 (k);

T_2 = temperatura superfície termopar 02 (k);

T_{se} = temperatura externa de um ponto afastado da superfície (k).

Com os termopares fixados na amostra e o *Datalogger* na posição externa a geração de calor a câmara era fechada e acionada a fonte geradora de calor, e assim iniciado o processo de leitura dos dados de temperatura nas duas faces da placa e no termômetro distante da placa. Os valores das temperaturas foram registrados e armazenados em *Datalogger* para posterior coleta e transferência dos dados para um software.

O valor do coeficiente de convecção (h_e) adotado foi de 8,1W/m².K, considerando situações de convecção natural em edifícios para paredes internas, segundo dados apresentados por Boabaid (2010), onde o coeficiente de transferência de calor para situações de convecção natural comuns quando se estuda problemas de transferência de calor em ambientes condicionados.

A inércia térmica foi determinada em segundos (s), considerando o tempo transcorrido entre a variação térmica do compartimento de aquecimento até sua manifestação na superfície oposta da placa submetida a transmissão de calor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia aplicada. Realizam-se discussões acerca das características físicas, mecânicas (resistência à flexão) e químicas para analisar e discutir as propriedades térmicas das placas por meio dos dados de condutividade térmica obtidos nos ensaios. As discussões pretendem promover maior conhecimento das características apresentadas pelas placas de fibrocimento produzidas com substituição parcial do cimento Portland por RCV, comparando-as com amostras referência, além de verificar qual o comportamento dessas placas em relação ao coeficiente de condutividade térmica de uma placa comercial.

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas foram afetadas com a substituição do cimento por RCV nas amostras produzidas com CP II F 32 e com CP V ARI, o que pode ser constatado pela observação da Tabela 14. As misturas PF e PV (referência) apresentaram massa específica superior em relação as demais amostras. Verificou-se, no entanto que ocorreu uma redução na massa específica das amostras com a substituição do cimento por RCV. Esta verificação decorre da característica peculiar da matéria-prima deste tipo de resíduo – de massa específica menor que os cimentos utilizados nas misturas. A relação água/cimento (A/C) estimada teve uma variação entre 0,28 a 0,35, apresentando aumento conforme o acréscimo no percentual de RCV nas misturas.

Como observado na Tabela 14, as placas à base de cimento CP II F 32, com 15%, 25 % e 50% de RCV possuem maior índice de absorção de água, maior porosidade e menor massa específica, sendo, portanto, menos densas que a placa referência (PF). No entanto, o índice de absorção de água e a porosidade foi maior e mais expressivo nas placas com 25% e 50% de RCV. Para as amostras das placas à base de cimento CP V ARI, com 15%, 25% e 50% de RCV também apresentaram redução na massa específica, e aumento na absorção de água e na porosidade em relação a placa referência (PV).

Tabela 14 – Valores médios (6 exemplares) das propriedades físicas das placas aos 28 dias, com desvio padrão entre parênteses.

Aglomerante	% RCV em volume	Absorção (%)	Massa específica (g/cm³)	Porosidade (%)	Relação A/C
CP II F 32	PF	24,80 (0,43)	1,53(0,09)	36,10 (0,98)	0,27
	PF15	25,93 (0,78)	1,40(0,04)	37,99 (0,58)	0,28
	PF25	30,98 (0,82)	1,35 (0,07)	42,14 (0,95)	0,30
	PF50	33,47 (1,32)	1,19 (0,02)	42,24 (1,98)	0,34
CP V ARI	PV	23,46 (1,02)	1,41(0,02)	37,73 (1,07)	0,29
	PV15	27,63 (1,06)	1,38(0,01)	39,39 (0,97)	0,31
	PV25	28,51 (0,62)	1,32(0,03)	40,10 (0,62)	0,32
	PV50	28,36 (1,14)	1,20(0,04)	39,47 (1,16)	0,35

Fonte: Autora (2018)

Verificou-se que ocorreu uma redução na massa específica de todos os corpos-de-prova das placas com o aumento na substituição do cimento por RCV. Esta verificação decorre da característica peculiar da matéria-prima deste tipo de resíduo – de massa específica menor que os cimentos utilizados nas misturas. Outro fator também pode ter contribuído para essa redução na massa específica, ou seja, o aumento na relação A/C. Além disso, El-Diadamony *et al.*, (2016), citam que o CSH formado a partir da reação pozolânica tem menor densidade em comparação com aquela formada somente pela hidratação do cimento puro. Portanto, apresentando valores menores de densidade aparente.

O aumento da porosidade e da absorção de água nos corpos-de-prova das placas de fibrocimento pode ser atribuído em razão da elevação da relação água/cimento (A/C), que aumentou de 0,27 para 0,35, conforme o aumento em percentual da substituição do cimento por RCV ou ainda pela própria incorporação do resíduo, por obter características de elevada porosidade (VIEIRA, TEIXEIRA e MONTEIRO, 2009). Os valores de relação A/C foram estimados pela diferença entre materiais secos e a massa das placas após a prensagem. Segundo Caldas e Silva (2002), a pressão negativa aplicada durante a execução das placas na forma para retirada da água permite a formação de canais entre a matriz o que provavelmente eleva a quantidade de poros e que pode ser diferente para cada composição.

Os corpos-de-prova das placas com CP V ARI, apresentaram aumento no índice de porosidade e absorção de água em relação a amostra referência, porém esse aumento foi menos significativo que as amostras com cimento CP II F 32. Uma explicação para isso pode ser a maior interação entre os produtos da matriz com presença de produtos hidratados mais denso,

ou seja, tais características podem corroborar positivamente no desempenho mecânico, contribuindo no aumento da resistência à flexão.

Após a cura aos 28 dias, as placas foram também fotografadas para analisar possíveis interferências na cor, devido a presença do RCV, uma vez que o resíduo possui um teor significativo de Fe_2O_3 em sua composição. Pode-se observar na Figura 30 que há pequenas variações de cor entre elas, sendo mais evidente a alteração nas placas PF50 e PV50, decorrente do maior percentual de resíduo.

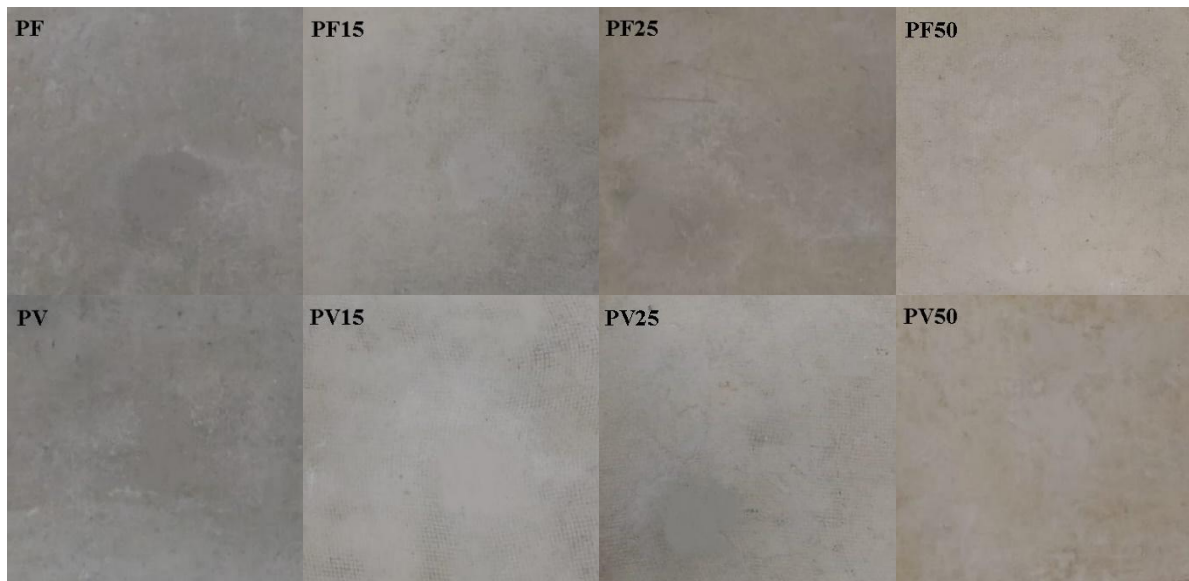


Figura 30 – Imagens das amostras aos 28 dias de hidratação, antes da realização dos ensaios térmicos
Fonte: Autora (2018)

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os gráficos apresentados nas Figuras 31 e 32 apresentam os valores médios do módulo de ruptura à flexão das placas aos 7 e 28 dias de hidratação com diferentes teores de substituição do CP II F 32 e CP V ARI, por RCV, respectivamente.

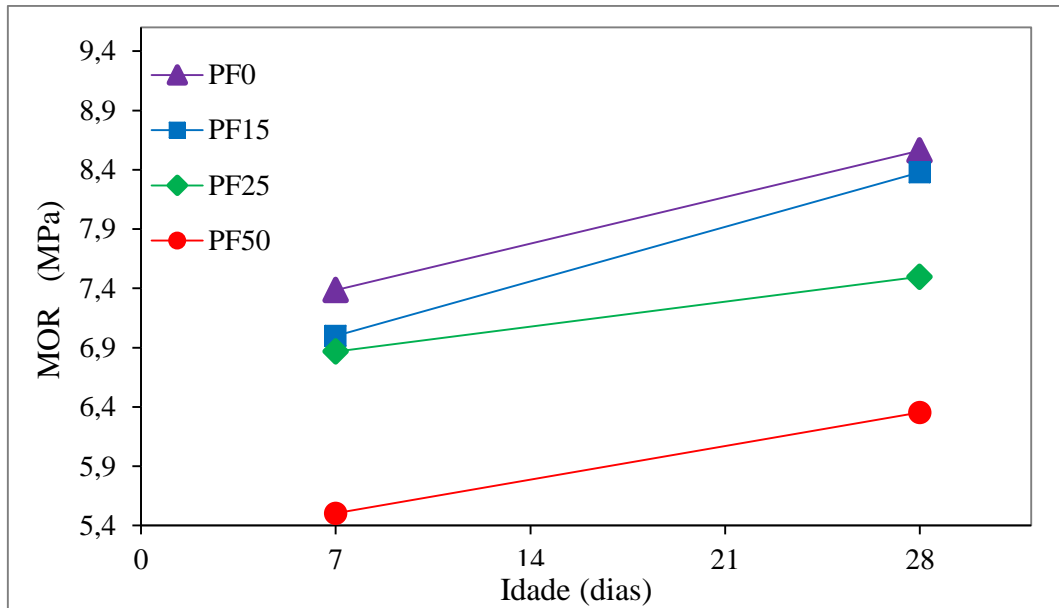


Figura 31 – Resistência à flexão placas em fibrocimento produzidas com CP II F 32
Fonte: Autora (2018)

Nota-se que os resultados obtidos nas placas com CP II F 32 apresentaram queda na resistência mecânica em decorrência da substituição do cimento por RCV, sendo essa redução mais expressiva para as amostras com 50% de RCV. Apesar da queda nos valores, ainda assim, todas as placas atenderam a resistência à flexão mínima para uso externo, com 28 dias de hidratação, classificadas segundo a NBR 15496 (2016) como classe A, categoria 3 (resistência mínima de 7MPa) e categoria 2 (resistência mínima de 4MPa).

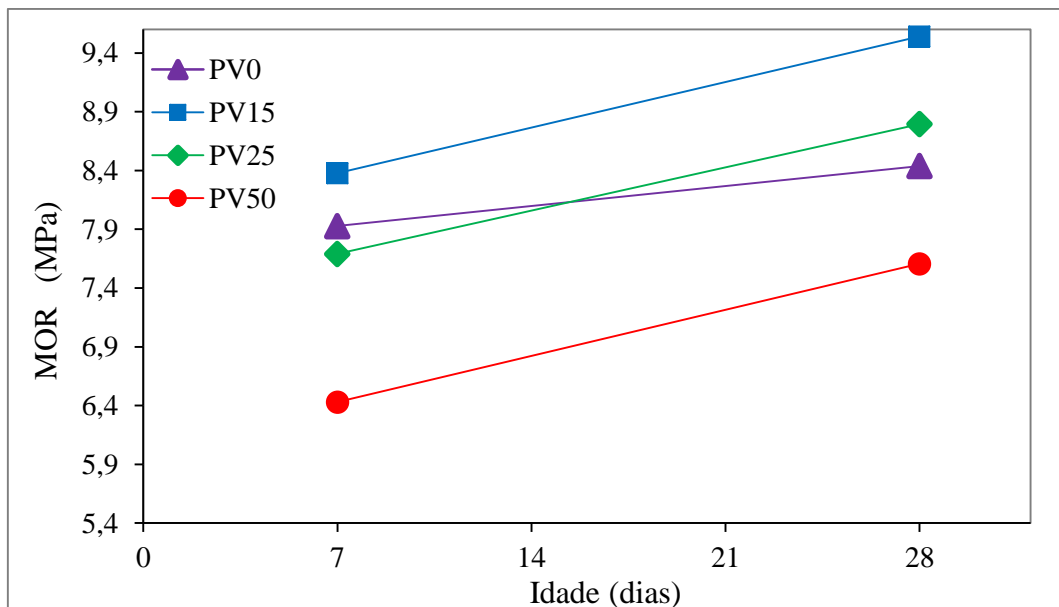


Figura 32 - Resistência à flexão placas em fibrocimento produzidas com CP V
Fonte: Autora (2018)

Os resultados obtidos aos 28 dias para as placas produzidas com CP V–ARI, substituição parcial de 15% (PV15) e 25% (PV25) por RCV, foram superiores as amostras de referência. (PV). No entanto, as amostras com 50% (PV50) de resíduo, apresentaram uma leve queda, chegando a 7,71MPa. Entretanto, todas as placas de fibrocimento podem ser classificadas como externa, Classe A, categoria 3, segundo a NBR 15496 (2016). O melhor resultado foi observado para as placas com 15% (PV15) de RCV, apresentando um ganho de resistência de aproximadamente 13,4% em relação a placa de referência (PV).

