



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



LAIS SOUSA LEÃO

INFLUÊNCIA DO TIPO DE EPS E MÉTODO DE MISTURA NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Uberlândia

2021

LAIS SOUSA LEÃO

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE EPS E MÉTODO DE MISTURA
NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS DE
REVESTIMENTO**

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

Área de Concentração: Estruturas e Construção Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Eliane Betânia Carvalho Costa

Uberlândia

2021

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

L439
2021

Leão, Lais Sousa, 1995-
Influência do tipo de EPS e método de mistura nas
propriedades de argamassas de revestimento [recurso
eletrônico] / Lais Sousa Leão. - 2021.

Orientadora: Eliane Betânia Carvalho Costa.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.528>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Costa, Eliane Betânia
Carvalho, 1982-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. III.
Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 269, PPGEC				
Data:	20 de Setembro de 2021	Hora de início:	09:00 h	Hora de encerramento:	12:00 h
Matrícula do Discente:	11912ECV012				
Nome do Discente:	Lais Sousa Leão				
Título do Trabalho:	Influência do tipo de EPS e método de mistura nas propriedades de argamassas de revestimento				
Área de concentração:	Estruturas e Construção civil				
Linha de pesquisa:	Construção Civil				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Inovação em Materiais de Construção civil				

Reuniu-se, em sessão pública pela plataforma Conferência Web (MConf) provida pela Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Mônica Batista Leite – UEFS, Leila Aparecida de Castro Motta – FECIV/UFU e Eliane Betânia Carvalho Costa – FECIV/UFU orientadora da candidata.

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

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

Aprovada

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

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

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



Documento assinado eletronicamente por **Eliane Betânia Carvalho Costa, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/09/2021, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leila Aparecida de Castro Motta, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/09/2021, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Monica Batista Leite, Usuário Externo**, em 20/09/2021, às 11:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3010114** e o código CRC **6471E421**.

Referência: Processo nº 23117.057751/2021-29

SEI nº 3010114

Dedico este trabalho à minha mãe, Ives, por
todo o apoio e carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Eliane, por todo o conhecimento compartilhado, compreensão, apoio e paciência. Obrigada por ter me redirecionado tantas vezes, especialmente nos momentos em que tive mais dificuldade.

Agradeço também aos técnicos e laboratórios, sem os quais essa pesquisa jamais seria realizada: Cristiane (Laboratório de Estruturas), Wanderly e Avelino (Laboratório de Materiais), Amanda (Laboratório de Pavimentação), Alisson (Laboratório de Geotecnia) e Rafael (secretário do PPGEC).

Agradeço imensamente à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia pelo corte de materiais (Oficina Mecânica, técnico Ulysses); ao Laboratório Multiusuário de Microscopia de Varredura Eletrônica e ao Laboratório Multiusuário II, nos quais foram realizados os ensaios de caracterização da microestrutura e caracterização dos agregados por análise dinâmica de imagem pelo técnico Rafael.

Também agradeço ao professor José de los Santos Guerra e ao Grupo de Ferroelétricos e Materiais Multifuncionais do Instituto de Física da Universidade Federal de Uberlândia, que forneceram os materiais e métodos necessários para o polimento das amostras, e ao pós-doutorando Atair Carvalho pela ajuda no polimento.

Obrigada à Bruna, representante comercial da Styroform, que facilitou a aquisição do EPS em pérolas; ao Diego, da Camargo Química, e ao Bruno, da Brasmix, pela doação dos aditivos.

Meu muito obrigada à Camila, Renner, Ismara, Leonardo, Yasmine e Gabriel, que foram meus colegas durante a pós-graduação: especialmente ao Leonardo pela companhia durante o desenvolvimento do programa experimental. Aqui também fica minha gratidão à Cris e ao Wanderly por todos os momentos compartilhados durante o tempo em laboratório.

Também agradeço imensamente às professoras Mônica Leite e Leila Motta pela participação nas bancas de qualificação e defesa, que muito contribuíram para a melhoria deste trabalho. Agradeço também as contribuições dos alunos Gabriel Spini e Nicolas Polvore (auxílio na execução do programa experimental), da professora Maria Cláudia Salomão e da engenheira Marylinda França (discussão dos resultados).

Meu muito obrigada ao Filipe, Pedro, Isabela e Marina: a amizade de vocês é muito importante para mim. Obrigada também às minhas tias Magali, Nena, Aparecida, Irinha, minha avó Arlinda e à minha madrinha, Lúcia, por todo o apoio e orações. À minha terapeuta, Anelisa, por prover as ferramentas necessárias que me ajudaram no desenvolvimento pessoal e

profissional. Também sou grata por várias pessoas que me acompanharam, mesmo que de longe, por quem nutro muito carinho: Carol, Erica, Gabi, Fabris, Rebecca, Lucy, Zoë e Matilda.

Agradeço também a todos os músicos, artistas e criadores de conteúdo que acompanhei durante o mestrado, que me inspiraram a seguir em frente, a superar as dificuldades desse período e a conhecer pessoas incríveis.

Agradeço à CAPES pela bolsa de estudos concedida, que me permitiu a dedicação ao mestrado em tempo integral, e encerro meus agradecimentos mencionando a pessoa mais importante de toda a minha trajetória: minha mãe, Ives, fonte inesgotável de apoio, amor, sabedoria e carinho.

“Mesmo a hora mais escura tem apenas sessenta minutos.”

Morris Mandel

RESUMO

Este estudo tem como objetivo analisar a influência do tipo de EPS e do método de mistura nas propriedades de argamassas de revestimento. Foram avaliadas argamassas produzidas com três agregados, sendo uma areia natural e dois tipos de EPS: virgem (pérolas) e reciclado (flocos), que foram avaliados quanto à granulometria, morfologia da partícula, massa específica e capacidade de absorção de água. O EPS foi utilizado substituindo 50% do volume de areia, o que corresponde a 30% do volume total das argamassas. Foram produzidas cinco argamassas, sendo o traço de referência igual a 1:0,5:4,5:0,70 (cimento Portland: fíler calcário: areia: relação água/cimento). O teor de água foi mantido constante, sendo utilizado aditivo superplastificante para obtenção do índice de consistência pré-estabelecido. Dois métodos de mistura foram avaliados na produção das argamassas com EPS, sendo eles: homogeneização parcial da pasta cimentícia e adição posterior do EPS (tipo A); e envelopamento do EPS por água e finos da mistura (tipo B). As argamassas foram avaliadas no estado fresco em relação ao consumo de aditivo, densidade de massa, teor de ar incorporado, retenção de água e caracterização reológica por *squeeze-flow*. No estado endurecido foram avaliadas propriedades mecânicas, físicas e microestruturais. Para verificação da aderência das argamassas sobre uma base foram feitos ensaios de resistência de aderência à tração aos 28 dias. Os resultados mostraram que as partículas de EPS virgem são esféricas e apresentam menor rugosidade/poros abertos em comparação com o EPS reciclado. Devido ao processo de trituração, as partículas recicladas são angulares, alongadas e com estrutura porosa. Ambos os tipos de EPS apresentaram capacidade de absorver água. O uso de EPS reduziu a massa específica e, de forma geral, aumentou a trabalhabilidade das argamassas; o tipo de mistura não foi significativo para as propriedades no estado fresco. No estado endurecido, o EPS reduziu as propriedades mecânicas e aumentou a absorção de água e a porosidade das argamassas. As propriedades mecânicas das argamassas com EPS reciclado foram superiores às do virgem; a aderência argamassa-base foi 41% superior às com EPS virgem, independentemente do tipo de mistura utilizado. Há um potencial de uso de EPS reciclado, tanto pelo desempenho superior em relação ao EPS virgem quanto pelo fato de ser um resíduo reutilizado.

Palavras-chave: poliestireno expandido; resíduo; argamassa de revestimento; aderência; microestrutura.

ABSTRACT

This study aims to analyze the influence of EPS type and the mixing method on rendering mortars properties. Mortars were produced with three aggregates, one being natural sand and two types of EPS: virgin (pearls) and recycled (flakes). These were evaluated for particle size distribution, particle morphology, density, and water absorption capacity. The EPS replaced 50% of the sand volume, which corresponds to 30% of the total volume of mortar. Five mortars were produced, and the mix proportion was equal to 1:0.5:4.5:0.70 (cement: limestone filler: sand: water/binder ratio). The water content was kept constant, and a superplasticizer was used to achieve the pre-established flow table spread. Two mixing methods were evaluated in the production of mortars with EPS: partial homogenization of the cement paste and later addition of EPS (type A); and EPS wrapping by water and fine particles (type B). Mortars were evaluated in the fresh state according to superplasticizer content, bulk density, air content, water receptivity, and squeeze-flow test. In hardened state, mechanical, physical, and microstructural properties were evaluated. Bond strength tests were performed at 28 days to verify the mortar adhesion on a cementitious substrate. The results showed that virgin EPS particles are spherical, presenting lower surface roughness/open pores compared to recycled EPS. Due to the gridding process, the particles are angular, elongated, and with porous structures. Both EPS types can absorb water. The use of EPS reduced the bulk density and increased the mortar workability; the mixing method was not significant for the fresh state properties. In hardened state, EPS reduced mechanical properties and increased water absorption and porosity of mortars. The mechanical properties of recycled EPS mortars were higher than those of the virgin. Bond strength was 41% higher than those with virgin EPS, regardless of the mixing method used. There is a potential for the use of recycled EPS, both for the superior performance compared to virgin EPS and for the waste reuse.

Keywords: expanded polystyrene; waste; rendering mortars; adhesive strength; microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Usos do EPS na indústria da construção civil (a) painel de isolamento; (b) enchimento de lajes nervuradas; (c) flutuador de doca	17
Figura 2 – Processo de reciclagem do EPS	18
Figura 3 – Tipo de inserção do EPS como agregado nos materiais cimentícios.....	24
Figura 4 – Comparativo entre a proporção volumétrica dos materiais quando o EPS é utilizado em (a) substituição do agregado ou (b) adição ao volume da matriz	25
Figura 5 – Variação da resistência à compressão de concreto com uso do EPS em substituição (a) agregado gráúdo e (b) volume da matriz.....	25
Figura 6 – DMC do EPS utilizado nos trabalhos analisados.....	26
Figura 7 – Variação da resistência à compressão com o tamanho das partículas e teor de EPS	28
Figura 8 – Variação do tipo de ruptura em função da porosidade do concreto e do tamanho das partículas (a) 6,3 mm e (b) 2,5 mm – 10% EPS; e (c) 6,3 mm e (d) 2,5 mm – 50% EPS.....	28
Figura 9 – Variação do módulo de elasticidade com o tamanho das partículas e teor de EPS	29
Figura 10 – Variação da resistência à compressão em função do teor de EPS (a) e da massa específica no estado fresco (b).....	30
Figura 11 – Variação da densidade de massa do EPS em função do diâmetro da pérola	30
Figura 12 – Zona de transição entre EPS moído (a) (aumento 60×) e rede polimérica formada pelo EPS em pó (b) (aumento 500×)	31
Figura 13 – Variação das dimensões do EPS reciclado (a) falha no processo de trituração das partículas e (b) EPS virgem triturado em moinho de facas	32
Figura 14 – Tipos de EPS utilizados nas publicações analisadas	33
Figura 15 – Micrografia da superfície de diferentes tipos de partículas de EPS.....	34
Figura 16 – Comparativo da resistência à compressão para compósitos com EPS em flocos e EPS em pérolas	35
Figura 17 – Micrografia da superfície de ruptura de concreto para EPS em pérola e em flocos	36
Figura 18 – Microestrutura da interface matriz cimentícia e EPS: (a) pérolas 5 a 10 mm – ampliação 30×; (b) EPS reciclado moído menor que 5 mm – ampliação 120×; (c) pérolas de 2,5 a 5 mm – ampliação de 300× e (d) pérolas de 2,5 a 5 mm – ampliação de 12×.	37

Figura 19 – Deformação volumétrica do EPS com o tratamento térmico (a) resíduo de EPS original (b) EPS modificado e (c) indica a deformação para diferentes temperaturas de tratamento térmico.....	38
Figura 20 – Efeito da incorporação de aditivo dispersante em concretos com uso de EPS: (a) fluidez excessiva (relação a/c = 0,55; aditivo superplastificante = 0,78% e (b) fluidez adequada (relação a/c = 0,35; aditivo superplastificante = 0,60%	41
Figura 21 – Sequência de mistura adotada nos estudos analisados.....	45
Figura 22 – Efeito do teor de EPS sobre a massa específica de compósitos no estado fresco.	46
Figura 23 – Variação da resistência à compressão (R_c) normalizada em função do teor de EPS	47
Figura 24 – Variação da resistência à tração por compressão diametral normalizada ($R_{t,cd}$) em função do teor de EPS	48
Figura 25 – Variação da resistência à tração na flexão (R_{tf}) normalizada em função do teor de EPS	49
Figura 26 – Variação do módulo de elasticidade em função do teor de EPS.....	49
Figura 27 – Padrão de fissuração dos corpos de prova após ensaio de resistência à compressão para os diferentes teores de EPS analisados	50
Figura 28 – Efeito do teor de EPS na absorção dos materiais cimentícios	51
Figura 29 – Variação do diâmetro das pérolas de EPS em função da temperatura e do tempo de exposição ao calor	51
Figura 30 – Representação esquemática do programa experimental adotado.....	54
Figura 31 – Areias naturais utilizadas: AR1 (a) e AR2 (b).....	57
Figura 32 – Distribuição granulométrica das areias disponíveis.....	57
Figura 33 – Tipos de EPS utilizados (a) pérola; (b) micropérola; (c) reciclado 1 (R1); (d) reciclado 2 (R2)	59
Figura 34 – Presença de contaminantes nos lotes dos resíduos de EPS utilizados: R1 (a) e R2 (b)	59
Figura 35 – Liquidificador industrial utilizado no processo de trituração: (a) vista frontal e (b) vista interna	60
Figura 36 – Curvas granulométricas dos resíduos de EPS em função do tempo de trituração	61
Figura 37 – EPS triturado utilizado na produção das argamassas: (a) R1 e (b) R2	62
Figura 38 – Curvas granulométricas das frações utilizadas na composição dos tipos de EPS	63
Figura 39 – Curvas granulométricas finais dos agregados utilizados	64

Figura 40 – Detalhes do ensaio de determinação de massa específica dos EPS: (a) frasco com EPS; (b) papel filtro utilizado na tampa do frasco para evitar flutuação; e (c) frasco preenchido com água.....	66
Figura 41 – Detalhes da realização do ensaio de absorção do EPS: (a) saquinho de tule contendo a amostra de EPS; (b) tela metálica prendendo os saquinhos submersos.....	67
Figura 42 – Métodos de mistura analisados em função do tipo de argamassa.....	70
Figura 43 – Ajuste da proporção de areia natural na argamassa de referência (REF): (a) 100% AR1 e (b) 55% AR1 e 45% AR2.....	71
Figura 44 – Ajuste da proporção de finos na argamassa de referência (a) sem adição e (b) com adição de 10% de fíler calcário.....	72
Figura 45 – Proporção em volume (a) e em massa (b) dos componentes da argamassa para 1 m ³	73
Figura 46 – <i>Squeeze-flow</i> : detalhe do anel de moldagem (a) e do ensaio (b)	75
Figura 47 – Sequência de corte das amostras para a inspeção visual	76
Figura 48 – Sequência de corte dos corpos de prova prismáticos para as amostras de MEV na seção transversal (1 e 2) e na seção longitudinal (3)	77
Figura 49 – Detalhe da preparação das amostras para ensaio de microscopia (a) polimento e (b) metalização	78
Figura 50 – Detalhes do ensaio de resistência de aderência à tração: (a) pastilhas metálicas coladas sobre os corpos de prova e (b) dinamômetro de tração utilizado no ensaio	79
Figura 51 – Distribuição de frequência das partículas dos agregados utilizados.....	82
Figura 52 – Aspectos da superfície das partículas de EPS virgem: (a) micropérolas, ampliação 50×; (b) micropérolas, ampliação 200×; (c) pérolas, ampliação 50×; (d) pérolas, ampliação de 200×.....	83
Figura 53 – Aspectos da superfície das partículas de EPS reciclado na forma de agregado miúdo: (a) partículas com formatos variados, ampliação 50×; (b) partícula alongada com porosidade aberta, ampliação 200×; (c) superfície com desgaste intenso, ampliação 200×; (d) superfície com desgaste reduzido, ampliação 200×	84
Figura 54 – Aspecto das argamassas após a determinação do índice de consistência: (a) REF, (b) VMA, (c) VMB, (d) RMA e (e) RMB.....	87
Figura 55 – Teores de aditivo adotado para obtenção do índice de consistência estabelecido em função do tipo de argamassa.....	87
Figura 56 – Densidade de massa das argamassas estudadas	89
Figura 57 – Fases do diagrama carga deslocamento no ensaio de <i>squeeze-flow</i>	90

Figura 58 – Perfil carga-deslocamento do ensaio de <i>squeeze-flow</i> para as argamassas estudadas	91
Figura 59 – Variação da resistência à compressão em função da idade	93
Figura 60 – Resistência à compressão aos 28 dias para cada argamassa estudada	93
Figura 61 – Superfícies de ruptura apresentadas pelas argamassas com EPS após a realização do ensaio de compressão aos 28 dias (a) VMA; (b) VMB; (c) RMA; (d) RMB	95
Figura 62 – Padrão de fissuração apresentado pelas argamassas após ensaio de compressão aos 28 dias (a) REF; (b) VMA; (c) VMB; (d) RMA; (e) RMB	95
Figura 63 – Resistência à compressão normalizada para argamassas com mesmo teor de EPS ($p = 0,30$) e diferentes consumos de cimentos verificadas na literatura e na presente pesquisa	96
Figura 64 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias para as argamassas estudadas	96
Figura 65 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias para as argamassas estudadas	97
Figura 66 – Superfície de ruptura dos corpos de prova das argamassas com EPS após o ensaio de tração na flexão aos 28 dias	98
Figura 67 – Ruptura da argamassa RMB após ensaio de tração na flexão	98
Figura 68 – Absorção por imersão aos 28 dias das argamassas estudadas	100
Figura 69 – Índice de vazios determinado para as argamassas estudadas aos 28 dias	101
Figura 70 – Seção longitudinal das argamassas extraídas após 28 dias de moldagem	101
Figura 71 – Perfis de capilaridade para as argamassas estudadas	102
Figura 72 – Zonas de transição das argamassas VMA, RMA, VMB e RMB. Ampliação de 200×	103
Figura 73 – Distribuição do elemento cálcio (em azul) para a argamassa (a) VMA e (b) VMB, sendo a imagem da esquerda a micrografia obtida e a esquerda o mapeamento do elemento cálcio realizado via EDS	104
Figura 74 – Distribuição do elemento cálcio (em azul) para a argamassa (a) RMA e (b) RMB, sendo a imagem da esquerda a micrografia obtida e a esquerda o mapeamento do elemento cálcio realizado via EDS	105
Figura 75 – Resistência de aderência à tração das argamassas estudadas	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pesquisas aderentes ao tema com informações suficientes para o cálculo da fração volumétrica de EPS e a respectiva base de dados	23
Tabela 2 – Redução da resistência à compressão em função do aumento do teor (p) e da DMC do EPS	27
Tabela 3 – Variação da absorção por imersão e por capilaridade em função do teor de EPS p e do tamanho das partículas de EPS.....	31
Tabela 4 – Tipo de aditivo químico e teor utilizado na produção dos compósitos cimentícios com EPS nas publicações analisadas.....	40
Tabela 5 – Tipo e teor de adição mineral utilizado nas publicações analisadas	43
Tabela 6 – Composição química do cimento CPV utilizado	55
Tabela 7 – Composição química do filer calcário	56
Tabela 8 – Módulo de finura, diâmetros característicos e coeficientes de não-uniformidade e de curvatura das areias utilizadas	58
Tabela 9 – Porcentagens das frações utilizadas para a composição granulométrica dos agregados.....	64
Tabela 10 – Coeficiente de uniformidade, coeficiente de curvatura e módulo de finura dos agregados.....	64
Tabela 11 – Traço em massa das argamassas estudadas	72
Tabela 12 – Desvio aceitável d_i, max para uma amostra de tamanho n	80
Tabela 13 – Propriedades dos agregados utilizados na produção de argamassas	81
Tabela 14 – Composição química qualitativa do EPS	85
Tabela 15 – Resultados de índice de consistência, massa específica no estado fresco, teor de ar incorporado, retenção de água e <i>squeeze-flow</i>	86
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, e resistência à tração na flexão	92
Tabela 17 – Resultados para absorção por imersão (A), índice de vazios (I_v), massa específica saturada (ρ_{sat}), seca (ρ_s) e real (ρ_r) e coeficiente de capilaridade (C) aos 28 dias	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Bases de dados, palavras-chave, filtros aplicados e número de publicações	20
Quadro 2 – Matriz do planejamento experimental 2^k	69
Quadro 3 – Moldagens realizadas no programa experimental	73
Quadro 4 – Significância dos efeitos para as propriedades do estado fresco.....	86
Quadro 5 – Significância dos efeitos para as propriedades mecânicas no estado endurecido .	92
Quadro 6 – Significância dos efeitos para as propriedades físicas no estado endurecido	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIQUM – Associação Brasileira da Indústria Química.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AR1 – Areia 1.

AR2 – Areia 2.

ATAC - *Advanced Technologies & Aerospace Database*.

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

CCA – Cinza da casca de arroz.

CV – Cinza volante.

DMC – Dimensão máxima característica.

EDS – Espectroscopia por dispersão de elétrons.

EPH – Emulsão polimérica hidrofugante.

EPS – Poliestireno expandido.

FC – Fíler calcário.

FECIV – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

HP – Aditivo hiperplastificante.

IA – Aditivo incorporador de ar.

IMP – Aditivo impermeabilizante.

JEPSA – *Japan Expanded Polystyrene Association*.

MEV – Microscopia de varredura eletrônica.

MS – Microssílica.

MV – Aditivo modificador de viscosidade.

NBR – Norma brasileira.

NS – Nanossílica.

p – Teor de EPS incorporado na matriz cimentícia.

PD – Aditivo polimérico dispersante.

PM – Pó de mármore.

R1 – Lote de EPS reciclado 1.

R2 – Lote de EPS reciclado 2.

RA – Aditivo retentor de água.

RAAE - Aditivo redutor de água de alta eficiência.

Rc – Resistência à compressão normalizada.

Rt,cd – Resistência à tração por compressão diametral normalizada.

RTA – Aditivo retentor de água.

Rtf – Resistência à tração na flexão normalizada.

SP – Aditivo superplastificante.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	14
1.2 Estrutura do Trabalho	14
2 USO DO EPS COMO AGREGADO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	16
2.1 Processos de Produção, Reciclagem e Aplicações do EPS	17
2.2 Metodologia	19
2.3 Resultados e Discussão	23
2.3.1 <i>Tipo de inserção do EPS como agregado nos materiais cimentícios.....</i>	<i>23</i>
2.3.2 <i>Granulometria das partículas de EPS.....</i>	<i>26</i>
2.3.3 <i>Tipo de EPS.....</i>	<i>32</i>
2.3.4 <i>Tratamento superficial das partículas de EPS</i>	<i>36</i>
2.3.5 <i>Influência do uso de EPS na produção das matrizes cimentícias</i>	<i>38</i>
2.3.5.1 <i>Uso de aditivos químicos.....</i>	<i>39</i>
2.3.5.2 <i>Uso de adições minerais.....</i>	<i>42</i>
2.3.5.3 <i>Efeito do método de mistura.....</i>	<i>44</i>
2.3.6 <i>Influência do teor do EPS nas propriedades dos materiais cimentícios.....</i>	<i>46</i>
2.4 Conclusões Parciais	51
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	54
3.1 Materiais.....	54
3.1.1 <i>Finos: cimento e filer calcário</i>	<i>55</i>
3.1.2 <i>Água e aditivo.....</i>	<i>56</i>
3.1.3 <i>Areia natural.....</i>	<i>56</i>
3.1.4 <i>EPS.....</i>	<i>58</i>
3.1.4.1 <i>Preparação dos resíduos de EPS (R1 e R2).....</i>	<i>60</i>
3.1.4.2 <i>Distribuição granulométrica das partículas de EPS.....</i>	<i>62</i>
3.2 Definição da Curva Granulométrica dos Agregados	63
3.3 Caracterização dos Agregados	65
3.3.1 <i>Determinação das massas unitária e específica</i>	<i>65</i>
3.3.2 <i>Determinação da absorção de água</i>	<i>66</i>
3.3.3 <i>Análise dinâmica de imagem.....</i>	<i>68</i>
3.3.4 <i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV-EDS).....</i>	<i>68</i>
3.4 Definição da Matriz Experimental.....	68

3.5	Formulação das Argamassas	71
3.6	Produção das Argamassas e Moldagem dos Corpos de Prova	73
3.7	Propriedades das Argamassas Avaliadas	74
3.7.1	<i>Argamassa no estado fresco</i>	<i>74</i>
3.7.2	<i>Propriedades mecânicas das argamassas</i>	<i>75</i>
3.7.3	<i>Propriedades físicas das argamassas</i>	<i>76</i>
3.7.4	<i>Microestrutura das argamassas</i>	<i>77</i>
3.7.5	<i>Avaliação da resistência de aderência à tração das argamassas</i>	<i>78</i>
3.7.6	<i>Tratamento dos dados e análise dos resultados</i>	<i>79</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81
4.1	Caracterização dos Agregados	81
4.2	Propriedades das Argamassas no Estado Fresco.....	85
4.3	Propriedades Mecânicas das Argamassas	91
4.4	Propriedades Físicas das Argamassas	98
4.5	Análise Microestrutural das Argamassas.....	103
4.6	Aderência Argamassa-substrato	106
5	CONCLUSÕES.....	108
5.1	Sugestões Para Futuras Pesquisas.....	110
	REFERÊNCIAS.....	111
	APÊNDICE A – DETALHAMENTO DA GRANULOMETRIA	125
	APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	128

1 INTRODUÇÃO

O poliestireno expandido (EPS) é um polímero celular rígido, derivado do petróleo e resultante da polimerização do estireno em água. A composição deste material pode chegar a 98% de ar e 2% de poliestireno, o que lhe confere baixa massa específica e baixa condutividade térmica (ABIQUIM, 2020a).

O EPS é utilizado de diversas formas: em embalagens, isolamento termoacústico, material de enchimento, flutuador e em elementos decorativos, dentre outros. O mercado de EPS a nível mundial é promissor: em 2018, foram produzidas 10,3 milhões de toneladas e a projeção é que se chegue a 10,6 milhões de toneladas em 2023 (GARSIDE, 2020). No Brasil, em 2017 foram produzidas 44,9 mil toneladas de EPS e o consumo total foi de 91,74 mil toneladas (ABIQUIM, 2020b). O mercado global de EPS foi avaliado em 9,7 bilhões de dólares em 2019, com projeção de crescimento anual de 4,6% entre 2020 e 2027, atingindo o valor de 12,9 bilhões de dólares (GRAND VIEW RESEARCH INC, 2020).

Assim como outros materiais poliméricos, o EPS pode ser uma fonte de poluição por micropartículas. Por isso, diversos esforços têm sido feitos para minimizar o impacto ambiental: alguns são polêmicos, como o banimento no estado de New York de embalagens alimentares descartáveis à base de EPS a partir de 2022 (NEW YORK STATE, 2019). Outros são mais realistas, como a organização de processos de logística reversa para a reciclagem. Por exemplo, 90,8% do EPS descartado no Japão é reciclado e apenas 4% tem o aterro sanitário como destino final (JEPSA, 2019). No Brasil, em 2012, 34,5% do EPS pós-consumo foi reciclado, o que é um quantitativo considerável, uma vez que a coleta seletiva é realizada em menos de 20% dos municípios (PLASTIVIDA, 2015).

Uma das formas de impulsionar a reciclagem do EPS é otimizar o uso de suas propriedades, agregando valor ao material. No âmbito da construção civil, diversas frentes de estudo têm sido realizadas com essa finalidade. Algumas são promissoras, como por exemplo o uso como agregado em compósitos cimentícios, pois essa aplicação ocorre em grandes volumes, uma vez que o agregado é uma parcela significativa do volume do material (KISKU et al., 2017).

A incorporação de EPS nos materiais cimentícios provoca a redução da massa específica, o que pode gerar economia de recursos por meio de seções estruturais mais esbeltas e diminuição da carga solicitante das fundações (MADANDOUST; RANJBAR; MOUSAVI, 2011). Além disso, o EPS também proporciona a redução da condutividade térmica (SAYADI

et al., 2016), tendo como efeito direto a melhoria do desempenho térmico das edificações e a consequente economia de energia, minimizando custos.

Algumas tendências sobre a aplicação do EPS em materiais cimentícios estão consolidadas, como a melhoria do desempenho térmico com a incorporação de EPS (CARVALHO; MOTTA, 2019; ALVES, 2020); a queda nos resultados das propriedades mecânicas com o aumento do tamanho das partículas e do teor de EPS na matriz (MILED; SAB; LE ROY, 2007; LIU; CHEN, 2014), o potencial de absorção de energia na ruptura (BABU; BABU; WEE, 2005; OZÓRIO, 2016) e a redução na massa específica proporcional ao aumento do teor de EPS (MADANDOUST; RANJBAR; MOUSAVI, 2011; RANJBAR; MOUSAVI, 2015).

No entanto, ainda existem algumas lacunas sobre a influência do EPS na produção e propriedades dos compósitos. Resultados divergentes foram obtidos por Trussoni, Hays e Zollo (2012); Tittarelli et al. (2016) e Carvalho e Motta (2019) ao comparar o desempenho do EPS em pérolas e reciclado, cuja principal diferença é o formato das partículas: o primeiro é composto por partículas esféricas e o último é formado por uma grande variedade de formatos que depende do processo de reciclagem adotado. Em relação ao uso de EPS reciclado ainda há poucos estudos, principalmente para aplicação como agregado miúdo (SABAA; RAVINDRARAJAH, 1997; WOLFF, 2008; FERRÁNDIZ-MAS et al., 2014).

Outro fator que precisa ser investigado é a influência do processo de mistura na produção dos materiais cimentícios com EPS, a fim da melhoria da dispersão das partículas e redução dos efeitos de segregação, flutuação e incorporação de ar. Diversos autores utilizam o método estabelecido por Babu e Babu (2003), no qual as partículas de EPS seriam envelopadas pelo aglomerante, o que provocaria a melhoria da zona de transição. Todavia, faltam comparações com outros procedimentos de mistura.

Ainda há poucas publicações que trazem análises sobre a microestrutura dos materiais cimentícios com EPS, que facilita o entendimento dos fatores que interferem nas propriedades desses compósitos. Alguns estudos ilustram a interface agregado-pasta: Trussoni, Hays e Zollo (2012) compararam a zona de transição de EPS reciclado e em pérolas; Maaroufi et al. (2018) observaram a variação da massa específica da pasta cimentícia nas proximidades da pérola por meio da diferença de textura e coloração, mas para os autores isso não necessariamente equivale a uma zona de transição.

Sendo assim, torna-se necessário o desenvolvimento de pesquisas sobre a influência do tipo de EPS e de mistura na produção e propriedades de compósitos cimentícios. Desse modo,

é possível estabelecer diretrizes para aplicação de forma otimizada do EPS, impulsionando a reciclagem dos resíduos de EPS e minimizando os impactos ambientais.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a influência do uso de EPS virgem e reciclado em substituição parcial do agregado miúdo e do método de mistura nas propriedades de argamassas de revestimento.

São objetivos específicos:

- desenvolver uma metodologia para redução das dimensões das partículas de EPS reciclado;
- descrever as características físicas dos tipos de EPS (virgem e reciclado);
- analisar as curvas granulométricas dos agregados disponíveis e do EPS a fim de definir a proporção dos materiais para a formulação das argamassas de revestimento;
- comparar o efeito de diferentes métodos de mistura nas propriedades das argamassas de revestimento com EPS;
- investigar o efeito do uso de EPS em substituição parcial à areia na formulação e propriedades da argamassa de revestimento no estado fresco e endurecido;
- avaliar a interface EPS-matriz das argamassas de revestimento produzidas por meio de análises microestruturais;
- avaliar a aderência das argamassas a um substrato cimentício por meio de ensaios de resistência de aderência à tração.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é composto por cinco capítulos:

- capítulo 1 – Introdução: apresenta a contextualização, justificativas e os objetivos do estudo;
- capítulo 2 – Uso do EPS como agregado em compósitos cimentícios: dedicado ao estado da arte do assunto, com foco nos efeitos que a incorporação de EPS como agregado exerce sobre as propriedades dos compósitos cimentícios;
- capítulo 3 – Programa experimental: descreve as variáveis, os materiais, a metodologia e os métodos de ensaio adotados no desenvolvimento da pesquisa;

- capítulo 4 – Resultados e discussões: apresentação e análise dos resultados obtidos; e,
- capítulo 5 – Conclusão: são destacadas as principais conclusões obtidas e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 USO DO EPS COMO AGREGADO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Os agregados constituem uma parcela fundamental dos compósitos cimentícios, correspondendo de 55 a 80% do volume de concreto (KISKU et al., 2017). Em 2018, foram consumidas 41 bilhões de toneladas de areia e brita na construção civil: a demanda origina-se principalmente da necessidade de infraestrutura e da crescente urbanização (UNEP, 2019). Uma vez que a população que vive em áreas urbanas aumentará de 54% para 66% até 2050, a escassez de areia existente em algumas regiões tende a aumentar (UNEP, 2019).

Além disso, a utilização de agregados gera um impacto ambiental significativo. O processo de extração provoca erosão, alteração/assoreamento de cursos d'água, modificação da paisagem e poluição atmosférica, entre outros. Para minimizar esse problema, pesquisas têm sido realizadas com o intuito de avaliar as propriedades de diversos materiais para substituição parcial ou total de agregados em materiais cimentícios: escória; areia de fundição; resíduos de construção e demolição (RCD), cerâmicos, de vidro e agroindustriais, borracha de pneus e poliestireno expandido (EPS), entre outros. Nesta linha, o uso de EPS como agregado em materiais cimentícios tem sido investigado para a produção de argamassas e concretos leves.

