

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

YASMIN ECCEL PETEREIT

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
EXTERNO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR
MATERIAIS RECICLADOS**

São Leopoldo

2020

YASMIN ECCEL PETEREIT

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
EXTERNO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR
MATERIAIS RECICLADOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González

São Leopoldo
2020

P479c Petereit, Yasmin Eccel.
Comportamento térmico de argamassas de revestimento externo com substituição parcial do agregado miúdo por materiais reciclados / por Yasmin Eccel Petereit. -- São Leopoldo, 2020.

114 f. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González, Escola Politécnica.

1.Argamassa – Propriedades térmicas. 2.Revestimentos – Propriedades térmicas. 3.Materiais de construção – Reaproveitamento. 4.Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 5.Resíduos como material de construção. 6.Materiais – Aspectos ambientais. I.González, Marco Aurélio Stumpf. II.Título.

CDU 691.53:66-97
693.625:66-97

Catálogo na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

YASMIN ECCEL PETEREIT

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
EXTERNO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR
MATERIAIS RECICLADOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 26 de março de 2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Rizzatti – PPGEC UFSM

Prof. Dr. Cláudio de Souza Kazmierczak – PPGEC UNISINOS

Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González – PPGEC UNISINOS

Dedico este trabalho à minha mãe, Rejane, pelo exemplo, incentivo e amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Rejane, pelo carinho, incentivo, exemplo e educação que me destes e por acreditar em minha capacidade acadêmica e profissional. Ao meu pai, Luiz Henrique (*In memoriam*), pelos ensinamentos que me proporcionou.

Aos meus avós maternos e paternos, por todo carinho compartilhado mesmo nos momentos de ausência.

Um agradecimento especial ao meu orientador Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González, pelo imenso conhecimento transpassado, pela paciência e disponibilidade de sempre esclarecer minhas dúvidas que surgiram ao longo do trabalho e pela amizade, no qual sempre irei ter como exemplo de profissional.

A equipe da Espaço 3 Arquitetura e a Sulflex, pelo fornecimento do resíduos utilizados na pesquisa.

Enfim, sou muito grata a todos que contribuíram na minha jornada acadêmica e neste trabalho.

RESUMO

O panorama do aumento crescente do consumo de energia nas edificações, escassez de recursos naturais e aumento da geração de resíduos alavancou a necessidade de elaboração de soluções sustentáveis no setor da construção civil. A incorporação de resíduos no revestimento argamassado externo indica benefícios no âmbito ambiental, reduzindo o consumo de recursos naturais, e permite a melhoria das propriedades térmicas de uma edificação, de forma a contribuir para o desempenho térmico das fachadas e o aumento da eficiência energética. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi avaliar o comportamento térmico de argamassas de revestimento externo com substituição parcial do agregado miúdo por materiais reciclados – polietileno expandido, couro e etileno acetato de vinila (EVA) – em relação ao desempenho térmico. Foram investigados alguns teores de resíduos (25, 50 e 75%). A avaliação das propriedades térmicas foi realizada através dos ensaios de calorimetria diferencial de varredura (DSC) e condutividade térmica (método cálculo ABNT NBR 15220-4:2005). Os resultados apontaram a redução da densidade das amostras de argamassa com resíduos, o que proporcionou uma condutividade térmica menor. No ensaio de DSC, pode-se observar que o valor de entalpia foi maior para as amostras com 50% de EVA e 75% de polietileno expandido em relação à argamassa de referência, resultando em maior isolamento térmico e menor condutividade térmica e calor específico. Considerando também outras propriedades da argamassa para revestimento externo, como resistência à compressão e tração na flexão, absorção por capilaridade – relacionada à impermeabilidade e certas patologias – e relação água/cimento, os resultados apontam no aumento ou similaridade de desempenho, perante à argamassa convencional, com a incorporação de resíduos de polietileno expandido dentre todos os teores e do EVA com 25% de incorporação.

Palavras-chave: Construção Civil. Resíduos. Argamassa de revestimento. Propriedades térmicas.

ABSTRACT

The growth in energy consumption in buildings, the scarcity of natural resources and the increase in waste production leveraged the need to develop sustainable solutions in the civil construction sector. The incorporation of waste in the external coating mortar indicates environmental benefits, reducing the consumption of natural resources, and allows the improvement of the thermal properties of a building, in order to contribute to the thermal performance of the facades and to increase energy efficiency. Thus, the objective of this study was to evaluate the thermal behavior of external coating mortars with partial replacement of fine aggregate by recycled materials – expanded polyethylene, leather and ethylene vinyl acetate (EVA) – towards the thermal performance. Waste contents of 25, 50 and 75% were investigated. The evaluation of thermal properties was carried out through the differential scanning calorimetry (DSC) and the thermal conductivity (ABNT NBR 15220-4: 2005 calculation method). The results showed a reduction in the density of the mortars with wastes, which provided a lower thermal conductivity. With the results of the DSC test, it can be seen that the enthalpy value was higher for samples with 50% of EVA and 75% of expanded polyethylene compared to the reference mortar, resulting in greater thermal insulation and less thermal conductivity and specific heat. Considering also other properties of the external coating mortar, such as compressive strength and flexural strength, absorption by capillarity – related to impermeability and certain pathologies – and water/cement ratio, the results point to an increase or similarity of performance in relation to the conventional mortar, with the incorporation of expanded polyethylene wastes among all contents and EVA with 25% of incorporation.

Key-words: Civil construction. Waste. Coating mortar. Thermal properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formas de controle climático a ser adotadas no projeto das edificações	30
Figura 2 – Amortecimento e atraso de uma construção com as curvas de variação interna e externa.....	31
Figura 3 – Relação entre o sistema econômico e o meio ambiente	35
Figura 4 – Ciclo do impacto da aquecimento global x eficiência energética das edificações	37
Figura 5 – Constituintes sólidos da argamassa: areia grossa, média e fina, cal, metacaulim e resíduo cerâmico.....	44
Figura 6 – Resíduos de borracha da recauchutagem de pneus de granulometria fina (a), média (b) e grossa (c).....	44
Figura 7 – Resíduo de palha de arroz fina (a), grossa (b) e casca de arroz (c)	45
Figura 8 – Areia natural (a), EPS triturado (b) e resíduos de lã de rocha/ lã de vidro/ vermiculita (c)	45
Figura 9 – Resíduo de vidro após processo de moagem e peneiramento	46
Figura 10 – Pellets de madeira antes da moagem	46
Figura 11 – Folhas de PVC expandidas (EPVC) e partículas de resíduo de EPVC..	47
Figura 12 – Equipamento λ -Meter EP500	49
Figura 13 – Quadrantes na face posterior de uma parede de concreto, com temperaturas de 45,2°C (REF), 39,3°C (E90L), 39,3°C (E80), e 37,6°C (E90) após cinco horas de aquecimento	50
Figura 14 – Equipamento ISOMET QTM 30 Quickline.....	51
Figura 15 – Fluxograma experimental.....	60
Figura 16 – Aglutinador Seibt AS 30/500	63
Figura 17 – Moinho de facas Marconi 580	63
Figura 18 - Resíduo de polietileno expandido (a) como foi recebido, (b) após a moagem no aglutinador e (c) após ser processado no moinho de facas	63
Figura 19 - Resíduo de EVA (a) como foi recebido, (b) após a moagem no aglutinador e (c) após ser processado no moinho de facas	64
Figura 20 - Resíduo de couro (a) como foi recebido, (b) após a moagem no aglutinador e (c) após ser processado no moinho de facas	65
Figura 21 – Moldes das argamassas para o ensaio térmico	72

Figura 22 - Calorímetro Diferencial de Varredura (Shimadzu modelo DSC-60)	75
Figura 23 - Sistema interior do DSC-60	75
Figura 24 – Método LFA	77
Figura 25 – Comportamento da argamassa C50	80
Figura 26 – Ensaio de índice de consistência argamassa EVA75	80
Figura 27 – Aspecto da ruptura da amostra de referência após o ensaio de resistência à tração na flexão	86

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados no Brasil	36
Gráfico 2 - Condutividade térmica das argamassas com resíduos	53
Gráfico 3 - Redução da condutividade térmica das argamassas com resíduos em relação à argamassa de referência	54
Gráfico 4 – Curva granulométrica dos agregados	67
Gráfico 5 – Curva granulométrica dos agregados a partir da peneira 1,19 mm	68
Gráfico 6 – Densidade de massa das argamassas no estado fresco.....	82
Gráfico 7 – Densidade de massa das argamassas conforme teores de resíduo	83
Gráfico 8 – Densidade de massa aparente das argamassas	84
Gráfico 9 – Resistência à compressão das amostras	85
Gráfico 10 – Resistência à tração na flexão das amostras	85
Gráfico 11 – Absorção de água por capilaridade das argamassas no intervalo de 10 e 90 minutos	87
Gráfico 12 – Coeficiente de capilaridade das argamassas	88
Gráfico 13 – Análise térmica DSC.....	89
Gráfico 14 – Entalpia das amostras através do DSC	89
Gráfico 15 – Calor específico das amostras.....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades de materiais isolantes.....	38
Quadro 2 - Estudos realizados de argamassas com incorporação de resíduos	47
Quadro 3 - Condutividade térmica e método utilizado das argamassas com incorporação de resíduos	52
Quadro 4 - Propriedades mecânicas das argamassas com incorporação de resíduos aos 28 dias	57
Quadro 5 - Caracterização química, física e mecânica do Cimento Portland CP II-Z classe 32	61
Quadro 6 - Caracterização química e física da Cal Hidráulica	61
Quadro 7 – Caracterização dos agregados.....	66
Quadro 8 – Dimensão máxima e módulo de finura dos agregados.....	68
Quadro 9 – Combinações das amostras de argamassas para o plano experimental	70
Quadro 10 – Dados obtidos no ensaio de consistência das amostras	79
Quadro 11 – Resultados condutividade, resistência e transmitância térmica	92

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CO ₂	Dióxido de carbono
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
EVA	Etileno Acetato de Vinila
ISO	Organização Internacional de Normalização
ittPerformance	Instituto Tecnológico em Desempenho da Construção Civil
LFA	Laser Flash Analysis
LMC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NR	Norma Regulamentadora
PPGEC	Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil
RCD	Resíduos de Construção e Demolição

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	24
1.2 OBJETIVOS	24
1.2.1 Objetivo Geral	24
1.2.2 Objetivos Específicos	24
1.3 JUSTIFICATIVA	24
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1 COMPORTAMENTO TÉRMICO	27
2.1.1 Fenômenos de Transmissão de Calor e Inércia Térmica	27
2.1.2 Conforto Térmico	32
2.1.3 Desempenho Térmico	33
2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS.....	34
2.2.1 Eficiência Energética e Materiais Isolantes Convencionais	36
2.2.2 Incorporação de Resíduos em Argamassas	40
2.2.3 Propriedades Térmicas e Mecânicas de Argamassas com Materiais Reciclados	43
2.2.3.1 Condutividade Térmica de Argamassas com Materiais Reciclados	49
2.2.3.2 Propriedades Mecânicas das Argamassas com Materiais Reciclados.....	55
3 MATERIAIS E MÉTODO	59
3.1 MATERIAIS	60
3.1.1 Aglomerantes	60
3.1.2 Agregado Miúdo Natural	62
3.1.3 Resíduo de Polietileno Expandido	62
3.1.4 Resíduo de EVA	64
3.1.5 Resíduo Couro	64
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	65
3.2.1 Massa Específica e Massa Unitária	65
3.2.2 Análise Granulométrica	66
3.3 MÉTODO DE ENSAIO	69
3.3.1 Produção das Argamassas	69
3.3.2 Ensaio no Estado Fresco	71
3.3.2.1 Índice de Consistência	71

3.3.2.2 Densidade de Massa	71
3.3.2 Moldagem dos Corpos de Prova	72
3.3.3 Ensaio no Estado Endurecido	73
3.3.3.1 Densidade de Massa Aparente.....	73
3.3.3.2 Resistência À Compressão e À Tração na Flexão.....	73
3.3.3.3 Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade	74
3.3.4 Ensaio Térmico	74
3.3.4.1 Ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura	75
3.3.4.2 Ensaio de Condutividade Térmica	77
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS NO ESTADO FRESCO.....	79
4.1.1 Índice de Consistência	79
4.1.2 Densidade de Massa.....	81
4.2 PROPRIEDADES FÍSICAS NO ESTADO ENDURECIDO	83
4.2.1 Densidade de Massa Aparente	83
4.2.2 Resistência À Compressão e À Tração na Flexão	84
4.2.3 Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade	87
4.2.4 Calorimetria Diferencial de Varredura.....	88
4.2.5 Condutividade Térmica	91
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
REFERÊNCIAS	99
APÊNDICE A – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS	107
APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS AMOSTRAS	109
APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À COMPREENSÃO DAS AMOSTRAS.....	111
APÊNDICE D – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE DAS AMOSTRAS	113

1 INTRODUÇÃO

O panorama do aumento crescente do consumo de energia, escassez de recursos naturais e o aumento da geração de resíduos alavancou a necessidade de elaboração de processos sustentáveis nos diversos setores produtivos. A sustentabilidade colabora para preservar o meio ambiente e garantir a disponibilidade de recursos naturais para gerações futuras, através de estratégias de otimização (DIAS, 2015).

Os resíduos são gerados a partir do descarte de produtos ou processos produtivos, como na indústria e na construção civil. O desenvolvimento da urbanização propiciou o aumento da quantidade de resíduos produzidos, tornando-se interessante o reaproveitamento destes como coprodutos. Por conseguinte, a reutilização e reciclagem de resíduos como estratégia de utilizá-las como matérias-primas é uma forma de destinação sustentável, que consequentemente ajuda à reduzir o consumo de recursos naturais (NASCIMENTO NETO, 2013).

Os requisitos de desempenho térmico para edificações habitacionais, diante da publicação da Norma de Desempenho (ABNT NBR 15.575:2013), direcionou a necessidade de projetar construções com premissas perante as condições de habitabilidade. Ademais, o conceito de eficiência energética está implícito ao desempenho, uma vez que o elevado consumo da energia elétrica no Brasil é consequência da busca do condicionamento térmico em edificações, sendo necessário tornar as construções mais eficientes e otimizadas. Destaca-se que as edificações, no setor residencial, são responsáveis por cerca de 24,6% do consumo total de energia elétrica no Brasil (MME, 2019).

Diante da busca pela sustentabilidade no setor da construção civil, algumas soluções de revestimento argamassado externo permitem a melhoria das propriedades térmicas de uma edificação, de forma a contribuir para o desempenho térmico das fachadas e o aumento da eficiência energética (WANG; SUN; YU, 2018).

Aliando estes três fatores – sustentabilidade, desempenho térmico e eficiência energética – idealizou-se soluções de revestimento externo utilizando materiais reciclados em substituição ao agregado miúdo, isso é, a areia, visando o aumento do potencial de isolamento térmico e sustentabilidade das argamassas.

A pesquisa desenvolvida visa avaliar a influência de argamassas de revestimento externo com a incorporação de resíduos de polietileno expandido, couro e EVA no desempenho térmico das edificações.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho delimita-se a estudar a contribuição da incorporação de resíduos para a melhoria das propriedades térmicas das argamassas para revestimento externo. O aumento do número de amostras nos ensaios e o ensaio de determinação da resistência de aderência à tração não foram realizados em virtude de demandar grande quantidade de resíduo moído e por que o equipamento para moagem dos materiais não era de propriedade da Unisinos, aumentando o custo deste processo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento térmico de argamassas de revestimento externo com substituição parcial do agregado miúdo por resíduos tendo em vista as propriedades térmicas.

1.2.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- a) caracterizar as argamassas com diferentes teores de substituição parcial do agregado miúdo por resíduos;
- b) determinar as propriedades térmicas das argamassas analisadas.

1.3 JUSTIFICATIVA

O Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) indicou uma projeção de crescimento médio anual de consumo de energia no Brasil, para o período de 2018-2022, de 3,9% (MME, 2018b). Dessa forma, medidas para minimizar a utilização de

condicionamento artificial de ar nas edificações, em função da busca por conforto térmico, necessitam ser exploradas.

Dentre os sistemas que mais afetam o conforto térmico e a eficiência energética, está a envoltória das edificações. A envoltória delimita a quantidade de energia necessária para aquecer ou resfriar um ambiente e, portanto, precisa ser otimizada para manter a carga de energia mínima para aquecimento e resfriamento. O impacto da envoltória de uma edificação no consumo de energia é relevante, uma vez que a energia de aquecimento e resfriamento dos ambientes representam globalmente mais de um terço de toda energia consumida em edifícios (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2013). Deste modo, sistemas construtivos com baixa condutividade térmica podem efetivamente reduzir a troca de calor entre o espaço interior de um edifício com o ambiente externo. Conforme Wang, Sun e Yu (2018), construir as envoltórias com novos materiais de propriedades térmicas diferentes seria uma nova forma para a aplicação de energias renováveis.

Ademais, conforme Yassine et al. (2018), a utilização de resíduos em substituição ao agregado miúdo natural colabora com a sustentabilidade e é uma aposta para a redução de desperdícios e reutilização como coproduto em diversos setores, uma vez que os resíduos são nocivos ao meio ambiente.

Alguns estudos vêm sendo desenvolvidos com esta proposta de melhoria do desempenho e utilização de resíduos em matrizes cimentícias. Dentre as pesquisas que investigaram o potencial térmico de argamassas com resíduos, destacam-se, por exemplo, a utilização de resíduos de EPS de alta densidade, resíduo de lã de rocha, lã de vidro e vermiculita, proveniente do processo de acabamento de materiais compósitos utilizados para isolamento térmico e acústico, resíduo de folhas de PVC expandidas, resíduo de vidro, subprodutos agrícolas – resíduos de casca e palha de arroz na argamassa – pellets de madeira, resíduos de borracha da recauchutagem de pneus, resíduos cerâmicos de construção (FONTES, 2013; PITEIRA, 2015; MONTEIRO, 2015; PASSOS et al., 2016; SILVA, 2017; SIKORA et al., 2017; LATROCH et al., 2018).

As argamassas de revestimento têm influência no comportamento térmico das edificações. A importância de estudos com o intuito de avaliar as características térmicas de argamassas com substituição do agregado miúdo por materiais reciclados é relevante para a contribuição para sustentabilidade por meio

da destinação destes resíduos e diminuição dos danos para o meio ambiente e para o aumento do desempenho térmico das edificações (WANG; SUN; YU, 2018).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo abrange o comportamento térmico das edificações, através de conceitos de fenômenos de transmissão e calor, inércia térmica e conforto e desempenho térmico. Ademais, é explanado pesquisas que incorporaram resíduos em argamassas a fim de avaliar as propriedades térmicas.

2.1 COMPORTAMENTO TÉRMICO

O comportamento térmico das edificações está relacionado às variáveis climáticas, aos mecanismos de trocas de calor e às propriedades térmicas dos materiais que compõem a edificação. A fim de que uma construção tenha bom conforto térmico e, conseqüentemente, baixo consumo energético, reduzindo o condicionamento artificial de ar, deve-se observar elementos de isolamento térmico, projetos arquitetônicos adequados e a perda e ganho de calor através das paredes e janelas.

Para compreender o comportamento térmico das edificações é importante rever os conceitos intrínsecos às respostas térmicas ambientais das edificações, bem como parâmetros de conforto e desempenho térmico.

2.1.1 Fenômenos de Transmissão de Calor e Inércia Térmica

O calor é uma forma de energia, sendo que a energia interna de um corpo é elevada no momento que absorve calor e aumenta sua temperatura. Os tipos mais comuns de energia térmica são: a energia cinética dos elétrons livres e a energia de vibração dos átomos em volta das posições médias na matéria. A condicional para que haja troca de calor entre corpos é que suas temperaturas sejam desiguais, sendo que o corpo mais quente transfere calor para o mais frio (MORAN, 2005).

A transmissão de calor é o principal mecanismo no qual os efeitos do meio ambiente são manifestados dentro das edificações. A condução de calor através de peles de vidro, transmissão de radiação solar através de janelas, e resfriamento por ventilação são alguns exemplos de como a transmissão de calor afeta o comportamento térmico de edificações (KREIDER; RABL, 1994).

Diante da diferença de temperatura entre duas regiões do espaço, esta tende a entrar em equilíbrio pela passagem de calor de uma região para outra, o conjunto de fenômenos que caracterizam essa passagem de calor é denominada de transmissão de calor. Existem três formas distintas de transmissão de calor: condução, convecção e radiação. Estes mecanismos detêm as características em comum da necessidade de uma diferença de temperatura entre dois corpos e o sentido do fluxo térmico ocorre sempre nas temperaturas decrescentes (COSTA, 2008).

A condução é definida como a “[...] passagem de calor de uma zona para outra de um mesmo corpo ou de corpos diversos em íntimo contato, devido ao movimento molecular dos mesmos, sem que se verifiquem deslocamentos materiais no corpo [...]” (COSTA, 2008, p. 66). Neste mecanismo existe uma forte relação entre a condutividade térmica e elétrica.

Conforme Frota e Schiffer (2001), na condução, a intensidade do fluxo térmico do mecanismo de troca é definida pela Equação 1 e obedece à Lei de Fourier.

$$q_{cd} = \frac{\lambda}{e} (\theta_e - \theta_i) \quad (1)$$

Sendo que:

q_{cd} – intensidade do fluxo térmico por condução (W/m²);

λ – coeficiente de condutividade térmica do material (W/m°C);

e – espessura da parede (m);

θ_e – temperatura da superfície externa da envolvente (°C);

θ_i – temperatura da superfície interna da envolvente (°C).

O coeficiente de condutividade térmica dos materiais é definido como:

[...] o fluxo de calor que passa, na unidade de tempo, através da unidade de área de uma parede com espessura unitária e dimensões suficientemente grandes para que fique eliminada a influência de contorno, quando se estabelece, entre os parâmetros dessa parede, uma diferença de temperatura unitária. (FROTA; SCHIFFER, 2001, p. 35).

Ainda segundo os autores, algumas propriedades que estão intrínsecas ao coeficiente de condutividade térmica dos materiais são:

- densidade, uma vez que a matéria é mais condutora que o ar compreendido em seus poros;

- natureza química, sendo que os materiais cristalinos são geralmente mais condutores que os materiais amorfos;
- umidade, em virtude da água ser melhor condutora que o ar.

Ademais, conforme a ABNT NBR 15.220-4:2005, para materiais homogêneos, a condutividade térmica é considerada como uma propriedade intrínseca dos materiais, isto é, não é afetada por uma mudança de gradiente de temperatura.

Assim como a Lei de Ohm explica a resistência elétrica, analogicamente, é utilizado o conceito de resistência térmica para simplificar os cálculos de transmissão de calor por condução em paredes compostas por várias camadas de materiais diferentes. Esta é definida pela Equação 2, sendo a propriedade do material em resistir à passagem de calor (COSTA, 2008; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

$$R_t = \frac{L}{\lambda} \quad (2)$$

Onde:

R_t – resistência térmica do elemento (m^2K/W);

λ – condutividade térmica do material (W/mK);

e – espessura do material (m).

Outra forma de transmissão de calor é a convecção, o qual é caracterizado quando um fluido (líquido ou gás) entra em contato com uma superfície em temperaturas diferentes. Este mecanismo está associado à passagem de calor de uma zona a outra de um fluido através do movimento das partículas, que por meio da diferença de temperatura e de densidade da massa fluida, provoca a diferença de pressão. Quanto maior a velocidade do fluxo do fluido, maior a taxa de transferência de calor por convecção (COSTA, 2008).

Existe dois tipos de fenômeno de convecção: natural ou forçada. A primeira é obtida através da diferença de densidade no fluido causada pelo contato entre a superfície. Já a convecção forçada ocorre quando uma força externa movimenta um fluido em uma superfície quente ou fria, em que a velocidade do fluido é maior do que na convecção natural (KREIDER; RABL, 1994).