É importante ressaltar que todas as amostras tiveram ganho de resistência mecânica de 7 dias para 28 dias de hidratação, o que era esperado devido ao processo de hidratação do cimento (Tabela 15).

Tabela 15 - Resultados médios obtidos da resistência à flexão 3 pontos (σ_r), com desvio padrão entre parênteses

Placas de fibrocimento	σ_r (MPa) 7 dias	σ_r (MPa) 28 dias	Classe-categoria NBR 15496 (2016)
PF	7,39 (0,64)	8,56 (0,65)	A-3
PF15	7,00 (0,39)	8,38 (1,22)	A-3
PF25	6,87 (0,47)	7,50 (1,16)	A-3
PF50	5,50 (0,99)	6,36 (1,34)	A-2
PV	7,93 (1,56)	8,44 (1,44)	A-3
PV15	8,38 (1,42)	9,54 (0,98)	A-3
PV25	7,69 (1,03)	8,80 (1,43)	A-3
PV50	6,43 (0,55)	7,71 (0,90)	A-3

Fonte: Autora (2018)

O tratamento estatístico anova dos resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica das placas produzidas com CP II F-32 e CP V- ARI, com substituições de 0%, 15%, 25% e 50% por RCV aos 28 dias de cura, demonstram que tanto nas amostras com CP II F-32, quanto nas amostras com CP V- ARI, o “p-valor” (0,061 e 0, 211, respectivamente) é superior ao “alfa” (0,05), confirmando a igualdade entre elas para um nível de confiança de 95% (APÊNDICE B).

Aguiar (2016), obteve seus melhores resultados na resistência mecânica à flexão com substituição de até 30% do cimento Portland por RCV, em placas produzidas a partir de um compósito, utilizando-se argamassa e fibras longa de malva. Observa-se, no entanto, que no estudo de Aguiar (2016), os compósitos foram produzidos com a substituição de 30% e 50%

do cimento Portland pelo resíduo de cerâmica vermelha, areia quartzosa de rio, 1% de superplastificante e 6% de volume de fibras longas de malva, em um processo produtivo onde tem-se uma camada de argamassa, uma camada de fibra e por fim mais uma camada de argamassa, enquanto que nesta pesquisa, foram produzidas placas de fibrocimento pelo método Hatschek adaptado para fabricação em laboratório, em uma mistura com um total de 3% de fibras (PP e celulose).

Além disso, deve-se ressaltar que a pesquisa realizada por Aguiar (2016), teve um tratamento de hornificação e aplicação de verniz nas fibras de malva, o que reduziu a absorção e a variação dimensional das fibras, possibilitando assim, aumento na resistência mecânica.

A Figura 33 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência a flexão pelo método dos três pontos para as placas produzidas com CP II F 32, e CP V ARI aos 28 dias de hidratação, além do ensaio realizado em uma placa plana comercial (PI), amplamente utilizada em sistemas de construções em LSF.

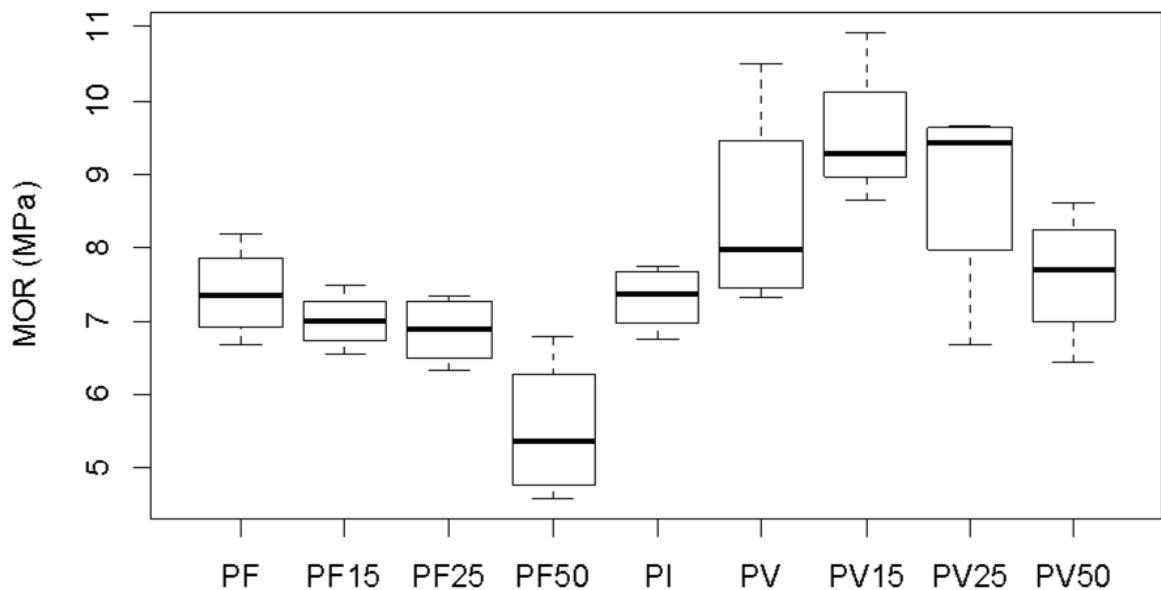


Figura 33 – Resistência à flexão placas de fibrocimento CP II F 32, CP V ARI e Placa indústria, 28 dias de hidratação
Fonte: Autora (2018)

Quando comparado os valores médios de resistência mecânica de todas as placas, inclusive da amostra da placa comercial (PI), o “p-valor” observado foi de 0,0177, evidenciando que pelo menos uma amostra difere das demais (APÊNDICE B).

As placas produzidas com CP V ARI, obtiveram os melhores resultados, em comparação as amostras com CP II F 32 e a placa de mercado (PI). O menor resultado foi encontrado na

placa com 50% de RCV em substituição ao CP II F 32. Resultados esses, já esperados, considerando que quanto maior as adições de materiais inertes em cimentos Portland, menor a resistência mecânica.

O maior aumento de resistência mecânica a flexão foi de 13,3% em relação a placa referência, obtido na amostra PV15 (15% de RCV). Anjos; Ghavami e Barbosa (2003b), verificaram a substituição do cimento Portland CP II E – 32 por resíduo cerâmico nos teores de 20%, 30% e 40% para fabricação de compósitos reforçados com polpa de bambu refinada, observando que a substituição de 20% foi a que apresentou os melhores resultados, com praticamente a mesma resistência à flexão que a placa referência.

Em pesquisas com testes em argamassas, Araújo (2017), Silva; Brito e Veiga (2009), observaram maior resistência à compressão nas misturas com 10% de pó cerâmico em substituição ao cimento. Para Araújo (2017) e Jamil *et al.*, (2016), o aumento da resistência mecânica se justifica devido à ação do enchimento, por meio da contribuição do material que apresenta granulometria menor que a do cimento e a reação pozolânica., essas ações são mais evidentes em cimentos puros, como exemplo pode-se citar o CP V ARI. Essa compensação da resistência à compressão pode ser explicada também pela formação de produtos da reação pozolânica como C-S-H e C-A-S-H (Aluminossilicato de Cálcio Hidratado).

Para Castro (2009); Pereira-de-Oliveira; Castro-Gomes e Santos (2012), o aumento da resistência à flexão em produtos cimentícios com a substituição de parte do cimento Portland pelo resíduo de cerâmica vermelha apresenta ligação com o fato da matriz cimentícia se tornar mais resistente a agentes químicos, com menor porosidade e menor calor de hidratação, menor risco de fissuração térmica e maior consumo de hidróxido de cálcio livre por meio das reações pozolânicas, resultando na formação de C-S-H (Silicato de cálcio hidratado) que diminui a alcalinidade da matriz cimentícia. No entanto, é importante salientar que algumas misturas desta pesquisa, como foi o caso da PF25 e PF50, obtiveram elevada porosidade e queda na resistência. Resultados esses que serão melhores discutidos no item 4.5 Análise térmica, e que puderam contribuir no aumento do desempenho térmico.

Beraldo, Shiroma e Ferreira (2014), estudaram o comportamento de compósitos de cimento Portland de alta resistência inicial com adição de resíduos de isoladores de porcelana e resíduos de Pinus, obtendo a maior resistência à tração na flexão (8MPa) nas misturas com 30% de resíduos de isoladores de porcelana e de 19% de partículas de Pinus, considerada características mecânicas adequadas para uso na construção civil.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

4.3.1 Avaliações pela técnica de Difração de Raios X (DRX)

Buscando compreender e subsidiar as análises de desempenho térmico e resistência mecânica, foram realizados ensaios de DRX nas amostras de placas de fibrocimento com CP II F 32 e CP V ARI, aos 28 dias de hidratação. A Figura 34 apresenta os difratogramas das amostras produzidas com CP II F 32 (0%, 15%, 25% e 50% de RCV), onde é possível observar a presença dos picos de Etringita (AFt), Hidróxido de cálcio (CH), Carbonato de cálcio (Cc) e Aluminato (Al) presentes no cimento, e os picos de Quartzo (Q) e Hematita (H) decorrente da presença do RCV. Verifica-se também que ocorre uma redução do Hidróxido de Cálcio conforme aumenta o teor de RCV, devido ao consumo deste composto em consequência da reação pozolânica.

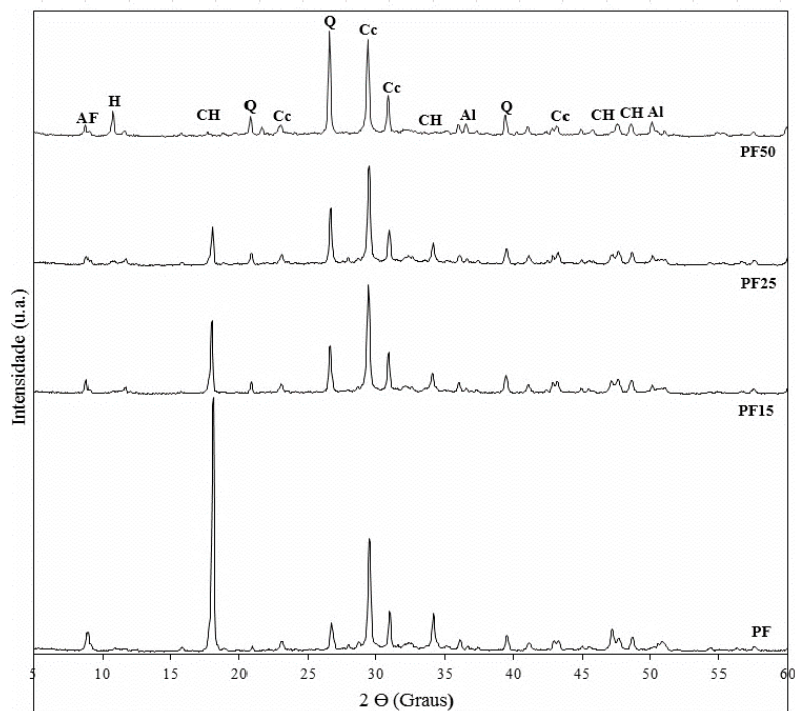


Figura 34 - Difratograma das amostras (placas) com CP II F 32
Fonte: Autora (2018)

Na Figura 35 apresenta-se os difratogramas das amostras produzidas com CP V ARI, onde observa-se uma redução maior no pico de CH, aumento nos picos cristalinos de quartzo e também a presença da hematita nas misturas com adição de RCV.

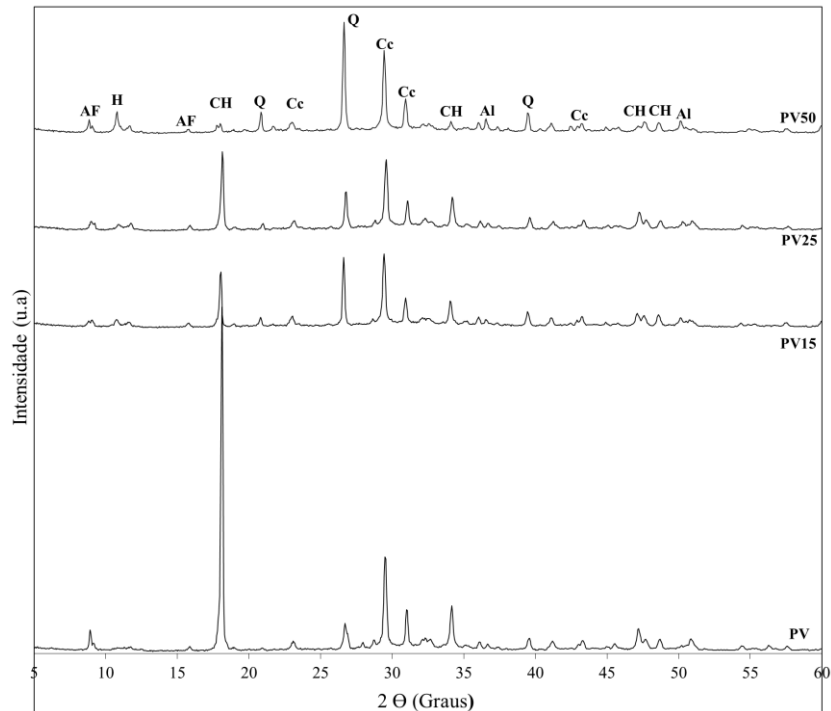


Figura 35- Difratoograma das amostras (placas) com CP V ARI
Fonte: Autora (2018)

Materiais pozolânicos, de forma geral, têm influência benéfica em compósitos, tanto no comportamento mecânico como nas propriedades físicas. De acordo com Anjos (2002), o uso de materiais como o RCV tende a diminuir o ataque às fibras, devido à redução na quantidade de hidróxido de cálcio na matriz, possibilitando aumento da durabilidade.