Chen e Fang (2011) citam que a pesquisa da viabilidade do uso de EPS como agregado começou em 1973, com o trabalho de Cook. Nos quase cinquenta anos de estudos, algumas propriedades dos compósitos estão bem delimitadas: o teor de EPS presente na mistura provoca redução das propriedades mecânicas, como resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Certos impactos nas propriedades físicas também são relatados, como a redução da massa específica, a melhoria do isolamento termoacústico e o aumento da absorção de água.

O presente capítulo tem como objetivo apresentar um panorama sobre o uso de EPS como agregado na produção de materiais cimentícios, visando identificar as lacunas no conhecimento e como o uso desse material tem afetado a produção e as propriedades de argamassas e concretos em termos de trabalhabilidade, resistência mecânica, durabilidade e microestrutura. Inicialmente serão apresentados os processos de produção, reciclagem e aplicações do EPS; posteriormente, a metodologia utilizada para a seleção das publicações analisadas; e, por fim, a compilação dos principais resultados.

2.1 Processos de Produção, Reciclagem e Aplicações do EPS

O processo de fabricação do EPS começa com o material na forma resinada ou peletizada, na qual cada pérola tem em seu interior uma pequena bolha de gás expansivo (usualmente pentano), com a temperatura controlada para evitar o escape ou a variação do volume do gás (FABRICATED PACKAGING MATERIALS INC., 2020). Em seguida, as pérolas são introduzidas em um pré-expansor, com vapor de água a cerca de 90°C, o que provoca a expansão do pentano e o amolecimento da superfície das pérolas, aumentando o volume em até cinquenta vezes (EXPANDED POLYSTYRENE AUSTRALIA INC., 2014; KNAUF INDUSTRIES, 2018; FABRICATED PACKAGING MATERIALS INC., 2020).

Após a saída das pérolas do pré-expansor, ainda há a possibilidade de expansão residual pela temperatura. Por isso, elas são direcionadas para silos de maturação, onde a temperatura e a pressão interna atingem o equilíbrio e a eletricidade estática acumulada durante o processo produtivo é descarregada (EXPANDED POLYSTYRENE AUSTRALIA INC., 2014; GARCIA et al., 2017). Uma vez estabilizadas, as pérolas são transportadas para o processo de moldagem, no qual o material é inserido no molde e aquecido por meio de vapor, provocando mais uma vez a expansão do pentano e o amolecimento da superfície das pérolas, que são conformadas com massa específica controlada. A moldagem pode ser feita em formatos específicos ou em blocos, que posteriormente são cortados com o uso de fio metálico aquecido. Os resíduos gerados no processo de fabricação podem ser moídos e incorporados às pérolas na etapa de moldagem (EXPANDED POLYSTYRENE AUSTRALIA INC., 2014; GARCIA et al., 2017; KNAUF INDUSTRIES, 2018; FABRICATED PACKAGING MATERIALS INC., 2020).

O EPS é bastante utilizado na indústria de embalagens em formatos e composições diversas. Alguns usos também estão bem consolidados na indústria da construção civil, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Usos do EPS na indústria da construção civil (a) painel de isolamento; (b) enchimento de lajes nervuradas; (c) flutuador de doca

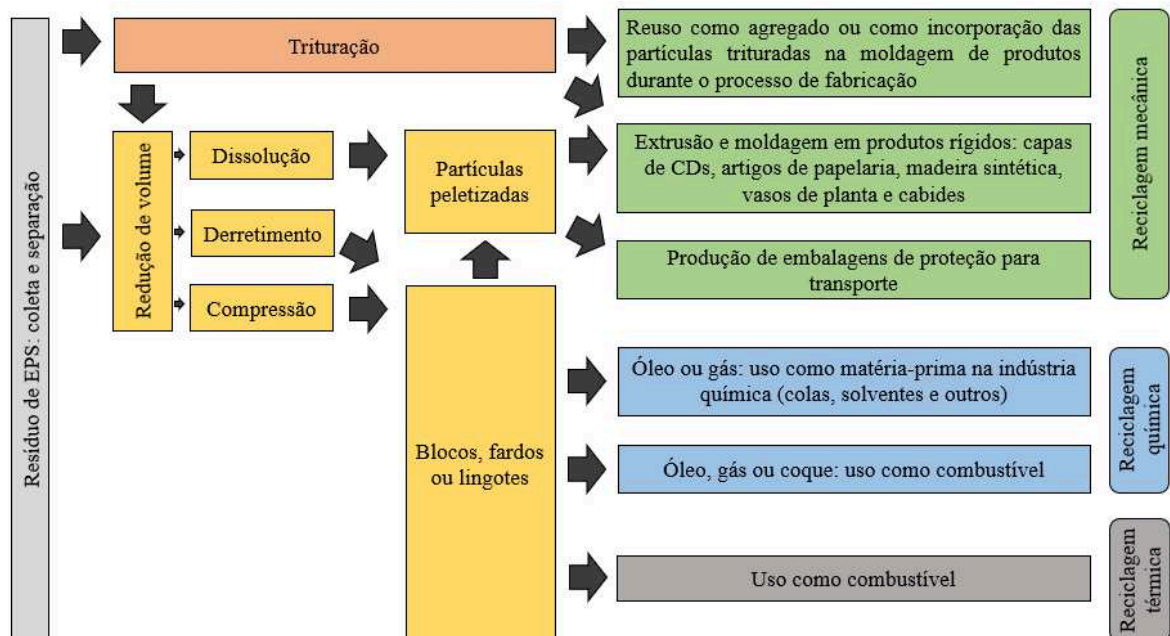


Fonte: (a) AECweb (2020); (b) Lajes Esteves (2020); (c) Metal Barrier (2020).

O EPS é um material 100% reciclável. Porém, devido à baixa massa específica, carece de muito espaço para armazenamento e espalha-se facilmente. Por isso, sem beneficiamento prévio, possui custo de transporte e de disposição final elevados, pois a quantidade de poliestireno em um volume não compactado é muito pequena (RUBIO, 2020). Outro aspecto importante é a escassez de processos de separação do EPS após o descarte, o que resulta na contaminação por uma variedade de outros materiais, como resíduos de alimentos, tintas, colas e papel, o que dificulta e onera o processo de reciclagem. Um estudo do Departamento de Saneamento da cidade de New York constatou que a reciclagem de embalagens de EPS descartáveis utilizadas no setor alimentício não é vantajosa porque o EPS é completamente recoberto por resíduos de alimentos (GARCIA, 2017). O mesmo estudo também menciona que, em Los Angeles, o custo estimado do EPS reciclado a partir de embalagens alimentícias foi duas vezes maior que o custo do EPS virgem. Por isso, é mais rentável adquirir os resíduos gerados durante o processo de fabricação do EPS ou de outros setores nos quais o EPS seja isento de contaminantes.

O fluxograma dos processos de reciclagem dos resíduos de EPS está esquematizado na Figura 2.

Figura 2 – Processo de reciclagem do EPS



Nota: partículas peletizadas de EPS correspondem aos grânulos antes do processo de expansão.

Fonte: adaptado de JEPSA (2021), The International Expanded Polystyrene Alliance (2021), Expanded Polystyrene Australia Inc. (2014) e Rubio (2020).

Conforme a Figura 2, há três formas de reciclagem do EPS: mecânica, na qual o EPS volta à forma pré-processamento para dar origem a novos produtos; química, por meio da decomposição do EPS por pressão ou calor até que haja a conversão em gás ou óleo, que são encaminhados para reutilização em produtos como colas e solventes ou como combustível; e térmica, pela combustão e aproveitamento energético para produção de energia elétrica ou energia térmica em processos industriais (JEPSA, 2021; KNAUF INDUSTRIES, 2018).

2.2 Metodologia

A pesquisa foi realizada por meio de um levantamento bibliográfico sobre o uso de EPS na produção de materiais cimentícios em periódicos indexados, teses e dissertações, efetuado entre fevereiro e outubro de 2020. A coleta de dados inicial foi feita pelo Portal de Periódicos da CAPES¹, adotando as palavras-chave *EPS and cement* para os campos título e assunto. Foram consideradas as publicações entre 1990 e 2020 nos idiomas inglês e português.

Os resultados foram filtrados pelo critério de revisão por pares e exclusão de tópicos relacionados a outras áreas do conhecimento (biológicas e ciências sociais aplicadas), autores anônimos e artigos da coleção *Advanced Technologies & Aerospace Database* (ATAC). Após a aplicação desses critérios, foi realizada a análise do título dos artigos para eliminar os que não abordassem materiais cimentícios, tais como aplicação em geopolímeros e estabilização de solos. Em seguida, foram avaliados os resumos.

Todas as publicações relacionadas ao uso de EPS na construção civil foram consideradas, independentemente da forma de uso: aglomerante, agregado ou elemento de vedação (bloco ou painel de isolamento). Publicações abordando processos de fabricação, reciclagem e tratamentos químicos de EPS também foram incluídas. Como a pesquisa retornou apenas uma publicação de origem brasileira (SCHACKOW et al., 2014), a busca foi expandida para outras bases: SciELO, Catálogo de Teses e Dissertações (CAPES) e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações. As buscas foram realizadas considerando a palavra-chave EPS e o período supracitado, filtrando os trabalhos pelo título e resumo e descartando os estudos em duplicidade. A base de dados, as palavras-chave, os filtros utilizados e o total de publicações após a seleção estão apresentados no Quadro 1.

¹**Bases contempladas pelo mecanismo de busca:** Scopus (Elsevier), Science Citation Index Expanded (Web of Science), OneFile (GALE), Technology Research Database, Materials Science & Engineering Database, SpringerLink, Materials Research Database, Engineering Research Database, Engineered Materials Abstracts, ScienceDirect (Elsevier), Directory of Open Access Journals (DOAJ), Civil Engineering Abstracts, Taylor & Francis Online – Journals.

Quadro 1 – Bases de dados, palavras-chave, filtros aplicados e número de publicações

Base de dados	Critérios de seleção			nº publicações
Portal de periódicos da CAPES	Palavras-chave		“EPS” e “cement”	2090
	Filtros	1º	Data de publicação: 1990 a 2020 menos 153 publicações	1937
		2º	Tipo de material: artigos menos 107 publicações	1830
		3º	Idioma: inglês e português menos 19 publicações	1811
		4º	Periódicos revisados por pares menos 111 publicações	1700
		5º	Exclusão de artigos área – biológicas menos 425 publicações	1275
		6º	Exclusão de artigos área – sociais menos 191 publicações	1084
		7º	Exclusão de artigos – autores anônimos menos 20 publicações	1068
		8º	Exclusão de coleção – ATAC menos 216 publicações	852
		9º	Análise do título e resumo menos 674 publicações	178
		2º	Exclusão de artigos das áreas de saúde, humanas biológicas, agrárias e sociais aplicadas menos 184 publicações	67
		3º	Análise do título e resumo menos 176 publicações	08
SciELO	Palavras-chave		“EPS”	400
	Filtros	1º	Idioma: português e inglês menos 149 publicações	251
		2º	Exclusão de artigos das áreas de saúde, humanas biológicas, agrárias e sociais aplicadas menos 184 publicações	67
		3º	Análise do título e resumo menos 176 publicações	08

Continuação Quadro 1 – Bases de dados, palavras-chave, filtros aplicados e número de publicações

Base de dados	Critérios de seleção			n° publicações
Catálogo de Teses e Dissertações (CAPES)	Palavras-chave		“EPS”	930
	Filtros	1°	Data de publicação: 1990 a 2020 menos 185 publicações	745
		2°	Exclusão de artigos das áreas de saúde, humanas biológicas, agrárias e sociais aplicadas, linguística, letras e artes, biotecnologia, engenharias – aeroespacial, biomédica, elétrica, nuclear, sanitária, tecnologia e gestão, ensino, ensino de ciências e matemática, processos bioquímicos, processos industriais de engenharia química, saneamento ambiental, saúde e biológicas e sociais e humanidades menos 511 publicações	234
		3°	Análise do título, resumo e disponibilidade na plataforma sucupira menos 216 publicações	18
Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações	Palavras-chave		“EPS”	618
	Filtros	1°	Data de publicação: 1990 a 2020 menos 02 publicações	616
		2°	Seleção de publicações: EPS, conforto térmico, compósito, concreto leve, casas populares, concreto pré-moldado, poliestireno, reciclagem, resíduos industriais, concreto com EPS, construção civil e poliestireno expandido menos 545 publicações	71
		3°	Análise do título e resumo e exclusão das publicações em duplicidade menos 69 publicações	02

Fonte: A autora.

Além das publicações verificadas nas bases de dados, também foi incluso o trabalho de conclusão de curso de Costa (2018), desenvolvido na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV-UFU). Nos casos em que a dissertação/tese originou um artigo publicado, apenas o último foi considerado para análise.

Após a seleção, foram identificadas as principais variáveis e propriedades estudadas em relação ao uso de EPS em materiais cimentícios. A partir da identificação, foi feita a análise das publicações considerando a influência dos seguintes itens: uso como agregado miúdo ou gráudo; forma (virgem em pérola ou reciclado em floco); granulometria (dimensão máxima característica) e aspectos de dosagem e produção dos materiais cimentícios com EPS, com foco nas propriedades mecânicas e microestrutura.

Para fins comparativos, foi adotado o critério de densidade de empacotamento de EPS para a análise das propriedades. Esse critério considera que a incorporação de EPS provoca vazios na matriz cimentícia, com as pérolas ou flocos equivalentes à macro porosidade (LE ROY; PARANT; BOULAY, 2005; MILED; SAB; LE ROY, 2007). É possível calcular a porcentagem em volume de EPS (p) de duas maneiras diferentes: diretamente pelo traço da matriz cimentícia, utilizando a massa específica do EPS para obter o volume ou conforme a Equação (1) (MILED; SAB; LE ROY, 2007):

$$(p) = \frac{\rho_{ref} - \rho_{compósito}}{\rho_{ref} - \rho_{EPS}} \quad (1)$$

Na Equação (1), (p) é a fração volumétrica de EPS em relação ao volume total do compósito; ρ_{ref} é a massa específica do compósito de referência, que não possui EPS incorporado; $\rho_{compósito}$ é a massa específica do compósito analisado com incorporação de EPS; ρ_{EPS} é a densidade de massa do EPS utilizado. Por exemplo, (p) = 0,70 significa que 70% do volume do compósito em questão corresponde ao EPS.

Das publicações selecionadas, quarenta e nove (49) continham dados suficientes para o cálculo da fração volumétrica de EPS, como mostra a Tabela 1. Para efeito de simplificação, foi considerado que os valores teóricos e efetivos de (p) são equivalentes.

Tabela 1 – Pesquisas aderentes ao tema com informações suficientes para o cálculo da fração volumétrica de EPS e a respectiva base de dados²

Base de dados	Publicações
Portal periódicos da CAPES	41
SciELO	01
Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES	04
Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações	02
Trabalho de conclusão de curso (TCC – FECIV/UFU)	01
Total	49

Fonte: A autora.

2.3 Resultados e Discussão

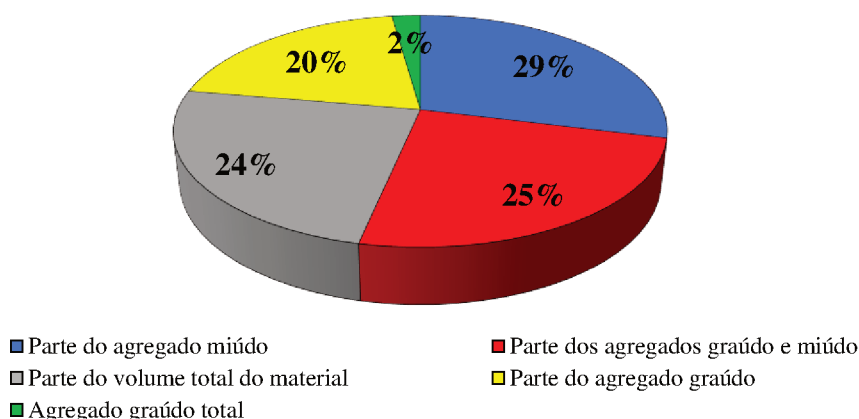
2.3.1 Tipo de inserção do EPS como agregado nos materiais cimentícios

Na Figura 3 está apresentada a forma de inserção do EPS no material cimentício: substituição de uma determinada porcentagem do agregado miúdo, do graúdo ou de ambos; do volume total do material; ou da fração total do agregado graúdo.

Nota-se que 29% das publicações utilizaram o EPS em substituição de uma determinada porcentagem do agregado miúdo e outros 20% do graúdo, de forma isolada. Nesses casos, quando houve a mistura de agregados graúdo e miúdo no compósito, a substituição foi realizada em apenas um deles e a quantidade do outro tipo permaneceu constante.

² **Publicações adotadas para o cálculo da fração volumétrica de EPS:** Sabaa e Ravindrarajah (1997); Babu e Babu (2003); Babu e Babu (2004); Chen e Liu (2004); Babu, Babu e Wee (2005); Babu, Babu e Tiong-Huan (2006); Kan e Demirboğa (2007); Wolff (2008); Kan e Demirboğa (2009a); Torres e García-Ruiz, (2009); Chen, Liu e Chen, (2010); Madandoust, Ranjbar e Mousavi, (2011); Chen e Fang, (2011); Trussoni, Hays e Zollo, (2012); Xu et al., (2012); Sadrmomtazi et al., (2012); Brás, Leal e Faria (2013); Herki, Khatib e Negim, (2013); Sadrmomtazi, Sobhani e Mirgozar (2013); Liu e Chen (2014); Ferrándiz-Mas et al. (2014); Schackow et al. (2014); Sousa Junior (2015); Yoon et al. (2015); Kumayama et al. (2015); Lanzón et al. (2015); Pecce et al. (2015); Ranjbar e Mousavi, (2015); Ozório (2016); Shi et al. (2016); Tittarelli et al. (2016); Mohammed e Zain (2016); Cui et al. (2016); Remesar, Vera e Lopez (2017); Tang Van et al. (2018); Brooks, Zhou e Hanna (2018); Li et al. (2018); Lam et al., (2018); Nikbin e Golshekan (2018); Costa (2018); Mazoni (2019); Baptista Junior (2019); Qurashi et al. (2019); Carvalho e Motta (2019) e Alves (2020). As publicações de Laukaitis, Žurauskas e Keriene (2005), Ferrándiz-Mas et al. (2014) e Maaroufi et al. (2018) foram analisadas apenas quanto à microestrutura; já a de Miled, Sab e Le Roy (2007) foi analisada apenas em relação aos efeitos descritos na resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Figura 3 – Tipo de inserção do EPS como agregado nos materiais cimentícios³



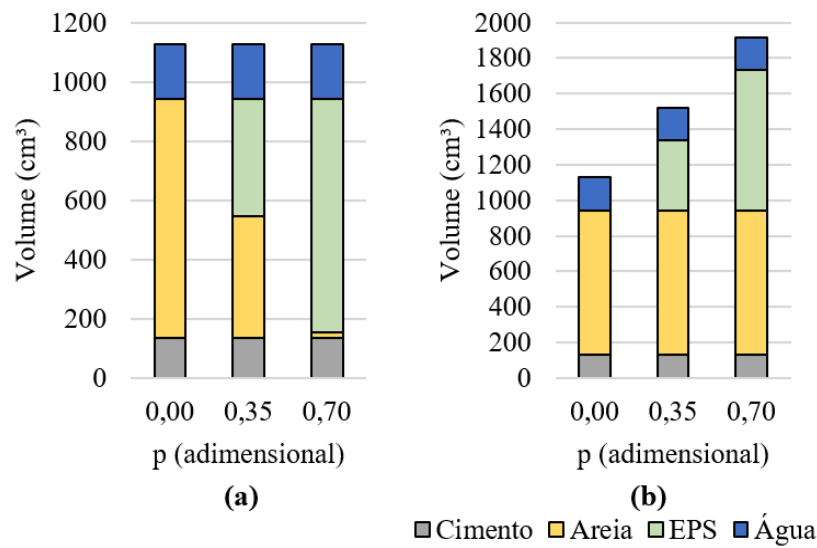
Fonte: A autora.

Em 25% dos trabalhos analisados, a substituição foi realizada simultaneamente nas duas faixas granulométricas de agregados. Esse procedimento foi realizado considerando diferentes proporções, dadas as diferentes granulometrias de EPS e partículas existentes. Alguns autores utilizaram apenas um tipo de EPS para substituir a composição: por exemplo, Sadrmomtazi et al. (2012) e Sadrmomtazi, Sobhani e Mirgozar (2013) avaliaram o uso de EPS com pérolas de até 3,5 mm de diâmetro para substituir os agregados graúdo e miúdo da matriz de referência. Por outro lado, Babu e Babu (2004) e Babu, Babu e Wee (2005) substituíram de 0 a 95% do agregado total, utilizando uma mistura de EPS cujos diâmetros variavam entre 6,3 mm e 4,75 mm. A substituição ocorreu em duas séries diferentes: parte dos compostos foi formada por agregado miúdo e EPS e o restante por uma mistura de agregados graúdo/miúdo e EPS.

Verificou-se que em 24% das publicações foi utilizado o EPS como parte do volume total do compósito cimentício. Nesse caso, o EPS pode ser inserido em substituição ao agregado, o que não altera a quantidade dos outros componentes; ou como adição à matriz cimentícia, reduzindo o volume de pasta, e consequentemente, o consumo de aglomerante. A diferença na proporção volumétrica dos materiais quando o EPS é inserido em substituição parcial dos agregados ou como adição à matriz pode ser visualizada no exemplo da Figura 4.

³ **Parte do agregado miúdo:** Torres e García-Ruiz (2009); Trussoni, Hays e Zollo (2012); Sadrmomtazi et al. (2012); Brás, Leal e Faria, (2013); Herki, Khatib e Negim (2013); Sadrmomtazi, Sobhani e Mirgozar (2013); Liu e Chen (2014); Ferrándiz-Mas et al. (2014); Schackow et al. (2014); Ozório (2016); Tittarelli et al. (2016); Cui et al. (2016) e Baptista Junior (2019). **Parte dos agregados graúdo e miúdo:** Chen e Liu (2004); Babu, Babu e Tiong-Huan (2006); Kan e Demirboğa (2009a); Chen, Liu e Chen (2010); Madandoust, Ranjbar e Mousavi, (2011); Chen e Fang, (2011); Kumayama et al. (2015); Pecce et al. (2015); Ranjbar e Mousavi (2015); Nikbin e Golshekan (2018) e Carvalho e Motta (2019). **Parte do volume total do material:** Kan e Demirboğa (2007); Xu et al. (2012); Sousa Junior (2015); Lanzón et al. (2015); Shi et al. (2016); Remesar, Vera e Lopez (2017); Tang Van et al. (2018); Brooks, Zhou e Hanna (2018); Li et al. (2018); Lam et al. (2018) e Mazoni (2019). **Parte do agregado graúdo:** Sabaa e Ravindrarajah (1997); Babu e Babu, (2003); Babu e Babu, (2004); Babu, Babu e Wee (2005); Wolff (2008); Mohammed e Zain (2016); Costa (2018); Qurashi et al., (2019) e (Alves, 2020). **Agregado graúdo total:** Yoon et al. (2015).

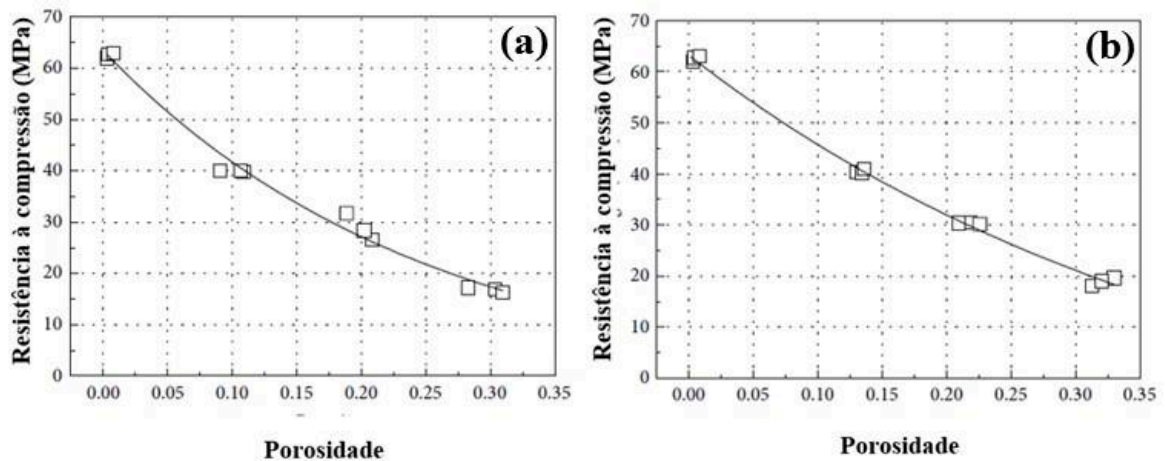
Figura 4 – Comparativo entre a proporção volumétrica dos materiais quando o EPS é utilizado em (a) substituição do agregado ou (b) adição ao volume da matriz



Na Figura 4a, observa-se que os volumes de água e cimento permanecem constantes para todos os teores de EPS (p) em substituição de parte do agregado miúdo; na Figura 4b é mostrado que a adição de EPS nos teores de 30% e 70% aumentará o volume de material a ser produzido.

Shi et al. (2016) verificaram a influência do uso de EPS em substituição ao volume do agregado graúdo ou da matriz em teores de 0%; 20%; 30% e 40% na resistência à compressão do concreto, conforme os resultados mostrados na Figura 5.

Figura 5 – Variação da resistência à compressão de concreto com uso do EPS em substituição (a) agregado graúdo e (b) volume da matriz.



Nota: Nesse estudo, o teor de EPS foi considerado equivalente a porosidade do concreto, sendo calculado conforme a Equação 1.

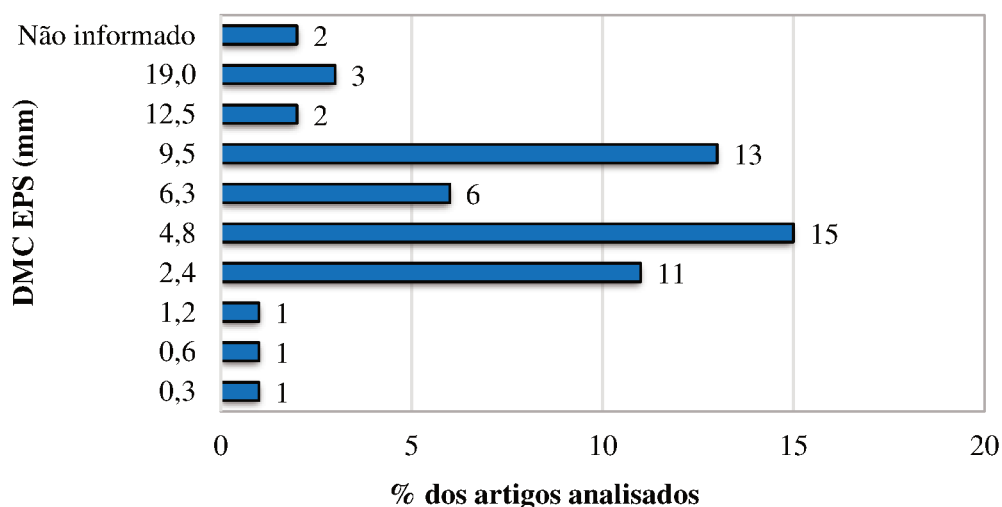
Fonte: Shi et al. (2016).

É possível verificar na Figura 5 que a resistência à compressão apresentou a mesma ordem de grandeza para ambos os tipos de incremento de EPS analisados. Logo, para a faixa de porosidade estudada, foi mais conveniente incorporar o EPS à matriz cimentícia como adição, uma vez que essa forma de incorporação do EPS leva a um menor consumo de aglomerante para o mesmo teor de EPS quando comparada à substituição.

2.3.2 Granulometria das partículas de EPS

A dimensão das partículas de EPS interfere nas características reológicas da matriz durante o processo de mistura e, posteriormente, na porosidade do sistema, afetando as propriedades mecânicas e a permeabilidade do material. Na Figura 6 está apresentada uma compilação da dimensão máxima característica das partículas de EPS utilizada nas publicações analisadas.

Figura 6 – DMC do EPS utilizado nos trabalhos analisados⁴



Fonte: A autora.

⁴ **DMC 19 mm:** Wolff (2008); Schackow et al. (2014) e Costa (2018). **DMC 12,5 mm:** Kan e Demirboğa (2009a); Alves (2020). **DMC 9,5 mm:** Babu e Babu (2003); Babu e Babu (2004); Chen e Liu (2004); Babu, Babu e Wee (2005); Madandoust, Ranjbar e Mousavi (2011); Chen e Fang (2011); Yoon et al. (2015); Ranjbar e Mousavi (2015); Tittarelli et al. (2016); Remesar, Vera e Lopez (2017); Nikbin e Golshekan (2018) e Mazoni (2019). **DMC 6,3 mm:** Babu e Babu (2003); Babu, Babu e Tiong-Huan (2006); Kan e Demirboğa (2007); Tittarelli et al. (2016); Mohammed e Zain (2016) e Tang Van et al. (2018). **DMC 4,8 mm:** Sabaa e Ravindrarajah (1997); Chen, Liu e Chen (2010); Chen e Fang (2011); Xu et al. (2012); Liu e Chen (2014); Lanzón et al. (2015); Pecce et al. (2015); Ozório (2016); Shi et al. (2016); Cui et al. (2016); Brooks, Zhou e Hanna (2018); Lam et al. (2018); Mazoni (2019); Baptista Júnior (2019); Carvalho e Motta (2019). **DMC 2,4 mm:** Babu, Babu e Tiong-Huan (2006); Torres e García-Ruiz (2009); Trussoni, Hays e Zollo (2012); Sadrmomtazi et al. (2012); Brás, Leal e Faria (2013); Herki, Khatib e Negim (2013); Sadrmomtazi, Sobhani e Mirgozar (2013); Sousa Junior (2015); Ozório (2016); Brooks, Zhou e Hanna (2018) e Li et al. (2018). **DMC 1,2 mm:** Chen e Fang (2011). **DMC 0,6 mm:** Ferrándiz-Mas et al. (2014). **DMC 0,3 mm:** Ferrándiz-Mas et al. (2014). **DMC não informado:** Kumayama et al. (2015) e Qurashi et al. (2019).

Observa-se que quase dois terços das publicações analisadas utilizaram EPS com DMC inferior a 4,8 mm. Isso ocorre porque há uma tendência de melhoria dos resultados das propriedades mecânicas com a redução do tamanho das partículas de EPS. Quanto à dispersão, verificou-se que 54% das publicações analisadas adotaram sistemas constituídos por uma mistura de duas ou mais partículas de EPS com tamanhos distintos; 40% trabalharam com partículas de um único tamanho (monodisperso); 6% não informaram a dimensão estudada.

Os primeiros autores a analisar a influência da dimensão do EPS nas propriedades dos materiais cimentícios foram Babu e Babu (2003), que avaliaram sistemas monodispersos constituídos por pérolas de EPS com DMC de 4,8 mm e polidispersos com partículas de 4,8 mm e 6,3 mm. Os resultados mostraram que, para um mesmo teor de EPS, as misturas com menor DMC apresentaram maiores valores de resistência à compressão. Não foi mencionada a proporção adotada para cada dimensão na mistura. Babu, Babu e Tiong-Huan (2006) também verificaram esse fenômeno ao comparar composições com pérolas de EPS de DMC igual a 2,4 mm e 6,3 mm, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Redução da resistência à compressão em função do aumento do teor (p) e da DMC do EPS

(p)	R_{c,28} (MPa)	DMC EPS (mm)
0,20	21,01	2,4
0,20	19,8	6,3
0,35	12,53	2,4
0,35	11,31	6,3
0,50	9,29	2,4
0,50	6,60	6,3

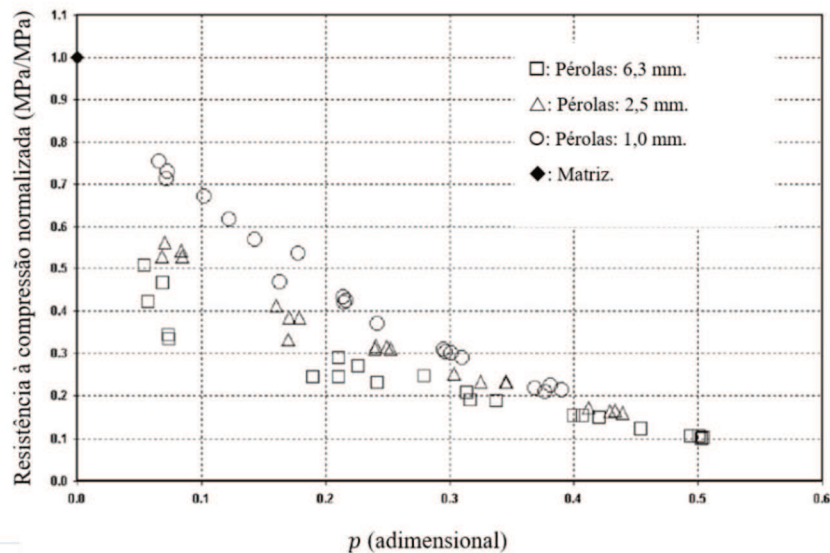
Fonte: Babu, Babu e Tiong-Huan (2006).

Resultados similares também foram observados por Miled, Sab e Le Roy (2007) e Chen e Fang (2011). Miled, Sab e Le Roy (2007) verificaram que, para concretos produzidos com três dimensões de EPS (1 mm, 2,5 mm e 6,3 mm), com teor variando de 10% a 50%, quanto menor a dimensão da partícula de EPS, maior a resistência à compressão para a mesma porosidade (Figura 7).