O fenômeno da radiação é um dos principais determinantes do conforto térmico e troca de calor nos fechamentos das edificações. Frota e Schiffer (2001, p. 33) definem a radiação como:

[...] mecanismo de troca de calor entre dois corpos — que guardam entre si uma distância qualquer — através de sua capacidade de emitir e de absorver energia térmica. Esse mecanismo de troca é consequência da natureza eletromagnética da energia, que, ao ser absorvida, provoca efeitos térmicos, o que permite sua transmissão sem necessidade de meio para propagação, ocorrendo mesmo no vácuo.

A quantidade de calor trocada em unidade de tempo é definida como fluxo térmico, este depende das temperaturas, aspectos geométricos e físicos das superfícies e da emissividade térmica – a qual consiste na capacidade da superfície de emitir calor (COSTA, 2008).

A partir dos mecanismos de transmissão de calor, pode-se adotar estratégias bioclimáticas que devem ser consideradas no projeto da edificação, para que não haja desconforto por frio ou calor. A Figura 1 indica os objetivos de controle climático em períodos frios e quentes (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Figura 1 – Formas de controle climático a ser adotadas no projeto das edificações

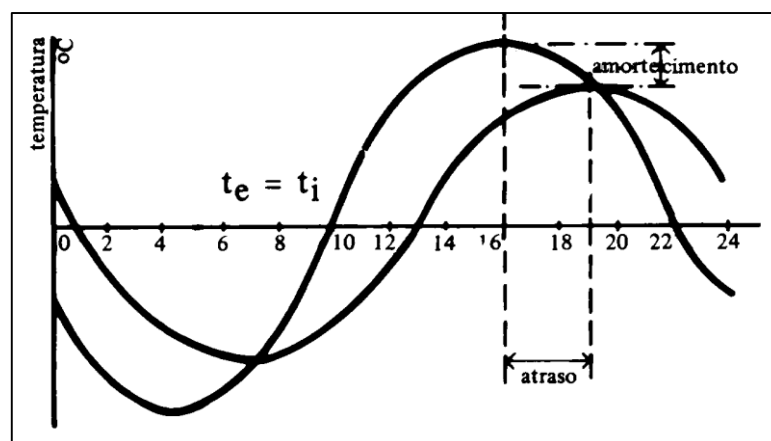
	CONDUÇÃO	CONVECÇÃO	RADIAÇÃO	EVAPORAÇÃO
INVERNO	Promover ganhos		Promover ganho de calor solar	
	Resistir às perdas	Minimizar fluxos de calor por condução	Minimizar fluxo de ar externo Minimizar infiltração de ar	
VERÃO	Resistir aos ganhos	Minimizar fluxos de calor por condução	Minimizar infiltração de ar	Minimizar ganho solar Promover resfriamento evaporativo
	Promover Perdas	Promover resfriamento através do solo	Promover ventilação	Promover resfriamento radiativo
	Fontes de calor	Atmosfera	Sol	
	Fontes de resfriamento	Solo	Atmosfera	Céu Atmosfera

Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2014).

Dois fenômenos importantes para o comportamento térmico das edificações estão associados à inércia térmica: o amortecimento e o atraso da onda de calor, em função do aquecimento ou resfriamentos dos materiais que compõe a construção. Assim, a inércia térmica depende das propriedades térmicas dos materiais que envolvem o edifício e seus componentes internos (FROTA; SCHIFFER, 2001).

O fluxo de calor que atravessa uma parede se comporta com atraso e amortecimento que impacta na temperatura de um recinto, conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Amortecimento e atraso de uma construção com as curvas de variação interna e externa



Fonte: Frota e Schiffer (2001).

Conforme Frota e Schiffer (2001, p. 48), “O atraso e o amortecimento, juntos, compõem a inércia térmica, a qual é função da densidade, da condutibilidade e da capacidade calorífica da parede.”. Esta capacidade calorífica é expressa através do calor específico, que constitui na “[...] quantidade de calor necessária para fazer elevar de uma unidade de temperatura, a sua unidade de massa (J/kg°C).” (FROTA; SCHIFFER, 2001, p. 48).

Costa (2008, p. 21) define que o valor do calor específico varia conforme a temperatura e as transformações que ocorrem num determinado intervalo de temperatura de acordo com a situação do material que deseja analisar:

O calor específico não é constante durante o aquecimento de um sistema. [...] este pode ser considerado como uma função linear da temperatura, de modo que o calor específico verdadeiro para um temperatura qualquer será dado por: $C = at + b$. Ao variar a temperatura de um sistema, o mesmo sofre variações de estado, efetuando uma transformação qualquer. A relação entre a quantidade de calor que entra em jogo durante a transformação e a variação de temperatura sofrida pelo sistema durante a mesma é o calor específico do sistema correspondente à transformação considerada. Podemos, assim, conceber uma série de calores específicos de transformações.

O calor específico dos materiais é uma propriedade intrínseca para a análise do comportamento dinâmico de edificações em *softwares* como o *EnergyPlus*. A massa específica aparente, a condutividade térmica e o calor específico compõem o

comportamento térmico dos materiais aplicados na construção e são determinantes para o atraso térmico e sua capacidade de reter calor.

Ademais, a inércia térmica depende da difusividade térmica do material, que é a velocidade de difusão do calor através de um material, assim pode-se avaliar o comportamento térmico de um material através da sua difusividade térmica – um material isolante possui difusividade menor – pois depende da condutividade térmica, massa específica aparente e calor específico do material, conforme mostra a Equação 3:

$$D = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (3)$$

Onde:

D – difusividade térmica do material (m^2/s);

λ – condutividade térmica do material ($W/m^{\circ}C$);

ρ – massa específica aparente do material (Kg/m^3);

c – calor específico do material ($J/Kg^{\circ}C$).

2.1.2 Conforto Térmico

O conceito de conforto térmico está associado a um estado subjetivo do indivíduo quanto a satisfação diante do ambiente térmico no qual se encontra. As trocas de calor entre o ambiente e o corpo humano devem ocorrer sem maior esforço para alcançar o bem estar térmico. No momento em que as condições térmicas manifestam sensações de frio ou calor, indica que o organismo está gastando energia para manter a homeotermia – isto é, a temperatura interna do corpo tende a permanecer constante (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; FROTA; SCHIFFER, 2001).

Para estabelecer um índice de conforto térmico, o qual permite projetar as edificações atendendo às exigências térmicas, deve-se levar em consideração as variáveis climáticas (temperatura do ar, temperatura radiante, umidade relativa, velocidade do vento), vestimentas e atividade física desenvolvida pelos indivíduos (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Conforme Frota e Schiffer (2001, p. 27), alguns índices de conforto térmico são classificados conforme a diferentes aspectos do conforto:

- índices biofísicos – que se baseiam nas trocas de calor entre o corpo e o ambiente, correlacionando os elementos do conforto com as trocas de calor que dão origem a esses elementos;
- índices fisiológicos – que se baseiam nas reações fisiológicas originadas por condições conhecidas de temperatura seca do ar, temperatura radiante média, umidade do ar e velocidade do ar;
- índices subjetivos – que se baseiam nas sensações subjetivas de conforto experimentadas em condições em que os elementos de conforto térmico variam.

A fim de avaliar este conceito subjetivo, pesquisadores desenvolveram métodos simplificados para quantificar e avaliar o conforto térmico das edificações. Dentre os principais índices de conforto térmico utilizados destacam-se: o voto médio predito (PMV), pesquisa de Humphreys, programa de análise e simulação de conforto térmico Analysis - CST, programa de cálculo do PMV da Macquarie University – Sydney, Comfort Calculator (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

2.1.3 Desempenho Térmico

O desempenho térmico das edificações pode ser verificado através da ABNT NBR 15220:2005, que estabelece o método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações, zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida e pelo método fluximétrico.

Segundo Frota e Schiffer (2001, p. 54), as variáveis climáticas que mais afetam o desempenho térmico das edificações são: “[...] a oscilação diária e anual da temperatura e umidade relativa, a quantidade de radiação solar incidente, o grau de nebulosidade do céu, a predominância de época e o sentido dos ventos e índices pluviométricos.”.

A fim de obter um bom desempenho térmico das edificações, na fase de projetos deve-se levar em conta o conhecimento do clima local e dados climáticos, principalmente as variáveis ambientais associadas ao conforto térmico, adoção de projeto arquitetônico seguindo as características em função do clima e uso do edifício, e por fim, a tomada de decisões quanto a especificações de materiais e demais soluções para melhorar o desempenho térmico (FROTA; SCHIFFER, 2001).

A ABNT NBR 15.575:2013 determina os requisitos mínimos de desempenho térmico que as edificações multifamiliares de até cinco pavimentos devem atender, considerando-se a zona bioclimática em que a edificação está inserida. Para a avaliação da adequação das construções a norma referida propõe dois procedimentos: o simplificado, em que os sistemas construtivos devem atender a ABNT NBR 15520-4 e ABNT NBR 15520-5 – nos casos em que transmitância e capacidade térmica atingirem resultados inferiores ao desempenho requerido, deve-se realizar a simulação computacional, através do software EnergyPlus, por exemplo, e analisar a edificação como um todo; ou o procedimento de medição em edificações ou construção de protótipos.

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

A Lei nº 12.305/2010, que institui a política nacional de resíduos sólidos, define resíduo sólido como o material, substância ou objeto descartado, resultante de atividades humanas, no estado sólido ou semissólido e que necessita de destinação final adequada, em função de sua natureza ou tecnologia disponível. Essa lei estabelece as diretrizes de gerenciamento de resíduos e classifica-os como:

Art. 13. Para os efeitos desta Lei, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação:

I - quanto à origem:

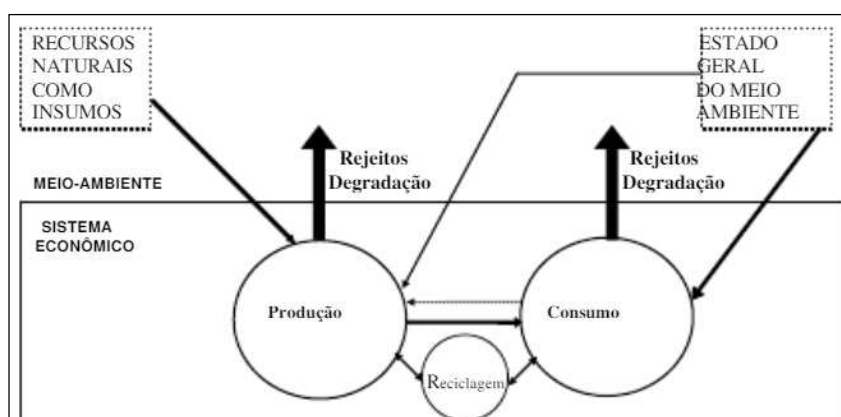
- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;

k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios; [...]. (BRASIL, 2010).

A preocupação com o gerenciamento de resíduos no Brasil iniciou a partir do século XX, entre 1940 e 1970, devido às altas taxas de crescimento demográfico e migração para as cidades, resultando em mais de 34 milhões de habitantes nas áreas urbanas, que não haviam infraestrutura de serviços públicos para acompanhar esta expansão (PHILLIPI JR.; AGUIAR, 2005 apud NASCIMENTO NETO, 2013).

A forma de degradação ambiental é afetada pelo estilo de desenvolvimento do país, de modo que este determina a distribuição da renda pelos diversos segmentos, refletindo na demanda e por conseguinte no nível de produção. Este desenvolvimento e demanda da sociedade caracteriza as tecnologias empregadas, a intensidade de uso da mão de obra, capital, tipos de recursos naturais empregados no processo de produção e, por fim, a natureza e quantidade de resíduos gerados. A Figura 3 ilustra como o estilo de desenvolvimento se reflete no meio ambiente, diante da demanda estabelecida pela sociedade, a economia organiza as atividades e aloca os recursos para produção de bens e serviços (MUELLER, 2012).

Figura 3 – Relação entre o sistema econômico e o meio ambiente

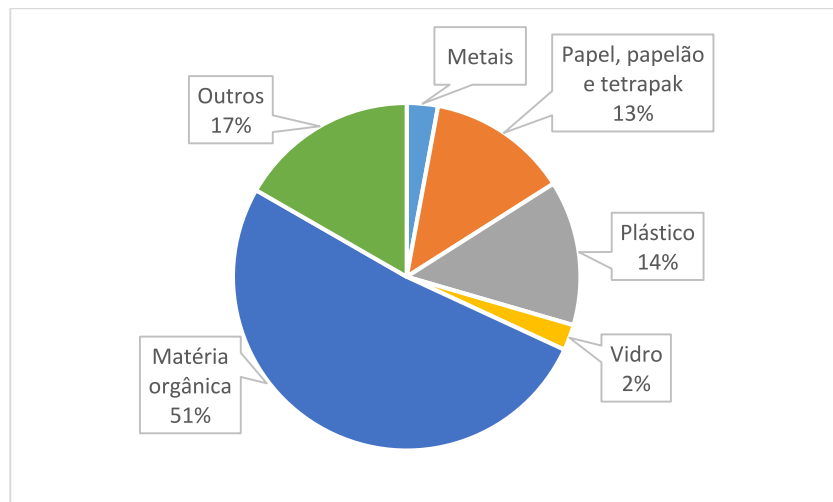


Fonte: Mueller (2012).

Perante a este quadro, técnicas de efetividade do uso de matérias-primas referem-se à diferentes conceitos que envolvem tanto materiais, quanto métodos de construção. Uma das estratégias é a utilização de materiais reciclados, estes são chamados também de *downcycled*, que podem ser incorporados na mesma aplicação ou para outros fins, como por exemplo, pneus de borracha podem ser reciclados para a geração de novos pneus ou transformados em agregados para incorporação na pavimentação asfáltica (KIBERT, 2013).

Para a avaliação do potencial de reciclagem dos resíduos sólidos gerados no Brasil, foi realizada a composição gravimétrica de resíduos coletados em 93 municípios brasileiros, analisados entre 1995 e 2008. A partir do Gráfico 1, verifica-se que 31,9% dos materiais coletados são recicláveis, com possibilidade de agregação para outras utilizações (IPEA, 2012).

Gráfico 1 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados no Brasil

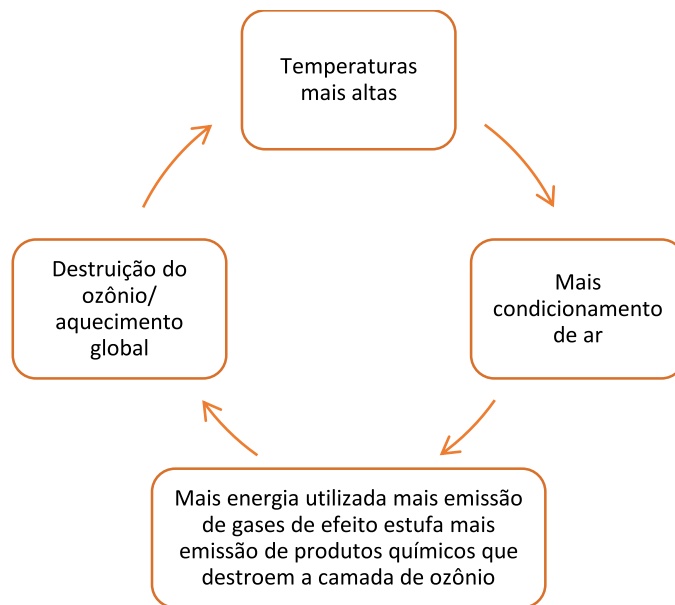


Fonte: IPEA (2012).

2.2.1 Eficiência Energética e Materiais Isolantes Convencionais

O panorama atual de escassez de recursos naturais, o aumento no número e na intensidade de enchentes e ciclones, as faltas de água e a fome que resulta das secas são alguns dos impactos relacionados às emissões de CO₂ (Figura 4). Dentre as formas de agir para reduzir estas emissões é através do setor das edificações, o qual pode efetivamente alcançar reduções rápidas. As residências são responsáveis por consumir cerca de 50% de toda energia utilizadas das edificações (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2014).

Figura 4 – Ciclo do impacto da aquecimento global x eficiência energética das edificações



Fonte: Roaf, Fuentes e Thomas (2014).

Conforme Roaf, Fuentes e Thomas (2014), a solução mais eficaz para tornar as edificações sustentáveis para o meio ambiente é melhorar a eficiência energética. Os sistemas mecânicos de condicionamento de ar é a principal fonte de gases das mudanças climáticas. Nos Estados Unidos mais de 40% da energia gerada é destinada em condicionamento de ar.

Durante a elaboração do projeto a primeira prioridade deveria ser reduzir ao máximo as necessidades de uso de energia, através de técnicas de conservação de energia e buscas sistemas de energia renováveis. O impacto dos materiais geralmente pode ser observado em um segundo momento (KIBERT, 2013).

O desempenho térmico e a eficiência energética são significativamente afetados pela envoltória das edificações. Estes parâmetros devem ser considerados como uma das diretrizes de projeto, visando a utilização de sistemas construtivos que permitam diminuir o consumo de energia para o condicionamento térmico das habitações (FROTA, 2001).

Existe uma ampla gama de materiais isolantes convencionais, o Quadro 1 aponta alguns deles. Para cada construção e aplicação devem ser avaliadas a função e as propriedades que o isolante deve atender para obter isolamento e durabilidade eficazes (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2014).

Quadro 1 – Propriedades de materiais isolantes

(continua)

Tipo de isolamento	Desempenho térmico	Resistência à umidade	Resistência mecânica	Propriedades químicas	Comportamento ao fogo
Isolamento com poliestireno expandido	0,033 W/mK	Não considerado como barreira de vapor. Baixa transmissão de vapor de água, sem ação capilar e muito pouco higroscópico	10% de resistência à compressão de 110–150 kPa.	Resistente a ácidos e álcalis diluídos. Não resistente a solventes orgânicos. Pode interagir quimicamente com membranas simples de PVC.	Funde e encolhe com pouco calor. Queima com fortes chamas e fumaça densa, quando exposto a uma grande fonte de calor.
Lã de rocha	0,034–0,036 W/mK	Não absorve umidade. Sob umidade relativa de 95%, o conteúdo higroscópico de água é de apenas 0,02% do volume, 2% do peso. Sem ação de capilaridade.	10% de resistência à compressão de 120–180 kPa.	Pode ser necessária uma chapa de isolamento quando instalada sob asfalto.	Não combustível até 2.000°C. O limite, na prática, é de 1.000°C, devido aos aditivos.
Vidro celular	0,042 W/mK	0,2% do volume. Sem ação de capilaridade.	Resistência média à compressão 600 kPa (87 psi).	Totalmente inorgânico. Pode liberar sulfeto de hidrogênio e CO em um incêndio.	Não combustível.
Celulose	0,033 W/mK	Não fornecida (supõe-se que seja extremamente e higroscópico)	Não fornecida (supõe-se que sua resistência mecânica seja baixa).	Tratado com sais inorgânicos para proteção contra fogo.	Suporta o calor direto de um maçarico.

Quadro 1 – Propriedades de materiais isolantes

(continuação)

Tipo de isolamento	Desempenho térmico	Resistência à umidade	Resistência mecânica	Propriedades químicas	Comportamento ao fogo
Sílica microporosa	0,020 W/mK	Absorve de 1–3% do seu peso em umidade.	Baixa resistência à tração. 5% da compressão pode ser inteiramente recuperada.	O teor de cloretos lixiviáveis é baixo, menos de 50 ppm. Teor de silicato lixiviável alto, maior que 1.500 ppm.	Não combustível. Não espalha chamas.
Lã de ovelha	0,037 W/mK	40% de absorção d'água (por peso seco) sob umidade relativa do ar de 100%.	Não fornecida (supõe-se que a resistência mecânica seja baixa).	Não mencionadas.	Ponto de ignição: 560°C. Resistência ao fogo classe B2.
Espuma de melamina flexível	0,035 W/mK	Sofre mudanças dimensionais significativas com o aumento da umidade interna, devido à sua estrutura celular aberta.	Espumas não têm resistência particularmente alta	Resiste a hidrólise, álcoois, hidrocarbonetos, à maioria dos solventes orgânicos e a ácidos e bases diluídos.	Pode resistir até 150°C sem redução de desempenho. Classe 1.
Cortiça	0,037 W/mK	Repelente à água, com capilaridade zero. Taxa de transmissão de vapor relativamente alta.	Resistente à compressão de até 20 kN/m ² sem deformação Resistência à flexão de 140 kN/m ² .	Não é afetada por água, álcalis e solventes orgânicos.	Não produz cianetos, cloretos ou outros gases tóxicos. Classe 1.

Quadro 1 – Propriedades de materiais isolantes

(conclusão)

Tipo de isolamento	Desempenho térmico	Resistência à umidade	Resistência mecânica	Propriedades químicas	Comportamento ao fogo
Manta de fibra de algodão reciclada	0,039 W/mK	Aumento de volume médio de 10% sob umidade relativa de 50–85%. Pode absorver e liberar umidade sem sofrer danos.	Baixa.	Não é tóxica.	Tratada com sais de boro. Euroclass E. Atende ao Código de Edificações britânico.
Tecido reciclado misto	Valor-R/pol; 2,8–5,5	Absorve água.	Baixa.	Não é tóxico.	Tratado com retardante natural de fogo.

Fonte: Adaptado de Roaf, Fuentes e Thomas (2014, p.44).

2.2.2 Incorporação de Resíduos em Argamassas

Dentre as estratégias para minimizar o impacto da geração de resíduos e escassez de recursos naturais, diversas pesquisas investigam a incorporação de materiais recicláveis em compósitos argamassados, a fim de aprimorar as propriedades mecânicas, termoacústicas, estanqueidade, durabilidade, entre outras. Neste item serão apresentados estudos que avaliaram o potencial de utilização de resíduos em argamassas e aborda a importância da sua destinação em vista da proporção de resíduos gerados.

Nos estudos de Heineck (2012), em que foi avaliado o comportamento de argamassas de revestimento com incorporação de resíduos reciclados de concreto submetido à cura convencional e à cura térmica à vapor, em substituição ao agregado miúdo natural, verificou-se a redução da resistência à compressão, o aumento da resistência à tração e da impermeabilidade. Estas propriedades observadas indicam que sua aplicação como revestimento externo é interessante, uma vez que sua impermeabilidade evita algumas manifestações patológicas. Ademais, a presença do resíduo diminuiu a densidade de massa no estado fresco e endurecido, devido à forma das partículas, com menor esfericidade e arredondamento, resultando em uma redução do empacotamento.

Outros resíduos investigados com sua incorporação em argamassas, em substituição parcial à areia, são a casca de arroz, contraforte termoplástico impregnado e compensado resinado. Além das propriedades mecânicas, Flach (2012) investigou o potencial acústico destes compósitos argamassados com resíduos e verificou que todas as amostras apresentaram coeficientes de absorção acústica superiores aos de referência, na ordem de destaque: casca de arroz, compensado resinado e contraforte termoplástico impregnado. Já para resistência à tração e à compressão, a ordem dos resultados superiores das argamassas com resíduo é inversa, isto é, a amostra com resíduo de contraforte apresentou as maiores resistências, seguido do compensado e casca de arroz.

Ademais, a incorporação de resíduos é investigada em argamassas para contrapiso. Borges (2015) utilizou resíduo de casca de arroz, EVA e serragem e verificou que os compósitos evidenciaram um desempenho ao isolamento de ruído de impacto superior à amostra de referência, sendo que para o nível de pressão sonora padronizado ponderado, o EVA se destacou, seguido da casca de arroz. Devido à fragilidade das amostras com incorporação de serragem, não foi realizado os ensaios quanto aos níveis de pressão sonora de impacto. Nas propriedades mecânicas, tanto para a resistência à tração na flexão, quanto à compressão, as amostras com casca de arroz apresentaram os resultados superiores, seguido do EVA e serragem, o qual obteve uma redução acentuada das resistências.

Para a confecção do couro, diversos tipos de resíduos são gerados no processo, causando significativos impactos ambientais. Dentre as unidades produtivas de couro no Brasil, cerca de um terço estão localizadas no Rio Grande do Sul, dessa forma, Matz (2016) realizou a avaliação dos resíduos sólidos oriundos da produção de couros e constatou que o resíduo de couro (aparas e retalhos de couro atinado) tem uma média anual de geração de 537 toneladas, sendo descartados 15,8% desta quantidade. A pesquisa apontou também que a massa unitária deste resíduo é de 366,029 kg/m³.