A quantidade de CH presente em uma matriz de cimento com adição de material pozolânico, depende dos níveis dessa substituição, onde o pico de CH pode diminuir devido ao seu consumo durante uma reação química pozolânica, contribuindo para resultados satisfatórios na resistência mecânica em alguns casos, como por exemplo neste estudo o uso do cimento Portland CP V ARI, substituição de 15% e 25% por RCV (ABDELLI *et al.*, 2017; HASSE *et al.*, 2017; TIRONI *et al.*, 2015).

4.3.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As análises de microscopia eletrônica de varredura foram realizadas com o objetivo de buscar imagens dos compostos hidratados C-S-H observados nas demais análises de DRX. Além de verificar o comportamento das fibras nas placas produzidas com cimento CP II F 32 e CP V ARI, com e sem substituição do RCV. A Figura 36 apresenta a morfologia geral das fibras de celulose de papel jornal e fibras PP.

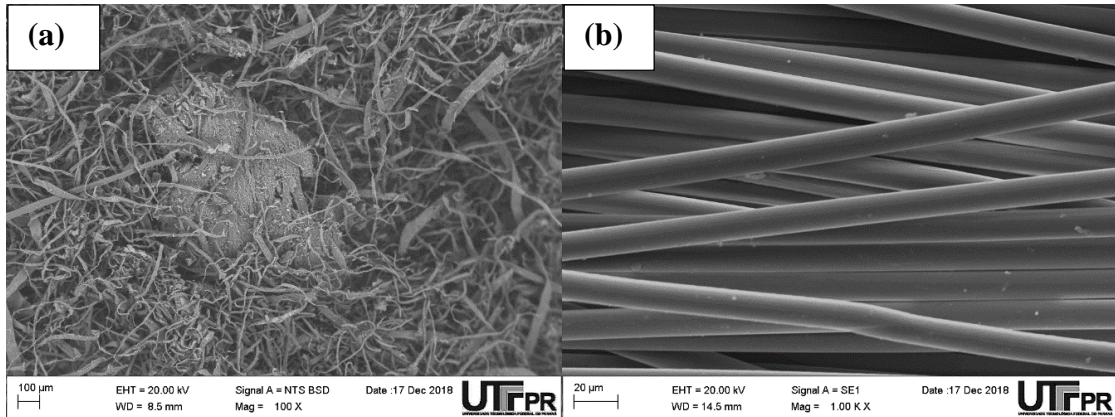


Figura 36 – (a) Morfologia geral das fibras de celulose de papel jornal; (b) Morfologia geral fibras PP
Fonte: Autora (2018)

As fibras de celulose apresentam uma densidade de 500 kg/m^3 , de estrutura predominantemente cristalina. Com fibras dispersas de maneira aleatória, atuando como um micro reforço em uma matriz de cimento, podendo contribuir positivamente com a resistência à flexão, módulo de elasticidade e estabilidade térmica Sullcahuamán *et al.*, (2007). Além disso, para Serrano *et al.* (2014), o uso de fibras de papel jornal tem como resultado, produtos mais econômicos e leves.

Já as fibras PP têm um diâmetro médio de 18microns, comprimento máximo de 12 mm, uma densidade média de 940 kg/m^3 , boa dispersão, resistência elevada a álcalise baixa condutividade térmica. Ainda de acordo com Tabela 8 apresentada no item 3.1.2 Fibras, as fibras PP têm resistência a tração de 80 MPa e um módulo de elasticidade de 5 GPa, que torna possível melhorar as propriedades mecânicas de resistência à flexão das placas de fibrocimento.

Nas Figuras 37 (b, d, f, g) e 38 (b, d, f, g) observa-se a presença dos compostos de hidratação na superfície dos dois tipos de fibras, em todas as amostras de placas de fibrocimento analisadas, quando comparado as imagens das fibras naturais (Figura 36).

Nas Figuras 37 (c) e 38 (c) referente as amostras PF15 e PV15, foi possível observar uma superfície menos porosa quando comparada as demais amostras com presença de RCV, enquanto que as Figuras 37 (g) e 38 (g) referente as placas PF50 e PV50 apresentam maior porosidade. Obviamente, as imagens de MEV indicam que as amostras com menor percentual de RCV, bem como as misturas de referência, possuem uma estrutura mais densa, comprovando o que foi observado nos ensaios de caracterização física e de porosidade pelo método de BET.

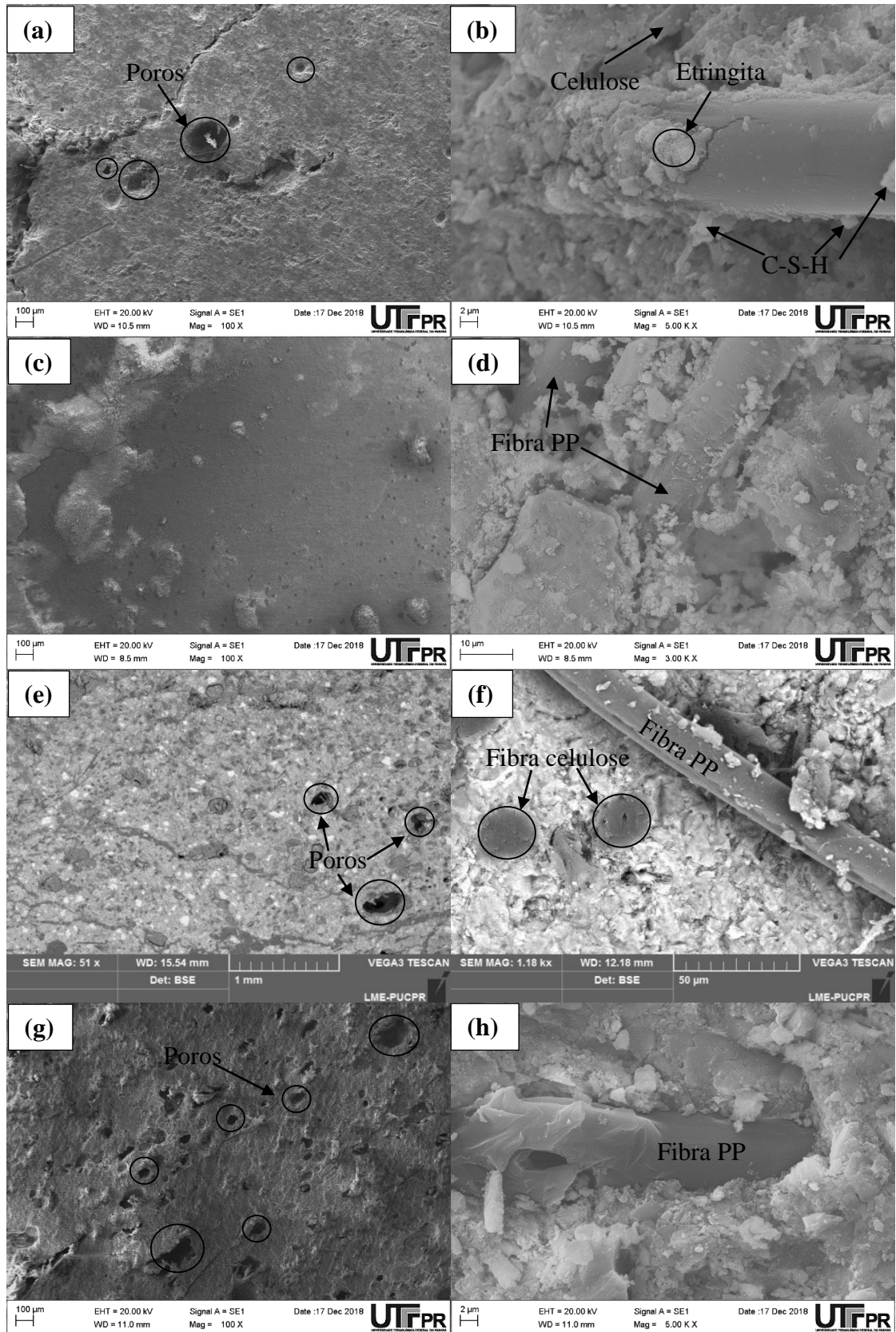


Figura 37 – MEV das placas com CP II F 32, 28 dias de hidratação, sendo: (a) e (b) PF; (c) e (d) PF15; (e) e (f) PF25; (g) e (h) PF50
Fonte: Autora (2018)

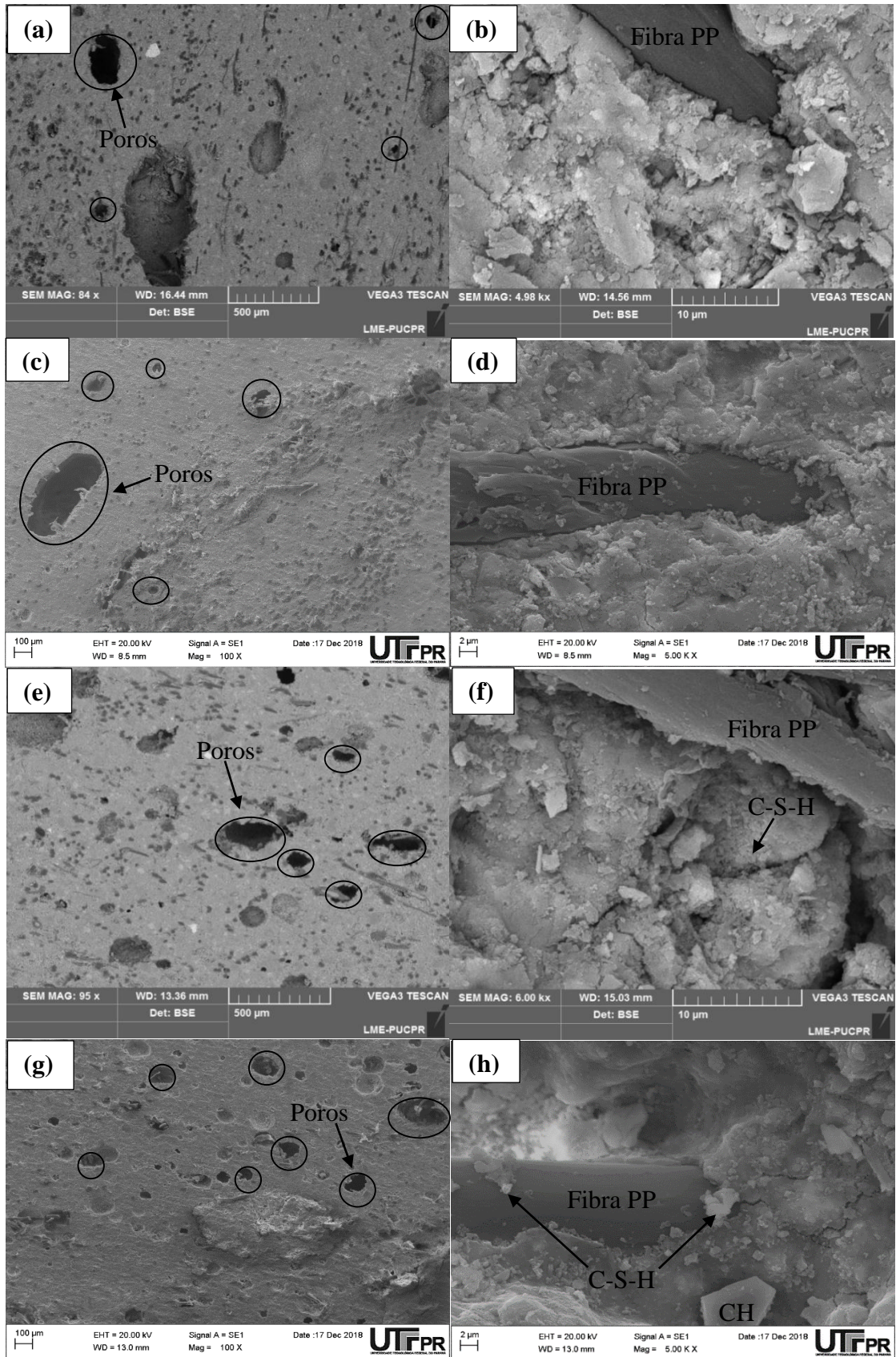


Figura 38 – MEV das placas com CP V -ARI, 28 dias de hidratação, sendo: (a) e (b) PV; (c) e (d) PV15; (e) e (f) PV25; (g) e (h) PV50

Fonte: Autora (2018)

Com a diminuição no consumo de cimento e o aumento da relação A/C mais poros aparecem, com exceção das amostras com substituição de 15% de cimento por RCV, Figuras 37 (c) e 38 (c), onde as imagens de MEV não permitem observar poros na superfície analisada.

É possível observar nas imagens de MEV da Figura 37 (b, d, h), referente as placas produzidas com CP II F 32 uma estrutura mais amorfa, enquanto que na Figura 38 (d, h), são representadas por uma estrutura mais cristalina, o que pode ser evidenciado principalmente na amostra PV50 Figura 38 (h).