Os autores também observaram que o efeito do tamanho de partícula é mais pronunciado em concretos de baixa porosidade, cujo modo de ruptura é quase frágil, enquanto para concretos de alta porosidade, com ruptura mais dúctil, esse efeito é praticamente desprezível. Nesse

estudo, ainda foi verificado que o padrão de fissuração dos corpos de prova variava de acordo com a DMC do EPS nos concretos de menor porosidade. Nos compósitos com pérolas de 6,3 mm, a fissuração ocorreu em uma região bem delimitada quando comparada ao compósito com pérolas de 2,5 mm, como ilustrado na **Error! Reference source not found.**a; b, respectivamente. Isso pode ter acontecido devido à expansão das fissuras, que foi facilitada pela maior concentração de EPS em uma região restrita. Para concretos com maior teor de EPS (porosidade elevada), observou-se uma ruptura dúctil caracterizada pela presença de microfissuras distribuídas em toda a matriz e em torno das partículas de EPS. Nesses casos, o efeito da dimensão da partícula foi desprezível (Figura 7 c; d), ou seja, o efeito do tamanho de partícula depende muito do modo de ruptura.

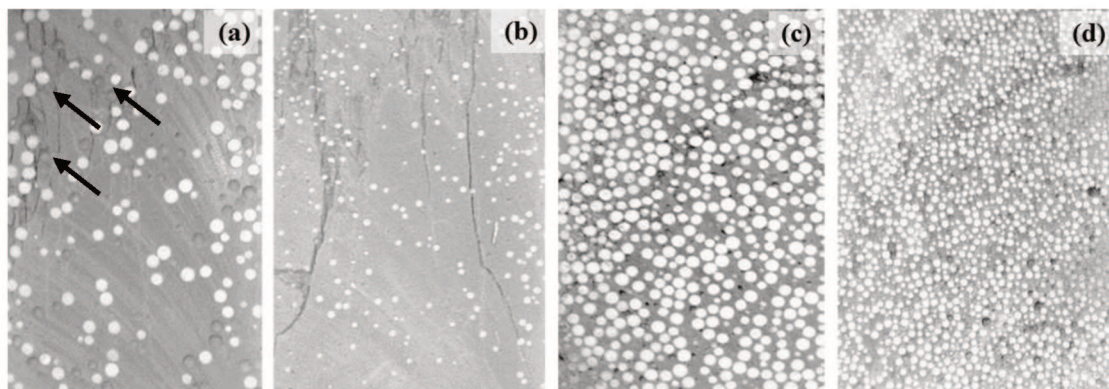
Figura 7 – Variação da resistência à compressão com o tamanho das partículas e teor de EPS



Nota: resistência à compressão normalizada é a razão entre a resistência do compósito com EPS e a resistência do compósito de referência.

Fonte: Miled, Sab e Le Roy (2007).

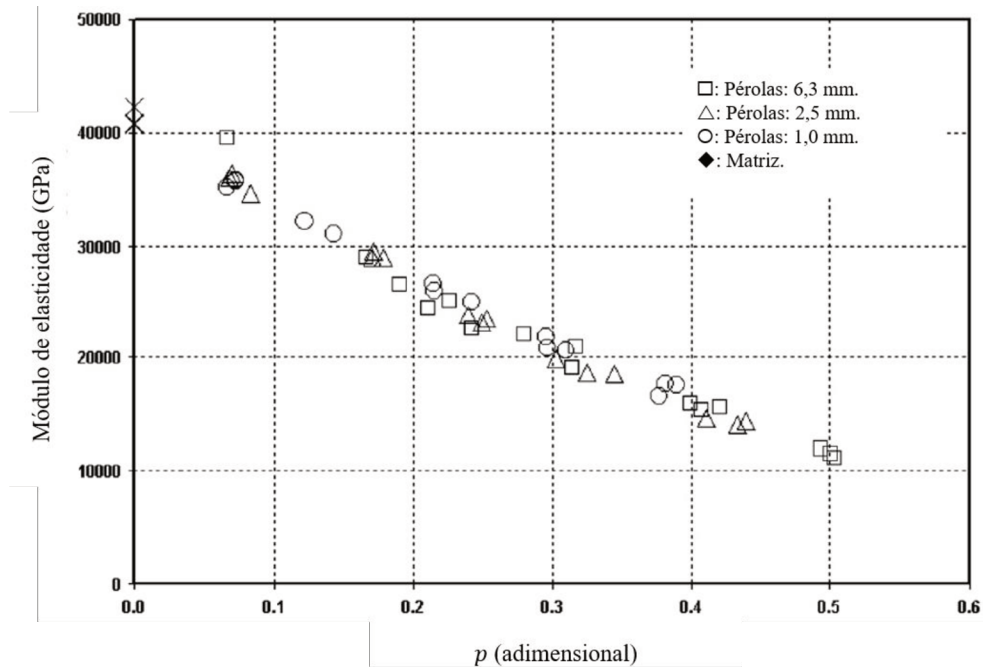
Figura 8 – Variação do tipo de ruptura em função da porosidade do concreto e do tamanho das partículas (a) 6,3 mm e (b) 2,5 mm – 10% EPS; e (c) 6,3 mm e (d) 2,5 mm – 50% EPS



Fonte: Miled, Sab e Le Roy (2007).

Apesar da mudança detectada no padrão de fissuração, Miled, Sab e Le Roy (2007) não detectaram variação do módulo de elasticidade em função da DMC do EPS para um mesmo teor, como ilustrado na Figura 9 .

Figura 9 – Variação do módulo de elasticidade com o tamanho das partículas e teor de EPS



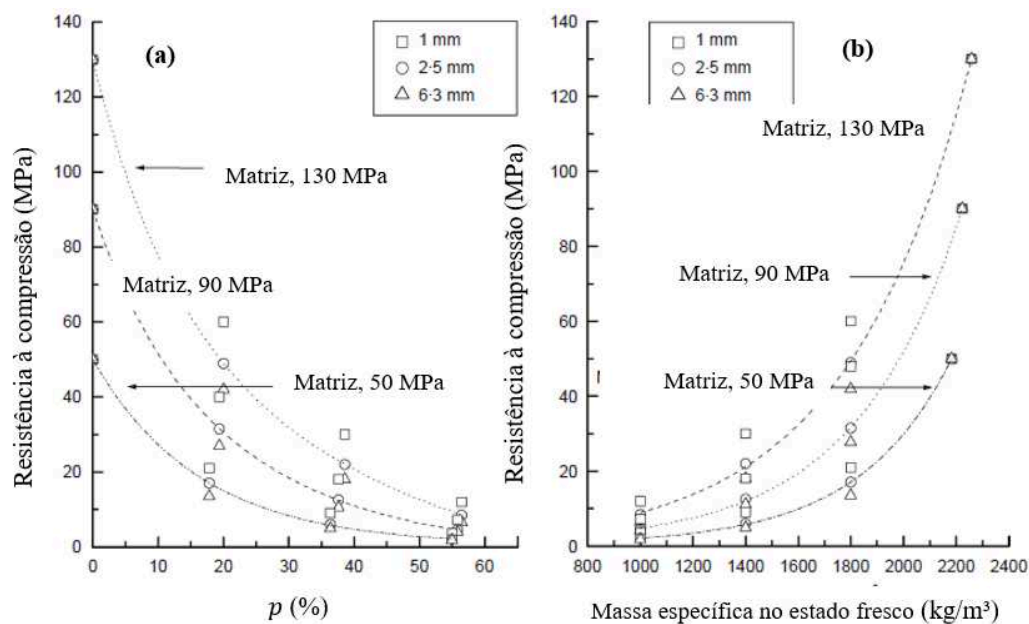
Fonte: Miled, Sab e Le Roy (2007).

Chen e Fang (2011) avaliaram o efeito do teor e do tamanho das partículas de EPS (1; 2,5 e 6,3 mm) na resistência à compressão e massa específica de concretos de resistência à compressão de 50 MPa, 90 MPa e 130 MPa, conforme a Figura 10. Os resultados mostraram que, para compósitos de alta resistência, o decaimento da resistência à compressão em função da massa específica é mais significativo. Isso pode ser devido à menor resistência inerente aos concretos com maior teor de EPS e, conseqüentemente, menor massa específica. Nota-se na Figura 10b que a massa específica varia com o tamanho das partículas de EPS: valores de (p) semelhantes com tamanhos de partícula diferentes apresentam variação da massa específica, e quanto maior o valor de (p), menor o valor da massa específica da matriz em questão.

Para um volume constante, quanto menor o diâmetro das pérolas, menor a quantidade de vazios. Conseqüentemente, a quantidade de EPS e a densidade de massa por volume aumentam, conforme a

Figura 11. Uma vez que as partículas menores são mais estruturadas (possuem maior quantidade de poliestireno em um mesmo volume) e apresentam maior densidade de massa, o aumento é repassado para a matriz cimentícia. Por isso, compósitos com teores de EPS semelhantes e tamanhos de partícula diferentes não apresentam os mesmos valores de massa específica e, nesse caso, quanto menor o tamanho das partículas de EPS, maior a massa específica do composto.

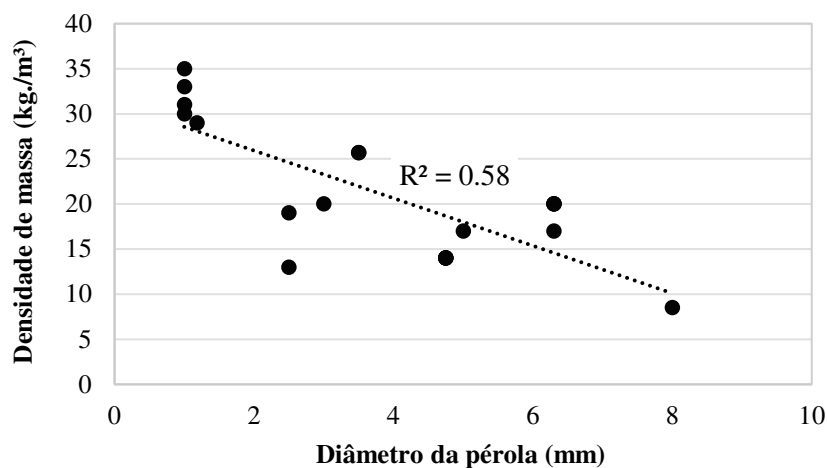
Figura 10 – Variação da resistência à compressão em função do teor de EPS (a) e da massa específica no estado fresco (b)



Fonte: Chen e Fang (2011).

Figura 11 – Variação da densidade de massa do EPS em função do diâmetro da pérola⁵

⁵ **Pérolas virgens:** Babu e Babu (2003); Babu e Babu (2004); Chen e Liu (2004); Babu, Babu e Wee, (2005); Babu, Babu e Tiong-Huan (2006); Kan e Demirboğa (2007); Torres e García-Ruiz (2009); Chen, Liu e Chen (2010); Madandoust, Ranjbar e Mousavi (2011); Chen e Fang (2011); Xu et al. (2012); Sadrmomtazi et al. (2012); Brás, Leal e Faria (2013); Herki, Khatib e Negim (2013); Sadrmomtazi, Sobhani e Mirgozar (2013); Liu e Chen (2014); Sousa Junior (2015); Yoon et al. (2015); Kumayama et al. (2015); Lanzón et al. (2015); Pecce et al. (2015); Ranjbar e Mousavi (2015); Ozório (2016); Shi et al. (2016); Mohammed e Zain (2016); Cui et al. (2016); Remesar, Vera e Lopez (2017); Tang Van et al. (2018); Brooks, Zhou e Hanna (2018); Li et al. (2018); Lam et al. (2018); Nikbin e Golshekan (2018) e Qurashi et al. (2019).



Fonte: A autora.

Em relação à durabilidade dos materiais cimentícios com EPS, Babu, Babu e Tiong-Huan (2006) verificaram que para um mesmo teor de EPS, o aumento do tamanho da partícula acarreta um acréscimo na capacidade de absorção e permeabilidade do concreto, conforme mostra a Tabela 3.

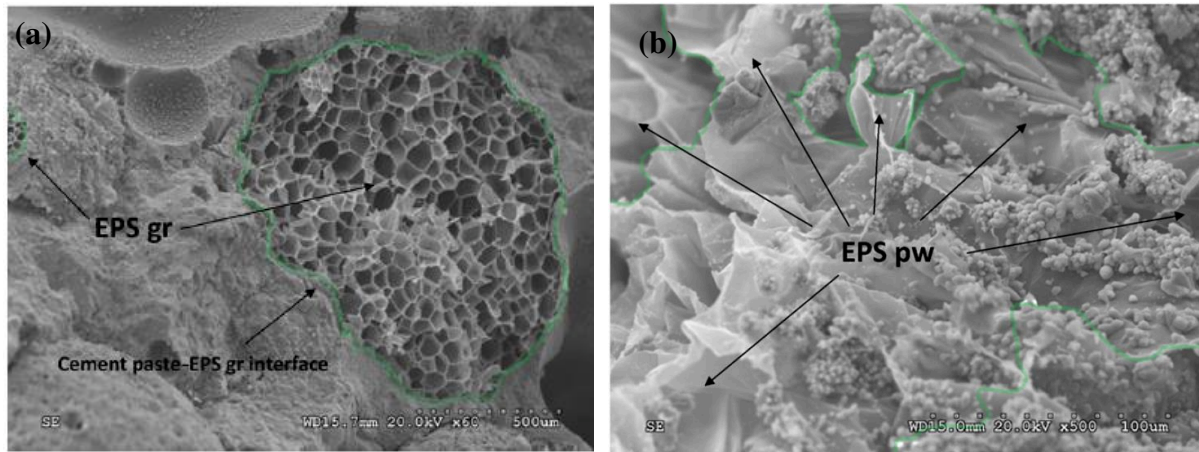
Tabela 3 – Variação da absorção por imersão e por capilaridade em função do teor (p) e do tamanho das partículas de EPS

(p)	Absorção por capilaridade (%)	Absorção por imersão (%)	DMC das partículas de EPS (mm)
0,20	1,13	3,94	2,4
0,20	1,49	4,53	6,3
0,35	1,34	4,23	2,4
0,35	1,98	5,25	6,3
0,50	1,50	5,74	2,4
0,50	3,14	9,01	6,3

Fonte: Babu, Babu e Tiong-Huan (2006).

A dimensão das partículas de EPS também interfere na interface com a pasta cimentícia. Ferrándiz-Mas et al. (2014) compararam o uso de EPS moído (< 1 mm) e em pó (< 0,5 mm) na microestrutura de argamassas (Figura 12). É possível visualizar que, na argamassa com EPS moído, as partículas ainda contêm ar na sua estrutura; no caso do EPS em pó, as partículas formam uma rede polimérica coberta pela pasta cimentícia.

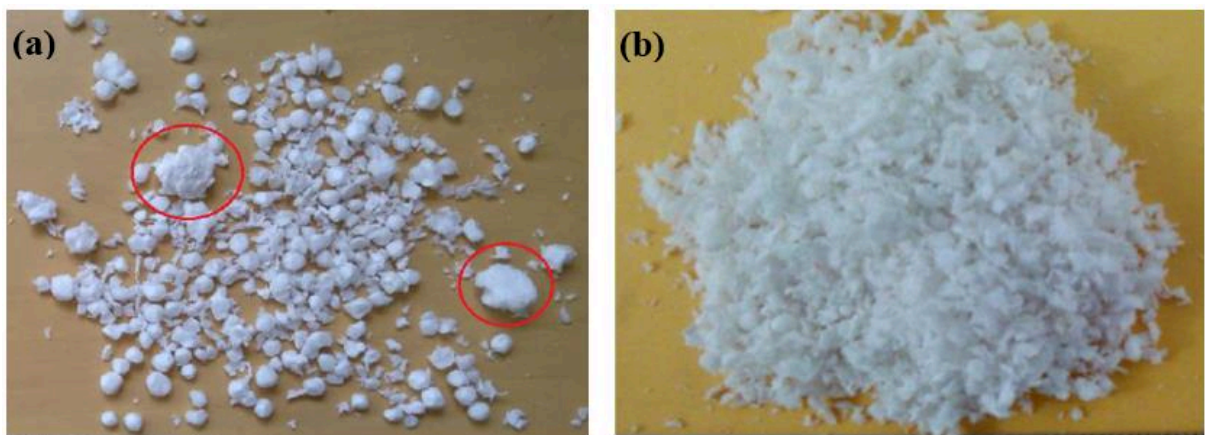
Figura 12 – Zona de transição entre EPS moído (a) (aumento 60×) e rede polimérica formada pelo EPS em pó (b) (aumento 500×)



Fonte: Ferrándiz-Mas et al. (2016).

Alguns autores fizeram adequações na granulometria das partículas para atender a particularidades dos estudos: Costa (2018), menciona que o processo de trituração do EPS reciclado obtido não foi uniforme, apresentando partículas de tamanhos variados e com dimensões elevadas ($> 12,5$ mm), de modo que foi necessária a realização de novo procedimento de trituração e/ou peneiramento para uniformizar a granulometria, como pode ser visualizado na Figura 13a. Sousa Junior (2015) triturou o EPS em pérolas para reduzir a granulometria e facilitar o uso em argamassas de revestimento, como ilustrado na Figura 13b.

Figura 13 – Variação das dimensões do EPS reciclado (a) falha no processo de trituração das partículas e (b) EPS virgem triturado em moinho de facas



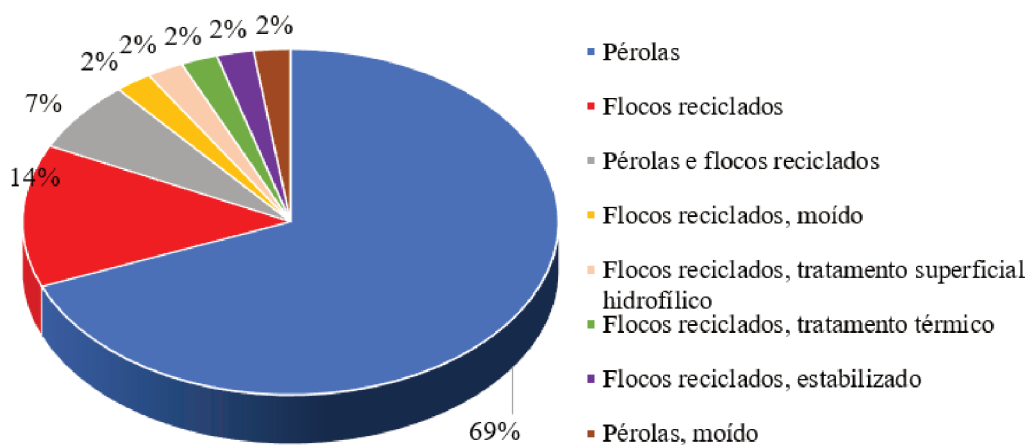
Fonte: (a) Costa (2018) e (b) Sousa Junior (2015).

A variação do tamanho das partículas de EPS presentes na mistura (sistemas polidispersos) também possui efeito significativo nas propriedades dos compósitos. Por exemplo, Tittarelli et al. (2016) observaram que o uso de partículas de mesmo tamanho (monodispersão) de pérolas de EPS pode prejudicar o empacotamento e provocar o aumento da macroporosidade da argamassa.

2.3.3 Tipo de EPS

Conforme mencionado anteriormente, nos materiais cimentícios o EPS vem sendo utilizado na forma de pérolas ou flocos reciclados, sendo o último adotado como alternativa para redução dos impactos ambientais. As pérolas formadas no processo de expansão do EPS apresentam diâmetros que variam entre 0,5 mm e 10 mm (ABIQUIM, 2020). O EPS reciclado é formado por flocos oriundos da trituração de peças de EPS que foram descartadas, cuja composição química depende dos resíduos e do processo de separação, podendo ser variável e conter traços de elementos contaminantes. Na Figura 14 estão apresentados os tipos de EPS utilizados nas publicações analisadas.

Figura 14 – Tipos de EPS utilizados nas publicações analisadas⁶



Fonte: A autora.

Os resultados mostraram que 69% dos autores analisaram a aplicação do EPS virgem em pérolas; 14% reciclado em flocos e 7% em ambos os tipos. Os outros 10% abordaram o uso

⁶**Pérolas virgens:** Babu e Babu (2003); Babu e Babu (2004); Chen e Liu (2004); Babu, Babu e Wee, (2005); Babu, Babu e Tiong-Huan (2006); Kan e Demirboğa (2007); Torres e García-Ruiz (2009); Chen, Liu e Chen (2010); Madandoust, Ranjbar e Mousavi (2011); Chen e Fang (2011); Xu et al. (2012); Sadrmomtazi et al. (2012); Brás, Leal e Faria (2013); Herki, Khatib e Negim (2013); Sadrmomtazi, Sobhani e Mirgozar (2013); Liu e Chen (2014); Sousa Junior (2015); Yoon et al. (2015); Kumayama et al. (2015); Lanzón et al. (2015); Pecce et al. (2015); Ranjbar e Mousavi (2015); Ozório (2016); Shi et al. (2016); Mohammed e Zain (2016); Cui et al. (2016); Remesar, Vera e Lopez (2017); Tang Van et al. (2018); Brooks, Zhou e Hanna (2018); Li et al. (2018); Lam et al. (2018); Nikbin e Golshekan (2018) e Qurashi et al. (2019). **Reciclado:** Wolff (2008); Schackow et al. (2014); Costa (2018); Mazoni (2019); Baptista Junior (2019) e Alves (2020). **Pérolas virgens e reciclado:** Trussoni, Hays e Zollo (2012); Tittarelli et al. (2016) e Carvalho e Motta (2019). **Reciclado, tratamento superficial hidrofílico:** Sabaa e Ravindrarajah (1997). **Reciclado, tratamento térmico:** Kan e Demirboğa (2009a). **Reciclado, estabilizado:** Herki, Khatib e Negim (2013). **Reciclado, moído:** Ferrándiz-Mas et al. (2014).

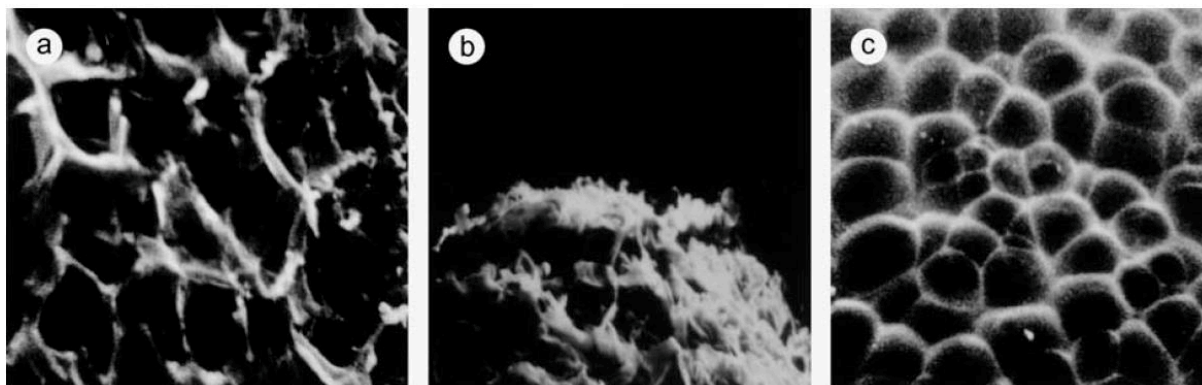
de EPS em pérola ou em floco reciclado com alguma forma de beneficiamento, seja moído ou com tratamento térmico/superficial.

Nas publicações analisadas, verificou-se a utilização EPS em pérolas com diâmetros compreendidos entre 1,0 e 7,2 mm e massa específica entre 9,5 e 34,9 kg/m³. A densidade aparente do EPS reciclado variou de 6,2 a 36,8 kg/m³ e a DMC entre 0,5 e 19 mm; ambas as propriedades dependem do equipamento adotado para a redução das dimensões das partículas.

Laukaitis, Žurauskas e Keriene (2005) avaliaram a microestrutura de compósitos cimentícios constituídos por EPS virgem – pérolas grandes (diâmetros de 5 mm a 10 mm), pérolas pequenas (diâmetros de 2,5 mm a 5 mm) e EPS reciclado (flocos menores que 5 mm).

Os autores verificaram que a microestrutura das partículas varia de acordo com o tamanho e tipo de material. As pérolas são esféricas; as de maior dimensão têm a superfície formada por filetes de poliestireno (Figura 15a), enquanto as pérolas menores são constituídas pela junção de pequenas bolhas (Figura 15c). O EPS reciclado, por ser desagregado mecanicamente, apresentou maior variação da morfologia das partículas. Além disso, as cavidades da superfície são muito mais profundas do que a das pérolas grandes (Figura 15b).

Figura 15 – Micrografia da superfície de diferentes tipos de partículas de EPS



Nota: (a) pérolas grandes; (b) flocos reciclados; (c) pérolas pequenas. Ampliação de 120×.

Fonte: Laukaitis, Žurauskas e Keriene (2005).

A variação do tipo de EPS provoca alterações nos compósitos resultantes. Três publicações compararam o desempenho do EPS em pérolas e em flocos: Trussoni, Hays e Zollo (2012); Tittarelli et al. (2016) e Carvalho e Motta (2019).

No estado fresco, Trussoni, Hays e Zollo (2012) verificaram que, durante a mistura do concreto, o EPS em flocos incorporou o triplo de ar que o EPS em pérolas: 10,7% e 3,64%, respectivamente. Os compósitos com EPS em flocos também apresentaram redução da trabalhabilidade e da massa específica quando comparados aos compósitos com EPS em pérolas. Segundo os autores, isso ocorre devido à forma angular e porosa dos flocos de EPS

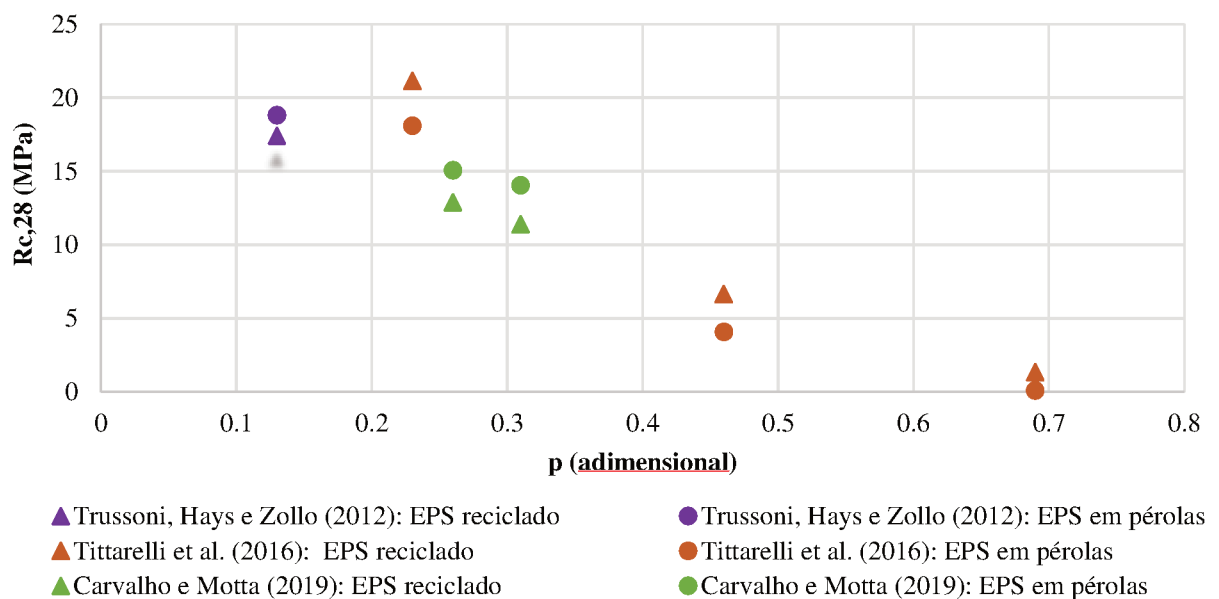
reciclado, decorrente da trituração, ao contrário das pérolas, que são esféricas e com a superfície lisa.

Carvalho e Motta (2019), estudando concretos com agregado graúdo britado, verificaram que a adição de ambos os tipos de EPS (em pérolas e em flocos) melhoraram a trabalhabilidade no estado fresco, pois o formato do EPS era menos angular que o agregado britado.

Tittarelli et al. (2016) avaliaram argamassas estruturais, de resistência moderada e de isolamento térmico utilizando EPS em pérolas e EPS em flocos reciclados, com massa específica e DMC semelhantes. No estudo desenvolvido por Carvalho e Motta (2019) também não foi detectada alteração da trabalhabilidade com a variação entre os tipos de EPS.

O comparativo dos resultados de resistência à compressão dos três trabalhos mencionados acima pode ser visualizado na Figura 16.

Figura 16 – Comparativo da resistência à compressão para compósitos com EPS em flocos e EPS em pérolas



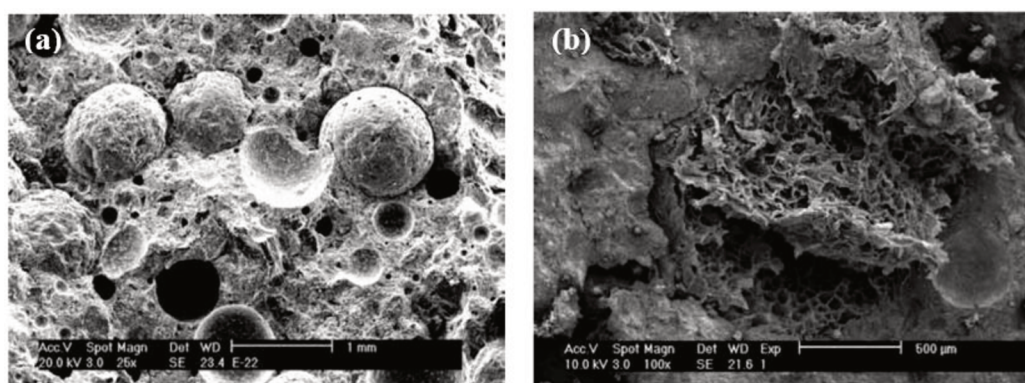
Trussoni, Hays e Zollo (2012) não indicaram a granulometria ou a DMC dos flocos de EPS reciclado; portanto, não é possível determinar se os resultados de resistência à compressão foram influenciados pelas dimensões das partículas. Cabe ressaltar que também não foi utilizado nenhum tipo de aditivo no estudo.

Tittarelli et al. (2016) observaram melhores resultados de resistência à compressão do EPS em flocos quando comparado ao EPS em pérolas (observados na Figura 16), o que não é

condizente com os resultados de Trussoni, Hays e Zollo (2012) e Carvalho e Motta (2019). No estudo de Tittarelli et al. (2016), a granulometria do EPS em flocos foi mais contínua do que a do EPS em pérolas, o que provavelmente favoreceu o empacotamento da matriz, reduzindo a macroporosidade da argamassa.

Trussoni, Hays e Zollo (2012) também avaliaram a superfície fraturada dos compósitos. As características microestruturais das partículas de EPS são semelhantes às observadas por Laukaitis, Žurauskas e Keriene (2005): os flocos de EPS reciclado possuem contorno irregular e as pérolas de EPS virgem são esféricas e pouco rugosas, o que pode reduzir a aderência e provocar o arrancamento na ruptura, como ilustra a Figura 17.

Figura 17 – Micrografia da superfície de ruptura de concreto para EPS em pérola e em flocos



Nota: (a) floco de EPS reciclado com ampliação de 100x; (b) - pérolas de EPS com ampliação de 25x.
Fonte: Trussoni, Hays e Zollo (2012).

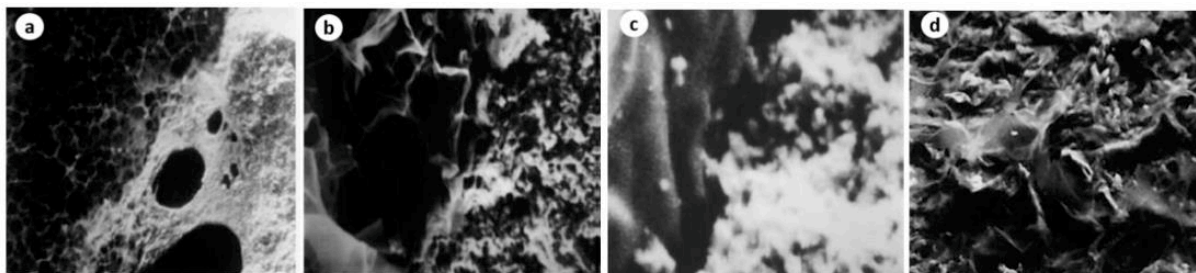
2.3.4 Tratamento superficial das partículas de EPS

Algumas pesquisas propuseram beneficiamento do EPS por tratamento superficial com produtos químicos (SABAA; RAVINDRARAJAH, 1997; LAUKAITIS; ŽURAUSKAS; KERIENE, 2005); tratamento térmico (KAN; DEMIRBOĞA, 2009a) ou por estabilização de partículas (HERKI; KHATIB; NEGIM, 2013), a fim de melhorar a aplicabilidade do EPS como agregado nas misturas cimentícias.

Sabaa e Ravindrarajah (1997), para melhorar a dispersão das partículas de EPS na matriz e evitar segregação, tornaram a superfície do EPS hidrofílica com o uso de produtos químicos. Os autores não traçaram um comparativo entre o EPS com a superfície sem e com tratamento superficial. No entanto, relataram que para misturas com 50% e 70% de substituição do agregado gráúdo por EPS, é imprescindível o uso de aditivo superplastificante para uma trabalhabilidade adequada.

Laukaitis, Žurauskas e Keriene (2005) também realizaram tratamento superficial a fim de conferir características hidrofílicas à superfície das partículas do EPS (virgem e reciclado) e aumentar a aderência entre o EPS e a matriz cimentícia. A hidrofilição das partículas foi realizada de duas maneiras: por imersão e vácuo, sendo utilizada água e solução de agente de expansão (0,2% de naftaleno sulfonato de sódio e 0,03% de solução aquosa de cola). Os resultados mostram que apesar do procedimento com vácuo ser mais eficiente na hidrofilição das partículas, em termos práticos é inviável. Na imersão, o maior nível de hidrofilição é obtido nos primeiros cinco minutos. A microestrutura da zona de transição EPS-pasta cimentícia variou com a dimensão e o tipo de EPS (pérola ou floco). Foi verificado que, no sistema com pérolas graúdas (> 5 mm), os poros não estão interconectados e, após a ruptura, as partículas se fragmentaram, mas a matriz permaneceu aderida à superfície (Figura 18a). No caso do EPS triturado, também foi observada uma forte coesão na zona de transição entre a pérola e a matriz (Figura 18b). Porém, as pérolas com dimensões inferiores a 5 mm apresentaram uma zona de transição menos coesa, provavelmente porque essas partículas apresentam menor rugosidade na superfície, diminuindo a extensão do contato matriz-agregado e, conseqüentemente, a aderência.