Outro setor que vem aumentando sua demanda e, conseqüentemente, reflete no aumento de resíduos é o calçadista. Numa pesquisa realizada em indústrias situadas no Rio Grande do Sul, nas principais regiões calçadistas, contatou-se que no processo de fabricação do calçado feminino de couro são gerados 28,6% de resíduos da matéria prima, enquanto o calçado sintético detém um desperdício de 18,1% de matéria prima têxtil (SILVA, 2016).

Diversas pesquisas buscam a utilização de resíduos plásticos, como uma alternativa sustentável, incorporando estes em argamassas em substituição ao agregado miúdo natural. Dentre os plásticos utilizados evidencia-se trabalhos com PVC, PET, polietileno de alta densidade, poliuretano, entre outros, que buscam investigar seu comportamento na matriz cimentícia, visando melhorar as propriedades de durabilidade, mecânicas, térmicas (LATROCH et al., 2018; SENHADJI et al., 2019; CHINCHILLAS-CHINCHILLAS et al., 2020; AATTACHE et al., 2013; BADACHE et al., 2018; GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ et al., 2012; JUNCO et al., 2018).

Na Índia, Gupta e Vyas (2018) destacam que, para o corte e acabamento de pedras de granito, cerca de 400 toneladas de resíduos são geradas por ano, sendo que 30% desta quantidade é perdida em forma de poeira. Dessa forma, os autores analisaram a viabilidade da utilização do resíduo de pó de granito em substituição parcial ao agregado miúdo em argamassas, na proporção de 30 e 40% em volume. Dentre as propriedades verificadas, observou-se uma redução na relação água/cimento comparada com a argamassa de referência, em 7 e 3% para as argamassas de 30 e 40% de substituição, respectivamente. Este fato contribuiu para o aumento da resistência à compressão força de ligação elástica e força adesiva na ordem de 4%, 23% e 23%, respectivamente, apresentando assim, melhor desempenho do que a argamassa de referência. Estes resultados se justificam pela redução da relação a/c e melhor empacotamento da matriz cimentícia, para a resistência a compressão. No caso da aderência, a qual depende principalmente da ligação entre argamassa e substrato e da presença de poros, o efeito de filler do pó de granito contribuiu para o aumento desta ligação. Ademais, através dos ensaios de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier e difração de raios-X, constatou-se que a incorporação de pó de granito aumentou o volume de cimento hidratado na mistura.

A construção civil, também expressa uma quantidade muito significativa de resíduo gerada em seu processo. Teles (2015) analisou a geração de resíduos de construção e demolição (RCD) em obras de habitações populares horizontais e verificou uma taxa de resíduo de 0,054 m³/m² construído. Estudos apontam que a incorporação deste resíduo em argamassas é uma forma de ampliar os benefícios econômicos e ambientais. Dentre os resíduos de RCD, os mais utilizados nas pesquisas são o de cerâmica, concreto e misto. Diante de amostras contendo os diferentes tipos de agregados da construção e demolição como substituição parcial e total do agregado miúdo natural em argamassas, observou-se na análise das

propriedades mecânicas das pesquisas que não há grande variação entre os três resíduos – não obstante, o resíduo cerâmico ainda apresenta valores superiores aos demais. Ademais, cabe salientar que o uso de técnicas de demolição seletiva tende a melhorar as propriedades dos agregados reciclados e, conseqüentemente, qualidade da argamassa produzida.

Ainda quanto aos resíduos de RCD, alguns estudos investigam a utilização do resíduo cerâmico em argamassas e destacam que a resistência a compressão da mistura com este resíduo é superior comparado a utilização de recursos naturais como agregado (ANDRADE et al., 2018; COLANGELO; CIOFFI, 2017).

2.2.3 Propriedades Térmicas e Mecânicas de Argamassas com Materiais Reciclados

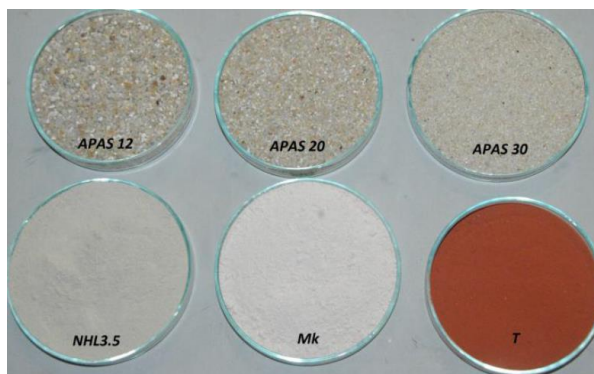
Diversos estudos foram desenvolvidos com o intuito de avaliar as características térmicas de argamassas com substituição da areia por resíduos, contribuindo para a sustentabilidade e para o desempenho térmico das edificações. Neste item serão apresentadas algumas pesquisas de argamassas com a respectiva dosagem, método, propriedades mecânicas e térmicas. É feita uma abordagem com bases nas pesquisas mais relevantes encontradas na literatura técnica, que contêm resíduos comuns e com quantidades significativas de descarte, de forma a contribuir para a sustentabilidade do meio ambiente e averiguar a sua viabilidade de incorporação na argamassa diante das propriedades térmicas e mecânicas.

Nos estudos de Guardia et al. (2019) investigaram a influência da adição de perlita expandida em argamassas nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas, sendo que as propriedades térmicas foram avaliadas através da Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC) para verificar a entalpia das argamassas, além da medição da condutividade térmica. Observou-se que o agregado leve aumentaram a porosidade e entalpia das argamassas de cimento-cal, enquanto reduziram a resistência e a condutividade térmica.

Fontes (2013) empregou resíduos cerâmicos de construção na argamassa, os quais foram moídos e utilizado somente a granulometria mais fina (até 0,2 mm). A partir do traço 1:3, os constituintes secos da mistura são cal hidráulica natural NHL 3,5, três tipos de areias de diferentes granulometrias, resíduo cerâmico e metacaulim (Figura 5). Estes dois últimos, foram empregados na argamassa em substituição

parcial de cal. As amostras possuem diferentes proporções de substituição com o resíduo cerâmico e com a combinação do resíduo e metacaulim. As argamassas contendo apenas o resíduo cerâmico.

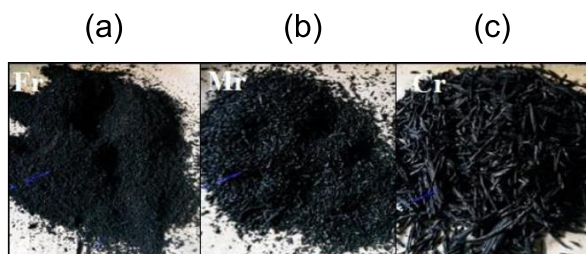
Figura 5 – Constituintes sólidos da argamassa: areia grossa, média e fina, cal, metacaulim e resíduo cerâmico



Fonte: Fontes (2013).

Piteira (2015) adicionou resíduos de borracha da recauchutagem de pneus, provenientes dos resíduos da extração da banda de rodagem, na argamassa. Esta mistura foi realizada com traço 1:3, cal hidráulica natural NHL 3,5 como aglomerante, quatro areias siliciosas de diferente granulometria misturadas e resíduos de borracha. As amostras variaram como: adições de 2,5%, 5% e 7,5% de mistura de borracha de diferentes frações granulométricas (MIX) e adições de 5% de resíduo de borracha de granulometria grossa (entre 0,6 mm e 2,36 mm), média (entre 0,212 mm e 0,6 mm) e fina (menores que 0,212 mm) – conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Resíduos de borracha da recauchutagem de pneus de granulometria fina (a), média (b) e grossa (c)

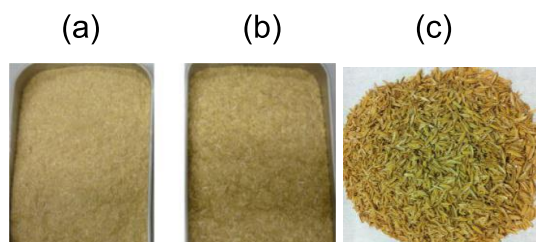


Fonte: Piteira (2015).

O aproveitamento de subprodutos agrícolas apresenta relevância entre os pesquisadores, devido a aplicação com diversas finalidades. Monteiro (2015) incorporou resíduos de casca e palha de arroz na argamassa, com traço volumétrico

de 1:2,5. Para mistura foi utilizado cimento tipo CEM II/B-L 32,5N, areia de rio, resíduo de palha de arroz grossa (4 mm) e fina (1 mm) ou resíduo de casca de arroz, com dimensão média entre 3 e 5 mm (Figura 7), e hidrófugo de massa com efeito plastificante como adjuvante.

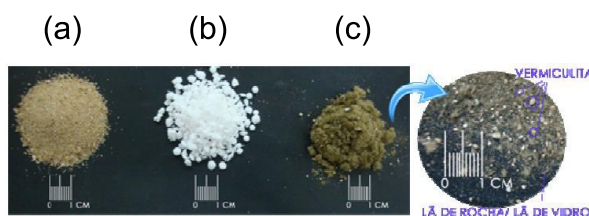
Figura 7 – Resíduo de palha de arroz fina (a), grossa (b) e casca de arroz (c)



Fonte: Monteiro (2015).

Passos et al. (2016) utilizaram a argamassa com traço 1:5, variando três diferentes teores de resíduos e aditivo. Dentre os aglomerantes foi empregado o cimento Portland CP V - ARI e cal hidratada CH-I; o agregado miúdo foi a areia média quartzosa; os resíduos de EPS de alta densidade, obtidos através de material proveniente de descarte, foram triturados e apresentaram dimensão máxima característica de 5mm; já o resíduo de lã de rocha, lã de vidro e vermiculita, proveniente do processo de acabamento de materiais compósitos utilizados para isolamento térmico e acústico, possui dimensão de 0,074mm, conforme ilustra a Figura 8.

Figura 8 – Areia natural (a), EPS triturado (b) e resíduos de lã de rocha/ lã de vidro/ vermiculita (c)



Fonte: Passos et al. (2016).

Sikora et al. (2017) empregaram resíduo de vidro na composição da argamassa com o intuito de melhorar sua propriedade térmica. Os materiais utilizados foram cimento Portland CEM I 42.5R, nanosílica (em três dosagens com 0%, 1% e 3% de nanosílica em relação à massa de cimento), areia natural e resíduo de vidro marrom com partículas menores que 2mm (Figura 9). Entretanto, foi abordada somente a

dosagem que não contempla a nanosílica, a fim de verificar a influência do resíduo no desempenho térmico.

Figura 9 – Resíduo de vidro após processo de moagem e peneiramento



Fonte: Sikora et al. (2017).

Silva (2017) utilizou, para a melhoria de desempenho térmico das argamassas, pellets de madeira. Este material é um tipo de biocombustível proveniente da moagem de estilha de madeira e outros desperdícios, assim, é considerado um produto sustentável, uma vez que é gerado a partir do aproveitamento de resíduos. A mistura com traço 1:3 constitui-se de cal hidráulica HL 5 como ligante, quatro tipos de areias lavadas (composta de quartzo ou quartzo e turmalina), superplastificante e os pellets de madeira, que foram moídos para a elaboração da argamassa, visto que possuem uma forma cilíndrica com dimensões de 6 a 8 mm de diâmetro e 10 a 30mm de comprimento (Figura 10).

Figura 10 – Pellets de madeira antes da moagem



Fonte: Silva (2017).

Para a argamassa com resíduo de folhas de PVC expandidas (EPVC), Latroch et al. (2018) aplicaram o traço de 1:3, com cimento Portland CPJ-CEM II/A-L 42.5, areia composta por 60% de areia quartzosa e 40% de areia do mar, possuindo uma dimensão máxima característica de 2mm, assim como o resíduo de EPVC (Figura 11).

Figura 11 – Folhas de PVC expandidas (EPVC) e partículas de resíduo de EPVC



Fonte: Latroch et al. (2018).

Badache et al. (2018) utilizaram polietileno de alta densidade (HDPE) como agregado miúdo em argamassas e avaliaram as propriedades térmicas e mecânicas do compósito. As composições utilizaram cimento Portland CPJ CEM II/B42.5N, mistura de areia com 60% calcária e 40% de duna e substituição parcial do volume de areia natural por HDPE (0%, 15%, 30%, 45% e 60%).

Lakraflí et al. (2012) investigaram a incorporação de couro nas argamassas, avaliando suas propriedades térmicas, bem como mecânicas, com o traço de 1:3, composto por cimento Portland CPJ55, areia e resíduo de couro com substituição parcial de 1 a 5%.

O Quadro 2 resume os estudos analisados sobre argamassas, sendo apresentado os materiais incorporados a fim de melhorar o desempenho térmico e reduzir o impacto ambiental pelo uso de recursos naturais e variações de incorporação.

Quadro 2 - Estudos realizados de argamassas com incorporação de resíduos
(continua)

Material	Incorporação do resíduo	Variações de incorporação	Abreviação do traço	Fonte
Resíduo cerâmico	Substituição do ligante - cal	5%	NHL 5T	Fontes (2013)
		10%	NHL 10T	
Resíduos de borracha da recauchutagem de pneus	Adição – sobre a areia.	2,5% de diferentes frações granulométricas	MIXr_2.5	Piteira (2015)
		5% de diferentes frações granulométricas	MIXr_5	
		7,5% de diferentes frações granulométricas	MIXr_7.5	
		5% de granulometria grossa	Cr_5	
		5% de granulometria média	Mr_5	
		5% de granulometria fina	Fr_5	

Quadro 2 - Estudos realizados de argamassas com incorporação de resíduos

(conclusão)

Material	Incorporação do resíduo	Variações de incorporação	Abreviação do traço	Fonte
Resíduo de casca arroz	Substituição do agregado - Areia	80%	ACA	Monteiro (2015)
Resíduo de palha de arroz fino		60%	APAF	
Resíduo de palha de arroz grosso		60%	APAG	
EPS	Substituição do agregado - Areia	83,3%	E80	Passos et al. (2016)
		91,7%	E90	
EPS + resíduos de lã de rocha, lã de vidro, vermiculita		91,7% de EPS + 8,3% de resíduos de lã de rocha, lã de vidro, vermiculita	E90L	
Resíduo de vidro	Substituição do agregado - Areia	100%	WG	Sikora et al. (2017)
Pellets de madeira	Substituição do agregado - Areia	4%	P4	Silva (2017)
		9%	P9	
		15%	P15	
		23%	P23	
Resíduos de folhas de PVC expandidas (EPVC)	Substituição do agregado - Areia	15%	LMEPVC15	Latroch et al. (2018)
		25%	LMEPVC25	
		50%	LMEPVC50	
		75%	LMEPVC75	
Resíduo de polietileno de alta densidade	Substituição do agregado - Areia	15%	LWCM15	Badache et al. (2018)
		30%	LWCM30	
		45%	LWCM45	
		60%	LWCM60	
Resíduo de couro	Substituição do agregado - Areia	1%	BD1	Lakraffi et al. (2012)
		2%	BD2	
		3%	BD3	
		4%	BD4	
		5%	BD5	

Fontes: Adaptado dos estudos indicados na tabela.

A partir deste levantamento, pode-se notar que as dosagens das argamassas são diferentes entre os estudos apresentados, variando o traço, o aglomerante e o agregado miúdo. Apenas Piteira (2015) e Fontes (2013) adotaram o mesmo traço e aglomerante, entretanto a areia é composta por características diferentes.

2.2.3.1 Condutividade Térmica de Argamassas com Materiais Reciclados

A ABNT NBR 15220-2:2005 apresenta valores de referência de condutividade térmica para a argamassa comum e de gesso (ou cal e gesso) de 1,15 e 0,70 W/(m.K), respectivamente. Entretanto, estes são valores indicativos. As características do material ligante e dos demais constituintes secos da mistura podem ser distintos em cada região, sendo relevante a realização de ensaios em laboratório e a comparação com a argamassa de referência analisada em cada estudo.

Para a determinação das propriedades térmicas, Fontes (2013) utilizou o equipamento Heat Transfer Analyzer, ISOMET Model 2104. Embora o resíduo cerâmico possui quantidades significativas de descarte, e sua inclusão na argamassa contribui para a sustentabilidade do meio ambiente, a incorporação de resíduo cerâmico aumentou a condutividade térmica da argamassa comparada com a de referência, não apresentando um desempenho térmico desejável.

Piteira (2015) utilizou o equipamento ISOMET Model 2104, no qual analisou amostras cilíndricas com dimensões de 9 cm de diâmetro e 2 cm de espessura. Verifica-se a diminuição da condutividade térmica a medida que a porcentagem de resíduo aumenta e o tamanho das partículas de borracha diminui. Ademais, esta característica é verídica, visto que a borracha é um material resistente ao calor.

Monteiro (2015) determinou a propriedade térmica da argamassa com resíduo de palha e casca de arroz através da norma EN 12664:2001 e o equipamento λ -Meter EP500 (Figura 12), que possui o método da placa quente protegida. As amostras apresentavam dimensões de 15 x 15 x 4 cm. A incorporação de resíduo de palha de arroz grosso mostrou-se vantajosa para o desempenho térmico, apresentando os resultados de condutividade térmica mais favorável.

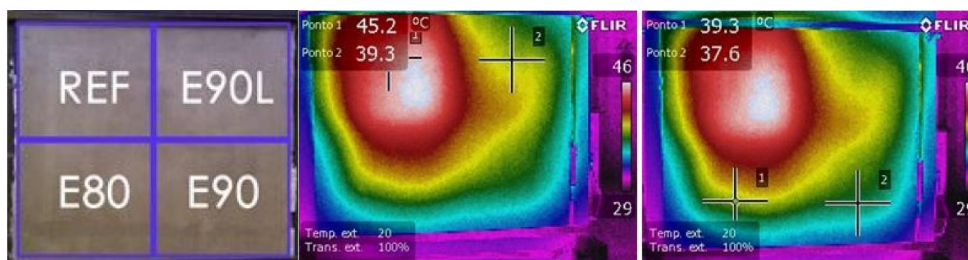
Figura 12 – Equipamento λ -Meter EP500



Fonte: Monteiro (2015).

Passos et al. (2016) avaliaram o fluxo de calor através de um painel de concreto revestido com as argamassas investigadas com o auxílio de um termovisor infravermelho. Já para a condutividade térmica, utilizou-se o cálculo simplificado a partir da tabela B.3 da ABNT NBR 15220-2:2005 de acordo com a composição e densidade de massa aparente. Apesar de que os valores de condutividade foram aproximados, é possível inferir que as argamassas com resíduo impediram o fluxo de calor rápido no painel de concreto, conforme ilustra a Figura 13, devido a menor massa específica da mistura, propriedade que está diretamente relacionada com a condutividade térmica.

Figura 13 – Quadrantes na face posterior de uma parede de concreto, com temperaturas de 45,2°C (REF), 39,3°C (E90L), 39,3°C (E80), e 37,6°C (E90) após cinco horas de aquecimento



Fonte: Passos et. al. (2016).

Passos et al. (2016) ainda calculou o parâmetro de transmitância térmica e capacidade térmica do sistema de vedação vertical para verificar o atendimento a ABNT NBR 15.575:2013. Todas as argamassas atenderam os níveis de capacidade térmica, entretanto para a transmitância térmica, a argamassa de referência não atendeu o critério em nenhuma zona bioclimática brasileira. A incorporação dos resíduos, dos três traços, viabilizou a utilização da argamassa nas zonas bioclimáticas de 3 a 8, desde que tenham absorvância menor que 0,6, ou seja, que sejam pintadas com cores claras. Portanto, pode-se observar que a condutividade térmica dos materiais que compõem o sistema de vedação vertical é de extrema importância para atendimento aos requisitos de desempenho térmico da edificação.

Sikora et. al. (2017) empregou o mesmo equipamento que Piteira (2015), o ISOMET 2104, a partir de amostras de argamassa de 10 x 10 x 5 cm. Conforme os resultados apresentados no Quadro 3, o decréscimo da condutividade térmica da argamassa na presença de resíduo de vidro, pode ser justificada devido à menor condutividade térmica e densidade do vidro, em comparação com a areia.

Silva (2017) usou o equipamento ISOMET Model 2014, com procedimentos de ensaio baseados nas suas normas de utilização. Os resultados apontam a redução da condutividade térmica em 90% da argamassa com substituição de 23% de areia por pellets de madeira. Este decréscimo ocorreu devido à diminuição da massa volumétrica e ao valor de condutividade térmica da madeira ser inferior comparado ao da areia.

Latroch et al. (2018) mediram as propriedades térmicas dos compósitos através do aparelho Quickline ISOMET QTM 30 (Figura 14), de acordo com a norma ISO 8302-91. A condutividade térmica da argamassa com incorporação de 75% de resíduos de folhas de PVC expandidas reduziu cerca de 60% comparado à argamassa de referência, isto se deve ao efeito isolante das partículas de resíduo de PVC.

Figura 14 – Equipamento ISOMET QTM 30 Quickline



Fonte: Latroch et. al. (2018).

Badache et al. (2018) utilizaram o equipamento ISOMET 30 Quickline para a medição da condutividade térmica, a partir de amostras prismáticas das argamassas (4 x 4 x 16cm). A condutividade térmica das amostras com substituição de 15, 30, 45 e 60% de areia por polietileno de alta densidade reduziu 10, 20, 31 e 41%, respectivamente, em relação à argamassa de referência.

Lakrafli et al. (2012) mediram a condutividade térmica através do equipamento DELTALAB, que é baseado no método da transferência de calor em estado estacionário, sendo que as dimensões das amostras foram 27 x 27 x 4 cm. Observou-se que com 5% de incorporação de couro a condutividade térmica reduziu 80% em relação ao compósito sem resíduo.