A microestrutura observada na Figura 37 (g), referente a placa de fibrocimento PF50, indica elevada quantidade de poros, distribuídos uniformemente na superfície da amostra, o que também eleva quantidade de ar aprisionado na placa, bem como, pode ser a causa da queda na resistência mecânica. Por outro lado, essas características auxiliam para o aumento no desempenho térmico do material.

Chen *et al.*, (2018) verificaram que a fibra PP pode melhorar a resistência a deformação elástica, e isso pode ser observado devido à estreita interação entre fibra PP e C-S-H. Com a elevada resistência à fratura em decorrência do uso das fibras o desenvolvimento de fissuras pode ser então reduzido.

O aumento no desempenho mecânico das amostras PV15 e PV25 pode ter relação com a maior eficiência na reatividade pozolânica do resíduo, resultando em maior aderência entre a pasta e a fibra. Confirmado pela observação de ranhuras e material (pasta) depositado sobre as fibras nas Figuras 38 (d) e (f), quando comparado as imagens de MEV da fibra natural. Esse resultado é paralelo ao trabalho de Betioli; John e Pileggi (2011), ao observarem que a presença de ranhuras e material depositado sobre a superfície das fibras (PVA) comprovam a aderência entre a fibra e a matriz e o aumento da resistência mecânica.

4.4 POROSIDADE

Nas amostras das placas PF15 à PF50, o volume acumulado de poros aumentou significativamente para 20,59% e 123,3%, respectivamente em comparação à placa referência. Os resultados corroboram com o aumento da porosidade aparente nos ensaios de caracterização física e as imagens de MEV, onde é possível observar uma presença maior de poros na superfície das amostras com 50% de RCV (PF50). No gráfico representado pela Figura 39 é possível observar que o volume acumulado de poros aumenta conforme eleva-se o nível de substituição do cimento CP II F 32 por RCV.

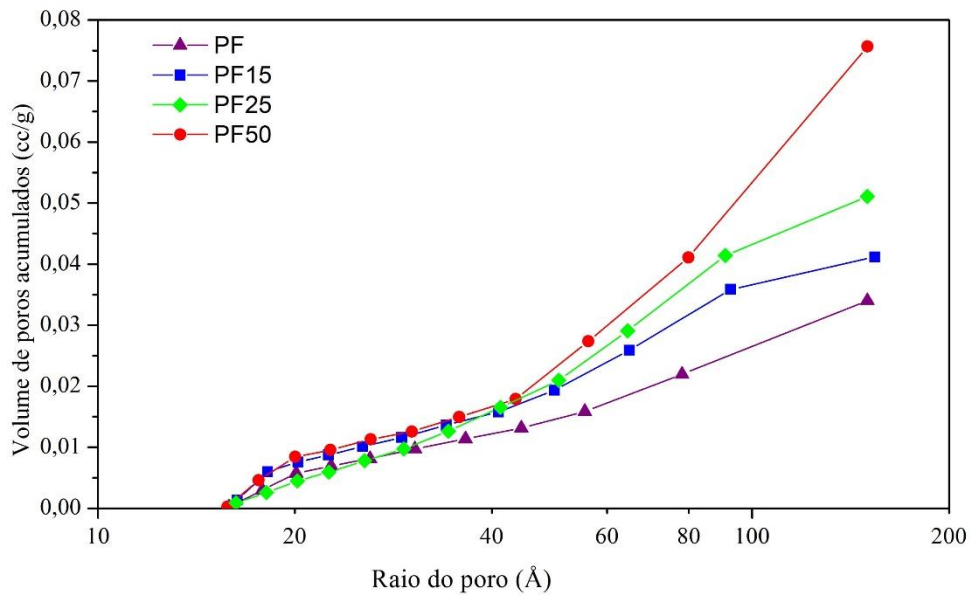


Figura 39 - Gráfico do volume acumulado de poros nas amostras com CP II F 32
Fonte: Autora (2018)

Observa-se que as placas produzidas com 15% de RCV apresentam valores de porosidade semelhantes aos das placas referência, por conter o menor percentual de resíduos.

Os efeitos no volume acumulado de poros nas amostras das placas com a substituição do cimento CP V ARI pelo RCV nos percentuais de 15%, 25% e 50% em volume, foram de aproximadamente 11%, 24% e 13% respectivamente, todos superiores a amostra referência (0% de RCV). No gráfico representado pela Figura 40 é possível verificar as curvas de distribuição do volume acumulado de poros obtidos pelo método de BET.

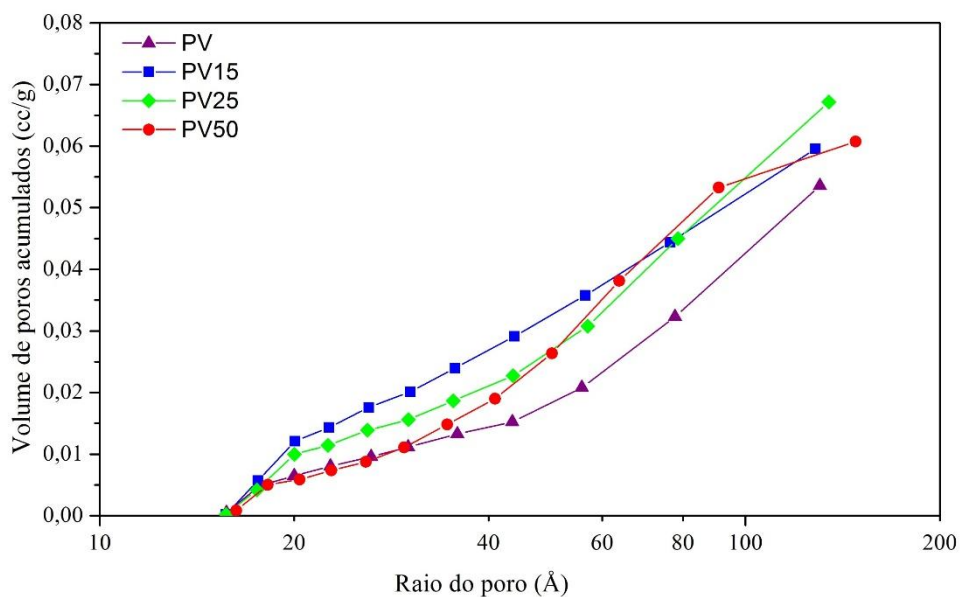


Figura 40- Gráfico do volume acumulado de poros nas amostras com CP V ARI
Fonte: Autora (2018)

Dentre as placas produzidas com CP V ARI, a PV25 foi a amostra que apresentou o maior volume acumulado de poros, conseqüentemente pode favorecer um melhor desempenho térmico.

A presença do RCV na placa cimentícia aumenta a sua porosidade primeiramente por suas características estruturais. Os ensaios de BET (item 3.1.1) mostraram que o mesmo apresenta porosidade intragranular, sendo ainda verificado que suas partículas são angulares, formando uma estrutura desordenada.

Tem-se ainda que sua utilização traz como consequência o aumento da relação água/cimento, fato que resulta na formação de vazios pela evaporação da água. Os resultados estão alinhados aos trabalhos de Aliabdo, Abd-Elmoaty e Hassan (2014); e Araújo (2017), ao apontarem que o RCV contribui para o aumento na relação A/C em materiais cimentícios, resultando em maior porosidade total, sendo dependente do percentual de RCV utilizado.

A associação dos efeitos da porosidade intragranular e do aumento da relação água/cimento é mais representativo nas amostras onde foi utilizado o cimento CP II F 32 do que no cimento CP V ARI. Dessa forma, infere-se que a maior porosidade apresentada pelas amostras em cimentos compostos (CP II F 32), pode ser decorrente do efeito físico, pela presença da adição de fíler, ou ainda pelo menor potencial de formação de produtos hidratados como C-S-H (silicato de cálcio hidratado).

Os resultados de porosidade obtidos pelo método BET não apresentaram similaridade com todos os resultados de absorção de água por imersão, entretanto, verifica-se que há diferença entre as bases físicas dos dois métodos, juntamente com o fato de que os poros e microestruturas de compósitos baseados em cimento são bastante complexos e heterogêneos, e podem influenciar os resultados finais. Considerando ainda, que o método BET avaliou mais especificamente os mesoporos, enquanto que o método de absorção por imersão indica o volume de poros permeáveis de um sólido, incluindo os macroporos (ARAÚJO, 2017).

O volume acumulado total de poros nas amostras referência PF e PV são inferiores em relação as demais misturas, confirmando assim o aumento na porosidade total das placas com a substituição parcial do cimento Portland por RCV. Na Tabela 16 são apresentados o volume acumulado total de poros para todas as misturas.

Tabela 16 - Volume acumulado total de poros

ID	Proporção (%)	Volume acumulado total dos poros - BET (cm ³ /g)	Desvio padrão (comparação das médias)
PF	0	0,034	
PF15	15	0,041	
PF25	25	0,051	0,02
PF50	50	0,076	
PV	0	0,054	
PV15	15	0,060	
PV25	25	0,067	0,01
PV50	50	0,061	

Fonte: Autora (2018)

As curvas de distribuição de tamanhos de poros (DTP) analisadas pelo método BET para as amostras com cimento CP II F 32 e CP V ARI estão plotadas nos gráficos representados pelas Figuras 41 e 42. O intervalo do raio dos poros verificados foi de 1,5 a 15,0 nm (15 à 150 Å), classificados por Everett (1972), como mesoporos.

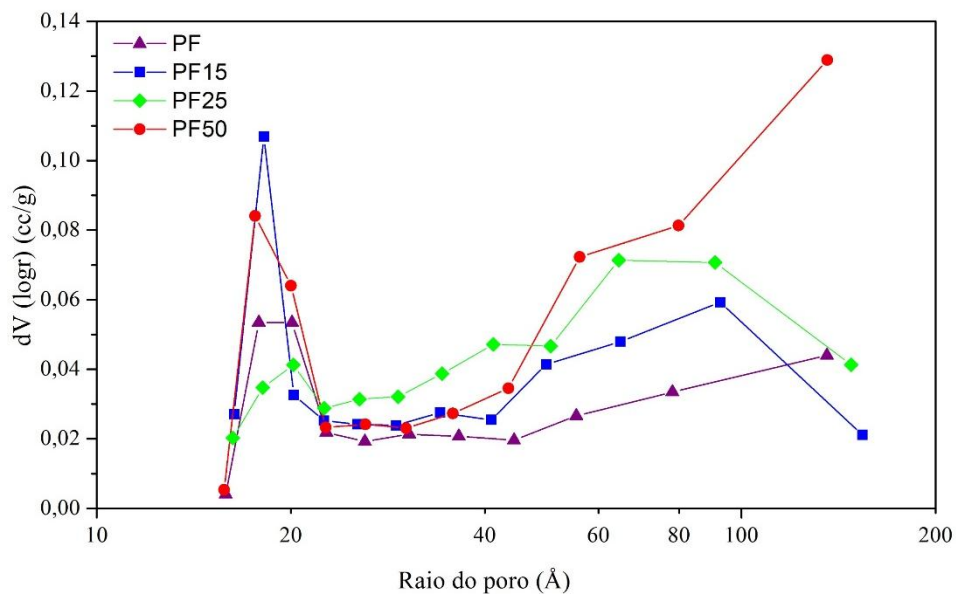


Figura 41 - Distribuição do tamanho de poros BET nas amostras com CP II F 32
Fonte: Autora (2018)

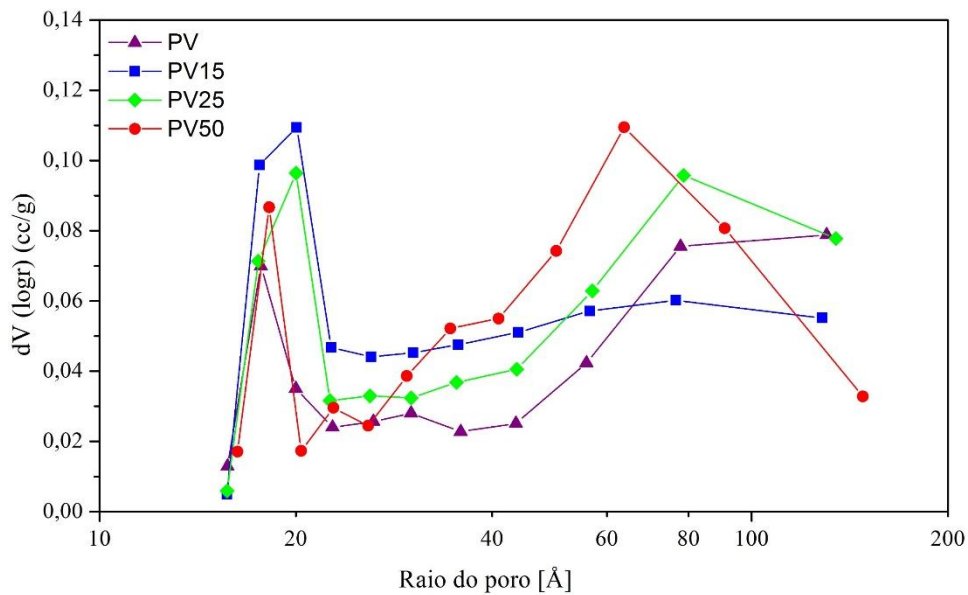


Figura 42 - Distribuição do tamanho de poros BET nas amostras com CP V ARI
Fonte: Autora (2018)

Claramente é possível observar em todas as amostras picos elevados nos tamanhos de poros com raio em torno de 1,5nm à 2,5nm, e também entre 6,0nm à 15,0nm, com exceção da placa PF25, onde ocorreu uma redução nos picos mais finos. Ainda assim, infere-se que quanto maior o percentual de RCV, maior a intensidade dos picos do gráfico BET. O aumento significativo no número de poros pequenos é explicado pelo efeito físico do material RCV moído, reflexo do refinamento do sistema de poros causado pelas alterações na microestrutura, confirmado em estudos realizados por Araújo (2017) e Oliveira (2012).