Figura 18 – Microestrutura da interface matriz cimentícia e EPS: (a) pérolas 5 a 10 mm – ampliação 30×; (b) EPS reciclado moído menor que 5 mm – ampliação 120×; (c) pérolas de 2,5 a 5 mm – ampliação de 300× e (d) pérolas de 2,5 a 5 mm – ampliação de 12×.



Fonte: Laukaitis, Žurauskas e Keriene (2005).

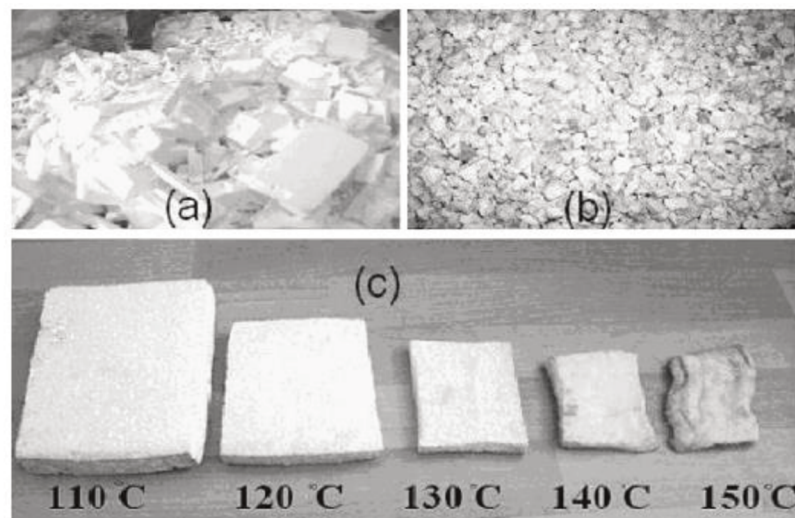
Kan e Demirboğa (2009a), a fim de tornar o EPS reciclado mais estável e com maior resistência mecânica, propuseram um tratamento térmico considerando diferentes temperaturas (100°C a 150°C, com incrementos de 10°C) e períodos de exposição (15; 30; 45; 60 e 120 min). Esse tratamento possibilitou uma redução do volume de resíduos de EPS em até vinte vezes (Figura 19).

Antes do tratamento térmico proposto por Kan e Demirboğa (2009a), a densidade média, condutividade térmica e resistência à compressão dos resíduos de EPS eram de 10 kg/m³;

0,0368 W/mK e 0,12 MPa, respectivamente. Após a modificação, houve o aumento dessas propriedades, sendo o melhor resultado obtido a 130°C e 15 min, sendo equivalente a 217 kg/m³; 0,055 W/mK e 8,29 MPa.

Herki, Khatib e Negim (2013) produziram um tipo de EPS estabilizado, composto por 80% de EPS reciclado, 10% de argila vermelha e 10% de cimento Portland, a fim de reduzir a possibilidade de segregação durante a produção do material cimentício, que é causada pelos métodos convencionais de vibração, nos quais o EPS concentra-se na superfície. Embora esse efeito possa ser reduzido com o uso de aditivos superplastificantes ou adições minerais dispersantes, os autores ressaltam que nem sempre esses recursos estão disponíveis, especialmente em países em desenvolvimento. A desvantagem é que a massa específica do composto aumentou para valores da ordem de 800 kg/m³.

Figura 19 – Deformação volumétrica do EPS com o tratamento térmico (a) resíduo de EPS original (b) EPS modificado e (c) indica a deformação para diferentes temperaturas de tratamento térmico.



Fonte: Kan e Demirboğa (2009b).

2.3.5 *Influência do uso de EPS na produção das matrizes cimentícias*

Alguns autores relatam que devido aos baixos valores da massa específica, durante a mistura as partículas de EPS tendem a se acumular na superfície, resultando na segregação do

compósito (ZHAO et al., 2009; MADANDOUST; RANJBAR; MOUSAVI, 2011; SHI et al., 2016); LI et al., 2018).

Segundo Le Roy, Parant e Boulay (2005), quando partículas de EPS estão presentes num fluido viscoso, duas forças atuam no sistema: o empuxo e a tensão de cisalhamento resultante desenvolvida na matriz, principalmente na interface com a partícula. Assim, para manter a mistura homogênea é necessário que haja um equilíbrio entre a força resultante das partículas no meio e a força motriz ascendente na superfície.

Madandoust, Ranjbar e Mousavi (2011), analisando a trabalhabilidade de concretos autoadensáveis com diferentes teores de EPS ($(p) = 13\%; 19\%; 29\%$ e 39%), constataram que misturas com massa específica menor que 1900 kg/m^3 ou teores acima de 29% são mais susceptíveis à segregação. Isso acontece porque não há uma quantidade adequada de pasta cimentícia para reter o EPS na mistura (BABU; BABU, 2003).

A capacidade de absorção de água do EPS também interfere na produção dos compósitos cimentícios. Wolff (2008), para uma polidispersão de DMC 4,8 mm, verificou que cada 1 g de EPS absorvia 9 g de água. Alves (2020), baseando-se no método proposto por Bouchonneau et al. (2010), constatou absorção média em massa de 300% para EPS reciclado com polidispersão, DMC igual a 12,5 mm e massa específica de $13,5 \text{ kg/m}^3$. O valor elevado da absorção pode ser um resultado da formação dos flocos de EPS durante o processo de trituração: os aglomerados formados pelas partículas menores e a porosidade aberta oriunda da trituração podem aprisionar água em seu interior.

Uma absorção elevada de água por parte do EPS pode comprometer a trabalhabilidade de argamassas e/ou concretos, visto que parte da água de amassamento poderá ser absorvida. Tal como nos agregados reciclados produzidos a partir de resíduos de construção e demolição (RCD), algumas alternativas podem ser adotadas para evitar esse problema: (1) determinação da quantidade de água adicional que deve ser inserida durante a mistura para manter uma dada trabalhabilidade; (2) pré-saturação; (3) adição de aditivos superplastificantes; e (4) tratamentos superficiais impermeabilizantes. No caso de adição de água ou da pré-saturação, pode ocorrer a elevação da relação água/aglomerante, comprometendo o desempenho mecânico. Na prática, uma das formas de obter misturas homogêneas é por meio do uso de aditivos químicos.

2.3.5.1 *Uso de aditivos químicos*

Na Tabela 4 estão apresentados os tipos e teores de aditivo utilizados na produção dos compósitos cimentícios com uso de EPS das publicações compiladas. Verificou-se a utilização

predominante dos aditivos redutores de água (67%), que promovem a dispersão das partículas de EPS na matriz, melhorando a trabalhabilidade sem a necessidade de acréscimo de água.

Os aditivos redutores de água utilizados por Baptista Junior (2019); Madandoust, Ranjbar e Mousavi, (2011); Brás, Leal e Faria (2013); Yoon et al. (2015) e Ranjbar e Mousavi (2015) são à base de éter policarboxílico (PCE). Esses aditivos são polímeros de estrutura combinada, constituídos por uma cadeia principal que adsorve as partículas de cimento e cadeias laterais neutras, que dispersam as partículas por repulsão estérica. Tal mecanismo reduz as forças de atração entre as partículas, liberando a água aprisionada nos aglomerados presentes, diminuindo a tensão de escoamento e aumentando a fluidez da mistura (LIU et al., 2019).

Tabela 4 – Tipo de aditivo químico e teor utilizado na produção dos compósitos cimentícios com EPS nas publicações analisadas

Autor	Tipo de aditivo	Teor (% massa de finos)
Sabaa e Ravindrarajah (1997)	SP	?
Babu e Babu (2003)	SP	0,25-0,75
Babu e Babu (2004)	SP + IA	?
Chen e Liu (2004)	SP	4-5,1 mL/kg
Babu, Babu e Wee (2005)	SP + IA	?
Babu, Babu e Tiong-Huan (2006)	SP	0,50
Kan e Demirboğa (2007)	SP	?
Kan e Demirboğa (2009)	SP	0,50
Torres e García-Ruiz (2009)	RTA + IMP	?; 0,25
Chen, Liu e Chen (2010)	SP	0,80 -1,00 mL/kg
Madandoust, Ranjbar e Mousavi (2011)	RAAE	0,52 - 0,90
Chen e Fang (2011)	SP	0,80 -1,20 mL/kg
Sadrmomtazi <i>et al.</i> (2012)	SP	?
Brás, Leal e Faria (2013)	RAAE	0,30
Liu e Chen (2014)	SP	1,49-1,52
Ferrándiz-Mas <i>et al.</i> (2014)	IA + SP + RA	0,40-0,80; 0,10; 0,50-0,80; 6,00
Schackow <i>et al.</i> (2014)	SP + IA	1,00
Yoon <i>et al.</i> (2015)	RAAE	0,30
Kumayama <i>et al.</i> (2015)	SP	0,30

Lanzón <i>et al.</i> (2015)	RA	0,61
Pecce <i>et al.</i> (2015)	SP + IA + MV	1,12; 1,12; 0,33
Ranjbar e Mousavi (2015)	RAAE	0,90
Ozório (2016)	SP	1,00
Shi <i>et al.</i> (2016)	SP + MV + RAAE	1,43; 1,43; 0,48

Legenda: SP: aditivo superplastificante; IA: aditivo incorporador de ar; RTA: aditivo retentor de água; IMP: aditivo impermeabilizante; RAAE: aditivo redutor de água de alta eficiência; RA: aditivo retentor de água; PD: aditivo polimérico dispersante; MV: aditivo modificador de viscosidade; EPH: emulsão polimérica hidrofugante; HP: aditivo hiperplastificante. Os teores de aditivo separados por ponto e vírgula correspondem a diferentes tipos de aditivo e os separados por hífen aos limites inferior e superior adotados. Finos incluem cimento e adições minerais. A notação (?) indica que o teor não foi informado na publicação.

Continuação Tabela 4 – Tipo de aditivo químico e teor utilizado na produção dos compósitos cimentícios com EPS nas publicações analisadas

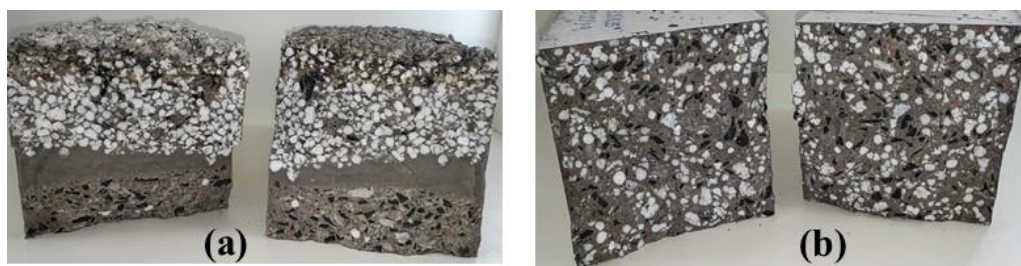
Autor	Tipo de aditivo	Teor (% massa de finos)
Tittarelli <i>et al.</i> (2016)	IA + EPH	0,1-0,3; 0,5
Mohammed e Zain (2016)	SP	3,96-4,1 mL/kg
Cui <i>et al.</i> (2016)	RA	1
Remesar, Vera e Lopez (2017)	RAAE	0,5
Brooks, Zhou e Hanna (2018)	SP	?
Li <i>et al.</i> (2018)	SP, MV e EPH	1,50; 1,00; 0,00-1,00
Lam <i>et al.</i> (2018)	SP	1,43-1,67
Nikbin e Golshekan (2018)	SP	0,42-0,67
Costa (2018)	SP	0,50-0,70
Mazoni (2019)	SP	0,30-0,60
Baptista Júnior (2019)	HP	0,20
Carvalho e Motta (2019)	SP	1,00
Alves (2020)	SP	?

Nota: SP: aditivo superplastificante; IA: aditivo incorporador de ar; RTA: aditivo retentor de água; IMP: aditivo impermeabilizante; RAAE: aditivo redutor de água de alta eficiência; RA: aditivo retentor de água; PD: aditivo polimérico dispersante; MV: aditivo modificador de viscosidade; EPH: emulsão polimérica hidrofugante; HP: aditivo hiperplastificante. Os teores de aditivo separados por ponto e vírgula correspondem a diferentes tipos de aditivo e os separados por hífen aos limites inferior e superior adotados. Finos incluem cimento e adições minerais. A notação (?) indica que o teor não foi informado na publicação.

Fonte: A autora.

A dosagem inadequada dos aditivos superplastificantes pode aumentar a fluidez de forma excessiva, acentuando a segregação (Figura 20a). No entanto, a dosagem adequada propicia uma distribuição homogênea do EPS na mistura (Figura 20b).

Figura 20 – Efeito da incorporação de aditivo dispersante em concretos com uso de EPS: (a) fluidez excessiva (relação a/c = 0,55; aditivo superplastificante = 0,78% e (b) fluidez adequada (relação a/c = 0,35; aditivo superplastificante = 0,60%)



Fonte: A autora.

Algumas pesquisas utilizaram a combinação de diferentes aditivos para atender as particularidades do tipo de material estudado. Verifica-se o uso do aditivo superplastificante em combinação a um incorporador de ar para melhorar a trabalhabilidade no estado fresco. A incorporação de ar contribui com a redução da condutividade térmica dos concretos estudados, mas provoca redução das propriedades mecânicas (SCHACKOW et al., 2014).

Torres e García-Ruiz (2009) estudaram os efeitos do EPS, diâmetro de 1 a 2 mm, como agregado em argamassas de revestimento e adotaram um aditivo retentor de água (éter de celulose) e um impermeabilizante (oleato de sódio), comuns a esse material. No entanto, os autores constataram que o uso do EPS reduziu o espalhamento em 20%, mesmo com o acréscimo de 24% do teor de água durante a mistura em relação à argamassa de referência.

Resultados similares foram obtidos por Ferrándiz-Mas et al. (2014) ao analisarem a influência da incorporação de EPS, em pó ou moído, na produção de argamassas de revestimento. Ambos os tipos de EPS, em teores de $(p) = 0,29$ e $(p) = 0,49$, respectivamente, reduziram a trabalhabilidade da argamassa (1,5% a 5%) e o uso combinado dos aditivos superplastificante, incorporador de ar, polímero dispersante e modificador de viscosidade introduziram ar durante a mistura, reduzindo a resistência à compressão. A diminuição foi mais acentuada para o EPS em pó.

Tittarelli et al. (2016), analisando a influência do uso de hidrofugante à base de silano na produção de argamassas com EPS virgem e reciclado, verificaram que misturas com teor de EPS de 0,23 e 0,46, combinado com aditivo incorporador de ar, melhoraram a trabalhabilidade das argamassas e promoveram um aumento da resistência à compressão aos 28 dias em relação às argamassas sem silano. Para o teor de 70% de EPS, o efeito foi contrário. Além da quantidade e consistência da pasta, outro fator determinante para a trabalhabilidade da mistura no estado fresco é o teor de finos, que pode ser ajustado com o uso de adições minerais.

2.3.5.2 *Uso de adições minerais*

Além de minimizar a segregação e/ou flutuação das partículas de EPS durante a mistura, as adições minerais reduzem a porosidade da pasta cimentícia e, conseqüentemente, aumentam a resistência mecânica. Apesar disso, 55% das publicações analisadas⁷ não utilizaram nenhum tipo de adição mineral. Os outros 45% adotaram tais materiais nos compósitos cimentícios com EPS, sejam eles inertes ou reativos. Na Tabela 5 estão apresentados os tipos de adições minerais utilizados, bem como os teores adotados pelos autores.

Tabela 5 – Tipo e teor de adição mineral utilizado nas publicações analisadas

Autor	Adição mineral	Teor (% total de finos)
Babu e Babu (2003)	MS	3,00; 5,00; 9,00
Babu e Babu (2004)	CV	50,00
Chen e Liu (2004)	MS	0,00; 10,00
Babu, Babu e Wee (2005)	CV	50,00
Babu, Babu e Tiong-Huan (2006)	CV	30,00
Chen, Liu e Chen (2010)	MS	0,00; 10,00; 15,00; 20,00
Madandoust, Ranjbar e Mousavi (2011)	MS; NS	10,00; 10,00 + 2,70
Chen e Fang (2011)	MS	10,00; 20,00; 30,00
Sadrmomtazi <i>et al.</i> (2012)	MS; CCA	10,00; 20,00
Herki, Khatib e Negim (2013)	CV	20,00; 40,00
Sadrmomtazi, Sobhani e Mirgozar (2013)	MS; CCA	10,00; 20,00
Liu e Chen (2014)	MS	23,00
Kumayama <i>et al.</i> (2015)	PM	13,04
Ranjbar e Mousavi (2015)	MS	9,90
Ozório (2016)	MS	0,00; 10,00
Shi <i>et al.</i> (2016)	MS	4,76
Mohammed e Zain (2016)	MS	0,00; 10,00
Li <i>et al.</i> (2018)	CV	25,00

⁷ Publicações analisadas: 45, sendo 25 sem adoção de adições minerais e 20 com uso de algum tipo - reativa (18), inerte (1) ou uso combinado de ambos os tipos (1).

Lam <i>et al.</i> (2018)	CV	17,00; 23,00; 29,00
Nikbin e Golshekan (2018)	MS; FC	4,84 + 25,96

Legenda: MS: microssílica; CV: cinza volante; NS: nanossílica; CCA: cinza da casca de arroz; PM: pó de mármore; FC: fíler calcário.

Fonte: A autora.

A presença de finos tende a aumentar a viscosidade do sistema, diminuindo a ocorrência de segregação. Porém, o uso desses materiais pode demandar o ajuste do teor de água ou aditivo para manter a trabalhabilidade. Madandoust, Ranjbar e Mousavi (2011) observaram em seu estudo que foi mais conveniente adicionar nanossílica do que reduzir a relação água/aglomerante para a manutenção da trabalhabilidade no estado fresco em caso de fluidez excessiva. Ranjbar e Mousavi (2015) constataram a densificação da zona de transição ao reduzir a quantidade de água e otimizar a dispersão das partículas de microssílica com uso de redutor de água.

Observa-se que a maioria dos trabalhos fez uso de adições pozolânicas, como a microssílica, cinza volante e cinza da casca de arroz. De modo geral, o uso de microssílica tende a melhorar as propriedades mecânicas, a durabilidade e a porosidade das matrizes com agregado de EPS, como verificado por Babu e Babu (2003), Chen e Liu (2004) e Sadrmomtazi et al. (2012). Babu e Babu (2004) também observaram essa tendência para concretos com adição de cinza volante.

Adições inertes, como pó de mármore e fíler calcário, atuam predominantemente pela ação física, melhorando o empacotamento do sistema. Também funcionam como agente de nucleação, participando da ativação química do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.3.5.3 *Efeito do método de mistura*

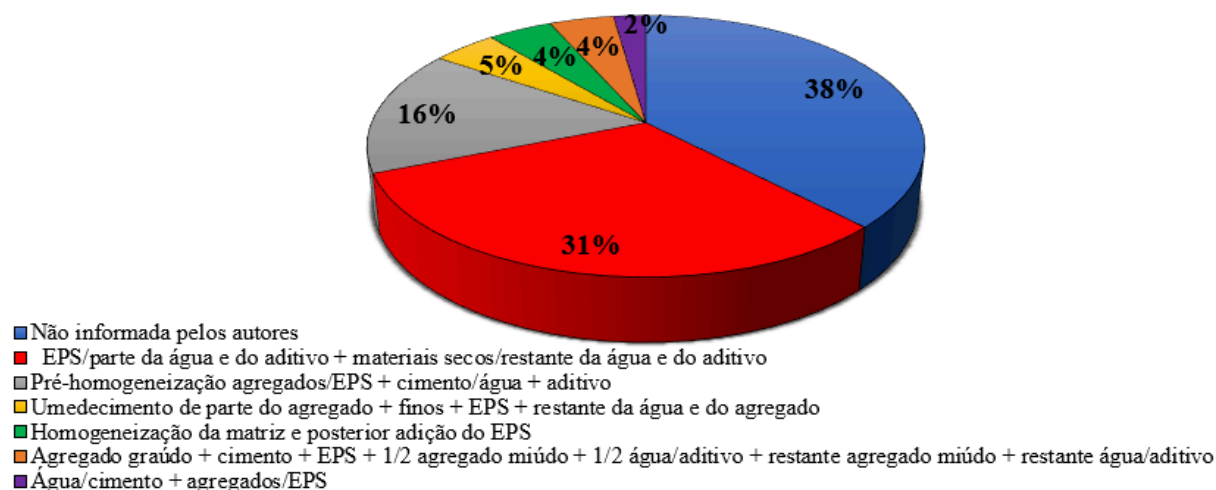
Nos materiais cimentícios com agregados convencionais, o comportamento reológico e as propriedades no estado endurecido não dependem somente dos materiais utilizados; também é importante como é feito o processo de homogeneização dos constituintes. Se os parâmetros de mistura forem adequados, garantindo a uniformidade do sistema, é possível reduzir o teor de água para a obtenção de uma dada trabalhabilidade. Segundo Yang e Jennings (1995), uma mistura deficiente torna a microestrutura heterogênea, gerando defeitos que comprometem a resistência mecânica e a durabilidade dos materiais cimentícios.

Alguns fatores podem interferir na homogeneidade do compósito cimentício durante a execução da mistura. Entre eles podem ser citados o tipo de misturador, o tempo total de mistura

e a taxa de adição de água, bem como a sequência de mistura (CHOPIN; DE LARRARD; CAZACLIU, 2004; ZHOU et al., 2012; FRANÇA; CARDOSO; PILEGGI, 2012; FRANÇA et al., 2016; FRANÇA et al., 2019).

No que tange o processo de mistura das matrizes com EPS, pouca ênfase é dada a esses parâmetros. Na Figura 21 está apresentada a sequência de mistura adotada nas publicações analisadas.

Figura 21 – Sequência de mistura adotada nos estudos analisados⁸



Nota: Componentes separados por barra foram incorporados na mesma etapa. As etapas estão separadas pelo símbolo de adição.

Fonte: A autora.

Nota-se que 38% das publicações analisadas não detalha o processo de mistura: 31% adotaram o método de mistura estabelecido por Babu e Babu (2003), em que a área superficial do EPS é umedecida com parte da mistura de água e aditivo e envelopada pela mistura de agregado miúdo e finos (*sand wrapping* ou *cement wrapping*), o que diminuiria a segregação e melhoraria a coesão do compósito, consequentemente melhorando o desempenho mecânico.

⁸ **Não informada pelos autores:** Babu e Babu (2004); Trussoni, Hays e Zollo (2012); Schackow et al. (2014); Sousa Junior (2015); Yoon et al. (2015); Lanzón et al. (2015); Pecce et al. (2015); Ozório (2016); Tittarelli et al. (2016); Cui et al. (2016); Remesar, Vera e Lopez (2017); Van et al. (2018); Brooks, Zhou e Hanna (2018); Lam et al. (2018); Nikbin e Golshekan (2018); Baptista Júnior (2019) e Carvalho e Motta (2019). **EPS/parte da água e do aditivo + materiais secos/restante da água e do aditivo:** Babu e Babu (2003); Chen e Liu (2004); Babu, Babu e Wee (2005); Babu, Babu e Tiong-Huan (2006); Kan e Demirboga (2007); Kan e Demirboga (2009); Chen, Liu e Chen (2010); Xu et al. (2012); Sadrmondtazi et al. (2012); Herki, Khatib e Negim (2013); Sadrmondtazi, Sobhani e Mirgozar (2013); Shi et al. (2016); Mohammed e Zain (2016) e Qurashi et al. (2019). **Pré-homogeneização agregados/EPS + cimento/água + aditivo:** Sabaa e Ravindrarajah (1997); Torres e García-Ruiz (2009); Madandoust, Ranjbar e Mousavi (2011); Brás, Leal e Faria (2013); Ranjbar e Mousavi (2015); Li et al. (2018) e Mazoni (2019). **Umedecimento de parte do agregado + finos + EPS + restante da água e do agregado:** Wolff (2008) e Kumayama et al. (2015). **Homogeneização da matriz e posterior adição do EPS:** Chen e Fang (2011) e Liu e Chen (2014). **Agregado graúdo + cimento + EPS + 1/2 agregado miúdo + 1/2 água/aditivo + restante agregado miúdo + restante água/aditivo:** Costa (2018) e Alves (2020). **Água/cimento + agregados/EPS:** Ferrándiz-Mas et al. (2014).

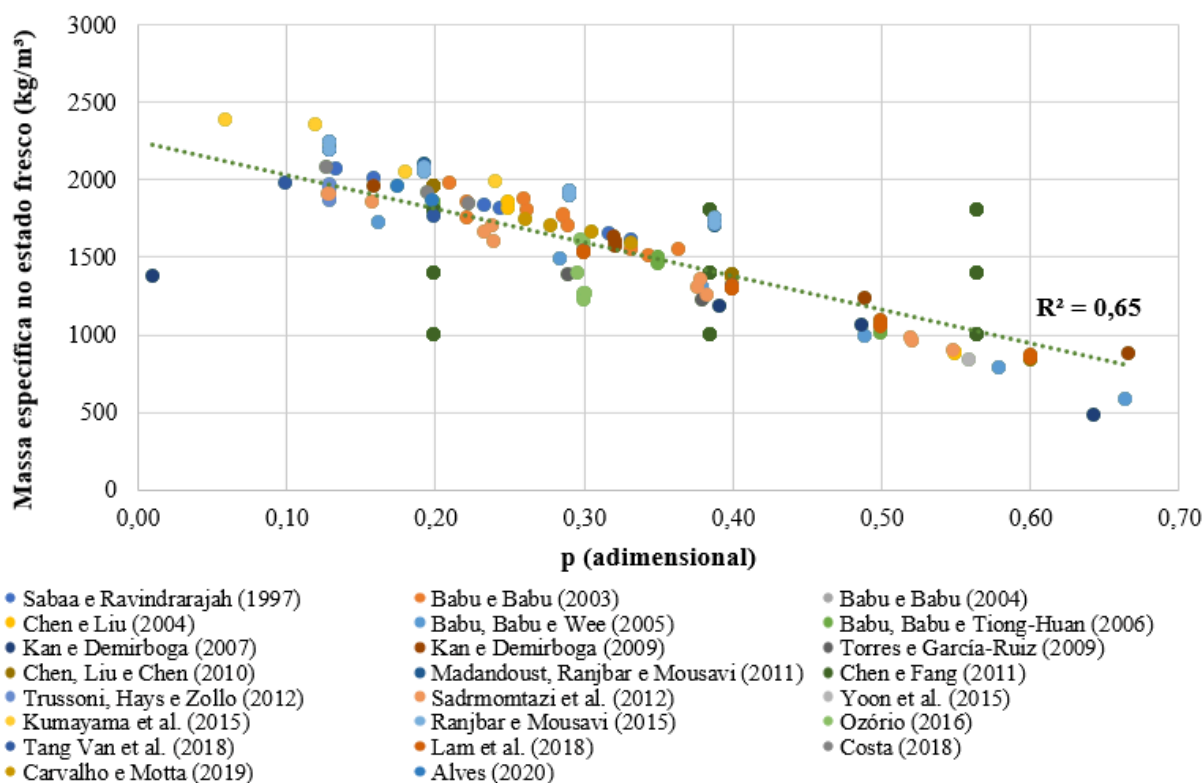
Nos outros tipos de mistura mencionados, parte dos autores utiliza o método de pré-homogeneização a seco dos agregados, que pode ocorrer separadamente ou diretamente no misturador, como uma etapa preliminar, a exemplo de Ranjbar e Mousavi (2015). Em suma, é importante considerar no processo de mistura a taxa de adição de água para reduzir a possibilidade de segregação causada pela flutuação do EPS, como aponta Wolff (2008). Além disso, cuidados adicionais devem ser observados em relação ao tempo de mistura, pois um pequeno intervalo de tempo pode não ser suficiente para a homogeneização do sistema e, em períodos longos, pode ser introduzido elevado teor de ar, comprometendo o desempenho mecânico. Esse cuidado deve ser reforçado para os compósitos com EPS porque existe uma tendência na literatura de adicioná-lo na etapa final da homogeneização, observada em 11% dos trabalhos.

2.3.6 *Influência do teor do EPS nas propriedades dos materiais cimentícios*

O teor de EPS, assim como as propriedades descritas anteriormente, também altera as características dos materiais cimentícios. Existe uma interação das características da matriz cimentícia de referência com as características do EPS que pode alterar os resultados, ou seja, as propriedades do EPS e o teor de EPS isoladamente não são suficientes para explicar os fenômenos ocorridos.

Uma das principais vantagens do uso de EPS é a redução da massa específica do compósito. Por isso, espera-se que a massa específica da matriz diminua com o aumento do teor de EPS, como apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Efeito do teor de EPS sobre a massa específica de compósitos no estado fresco

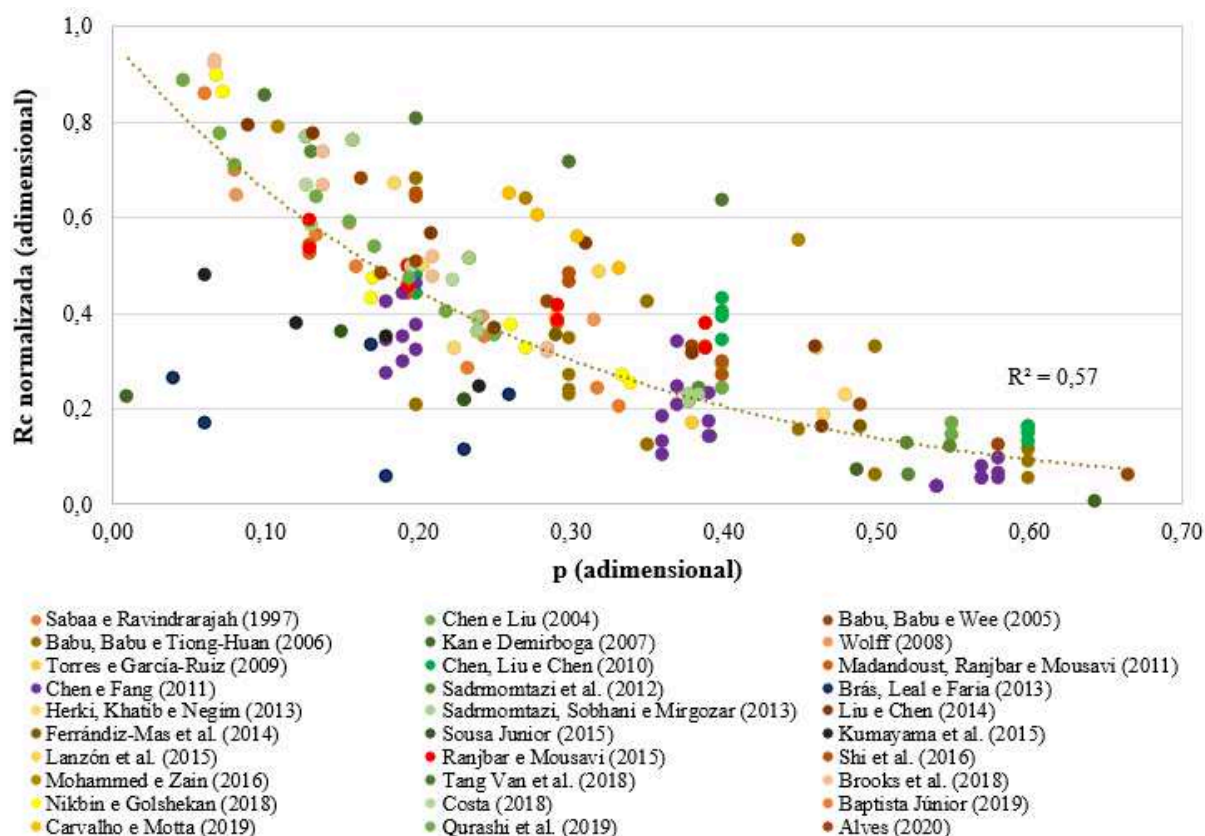


Fonte: A autora.

É importante observar que as características da pasta na qual o EPS é dispersado também impactam a massa específica obtida. Chen e Fang (2011) obtiveram valores semelhantes de massa específica para teores diferentes de EPS ao ajustar a quantidade de aglomerante utilizada. Os autores também notaram que quanto maior o teor de EPS, menor a alteração na massa específica provocada pela variação da DMC do EPS.

A resistência à compressão também decai com o aumento do teor de EPS, de acordo com a Figura 23, na qual estão apresentados os valores de resistência à compressão aos 28 dias, normalizados em relação ao compósito de referência (sem EPS).

Figura 23 – Variação da resistência à compressão (R_c) normalizada em função do teor de EPS



Nota-se na Figura 23 que há uma redução exponencial da resistência à compressão com o aumento do teor de EPS (p) na mistura. Verifica-se também que alguns pontos destoam bastante dessa linha de tendência. Kan e Demirboğa (2007) obtiveram apenas 22% da resistência normalizada para $p = 0,01$. Como o compósito de referência utilizado é uma pasta de cimento e água, fica evidente que o baixo teor de EPS não é suficiente para ajustar adequadamente a proporção da dosagem.

Chen e Fang (2011) observaram que quanto maior o teor de EPS, menor o aumento da resistência à compressão provocado pela redução do tamanho da partícula, mesmo considerando matrizes de referência com resistências bastante distintas. Uma tendência semelhante foi detectada por Tittarelli et al. (2016): quanto maior o teor de EPS, menor a diferença provocada pela variação entre os tipos virgem e reciclado.

Brás, Leal e Faria (2013) também obtiveram valores reduzidos (0,05 a 0,25) de resistência normalizada considerando a mesma faixa do teor de EPS utilizada por outros autores. O baixo desempenho mecânico foi atribuído à incorporação de ar durante a mistura devido ao aditivo redutor de água utilizado associado ao tempo elevado de agitação da mistura (5 min).