Quadro 3 - Condutividade térmica e método utilizado das argamassas com incorporação de resíduos

(continua)

Fonte	Material	Codificação no estudo	Condutividade térmica (W/(m.K))	Método
Fontes (2013)	Referência	REF	0,79	ISOMET 2104
	Resíduo cerâmico	NHL 5T	0,95	
		NHL 10T	0,82	
Piteira (2015)	Referência	REF	1,105	ISOMET 2104
	Resíduos de borracha da recauchutagem de pneus	MIXr_2.5	0,831	
		MIXr_5	0,677	
		MIXr_7.5	0,669	
		Cr_5	0,856	
		Mr_5	0,709	
Fr_5	0,653			
Monteiro (2015)	Referência	REF	0,341	λ-Meter EP500 (EN 12664:2001)
	Resíduo de casca arroz	ACA	0,155	
	Resíduo de palha de arroz fino	APAF	0,127	
	Resíduo de palha de arroz grosso	APAG	0,108	
Passos et. al. (2016)	Referência	REF	1,15	Cálculo Simplificado (ABNT NBR 15.575:2013)
	EPS	E80	0,40	
		E90	0,20	
EPS + resíduos de lã de rocha, lã de vidro, vermiculita	E90L	0,25		
Sikora et. al. (2017)	Referência	REF	1,8	ISOMET 2104
	Resíduo de vidro	WG	0,7	
Silva (2017)	Referência	REF	1,40	ISOMET Model 2014
	Pellets de madeira	P4	0,56	
		P9	0,25	
		P15	0,17	
P23		0,12		
Latroch et. al. (2018)	Referência	REF	1,8	ISOMET QTM 30 Quickline (ISO 8302-91)
	Resíduos de folhas de PVC expandidas (EPVC)	LMEPVC15	1,6	
		LMEPVC25	1,4	
		LMEPVC50	0,8	
LMEPVC75		0,5		
Badache et al. (2018)	Referência	REF	1,9	ISOMET 30 Quickline
	Resíduo de polietileno de alta densidade	LWCM15	1,75	
		LWCM30	1,48	
		LWCM45	1,25	
LWCM60		1,1		

Quadro 3 - Condutividade térmica e método utilizado das argamassas com incorporação de resíduos

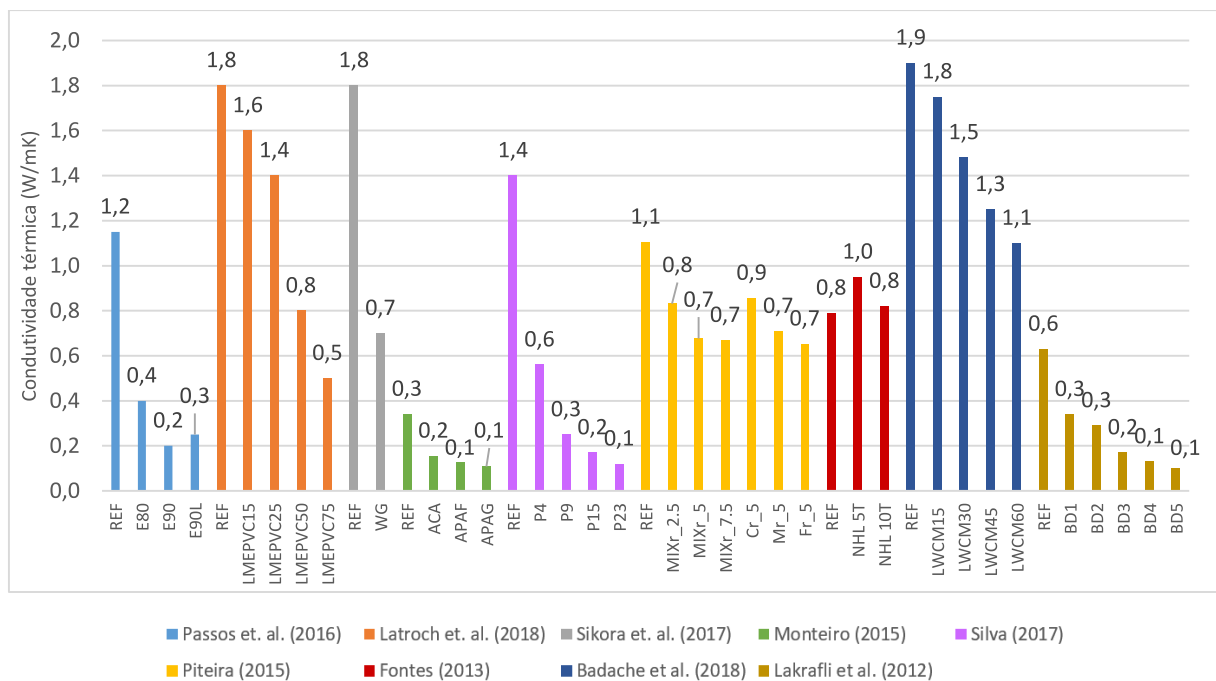
(conclusão)

Fonte	Material	Codificação no estudo	Condutividade térmica (W/(m.K))	Método
Lakraflí et al. (2012)	Referência	REF	0,63	DELTALAB
	Resíduo de couro	BD1	0,34	
		BD2	0,29	
		BD3	0,17	
		BD4	0,13	
		BD5	0,10	

Fontes: Adaptado dos estudos indicados.

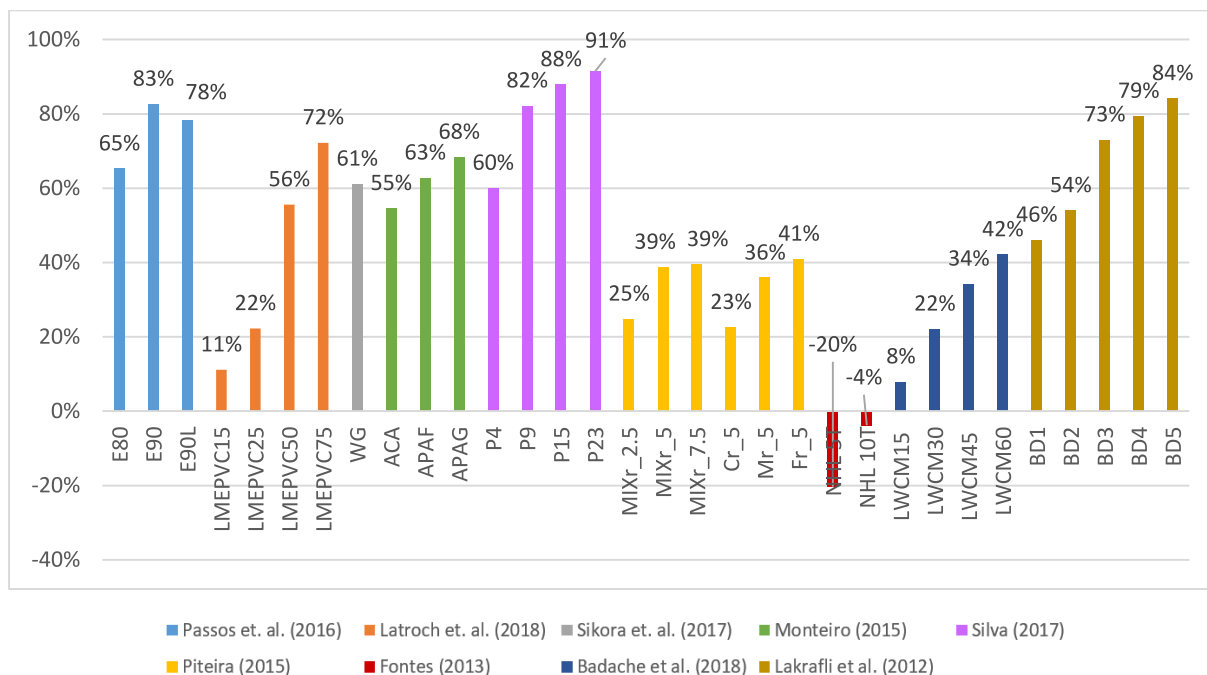
O Gráfico 2 apresenta os resultados de condutividade térmica dos estudos citados de argamassas com incorporação de resíduos. Já o Gráfico 3 indica a redução atribuída na condutividade térmica da argamassa com resíduo, em comparação com a de referência em cada caso.

Gráfico 2 - Condutividade térmica das argamassas com resíduos



Fontes: Adaptado dos estudos citados no Quadro 3.

Gráfico 3 - Redução da condutividade térmica das argamassas com resíduos em relação à argamassa de referência



Fontes: Adaptado dos estudos citados no Quadro 3.

Nos estudos mencionados, os resíduos que mais contribuem para a melhoria do desempenho térmico da argamassa foram os pellets de madeira, seguido pelo EPS e EPS com resíduos de lã de rocha, lã de vidro, vermiculita. As densidades destes resíduos são 0,65, 0,41 e 0,42 g/cm³, respectivamente. Esta propriedade tem relação com a condutividade térmica, entretanto a propriedade que mais interfere na condutividade térmica da argamassa, é o comportamento térmico do material que constitui o resíduo, segundo Passos et al. (2016) e Pinewells (2018).

Os resíduos de EPVC, vidro e casca e palha de arroz apresentaram um potencial de desempenho térmico semelhante, com reduções na condutividade térmica superiores à 50% em quase todas as porcentagens de substituição. O resíduo de borracha contribuiu para a redução de no máximo 41% da condutividade térmica. Já o resíduo cerâmico aumentou a condutividade em até 20%, não sendo vantajosa sua utilização em termos de desempenho térmico (LATROCH et al., 2018; MONTEIRO, 2015; SIKORA et al., 2017; FONTES, 2013; PITEIRA, 2015).

2.2.3.2 Propriedades Mecânicas das Argamassas com Materiais Reciclados

Os resultados de Passos et al. (2016) evidenciam uma diminuição da resistência à compressão, devida à incorporação de resíduos leves e menos resistentes, formando uma estrutura menos compacta, isto é, em argamassas com menor densidade, a resistência à compressão é reduzida. Pode-se observar que nos resíduos com granulometria menor (E90L), há um aumento significativo na resistência à compressão, devido ao efeito filler, melhorando o empacotamento da argamassa. A partir dos resultados, utiliza-se a ABNT NBR 13.281:2005 para designar a classe da argamassa. Neste caso, todas as argamassas com incorporação de resíduos apresentam classe P1 (resistência à compressão < 2 MPa) e R1 (resistência à tração na flexão < 1,5 MPa).

Latroch et al. (2018) e Sikora et al. (2017) utilizaram normas semelhantes, a EN 196-1:2016 e EN 197-1:2011. Para as argamassas com EPVC, houve uma redução de até 68% na resistência à compressão e até 46% na resistência à tração na flexão. Já as argamassas com resíduo de vidro apresentaram um comportamento distinto, aumentando em 28% da resistência à compressão.

Fontes (2013), Monteiro (2015) e Piteira (2015) realizaram ensaios conforme a EN 1015-11:1999. Dentre os resíduos analisados, os resíduos de casca e palha de arroz foram os que mais diminuíram as propriedades mecânicas, obtendo uma redução de até 99% nas duas resistências, sendo a palha de arroz fina a que provocou a maior diminuição.

Nos resultados de Piteira (2015), pode-se observar que a resistência à compressão mais elevada das argamassas com resíduo de borracha de pneu é a que contém 5% de diferentes frações granulométricas (MIXr_5). Já para a resistência à tração a mistura com 2,5% de diferentes frações granulométricas (MIXr_2,5) apresenta valores maiores. Para as misturas com granulometria classificada, a argamassa com 5% de granulometria grossa (Cr_5) apresentou os melhores resultados, tanto para resistência à compressão, quanto para tração.

Para o resíduo cerâmico, a argamassa reduziu apenas 20% da resistência à compressão, enquanto que todas as composições apresentaram valores de resistência à tração superiores ao da argamassa de referência (FONTES, 2013).

Dessa forma, pode-se notar que a queda das propriedades mecânicas é relacionada com a densidade do agregado miúdo incorporado. Resíduos com

densidade menores, como EPS, EPVC, casca e palha de arroz, obtiveram as reduções de resistência mais significativas entre 68 e 99% (PASSOS et al., 2016; LATROCH et al., 2018; MONTEIRO, 2015).

Em suma, as argamassas de revestimento com incorporação de resíduos, além de serem sustentáveis, apresentam um potencial de otimização das propriedades térmica da argamassa convencional. A partir da investigação de estudos realizados, pode-se constatar que o comportamento térmico do material que constitui o resíduo incorporado possui maior influência do que a densidade do mesmo.

O resíduo com o melhor desempenho térmico nos casos analisados foram os pellets de madeira, EPS e EPS com resíduos de lã de rocha, lã de vidro, vermiculita. Entretanto, a pesquisa de argamassa com pellets de madeira não apresenta as propriedades mecânicas deste compósito, restringindo a análise completa de aplicação para revestimentos exteriores. Já os estudos com EPS e com resíduos de lã de rocha, lã de vidro, vermiculita adotaram o método de cálculo simplificado com base nos dados de condutividade térmica dos materiais apresentados na ABNT NBR 15.575:2013, sendo necessário a comprovação por ensaios no laboratório (LATROCH et al., 2018; SILVA, 2017).

Do mesmo modo, os resíduos de EPVC, vidro, casca e palha de arroz apresentaram propriedades térmicas interessantes, que melhoraram mais de 50% no desempenho térmico da argamassa. Apenas os resíduos de casca e palha de arroz obtiveram sua resistência mecânica significativamente reduzida (PASSOS et al., 2016; LATROCH et al., 2018; SIKORA et al., 2017; MONTEIRO, 2015; SILVA, 2017; PITEIRA, 2015; FONTES, 2013).

Assim, os resíduos de borracha e cerâmica foram os que apresentaram características de desempenho térmico menos vantajosas, sendo que o último inclusive aumentou a condutividade térmica (PITEIRA, 2015; FONTES, 2013).

A incorporação de polietileno de alta densidade reduziu as propriedades mecânicas, sendo que a incorporação de 60% de resíduo HDPE reduziu a resistência à compressão em 38% em relação a argamassa de referência (BADACHE et al., 2018).

As argamassas com incorporação de EVA nas proporções de 25, 50 e 75%, reduziram a resistência à tração na flexão em relação ao compósito de referência 17, 50 e 83%, respectivamente, já na resistência à compressão a redução foi de 22, 66 e 92% (BORGES, 2015).

Todas as amostras com resíduo de couro reduziram a resistência mecânica em relação à argamassa sem resíduo à medida que o teor de resíduo aumentou, sendo que ocorreu uma queda maior das resistências a partir de 2% de incorporação de couro (LAKRAFLI et al., 2012).

O Quadro 4 resume os resultados dos estudos quanto a resistência à compressão e à tração na flexão.

Quadro 4 - Propriedades mecânicas das argamassas com incorporação de resíduos aos 28 dias

(continua)

Fonte	Material	Abreviação do traço	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Método
Fontes (2013)	Referência	REF	1,0	0,41	EN 1015-11:1999
	Resíduo cerâmico	NHL 5T	0,9	0,52	
		NHL 10T	0,8	0,44	
Piteira (2015)	Referência	REF	1,42	0,49	EN 1015-11:1999
	Resíduos de borracha da recauchutagem de pneus	MIXr_2.5	0,65	0,38	
		MIXr_5	1,04	0,27	
		MIXr_7.5	0,58	0,23	
		Cr_5	0,69	0,27	
		Mr_5	0,65	0,24	
		Fr_5	0,47	0,20	
Monteiro (2015)	Referência	REF	22,01	4,70	EN 1015-11:1999
	Resíduo de casca arroz	ACA	1,54	0,74	
	Resíduo de palha de arroz fino	APAF	0,07	0,04	
	Resíduo de palha de arroz grosso	APAG	0,10	0,10	
Passos et al. (2016)	Referência	REF	4,13	1,78	ABNT NBR 13.279
	EPS	E80	1,10	0,88	
		E90	0,70	0,71	
	EPS + resíduos de lã de rocha, lã de vidro, vermiculita	E90L	1,19	1,16	
Sikora et al. (2017)	Referência	REF	43	-	EN 197-1
	Resíduo de vidro	WG	55	-	

Quadro 4 - Propriedades mecânicas das argamassas com incorporação de resíduos aos 28 dias

(conclusão)

Fonte	Material	Abreviação do traço	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Método
Silva (2017)	Referência	REF	-	-	-
	Pellets de madeira	P4			
		P9			
		P15			
		P23			
Latroch et al. (2018)	Referência	REF	40	8,3	EN 196-1
	Resíduos de folhas de PVC expandidas (EPVC)	LMEPVC15	32	8,1	
		LMEPVC25	28	6,5	
		LMEPVC50	22	6,0	
		LMEPVC75	13	4,5	
Badache et al. (2018)	Referência	REF	42	4,00	EN 196-1
	Resíduo de polietileno de alta densidade	LWCM15	36	3,25	
		LWCM30	32	3,20	
		LWCM45	25	2,55	
		LWCM60	20	2,60	
Borges (2015)	Referência	REF	6,4	0,6	ABNT NBR 13.279
	Resíduo de EVA	EVA 25%	5	0,5	
		EVA 50%	2,2	0,3	
		EVA 75%	0,5	0,1	
Lakrafli et al. (2012)	Referência	REF	45	8,5	EN 196-1
	Resíduo de couro	BD1	20	6,0	
		BD2	0,40	0,65	
		BD3	0,37	0,45	
		BD4	0,31	0,30	
		BD5	0,24	0,29	

Fontes: Adaptado dos estudos indicados.

3 MATERIAIS E MÉTODO

O desenvolvimento deste trabalho tem como objetivo verificar o comportamento térmico de argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por materiais reciclados perante ao desempenho térmico. Devido à necessidade do conhecimento das propriedades térmicas das argamassas com composições diferentes das já difundidas em estudos anteriores, foi necessário realizar um plano experimental a fim de avaliar o comportamento térmico e mecânico destas novas misturas.

Neste capítulo foram abordadas as fases referentes à caracterização das argamassas: descrição dos materiais e resíduos utilizados; métodos de fabricação das argamassas e os respectivos ensaios de caracterização; e os ensaios para aferir as propriedades térmicas necessárias.

A partir da compilação dos resultados apresentados na literatura, o conhecimento dos materiais com potencial de isolamento térmico, o panorama atual da geração de resíduos sólidos na região e no Brasil e as pesquisas já realizadas no PPGEC/UNISINOS – de forma a analisar os resultados quanto à caracterização e investigação de outros aspectos do comportamento dos compósitos – fundamentam a escolha dos resíduos que possuem a melhor expectativa para sua incorporação em argamassa e por conseguinte melhorar o desempenho térmico e energético das edificações. Dessa forma, para este estudo foram escolhidos os resíduos de manta de polietileno expandido de isolamento acústico para pisos, couro e EVA.

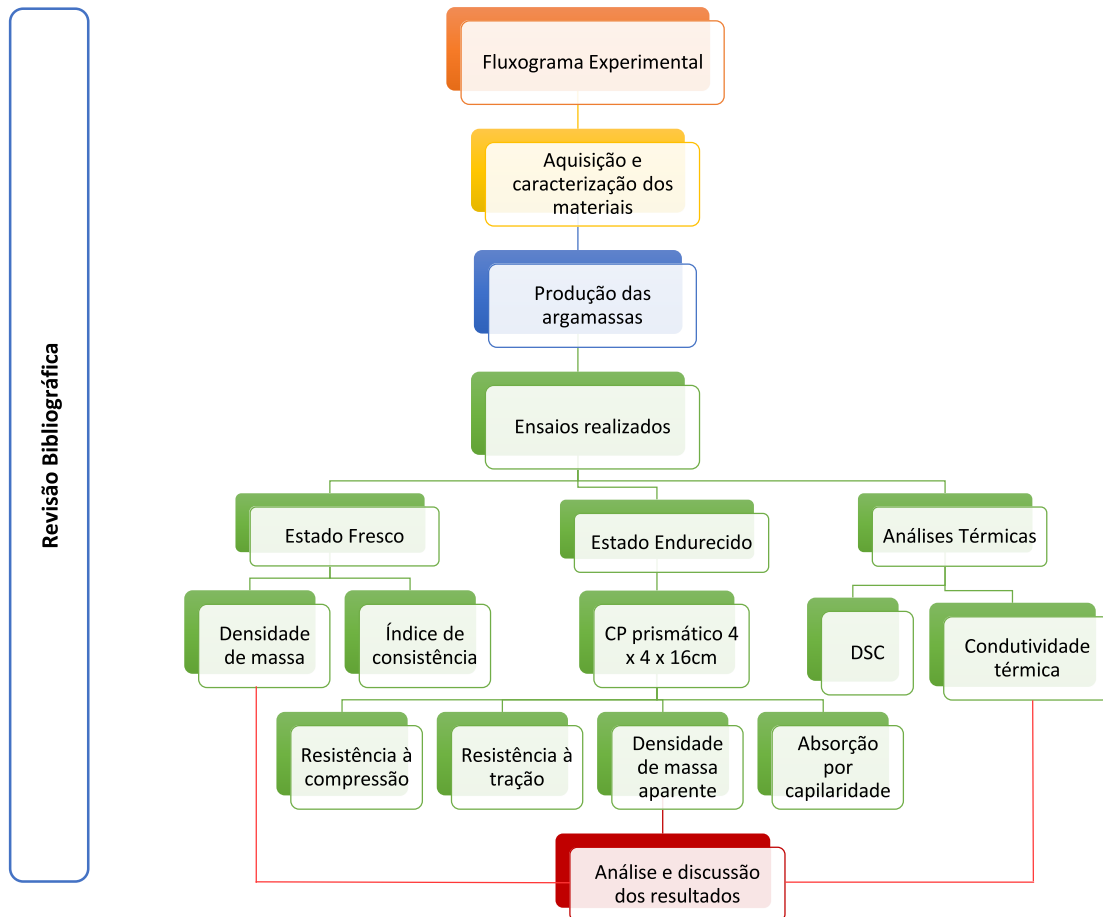
Com o propósito de verificar o desempenho térmico das argamassas, foram produzidos dez amostras de argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de polietileno expandido, couro e EVA. Estes variaram a porcentagem de substituição em 25, 50 e 75% e traço 1:1:6 (cimento:cal:areia), em volume. Foi também produzido uma argamassa convencional, sem substituição por resíduos, a fim de propor a referência para as análises comparativas de desempenho das composições.

Primeiramente foram avaliadas as características dos aglomerantes e agregados das argamassas, como análise granulométrica, massa específica e unitária. Após a definição da dosagem das misturas, procede-se a caracterização física, tanto no estado fresco – ensaio de índice de consistência e densidade de massa – quanto no estado endurecido – densidade de massa aparente, resistência à tração

na flexão e à compressão, absorção por capilaridade, condutividade térmica e calor específico.

A Figura 15 apresenta o fluxograma do método de pesquisa.

Figura 15 – Fluxograma experimental



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 MATERIAIS

Os materiais empregados, sua origem e a preparação dos resíduos, através dos processos de moagem, para a realização do plano experimental estão apresentados nos itens a seguir.

3.1.1 Aglomerantes

Os aglomerantes utilizados para a produção de argamassas deste estudo foram o Cimento Portland CP II-Z, classe 32, uma vez que é um cimento facilmente encontrado e de vasta utilização na construção civil no Rio Grande do Sul, e cal

hidráulica. Os dados dos ensaios de caracterização química, física e mecânica do cimento, que estão representados no Quadro 5, foram fornecidos pelo fabricante, correspondendo ao lote do qual foi coletado, atendendo aos requisitos apontados na ABNT NBR 16.697:2018. O cimento Portland CP II Z é constituído pelos componentes em massa: clínquer + gesso (71 – 94 %), pozolana (6 – 14%) e material carbonático (0 – 15%) (Votorantim, 2019). A fim de evitar variações, os aglomerantes utilizados na pesquisa foram do mesmo lote para todas as amostras.

Quadro 5 - Caracterização química, física e mecânica do Cimento Portland CP II-Z classe 32

Ensaio		Resultados	Requisitos exigidos pela ABNT NBR 16697:2018
Massa específica aparente (g/cm ³)		1,2	-
Massa específica absoluta (g/cm ³)		2,97	-
Finura	Peneira # 200 (%)	0,4	-
	Peneira # 325 (%)	5,9	≤ 12,0
Tempo de Pega	Início (min)	245	> 60min
	Fim (min)	285	< 600min
Água Consistência (%)		27,5	-
Blaine (cm ² /g)		4493	-
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	27,9	> 10 MPa
	7 dias	33	> 20MPa
	28 dias	-	> 32 MPa
Componentes químicos (%)	Perda ao fogo	6,9	< 8,5
	Resíduo insolúvel	14,4	≤ 18,5
	Trióxidos de enxofre (SO ₃)	2,3	< 4,5
	Óxido de magnésio (MgO)	5,7	-

Fonte: Adaptado de Votorantim (2019).

Já os dados dos ensaios de caracterização química e física da cal hidráulica estão apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Caracterização química e física da Cal Hidráulica

(continua)

Ensaio		Resultados	Requisitos exigidos pela NBR 7175:2003
Massa específica aparente (g/cm ³)		0,7	-
Massa específica absoluta (g/cm ³)		0,584	-
Finura	Peneira 0,600 mm (%)	0	≤ 0,5%
	Peneira 0,075 mm (%)	5,57	≤ 15%

Quadro 6 - Caracterização química e física da Cal Hidráulica

(conclusão)

Ensaio		Resultados	Requisitos exigidos pela NBR 7175:2003
Componentes químicos (%)	Perda ao fogo	13,81	-
	Resíduo insolúvel	39,49	-
	Óxido de magnésio (MgO)	16,91	-
	Óxido de cálcio (CaO)	29,04	-
	Óxido totais (MgO+CaO)	53,31	-
	Óxido totais não hidratados	10,12	-
Componentes químicos (%)	Dióxido de carbono (CO ₂)	1,64	-
	Umidade	0,47	-

Fonte: Adaptado de Dagoberto Barcellos (2019).

3.1.2 Agregado Miúdo Natural

O agregado miúdo natural empregado é areia de origem quartzosa, proveniente do Rio Jacuí, na Região Metropolitana de Porto Alegre. Para os ensaios de caracterização e utilização nas argamassas, a areia foi seca em estufa e posteriormente reservada em tonéis plásticos até a confecção das amostras.