Analisando a quantidade de poros em relação à dimensão do raio, observou-se um comportamento similar na sua distribuição entre todas as misturas, porém as amostras com CP V ARI, apresentaram poros com diâmetro menor em relação as amostras com CP II F 32. Isso pode ser explicado pelo fato do RCV ser uma pozolana de baixa reatividade, com isso, parte do RCV não hidratada funcionando como partículas inertes (fíler), sendo esse efeito mais significativo para o cimento CP II F 32, por apresentar menor potencial de reação que o CP V ARI.

4.5 ANÁLISES TÉRMICA

O objetivo principal desta pesquisa foi verificar o coeficiente de condutividade térmica de placas de fibrocimento produzidas em laboratório, com a substituição parcial do cimento Portland por RCV, comparando esses resultados com placas referência (0% de RCV) e uma

placa comercial. Com os dados coletados, segundo o procedimento descrito no item 3.2.4.6, calculou-se o fluxo de calor e o coeficiente de condutividade térmica, com base na espessura de cada placa de fibrocimento. De forma a padronizar os períodos de medição a serem considerados nos cálculos, os dados foram coletados por 3 horas para cada placa aos 28 dias de hidratação.

É importante ressaltar que o coeficiente de condutividade para todas as amostras foi calculado a partir da estabilidade na temperatura da câmara, ou seja, após trinta minutos do início das medições até o instante final de três horas, correspondendo ao período das duas horas e trinta minutos.

Na Figura 42 observa-se um comparativo entre todas as placas de fibrocimento, incluindo os dois tipos de cimento e a placa comercial. Neste caso, o tratamento estatístico – Teste Dunn (1964), teste Post-Hoc para Kruskal-Wallis (APÊNDICE C) dos dados obtidos no ensaio de térmica na câmara “Prohélios”, demonstrou que há diferença significativa entre as amostras para um nível de confiança de 95%. Analisando os resultados estatísticos e observando a Figura 43, é possível verificar que as placas PF, PV, PF15, PV15, PV50 e a placa comercial não apresentaram diferença significativa entre elas, com dados de coeficiente de condutividade térmica muito próximos. Os dados demonstram ainda igualdade nos resultados entre as placas PF25 e PV25.

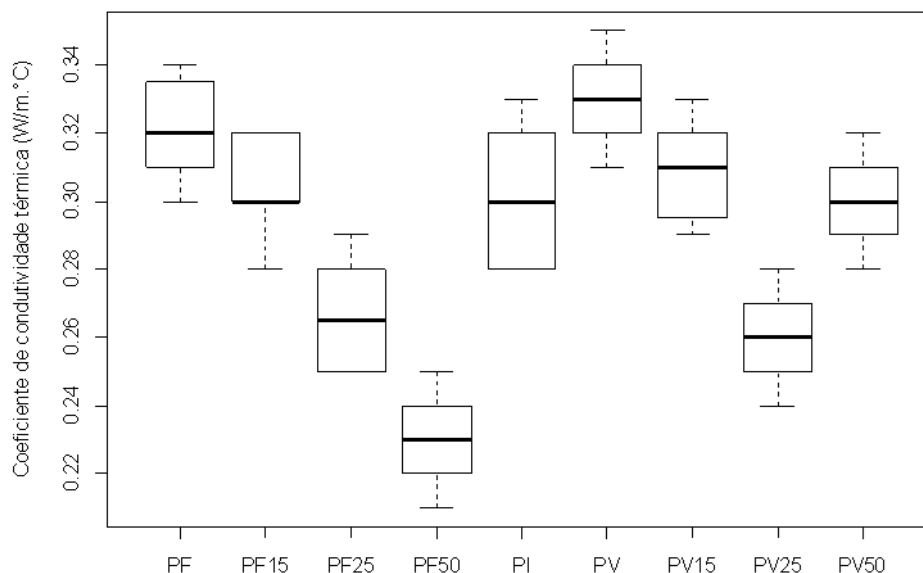


Figura 43 – Coeficiente de condutividade térmica obtidos para as amostras CP II F 32, CP V ARI e placa indústria, aos 28 dias de hidratação

Fonte: Autora (2018)

Fongang *et al.*, (2015), explicam que a condutividade térmica de um compósito é uma propriedade importante que determina a capacidade de isolamento e os regimes de transferência de calor de um componente ou material. Uma estrutura leve, de baixa densidade é significativa ao impedir a transferência térmica através da matriz dos compósitos, o que justifica o comportamento analisado principalmente nas placas PF25, PF50 e PV25, com redução na densidade e melhores resultados no desempenho térmico.

Os resultados mostram que a condutividade térmica das placas depende do tipo de cimento utilizado, o uso de um cimento sem adições como é o caso do CP V ARI, fez com que a porcentagem de isolamento térmico diminuísse sensivelmente quando comparado as placas produzidas com CP II F 32. Além disso, outros fatores como teor de umidade, temperatura, tipo de material cimentício e densidade influenciam na condutividade térmica. Desta forma, a temperatura máxima avaliada no ensaio foi mantida em 40°C, com uma variação de $\pm 2^\circ\text{C}$ para todas as misturas (ASADI *et al.*, 2018; SAIDI *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2017).

O gráfico na Figura 44 apresenta o coeficiente de condutividade térmica obtido nas placas produzidas com CP II F 32, substituições de 0%, 15%, 25% e 50% de RCV aos 28 dias de hidratação.

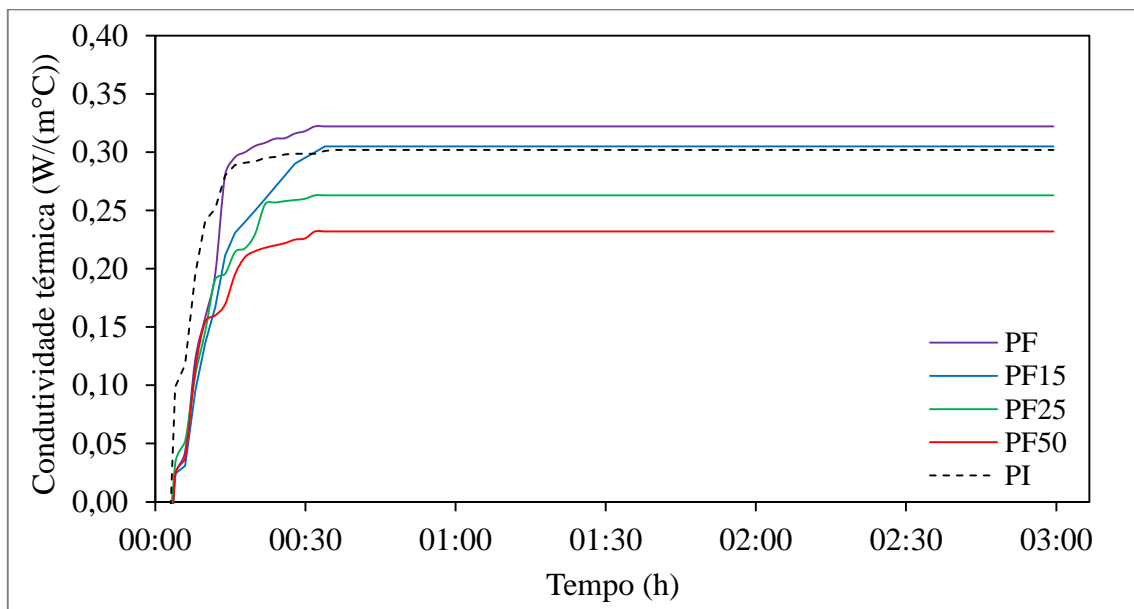


Figura 44 – Coeficiente de condutividade térmica para as amostras CP II F 32 e placa indústria, aos 28 dias de hidratação

Fonte: Autora (2018)

Conforme os resultados apresentados pelo Teste de comparação múltipla de Dunn, Post-Hoc para Kruskal-Wallis (APÊNDICE C), todas as amostras são estatisticamente diferentes. As placas de fibrocimento PF25 e PF50 foram as que apresentaram os melhores resultados de

coeficiente de condutividade térmica, com valores médios de $0,25\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$, e $0,22\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$, respectivamente. O valor médio do coeficiente de condutividade térmica da placa referência PF foi de $0,30\text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$, 36,6% maior que a placa PF50, e 20% superior à placa PF25.

A medida que se eleva a porcentagem de RCV nas misturas com o cimento CP II F32, ocorre uma redução na densidade e também na condutividade térmica, bem como aumento na porosidade total. Assim, observa-se que a densidade e a porosidade tiveram forte influência no comportamento térmico das placas. Para Zeng *et al.*, (2018), estruturas altamente porosas e superfícies extremamente rugosas, indicam redução na condutividade térmica do material.

Alterações nas ligações entre as fibras e a matriz contendo resíduo aumentaram o volume de vazios, ocasionando poros fechados ou interconectados que dificultam a transferência de calor, além de contribuir na massa específica, formando placas com baixa densidade (FONGANG *et al.*, 2015).

A Figura 45 demonstra o comportamento em relação ao coeficiente de condutividade térmica ao longo de três horas para placas produzidas com CP V ARI, substituições de 0%, 15%, 25% e 50% de RCV aos 28 dias de hidratação.

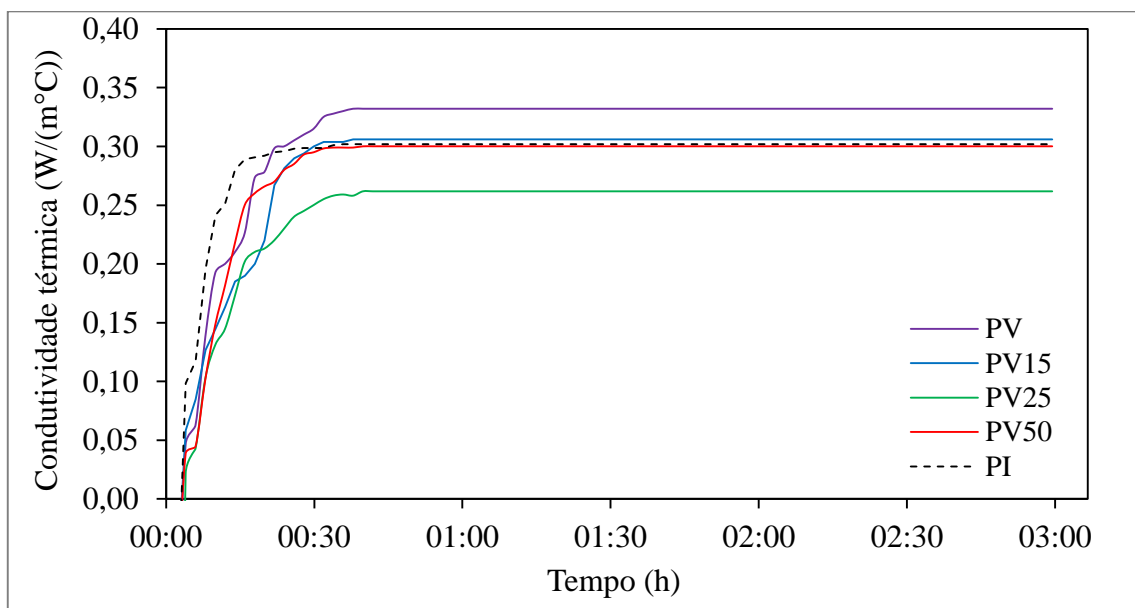


Figura 45 – Coeficiente de condutividade térmica para as amostras CP V ARI e placa indústria, aos 28 dias de hidratação
Fonte: Autora (2018)

As placas de fibrocimento produzidas com CP V ARI não apresentaram um comportamento linear em relação ao coeficiente de condutividade térmica, porém, o Teste estatístico de comparação múltipla de Dunn, Post-Hoc para Kruskal-Wallis (APÊNDICE C) confirma que há diferença significativa entre as misturas para um nível e significância de 95%.

A placa PV25 foi a que apresentou o menor coeficiente de condutividade térmica com 0,26 W/(m°C), dentre as misturas produzidas com cimento CP V ARI, seguida da placa PV50 com um coeficiente de 0,30 W/(m°C), sendo aproximadamente 21% e 9% menor que a placa referência PV, respectivamente.

Analisando os dados, onde a placa PV25 apresenta desempenho térmico superior à placa PV50, pode-se verificar que a quantidade, composição e finura do cimento, bem como quantidade e presença de adições, tem forte influência na porosidade e, por consequência no coeficiente de condutividade térmica de um material cimentício (ASADI *et al.*, 2018; KIM *et al.*, 2003; OLIVEIRA, 2012).

Observa-se que a redução na condutividade térmica das placas pode ser acompanhada por acréscimo na porosidade e por uma redução na densidade, decorrente da porosidade dos materiais constituintes, quanto pelos vazios existentes no interior da placa, sejam eles de ar incorporado, poros capilares e porosidade de gel.