Por sua vez, Tang Van et al. (2018) obtiveram valores de resistência normalizada visivelmente maiores para diversas faixas do teor de EPS (p) (0,10, 0,20, 0,30 e 0,40). Nesse estudo, as pérolas de EPS foram incorporadas à matriz cimentícia em forma de adição, ou seja, parte do volume da pasta cimentícia foi retirada para a adição de EPS. Os consumos de cimento foram elevados, variando de 464 a 702 kg/m³; apesar da redução de parte do aglomerante para a adição do EPS, a quantidade restante foi suficiente para garantir a coesão do material.

A tendência observada para a resistência à compressão também foi verificada para outras propriedades mecânicas, como resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão, as quais podem ser visualizadas na Figura 24 e na Figura 25, respectivamente.

Figura 24 – Variação da resistência à tração por compressão diametral normalizada ($R_{t,cd}$) em função do teor de EPS

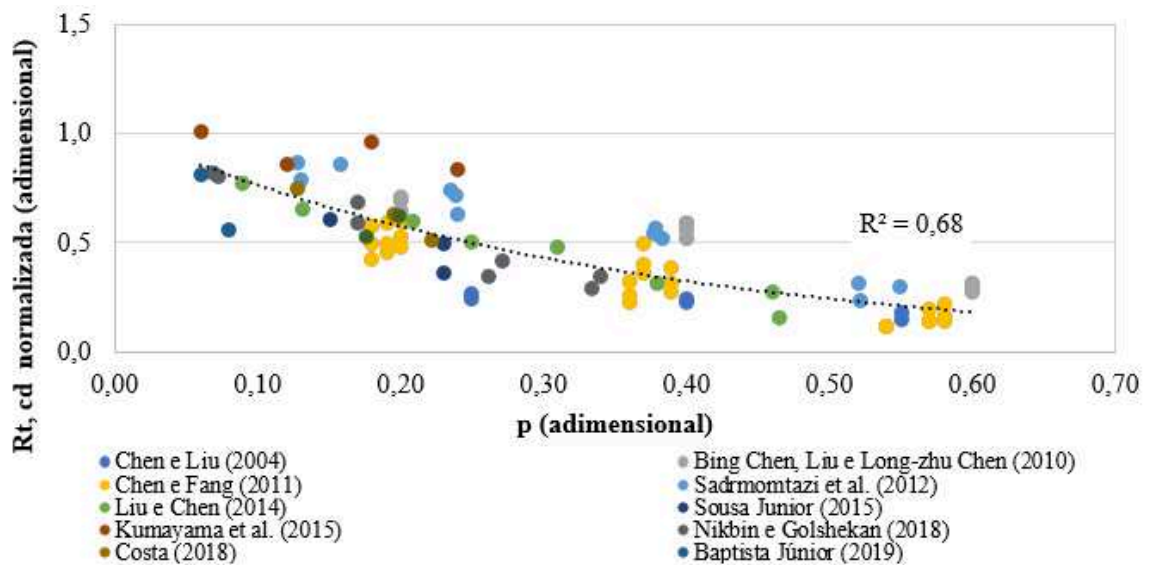
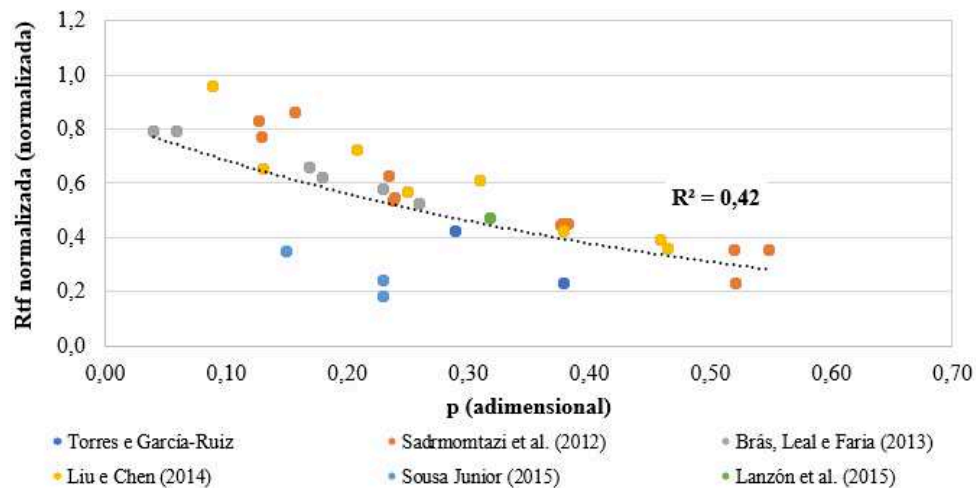


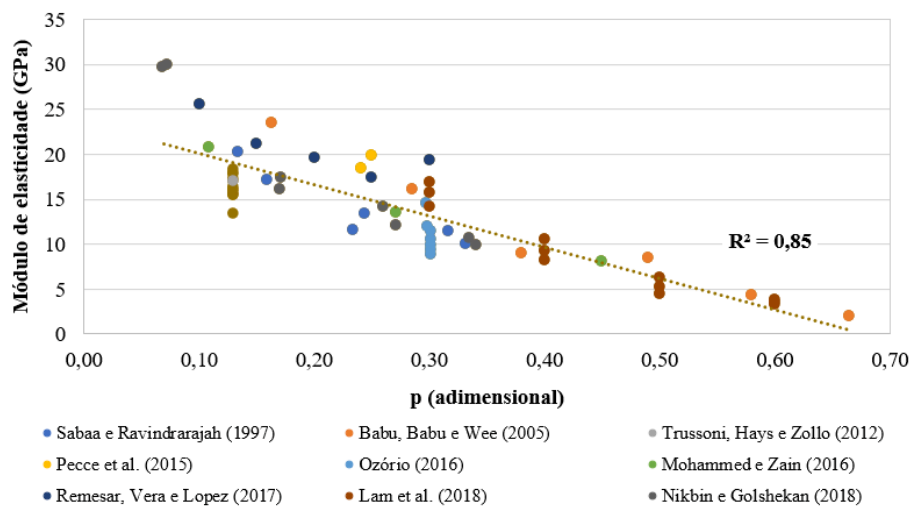
Figura 25 – Variação da resistência à tração na flexão (R_{tf}) normalizada em função do teor de EPS



Fonte: A autora.

Em comparação com a resistência à compressão, poucos trabalhos avaliaram o módulo de elasticidade, que diminui de modo linear na medida em que se aumenta o teor de EPS (Figura 26). Essa tendência também foi observada no estudo de Miled, Sab e Le Roy (2007).

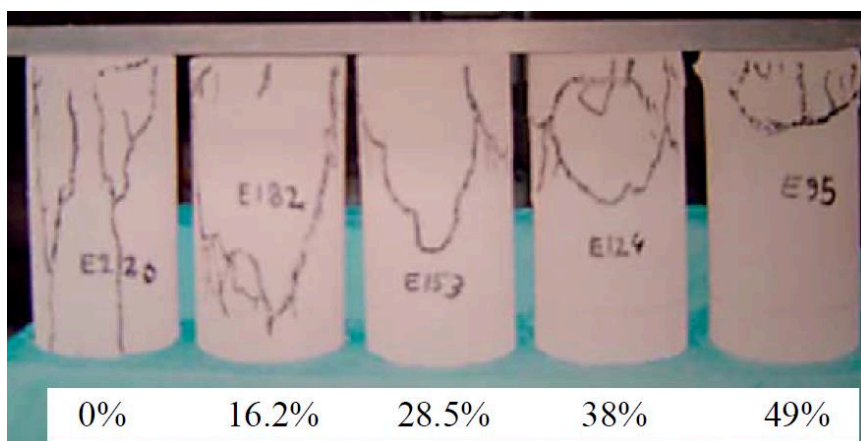
Figura 26 – Variação do módulo de elasticidade em função do teor de EPS



Fonte: A autora.

Alguns autores verificaram que o padrão de fissuração dos corpos de prova é alterado com o aumento do teor de EPS (BABU; BABU; WEE, 2005; MILED; SAB; LE ROY, 2007), o que pode ser explicado pelo módulo de elasticidade. Babu, Babu e Wee (2005) registraram a fissuração para valores de (p) diferentes; quanto maior o valor de (p), maior a concentração de microfissuras em uma região claramente delimitada, como ilustrado na Figura 27. A ruptura localizada na parte superior do corpo de prova pode indicar que a concentração de EPS numa dada região induz o início e a propagação de fissuras.

Figura 27 – Padrão de fissuração dos corpos de prova após ensaio de resistência à compressão para os diferentes teores de EPS analisados



Nota: Os valores em porcentagem correspondem ao teor (p).
Fonte: Babu, Babu e Wee (2005).

Miled, Sab e Le Roy (2007) verificaram que o padrão de fissuração dos corpos de prova, quando submetidos ao esforço de compressão, foi diferente para valores altos e baixos de (p). Para valores baixos do teor de EPS, foi observada a propagação de macrofissuras nos compósitos; nos teores mais altos, a ruptura foi mais localizada, com microfissuração. Babu, Babu e Wee (2005) também constataram a ruptura localizada, afirmando inclusive que o EPS funciona como um material que tem capacidade de absorção de energia.

Por fim, o teor de EPS também impacta as propriedades físicas dos compósitos. Na Figura 28, observa-se a tendência de aumento da absorção de água com o aumento de p . É importante ressaltar que a temperatura de secagem dos corpos de prova para o ensaio de absorção pode provocar efeitos significativos sobre os resultados obtidos. Para valores de p semelhantes, os trabalhos que seguiram as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2005a), que especifica a secagem dos corpos de prova a 105°C, apresentaram valores de absorção elevados (SCHACKOW et al., 2014; SOUSA JUNIOR, 2015; CARVALHO; MOTTA, 2019). Assim, o resultado pode ser alterado tanto pela possibilidade de retração das partículas de EPS provocada pela temperatura de secagem quanto pela decomposição de hidratos durante o processo de secagem. Isso foi comprovado pelos resultados obtidos por Ozório (2016) e Mazoni (2019), que realizaram a secagem a 50°C e obtiveram valores de absorção consideravelmente menores. Nessa mesma linha, Maaroufi et al. (2018), submetendo corpos de prova ao calor por um determinado período, constataram a variação do diâmetro das pérolas com o aumento da temperatura, como mostra a Figura 29.

Figura 28 – Efeito do teor de EPS na absorção dos materiais cimentícios

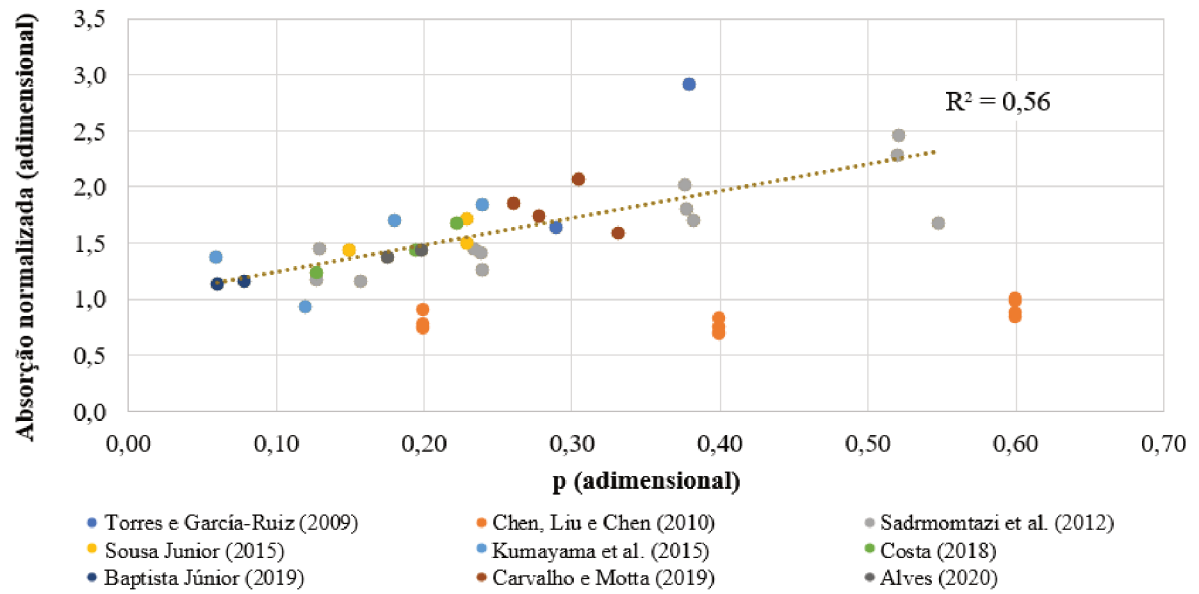
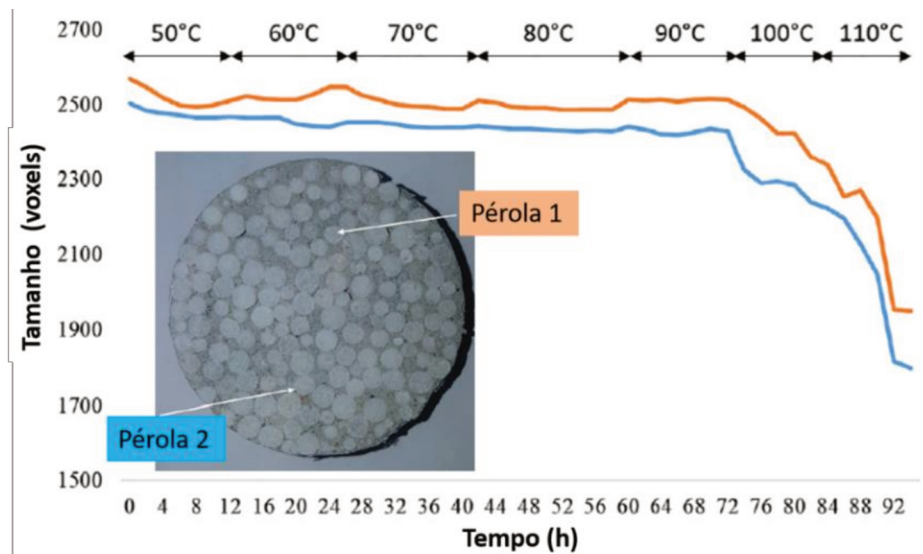


Figura 29 – Variação do diâmetro das pérolas de EPS em função da temperatura e do tempo de exposição ao calor



2.4 Conclusões Parciais

O uso de poliestireno expandido como agregado para a produção de materiais cimentícios leves pode contribuir para minimizar os impactos ambientais pela extração de recursos naturais e deposição de resíduos. Com base nas publicações analisadas, são tecidas as seguintes conclusões:

- quanto à forma de inserção do EPS nas compósitos cimentícios, verificou-se a aplicação em substituição de parte do volume de agregado miúdo e/ou graúdo e em relação ao volume total da mistura; pouco foi observado sobre o uso como adição à mistura, que demanda uma quantidade maior de finos e/ou aditivos para garantir a trabalhabilidade, o que pode reduzir o escopo das aplicações;
- a dimensão das partículas de EPS tem um papel preponderante no desempenho mecânico dos compósitos cimentícios. 67% dos trabalhos analisados adotaram partículas inferiores a 4,8 mm, o que indica o potencial de aplicação do EPS em substituição à areia. No entanto, poucos estudos analisaram a importância do empacotamento das partículas de EPS na redução da porosidade do compósito, sendo empregados principalmente sistemas com granulometria uniforme ou descontínua, geralmente com duas faixas granulométricas. No caso do EPS virgem, a limitação da disponibilidade de partículas com diferentes faixas granulométricas é resultante do processo de expansão das pérolas. A reciclagem do EPS, além dos benefícios ambientais, pode propiciar a produção de sistemas polidispersos com melhor desempenho mecânico. No entanto, o processo de trituração precisa ser controlado;
- poucos estudos abordaram as diferenças nas propriedades em relação ao uso do EPS virgem (pérolas) e reciclado (flocos). Há divergência de resultados em relação ao desempenho dos compósitos quando comparado os dois tipos. Essa divergência pode ser oriunda não somente do tipo de EPS, mas também da variabilidade do EPS virgem (devido à granulometria disponível) e do reciclado (causada pelo processo de trituração). Ressalta-se ainda a carência de estudos que abordem a caracterização dos tipos de EPS em termos de composição, forma e dimensão das partículas e até do beneficiamento efetuado para a aplicação nos compósitos;
- as misturas com EPS podem acentuar os efeitos de segregação e/ou flutuação das partículas na matriz devido à diferença de massa específica entre o EPS e o meio dispersante. Para mitigação desses efeitos, têm sido utilizados aditivos químicos e adições minerais, que tendem a aumentar a viscosidade da pasta e dispersar as partículas. É necessário adequar o teor de aditivo de forma a não causar fluidez e incorporação de ar excessiva;
- a otimização do processo de mistura também pode contribuir para obtenção de misturas mais homogêneas; no entanto, 38% das publicações não mencionam o procedimento adotado. Não há estudos sobre a ordem de colocação dos componentes, a taxa de adição

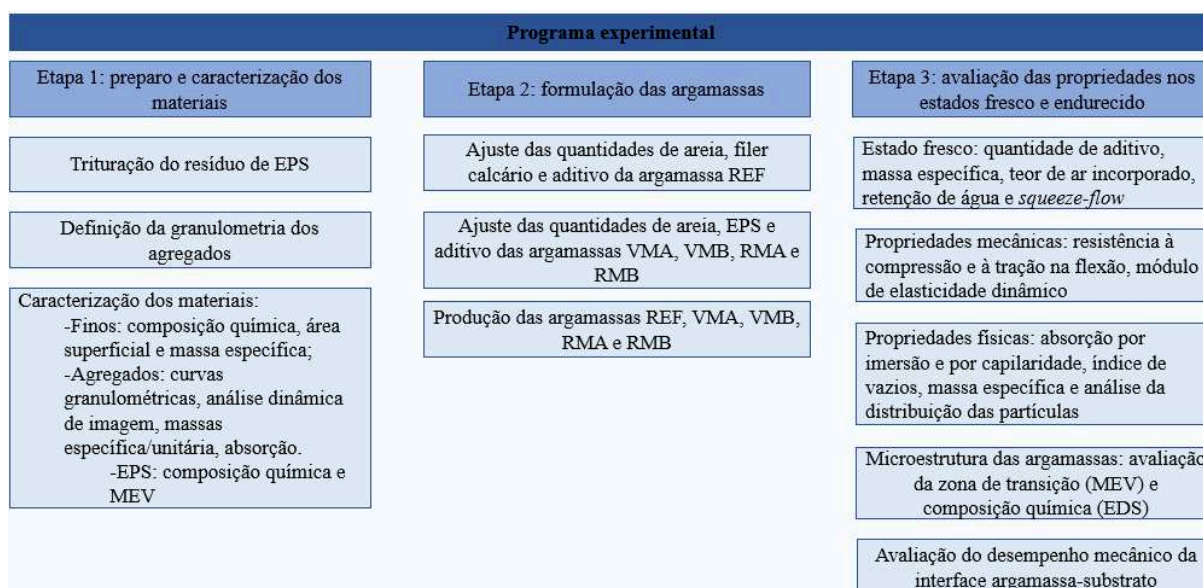
de água, o tempo de homogeneização e as variações decorrentes tanto no comportamento reológico das misturas com EPS quanto nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade no estado endurecido;

- sobre a absorção de água do EPS, os resultados obtidos por Wolff (2008) e Alves (2020) são indícios de que o EPS pode absorver água. Não se sabe se esses resultados são particularidades dos lotes estudados ou se podem ser generalizados. O entendimento dessa característica superficial das partículas de EPS torna-se importante, visto que muitos autores relataram a necessidade de ajustes de água ou o uso de aditivos redutores de água para obtenção de uma trabalhabilidade adequada quando o EPS foi inserido na mistura. Além disso, há evidências de que o EPS aumenta a capacidade de absorção de água dos materiais cimentícios, causando um impacto negativo na durabilidade;
- o teor de EPS (p) na mistura exerce um papel preponderante nas propriedades dos materiais cimentícios. No estado fresco, o aumento de EPS pode induzir a perda de trabalhabilidade: aplicação em teores acima de 30% provocaram segregação da mistura. De modo geral, há uma redução das propriedades mecânicas com o aumento do teor de EPS na mistura, limitando o uso em aplicações estruturais. Há uma tendência exponencial de decaimento com o aumento do teor de EPS quando avaliada a resistência mecânica dos compósitos. Para o módulo de elasticidade verificou-se uma tendência linear. O aumento do teor de EPS tende a concentrar as fissuras na região de maior incidência de partículas de EPS, mesmo que o compósito não tenha apresentado segregação. Também nota-se pelos resultados de Miled, Sab e Le Roy (2007), Chen e Fang (2011) e Tittarelli et al. (2016) que para teores de EPS acima da faixa de 30-40%, a melhoria no desempenho mecânico provocada pela redução do tamanho da partícula de EPS, pelo aumento da quantidade de aglomerante na pasta cimentícia e pela variação do tipo de EPS é menos expressiva;
- por fim, foram observados maiores valores de absorção de água dos compósitos cimentícios com o aumento do teor de EPS. Alguns autores constataram que a temperatura de secagem estabelecida para a realização dos ensaios pode influenciar os resultados e induzir a análises distorcidas.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência do uso de EPS como agregado e do método de mistura nas propriedades de argamassas. Foram avaliadas cinco argamassas, produzidas com 0% e 50% de substituição do volume total da areia por EPS virgem ou reciclado, sendo as formulações com EPS submetidas a dois procedimentos de mistura baseados na NBR 16541 (ABNT, 2016b). O resíduo de EPS, obtido comercialmente, foi triturado a fim de se ajustar a granulometria para uso como agregado miúdo (< 4,8 mm). As etapas do programa experimental estão esquematizadas na Figura 30.

Figura 30 – Representação esquemática do programa experimental adotado



Fonte: A autora.

Os materiais utilizados foram caracterizados por meio de ensaios químicos e físicos. A partir da dosagem, as argamassas foram avaliadas no estado fresco e endurecido; também foram realizados ensaios para avaliação da microestrutura. Por fim, foi mensurada a aderência das argamassas quando aplicadas a um substrato de concreto por meio do ensaio de resistência de aderência à tração.

3.1 Materiais

Para a produção das argamassas foram utilizados como fração fina (< 75µm) cimento e fíler calcário. Como agregados, foram empregadas duas frações de areia natural quartzosa,

ambas disponíveis na região de Uberlândia; duas frações de EPS virgem, denominadas pérola e micropérola; e resíduo de EPS após trituração. Os outros materiais usados foram aditivo superplastificante e água da rede de abastecimento público. Também foi necessário o uso de um substrato cimentício para mensurar a resistência de aderência das argamassas⁹. O procedimento adotado para preparação e caracterização dos materiais utilizados está descrito nas seções a seguir.

3.1.1 *Finos: cimento e fíler calcário*

As argamassas foram produzidas com cimento Portland tipo CPV – ARI (marca Cauê – Intercement) composto por clínquer, sulfato de cálcio e material carbonático, em conformidade com a NBR 16697 (ABNT, 2018a). A massa específica foi igual a 3055 kg/m³ e a superfície específica igual a 354 m²/kg, ambas determinadas conforme as normas NBR 16605 (ABNT, 2017) e NBR 16372 (ABNT, 2015), respectivamente. A composição química do cimento está apresentada na Tabela 6 e foi obtida pelos ensaios de fluorescência de raios X e de perda ao fogo, métodos prescritos pela NBR ISO 12677 (ABNT, 2014) e NBR NM 18 (ABNT, 2012), respectivamente.

Tabela 6 – Composição química do cimento CPV utilizado

Composto	Resultados (%)
CaO	62,19
SiO ₂	15,33
SO ₃	5,16
Al ₂ O ₃	3,51
Fe ₂ O ₃	2,64
MgO	1,95
K ₂ O	1,02
Na ₂ O	0,53
Perda ao fogo	4,12

Fonte: A autora.

⁹ Para a avaliação da resistência de aderência à tração, as argamassas foram aplicadas sobre substrato cimentício, de baixa absorção, com coeficiente de absorção capilar aos 30 min igual a 0,0393 g/cm². Anterior à aplicação da argamassa, a superfície foi lavada com detergente e água para remoção da eventual contaminação com desmoldante. Após a limpeza, as placas foram secas em estufa a 50°C durante sete dias.

Foi utilizado fíler calcário (Procarb 5, obtido comercialmente junto à Provale Mining Group), a fim de minimizar a segregação das argamassas. De acordo com o fabricante, esse material possui a massa específica equivalente a 2070 kg/m³, superfície específica igual a 295 m²/kg e resíduo insolúvel igual a 4,5%. Na Tabela 7 está apresentada a composição química e a perda ao fogo do fíler calcário utilizado: nota-se a predominância de carbonato de cálcio (CaCO₃) e carbonato de magnésio (MgCO₃).

Tabela 7 – Composição química do fíler calcário

Propriedade	Resultados
CaCO ₃ (%)	80,00
MgCO ₃ (%)	15,50
Perda ao fogo média (%)	41,11

Fonte: Provale (2021) – composição química e autora (perda ao fogo média).

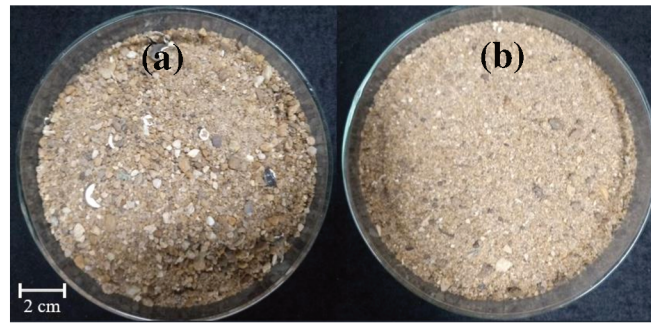
3.1.2 *Água e aditivo*

Foi utilizada água potável da rede pública de abastecimento de Uberlândia na produção das argamassas. Para a obtenção do índice de consistência estabelecido foi utilizado o aditivo superplastificante MasterGlenium 3500, marca BASF. Segundo informações do fabricante, esse aditivo é a base de éter policarboxílico, possui massa específica 1100–1140 kg/m³, odor leve, pH de 7–9, aspecto líquido e cor castanho escura. O teor recomendado varia de 0,20–1,20% sobre a massa de cimento, sendo possível um índice de redução de água de até 40%. O teor de aditivo adotado para cada argamassa estudada foi definido pelo ensaio de índice de consistência (260 ± 10 mm).

3.1.3 *Areia natural*

Após avaliação de diferentes lotes de areia natural disponíveis na região, verificou-se a deficiência de partículas finas nas areias (< 0,30 mm), mesmo que comercializadas como areia média fina ou areia fina. Para ajustar a granulometria, tendo em vista a aplicação em argamassa de revestimento, foram utilizadas duas areias distintas – denominadas AR1 e AR2, como mostrado na Figura 31.

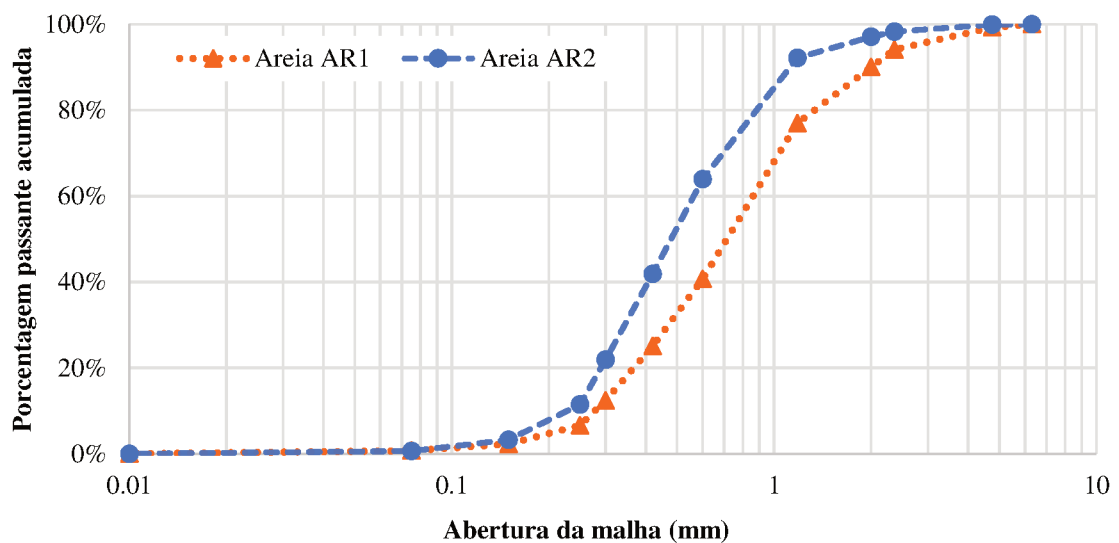
Figura 31 – Areias naturais utilizadas: AR1 (a) e AR2 (b)



Fonte: A autora.

A distribuição granulométrica das areias foi determinada conforme os procedimentos descritos na NM 248 (ABNT, 2003), sendo incluídas as peneiras 2,00 mm; 0,42 mm; 0,25 mm e 0,075 mm para obtenção de uma curva mais detalhada. As curvas granulométricas das areias AR1 e AR2 estão apresentadas na Figura 32.

Figura 32 – Distribuição granulométrica das areias disponíveis



Fonte: A autora.

As propriedades físicas das areias estão descritas na Tabela 8. O coeficiente de uniformidade e de curvatura das areias foi determinado a partir da obtenção dos diâmetros característicos: D_{10} , D_{60} e D_{90} . Os resultados mostram que as areias disponíveis diferem quanto à granulometria e aos parâmetros indicados na Tabela 3. A areia AR2 apresenta uma porcentagem de partículas finas superior à areia AR1. No entanto, ambas são mal graduadas, uma vez que o coeficiente de uniformidade é menor que 6 (PINTO, 2006). Quanto ao

coeficiente de curvatura, ambas as areias apresentam valores menores que 1, o que é um indicativo de que a curva granulométrica é descontínua (PINTO, 2006).

Tabela 8 – Módulo de finura, diâmetros característicos e coeficientes de não-uniformidade e de curvatura das areias utilizadas

Propriedades	Areia	
	AR1	AR2
Módulo de finura	2,74	2,20
D ₁₀	0,28	0,23
D ₆₀	0,48	0,35
D ₉₀	2,00	0,79
Coeficiente de uniformidade	3,26	2,45
Coeficiente de curvatura	0,90	0,92

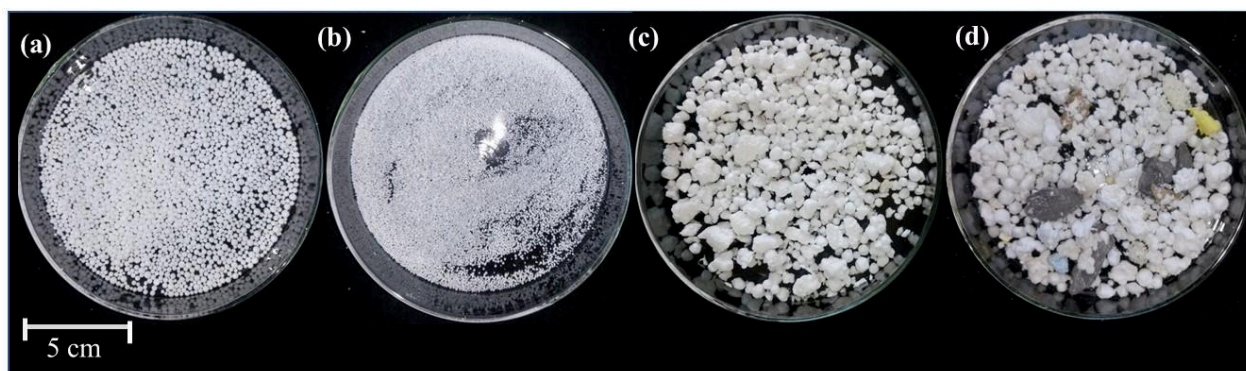
Fonte: A autora.

Para o ajuste do traço da argamassa de referência, foram realizados testes preliminares para verificação da trabalhabilidade. Verificou-se que o uso somente da areia AR1 produzia uma argamassa de baixa trabalhabilidade e, ao adicionar água para obtenção do índice de consistência, havia segregação. Desse modo, para evitar tais problemas optou-se pela utilização da mistura das duas areias (AR1 e AR2). A proporção entre elas foi determinada empiricamente (procedimento descrito no item 3.5) até que a trabalhabilidade das argamassas fosse satisfatória (índice de consistência igual a 260 ± 10 mm), resultando em 55% de AR1 e 45% de AR2.

3.1.4 EPS

Foram utilizados dois tipos de poliestireno expandido, virgem e reciclado, ambos disponíveis comercialmente. O EPS virgem, distribuído para empacotamento de mercadorias, foi obtido junto à empresa *Styroform* em duas granulometrias: pérola e micropérola. O EPS reciclado foi adquirido na empresa Premon, resultante da trituração de embalagens descartadas e resíduos de construção, como lajotas e enchimentos. Devido à quantidade de material a ser utilizada, o EPS reciclado foi constituído a partir da homogeneização de dois lotes de resíduos (R1 e R2). Na Figura 33 estão apresentados os tipos de EPS estudados.

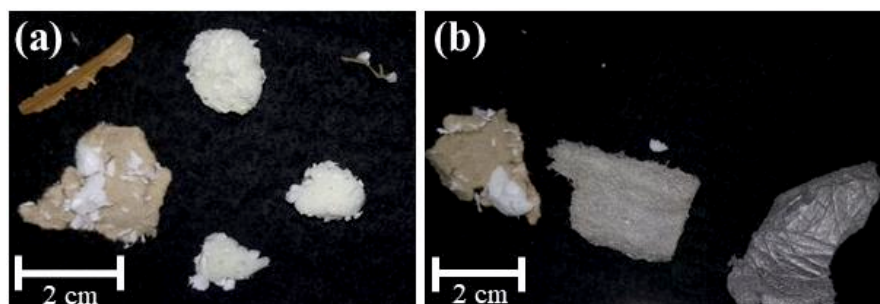
Figura 33 – Tipos de EPS utilizados (a) pérola; (b) micropérola; (c) reciclado 1 (R1); (d) reciclado 2 (R2)



Fonte: A autora.