Visto que o equipamento para os ensaios térmicos limita-se a amostras homogêneas com partículas menores ou iguais a 1mm, foi realizado o peneiramento da areia média e descartado os grãos maiores que 1mm.

3.1.3 Resíduo de Polietileno Expandido

O resíduo de polietileno expandido é proveniente de retalhos de manta de isolamento acústico para pisos – Multimpact de 5 mm da marca Multinova – utilizadas em edificações da construtora Espaço 3 Arquitetura de Caxias do Sul/RS.

A moagem do material foi realizada na Universidade de Caxias do Sul (UCS) e passou por dois processo de moagem para obter partículas inferiores a 1mm. Primeiramente, o resíduo foi triturado no aglutinador Seibt AS 30/500, Figura 16, com o intuito de reduzir o tamanho da manta em pedaços e, posteriormente, passou duas vezes pelo moinho de facas Marconi 580, Figura 17, a fim de garantir a escala de partículas inferiores a 1mm. Por conseguinte, o resíduo foi seco até massa constante sob temperatura de 60°C e após foi reservado em tonéis plásticos até a confecção das amostras.

A Figura 18 ilustra o resíduo de manta acústica de polietileno expandido no estado inicial, após a moagem no aglutinador e após a utilização do moinho de facas.

Figura 16 – Aglutinador Seibt AS 30/500



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17 – Moinho de facas Marconi 580



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 18 - Resíduo de polietileno expandido (a) como foi recebido, (b) após a moagem no aglutinador e (c) após ser processado no moinho de facas

(a)



(b)



(c)

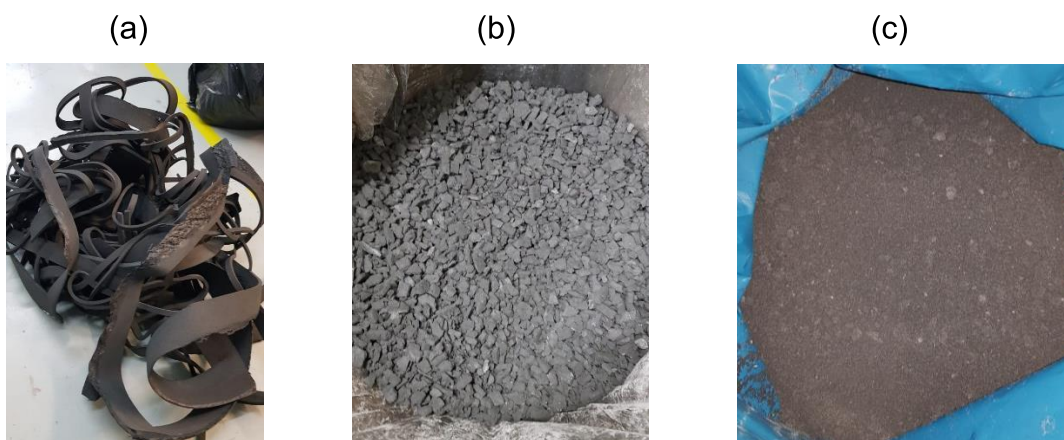


Fonte: Elaborado pela autora.

3.1.4 Resíduo de EVA

O resíduo de EVA utilizado nesta pesquisa é proveniente de recortes do processo de acabamento final de tatames, palmilhas, solas, etc., e foi cedido pela Sulflex comércio de EVA, empresa situada no município de São Leopoldo/RS. O material passou pelo mesmo processo de moagem do resíduo de polietileno expandido, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Resíduo de EVA (a) como foi recebido, (b) após a moagem no aglutinador e (c) após ser processado no moinho de facas



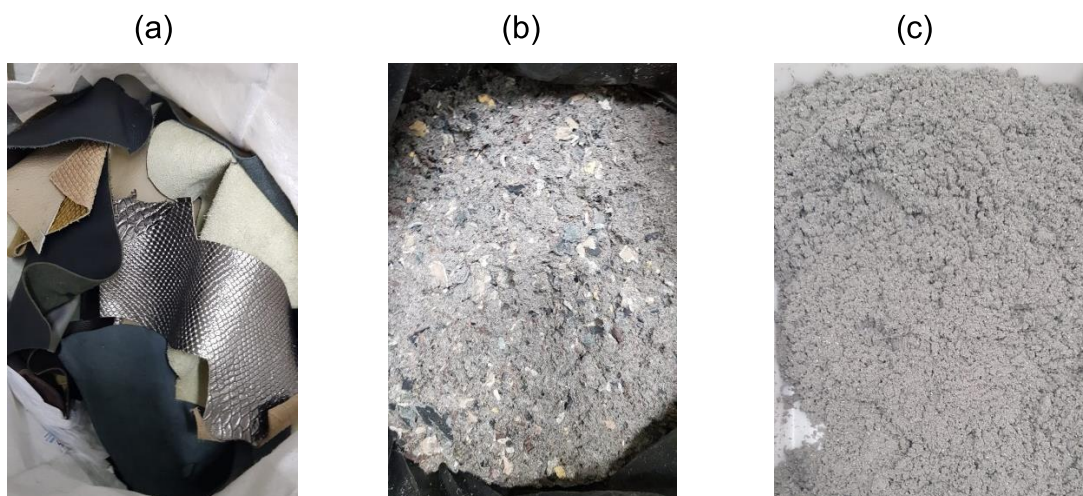
Fonte: Elaborado pela autora.

Após a moagem, o resíduo de EVA foi seco até atingir massa constante sob temperatura de 100°C e após foi reservado em tonéis plásticos até a preparação das amostras.

3.1.5 Resíduo Couro

O resíduo de couro foi concedido pelo processo de beneficiamento do couro na confecção de calçados, bolsas e cintos de uma empresa localizada em Caxias do Sul/RS. Os retalhos de couro passaram pelo mesmo processo de moagem do resíduo de polietileno expandido e EVA, segundo a Figura 20.

Figura 20 - Resíduo de couro (a) como foi recebido, (b) após a moagem no aglutinador e (c) após ser processado no moinho de facas



Fonte: Elaborado pela autora.

Posteriormente, o resíduo de couro foi seco sob temperatura de 100°C, até massa constante, e após foi reservado em tonéis plásticos até a data de preparação das amostras.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Para a caracterização da areia e dos resíduos de EVA, couro e polietileno expandido foram realizados os ensaios de composição granulométrica, massa específica e massa unitária, conforme a ABNT NBR NM 248:2003, ABNT NBR NM 52:2009 e ABNT NBR NM 45:2006, respectivamente, no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC) da UNISINOS.

3.2.1 Massa Específica e Massa Unitária

A massa unitária e índice de volume de vazios dos agregados foram considerados no estado solto e seguiu a ABNT NBR NM 45:2006. Já a massa específica foi realizada conforme a ABNT NBR NM 52:2009. Entretanto, para a caracterização da massa específica dos resíduos, foi realizado uma adaptação à norma, uma vez que possuem baixa densidade e ficam submersos na água, utilizou-se o recurso de uma tampa de vidro no topo do recipiente do ensaio.

O Quadro 7 apresenta os resultados obtidos dos agregados na realização dos ensaios.

Quadro 7 – Caracterização dos agregados

Agregados	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Índice de volume de vazios (%)
Areia	2,4256	1,5611	35,64
Manta de polietileno expandido	0,4845	0,0552	88,61
EVA	1,3577	0,3112	77,08
Couro	1,0046	0,0911	90,93

Fonte: Elaborado pela autora.

Através da análise dos resultados apresentados no Quadro 7, os agregados reciclados se enquadram como agregados leves, uma vez que sua massa específica é inferior a 2,0 g/cm³ e sua massa unitária abaixo de 1,04 g/cm³, conforme a ABNT NBR 12.655:2015 e ABNT NBR 7213:2013, respectivamente. A massa unitária da areia chega a ser 28 vezes maior que a da manta de polietileno expandido. Comparando entre os resíduos, o EVA mostrou-se ter a maior massa unitária, enquanto o polietileno e couro apresentaram valores mais próximos. No estudo de Borges (2015) foi encontrado a massa unitária do resíduo de EVA – proveniente do processo de lixamento em uma indústria calçadista – quase duas vezes menor comparado ao mesmo resíduo da presente pesquisa. Esta fato, além dos âmbitos de variáveis nas propriedades químicas e físicas, pode ser explicado pelo formato regular dos grãos de EVA e pelos moinhos utilizados no processo de moagem do material.

O índice de volume de vazios dos resíduos de couro e polietileno expandido apresentaram valores distantes ao agregado natural, o que condiz com a baixa massa unitária destes resíduos, após o mesmo processo de moagem. Já o resíduo de EVA apresentou-se com formato regular dos grãos e maior massa unitária entre os resíduos, aumentando, assim, o seu volume de vazios, conforme Neville (2016).

3.2.2 Análise Granulométrica

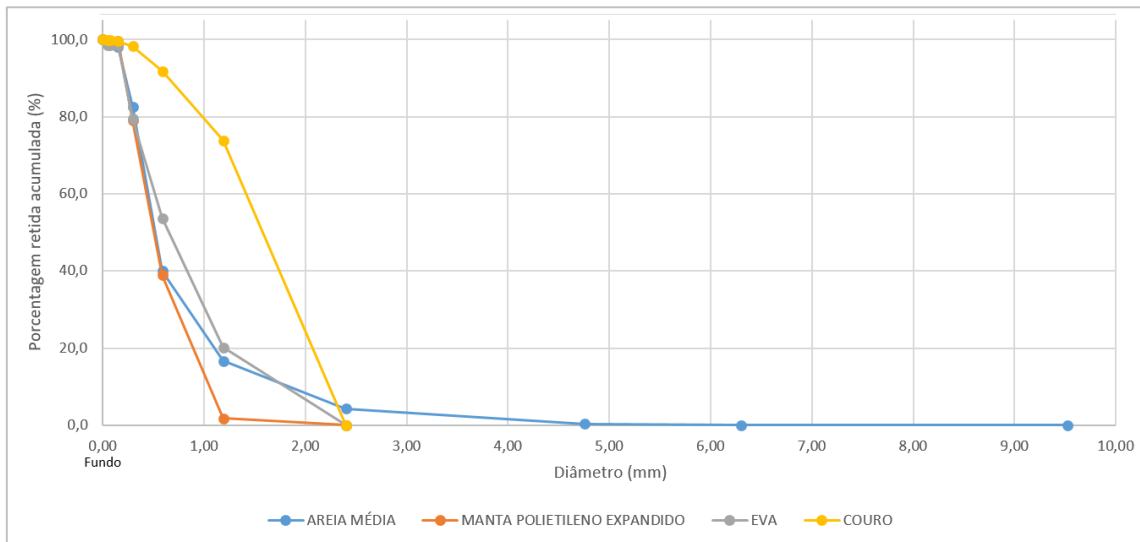
A análise da composição granulométrica da areia e dos resíduos foi realizada conforme as especificações da ABNT NBR NM 248:2003, utilizando peneiras de série normal e intermediária. Uma vez que os grãos dos agregados incorporados nas argamassas foram a partir de 1,19mm, utilizou-se as peneiras desde a abertura 1,19

mm até o fundo. O equipamento utilizado no ensaio é o agitador de peneiras Bertel, com diâmetro de 200 mm, em velocidade média, em tempo aproximado de dez minutos. Avaliou-se a porcentagem de partículas retidas nas peneiras, dimensão máxima, módulo de finura e frações dimensionais dos agregados.

A ABNT NBR NM 248:2003 recomenda realizar o ensaio com amostras de 500g e em duas repetições. Entretanto, como os resíduos ocupam volumes diferentes do agregado natural, foi necessário a realização de mais repetições com uma quantidade menor dos materiais reciclados.

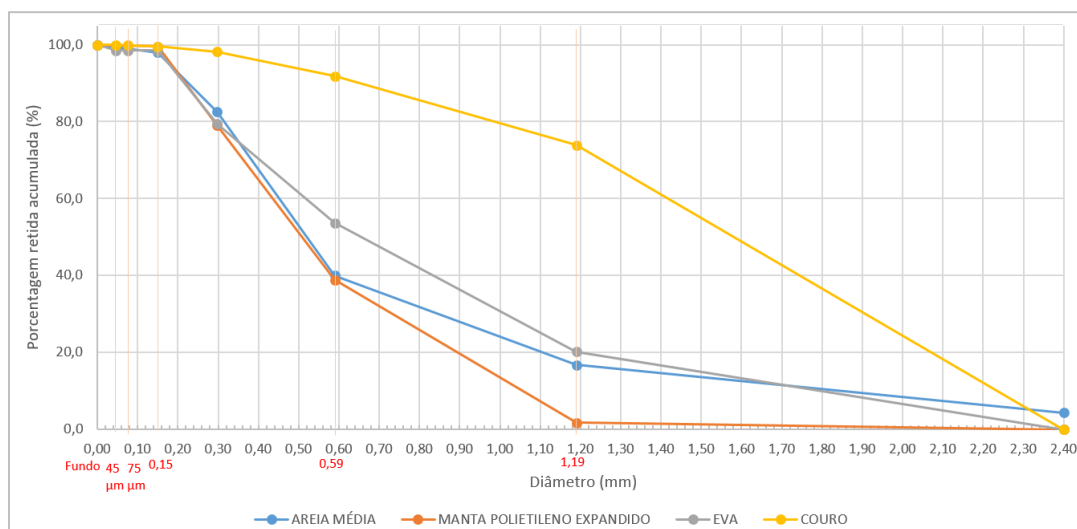
O Gráfico 4 e Gráfico 5 apresentam a distribuição granulométrica dos agregados reciclados e natural. No Apêndice A encontra-se os dados do ensaio.

Gráfico 4 – Curva granulométrica dos agregados



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 5 – Curva granulométrica dos agregados a partir da peneira 1,19 mm



Fonte: Elaborado pela autora.

O Quadro 8 apresenta a dimensão máxima característica e o módulo de finura dos agregados.

Quadro 8 – Dimensão máxima e módulo de finura dos agregados

Agregados	Dimensão máxima (mm)	Módulo de finura
Areia	4,76	2,42
Manta de polietileno expandido	1,19	3,19
EVA	2,40	3,50
Couro	2,40	3,63

Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar no Gráfico 5, que o resíduo de couro teve a maior quantidade de partículas retidas na peneira 1,19mm (73,9%), isto se deve ao comportamento das partículas deste resíduo, que se aglomeram entre si, assim, formam uma massa que o agitador de peneiras não consegue separar. Já os resíduos de EVA e de polietileno expandido apresentaram um comportamento similar ao da areia, sendo que o EVA apresentou uma quantidade retida acumulada de 20,2% na peneira de 1,19 mm. O polietileno expandido resultou em uma curva granulométrica uniforme, assim como o agregado natural.

A dimensão máxima dos agregados reciclados foi de 2,40 mm, com exceção da manta de polietileno expandido, com 1,9 mm. Entretanto, ao analisar o módulo de finura, os resultados são semelhantes entre os resíduos e superiores em relação ao agregado natural.

Em termos da microestrutura-reológica das argamassas, as distribuições granulométricas com muitas partículas concentradas em poucos diâmetros resultam em altas porosidades, enquanto as curvas com distribuição uniforme apresentam baixa porosidade (CARDOSO, 2009). Em contrapartida, Cardoso (2009) Carneiro, Cincotto e John (1997) afirmam que a distribuição granulométrica, assim como o módulo de finura, desconsideram a forma do grão, propriedade a qual possui grande influência no empacotamento das partículas, e concluem que a consistência da argamassa está relacionada com a massa unitária no agregado, de forma que a consistência diminuiu com o aumento da massa unitária – devido ao conteúdo de finos.

3.3 MÉTODO DE ENSAIO

A seguir estão descritos os procedimentos para a produção das argamassas e a moldagem dos corpos de prova do plano experimental, bem como os métodos de ensaios no estado fresco e endurecido.

3.3.1 Produção das Argamassas

Para a produção das argamassas primeiramente foi estabelecido os teores de substituição parcial do volume do agregado miúdo pelos materiais reciclados. Adotou-se as faixas de teores propostas por Latroch et al. (2018), visto que os resultados obtidos apresentaram uma distribuição adequada dentro dos intervalos de substituição.

Segundo a ABNT NBR 7211:2009, considera-se agregado miúdo o material passante na peneira de abertura de malha 4,76mm. Dessa forma, os resíduos utilizados nas amostras atendem a esta especificação. Ademais, este tamanho dos grãos possibilita maior homogeneidade, trabalhabilidade e empacotamento das misturas. Assim, todos os agregados foram peneirados e descartou-se os grãos não passantes na peneira de 1,19 mm – devido à limitação dos equipamentos de ensaios térmicos para partículas maiores que 1,19mm.

O traço das argamassas foi adotado como 1:1:6 em volume, uma vez que os agregados apresentam diferentes densidades. Definiu-se este traço, pois é encontrado na literatura, permitindo assim a comparação dos resultados obtidos, e

por ser um traço característico de argamassa de revestimento externo na construção civil. O índice de consistência seguiu a ABNT NBR 13.276:2016 e foi estabelecido o valor de 260 ± 5 mm, conforme recomenda a ABNT NBR 16.541:2016, na ausência de informação sobre a quantidade de água necessária para a mistura.

O Quadro 9 apresenta as amostras que foram desenvolvidas nesta pesquisa e as respectivas porcentagens de substituição por resíduos.

Quadro 9 – Combinações das amostras de argamassas para o plano experimental

Amostras de argamassa	Teores de incorporação de resíduo	Abreviação do traço
Referência	0%	REF
Manta de Polietileno Expandido	25%	M25
	50%	M50
	75%	M75
Couro	25%	C25
	50%	C50
	75%	C75
EVA	25%	EVA25
	50%	EVA50
	75%	EVA75

Fonte: Elaborado pela autora.

A preparação da mistura das argamassas foi realizada de acordo com a ABNT NBR 16.541:2016 no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC) da UNISINOS. O local de preparação permaneceu sob a uma temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de 60 ± 5 %. Os equipamentos utilizados para o preparo das argamassas foram o misturador planetário Emic AG-5, com capacidade para 5 litros, e balança de resolução 0,1g. Primeiramente foi adicionado os materiais anidros no misturador, acionado à uma velocidade baixa e incorporado 75% da água da mistura nos 10s iniciais até completar 30s desde o início do ensaio. Em seguida, acionou-se a velocidade alta por mais 60s e pausou-se o misturador para raspar toda a superfície interna, após 90s, entre esta tarefa e repouso, foi misturado a argamassa em velocidade baixa e adicionado o restante de água em 10s, prosseguindo a mistura por 60s.

3.3.2 Ensaio no Estado Fresco

A seguir estão apresentados os ensaios desenvolvidos para a caracterização das misturas no estado fresco.

3.3.2.1 Índice de Consistência

O ensaio de índice de consistência, relacionado à trabalhabilidade da argamassa, foi realizado após a homogeneização do material e seguiu os procedimentos da ABNT NBR 13.276:2016. Para a argamassa de revestimento definiu-se a consistência desejada como sendo 260 ± 5 mm, conforme recomenda a ABNT NBR 16.541:2016, e ajustou-se a quantidade de água de cada mistura até atingir a consistência desejada.

Houve uma determinada variação do volume de água em cada composição, uma vez que os resíduos possuem característica física, químicas e forma dos grãos distintas, de modo a absorver uma quantidade de água diferente entre estes, modificando assim sua trabalhabilidade.

3.3.2.2 Densidade de Massa

O procedimento da determinação da densidade de massa também foi realizado após a homogeneização das misturas e é estabelecido pela ABNT NBR 13.278:2005. Com a utilização de uma balança eletrônica com resolução de 0,1g, mediu-se os dados necessários para o cálculo da densidade de massa da argamassa no estado fresco, o qual calculado pela Equação (4):

$$d = \frac{m_c - m_v}{V_r} \times 1000 \quad (4)$$

Onde:

m_c = massa do recipiente contendo a argamassa (g);

m_v = massa do recipiente vazio (g);

V_r = volume do recipiente (cm^3);

d = densidade de massa da argamassa no estado fresco (kg/m^3).

3.3.2 Moldagem dos Corpos de Prova

Para os ensaios no estado endurecido – densidade de massa aparente, resistência à compressão e à tração na flexão e absorção por capilaridade – foram moldados seis amostras para cada composição indicada no Quadro 9, com dimensões de 4 x 4 x 16 cm, conforme a ABNT NBR 13.279:2005.

Para os ensaios térmicos de condutividade térmica e DSC foram moldadas três amostras idênticas de dimensões de 5 cm de comprimento e 1,27 cm de diâmetro. Os moldes foram confeccionados com pedaços de mangueira de jardim que possuíam o diâmetro interno de $\frac{1}{2}$ ", conforme Figura 21. Estas dimensões foram determinadas pelas dimensões do equipamento, tendo sido adotado o tamanho máximo. Para o ensaio de DSC foi necessário utilizar 20 mg das amostras. Conforme a ISO 11.357-1:2016 a amostra pode estar sob forma de pó ou sólida, desde que se encaixe no recipiente do ensaio.

Figura 21 – Moldes das argamassas para o ensaio térmico



Fonte: Elaborado pela autora.

Na moldagem dos corpos de prova, as formas receberam desmoldante para evitar a aderência do material e a argamassa foi depositada manualmente nas formas. Para as amostras dos ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão e de absorção de água por capilaridade, realizou-se o adensamento do material conforme a ABNT NBR 13.279:2005, aplicando nos moldes 30 quedas com a mesa de adensamento, assim como para as amostras dos ensaios térmicos, a fim de garantir a homogeneidade na distribuição dos corpos de prova. Posteriormente à etapa de adensamento, as formas foram niveladas com uma régua metálica a fim de garantir o alinhamento das amostras.

Os corpos de prova, tanto dos ensaios no estado endurecido, quanto dos ensaios térmicos, permaneceram 48 ± 24 horas nos moldes sob condições do ambiente de temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa de $60 \pm 5\%$, conforme indica

a ABNT NBR 13.279:2005. Os corpos de prova permaneceram em condições de cura sob temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa de $60 \pm 5\%$ até a idade de 28 dias.

3.3.3 Ensaios no Estado Endurecido

Os ensaios realizados para a caracterização das misturas no estado endurecido estão descritos a seguir.

3.3.3.1 Densidade de Massa Aparente

Após a cura de 28 dias das argamassas, foi aferida a densidade de massa aparente, determinada pela ASTM D1622-14. As amostras foram mantidas sob temperatura de 23 ± 2 °C e umidade de $50 \pm 10\%$ por no mínimo 40 horas antes do ensaio. Para o plano experimental foi utilizada uma balança com resolução de 0,1g, para verificar a massa dos corpos de prova, e um paquímetro, a fim de medir suas dimensões, operação repetida três vezes para cada face. O cálculo da densidade de massa aparente é estabelecido conforme a Equação (5):

$$D = \frac{m}{V} \quad (5)$$

Onde:

m = massa da argamassa (kg);

V = volume da argamassa (m³);

D = densidade de massa aparente da argamassa no estado endurecido (kg/m³).

3.3.3.2 Resistência À Compressão e À Tração na Flexão

O ensaio de ruptura seguiu a ABNT NBR 13.279:2005. A tolerância para o tempo de ruptura para os 28 dias é de 8 horas.

Para a resistência à tração na flexão aplicou-se uma carga de 50 ± 10 N/s nas amostras até a ruptura. Já para a resistência à compressão foi aplicada carga de 500 ± 5 N/s até a ruptura. A máquina de ensaio utilizada é a Emic, modelo DL 200, Classe 1, com calibração de erro $\leq 5\%$.

3.3.3.3 Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com a ABNT NBR 15.259:2005. Aos 28 dias, as amostras de argamassa foram lixadas na superfície e limpas com pincel. Após, com o auxílio de balança com resolução de 0,01g, determinou-se a massa inicial de cada corpo de prova. Posicionou-se as argamassas com a face em contato com o suporte em um recipiente de ensaio. O nível da água permaneceu constante a 5 ± 1 mm acima desta face. Após 10 e 90 minutos verificou-se a massa das amostras. O cálculo da absorção de água é dado por (Equação 6):

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (6)$$

Onde:

m_t = massa do corpo de prova em cada tempo (g);

m_0 = massa inicial do corpo de prova (g);

A_t = absorção de água por capilaridade, para cada tempo (g/cm^3).