4.5.1 Atraso térmico

Para avaliar o desempenho térmico das placas produzidas no programa experimental, foi verificado também o atraso térmico obtido no ensaio de condutividade térmica. Os resultados estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados dos ensaios do atraso térmico nas placas de fibrocimento

Tipo	ID	Atraso térmico (s)
		28 dias
CP II F 32	PF	720
	PF15	720
	PF25	600
	PF50	480
CP V ARI	PV	840
	PV15	720
	PV25	780
	PV50	600

Fonte: Autora (2018)

Pode-se observar uma tendência à redução no atraso térmico à medida que aumenta o percentual de resíduo nas amostras, visto que liberam calor mais rapidamente quando a temperatura começa a subir, no entanto, o calor liberado na superfície oposta a fonte de calor é menor. As placas PF25, PV25 e PF50 foram as que apresentaram os menores coeficientes de condutividade, assim como baixa inércia térmica, favorecendo o conforto térmico em altas temperaturas.

Martins (2018), explica que possuir menor inércia térmica pode ser positivo para uma região com clima predominantemente quente em grande parte do ano, ou para fachadas que recebem insolação direta, sendo que a baixa inércia térmica favorece a perda de calor da envoltória para o meio, reduzindo a transmitância de calor para o ambiente interno por períodos mais longos.

O uso de um material de alta ou baixa inércia térmica na envoltória de uma edificação dependerá da estratégia necessária para favorecer o conforto térmico, considerando o clima e as condições do entorno em que está inserida. Materiais com elevada inércia térmica podem transformar-se em acumuladores de calor, provocando desconforto térmico em períodos de altas temperaturas Akutsu (2009).

Conforme definido por Frota e Schiffer (2001), a inércia térmica está associada ao atraso da onda de calor e ao amortecimento térmico, devido ao aquecimento ou ao resfriamento dos materiais, que são dependentes dos componentes construtivos e das características térmicas do envolvente.

4.6 RESUMO DOS RESULTADOS

De forma geral, verifica-se que a condutividade térmica e o atraso térmico reduzem com o aumento da porosidade. A massa específica diminui conforme aumenta o percentual de resíduo, característico da substituição do cimento por RCV. Ao analisar a resistência mecânica à flexão, tem-se um comportamento estatisticamente igual, com um nível de confiança de 95% para todas as misturas. Considerando esses fatores, é possível afirmar que a substituição do cimento Portland por RCV contribui para melhorar o desempenho térmico das placas de fibrocimento, sem interferir significativamente na resistência a flexão. Um resumo dos resultados está apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Resumo dos resultados obtidos aos 28 dias de hidratação

ID	ABS (%)	Porosidade aparente (%)	Massa específica (g/cm³)	MOR – (MPa)	Porosidade BET (cc/g)	Condutividade térmica (W/m^oC)	Atraso térmico (s)
PF	24,80	36,10	1,53	8,56	0,034	0,32	720
PF15	25,93	37,99	1,40	8,38	0,041	0,30	720
PF25	30,98	42,14	1,35	7,50	0,051	0,25	600
PF50	33,47	42,24	1,19	6,36	0,076	0,23	480
PV	23,46	37,73	1,41	8,44	0,054	0,33	840
PV15	27,63	39,39	1,38	9,54	0,060	0,31	720
PV25	28,51	40,10	1,32	8,80	0,067	0,26	780
PV50	28,36	39,47	1,20	7,71	0,061	0,30	600

Fonte: Autora (2018)

A partir de pesquisas anteriores, Aliabdo, Abd-Elmoaty e Hassan (2014), citam como principais vantagens do uso de RCV como material alternativo na produção de materiais cimentícios a redução da densidade do material, menor consumo de matérias primas naturais e a adoção de uma abordagem ambientalmente correta. Entretanto, alguns obstáculos também podem ser apontados, como elevada porosidade, alta taxa de absorção e variação da qualidade do material em relação à durabilidade.

Para Zeng *et al.* (2018), os efeitos do isolamento térmico dos poros presentes em materiais à base de cimento são bastante complexos e podem estar relacionados a seus tamanhos, formas e distribuições, assim a análise da porosidade não pode caracterizar unicamente a condutividade térmica dos materiais, sendo necessário avaliar as demais propriedades físicas e químicas de um componente.

A NBR 15220-3 (ABNT, 2005), apresenta valores indicativos de condutividade térmica para placas de fibrocimento utilizadas em sistemas de fechamento vertical externo como *wood frame* e *stell frame*, para placas com densidade entre 1800 a 2200kg/m³, a condutividade térmica indicada é de 0,95W/(m.K), no entanto para densidade entre 1400 a 1800kg/m³, a condutividade térmica apresentada é de 0,65W/(m.K).

Observa-se que os valores de condutividade térmica apresentados pelas placas analisadas neste estudo atendem aos valores indicados na NBR 15220-3 (ABNT, 2005) para condutividade térmica em placas de fibrocimento com densidade entre 1400 a 1800 kg/m³ sendo de 0,65 W/(m.K).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo avaliar a influência da substituição parcial do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha moído na transferência de calor em placas de fibrocimento, com substituição do cimento CP II F 32 e CP V – ARI, por RCV, em percentuais que variam de 0% à 50%. Foram avaliadas as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais, bem como, o desempenho térmico, por meio do coeficiente de condutividade térmica e o atraso térmico das placas.

O RCV apresentou como principais componentes a sílica e o óxido de alumínio, seguido do óxido de ferro, características positivas do ponto de vista para uso como adição pozolânico ou substituição do cimento, por ser considerado um material compatível com a composição química de outros materiais utilizados para a mesma finalidade.

Pode-se observar que ocorreu um aumento gradativo na absorção de água e na porosidade total, conforme o aumento no percentual de RCV. Por outro lado, a massa específica apresentou uma redução nos valores na mesma ordem. Esses resultados puderam ser observados tanto nas placas com CP II F 32, quanto nas amostras com CP V – ARI.

Nos ensaios de resistência mecânica a flexão, os valores encontrados para os dois tipos de cimento, considerando todos os percentuais de substituição do cimento por RCV, foram muito próximos, sendo considerados sem diferença significativa para um nível de significância de 95%. No entanto, é importante evidenciar que apesar de estatisticamente os valores serem iguais a média apresentada nas placas com 15% e 25% de RCV, com CP V – ARI, são maiores que a amostra referência (PV).

Neste estudo, a análise comparativa entre as médias do coeficiente de condutividade térmica das placas de fibrocimento mostrou por meio dos testes estatísticos que há diferença significativa entre os resultados para um nível de significância de 95%. As placas com substituição parcial do cimento por RCV, independente do tipo de cimento, apresentaram queda no coeficiente de condutividade térmica em relação a placas referência PF, PV e a placa comercial (PI). Entretanto, as placas que apresentaram melhores níveis de coeficiente de condutividade térmica foram as com teores de 25% e 50% de RCV.

Ao associar os resultados das análises de resistência mecânica à flexão e condutividade térmica dentre todas as misturas, as placas PF25, PV25 e PF 50 podem ser consideradas as mais interessantes do ponto de vista de conforto térmico, assim como econômico.

O melhor resultado em relação ao coeficiente de condutividade térmica e o menor tempo de atraso térmico, foi observado na mistura PF50, utilizando-se do CP II F 32, com teor de 50%

de RCV. Confirmando assim que, o resíduo de cerâmica vermelha utilizado pode influenciar positivamente no desempenho térmico das placas de fibrocimento, sendo mais significativo em teores de 50%, e principalmente no uso do cimento com adição de fíler calcário.

Por meio dos resultados obtidos, foi possível perceber que as placas de fibrocimento produzidas com CP II F 32 e CP V – ARI, com teores de substituição do cimento por RCV de 25% e 50% são menos densas e possuem maior índice de vazios, favorecendo o isolamento térmico, confirmando assim, que a densidade do material possui uma forte relação com desempenho térmico.

Assim, as placas de fibrocimento com substituição parcial do cimento Portland por RCV, poderiam perfeitamente gerar produtos de larga aplicação na construção civil, contribuindo com a maior eficiência energética, porém, como o objetivo é aplicação externa na envoltória das edificações, estudos a respeito da durabilidade devem ser conduzidos em relação a questões de durabilidade, que não foram temas desse trabalho.

REFERÊNCIAS

ABDELLI, K. *et al.* Influence of the pozzolanic reactivity of the Blast Furnace Slag (BFS) and metakaolin on mortars. **Energy Procedia**, v. 139, p. 224–229, 2017.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil. Série Sustentabilidade**. 5° ed. Blucher. São Paulo, 2011.

AGUIAR, A. S. DE. **Estudos das propriedades físicas e mecânicas de placas cimentícias reforçadas com fibras longas de malva**. 2016. 108f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2016.

AKUTSU, M.; BRITO, A. C. DE; AQUILINO, M. DE M.; FILHO, A. DOS R.; SILVA, W. S. DA. O efeito da inércia térmica de paredes no desempenho térmico de edificações escolares. **XII ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no ambiente Construído e VIII ELACAC - Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído**, , n. November 2015, 2013.

ALIABDO, A. A.; ABD-ELMOATY, A. E. M.; HASSAN, H. H. Utilization of crushed clay brick in concrete industry. **Alexandria Engineering Journal**, v. 53, n. 1, p. 151–168, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) **C 948-81**. Test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. West Conshohocken (PA, USA); 1981.

ANGULSKI DA LUZ, C. *et al.* Estudo de um cimento com baixo impacto ambiental (BIA) a partir do clínquer sulfoaluminoso e do fosfogesso. **Ambiente Construído**, v. 5, n. 4, p. 7–27, 2005.

ANJOS, M. A. S. DOS. **Compósito à base de cimento reforçado com polpa de bambu - Caracterização física, mecânica e microestrutural**. 2002.96f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

ANJOS, M. A. S. DOS; GHAVAMI, K.; BARBOSA, N. P. Compósitos à base de cimento reforçado com polpa celulósica de bambu. Parte II: Uso de resíduos cerâmicos na matriz. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 346–349, 2003a.

ANJOS, M. A. S. DOS; GHAVAMI, K.; BARBOSA, N. P. Compósitos à base de cimento reforçados com polpa celulósica de bambu. Parte I: Determinação do teor de reforço ótimo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi**, v. 7, n. 2, p. 339–345, 2003b.

ANSI/ASHRAE - STANDARD 55. **Thermal Environment Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, 2004.

ANSI/ASHRAE - STANDARD 90.1-2013. **Determination of Energy Savings : Quantitative Analysis**. Washington, 2014.

ARAÚJO, R. A. **Influência da utilização de resíduo de cerâmica vermelha nas propriedades de argamassas mistas**. 2017. 95 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

ARCARO, S. *et al.* Thermal insulators produced from industrial solid wastes. **Cerâmica**, v. 62, p. 32–37, 2016.

ASADI, I. *et al.* Thermal conductivity of concrete – A review. **Journal of Building Engineering**, v. 20, p. 81–93, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA, (ABCERAM). **Anuário Brasileiro de Cerâmica**.ABS. São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5752** - Índice de atividade pozolânica. Rio de Janeiro, 2014.

_____.**NBR 10004**. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____.**NBR 12653** – Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

_____.**NBR 15220**. Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

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

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

_____.**NBR 15498**. Placa de fibrocimento sem amianto. Rio de Janeiro, 2016.

_____.**NBR 15575 -1**. Edificações habitacionais — desempenho Parte 1 : Requisitos gerais prefácio.Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2013.

_____.**NBR 15900**. Água para amassamento do concreto - Requisitos.Rio de Janeiro, 2009.

_____.**NBR 16372**. Cimento Portland e outros materiais em Pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA - ANICER. **Relatório Anual**. Rio de Janeiro. 2015.

AZEVEDO, A. R. G. DE. **Desenvolvimento de placas cimentícias reforçadas com incorporação do lodo primário da indústria de papel de celulose**. 2018. 168 f. Tese (Doutorado) - Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2018.

BARROSO, T. R. **Estudo da atividade pozolânica e da aplicação em concreto de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar com diferentes características físico- químicas**. 2011. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de engenharia Civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2011.

BERALDO, A. L.; SHIROMA, L.; FERREIRA, G. C. S. Compósito de cimento Portland com adição de resíduos de isoladores de porcelana e de Pinus. **Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis**, p. 69–77, 2014.

BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7º ed. [Tradução Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa]. Rio de Janeiro: LTC. 2014. Cap. 1 e 2, pag. 15 à 216.: [s.n.].

BETIOLI, A. M.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Equipamento para produção de placas de fibrocimento em laboratório. **1º Seminário de Pesquisa, Extensão e Inovação do IF-SC**, v. 1, p. 64–66, 2011.

BEZERRA, L. A. C. **Análise do desempenho térmico de sistema construtivo de concreto com EPS como agregado graúdo**. 2003. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

BOABAID, C. N. **Área técnica de refrigeração e condicionamento de ar: Transferência de calor (TCL)**. Instituto Federal de Santa Catarina. V. I – Parte 3. São José, 2010.

BORGES, J. C. DA S. **Compósito de poliuretano de mamona e vermiculita para isolamento térmico**, 2009. 80f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2009.

CALDAS E SILVA, A. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**. 2002. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CALDAS E SILVA, A.; SAVASTANO JR, H.; JOHN, V. M. Envelhecimento de compósitos à base de escória de alto-forno reforçados com polpa celulósica residual de eucalipto. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 25–44, 2009.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 1º ed. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2011.

CAMPELLO, E. D. F. **Comportamento mecânico de argamassas reforçadas por fibras sintéticas e metálicas**. 2013. 168 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

CARVALHO, J. **Estudo comparativo entre fachadas em alvenaria de bloco cerâmico revestidas com argamassa e fachadas executadas com placas**. 2015. 86 f. Projeto (Graduação) - Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

CASTRO, A. L. *et al.* Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 63, p. 65–76, 2017.