Nos resíduos de EPS, lote R1, além de partículas de EPS, constatou-se a presença de espuma de poliuretano, fragmentos de papelão e restos de vegetais, destacados na Figura 34a. No lote R2, também foi constatada a presença de partículas achatadas, possivelmente de poliestireno extrudado (XPS), e resíduos de papelão/tubo esponjoso (Figura 34b). Estas impurezas nos lotes são oriundas da falta de separação dos resíduos na fábrica.

Figura 34 – Presença de contaminantes nos lotes dos resíduos de EPS utilizados: R1 (a) e R2 (b)



Fonte: A autora.

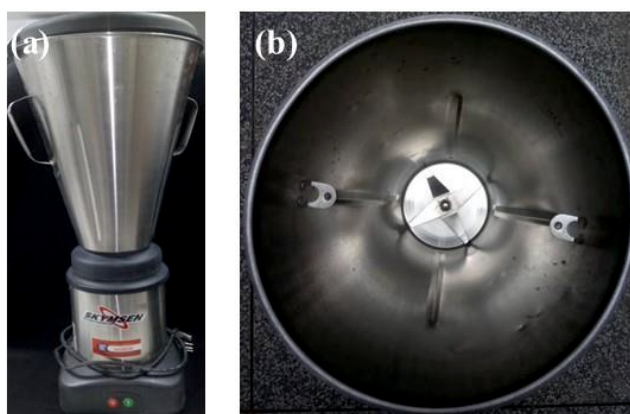
Os resíduos de EPS, R1 e R2 apresentaram dimensão máxima característica, determinada conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), igual a 19 mm e 12,5 mm, respectivamente. Sendo assim, foi necessário a redução das partículas para utilização como agregado miúdo em argamassas. O método adotado será apresentado no subitem a seguir.

3.1.4.1 *Preparação dos resíduos de EPS (R1 e R2)*

Os resíduos de EPS foram submetidos a um processo de trituração para redução da dimensão das partículas, a fim de se obter uma curva granulométrica similar ao EPS virgem para fins comparativos e homogeneização dos lotes dos resíduos recebidos. Esse processo foi realizado segundo o método a úmido proposto por Hernández-Zaragoza et al. (2013)¹⁰, utilizando um liquidificador industrial Skymssen, modelo LS-08MB-N, com potência do motor de 0,5 CV e 3500 rpm, acoplado a um copo monobloco fabricado em inox com capacidade de 8 L, como mostrado na Figura 35.

Na trituração, o volume foi limitado a 6 L devido à capacidade total do equipamento utilizado, pois em quantidades superiores parte da água transbordava. A proporção volumétrica de água/EPS adotada foi de 1:1, definida após testes. Um volume menor de água impedia a circulação do EPS no recipiente, dificultando o contato das partículas com as lâminas. Do mesmo modo, quando era adicionado excesso de água, o EPS flutuava, se acumulava na superfície e não era triturado.

Figura 35 – Liquidificador industrial utilizado no processo de trituração: (a) vista frontal e (b) vista interna



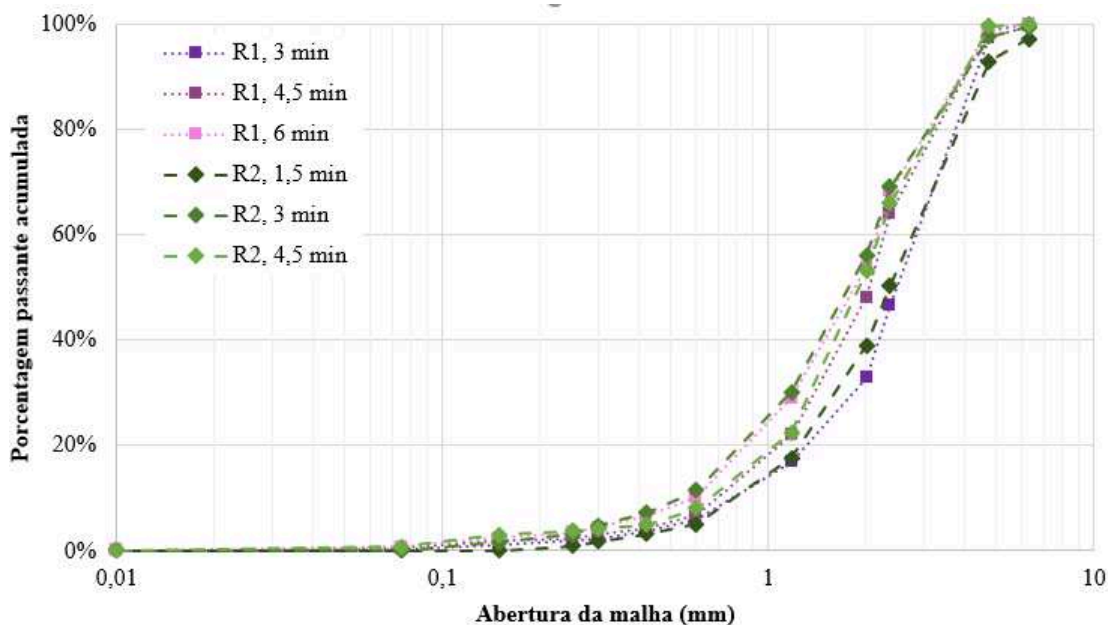
Fonte: A autora.

Para a trituração foram testados quatro intervalos de tempo: 1,5 min; 3 min; 4,5 min e 6 min. O controle foi feito por meio da determinação da curva de distribuição granulométrica, adotando o mesmo procedimento de ensaio descrito na caracterização das areias. O tempo de trituração foi definido a partir do momento em que a curva granulométrica do EPS triturado se mantivesse constante, com o desvio padrão menor que 5% para as porcentagens de todas as

¹⁰ Também existe a possibilidade de trituração a seco, que pode ser feita a partir de um moinho de facas. No caso da trituração à úmido, não foi avaliada a possibilidade de reutilização da água de moagem.

peneiras ou até o limite do equipamento. Na Figura 36 estão apresentadas as curvas granulométricas obtidas para os dois resíduos submetidos aos diferentes tempos de trituração. O desvio padrão consta no Apêndice A.

Figura 36 – Curvas granulométricas dos resíduos de EPS em função do tempo de trituração



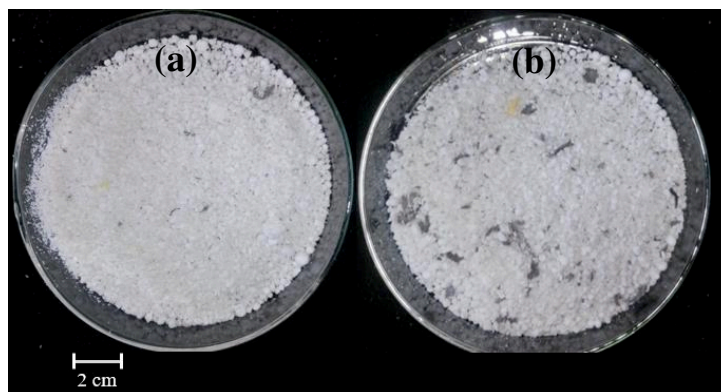
Fonte: A autora.

Os resultados mostram que o processo de trituração foi eficaz para a redução das partículas de EPS: foi possível reduzir a dimensão máxima característica de 19 mm e 12,5 mm para 4,8 mm. O tempo de trituração adotado foi de 6 min para o lote R1 e 4,5 min para o lote R2. Essa diferença pode ser atribuída predominantemente à dimensão inicial das partículas de EPS de cada lote.

Após a definição do tempo adequado, os resíduos de EPS foram triturados. Ao final dessa etapa, o EPS foi vertido em uma peneira de abertura da malha de 0,075 mm, descartando a fração pulverulenta passante oriunda do processo de trituração. A fração retida na peneira foi seca ao ar em uma superfície com declividade de 30% por aproximadamente duas horas, perdendo o excesso de água por gravidade¹¹. Em seguida, os lotes foram secos em estufa por 48 h a uma temperatura constante de $50 \pm 5^\circ\text{C}$, a fim de evitar a degradação do material devido à temperatura de secagem (OZÓRIO, 2016; MAAROUFI et al., 2018). Posteriormente à secagem, os lotes de EPS foram caracterizados, homogeneizados e armazenados até a sua utilização. A aparência final do EPS triturado pode ser visualizada na Figura 37.

¹¹ O procedimento de secagem ao ar foi adotado porque, ao retirar o excesso de água por gravidade, o tempo de secagem em estufa foi reduzido de 96 h para 48 h.

Figura 37 – EPS triturado utilizado na produção das argamassas: (a) R1 e (b) R2



Fonte: A autora.

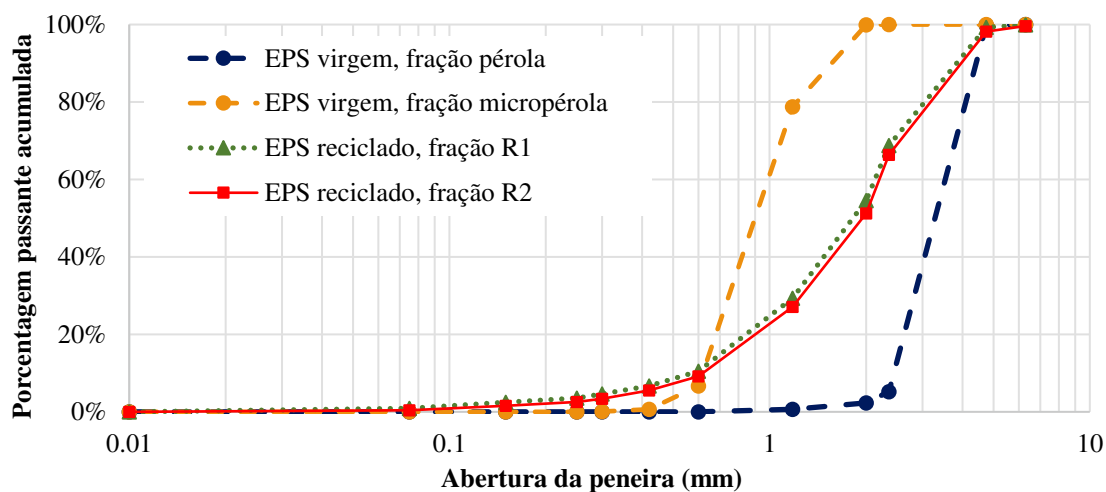
3.1.4.2 Distribuição granulométrica das partículas de EPS

Uma vez que ambos os tipos de EPS estavam sob a forma de agregado miúdo, foi feito o ensaio para avaliação da distribuição granulométrica, conforme procedimento descrito anteriormente. No entanto, devido à baixa massa específica do EPS, alguns cuidados foram necessários para garantir a confiabilidade dos resultados. A massa de material a ser ensaiada foi limitada para evitar a formação de uma camada espessa de material sobre as peneiras. Sendo assim, foram utilizados 3 g para os lotes de EPS reciclado, 5 g para as pérolas finas e 10 g para as micropérolas, o que foi equivalente a uma camada de 0,5 cm de espessura sobre a peneira de fundo, que retém 100% do material. O ensaio foi realizado utilizando agitador mecânico e o tempo de vibração utilizado foi de 15 min para garantir que as partículas se movessem adequadamente durante o peneiramento.

Além disso, devido à eletricidade estática o EPS adere facilmente às superfícies em contato, razão pela qual a massa retida foi determinada a partir da diferença de massa entre as peneiras cheias e vazias, evitando a perda de material aderido na peneira e acessórios utilizados. Para a realização do ensaio, as amostras foram obtidas de forma aleatória, sendo feitas duas determinações para cada fração do EPS virgem, pérola e micropérola, e dez para cada lote de EPS reciclado (R1 e R2). A quantidade de ensaios para o EPS reciclado foi adotada como parâmetro de controle do processo de trituração¹². As curvas granulométricas obtidas dos EPS virgem e reciclado estão apresentadas na Figura 38.

¹² As curvas granulométricas de controle de trituração do EPS reciclado constam no Apêndice A.

Figura 38 – Curvas granulométricas das frações utilizadas na composição dos tipos de EPS



Fonte: A autora.

É possível observar que a granulometria dos lotes de EPS reciclado é melhor graduada quando comparada aos lotes de EPS virgem, cuja granulometria é uniforme (especialmente das pérolas). Para fins comparativos entre os tipos de EPS e/ou com o agregado natural, foi necessário ajustar as proporções de cada fração para a produção das argamassas. No caso do EPS virgem, foi necessário inserir uma fração de correção que reduzisse a falta de partículas entre 2,36 mm e 1,18 mm. A fração de correção foi obtida a partir do peneiramento de parte do lote das micropérolas. A proporção de cada material estudada será apresentada posteriormente.

3.2 Definição da Curva Granulométrica dos Agregados

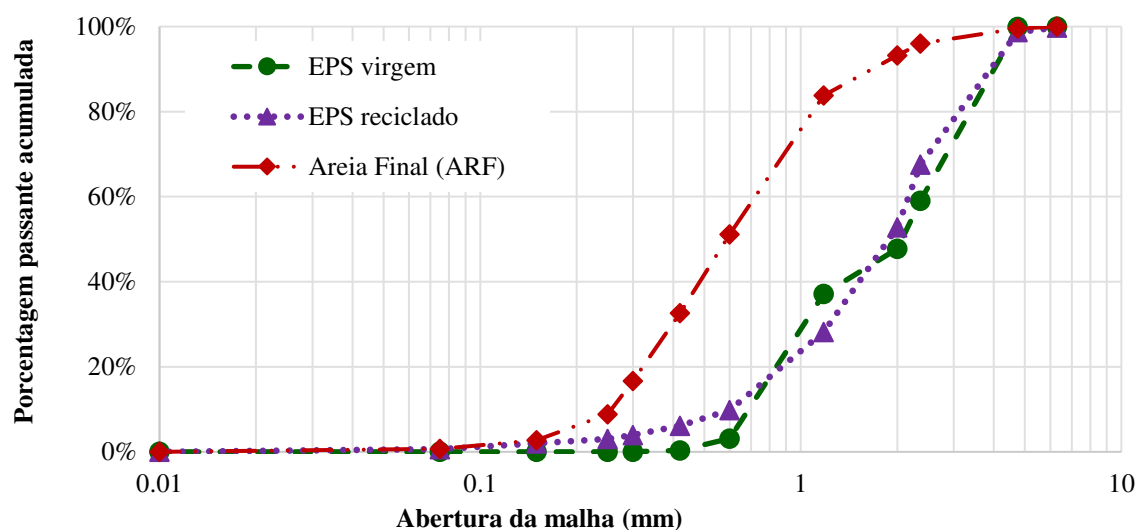
Após a preparação do EPS reciclado e a realização do ensaio de granulometria dos agregados, foi realizada a análise das curvas granulométricas para a definição das proporções de cada material. Foram estudados três agregados diferentes: (a) areia natural – AR1 e AR2; (b) EPS virgem – pérola e micropérola; e (c) EPS reciclado – R1 e R2. A proporção de cada material foi adotada de modo que a curva granulométrica dos EPS e areia natural fossem semelhantes. O ajuste entre as curvas de EPS (virgem e reciclado) foi feito até que o desvio padrão entre as curvas granulométricas fosse inferior a 5%. A proporção final estabelecida para cada agregado estudado está apresentada na Tabela 9 e as curvas granulométricas apresentadas na Figura 39. A dimensão máxima característica, coeficiente de uniformidade, coeficiente de curvatura e módulo de finura dos agregados estão representados na Tabela 10.

Tabela 9 – Porcentagens das frações utilizadas para a composição granulométrica dos agregados

Tipo de agregado	Fração	Porcentagem final
Areia	AR1	55%
	AR2	45%
EPS virgem	Pérola	43%
	Micropérola	47%
	Fração de correção	10%
EPS reciclado	R1	45%
	R2	55%

Fonte: A autora.

Figura 39 – Curvas granulométricas finais dos agregados utilizados



Em relação ao coeficiente de uniformidade, tanto a areia quanto os dois tipos de EPS apresentaram valores maiores que 2, ou seja, não são uniformes, mas ainda assim são mal graduados, uma vez que o coeficiente de uniformidade é menor que 6 (PINTO, 2006).

Quanto ao coeficiente de curvatura, tanto a areia quanto o EPS virgem apresentaram valor menor que 1, o que indica descontinuidade da curva granulométrica (PINTO, 2006). Isso era esperado para o EPS virgem por causa da uniformidade das frações de pérola e micropérola. Ainda que a fração de correção tenha sido utilizada, não foi possível estabelecer a continuidade da curva entre as partículas retidas nas malhas de abertura 0,60 e 2,00 mm, provocando o patamar visível na Figura 39. O EPS reciclado não apresenta o mesmo problema, pois o coeficiente de curvatura é maior que 1 e o traçado da curva granulométrica não apresenta patamares, como o EPS em pérolas.

3.3 Caracterização dos Agregados

A fim de complementar as informações obtidas com as curvas granulométricas, após a homogeneização dos materiais nas frações adotadas, foram realizados ensaios para determinação da densidade de massa, massa unitária, absorção de água e fator de forma dos agregados. As partículas de EPS também foram caracterizadas por ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS).

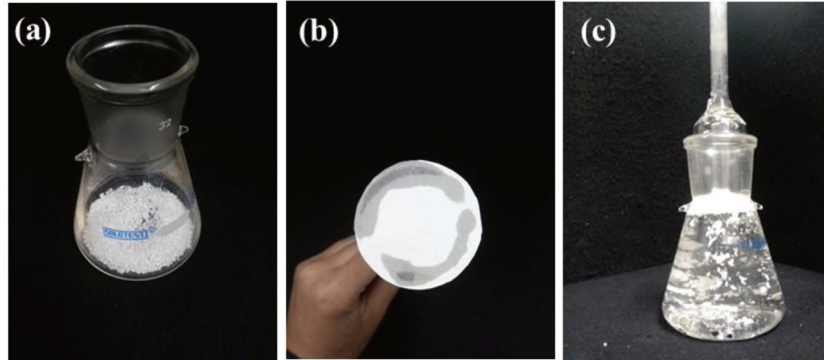
3.3.1 Determinação da massa unitária e densidade de massa

A massa unitária dos agregados foi determinada conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR NM 45 (ABNT, 2006) e a densidade de massa segundo a NBR NM 16916 (ABNT, 2021b). No caso do EPS¹³, adaptou-se a quantidade de material a ser ensaiada devido ao volume ocupado pelas partículas, sendo adotada uma massa de aproximadamente 0,5 g. Essa quantidade evitou a formação de uma camada espessa que poderia dificultar a percolação da água, acarretando o aprisionamento de bolhas de ar. Para a realização do ensaio, o material foi adicionado ao frasco e a tampa foi vedada com um disco de papel filtro para impedir a flutuação do EPS e a desestabilização do menisco formado. O conjunto foi vibrado num agitador mecânico durante 5 min, a fim de eliminar as bolhas de ar eventualmente

¹³ Foi testado o método utilizado por Alves (2020), no entanto houve dificuldade na determinação do volume deslocado e a variabilidade dos resultados provavelmente ocasionada pelo aprisionamento de ar no infusor e/ou não preenchimento de todos os vazios do EPS com água.

presentes. Posteriormente, o frasco foi preenchido com água até a marcação de 500 mL. Detalhes do procedimento estão ilustrados na Figura 40.

Figura 40 – Detalhes do ensaio de determinação de massa específica dos EPS: (a) frasco com EPS; (b) papel filtro utilizado na tampa do frasco para evitar flutuação; e (c) frasco preenchido com água



Fonte: A autora.

Após a estabilização do menisco, determinou-se a massa específica do EPS no estado seco ($\rho_{EPS,S}$) conforme a Equação (2):

$$\rho_{EPS,S} = \frac{m_{EPS}}{V - V_a} \quad (2)$$

em que: m_{EPS} , V e V_a são a massa de EPS, o volume do frasco e o volume de água adicionada ao frasco, nessa ordem.

3.3.2 Determinação da absorção de água

A absorção de água da areia (Abs) foi determinada conforme o método prescrito na NBR 16916 (ABNT, 2021b), sendo calculada pela Equação (3):

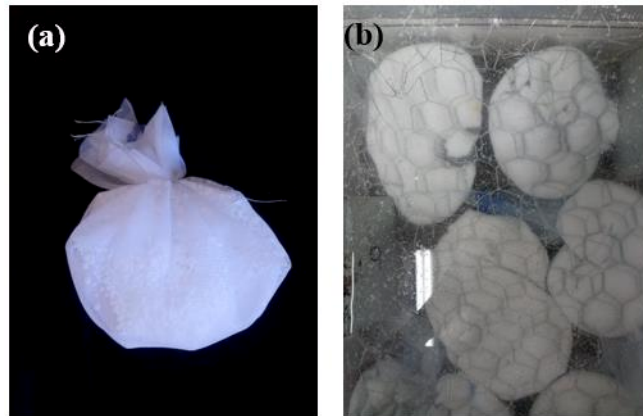
$$Abs (\%) = 100 \frac{m_B - m_A}{m_A} \quad (3)$$

em que: m_A é a massa seca em estufa e m_B é a massa saturada superfície seca.

Para a execução do ensaio, o EPS foi seco em estufa a 50°C por 24 h, conforme o procedimento da NBR 16866 (ABNT, 2020). Após o resfriamento, a massa de EPS (5 g) foi

colocada em um saquinho de tule, confeccionado a fim de evitar a perda de material durante o ensaio, ilustrado na Figura 41a. Esse foi previamente saturado por 72 h e o excesso de água retirado com o uso de um pano umedecido. O conjunto foi imerso em água e, para evitar flutuação, foi fixado com uma tela metálica (Figura 41b). Foi mantida sobre a tela uma lâmina de água constante e superior a 25 mm, conforme a recomendação da norma supracitada.

Figura 41 – Detalhes da realização do ensaio de absorção do EPS: (a) saquinho de tule contendo a amostra de EPS; (b) tela metálica prendendo os saquinhos submersos



Fonte: A autora.

Para aferição da massa, a amostra foi delicadamente pressionada para remover o excesso de água do EPS, e em seguida foi imersa em um béquer com água, com uma peça metálica que impedia a flutuação do saquinho de EPS. Foram feitas trinta determinações para cada tipo de EPS, virgem e reciclado, sendo a absorção de água do EPS (*Abs*) obtida pela Equação (4):

$$Abs(\%) = 100 \left[\frac{m_t - (m_{bcpm} + m_{sq})}{m_A} \right] \quad (4)$$

em que: m_t é a massa total do conjunto pesado (béquer + água de submersão da pesagem + EPS + peça metálica que impede a flutuação); m_{bcpm} é a massa do béquer com água de submersão da pesagem e da peça metálica; m_{sq} é a massa do saquinho saturado que contém o EPS; m_A é a massa de EPS no estado seco utilizada no ensaio.

3.3.3 *Análise dinâmica de imagem*

A determinação dos parâmetros geométricos das partículas foi realizada por meio de análise dinâmica de imagem no equipamento *CAMSIZER® P4*¹⁴, Retsch Technology, com a taxa de aquisição de sessenta imagens por segundo e escaneamento em sessenta e quatro direções diferentes para partículas processadas a seco com dimensão de até 25 mm. Foram ensaiadas duas amostras de 2,5 g de areia e 0,15 g de EPS. A partir desse ensaio, foram obtidas a distribuição do tamanho das partículas, a esfericidade¹⁵ e a relação largura/comprimento para cada tipo de agregado¹⁶.

3.3.4 *Microscopia eletrônica de varredura (MEV-EDS)*

A caracterização superficial das partículas de EPS foi realizada por meio de microscopia de varredura eletrônica (MEV). As amostras de cada tipo de EPS foram fixadas em *stubs* com uma fita de carbono e recobertas com uma camada de ouro (60 µm), em um ciclo de 40 min no equipamento Leica EM SCD050, para aumentar a condutividade elétrica. Após a metalização, as micrografias foram feitas utilizando o microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO MA10, em alto vácuo, com a tensão de aceleração dos elétrons de 5 kV. Depois da captura das imagens, foi feita a determinação dos elementos químicos presentes na amostra por meio do detector de espectroscopia de energia dispersiva por raios X (EDS), Oxford 51-ADD0048. Foram selecionadas três áreas aleatórias das partículas, com amplificação da imagem de 300×

3.4 **Definição da Matriz Experimental**

Tendo como objetivo analisar a influência do uso de EPS e do método de mistura nas propriedades das argamassas foram consideradas as variáveis tipo de EPS (virgem ou reciclado) e procedimento de mistura (A e B). Deste modo, foi adotado um planejamento fatorial 2^k com

¹⁴ Os ensaios de análise de imagem dinâmica e microscopia foram realizados no Laboratório Multiusuário II e no Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura, respectivamente, na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

¹⁵ Esfericidade = $(4\pi\text{área})/(\text{perímetro}^2)$ (HAWLITSCHKEK *et al.*, 2015).

¹⁶ A largura das partículas é a medida equivalente ao menor valor de todas as cordas detectadas pelo equipamento, que permite a comparação com os valores da fração retida na malha das peneiras granulométricas. A razão largura/comprimento é a taxa entre a menor corda e o maior diâmetro de Feret detectado (RETSCH TECHNOLOGY, 2018).

duas variáveis fixas, o que resultou em cinco experimentos, sendo quatro do planejamento fatorial e um de controle, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 – Matriz do planejamento experimental 2^k

Argamassa	Variável 1	Variável 2
VMA	EPS virgem	Mistura A
VMB	EPS virgem	Mistura B
RMA	EPS reciclado	Mistura A
RMB	EPS reciclado	Mistura B
REF	Sem EPS	Mistura padrão

Fonte: A autora.

A argamassa de controle (REF) foi produzida com agregado natural e procedimento de mistura proposto pela NBR 16541 (ABNT, 2016b), a fim de analisar o efeito da utilização de EPS nas propriedades das argamassas. As argamassas com EPS foram homogeneizadas em dois níveis, codificados como A e B e baseados no procedimento proposto pela NBR 16541 (ABNT, 2016b).

Em todas as argamassas foi feita a pré-homogeneização da fração anidra (cimento, calcário e areia) em sacos plásticos e, em seguida, o conteúdo foi adicionado ao misturador na respectiva etapa. A pré-homogeneização foi executada à parte para reduzir o tempo total de mistura (PERRY; BISCHOFF; YAMURA, 1991).

O método de homogeneização descrito pela NBR 16541 (ABNT, 2016b), utilizado na argamassa REF, consiste em três etapas: (1) homogeneização dos materiais sólidos juntamente com 2/3 da quantidade de água durante 90 s, em diferentes níveis de velocidade; (2) repouso por 90 s; e (3) mistura em velocidade baixa do material com a água remanescente. O tempo total de mistura é de 4 min.

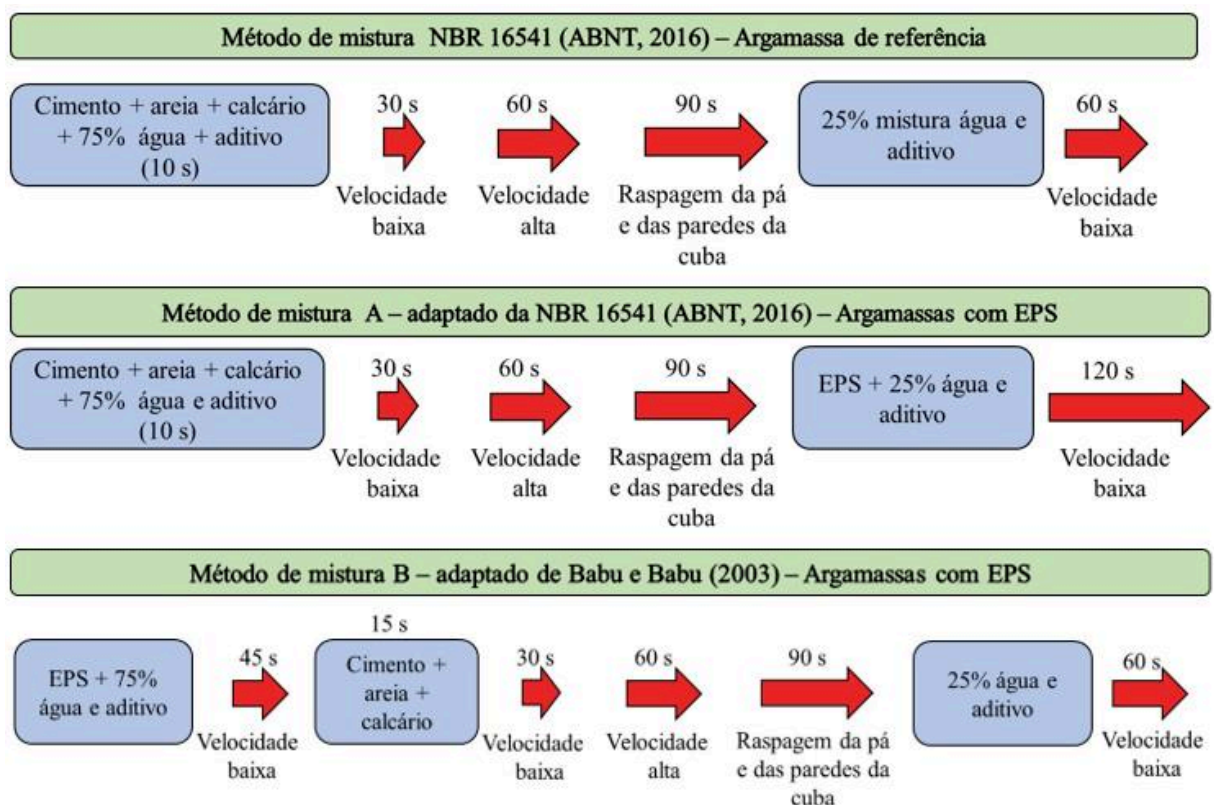
Na mistura A, o EPS foi incorporado após a homogeneização dos outros componentes da argamassa (90 s iniciais de mistura), depois da raspagem da pá e da cuba¹⁷. Na mistura B, o procedimento foi adaptado de Babu e Babu (2003), com o umedecimento da superfície do EPS com 75% da mistura de água e aditivo durante os primeiros 45 s de mistura, quando era visível que a superfície do EPS estava umedecida adequadamente.

¹⁷Esse processo de mistura foi utilizado devido à tendência observada no Capítulo 2, na qual os autores adicionam o EPS nos estágios finais da homogeneização dos compósitos.

O processo de mistura B é semelhante à mistura em duas etapas proposta por Tam, Gao e Tam (2005) para agregados RCD. Nesse tipo de agregado, esse processo de homogeneização melhora as características da zona de transição ao envelopar a superfície do agregado RCD com a mistura de água e cimento, preenchendo os poros e microfissuras e provocando uma zona de transição mais densa no estado endurecido, melhorando o desempenho mecânico (LI et al., 2012; TAM; GAO; TAM, 2005; TAM; TAM, 2007). Embora diversos estudos tenham utilizado esse tipo de mistura para compósitos com EPS, não se sabe ainda se o envelopamento é semelhante ao apresentado nos compósitos com agregado RCD.

Os dois procedimentos de mistura tiveram o tempo total fixo em 5 min. O acréscimo de 1 min comparado ao estabelecido pela NBR 16541 (ABNT, 2016b) foi necessário para garantir a incorporação adequada do EPS aos outros componentes. Os métodos de mistura analisados estão esquematizados na Figura 42.

Figura 42 – Métodos de mistura analisados em função do tipo de argamassa¹⁸



Fonte: A autora.

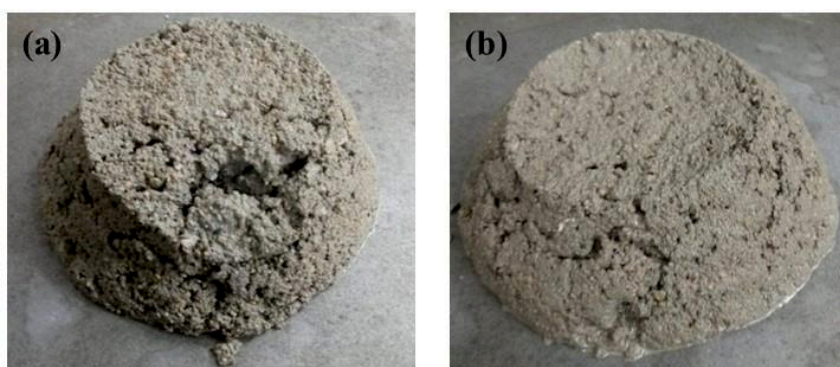
¹⁸ Nos processos de mistura padrão e A, a proporção de 75% da água e do aditivo deve ser incorporada aos materiais secos nos 10 s iniciais da mistura.

3.5 Formulação das Argamassas

Foram formulados três tipos de argamassas, sendo uma de referência (REF) e as outras duas com a fração de EPS (virgem ou reciclado) igual 30% do volume total da argamassa (em substituição equivalente a aproximadamente 50% do volume de areia). O teor de EPS ($p = 0,30$) foi adotado por ser o limite de trabalhabilidade apontado por Ranjbar e Mousavi (2015) e por ser próximo do limite de melhoria das propriedades mecânicas a partir da variação das características do EPS observado por Miled, Sab e Le Roy (2007), Chen e Fang (2011) e Tittarelli et al. (2016).

Inicialmente, adotou-se para a argamassa de referência o traço em massa: 1:5:0,70 (cimento: areia AR1: relação a/c). No entanto, após a mistura verificou-se uma argamassa com pouca trabalhabilidade, extremamente áspera, que é um indicativo da insuficiência de finos (Figura 43a). Posteriormente, foi feita a substituição gradual da areia AR1 pela areia AR2. Durante o manuseio da argamassa, foi notado que a aspereza da argamassa desapareceu para a proporção de 55% de AR1 e 45% de AR2 do traço, que foi mantida, resultando na argamassa ilustrada na Figura 43b.