O coeficiente de capilaridade é definido pela ABNT NBR 15.259:2005 (p. 3) como o “[...] coeficiente angular da reta que passa pelos pontos representativos das determinações realizadas aos 10 min e aos 90 min [...]” e é obtido pela Equação (7):

$$C = m_{90} - m_{10} \quad (7)$$

Onde:

M_{90} = massa do corpo de prova aos 90 minutos (g);

M_{10} = massa do corpo de prova aos 10 minutos (g);

C = coeficiente de capilaridade ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$).

3.3.4 Ensaios Térmicos

A fim de avaliar as propriedades térmicas das amostras, realizou-se os procedimentos dos ensaios térmicos apresentados a seguir.

3.3.4.1 Ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura

A fim de analisar o comportamento térmico das amostras e determinar o calor específico foi realizado o ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), através do equipamento DSC-60, marca Shimadzu, conforme ilustra a Figura 22, no LPOL (Laboratório de Polímeros) da Universidade de Caxias do Sul.

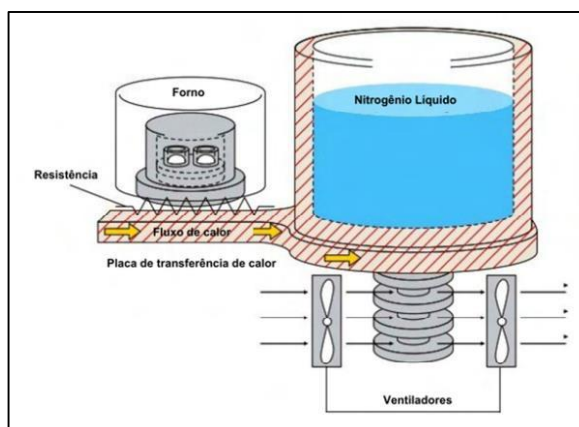
Figura 22 - Calorímetro Diferencial de Varredura (Shimadzu modelo DSC-60)



Fonte: Shimadzu (2012).

Este equipamento conta com um sistema de forno único, o qual possui um compartimento de alumínio para a amostra em teste e outro chamado de referência – que ficou vazio durante o ensaio. Conforme ilustra a Figura 23, as amostras são aquecidas através de resistências elétricas e resfriadas após a análise com o auxílio de ventiladores. Ademais, o sistema conta com uma câmara de nitrogênio para resfriamento ou para atingir temperaturas negativas durante o ensaio. Dessa forma, o DSC determina as medidas de diferença de temperatura entres os cadinhos.

Figura 23 - Sistema interior do DSC-60



Fonte: Adaptado de Shimadzu (2012).

O ensaio foi realizado na seleção das amostras: REF, M25, M50, M75, C25, EVA 25 e EVA50 – visto que, estes traços com teor de substituição do respectivo resíduo, apresentaram boa performance nos ensaios de estado fresco e endurecido, enquanto que os traços C50 e EVA75 diante das características reológicas, tornaram-se inviáveis devido à elevada relação a/c, causando até exsudação. Ademais, para determinar o calor específico das amostras, realizou o ensaio com o cadinhos vazios, que determinou-se como “linha base” e com um material com propriedades conhecidas como referência, o índio.

A taxa de variação de temperatura do ensaio foi de -10 °C até 150 °C com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. A análise térmica foi aplicada à estas condições visto que a temperatura de exposição que pode-se alcançar no local de aplicação do material está entre este intervalo, isto é, numa fachada de uma edificação. Utilizou-se cerca de 10,2 mg das amostras nos cadinhos.

Conforme a ISO 11.357-1:2016, todas as amostras foram analisadas e permaneceram em laboratório sob temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa de $60 \pm 5\%$ até a idade de 28 dias. Para o ensaio foi necessário o controle de temperatura entre 22 ± 5 °C e umidade relativa menor que 80% e a quantidade de material foi de 20mg, segundo indicações do fabricante. A ISO 11.357-1:2016 especifica que a amostra pode estar sob qualquer forma física (pó, fibra, sólido) desde que encaixe no recipiente do ensaio.

O ensaio de DSC fornece os dados da amostra analisada: temperaturas características, entalpia (fusão, cristalização, transformação e aquecimento de reação), estabilidade térmica, calor específico (PERKIN ELMER, 2018).

Para obter o calor específico utilizou-se o método das amplitudes, que verifica as amplitudes entre a linha base e a linha das amostras analisadas. A Equação 8 expressa o cálculo do calor específico que é realizado pelo software do fabricante (AMORIM, 2012).

$$c_p = \frac{A_s - A_b}{m_s \cdot \beta} \quad (8)$$

Onde:

A_s – amplitude da amostra (W);

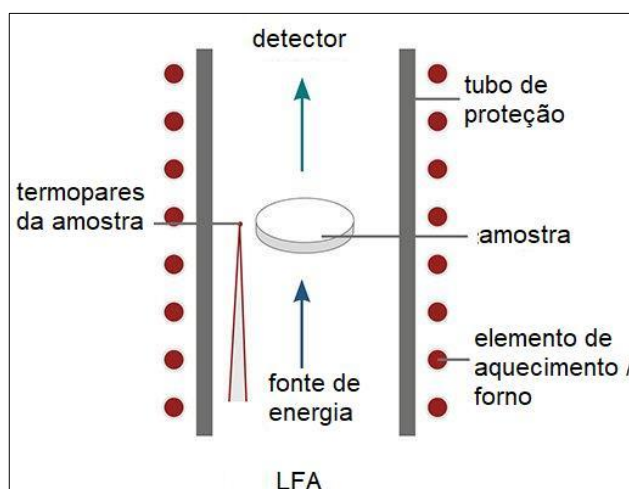
A_b – amplitude da referência índio (W);

- m_s – massa da amostra (g);
- β – taxa de aquecimento constante (K/s);
- c_p – calor específico da amostra (J/g.K).

3.3.4.2 Ensaio de Condutividade Térmica

Outra forma de avaliar o desempenho térmico das argamassas é através da condutividade térmica. O equipamento proposto para este ensaio foi o LFA 457 MicroFlash (Laser Flash Apparatus) da marca Netzsch no IMC (Instituto de Materiais Cerâmicos) da Universidade de Caxias do Sul. O princípio do método LFA consiste em, a partir de uma amostra com 12,7mm de diâmetro e 3mm de espessura, a superfície inferior da amostra é aquecida por um curto pulso de energia (laser), com a mudança de temperatura resultante na superfície superior registra-se a medida através do detector infravermelho, conforme ilustra a Figura 24 (NETZSCH, 2019).

Figura 24 – Método LFA



Fonte: Netzsch (2019).

Os corpos de prova permaneceram condicionados a uma temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa de $60 \pm 5\%$ até a idade de 28 dias. Na confecção das amostras fixou-se o diâmetro necessário para o ensaio. Não obstante, as amostras de argamassas com a idade de 28 dias apresentaram-se muito porosas, não sendo possível obter a espessura de 3mm adequada para uso no equipamento de LFA. Realizou-se tentativas de moldagem em recipientes com espessura mais próxima à 3mm, entretanto ao desmoldar as amostras encontravam-se muito frágeis, podendo até danificar o equipamento de medição da condutividade térmica.

Dessa forma, com base nos métodos utilizados na literatura técnica, determinou-se a condutividade térmica através aproximação dos valores especificados na ABNT NBR 15220-4:2005 e a densidade de massa aparente das amostras, conforme os estudos de Passos et al. (2016) e Heissler et al. (2017).

Ademais, na pesquisa de Sacht, Rossignolo e Santos (2010) através do plano experimental da medição de condutividade térmica pelo método fio quente paralelo, constataram que os dados obtidos são muito próximos aos da ABNT NBR 15220-4:2005.

Segundo a ABNT NBR 15220-4:2005, o cálculo da condutividade térmica é obtido pela divisão do fluxo de calor pelo gradiente de temperatura, isto é (Equação 9):

$$\lambda = \frac{q/A}{\Delta T/e} \quad (9)$$

Onde:

q = fluxo de calor por condução (W);

e = espessura do corpo de prova (m);

A = área do corpo de prova (m²);

ΔT = diferença de temperatura entre as faces (K);

λ = condutividade térmica (W/(m.K)).

Já a resistência térmica, conforme a norma referida, pode ser obtida pela Equação 10:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (10)$$

Onde:

e = espessura do corpo de prova (m);

λ = condutividade térmica (W/(m.K));

R = resistência térmica ((m².K)/W).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e a análise dos ensaios das argamassas no estado fresco e endurecido do estudo em questão. Realizou-se ensaios para avaliar as propriedades térmicas de argamassas com a incorporação de resíduos de polietileno expandido, EVA e couro. Após a apresentação dos resultados, estes foram analisados, diante das propriedades reológicas, mecânicas e térmicas, com estudos de argamassas relevantes da literatura.

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS NO ESTADO FRESCO

Os resultados obtidos das duas propriedades avaliadas no estado fresco estão apresentados a seguir.

4.1.1 Índice de Consistência

O ensaio de índice de consistência verificou as características reológicas das argamassas no estado fresco. O Quadro 10 apresenta os resultados do ensaio conforme a ABNT NBR 13.276:2016.

Quadro 10 – Dados obtidos no ensaio de consistência das amostras

Material	Teor de resíduo (%)	Abreviação	Índice de consistência (mm)	Relação a/c
Referência	0%	REF	265,0	1,75
Manta de polietileno expandido	25%	M25	257,7	1,58
	50%	M50	258,3	1,55
	75%	M75	258,3	1,46
Couro	25%	C25	255,0	1,65
	50%	C50	200,0	2,32
EVA	25%	EVA25	256,7	1,73
	50%	EVA50	263,3	1,77
	75%	EVA75	259,0	1,90

Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se através dos resultados no Quadro 10 que o teor de água necessário para atingir o índice de consistência estabelecido aumentou nos traços de C50, EVA50 e EVA75. Na amostra com teor de 50% de resíduo de couro em substituição à areia, aumentou-se a quantidade de água para atingir a consistência de 260 ± 5 mm,

não obstante a argamassa não mudou sua trabalhabilidade mantendo-se a consistência de 200mm, mesmo com adição de mais água. Assim, constatou-se inviável o traço C50 e conseqüentemente de 75% de teor de resíduo de couro. Este comportamento era esperado devido à característica do resíduo de aglomerar-se entre suas partículas, que constatou-se na análise granulométrica e ao manusear o resíduo. A Figura 25 ilustra o aspecto da argamassa com resíduo de couro e teor de 50%.

Figura 25 – Comportamento da argamassa C50



Fonte: Elaborado pela autora.

Ademais, no traço com resíduo de EVA com a incorporação de 75% do resíduo apresentou exsudação, conforme ilustra a Figura 26, devido à relação a/c de 1,9 necessária para atingir a trabalhabilidade estabelecida.

Figura 26 – Ensaio de índice de consistência argamassa EVA75



Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme Silva (2017), este acréscimo de água ocorre nas misturas visto que os resíduos se comportam e absorvem água de maneiras diferentes. O EVA foi o resíduo com a maior relação a/c, principalmente o traço com incorporação de 75% de

resíduo. Este comportamento é similar ao descrito por Borges (2015), que evidencia que a composição polimérica e o comportamento esponjoso do EVA são fatores que prejudicam a trabalhabilidade e reações de hidratação da pasta de cimento.

As misturas com couro de Lakraflı et al. (2012) também elevaram mais de 50% a quantidade de água em amostras com apenas 5% de adição do resíduo. Visto que o couro possui propriedades de absorver a água, a mistura não apresentou exsudação, entretanto o C50 não conseguiu obter a trabalhabilidade desejada por permanecer aglomerado entre si, mesmo com a adição contínua de água. Pode-se afirmar então que, para atingir a consistência de $260\pm 5\text{mm}$, a dosagem de incorporação de resíduo de couro não deve ultrapassar 25%.

Já as argamassas com polietileno expandido reduziram o fator *a/c* à medida em que o resíduo foi incorporado. Nos estudos de Badache et al. (2018), o polietileno de alta densidade também aumentou a trabalhabilidade, reduzindo a quantidade de superplastificante necessária na mistura.

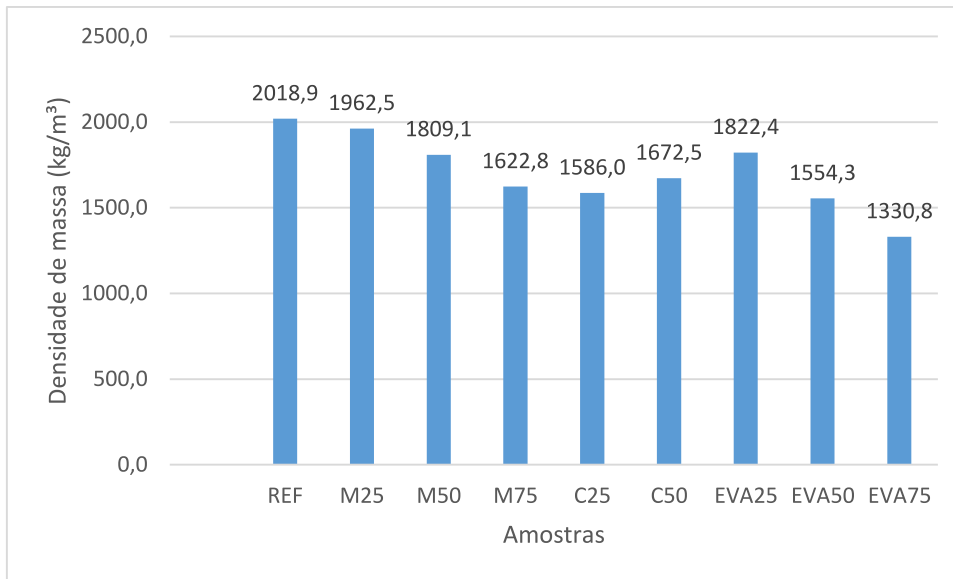
Neville (2016) afirma que a forma das partículas do agregado miúdo influenciam nas propriedades e trabalhabilidade dos compósitos, pois partículas angulosas e com maior teor de vazios exigem maior quantidade de água. Carasek et al. (2016) aponta que compósitos mais porosos, com grãos mais angulosos e menos esféricos, garantem menor trabalhabilidade. O autor justifica que misturas com bom empacotamento possuem maior teor de pasta para envolver os grãos, visto que possui menos vazios, reduzindo o atrito interno e aumentando a sua fluidez.

Uma vez que as amostras utilizaram resíduos com partículas inferiores a 1mm, acredita-se que as propriedades que mais interferiram o índice de consistência das argamassas foram a absorção do agregado e sua distribuição granulométrica, visto que as formas de todos os resíduos eram irregulares.

4.1.2 Densidade de Massa

O Gráfico 6 apresenta os valores de densidade de massa das amostras estudadas no estado fresco.

Gráfico 6 – Densidade de massa das argamassas no estado fresco

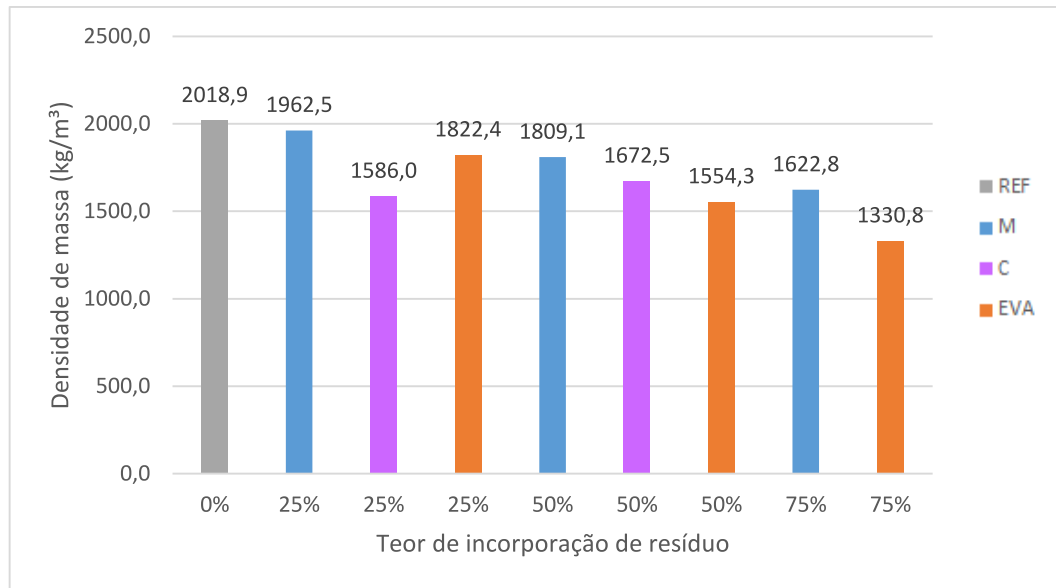


Fonte: Elaborado pela autora.

Através da análise do gráfico, pode-se observar que todas as amostras apresentaram densidade inferior à argamassa de referência. Ademais, a medida em que o teor de incorporação do resíduo aumentou, as densidades das amostras diminuíram, com exceção do resíduo de couro, o qual aumentou a densidade congruentemente ao aumento do teor de resíduo.

Conforme o Gráfico 7 salienta, as argamassas que apresentaram as menores densidades entre os teores de incorporação, foram os resíduos de couro e EVA. Mesmo que a manta de polietileno tenha sido o resíduo com a menor massa específica e unitária, os resultados de densidade de massa das argamassas apontaram que sua incorporação na mistura não resultou em uma diminuição da densidade de massa significativa.

Gráfico 7 – Densidade de massa das argamassas conforme teores de resíduo



Fonte: Elaborado pela autora.

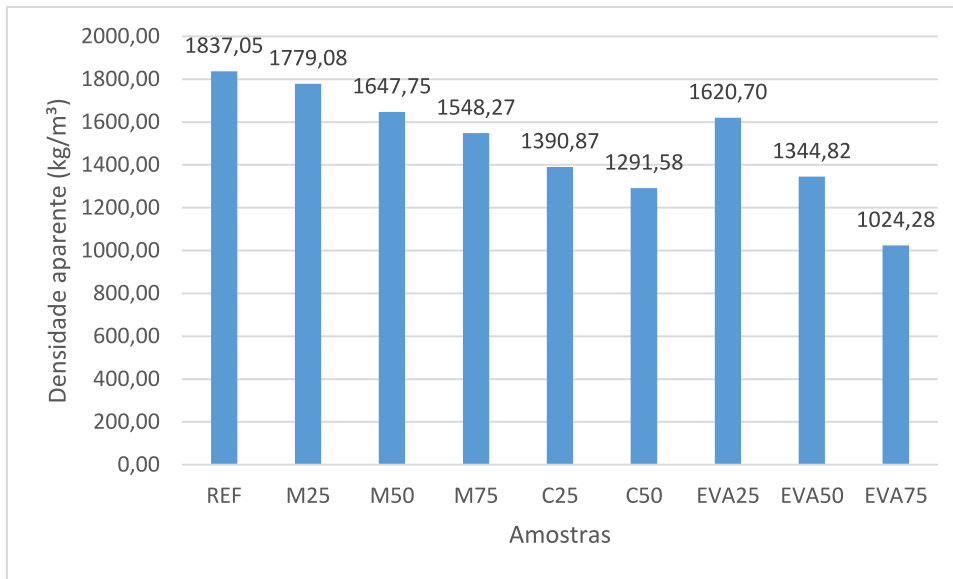
4.2 PROPRIEDADES FÍSICAS NO ESTADO ENDURECIDO

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios no estado endurecido das argamassas.

4.2.1 Densidade de Massa Aparente

Os valores de densidade de massa aparente no estado endurecido das amostras analisadas encontram-se no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Densidade de massa aparente das argamassas



Fonte: Elaborado pela autora.

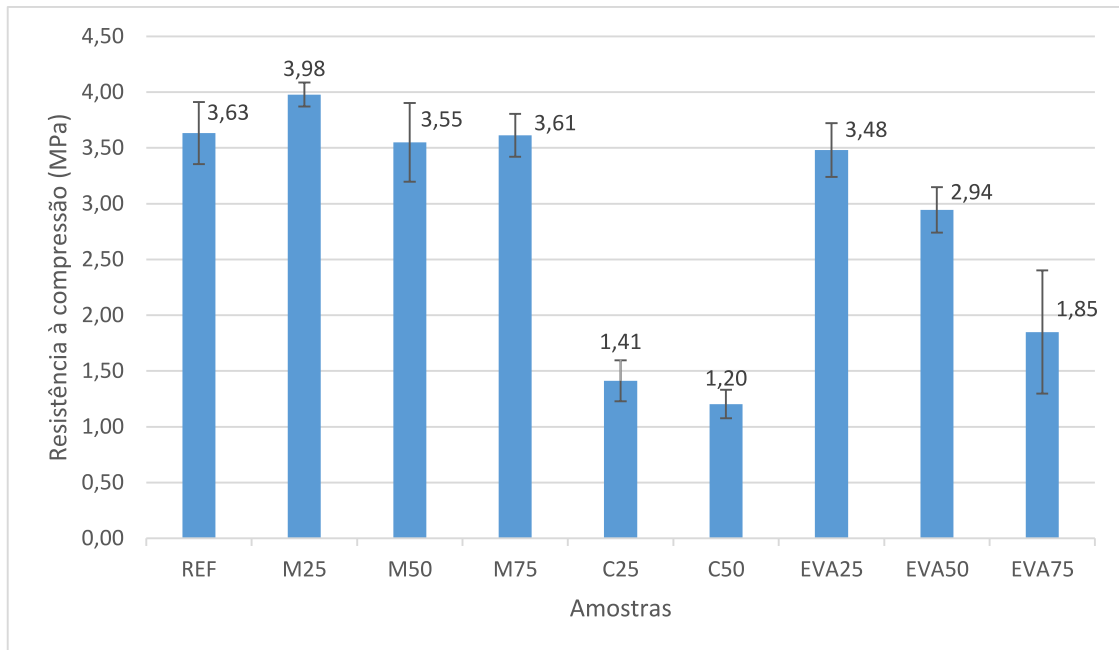
As argamassas apresentaram comportamento em conformidade com os resultados da densidade de massa no estado fresco. Não obstante, a amostra C50, enquanto que em seu estado fresco apresentava densidade de massa maior em relação ao C25, no estado endurecido obteve densidade aparente menor que a do traço com 25% de incorporação do resíduo de couro.

Sabe-se que para as propriedades térmicas a densidade possui influência para a condutividade térmica, sendo que quanto maior for a densidade, maior tende a ser sua condutividade térmica, uma vez que o material é mais condutor do que o ar compreendido em seus poros (SILVA, 2017).

4.2.2 Resistência à Compressão e à Tração na Flexão

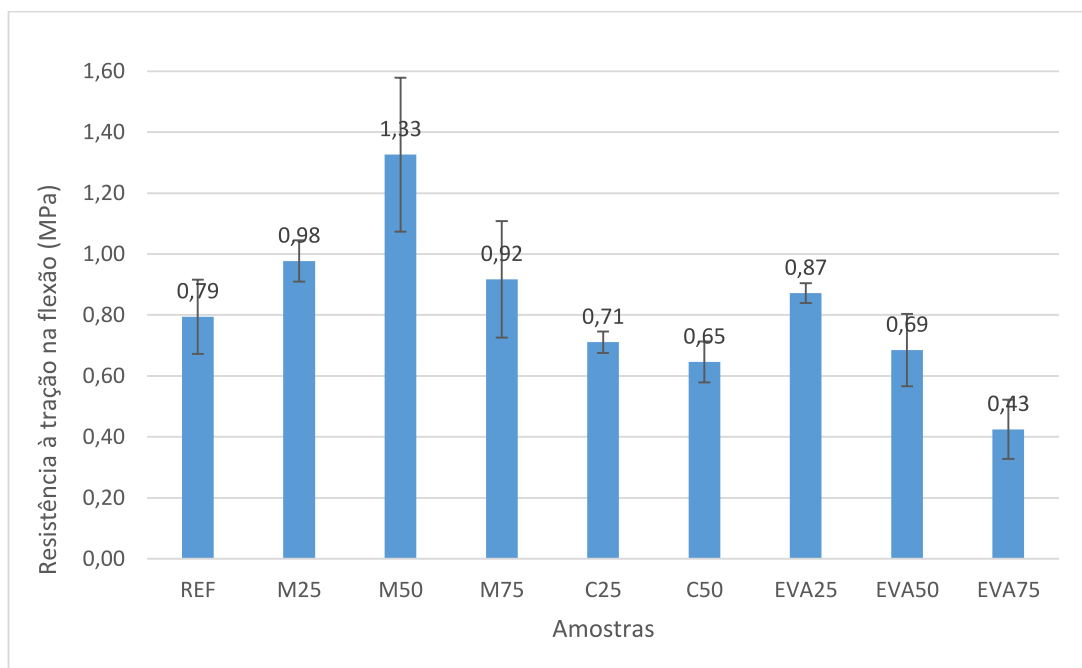
A influência dos resíduos na resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas foram verificadas no estado endurecido e os resultados estão apresentados no Gráfico 9 e Gráfico 10. Os dados obtidos nos ensaios encontram-se no Apêndice B e Apêndice C.