CASTRO, R. P. M. DE. **Análise macroscópica do efeito da adição de nanocerâmica ao concreto**. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Pós Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

CHEN, X. *et al.* Compressive behavior and microstructural properties of tailings polypropylene fibre-reinforced cemented paste backfill. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 211–221, 2018.

CINTRA, L. B. **Avaliação de propriedades térmicas de concreto com ar incorporado**. 2017. 143 f. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia., 2017.

CRASTO, R. C. M. DE. **Arquitetura e tecnologia em sistemas construtivos industrializados: Light Steel Framing**. 2005. 231f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós- Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

DEDAVID, A. B.; GOMES, I. C.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras: Materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. EDIPUCRS, Porto Alegre, 2007. 60 p.

DIAS, C. M. R. **Fibrocimentos com gradação funcional**. 2011. 173 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

DOBIAS, D.; POKORNY, P. Influence of Partial Replacement of Hydraulic Binder by Ground Brick on the Characteristics of Composites. **Procedia Engineering**, v. 190, p. 568–574, 2017.

EL-DIADAMONY, H. *et al.* Hydration and characteristics of metakaolin pozzolanic cement pastes. **HBRC Journal**, v. 14, n. 2, p. 150–158, 2016.

EL-GAMAL, S. M. A. *et al.* Ceramic waste as an efficient material for enhancing the fire resistance and mechanical properties of hardened Portland cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 1062–1078, 2017.

ESCOLA ENGENHARIA. Acesso em: 15 de janeiro de 2019. Disponível em: www.escolaengenharia.com.br/steel-frame/.

EVERETT, D. H. Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units. **Pure and Applied chemistry**, v. 31, p. 579–638. 585–586 p., 1972.

FALLIS, A. . **Manual de Conforto Térmico**. 5 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.: [s.n.]. v. 53

FERREIRA, R. L. DA S. **Identificação e disposição final dos resíduos sólidos gerados na fabricação de cerâmica vermelha no vale do ASSÚ/RN**. 2012. 66f. Projeto (Graduação) - Departamento de Ciências Exatas, Tecnológicas e Humanas - DCETH. Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA. Angicos, 2012.

FONGANG, R. T. T. et al. Cleaner production of the lightweight insulating composites: Microstructure, pore network and thermal conductivity. **Energy and Buildings**, v. 107, p. 113–122, 2015.

FONTENELLE, J. H. **Sistema de fixação e juntas em vedações verticais constituídas por placas cimentícias: Estado da arte, desenvolvimento de um sistema e avaliação experimental**. 2012. 219 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 5 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GALVÃO, Á. C. P. **Obtenção e caracterização de um compósito de Poliuretano de mamona e pó de vidro para aplicações em isolantes térmicos**. 2014. p. 72. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2014.

GARCIA, E. *et al.* Resíduo de cerâmica vermelha (RCV): Uma alternativa como material pozolânico. **Cerâmica Industrial**, n. JANUARY 2014, p. 31–38, 2014.

GHAVAMI, K.; TOLEDO FILHO, R. D.; BARBOSA, N. P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, n. 1, p. 39–48, 1999.

GOMES, E. G. S. **Desempenho térmico de alvenarias: uma alternativa com o uso de blocos EVA**. 2015. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

GONÇALVES, J. P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental e contendo argila calcinada e areia artificial**. 2005. 292 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE 1. Rio de Janeiro, 2005.

GONÇALVES, J. P. *et al.* Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1971–1979, 2009.

HANSEN, D. M. *et al.* **Aplicação De Resíduo Cerâmico Calcinado Como Pozolana : Application of Calcined Ceramic Waste As Pozzolan : a Review**. 6º Forum internacional de resíduos sólidos. **Anais...São José dos Campus, SP: 2015**

HASSE, J. A. *et al.* Influência do uso de adição de fíler cerâmico de resíduos de construção e demolição em concretos auto adensável. **In: 59 Congresso Brasileiro do Concreto (Ibracon)**, v. 59, p. São Paulo: IBRACON, 2017.

IKAI, S. *et al.* Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 2, p. 171–180, 2010.

INCROPERA, F. P. ET AL. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6° ed. Editora LTC. Rio de Janeiro. 2007.

JAMIL, M.; KHAN, M. N. N.; KARIM, M. R.; KAISH, A. B. M. A.; ZAIN, M. F. M. Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 185–198, 2016. Elsevier Ltd.

JONES, R. M. **Mechanics of composite materials**. Taylor & Francis, Filadélfia, USA, 1999, 2 ed. p. 1 – 14.

KAW A. K. **Mechanics of Composite Materials**. Taylor & Francis Group. Filadélfia, USA, 2006. 2 ed. p. 2.

KIM, K.-H. *et al.* An experimental study on thermal conductivity of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 3, p. 363–371, 2003.

KUDER, K. G.; SHAH, S. P. Processing of high-performance fiber-reinforced cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 2, p. 181–186, 2010.

KUNITZ, P. E. **Otimização de processo Hatschek pelo uso de polímeros flocculantes na produção de fibrocimento**. 2017. 223 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

LAMBERTS, R.; DUARTE, V. C. P. **Desempenho térmico de edificações**. 7. ed. Apostila, ECV- 5161, Laboratório de Eficiência energética em Edificações, (UFSC), Florianópolis, 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2014.

LEITE, M. B.; MOLIN, D. D. Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D. **Sitientibus**, v. 26, n. 75, p. 111–130, 2002.

MARTINS, J. F. A. **Análise do desempenho térmico de placas à base de óxido de magnésio aplicadas no sistema Light Steel Frame**. 2018. p. 157. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. 1° ed. PINI. São Paulo, 1994.

MENDES, J. U. . **Desenvolvimento de um compósito biodegradável para isolamento térmico**. 2002. 141 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2002.

MENEZES, R. R. et al. Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 6, p. 795–801, 2009.

MILANEZ, A. **Caracterização de argilas do Polo Cerâmico de Prudentópolis/PR: estudo de viabilidade técnica para aplicação em revestimentos cerâmicos**. Programa de Iniciação Científica.

MINEROPAR. **Projeto Riquezas Minerais**. Cadastro industrial do estado do Paraná. FIEP, Curitiba, 2002.

MINEROPAR. **Formalização da indústria de cerâmica vermelha na região metropolitana de Curitiba e norte do Paraná**. Curitiba, 2007. 22 p.

MIRANDA, S. A. DE. **Desempenho térmico em dormitórios e consumo de energia elétrica residencial: Estudo de caso em Cuiabá- MT**. 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental. Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2011.

MURRAY, H. H. Applied Clay Mineralogy. In: **Developments in Clay Science**. 2° ed. ELSEVIER, Indiana, v. 2 p. 1–6, 2007.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. . ed. 2 ed. Ver. Atual. São Paulo. Pini, 1997.

NG, S.; JELLE, B. P.; STAEHLI, T. Calcined clays as binder for thermal insulating and structural aerogel incorporated mortar. *Cement and Concrete Composites*, v. 72, p. 213 e 221, 2016.

OLIVEIRA, W. L. *et al.* Determinação do coeficiente de condutividade térmica de compósitos constituídos a partir da fibra de coco. **VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Porto Alegre**, p. 1–10, 2015.

OLIVEIRA, A. D. N. **Estudo da substituição parcial do cimento Portland por resíduos de cerâmica vermelha**. 2012. 50 f. Monografia: Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas. Universidade Federal Rural do Semi - Árido – UFERSA. Mossoró - RN, 2012.

OLIVEIRA, M. P. **Materiais compósitos à base de gesso contendo EVA (etileno acetato de vanila) e vermiculita: Otimização de mistura e propriedades termomecânicas**. 2009. 124 f. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba João Pessoa, 2009.

ORDENES, M.; LAMBERTS, R.; GUTHS, S. **Transferência de calor na envolvente da edificação**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC/UFSC. Florianópolis, 2008.

OZISIK, M. N. **Heat Conduction**. cap.12 p. 436 - 452:

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 832–838, 2010.

PAIXÃO, C. A. B. **Utilização de refugos de revestimentos cerâmicos (porcelanato e azulejo) em substituição à areia em argamassas cimentícias.** 2011. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; CASTRO-GOMES, J. P.; SANTOS, P. M. S. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 197–203, 2012.

RAVAL, A. D.; PATEL, I. N.; PITRODA, J. Stone waste: Effective replacement of cement for establishing green concrete. **International journal of innovative technology & exploring engineering**, v. 2, n. 5, p. 24–27, 2013.

RIBAS, R. A. J. **Método para avaliação do desempenho térmico e acústico de edificações aplicado em painéis de fechamento industrializados.** 2013. 222 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

RIBEIRO, U. G.; VASCONCELOS, R. P. DE. Estudo de propriedades térmicas e mecânicas de compósitos cimentícios produzidos com resíduos da indústria madeireira de Porto Velho. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 4, 2018.

RICHARD, Y. **Study of some physical properties of composition of kaolin in clay: a comparative study on Asamang and Agona clay.** 2015. 159 f. Thesis (Masters) - Department of Physics, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, College of Science, Kumasi, 2015.

RODRIGUES, C. D. S. **Efeito da adição de cinza de casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu.** 2004. 265 f. (Doutorado) em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro. 2004. 10 - 60 p.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement & Concrete Composites**, v. 23, p. 441–454, 2001.

SAIDI, M. et al. Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 566–577, 2018.

SANTIAGO, P. Fachadas inteligentes e bioclimática. Metáfora orgânica. **Revista da Faculdade de Ciência e Tecnologia**, n. 4, p. 38–47, 2007.

SANTOS, D. O. J.; FONTES, C. M. A.; LIMA, P. R. L. Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal. **Revista Materia**, v. 22, n. 1, p. 1694–1709, 2017

SANTOS, P. DE S. Ciência e tecnologia de argilas. In: BLÜCHER, E. (Ed.). . 2. ed. São Paulo, 1989, p. 397.

SAVASTANO, H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 5, p. 379–384, 2000.

SERRANO, A. et al. Study on the technical feasibility of replacing glass fibers by old newspaper recycled fibers as polypropylene reinforcement. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 489–496, 2014.

SILVA, A. DA R. **Estudo térmico e de materiais na construção de casas populares com blocos confeccionados a partir de um composto a base de cimento, gesso, EPS e raspa de pneu**. 2010. p. 92. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

SILVA, J.; BRITO, J. DE; VEIGA, R. Incorporation of fine ceramics in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 556–564, 2009.

SOARES, I. M. **Produção e caracterização de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibra de rami para fins de reforço estrutural**. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2012.

SOARES, N. *et al.* Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, n. March 2016, p. 194–209, 2017.

SOUZA, R. B. DE et al. Influência das variáveis atmosféricas na degradação dos materiais da construção civil. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Goiânia**, v. 13, n. 1, p. 1–19, 2016.

STROEVEN, P.; HU, J. Gradient structures in cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 4, p. 313–323, 2007.

SULLCAHUAMÁN, J. A. et al. Materiales compuestos de semento, papel reciclado, quitosano y refuerzo de fibras de sisal quimicamente modificadas. **8º congreso iberoamericano de ingeniería mecánica**, 2007.

TASDEMIR, C.; SENGUL, O.; TASDEMIR, M. A. A comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes. **Energy and Buildings**, v. 151, p. 469–475, 2017.

TIRONI, A. *et al.* Incorporation of Calcined Clays in Mortars: Porous Structure and Compressive Strength. **Procedia Materials Science**, v. 1, p. 366–373, 2012.

TIRONI, A. *et al.* Blended Cements Elaborated with Kaolinitic Calcined Clays. **Procedia Materials Science**, v. 8, p. 211–217, 2015.

TISKATINE, R. *et al.* Thermo-physical analysis of low-cost ecological composites for building construction. **Journal of Building Engineering**, v. 20, p. 762–775, 2018.

TOLEDO FILHO, R.D. GONÇALVES, J. P.; AMERICANO, B. B.; FAIRBAIN, E. M. R. Potential for use of crushed waste calcined clay brick as supplementary cementitious material in Brazil. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 1357–1365, 2007.

URREA-CEFERINO, G. E. **Accelerated carbonation: A study of the parameters, mineral**

additions effect, type cellulosic pulp and durability in fiber-cement. 2016. 147 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

URREA-CEFERINO, G. E. *et al.* Definition of optimal parameters for supercritical carbonation treatment of vegetable fiber-cement composites at a very early age. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 424–433, 2017.

VIEIRA, C. M. F.; DE SOUZA, E. T. A.; MONTEIRO, S. N. Efeito da incorporação de chamote no processamento e microestrutura de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 50, p. 254–260, 2004.

VIEIRA, C. M. F.; TEIXEIRA, S. S.; MONTEIRO, S. N. Efeito da temperatura de queima nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha contendo chamote. **Cerâmica**, v. 55, n. 335, p. 332–336, 2009.

VIVALDINI, D. O. *et al.* Revisão: Fundamentos e materiais para o projeto da microestrutura de isolantes térmicos refratários de alto desempenho. **Cerâmica**, v. 60, n. 354, p. 297–309, 2014.

XU, Y.; CHUNG, D. D. L. Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 1, p. 59–61, 2000.

ZACCARON, A. *et al.* Incorporação de Chamote na Massa de Cerâmica Vermelha como Valorização do Resíduo. **Cerâmica Industrial**, p. 33–39, 2014.