Figura 43 – Ajuste da proporção de areia natural na argamassa de referência (REF): (a) 100% AR1 e (b) 55% AR1 e 45% AR2



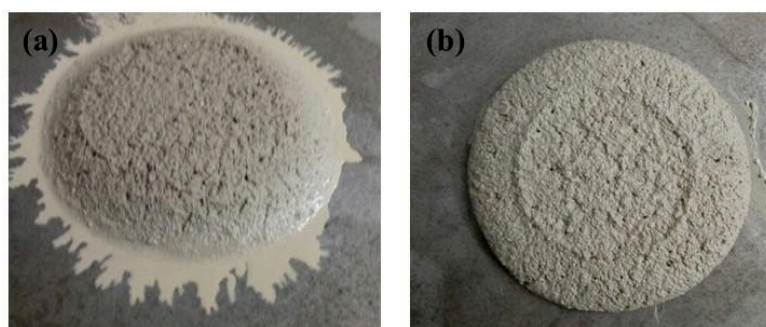
Fonte: A autora.

Após a definição da proporção de AR1 e AR2 na mistura, ajustou-se o teor de aditivo, inicialmente de 0,20% em relação à massa de cimento, por ser o mínimo recomendado pelo fabricante. No entanto, para esse teor, a argamassa apresentou separação de fases, como mostra a Figura 44a, sem que a trabalhabilidade fosse satisfatória.¹⁹ Para evitar a segregação, foi feita

¹⁹ Índice de consistência igual a 260 ± 10 mm determinado pelo método da mesa de consistência da NBR 13276 (ABNT, 2016a).

a substituição de 10% da massa da areia por fíler calcário, resultando em um traço 1: 0,5: 4,5: 0,70 (cimento: fíler calcário: areia: relação a/c), mantendo-se o teor de aditivo de 0,20%. A argamassa resultante não apresentou segregação como mostrado na Figura 44b, porém não atingiu o índice de consistência necessário, que foi corrigido com o aumento do teor de aditivo.

Figura 44 – Ajuste da proporção de finos na argamassa de referência (a) sem adição e (b) com adição de 10% de fíler calcário



Fonte: A autora.

A partir do estudo prévio, o traço em massa da argamassa de referência foi adotado para as outras argamassas, sendo ajustada a quantidade de areia e EPS conforme o teor de substituição pré-estabelecido. O consumo de cimento, fíler calcário e a relação a/c foram mantidos constantes em todas as argamassas. O teor de aditivo superplastificante foi ajustado para a obtenção do índice de consistência anteriormente mencionado. Nas argamassas com EPS, a porcentagem de aditivo variou em função dos métodos de mistura (A e B). Na Tabela 11 estão apresentados os traços em massa para as argamassas estudadas.

Tabela 11 – Traço em massa das argamassas estudadas

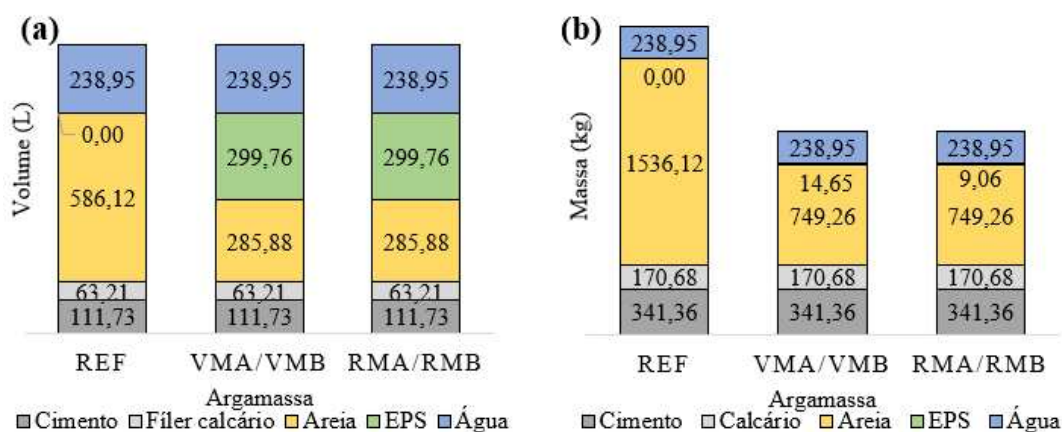
Argamassa	Cimento	Fíler calcário	Areia	EPS	a/c	Aditivo (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)
REF	1	0,50	4,50	0	0,70	0,33	341,36
VMA	1	0,50	2,19	0,0265	0,70	0,01	341,36
VMB	1	0,50	2,19	0,0265	0,70	0,02	341,36
RMA	1	0,50	2,19	0,0429	0,70	0,22	341,36
RMB	1	0,50	2,19	0,0429	0,70	0,21	341,36

Nota: aditivo (%) = média da porcentagem de aditivo em relação à massa de cimento utilizada para cada traço.

Fonte: A autora.

Na Figura 45 estão representadas as proporções em massa e volume para produção de 1 m³ de argamassa.

Figura 45 – Proporção em volume (a) e em massa (b) dos componentes da argamassa para 1 m³



Fonte: A autora.

3.6 Produção das Argamassas e Moldagem dos Corpos de Prova

As argamassas foram produzidas em laboratório com temperatura ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) e umidade controladas ($55 \pm 10\%$). A mistura foi realizada em uma argamassadeira Pavitest, modelo C3010. Foram necessárias dez moldagens para cada tipo de argamassa, totalizando cinquenta repetições ao todo, conforme o Quadro 3.

Quadro 3 – Moldagens realizadas no programa experimental

Moldagem	Ensaio
1	Absorção, índice de vazios e massa específica no estado endurecido
2	Resistência à compressão e módulo de elasticidade (28 dias)
3	Absorção por capilaridade (28 dias)
4	Resistência à tração na flexão (28 dias)
5	Resistência à compressão e módulo de elasticidade (3 dias)
6	Resistência à compressão e módulo de elasticidade (7 dias)
7	Retenção de água, <i>squeeze-flow</i> e MEV (réplica 1)
8	Retenção de água e <i>squeeze-flow</i> (réplica 2)
9	Retenção de água e <i>squeeze-flow</i> (réplica 3)
10	Resistência de aderência à tração

Fonte: A autora.

Para os ensaios no estado endurecido, a moldagem foi realizada em corpos de prova cilíndricos e prismáticos, com dimensões nominais de 5×10 cm (diâmetro × altura) e 4×4×16 cm (altura × largura × comprimento), respectivamente. O adensamento dos corpos de prova cilíndricos foi executado por trinta golpes com soquete metálico em cada camada, considerando quatro camadas, conforme o procedimento da NBR 7215 (ABNT, 2019a). Nos corpos de prova prismáticos, a moldagem foi feita em duas camadas e o adensamento realizado aplicando-se sessenta golpes em cada camada. Esse procedimento foi adaptado da NBR 13279 (ABNT, 2005d) que prevê o adensamento com o mesmo número de camadas e golpes, mas utilizando a mesa de queda.

Após a moldagem, a superfície dos corpos de prova foi selada com filme de PVC e a cura foi feita ao ar em ambiente de laboratório por 24 h. Depois disso, os corpos de prova foram desmoldados e imersos em solução de água e cal hidratada, no mesmo ambiente com temperatura controlada, até completarem a idade estipulada para a realização dos ensaios.

3.7 Propriedades das Argamassas Avaliadas

3.7.1 Argamassa no estado fresco

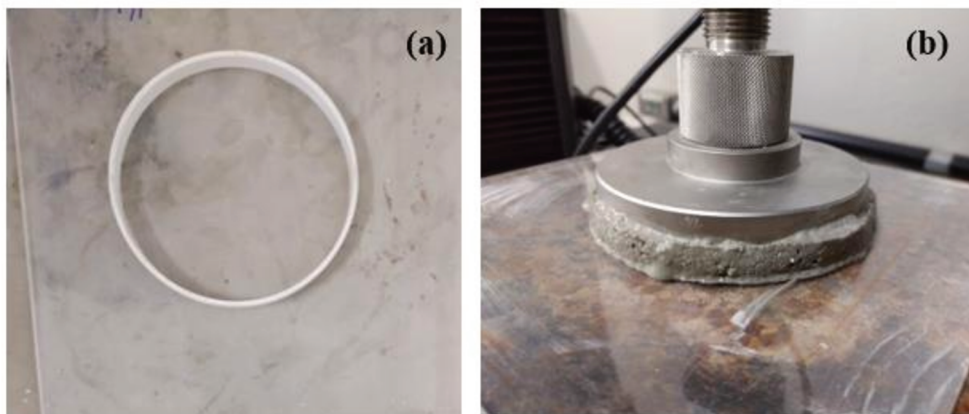
No estado fresco, as propriedades das argamassas foram avaliadas por meio dos seguintes ensaios:

- teor de aditivo para a faixa do índice de consistência de 260 ± 10 mm – NBR 13276 (ABNT, 2016a);
- densidade de massa – NBR 13278 (ABNT, 2005c);
- teor de ar incorporado – NBR 13278 (ABNT, 2005c);
- retenção de água – NBR 13277 (ABNT, 2005b);
- caracterização reológica pelo método *squeeze-flow* – NBR 15839 (ABNT, 2010).

Os ensaios de índice de consistência e densidade de massa foram realizados em todas as moldagens, totalizando dez repetições por argamassa. Para a determinação da capacidade de retenção de água e caracterização reológica pelo *squeeze-flow*, foram feitas três repetições. No *squeeze-flow*, cada réplica foi composta por um par de amostras. Esse ensaio foi realizado conforme a metodologia proposta por Costa et al. (2020), utilizando a máquina de ensaios

universal Instron 5982. Os corpos de prova foram moldados sobre uma superfície acrílica, com o uso de um anel de PVC, que foi retirado no momento do ensaio, mostrado na Figura 46.

Figura 46 – *Squeeze-flow*: detalhe do anel de moldagem (a) e do ensaio (b)



Fonte: A autora.

3.7.2 *Propriedades mecânicas das argamassas*

Foram avaliadas as seguintes propriedades mecânicas das argamassas:

- resistência à compressão – conforme NBR 5739 (ABNT, 2018b);
- módulo de elasticidade dinâmico – NBR 15630 (ABNT, 2008);
- resistência à tração na flexão – NBR 13279 (ABNT, 2005d).

Os ensaios de determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade foram realizados em cilindros 5×10 cm, na condição saturada. Ambos os ensaios foram executados aos 3, 7 e 28 dias, com cinco réplicas por argamassa. O módulo de elasticidade foi caracterizado com o equipamento de ultrassom *Controls* UPV, modelo 58-E48, com transdutores (receptor e transmissor) de 50 mm de diâmetro, frequência de 54 kHz e resolução de 0,01 μ s. A transmissão entre os transdutores foi direta, com cada um deles acoplado às faces planas do corpo de prova cilíndrico por meio de gel fixador à base d'água.

Depois que o módulo de elasticidade dinâmico foi determinado, a resistência à compressão foi aferida na máquina de ensaios universal EMIC DL 600 kN. Para a realização dos ensaios, os corpos de prova foram colocados em um suporte metálico, no qual as superfícies da base e topo ficaram em contato com almofadas elastoméricas. Todos os corpos de prova foram ensaiados na mesma posição em que foram moldados, a fim de se verificar se o método

de regularização das faces interferiu nos resultados. Após a realização do ensaio de compressão foram feitas imagens para verificação do padrão de ruptura dos corpos de prova.

A resistência à flexão foi caracterizada aos 28 dias na máquina de ensaios Instron 5982 100kN, em prismas 4×4×16 cm, também na condição saturada, mas com um total de quatro réplicas para cada argamassa.

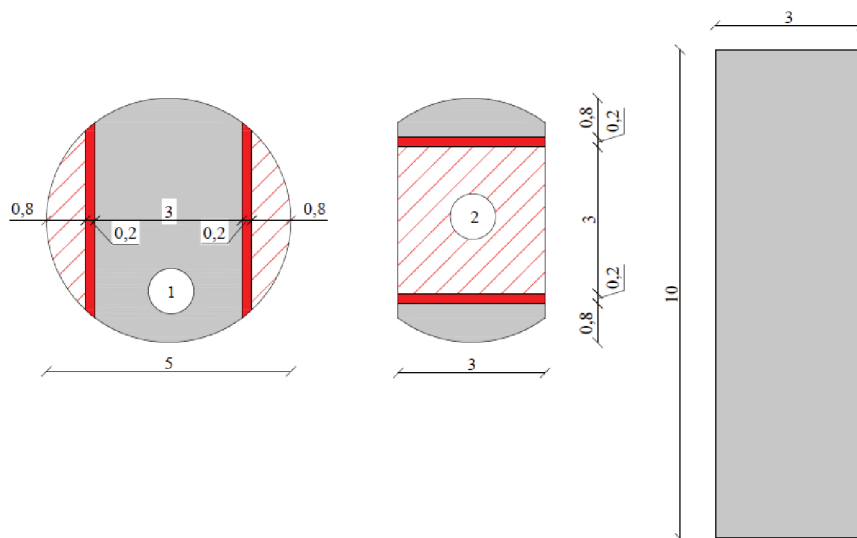
3.7.3 *Propriedades físicas das argamassas*

Os ensaios de caracterização física foram:

- absorção por imersão, índice de vazios e massa específica – NBR 9778 (ABNT, 2005a);
- absorção por capilaridade – NBR 15259 (ABNT, 2005e);
- análise de imagens para verificação da distribuição das partículas.

Os ensaios de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica foram realizados em corpos de prova cilíndricos (5×10 cm), com cinco réplicas para cada argamassa. A secagem dos corpos de prova foi feita a 50°C e a saturação realizada a 20°C, temperaturas adotadas para evitar retração e/ou dano das partículas de EPS (OZÓRIO, 2016; MAAROUFI et al., 2018). Após a finalização do ensaio de absorção por imersão foram extraídas as amostras para inspeção visual da distribuição das partículas, obtidas a partir do corte da seção com uma serra de bancada, na sequência representada na Figura 47.

Figura 47 – Sequência de corte das amostras para a inspeção visual



Legenda: hachura vermelha contínua = área de corte consumida no corte; hachura em vermelho e branco = porções dos corpos de prova descartadas; hachuras em cinza claro = amostras utilizadas. Medidas em cm (sem escala).

Fonte: A autora.

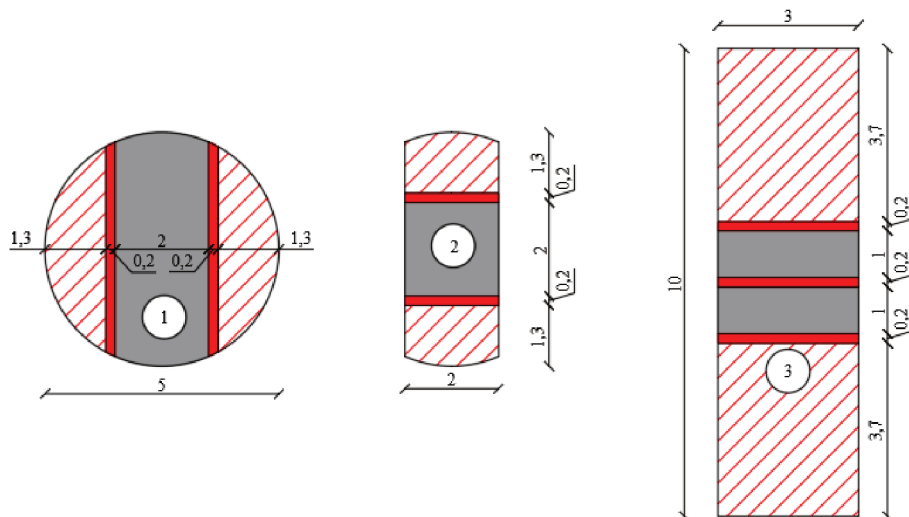
Na Figura 47, os itens 1 e 2 representam o corte na seção transversal, que transformou a amostra em um prisma e o item 3 a seção longitudinal após o corte do prisma nas etapas anteriores. Em seguida foi selecionada uma amostra aleatória de cada corpo de prova, totalizando cinco amostras prismáticas de seção 3×10 cm (largura \times altura) por argamassa.

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado em prismas $4 \times 4 \times 16$ cm, com quatro réplicas. A secagem também foi realizada a 50°C e as faces laterais dos corpos de prova foram revestidas com silicone, a fim de garantir o fluxo unidirecional de água durante o ensaio.

3.7.4 Microestrutura das argamassas

A caracterização da microestrutura das argamassas foi realizada por análise de imagens de microscopia de varredura eletrônica (MEV-EDS). Aos 28 dias, foram extraídas do centro dos corpos de prova cilíndricos amostras com dimensões $2 \times 2 \times 1$ cm (comprimento \times largura \times altura) com auxílio de serra de bancada. Os detalhes do procedimento de corte utilizado para retirada das amostras estão esquematizados na Figura 48.

Figura 48 – Sequência de corte dos corpos de prova prismáticos para as amostras de MEV na seção transversal (1 e 2) e na seção longitudinal (3)



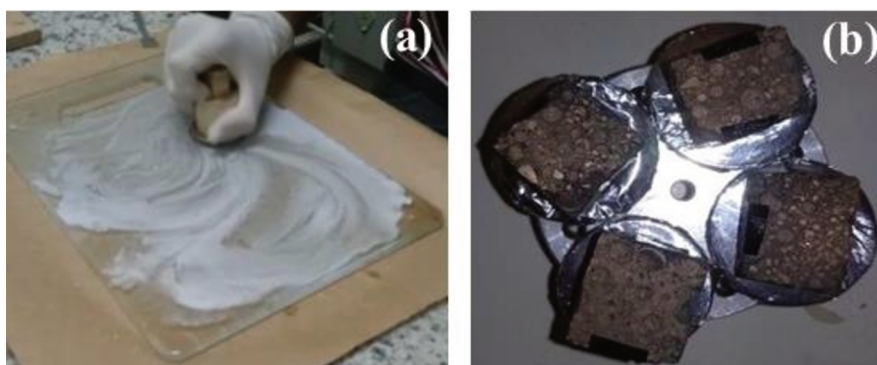
Fonte: A autora.

Após o corte, foi realizado o polimento²⁰ das faces das amostras, que foram fixadas com cera de abelha derretida em uma peça metálica. Em seguida, foi aspergida alumina calcinada

²⁰ Procedimento realizado no Laboratório do Grupo de Ferroelétricos e Materiais Multifuncionais do Instituto de Física da Universidade Federal de Uberlândia.

(granulometria 9 μm) sobre uma superfície lisa de vidro, umedecida com água destilada. A amostra foi polida com movimentos circulares sobre a alumina por cerca de 40 min (Figura 49a). Finalizado o polimento, a limpeza foi feita por meio de banho em ultrassom, sem aquecimento, em um ciclo de 480 s de imersão em isopropanol e depois outro ciclo de 480 s, com imersão em água destilada. Depois foi realizada a secagem em estufa, a 50°C, até a constância de massa e em seguida as amostras foram fixadas em *stubs* e recobertas com uma camada de ouro de 54 μm para aumentar a condutividade elétrica, em um ciclo de 60 min no equipamento Leica EM SCD050. As amostras metalizadas podem ser visualizadas na Figura 49b.

Figura 49 – Detalhe da preparação das amostras para ensaio de microscopia (a) polimento e (b) metalização



Fonte: A autora.

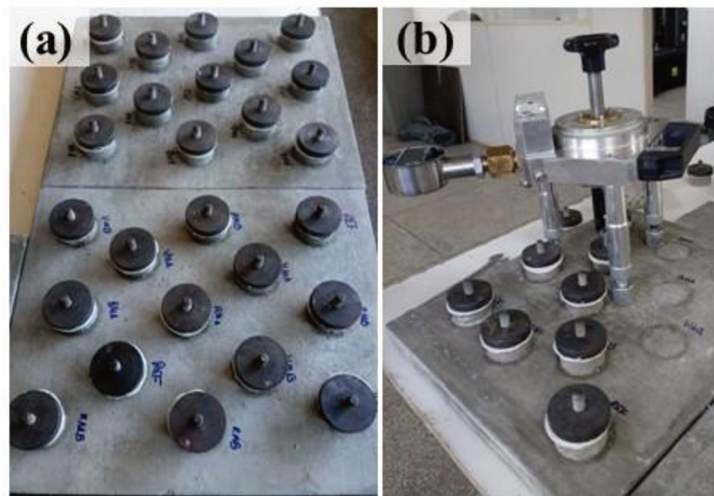
Após a metalização, foram obtidas imagens utilizando o microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO MA10, em alto vácuo, com a tensão de aceleração dos elétrons de 20 kV. Para verificação da composição química qualitativa de algumas regiões da amostra foi feito o mapeamento dos elementos químicos por meio do detector de espectroscopia de energia dispersiva por Raio-X (EDS) Oxford 51-ADD0048.

3.7.5 Avaliação da resistência de aderência à tração das argamassas

A avaliação do desempenho mecânico da interface argamassa-substrato foi feita pelo ensaio de resistência de aderência à tração, conforme o método proposto por Costa, Cardoso e John (2017), que é uma adaptação do procedimento da NBR 13528-3 (ABNT, 2019). Sobre a superfície do substrato cimentício foram moldados vinte quatro corpos de prova para cada argamassa analisada, com diâmetro de 50 mm e espessura de 20 mm. Para eliminar a influência do substrato, em cada placa foram moldadas amostras de diferentes tipos de argamassas,

distribuídas de forma aleatória. Após a moldagem, a cura foi realizada em sacos plásticos selados à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de 100% por 28 dias. Para a colagem das pastilhas metálicas foi utilizada massa de poliéster, curada por 24 h (Figura 50a). O ensaio foi executado utilizando um dinamômetro de tração com leitor digital da marca Brasil Solos (Figura 50b).

Figura 50 – Detalhes do ensaio de resistência de aderência à tração: (a) pastilhas metálicas coladas sobre os corpos de prova e (b) dinamômetro de tração utilizado no ensaio



Fonte: A autora.

3.7.6 Tratamento dos dados e análise dos resultados

Os resultados experimentais foram tratados pelo critério de Chauvenet. Em uma amostra de tamanho n , na qual a distribuição de probabilidade normal é válida, existe para cada repetição X_i um desvio médio aceitável. O critério é aplicado de acordo com a Equação (5) e o desvio d_i é comparado aos valores da Tabela 12 (GUL et al., 2018). Se o desvio d_i é maior que o desvio aceitável $d_{i,max}$, X_i é um valor duvidoso e deve ser rejeitado, pois a probabilidade do desvio padrão em relação à média é menor que $\frac{1}{2n}$. O critério foi repetido até que todos os valores fossem aceitáveis ou até que a amostra mínima tivesse $n = 3$ (para as amostras com $n \geq 4$) ou $n = 2$ (para as amostras com $n = 3$).

$$d_i = \frac{|X_i - X_m|}{\sigma} < d_{i,max} \quad (5)$$

Tabela 12 – Desvio aceitável $d_{i,max}$ para uma amostra de tamanho n

n	$d_{i,max}$	n	$d_{i,max}$
2	1,15	10	1,96
3	1,38	15	2,13
4	1,54	20	2,24
5	1,65	25	2,33
6	1,73	50	2,57
7	1,8	100	2,81
8	1,87	300	3,14
9	1,91	500	3,29

Fonte: Gul et al. (2018).

Depois que os dados foram tratados, a análise de significância dos efeitos foi realizada por análise de variância (ANOVA), no *software* STATISTICA 7.0, com um intervalo de confiança de 95% e variância a um nível de probabilidade de 5%. Nos casos em que a análise constatou diferença significativa entre as variáveis analisadas, a significância entre as médias e a formação de grupos homogêneos foi avaliada pelo teste de Duncan.

As imagens do MEV foram analisadas qualitativamente, com foco na zona de transição e na composição química qualitativa mapeada via EDS. Em todos os resultados buscou-se a comparação com os resultados apresentados na literatura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos Agregados

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados obtidos na caracterização dos agregados utilizados. Como esperado, o EPS apresenta valores de massa específica bem menores que a areia e, comparando os dois tipos de EPS, a massa específica do EPS virgem foi 38% superior ao reciclado. Provavelmente, isso é ocasionado pela morfologia e porosidade das partículas. De acordo com Carvalho e Motta (2019), as partículas de EPS virgem formam invólucros de poliestireno que são menos porosos que os presentes no EPS reciclado, o que provoca o aumento da massa específica.

Em relação à massa unitária, o maior valor para o EPS virgem pode ser explicado pela melhoria do empacotamento das partículas, haja vista que possuem maior esfericidade. Logo, para um mesmo volume, há maior quantidade de EPS virgem em relação ao reciclado.

Tabela 13 – Propriedades dos agregados utilizados na produção de argamassas²¹

Propriedade	Agregados		
	ARF	EPS virgem	EPS reciclado
Massa específica (kg/m ³)	2620	48,86	30,21
Massa unitária (kg/m ³)	911	29,72	17,88
Absorção de água (%)	0,74	7,50	4,86
D ₁₀	0,26	0,72	0,61
D ₅₀	0,39	1,06	1,24
D ₉₀	0,59	1,83	1,91
Esfericidade	0,83	0,98	0,66
Razão largura/comprimento	0,70	0,96	0,64

Fonte: A autora.

Quanto aos valores de absorção em massa, ambos os tipos de EPS apresentaram valores superiores à areia. Essa propriedade foi reportada apenas por Wolff (2008) e Alves (2020), que obtiveram absorção em massa, para EPS reciclado, de 980% para partículas polidispersas com DMC igual a 4,8 mm e 300% para DMC de 12,5 mm, respectivamente. Wolff (2008) não

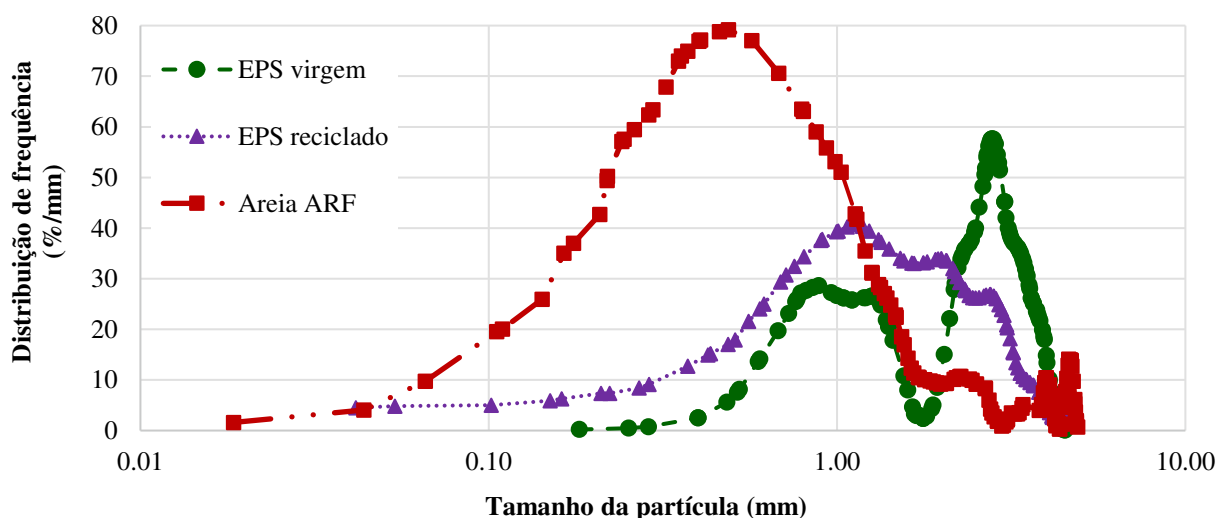
²¹ Detalhes da granulometria podem ser visualizados no Apêndice A.

menção como foi realizado o ensaio e no método utilizado por Alves (2020) não foi descrita a forma como a água livre na superfície das partículas foi removida. Por isso, é provável que em ambos os métodos a condição saturada superfície seca não tenha sido alcançada. Dessa forma, o excesso de água na superfície acaba sendo contabilizado como massa de água absorvida. Como a aferição de massa utilizada no ensaio foi realizada com o EPS submerso, esse problema foi resolvido e os resultados apresentam valores compatíveis com a faixa de absorção de agregados leves, que usualmente varia entre 5% e 25% em massa (ACI COMMITTEE 213, 2014).

Apesar do maior valor de absorção em massa, o EPS absorve menos água que a areia para o mesmo volume de material: para o volume de 1 m³, a areia, o EPS virgem e o EPS reciclado absorvem 19,39 L, 3,66 L e 1,47 L de água, respectivamente. Isso mostra que, mesmo com maiores valores absolutos de absorção em massa quando comparado à areia, o EPS provoca aumento da água livre na mistura de 81% (virgem) e 92% (reciclado).

A curva de distribuição granulométrica dos agregados obtida por meio da análise dinâmica de imagens está apresentada na Figura 51. Pode se observar que o EPS virgem utilizado apresenta uma distribuição descontínua, com duas faixas de distribuição bem distintas: (i) 0,5 e 1,5 mm e (ii) 2,0 e 4,0 mm, referentes à fração micropérola e pérola, respectivamente. A areia apresenta uma alta concentração de partículas em torno da dimensão de 0,50 mm e 1,5 mm e poucas partículas nas dimensões de 3,00 mm e 4,50 mm. No EPS reciclado, a faixa de distribuição das partículas é contínua em toda a sua extensão (ausência de “gaps”).

Figura 51 – Distribuição de frequência das partículas dos agregados utilizados

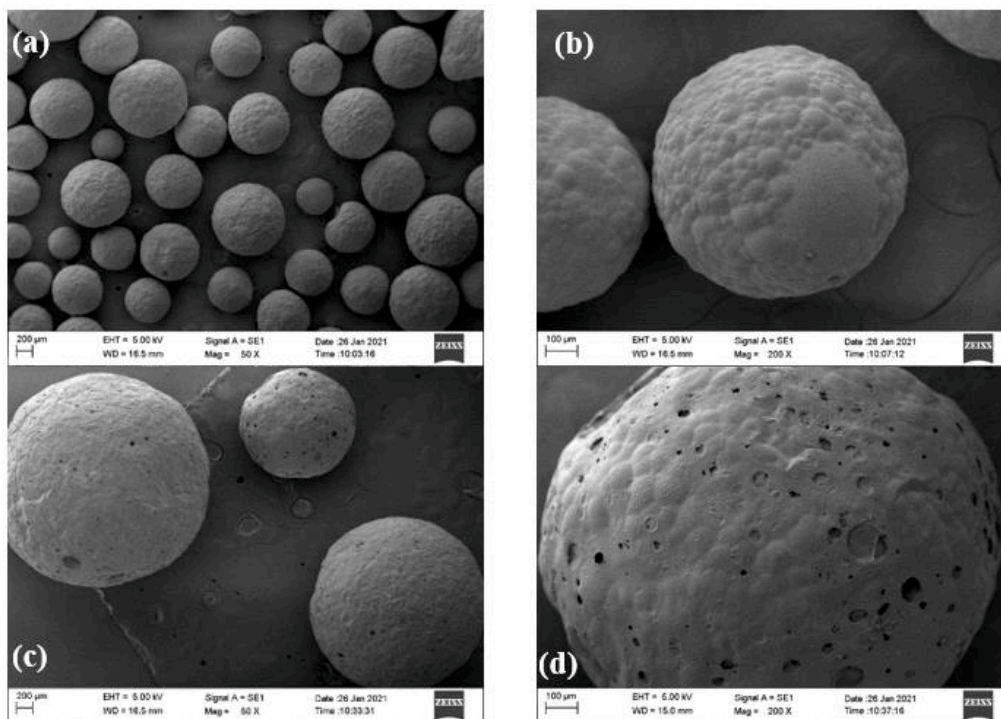


Fonte: A autora.

Em relação aos diâmetros característicos, nota-se que a areia possui uma fração maior de finos: 50% das suas partículas são inferiores a 0,39 mm, em relação ao EPS virgem e reciclado, nos quais o diâmetro médio corresponde a 1,06 mm e 1,24 mm, respectivamente. Comparando os tipos de EPS, é possível perceber que a distribuição de partículas é ligeiramente diferente: o EPS virgem apresenta menores valores para D_{50} e D_{90} , mas o valor de D_{10} é maior, o que indica que existe uma concentração de partículas maior que no EPS reciclado. Na Tabela 13, observa-se também que há diferença na morfologia das partículas. O EPS virgem apresenta partículas arredondadas, com grau de esfericidade próximo a 1, enquanto o reciclado apresenta menor esfericidade e razão largura/comprimento. As partículas do EPS reciclado são irregulares e mais alongadas, pois a estrutura das partículas de EPS é celular. Além disso, existe a magnificação da irregularidade das partículas provocada pelo processo de trituração.

Na Figura 52 são apresentadas imagens obtidas pelo MEV das partículas de EPS virgem para as frações pérola e micropérola.

Figura 52 – Aspectos da superfície das partículas de EPS virgem: (a) micropérolas, ampliação 50×; (b) micropérolas, ampliação 200×; (c) pérolas, ampliação 50×; (d) pérolas, ampliação de 200×



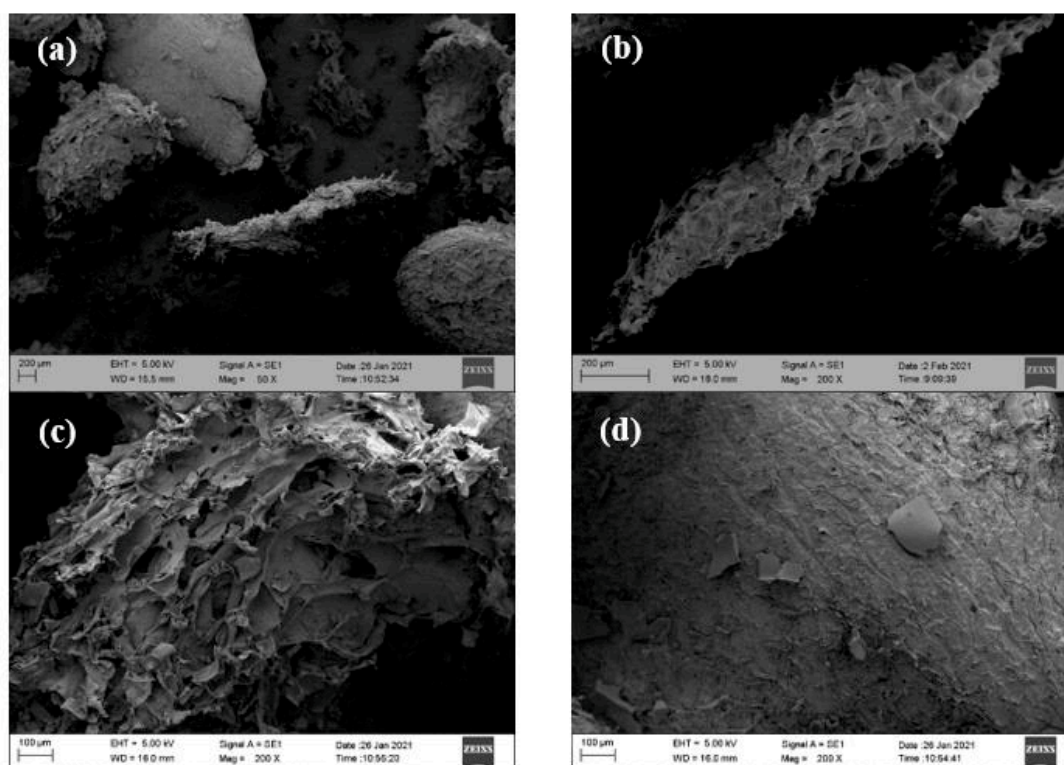
Fonte: A autora.