Gráfico 9 – Resistência à compressão das amostras



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 10 – Resistência à tração na flexão das amostras



Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando os Gráficos Gráfico 9 e Gráfico 10, pode-se observar que apenas o traço com 25% de incorporação de resíduo de polietileno expandido aumentou a resistência à compressão em relação ao de referência, enquanto que para a

resistência à tração na flexão todas as amostras com este resíduo obtiveram resistência superior.

Ademais, com o aumento do teor de incorporação de resíduos, ocorreu uma redução nas resistências, exceto para a amostra M50 que obteve destaque na resistência à tração na flexão.

Todas as amostras romperam na resistência à tração na flexão de forma muito similar, sendo que não ocorreu ruptura total das amostras. A Figura 27, ilustra a forma da ruptura da amostra de referência após o ensaio.

Figura 27 – Aspecto da ruptura da amostra de referência após o ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Elaborado pela autora.

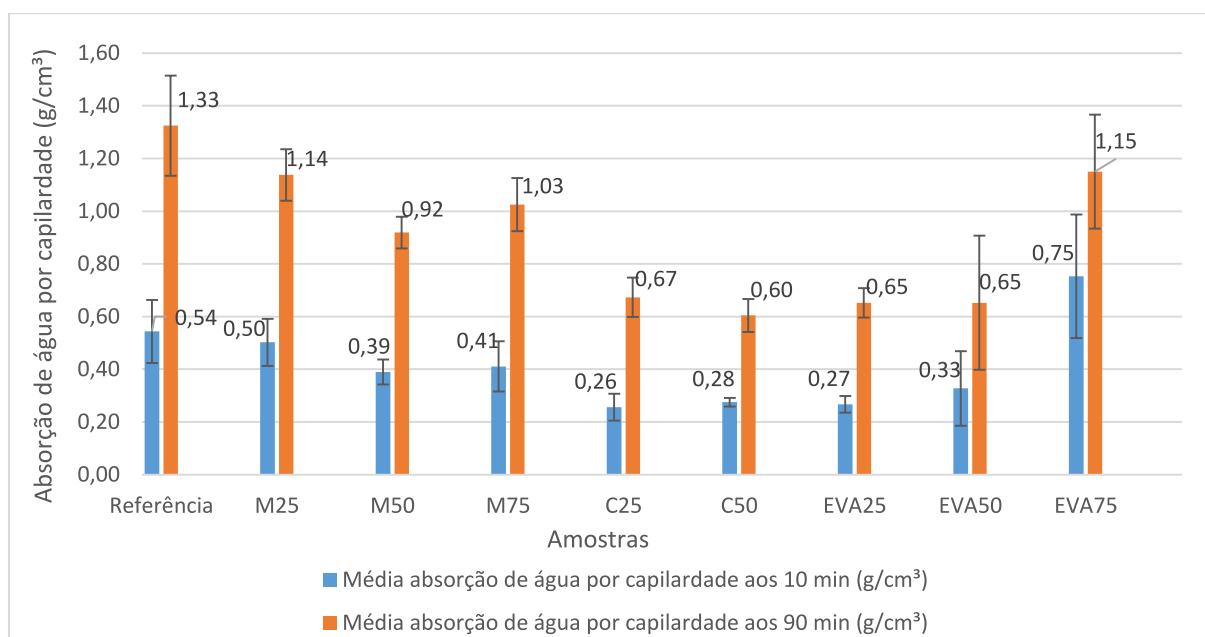
Dentre as pesquisas que investigaram o potencial térmico de argamassas com resíduos como EPS de alta densidade, lã de rocha, lã de vidro e vermiculita, folhas de PVC expandidas, vidro, casca e palha de arroz, pellets de madeira, borracha da recauchutagem de pneus, resíduos cerâmicos de construção, apresentaram uma redução de mais de 50% nas propriedades mecânicas das argamassas (FONTES, 2013; PITEIRA, 2015; MONTEIRO, 2015; PASSOS et al., 2016; SILVA, 2017; SIKORA et al., 2017; LATROCH et al., 2018).

Já Badache et al. (2018), que utilizaram um material similar ao polietileno expandido – polietileno de alta densidade – obtiveram redução da resistência à compressão cerca de 38%, enquanto as amostras deste estudo obtiveram resultados iguais ou superiores tanto na resistência à compressão quanto à tração na flexão. As amostras com couro de Lakrafi et al. (2012) também reduziram na resistência à compressão, não obstante o C25 e C50 obtiveram melhor desempenho quanto a resistência à tração na flexão.

4.2.3 Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade

Os valores obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, nos intervalos de tempo de 10 e 90 minutos estão apresentados no Gráfico 11. O Apêndice D apresenta os dados do ensaio.

Gráfico 11 – Absorção de água por capilaridade das argamassas no intervalo de 10 e 90 minutos



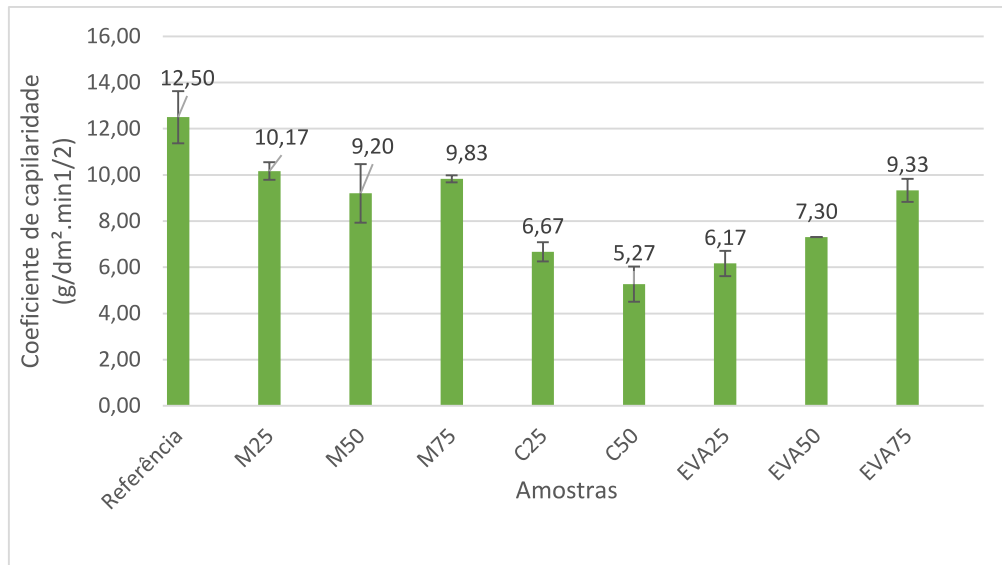
Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados das amostras aos 10 e 90 minutos se comportaram de maneira similar, sendo que todas argamassas obtiveram absorção de água por capilaridade inferior ao de referência. Se tratando de uma argamassa para aplicação em revestimento externo, esta propriedade é importante devido ao papel de estanqueidade que deve exercer.

Para o resíduo de polietileno expandido o aumento do teor de resíduo não foi proporcional à absorção de água por capilaridade, sendo que a menor absorção foi do M50. O resíduo de couro apresentou a menor absorção entre as amostras – 0,60 g/cm³ no traço C50 aos 90 minutos. Já o resíduo de EVA se comportou de forma muito similar nos traços de 25 e 50%, não obstante, o EVA75 quase duplicou o valor de absorção de água.

Calculou-se também o coeficiente de capilaridade das amostras e está apresentado no Gráfico 12.

Gráfico 12 – Coeficiente de capilaridade das argamassas



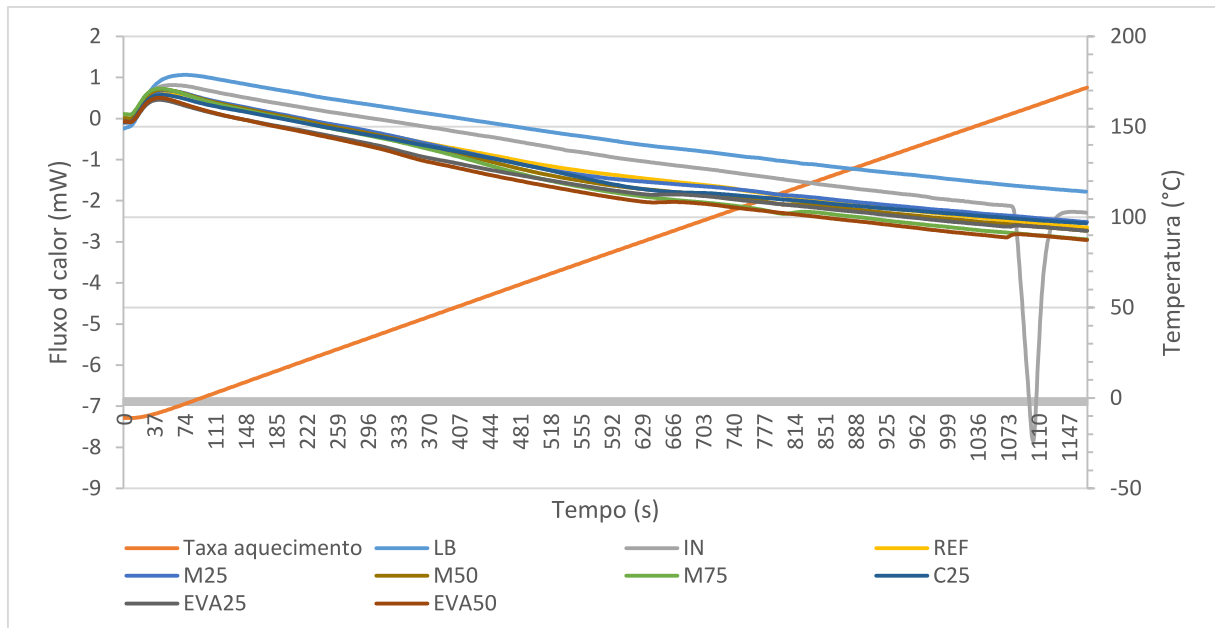
Fonte: Elaborado pela autora.

O Gráfico 12 indica que a incorporação de resíduos reduziu o coeficiente de capilaridade das argamassas, aumentando sua impermeabilidade e evitando certas patologias. Assim, não é possível estabelecer uma relação entre o teor de incorporação dos resíduos e sua absorção de água por capilaridade, mas há indicação que a presença dos resíduos estudados e a redução do teor de areia no traço melhoraram a estanqueidade das argamassas.

4.2.4 Calorimetria Diferencial de Varredura

A análise térmica das amostras através da Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) está apresentada no Gráfico 13, além das curvas do índio e linha base (cadinhos vazios) para referência deste ensaio.

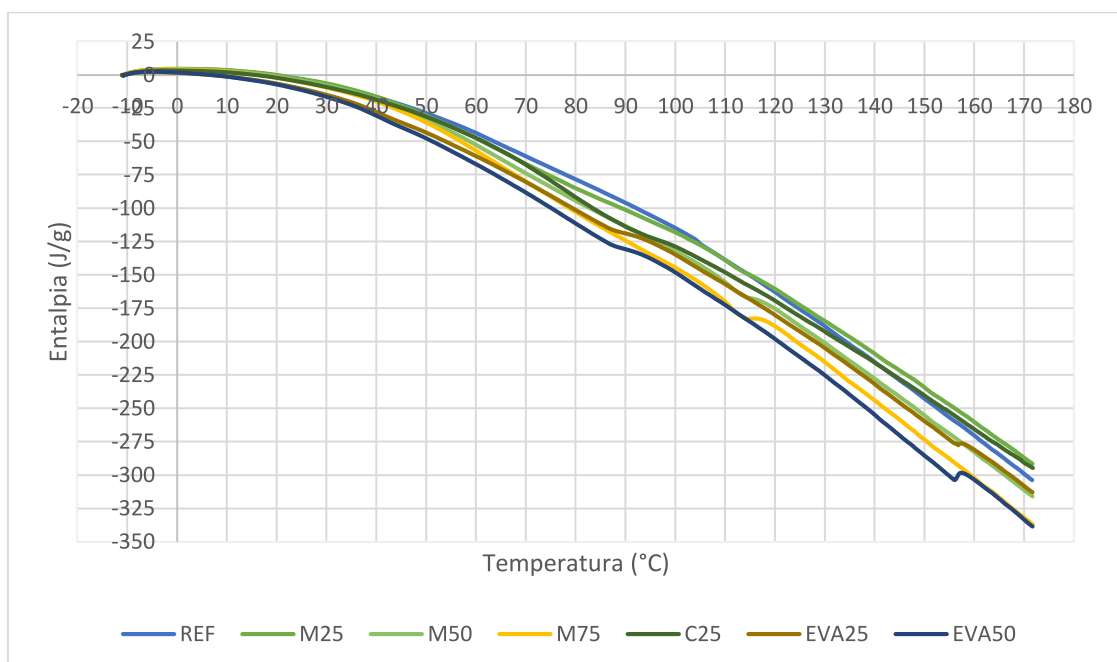
Gráfico 13 – Análise térmica DSC



Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar no Gráfico 13 que as amostras sofreram um pequeno pico exotérmico em torno de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e com o aumento da temperatura até $170\text{ }^{\circ}\text{C}$, apenas o índio apresentou pico endotérmico (fusão) nesta faixa de temperatura analisada em torno de $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, devido à transformação do seu estado físico (IONASHIRO, 2005; FRIGIONE et al., 2020).

Gráfico 14 – Entalpia das amostras através do DSC



Fonte: Elaborado pela autora.

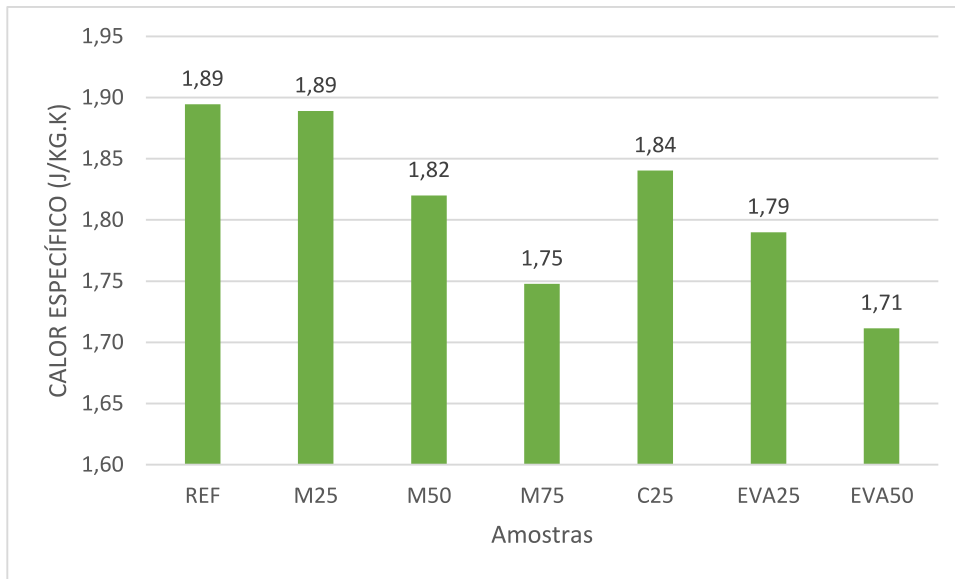
O Gráfico 14 mostra a entalpia de cada amostra durante o aquecimento dentro de um intervalo de -10°C a 170°C , sendo que a entalpia das amostras aumentou com a temperatura. A amostra de argamassa de referência apresentou um comportamento constante de entalpia, sem picos, com o aumento da temperatura, não obstante a entalpia das amostras com incorporação de resíduo variou com pequenos picos durante o aquecimento. Na máxima temperatura atingida no ensaio, o M25 apresentou entalpia de $-291,5 \text{ J/g}$, M50 de $-316,02 \text{ J/g}$, M75 de $-337,2 \text{ J/g}$, C25 de $-294,6 \text{ J/g}$, EVA25 $-312,9 \text{ J/g}$ e o EVA50 de $-338,75 \text{ J/g}$, enquanto a amostra de referência $-303,94 \text{ J/g}$. Esta alteração de linearidade de comportamento das curvas de entalpia em relação à referência, se deve à diferença das propriedades térmicas dos resíduos incorporados.

Apenas os traços M75 e o EVA50 apresentaram aumento em torno de 34 J/g da entalpia em relação à argamassa de referência e o M50 e EVA25 aumentaram 12 J/g e 9 J/g , respectivamente, enquanto o M25 e C25 reduziram cerca de 10 J/g . Nos estudos de Guardia et al. (2019) a entalpia das argamassas com adição de agregados leves, analisada até os 28°C , obteve uma entalpia similar aos dados obtidos no ensaio, sendo que a adição de perlita aumentou a entalpia 10 J/g em relação à argamassa de referência.

As amostras que elevaram a entalpia em relação à referência – M75, EVA50, M50 e EVA25 – requerem mais energia (maior entalpia) e consequentemente aumentaram o isolamento térmico, reduzindo sua condutividade térmica (GUARDIA et al., 2019).

O cálculo do calor específico das argamassas foi realizado pelo método das amplitudes e estão apresentados no Gráfico 15.

Gráfico 15 – Calor específico das amostras



Fonte: Elaborado pela autora.

Como esperado, através da análise prévia dos resultados de entalpia, o calor específico do EVA50, M75, EVA25 e M50 reduziram em relação ao de referência, melhorando suas propriedades térmicas. Observa-se também que a incorporação de apenas 25% de resíduo, seja qual for, causou menos impacto no comportamento térmico.

A ABNT NBR 15220-2:2005 apresenta valores de referência de calor específico para a argamassa comum e de gesso (ou cal e gesso) de 1,00 e 0,84 J/(kg.K), respectivamente. Os resultados encontrados divergem dos apontados pela norma, entretanto, conforme Costa (2008), o calor específico varia conforme a temperatura e não é constante durante o aquecimento, assim, ao definir-se a variação de temperatura sofrida pelo sistema durante a situação que deseja-se avaliar, obtém-se o calor específico do sistema correspondente à transformação considerada.

4.2.5 Condutividade Térmica

O resultado da condutividade térmica das amostras, determinado através da densidade de massa aparente e a aproximação de valores especificados na ABNT NBR 15220-4:2005, está apresentado no Quadro 11.

Quadro 11 – Resultados condutividade, resistência e transmitância térmica

Amostras	Densidade aparente (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/(m.K))	Resistência Térmica (m ² K/W)	Transmitância Térmica (W/m ² K)
REF	1837,05	1,15	0,02875	34,78
M25	1779,08	0,70	0,01750	57,14
M50	1647,75	0,70	0,01750	57,14
M75	1548,27	0,70	0,01750	57,14
C25	1390,87	0,70	0,01750	57,14
C50	1291,58	0,70	0,01750	57,14
EVA25	1620,70	0,70	0,01750	57,14
EVA50	1344,82	0,70	0,01750	57,14
EVA75	1024,28	0,70	0,01750	57,14

Fonte: Elaborado pela autora.

Todas as amostras analisadas apresentaram condutividade térmica inferior à argamassa de referência. A redução da condutividade térmica está relacionada à densidade aparente do material, à medida em que a densidade diminui, provoca a diminuição da condutividade térmica também (SILVA, 2017). Como esperado, os resíduos possuem massa específica inferior ao agregado natural – mais de 50% menor – assim, apresentaram menor densidade aparente e conseqüentemente, menor condutividade térmica, reduzindo cerca de 39% a condutividade em relação ao compósito de referência.

Os resultados obtidos mostraram-se promissores, quando comparado com outros estudos apresentados na literatura.

Os resultados dos compósitos com polietileno expandido foram semelhantes ao observado por Badache et al. (2018), que indicou que a substituição de 15, 30, 45 e 60% de areia por polietileno de alta densidade reduziu a condutividade cerca de 10, 20, 31 e 41%, respectivamente, em relação à argamassa de referência.

Lakrafli et al. (2012) também pesquisaram a incorporação de resíduo de indústria de couro em argamassas e verificaram que com apenas 5% de incorporação do resíduo a condutividade térmica foi reduzida em cerca de 80% em relação ao compósito sem resíduo. Ademais, a densidade da amostra com 5% de couro de Lakrafli et al. (2012) é muito próximo ao valor encontrado para o traço C25.

Avaliando entre outros resíduos, como borracha da recauchutagem de pneus, vidro, folhas de PVC expandidas (EPVC) dos estudos de Piteira (2015), Sikora et al. (2017) e Latroch et al. (2018), estes foram os que obtiveram valores e comportamento

próximos de condutividade térmica comparado aos resíduos analisados nesta pesquisa.

A partir da análise dos resultados, percebe-se que os valores obtidos são satisfatórios pela redução da condutividade térmica, e através da pesquisa de outros autores, percebe-se que estes valores podem ser ainda mais promissores por meio de uma investigação de ensaio laboratorial.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Buscar pelo melhor conforto térmico é um critério importante para a eficiência energética e para o desempenho das edificações. Optar por essa melhoria diante de materiais e sistemas construtivos inovadores traça um caminho novo para diversos arquitetos e engenheiros.

Os parâmetros e limites fornecidos pela ABNT NBR 15.575:2013 proporcionaram uma quebra de paradigmas na construção civil, direcionando a elaboração de projetos que atendam a níveis mínimos de qualidade e habitabilidade, tornando o desempenho um balizador de decisões e não apenas o custo de projeto. Este cenário proporciona o crescimento de tecnologias inovadoras e sustentáveis, como por exemplo, através da melhoria da eficiência energética que contribui para a redução de uso de ar condicionado utilizado para manter um bom condicionamento térmico em edificações.

Tendo em vista que a envoltória das edificações afeta a qualidade térmica das edificações, esta pesquisa apresenta resultados da avaliação de materiais inovadores compósitos para melhoria do desempenho térmico com a incorporação de resíduos de polietileno expandido, couro e EVA em argamassas para revestimento. A investigação foi realizada através de métodos de ensaios laboratoriais e comparativos.

As massas específicas e unitárias dos resíduos apresentaram-se inferiores aos dados da areia, sendo o resíduo de polietileno expandido o de menor massa, seguido do couro e EVA. Este comportamento foi coerente com os resultados dos ensaio de densidade de massa no estado fresco e densidade aparente no estado endurecido. De modo geral, a redução da densidade dos traços de argamassa, proporcionou uma condutividade térmica menor.

Analisando-se o comportamento térmico os resíduos incorporados na argamassa, observou-se diferença de comportamento quanto ao teor de incorporação e o tipo de resíduo, sendo que os traços EVA75 e C50, diante das características reológicas, tornaram-se inviáveis devido à elevada relação a/c necessária para atingir uma boa trabalhabilidade, causando até exsudação.

No âmbito das propriedades térmicas, o ensaios laboratoriais apresentaram resultados quanto à análise térmica por Calorimetria Diferencial de Varredura, entalpia e calor específico. Enquanto que a condutividade térmica foi obtida através dos dados da ABNT NBR 15220-4:2005. Os compósitos com resíduo apresentaram

condutividade térmica inferior à argamassa de referência. Os resultados evidenciaram que os resíduos podem influenciar positivamente no comportamento térmico das argamassas destinadas ao revestimento externo.