ZENG, Q. *et al.* Thermally insulating lightweight cement-based composites incorporating glass beads and nano-silica aerogels for sustainably energy-saving buildings. **Energy and Buildings**, v. 174, p. 97–110, 2018.

ZHANG, L. *et al.* Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 504–511, 2017.

APÊNDICE A

O APÊNDICE A apresenta os valores de absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente das placas produzidas com CP II F 32, CP V ARI para a idade de 28 dias de hidratação. Assim como o tratamento estatísticos dos dados.

Tabela 19 - Absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente placas CP II F 32

ID	Volume CP (cm ³)	M. Saturada superfície seca (Msss) (g)	Massa imersa (Mi) (g)	Massa Seca Ms (g)	Absorção de água (%)			Porosidade aparente (%)			Densidade aparente (g/cm ³)		
					Individual	Média	Desvio Padrão	Individual	Média	Desvio Padrão	Individual	Média	Desvio Padrão
PF	19,10	34,86	15,63	28,07	24,19			35,31			1,47		
	19,86	36,17	16,80	28,98	24,81			37,12			1,46		
	19,10	38,90	17,84	31,01	25,44	24,80	0,43	37,46	36,10	0,98	1,62	1,53	0,09
	19,48	38,47	17,44	30,90	24,50			36,00			1,59		
	19,10	34,02	14,95	27,22	24,98			35,66			1,43		
	19,48	39,33	16,97	31,49	24,90			35,06			1,62		
PF15	20,00	34,78	15,75	27,47	26,61			38,41			1,37		
	20,26	35,21	15,90	27,74	26,93			38,68			1,37		
	20,22	34,41	15,81	27,33	25,91	25,93	0,78	38,06	37,99	0,58	1,35	1,40	0,04
	18,15	33,23	15,41	26,54	25,21			37,54			1,46		
	19,83	35,30	16,18	28,01	26,03			38,13			1,41		

	18,74	33,60	15,54	26,90	24,91			37,10			1,44		
	16,47	29	12	22	31,82			41,18			1,34		
	17,7	32,5	14,5	25	30,00			41,67			1,41		
PF25	15,5	29,5	13	22,5	31,11	30,98	0,82	42,42	42,14	0,95	1,45	1,35	0,07
	16,03	26	11,5	20	30,00			41,38			1,25		
	17,07	29,5	13	22,5	31,11			42,42			1,32		
	16,28	29	13	22	31,82			43,75			1,35		
	19,28	30,5	13	22,5	35,56			45,71			1,17		
	19,88	31,5	12,5	23,7	32,91			41,05			1,19		
PF50	20,16	31,5	13	23,8	32,35	33,47	1,32	41,62	42,24	1,98	1,18	1,19	0,02
	21,25	34	13,5	25,4	33,86			41,95			1,20		
	20,35	33	13	25	32,00			40,00			1,23		
	20,77	33	13,5	24,6	34,15			43,08			1,18		

Tabela 20- Absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente placas CP V ARI

ID	Volume CP (cm ³)	M. Saturada superfície seca (Msss) (g)	Massa imersa (Mi) (g)	Massa Seca Ms (g)	Absorção de água (%)			Porosidade aparente (%)			Densidade aparente (g/cm ³)		
					Individual	Média	Desvio Padrão	Individual	Média	Desvio Padrão	Individual	Média	Desvio Padrão
PV	20,94	36,5	18	29,5	23,73			37,84			1,41		
	19,63	34	16,5	27,5	23,64			37,14			1,40		
	19,43	33,5	17,5	27,5	21,82	23,46	1,02	37,50	37,73	1,07	1,42	1,41	0,02
	20,18	35	17	28	25,00			38,89			1,39		
	19,53	34,5	16,5	28	23,21			36,11			1,43		
	21,29	37	19	30	23,33			38,89			1,41		
PV15	17,03	29,84	13,31	23,09	29,23			40,83			1,36		
	17,11	30,09	13,57	23,45	28,32			40,19			1,37		
	19,93	35,16	16,00	27,78	26,57	27,63	1,06	38,52	39,39	0,97	1,39	1,38	0,01
	20,58	36,11	16,38	28,53	26,57			38,42			1,39		
	16,25	28,63	12,82	22,38	27,93			39,53			1,38		
	20,77	36,12	16,25	28,40	27,18			38,85			1,37		
PV25	21,60	36,80	16,30	28,60	28,67			40,00			1,32		
	20,51	34,35	15,45	26,65	28,89	28,51	0,62	40,74	40,10	0,62	1,30	1,32	0,03
	21,94	36,10	15,85	28,10	28,47			39,51			1,28		
	21,43	36,10	16,00	27,90	29,39			40,80			1,30		

	18,39	32,00	14,60	25,00	28,00			40,23			1,36		
	19,06	33,19	14,90	26,00	27,65			39,31			1,36		
	19,89	30,50	13,50	23,50	29,79			41,18			1,18		
	19,29	30,00	13,20	23,40	28,21			39,29			1,21		
PV50	17,81	28,50	12,50	22,30	27,80	28,36	1,14	38,75	39,47	1,16	1,25	1,20	0,04
	20,52	31,00	13,90	24,50	26,53			38,01			1,19		
	19,27	30,50	12,88	23,60	29,24			39,16			1,22		
	21,27	31,50	14,20	24,50	28,57			40,46			1,15		

APÊNDICE B

O APÊNDICE B apresenta os valores dos ensaios de resistência à flexão das placas com CP II F 32, CP V ARI e Placa comercial (PI). Assim como o tratamento estatísticos dos dados, por meio do teste Tukey.

Tabela 21 - Módulo de ruptura à flexão amostras CP II F 32, 7 e 28 dias de hidratação

ID	7 dias				28 dias			
	Resistência individual (Mpa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente variação	Resistência individual (Mpa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente variação
PF	7,56	7,39	0,64	0,09	8,23	8,56	0,65	0,08
	6,67				9,20			
	8,17				9,00			
	7,14				7,82			
	6,53				7,76			
PF15	7,05	7,00	0,39	0,06	8,76	8,38	1,22	0,15
	7,47				7,10			
	6,94				9,89			
	7,16				6,11			
	7,35				7,29			
PF25	6,63	6,87	0,47	0,07	7,67	7,50	1,16	0,15
	6,33				8,92			
	6,78				5,80			
	4,92				6,69			
	4,56				4,89			
PF50	5,75	5,50	0,99	0,18	8,04	6,36	1,34	0,21

Tabela 22 - Módulo de ruptura à flexão amostras CP V ARI, 7 e 28 dias de hidratação

ID	7 dias				28 dias			
	Resistência individual (Mpa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente variação	Resistência individual (Mpa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente variação
PV	6,97	7,93	1,56	0,20	10,49	8,44	1,44	0,17
	6,93				7,31			
	10,22				7,57			
	7,59				8,38			
	9,18				9,30			
PV15	9,93	8,38	1,42	0,17	8,64	9,54	0,98	0,10
	6,84				10,94			
	7,56				9,28			
	8,25				9,67			
	7,92				9,24			
PV25	8,41	7,69	1,03	0,13	6,67	8,80	1,43	0,16
	6,18				9,60			
	6,86				7,86			
	5,63				7,54			
	6,53				8,6			
PV50	6,7	6,43	0,55	0,09	7,54	7,61	0,90	0,12
	6,43				8,6			

Tabela 23 - Módulo de ruptura à flexão amostras placa indústria

ID	28 dias			
	Resistência individual (Mpa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente variação
PI	7,59	7,31	0,45	0,06
	7,17			
	7,75			
	6,74			

Tabela 24 - Teste de significância placas CP II F 32, 28 dias de hidratação

Teste de Significância para placas CP II F 32					
	df (Grau de liberdade)	SS (Soma dos Quadrados)	MS (Quadrado médio)	F	P
ID	3	12,21	4,071	3,228	0,061
Resíduos	12	15,13	1,261		

Tabela 25 - Teste de significância placas CP V ARI, 28 dias de hidratação

Teste de Significância para placas CP V ARI					
	df (Grau de liberdade)	SS (Soma dos Quadrados)	MS (Quadrado médio)	F	P
ID	3	7,732	2,577	1,747	0,211
Resíduos	12	17,702	1,475		

Tabela 26- Teste de significância placas CP II F 32, CP V ARI e PI, 28 dias de hidratação

Teste de Significância para placas CP II F 32, CP V ARI e PI					
	df (Grau de liberdade)	SS (Soma dos Quadrados)	MS (Quadrado médio)	F	P
ID	8	28,85	3,607	2,911	0,0177
Resíduos	27	33,45	1,239		

Tabela 27 - Teste Shapiro Wilk e teste de Levene's para as placas CP II F 32, CP V ARI e PI, 28 dias de hidratação

Idade (dias)	Teste de normalidade	Teste de homocedasticidade
	P	P
28	0,9754	0,9178

Tabela 28 - Teste Tukey para as placas com CP II F 32, CP V-ARI e PI, 28 dias de hidratação

Teste Tukey HSD; variável placas CP II F 32, CP V-ARI e PI			
ID	P	ID	p
PF -PF15F	0,9999	PV15-PF25	0,2345
PF - PF25	0,9053	PV25-PF25	0,7705
PF -PF50	0,1601	PV50-PF25	1,0000
PF -PI	0,8027	PI-PF50	0,9456
PF -PV	1,0000	PV-PF50	0,2145
PF - PV15	0,9392	PV15-PF50	0,0099
PF -PV25	0,9999	PV25-PF50	0,0886
PF - PV50	0,9464	PV50-PF50	0,8001
PF25-PF15	0,9661	PV-PI	0,8765
PF50-PF15	0,2450	PV15-PI	0,1526
PI-PF15	0,9053	PV25-PI	0,6298
PV-PF15	1,0000	PV50-PI	0,9999
PV15-PF15	0,8563	PV15-PV	0,8878
PV25-PF15	0,9997	PV25-PV	0,9999
PV50-PF15	0,9848	PV50-PV	0,9760
PF50-PF25	0,8673	PV25-PV15	0,9877
PI-PF25	0,9999	PV50-PV15	0,2964
PV-PF25	0,9509	PV50-PV25	0,8418

APÊNDICE C

No APÊNDICE C, é apresentado o tratamento estatísticos dos dados referente ao ensaio do coeficiente de condutividade térmica. O teste utilizado foi de Kruskal-Wallis, Post-Hoc teste de comparação múltipla de Dunn.

Tabela 29 - Teste de significância placas CP II F 32, 28 dias de hidratação

Teste de Significância					
	df (Grau de liberdade)	SS (Soma dos Quadrados)	MS (Quadrado médio)	F	P
ID	3	0,3639	0,12129	699,2	0,0000000
Resíduos	299	0,0519	0,00017		

Tabela 30- Teste de Dunn para as placas com CP II F 32

Teste Post-Hoc para Kruskal-Wallis,
teste de comparação múltipla de Dunn,

PF - PF15	0,0023784
PF - PF25	0,0000000
PF - PF50	0,0000000
PF15-PF25	0,0000000
PF15-PF50	0,0000000
PF25-PF50	0,00000019

Tabela 31- Teste de significância placas CP V ARI, 28 dias de hidratação

Teste de Significância					
	df (Grau de liberdade)	SS (Soma dos Quadrados)	MS (Quadrado médio)	F	P
ID	3	0,20212	0,06737	388,3	0,0000000
Resíduos	299	0,05188	0,0017		

Tabela 32 - Teste de Dunn para as placas com CP V-ARI

Teste Post-Hoc para Kruskal-Wallis,
teste de comparação múltipla de Dunn,

PV - PV15	0,0000000
PV - PV25	0,0000000
PV - PV50	0,0000000
PV15-PV25	0,0000000
PV15-PV50	0,0138600
PV25-PV50	0,0000000

Tabela 33- Teste de significância placas CP II F 32, CP V-ARI e PI, 28 dias de hidratação

Teste de Significância

	df (Grau de liberdade)	SS (Soma dos Quadrados)	MS (Quadrado médio)	F	P
ID	8	0,6257	0,07822	411,7	0,0000000
Resíduos	673	0,1279	0,00019		

Tabela 34- Teste de Dunn para as placas com CP II F 32, CP V-ARI e PI

Teste Post-Hoc para Kruskal-Wallis,

teste de comparação múltipla de Dunn (1964),

variáveis placas CP II F 32, CP V-ARI e PI.

ID	p	ID	p
PF - PF15	0,0037583	PF50 - PV15	0,0000000
PF - PF25	0,0000000	PI - PV15	0,8160530
PF - PF50	0,0000000	PV - PV15	0,0000058
PF15-PF25	0,0000000	PF - PV25	0,0000000
PF15-PF50	0,0000000	PF15 - PV25	0,0000000
PF25-PF50	0,0003344	PF25 - PV25	1,0000000
PF - PI	0,0002339	PF50 - PV25	0,0017789
PF15 - PI	0,9416519	PI - PV25	0,0000000
PF25 - PI	0,0000000	PV - PV25	0,0000000
PF50 - PI	0,0000000	PV15 - PV25	0,0000000
PF - PV	0,2242840	PF - PV50	0,0000031
PV - PV15	0,0000002	PF15 - PV50	0,6485268
PV - PV25	0,0000000	PF25 - PV50	0,0000000
PV - PV50	0,0000000	PF50 - PV50	0,0000000
PV - PI	0,0000000	PI - PV50	1,0000000
PF - PV15	0,0327106	PV - PV50	0,0000000
PF15 - PV15	0,4993843	PV15 - PV50	0,1787324
PF25 - PV15	0,0000000	PV25 - PV50	0,0000000