No ensaio de DSC, pode-se observar que o valor de entalpia foi maior para os traços EVA50 e M75 em relação à argamassa de referência, resultando em maior isolamento térmico e menor condutividade térmica. Como esperado, os calores específicos desses compósitos reduziram.

Ademais, diante de outras propriedades importantes para a argamassa de revestimento externo, como resistência à compressão e tração na flexão, absorção por capilaridade – relacionada a impermeabilidade e certas patologias –, relação água/cimento, os resultados apontam no aumento ou similaridade de desempenho em, relação ao traço convencional, com a incorporação de resíduos de polietileno expandido dentre todos os teores e do EVA com 25% de incorporação.

Os compósitos estudados, em especial o EVA50 e M75, possuem perspectiva de ser uma opção de revestimento externo na construção civil, uma vez que apresentam características com potencial de isolamento térmico e propriedades mecânicas e reológicas satisfatórias comparada à argamassa de referência, além de contribuir para a sustentabilidade através da utilização de materiais reciclados em substituição parcial ao agregado miúdo natural. Visto que o presente trabalho utilizou resíduos provenientes de descartes em setores como a construção civil e indústria calçadista, a pesquisa contribuiu para a destinação e minimização de impactos ambientais gerado pelo seu descarte.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Investigar a condutividade térmica através de ensaios laboratoriais como o método de placa quente protegida;
- Investigar outras propriedades das argamassas com resíduos, tais como aderência, desempenho acústico, durabilidade, estanqueidade, resistência ao fogo;
- Investigar a eficiência energética da aplicação do revestimento externo em uma edificação através da simulação computacional;

- Investigar a viabilidade econômica das argamassas com adição de resíduos;
- Investigar outras formas de moagem que utilizem menos energia;
- Investigar a aplicação dos resíduos com composições granulométricas diferentes e partículas maiores;
- Investigar as argamassas com resíduos quanto porosidade e microestrutura interna no compósito.

REFERÊNCIAS

AATTACHE, A.; MAHI, A.; SOLTANI, R.; MOULI, M.; BENOSMAN, A. S. Experimental study on thermo-mechanical properties of Polymer Modified Mortar. **Materials & Design**, v. 52, p. 459-469, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C-177/19**: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. West Conshohocken, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D-1622/14**: Standard Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics. West Conshohocken, 2014.

AMORIM, J. A. de. **Estudo teórico e experimental do calor específico e da cinética de sorção em reator fixo**. Paraíba, 2012, 121f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2012.

ANDRADE, J. J. de O.; POSSAN, E.; SQUIAVON, J. Z.; ORTOLAN, T. L. P. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 70–83, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13.276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13.278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13.279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13.281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15.220-2**: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15.220-4:** Desempenho térmico de edificações - Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15.259:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16.541:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaio. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16.697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7.211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7213:** Agregados leves para concreto isolante térmico – Requisitos. Rio de Janeiro. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575:** Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro. 2013.

BADACHE, A.; BENOSMAN, A. S.; SENHADJI, Y; MOULI, M. Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE). **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 40-52, 2018.

BORGES, J. G. K. **Análise das propriedades acústicas de contrapisos produzidos com materiais reciclados**. São Leopoldo, 2015, 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2015.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: < <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em: 23 set. 2018.

CARASEK, H.; ARAUJO, R. C.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 714-732, 2016.

CHINCHILLAS-CHINCHILLAS, M. J.; GAXIOLA, A.; ALVARADO-BELTRÁN, C. G.; OROZCO-CARMONA, V. M.; PELLEGRINI-CERVANTES, M. J. RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, M.; CASTRO-BELTRÁN, A. A new application of recycled-PET/PAN composite nanofibers to cement-based materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, 2020.

COLANGELO, F.; CIOFFI, R. Mechanical properties and durability of mortar containing fine fraction of demolition wastes produced by selective demolition in South Italy. **Composites Part B: Engineering**, v. 115, p. 43–50, 2017.

COSTA, E. C. da. **Física aplicada à construção: conforto térmico.** 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

DIAS, R. **Sustentabilidade: origem e fundamentos, educação e governança global, modelo de desenvolvimento.** São Paulo: Atlas, 2015.

FLACH, F. **Investigação do potencial de absorção acústica de compósitos de argamassa com materiais reciclados.** São Leopoldo, 2012, 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2012.

FONTES, T. I. M. **Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional - Otimização de características com resíduo cerâmico e metacaulino.** 2013. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa (UNL), Lisboa, 2013.

FRIGIONE, M.; LETTIERI, M.; SARCINELLA, A.; AGUIAR, J. B. DE; Sustainable polymer-based Phase Change Materials for energy efficiency in buildings and their application in aerial lime mortars. **Construction and Building Materials**, v. 231, 2020.

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

GUARDIA, C.; BARLUENGA, G.; PALOMAR, I.; DIARCE, G. Thermal enhanced cement-lime mortars with phase change materials (PCM), lightweight aggregate and cellulose fibers. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 586–594, 2019.

GUARDIA, C.; BARLUENGA, G.; PALOMAR, I.; DIARCE, G. Thermal enhanced cement-lime mortars with phase change materials (PCM), lightweight aggregate and cellulose fibers. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 586–594, 2019.

GUPTA, L. K.; VYAS, A. K. Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 155–164, 2018.

GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ, S.; GADEA, J. ; RODRÍGUEZ, A.; JUNCO, C.; CALDERÓN, V. Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 653-658, 2012.

HEINECK, S. **Desempenho de argamassas de revestimento com incorporação da fração miúda da britagem de concreto**. São Leopoldo, 2012, 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2012.

HEISSLER, R. F.; CADORE, B. C.; PIRES, J. R.; CHRIST, R. Caracterização térmica de contrapisos produzidos com poliuretano em substituição de areia. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2017. **Anais...** São Leopoldo.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 1. ed. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: 25 set. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Technology Roadmap Energy efficient building envelopes**. Paris, 2013. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/technology-roadmap-energy-efficient-building-envelopes>>. Acesso em: 20 dez. 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 11357-1: Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC) - Part 1: General principles**. Geneva, 2016.

IONASHIRO, M. G. **Fundamentos da Termogravimetria, Análise Térmica Diferencial, Calorimetria Exploratória Diferencial**. São Paulo: Giz, 2005.

JUNCO, C.; RODRÍGUEZ, A.; CALDERÓN, V.; MUÑOZ-RUPÉREZ, C.; GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ, S. Fatigue durability test of mortars incorporating polyurethane foam wastes, **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 373-381, 2018.

KIBERT, C. J. **Sustainable construction: green building design and delivery**. 3. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

KREIDER, J. F.; RABL, A. **Heating and cooling of buildings: design for efficiency**. New York: McGraw-Hill, 1994.

LAKRAFLI, H.; TAHIRI, S.; ALBIZANE, A.; OTMANI, M.E. EL. Effect of wet blue chrome shaving and buffing dust of leather industry on the thermal conductivity of cement and plaster based materials. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 590-596, 2012.

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

LATROCH, N.; BENOSMAN, A. S.; BOUHAMOU, N. E.; SENHADJI, Y.; MOULI, M. Physico-mechanical and thermal properties of composite mortars containing lightweight aggregates of expanded polyvinyl chloride. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 77–87, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. Editor McGraw-Hill Professional Publishing. 4^o Edição, 2014.

METZ, L. E. G. **Avaliação ambiental dos resíduos sólidos oriundos da produção de couros no Rio Grande do Sul**. São Leopoldo, 2016, 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Dezembro/2019. Brasília, 2019. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2019>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **CMSE**: Consumo total de energia volta a crescer. Brasília, 2018b. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/cmse-consumo-total-de-energia-volta-a-crescer>. Acesso em: 02 jul. 2018.

MONTEIRO, M. M. **Caraterização de Argamassas com Incorporação de Resíduos de Casca e Palha de Arroz**. 2015. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), Coimbra, 2015.

MORAN, Michael J. et al. **Introdução à engenharia de sistemas térmicos**: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MUELLER, C. C. **Os economistas e as relações entre o sistema econômico e o meio ambiente**. 2 ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2012.

NASCIMENTO NETO, P. **Resíduos sólidos urbanos**: perspectivas de gestão intermunicipal em regiões metropolitanas. São Paulo: Atlas, 2013.

NETZSCH. **LFA 457 MicroFlash**. Selb/Bavária, 2019. Disponível em: <<https://www.netzsch-thermal-analysis.com/pt/produtos-solucoes/difusividade-termica-condutividade/lfa-457-microflash/>>. Acesso em: 17 ago. 2019.

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

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre: Bookman. 2^o Edição, 2013.

PASSOS, P. M. dos; CARASEK, H.; AMARAL, G. M. Avaliação da capacidade isolante térmica de revestimentos de argamassa. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016. p. 282–298.

PERKIN ELMER. **DSC 4000**. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.perkinelmer.com.br>>. Acesso em: 7 dez. 2018.

PINEWELLS. **Pellets, o produto/especificações técnicas**. Sarzedo, 2018. Disponível em: <<https://pinewells.com/pellets-o-produto>>. Acesso em: 15 jul. 2018.

PILEIRA, R. M. V. **Argamassas de cal hidráulica natural com resíduos de borracha da recauchutagem de pneus**. 2015. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa (UNL), Lisboa, 2015.

ROAF, S.; FUENTES, M.; THOMAS, S. **Ecohouse: a casa ambientalmente sustentável**. 4. ed. Porto. Alegre: Bookman, 2014.

SENHADJI, Y.; SIAD, H.; ESCADEILLAS, G.; BENOSMAN, A. S.; CHIHAOUI, R.; MOULI, M.; LACHEMI, M. Physical, mechanical and thermal properties of lightweight composite mortars containing recycled polyvinyl chloride. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 198-207, 2019.

SHIMADZU. **DSC 60 Series**. Quioto, 2012. Disponível em: <<https://shimadzu.com.au/system/files/60%20Seriesc160-e006h.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2019.

SIKORA, P.; HORSZCZARUK, E.; SKOCZYLAS, K.; RUCINSKA, T. Thermal Properties of Cement Mortars Containing Waste Glass Aggregate and Nanosilica. **Procedia Engineering**, v. 196, n. June, p. 159–166, 2017.

SILVA, A. H. da. **Avaliação ambiental do setor calçadista sob a ótica da gestão de resíduos sólidos**. São Leopoldo, 2016, 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2016.

SILVA, A. P. M. R. da. **Impacte de argamassas com pellets de madeira no desempenho energético de um edifício residencial – modelação numérica e experimental**. 2017. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa (UNL), Lisboa, 2017.

TELES, R. D. **Análise da geração de resíduos de construção e demolição em obras de habitações populares horizontais: estudo de caso**. São Leopoldo, 2015, 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2015.

THEODORO, S. H. (Org.). **Conflito e uso sustentável dos recursos naturais**. Rio de Janeiro: Garamond, 2002.

WANG, X.; SUN, X.; YU, C. W. F. Building envelope with variable thermal performance: Opportunities and challenges. **Indoor and Built Environment**, v. 27(6), p. 729–733, 2018.

APÊNDICE A – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

Análise granulométrica – Areia Média									
Peneira Série ABNT		Ensaio 1			Ensaio 2			Retida Média	Módulo de finura
		Retida	Retida	Acumulada	Retida	Retida	Acumulada		
#	mm	g	%	%	g	%	%	%	
3/8"	9,52	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
1/4"	6,30	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
4	4,76	0,90	0,2	0,2	2,7	0,5	0,5	0,4	0,4
8	2,40	16,70	3,3	3,5	22,7	4,5	5,1	4,3	4,3
16	1,19	50,50	10,1	13,6	73,5	14,7	19,8	16,7	16,7
30	0,59	106,80	21,4	35,0	125,9	25,2	45,0	40,0	40,0
50	0,297	218,80	43,8	78,7	207,2	41,4	86,4	82,6	82,6
100	0,150	93,70	18,7	97,5	60,7	12,1	98,5	98,0	98,0
Fundo	0	12,6	2,5	100,0	7,3	1,5	100,0	100,0	100,0
Amostra Total		500,00	100	100	500,00	100	100	100,0	2,42
Diâmetro Máximo (mm)		4,76							

Análise granulométrica – Polietileno Expandido									
Peneira Série ABNT		Ensaio 1			Ensaio 2			Retida Média	Módulo de de finura
		Retida	Retida	Acumulada	Retida	Retida	Acumulada		
#	mm	g	%	%	g	%	%	%	
8	2,40	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1,19	0,225	1,7	1,7	0,23	1,8	1,8	1,8	1,8
30	0,59	4,607	35,5	37,3	4,95	38,7	40,5	38,9	38,9
50	0,297	5,316	41,0	78,2	5,02	39,3	79,8	79,0	79,0
100	0,150	2,774	21,4	99,6	2,51	19,6	99,4	99,5	99,5
200	0,075	0,015	0,1	99,7	0,03	0,2	99,7	99,7	99,7
270	0,045	0	0,0	99,7	0,00	0,0	99,7	99,7	99,7
Fundo	0,00	0,033	0,3	100,0	0,04	0,3	100,0	100,0	100,0
Amostra Total		12,97	100	100	12,78	100	100	100	3,19
Diâmetro Máximo (mm)		1,19							

Análise granulométrica – EVA									
Peneira Série ABNT		Ensaio 1			Ensaio 2			Retida Média	Módulo de finura
		Retida	Retida	Acumulada	Retida	Retida	Acumulada		
#	mm	g	%	%	g	%	%	%	
8	2,40	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1,19	9,487	19,1	19,1	10,61	21,3	21,3	20,2	20,2
30	0,59	16,027	32,3	51,3	17,245	34,7	56,0	53,7	53,7
50	0,297	12,847	25,9	77,2	12,736	25,6	81,6	79,4	79,4
100	0,150	10,47	21,1	98,3	8,541	17,2	98,8	98,5	98,5
200	0,075	0	0,0	98,3	0	0,0	98,8	98,5	98,5
270	0,045	0	0,0	98,3	0	0,0	98,8	98,5	98,5
Fundo	0,00	0,864	1,7	100,0	0,589	1,2	100,0	100,0	100,0
Amostra Total		49,70	100	100	49,72	100	100	100	3,50
Diâmetro Máximo (mm)		2,40							

Análise granulométrica – Couro									
Peneira Série ABNT		Ensaio 1			Ensaio 2			Retida Média	Módulo de finura
		Retida	Retida	Acumulada	Retida	Retida	Acumulada		
#	mm	g	%	%	g	%	%	%	
8	2,40	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1,19	9,5	75,5	75,5	9,11	72,2	72,2	73,9	73,9
30	0,59	2,113	16,8	92,3	2,41	19,1	91,3	91,8	91,8
50	0,297	0,746	5,9	98,3	0,86	6,8	98,1	98,2	98,2
100	0,150	0,166	1,3	99,6	0,17	1,3	99,5	99,5	99,5
200	0,075	0,038	0,3	99,9	0,05	0,4	99,9	99,9	99,9
270	0,045	0,003	0,0	99,9	0,01	0,1	99,9	99,9	99,9
Fundo	0,00	0,01	0,1	100,0	0,01	0,1	100,0	100,0	100,0
Amostra Total		12,58	100	100	12,61	100	100	100	3,63
Diâmetro Máximo (mm)		2,40							

APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS AMOSTRAS

Resistência à tração na flexão					
Amostra	CPs	Força prensa (N)	Flexão (MPa)	Desvio máximo absoluto (<-0,3 e >0,3)	Média (MPa)
Referência	CP 1	367	0,86	-0,07	0,79
	CP 2	371	0,87	-0,08	
	CP 3	279	0,65	0,14	
M25	CP 1	443	1,04	-0,06	0,98
	CP 2	386	0,90	0,07	
	CP 3	422	0,99	-0,01	
M50	CP 1	611	1,43	-0,11	1,33
	CP 2	443	1,04	0,29	
	CP 3	644	1,51	-0,18	
M75	CP 1	307	0,72	0,20	0,92
	CP 2	470	1,10	-0,18	
	CP 3	397	0,93	-0,01	
C25	CP 1	291	0,68	0,03	0,71
	CP 2	299	0,70	0,01	
	CP 3	320	0,75	-0,04	
C50	CP 1	288	0,68	-0,03	0,65
	CP 2	243	0,57	0,08	
	CP 3	296	0,69	-0,05	
EVA25	CP 1	357	0,84	0,04	0,87
	CP 2	375	0,88	-0,01	
	CP 3	384	0,90	-0,03	
EVA50	CP 1	255	0,60	0,09	0,69
	CP 2	350	0,82	-0,14	
	CP 3	272	0,64	0,05	
EVA75	CP 1	191	0,45	-0,02	0,43
	CP 2	217	0,51	-0,08	
	CP 3	136	0,32	0,11	

APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À COMPREENSÃO DAS AMOSTRAS

Resistência à compressão					
Amostra	CPs	Força prensa (N)	Compressão (MPa)	Desvio máximo absoluto (<-0,5 e >0,5)	Média (MPa)
Referência	CP 1 A	5277	3,30	0,34	3,63
	CP 1 B	5487	3,43	0,20	
	CP 2 A	6031	3,77	-0,14	
	CP 2 B	6534	4,08	-0,45	
	CP 3 A	5654	3,53	0,10	
	CP 3 B	5905	3,69	-0,06	
M25	CP 1 A	6282	3,93	0,05	3,98
	CP 1 B	6282	3,93	0,05	
	CP 2 A	6408	4,01	-0,03	
	CP 2 B	6408	4,01	-0,03	
	CP 3 A	6659	4,16	-0,18	
	CP 3 B	6157	3,85	0,13	
M50	CP 1 A	5654	3,53	0,02	3,55
	CP 1 B	5151	3,22	0,33	
	CP 2 A *	6785	4,24	-0,58 *	
	CP 2 B	6157	3,85	-0,30	
	CP 3 A	5528	3,46	0,09	
	CP 3 B	5905	3,69	-0,14	
M75	CP 1 A	5528	3,46	0,16	3,61
	CP 1 B	5654	3,53	0,08	
	CP 2 A	5654	3,53	0,08	
	CP 2 B	6031	3,77	-0,16	
	CP 3 A	5528	3,46	0,16	
	CP 3 B	6282	3,93	-0,31	
C25	CP 1 A	1885	1,18	0,23	1,41
	CP 1 B	1885	1,18	0,23	
	CP 2 A	2471	1,54	-0,13	
	CP 2 B	2513	1,57	-0,16	
	CP 3 A	2387	1,49	-0,08	
	CP 3 B	2417	1,51	-0,10	
C50	CP 1 A	2136	1,34	-0,13	1,2
	CP 1 B	1633	1,02	0,18	
	CP 2 A	2010	1,26	-0,05	
	CP 2 B	1759	1,10	0,10	
	CP 3 A	1885	1,18	0,03	
	CP 3 B	2136	1,34	-0,13	

Resistência à compressão					
Amostra	CPs	Força prensa (N)	Compressão (MPa)	Desvio máximo absoluto (<-0,5 e >0,5)	Média (MPa)
EVA25	CP 1 A	5151	3,22	0,26	3,48
	CP 1 B	6157	3,85	-0,37	
	CP 2 A	5528	3,46	0,03	
	CP 2 B	5277	3,30	0,18	
	CP 3 A	5403	3,38	0,10	
	CP 3 B	5905	3,69	-0,21	
EVA50	CP 1 A	4523	2,83	0,12	2,94
	CP 1 B	4902	3,06	-0,12	
	CP 2 A	4272	2,67	0,27	
	CP 2 B	5151	3,22	-0,27	
	CP 3 A	4523	2,83	0,12	
	CP 3 B	4900	3,06	-0,12	
EVA75	CP 1 A	3015	1,88	-0,04	1,85
	CP 1 B	2890	1,81	0,04	
	CP 2 A	2890	1,81	0,04	
	CP 2 B	3040	1,90	-0,05	
	CP 3 A *	1382	0,86	0,63 *	
	CP 3 B *	1131	0,71	0,79 *	

* Valores desconsiderados na resistência à compressão média das amostras, pois o desvio máximo absoluto é < -0,5 ou > 0,5.

APÊNDICE D – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE DAS AMOSTRAS

Amostra	CPs	Massa inicial (g)	Massa após 10 min (g)	Massa após 90 min (g)	Absorção de água por capilaridade aos 10 min (g/cm ³)	Média C (g/cm ³)	Absorção de água por capilaridade aos 90 min (g/cm ³)	Média absorção de água por capilaridade aos 90 min (g/cm ³)
REF	CP 1	482,3	488,8	500	0,41	0,54	1,11	1,33
	CP 2	477,3	486,9	500	0,60		1,42	
	CP 3	479,7	489,7	502,9	0,63		1,45	
M25	CP 1	473,5	479,9	489,9	0,40	0,50	1,03	1,14
	CP 2	473,4	482,1	492,7	0,54		1,21	
	CP 3	470,4	479,4	489,3	0,56		1,18	
M50	CP 1	410,3	416,2	424,5	0,37	0,39	0,89	0,92
	CP 2	423,8	430,9	437,9	0,44		0,88	
	CP 3	416,7	422,4	432,5	0,36		0,99	
M75	CP 1	399,5	404,4	414,1	0,31	0,41	0,91	1,03
	CP 2	409,3	417,2	427	0,49		1,11	
	CP 3	403,6	410,5	420,5	0,43		1,06	
C25	CP 1	362,3	367,1	373,9	0,30	0,26	0,72	0,67
	CP 2	355,9	359,1	365,3	0,20		0,59	
	CP 3	352,8	357,1	364,1	0,27		0,71	
C50	CP 1	331	335,7	341,8	0,29	0,28	0,68	0,60
	CP 2	341,3	345,6	350,2	0,27		0,56	
	CP 3	326,3	330,5	335,6	0,26		0,58	
EVA25	CP 1	422,9	427,7	433,9	0,30	0,27	0,69	0,65
	CP 2	429,4	433,2	438,8	0,24		0,59	
	CP 3	431,9	436,1	442,8	0,26		0,68	
EVA50	CP 1	366,6	370,1	374,2	0,22	0,33	0,47	0,65
	CP 2	360,8	365,2	369,4	0,27		0,54	
	CP 3	353,9	361,7	369	0,49		0,94	
EVA75	CP 1	268,1	271,2	280	0,19*	0,75	0,74	1,15
	CP 2	258,5	267,9	277,7	0,59		1,20	
	CP 3	262,6	277,3	286,7	0,92		1,51	

* Valor desconsiderado na média da absorção de água por capilaridade aos 10 minutos da amostra, pois o desvio máximo absoluto é > 0,3.

Amostra	CPs	Coefficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Média coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Desvio relativo máximo coeficiente de capilaridade < 20% (%)
Referência	CP 1	11,20	12,50	-10,4
	CP 2	13,10		4,8
	CP 3	13,20		5,6
M25	CP 1	10,00	10,17	-1,6
	CP 2	10,60		4,3
	CP 3	9,90		-2,6
M50	CP 1	8,30	9,20	-9,8
	CP 2 *	7,00 *		-
	CP 3	10,10		9,8
M75	CP 1	9,70	9,83	-1,4
	CP 2	9,80		-0,3
	CP 3	10,00		1,7
C25	CP 1	6,80	6,67	2,0
	CP 2	6,20		-7,0
	CP 3	7,00		5,0
C50	CP 1	6,10	5,27	15,8
	CP 2	4,60		-12,7
	CP 3	5,10		-3,2
EVA25	CP 1	6,20	6,17	0,5
	CP 2	5,60		-9,2
	CP 3	6,70		8,6
EVA50	CP 1 *	4,10 *	7,30	-
	CP 2 *	4,20 *		-
	CP 3	7,30		0,0
EVA75	CP 1	8,80	9,33	-5,7
	CP 2	9,80		5,0
	CP 3	9,40		0,7

* Valores desconsiderados na média do coeficiente de capilaridade das amostras, pois – apesar de apresentarem desvio relativo máximo inferior à 20% exigido pela norma – há maior coerência diante a análise dos resultados, tendo em vista o aumento do teor de incorporação dos resíduos.