Nota-se que a superfície das partículas dessas frações é bastante distinta, mesmo que a única diferença entre elas seja o diâmetro da partícula. A morfologia das micropérolas foi

semelhante à observada por Laukaitis, Žurauskas e Keriene (2005) e Maaroufi et al. (2018): há predominância de estruturas semelhantes a um aglomerado de pequenas bolhas interligadas por sulcos, como ilustra a Figura 52a e Figura 52b. O mesmo não ocorre com as pérolas. Laukaitis, Žurauskas e Keriene (2005) observaram que a superfície era esférica e regular, formada por filetes de poliestireno arranjados em uma rede de estrutura descontínua, semelhante a um favo de mel. Contrastando com esses resultados, a superfície observada na micrografia das pérolas tem aspecto contínuo, mas apresenta poros abertos, que podem ser visualizados na Figura 52c e Figura 52d.

A estrutura do EPS reciclado é bastante variada e distinta das pérolas e micropérolas, como pode ser observada na Figura 53.

Figura 53 – Aspectos da superfície das partículas de EPS reciclado na forma de agregado miúdo: (a) partículas com formatos variados, ampliação 50×; (b) partícula alongada com porosidade aberta, ampliação 200×; (c) superfície com desgaste intenso, ampliação 200×; (d) superfície com desgaste reduzido, ampliação 200×



Fonte: A autora.

Na Figura 53a, verifica-se o formato alongado de uma partícula, que é oriundo da estrutura do interior dos flocos de EPS; uma estrutura semelhante também pode ser observada na Figura 53b. Outras irregularidades superficiais resultantes do desgaste superficial provocado

pela trituração em graus variados e pela deposição de fragmentos na superfície da partícula podem ser visualizadas na Figura 53c e Figura 53d. Resultados similares foram obtidos por Laukaitis, Žurauskas e Keriene (2005). A morfologia do EPS reciclado decorre tanto da variedade de formatos do material que é reciclado quanto do processo de trituração que não é uniforme.

A diferença observada entre as partículas do EPS virgem e reciclado explica os valores distintos de massa específica e absorção obtidos na caracterização e que podem afetar as propriedades das argamassas.

Em relação à composição química obtida por EDS, constatou-se a predominância do elemento carbono para todos os tipos de EPS analisados. As porcentagens em massa de cada elemento detectado podem ser visualizadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Composição química qualitativa do EPS

Tipo de EPS	Fração	Elemento	Porcentagem em massa (%)
Virgem	Micropérola	C	100
		C	95,88
	Pérola	O	4,12
Reciclado	-	C	99,16
		O	0,84

Fonte: A autora.

4.2 Propriedades das Argamassas no Estado Fresco

Na Tabela 15 estão apresentados os resultados obtidos na avaliação do espalhamento, massa específica, teor de ar incorporado, retenção de água e carga máxima obtida no ensaio de *squeeze-flow* para as argamassas estudadas.

No Quadro 4 é mostrada a significância estatística das variáveis estudadas para o nível de significância de 5% e intervalo de confiança de 95%. O detalhamento da análise estatística consta no Apêndice B.

Tabela 15 – Resultados de índice de consistência, massa específica no estado fresco, teor de ar incorporado, retenção de água e *squeeze-flow*

Propriedade	Argamassas estudadas				
	REF	VMA	VMB	RMA	RMB
Espalhamento (mm)	270 ± 5,93	259 ± 5,47	264 ± 6,89	268 ± 10,73	262 ± 11,29
Teor de aditivo (%)	0,33 ± 0,06	0,01 ± 0,02	0,02 ± 0,03	0,22 ± 0,09	0,21 ± 0,08
Densidade de massa (kg/m ³)	2101 ± 39,79	1457 ± 8,92	1456 ± 4,00	1681 ± 28,65	1719 ± 45,13
Teor de ar incorporado (%)	7,64	2,93	3,00	-11,53	-14,06
Retenção de água (%)	93,77 ± 1,83	90,34 ± 0,49	95,35 ± 0,36	91,92 ± 0,50	90,82 ± 0,50
Carga máxima <i>squeeze-flow</i> (N)	756 ± 151,90	154 ± 67,64	185 ± 64,27	173 ± 18,09	178 ± 37,35

Fonte: A autora.

Quadro 4 – Significância dos efeitos para as propriedades do estado fresco

Propriedade	Significância dos efeitos		
	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Interação EPS × mistura
Teor de aditivo (%)	S	NS	NS
Massa específica (kg/m ³)	S	NS	NS
Retenção de água (%)	NS	NS	NS
Carga <i>squeeze-flow</i> (N)	NS	NS	NS

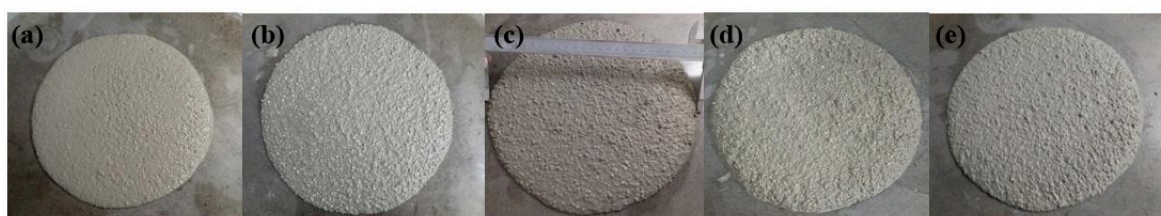
Nota: S = efeito significativo e NS = efeito não significativo

Fonte: A autora.

Nota-se que o tipo de mistura não exerceu influência em nenhuma das propriedades avaliadas das argamassas no estado fresco. O tipo de EPS, virgem ou reciclado, afeta significativamente o teor de aditivo para a mesma faixa do índice de consistência e a massa específica da argamassa. Esses resultados provavelmente são oriundos da estrutura interna, diferença de forma e irregularidades superficiais das partículas.

O índice de consistência das argamassas foi um dos parâmetros constantes no presente estudo (260 ± 10 mm). Na Figura 54 é mostrado o espalhamento de algumas argamassas, após a realização do ensaio, onde se pode observar que as argamassas são homogêneas, não havendo segregação entre as fases. Isso é um indicativo de que, mesmo com um volume de EPS igual a 30% do volume total, as argamassas apresentam consistência adequada e quantidade suficiente de pasta para dispersar e reter as partículas (BABU; BABU, 2003; LE ROY; PARANT; BOULAY, 2005; RANJBAR; MOUSAVI, 2015).

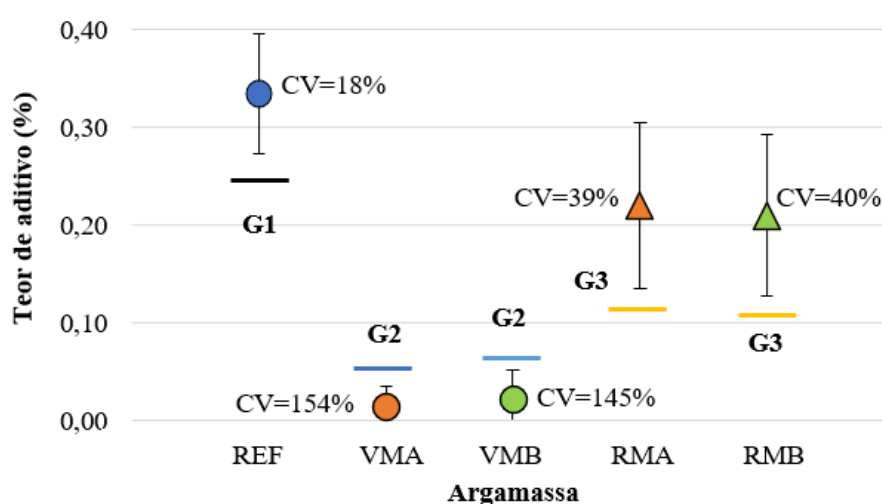
Figura 54 – Aspecto das argamassas após a determinação do índice de consistência: (a) REF, (b) VMA, (c) VMB, (d) RMA e (e) RMB



Fonte: A autora.

Para a obtenção da consistência estabelecida, verificou-se a variação no teor de aditivo da argamassa, conforme a Figura 55.

Figura 55 – Teores de aditivo adotado para obtenção do índice de consistência estabelecido em função do tipo de argamassa



Fonte: A autora.

As argamassas com EPS atingiram o mesmo espalhamento que a argamassa de referência com teores de aditivo bem menores. A redução da quantidade de aditivo

superplastificante indica que a trabalhabilidade das argamassas melhorou com a substituição da areia pelo EPS, resultado compatível com os apresentados por Kan e Demirboğa (2007); Madandoust, Ranjbar e Mousavi (2011); Tang Van et al. (2018) e Carvalho e Motta (2019). Ao mesmo tempo, o teor de aditivo ajustado para as misturas do tipo A e do tipo B foi semelhante, ou seja, o tipo de mistura não foi um fator decisivo para a variação do espalhamento das argamassas. Por isso, no teste de Duncan foram formados apenas três grupos: G1 (argamassa de referência), G2 (argamassas com EPS virgem) e G3 (argamassas com EPS reciclado).

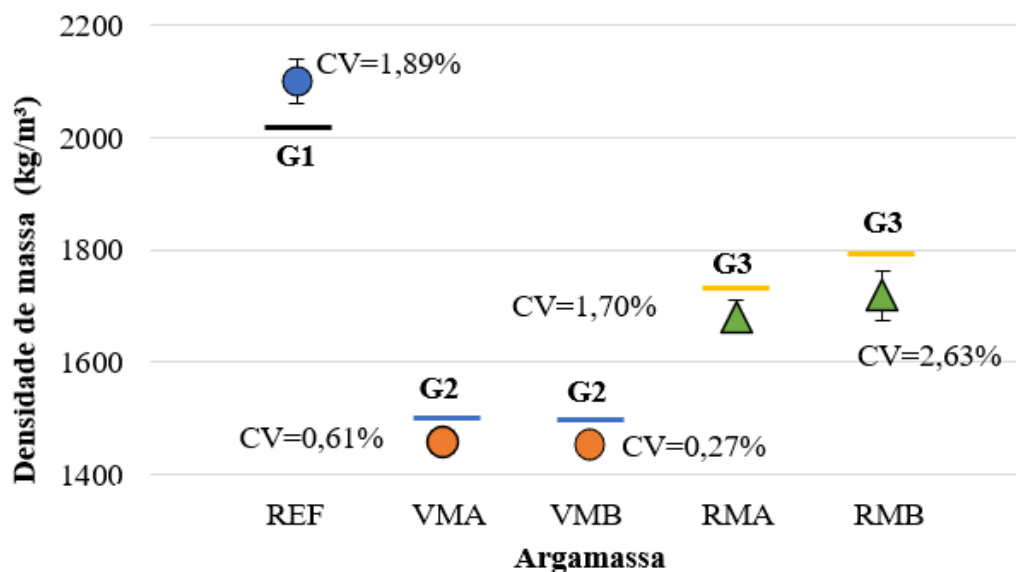
Em relação à argamassa de referência, o comportamento apresentado pelas argamassas com EPS se deve a diversos fatores: ainda que a dimensão máxima característica seja a mesma para todos os tipos de agregado utilizados, ambos os tipos de EPS apresentam módulo de finura maior que a areia, logo a área superficial a ser umedecida durante o processo de mistura é menor (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Além disso, como ambos os tipos de EPS apresentam curvas granulométricas com distribuição de partículas mais graduadas que a areia (conforme a distribuição de frequência observada na Figura 51), existe menor quantidade de picos de incidência ou falta de um determinado tamanho de partícula, o que também contribui para o aumento da trabalhabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A menor quantidade de água absorvida pelos tipos de EPS também acarreta um efeito secundário de aumento de água livre na mistura, o que favorece a trabalhabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2011).

A diferença observada no teor de aditivo para as argamassas com EPS virgem e reciclado está relacionada à forma das partículas. Apesar de apresentar uma distribuição descontínua, as partículas de EPS virgem são mais esféricas e apresentam menos irregularidades superficiais que as de EPS reciclado, como mostrado na Figura 52 e Figura 53. Neville (2011) observa que, para partículas com as mesmas dimensões, formatos esféricos apresentam um índice de vazios menor que formatos angulares. Mehta e Monteiro (2014) notam que compósitos com areias angulares requerem mais água para a mesma trabalhabilidade. Essa mesma tendência é registrada por Tristão (2005), que em seu estudo com argamassas de revestimento, concluiu que areias com partículas mais arredondadas, esféricas e com textura superficial menos rugosa reduziram a demanda de água de amassamento.

Em relação à densidade de massa, a substituição da areia natural por EPS propiciou uma redução de 30% ao usar EPS virgem e de aproximadamente 20% para EPS reciclado (Figura 56).

Figura 56 – Densidade de massa das argamassas estudadas



Fonte: A autora.

Embora as partículas de EPS reciclado tenham menor massa específica do que as partículas de EPS virgem, a menor redução da densidade de massa do compósito ocorre devido à morfologia das partículas. Como mostrado nas micrografias, o processo de trituração do EPS reciclado propiciou uma superfície irregular, com maior porosidade externa. Isso possibilita o ingresso de parte da água e dos finos presentes na pasta cimentícia da mistura para o interior das partículas de EPS, aumentando a densidade de massa da argamassa.

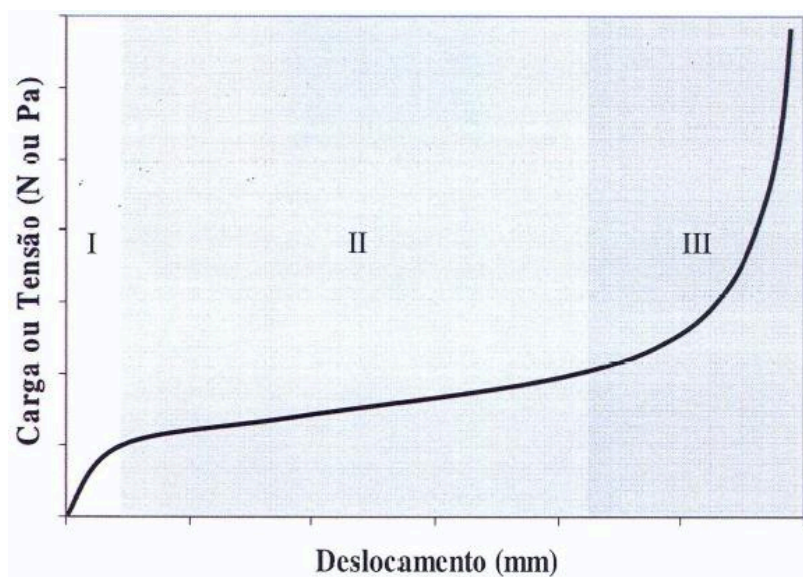
Também existe a possibilidade de deformação das partículas de EPS durante as etapas de mistura e adensamento. Ozório (2016) observou que a quantidade de EPS necessária para uma mesma densidade de massa no estado fresco reduziu 25% alterando o tipo de misturador. Kumayama et al. (2015) e Xu et al. (2016) obtiveram valores de densidade de massa no estado fresco menor que os valores teóricos calculados, o que também ocorreu para as argamassas RMA e RMB. Nesses casos, o teor de ar incorporado resultou em um valor negativo, o que na prática não existe; portanto, o método gravimétrico para determinação da incorporação de ar não se mostrou eficiente nesses casos. Os teores de ar incorporado das argamassas VMA e VMB resultaram em valores da ordem de 3%. Por apresentar partículas mais estruturadas que as de EPS reciclado por causa do invólucro externo, o EPS virgem provavelmente sofreu uma redução de volume menor; logo, o teor de ar incorporado pelo método gravimétrico apresenta valores maiores.

A retenção de água é uma propriedade que mensura de forma indireta a trabalhabilidade das argamassas (LEVIN; CLARKE; WELLS, 1956; CHEN et al., 2020) indicando a capacidade que a argamassa possui de reter a água de amassamento devido à sucção da base ou a

evaporação. Também é responsável por permitir que as reações de endurecimento da argamassa se tornem mais gradativas, promovendo a adequada hidratação do cimento e, conseqüente, ganho de resistência. Os resultados mostraram que a substituição da areia por EPS não alterou de forma significativa²² essa propriedade, mesmo modificando o processo de mistura.

Segundo Cardoso, Pileggi e John (2010), no ensaio de *squeeze-flow* podem ser identificados três estágios no diagrama carga \times deslocamento (Figura 57): a fase I é elástica e linear, correlacionada à espessura de revestimento que pode ser efetivamente aplicada; na fase II, o material alonga-se radialmente sob a carga, sofrendo deformação plástica ou viscosa, com altos valores de alongamento sem acréscimos proporcionais da carga; e, por fim, na fase III existe um aumento exponencial da carga para aumentar a deformação da argamassa, o que pode ser explicado pelo atrito entre as partículas e a restrição do deslocamento entre elas. No entanto, nem todos os ensaios de *squeeze-flow* irão satisfazer o perfil apresentado na Figura 57, que sofre influência da composição da argamassa (FRANÇA; CARDOSO; PILEGGI, 2013).

Figura 57 – Fases do diagrama carga deslocamento no ensaio de *squeeze-flow*

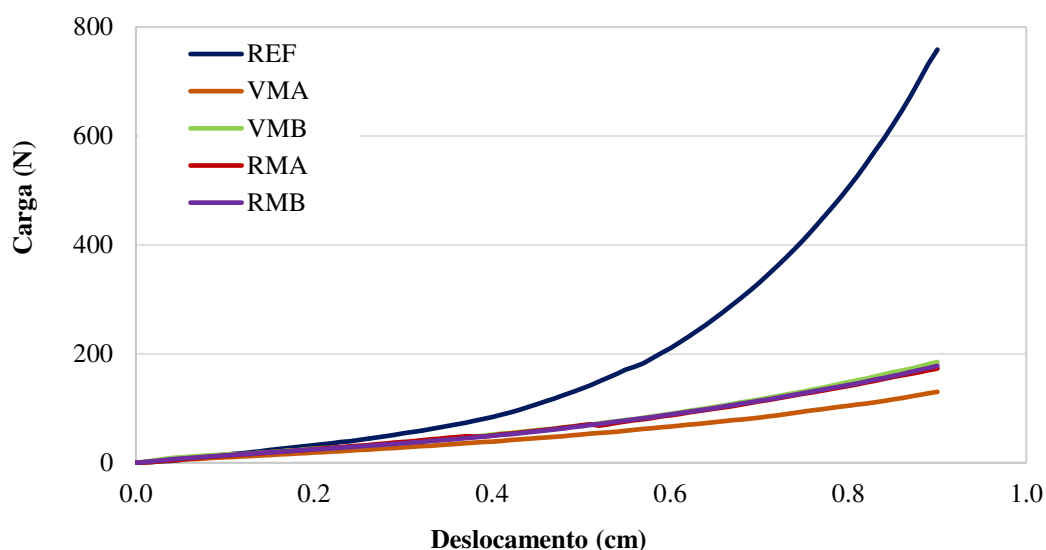


Fonte: Cardoso, Pileggi e John (2010).

Na Figura 58 estão apresentados os resultados do *squeeze flow* 15 min após a mistura das argamassas estudadas.

²² Resultados estatísticos conforme Apêndice B.

Figura 58 – Perfil carga-deslocamento do ensaio de *squeeze-flow* para as argamassas estudadas



Fonte: A autora.

Com base nos estágios da Figura 57, é possível verificar que todas as argamassas apresentam predominância das fases II e III. Nota-se que as argamassas com uso de EPS são bem mais plásticas que a argamassa REF. Tal como esperado, a substituição da areia pelo EPS provocou uma redução do nível de carga para o mesmo deslocamento, pois as partículas rígidas de areia foram substituídas pelas partículas flexíveis de EPS. As argamassas com EPS apresentaram maior deformabilidade, o que pode facilitar o seu manuseio e aplicação, especialmente como argamassa de revestimento.

4.3 Propriedades Mecânicas das Argamassas

A média e o desvio padrão dos resultados para as propriedades mecânicas estão mostrados na Tabela 16. A significância estatística dos efeitos para o nível de significância de 5% e intervalo de confiança de 95% consta no Apêndice B.

Observa-se no Quadro 5 que o tipo de EPS exerceu influência significativa em todas as propriedades mensuradas independentemente da idade de avaliação. No caso do tipo de mistura, o efeito foi significativo aos 28 dias quando avaliada a resistência à compressão e à tração na flexão e aos 7 dias para o módulo de elasticidade dinâmico.

Tabela 16 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, e resistência à tração na flexão

Propriedade	Argamassas estudadas				
	REF	VMA	VMB	RMA	RMB
$f_{c,3d}$ (MPa)	$23,46 \pm 0,99$	$4,56 \pm 0,76$	$5,33 \pm 0,08$	$7,19 \pm 0,33$	$7,46 \pm 1,00$
$f_{c,7d}$ (MPa)	$27,06 \pm 0,95$	$6,43 \pm 0,24$	$6,56 \pm 0,27$	$8,12 \pm 0,17$	$9,35 \pm 0,77$
$f_{c,28d}$ (MPa)	$28,03 \pm 0,78$	$6,93 \pm 0,38$	$6,89 \pm 0,51$	$8,17 \pm 0,41$	$10,58 \pm 0,26$
$E_d,3d$ (GPa)	$29,98 \pm 0,64$	$11,05 \pm 0,14$	$11,01 \pm 0,27$	$13,01 \pm 0,11$	$13,28 \pm 0,33$
$E_d,7d$ (GPa)	$32,17 \pm 0,59$	$11,38 \pm 0,15$	$12,49 \pm 0,12$	$14,45 \pm 0,32$	$14,62 \pm 0,40$
$E_d,28d$ (GPa)	$33,86 \pm 0,84$	$11,91 \pm 1,12$	$13,36 \pm 0,21$	$18,20 \pm 3,00$	$16,36 \pm 0,45$
$R_f,28d$ (GPa)	$4,72 \pm 0,17$	$2,85 \pm 0,09$	$2,65 \pm 0,04$	$2,76 \pm 0,05$	$3,21 \pm 0,12$

Nota: f_c = resistência à compressão; E_d = módulo de elasticidade dinâmico; R_f = resistência à tração na flexão; 3d, 7d, 28d = 3 dias, 7 dias e 28 dias, respectivamente.

Fonte: A autora.

Quadro 5 – Significância dos efeitos para as propriedades mecânicas no estado endurecido

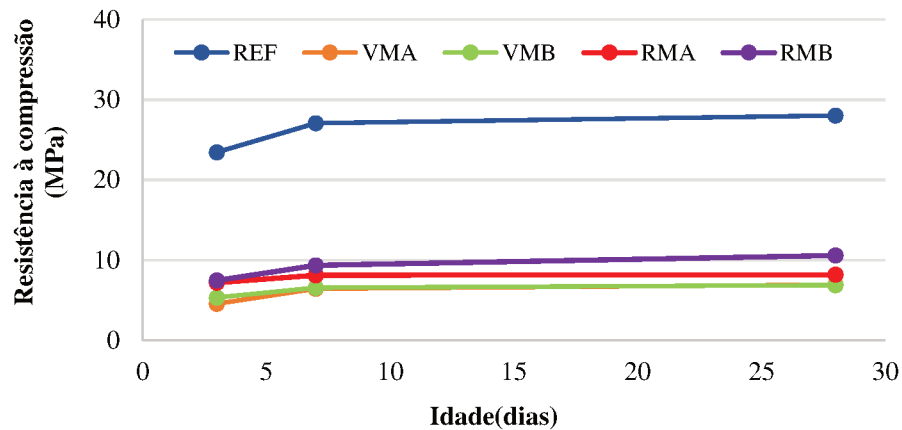
Propriedade	Significância dos efeitos		
	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Interação EPS × mistura
$f_{c,3d}$ (MPa)	S	NS	NS
$f_{c,7d}$ (MPa)	S	NS	NS
$f_{c,28d}$ (MPa)	S	S	S
$E_d,3d$ (GPa)	S	NS	NS
$E_d,7d$ (GPa)	S	S	S
$E_d,28d$ (GPa)	S	NS	NS
$R_f,28d$ (GPa)	S	S	S

Nota: S = efeito significativo e NS = efeito não significativo.

Fonte: A autora.

A resistência à compressão aumentou com a idade para todas as argamassas, como pode ser visualizado na Figura 59, com aumento mais expressivo nos primeiros dias. Aos 3 e 7 dias, a maior parte das reações de hidratação ainda se encontra em desenvolvimento; desse modo, é possível que as modificações provocadas pelos tipos de mistura na dispersão das partículas e na interface pasta-agregado não ocorreram em escala suficiente para afetar a resistência à compressão.

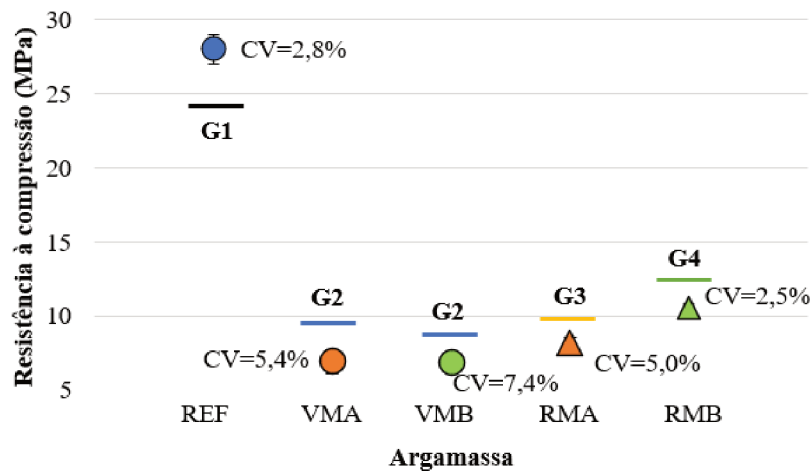
Figura 59 – Variação da resistência à compressão em função da idade



Fonte: A autora.

Na Figura 60 são mostrados os valores de resistência à compressão aos 28 dias para as argamassas avaliadas.

Figura 60 – Resistência à compressão aos 28 dias para cada argamassa estudada



Fonte: A autora.

Os resultados mostram uma redução da resistência à compressão de aproximadamente 71% das argamassas com uso de EPS em relação à de referência. Esse resultado está de acordo com a tendência observada na literatura (Capítulo 2, Figura 23). As argamassas com EPS reciclado apresentaram densidade de massa maior que as argamassas com EPS virgem, o que acarretou um pequeno acréscimo na resistência à compressão (BABU; BABU; WEE, 2005; LAUKAITIS; ŽURAUSKAS; KERIENE, 2005; XU et al., 2012).

Os resultados da análise estatística também mostraram que as argamassas VMA e VMB formaram um grupo homogêneo, diferente das argamassas RMA e RMB, que diferem entre si. Para o EPS reciclado, o tipo de mistura B provocou um aumento da resistência à compressão

de aproximadamente 23% quando comparado ao tipo de mistura A. Já para o EPS virgem, o tipo de mistura não exerceu influência sobre a resistência à compressão. Considerando que ambos os tipos de EPS absorvem água e finos da mistura, que são depositados no interior das partículas (fato comprovado pela análise microestrutural), a pré-saturação que ocorre no tipo de mistura B pode ter sido um fator determinante que favoreceu a resistência à compressão no caso do EPS reciclado; para o EPS virgem, apenas esse efeito não foi suficiente para compensar outros parâmetros que afetam a resistência à compressão.

Os maiores valores de resistência à compressão do EPS reciclado em relação ao EPS virgem também se justificam pela diferença de morfologia entre ambos. Partículas mais angulosas e com textura superficial mais rugosa provocam maior aderência entre a pasta cimentícia e o agregado (NEVILLE, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Assim, o EPS reciclado, por ter o formato das partículas anguloso e a textura superficial rugosa, apresentaria melhor aderência mecânica que o EPS virgem, que é esférico e com mais poros fechados. Embora as partículas de EPS virgem apresentem alguns poros abertos que permitem a entrada de pasta cimentícia, a menor rugosidade na superfície diminui a extensão do contato matriz-agregado e, conseqüentemente, a aderência, fato observado por Laukaitis, Žurauskas e Keriene (2005) e Maaroufi *et al.* (2018).

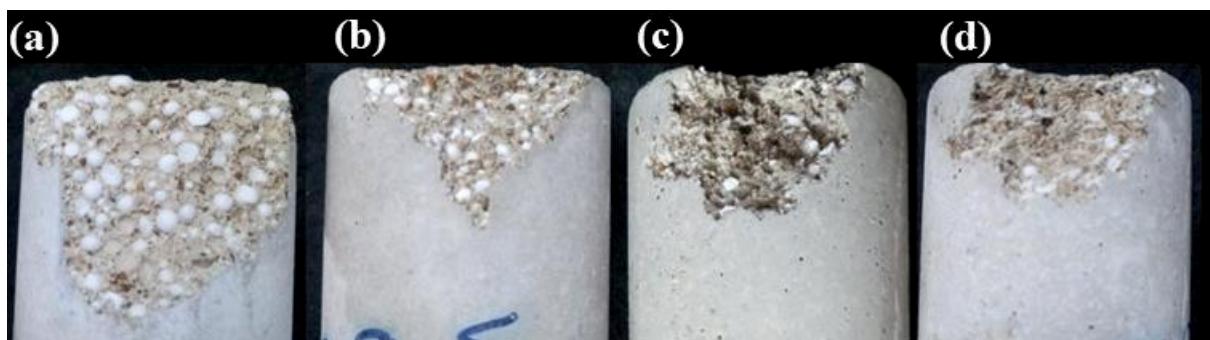
Na

Figura 61 estão mostrados os corpos de prova após a realização do ensaio de compressão. Verificou-se que parte das partículas das argamassas VMA e VMB sofreram arrancamento, enquanto nas argamassas RMA e RMB as partículas foram rompidas juntamente com a pasta e permaneceram aderidas, mesmo após a ruptura. A mesma tendência foi observada por Laukaitis, Žurauskas e Keriene (2005).

Também foi observada a alteração no padrão de fissuração provocada pelo EPS, como mostrado na Figura 62. As argamassas VMA, VMB, RMA e RMB apresentaram superfícies de ruptura com menores zonas de fissuração e retiveram a forma do corpo de prova em um grau maior do que a argamassa REF. Isso pode ter ocorrido devido ao aumento da macroporosidade e à absorção de energia provocada pela alteração da propagação de fissuras que o EPS causa, sendo que todos esses fatores são tendências bem estabelecidas na literatura²³.

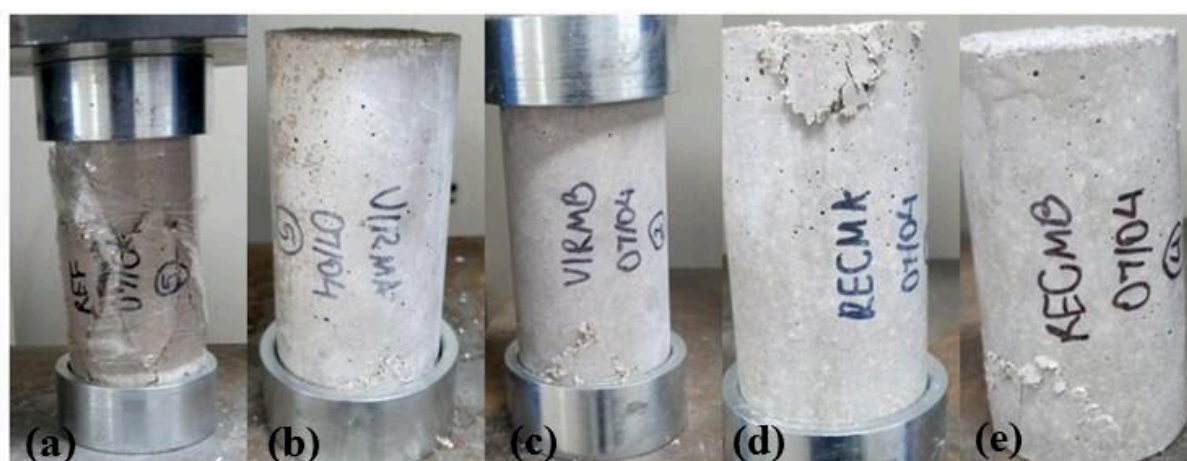
²³(BABU; BABU; TIONG-HUAN, 2006; BABU; BABU, 2003; CHEN; LIU, 2004; MAZONI, 2019; MOHAMMED; ZAIN, 2016; NIKBIN; GOLSHÉKAN, 2018; OZÓRIO, 2016; PETRELLA; DI MUNDO; NOTARNICOLA, 2020; SADRMOHTAZI *et al.*, 2012; BABU; BABU; WEE, 2005; TRUSSONI; HAYS; ZOLLO, 2012; TRUSSONI; HAYS; ZOLLO, 2013).

Figura 61 – Superfícies de ruptura apresentadas pelas argamassas com EPS após a realização do ensaio de compressão aos 28 dias (a) VMA; (b) VMB; (c) RMA; (d) RMB



Fonte: A autora.

Figura 62 – Padrão de fissuração apresentado pelas argamassas após ensaio de compressão aos 28 dias (a) REF; (b) VMA; (c) VMB; (d) RMA; (e) RMB

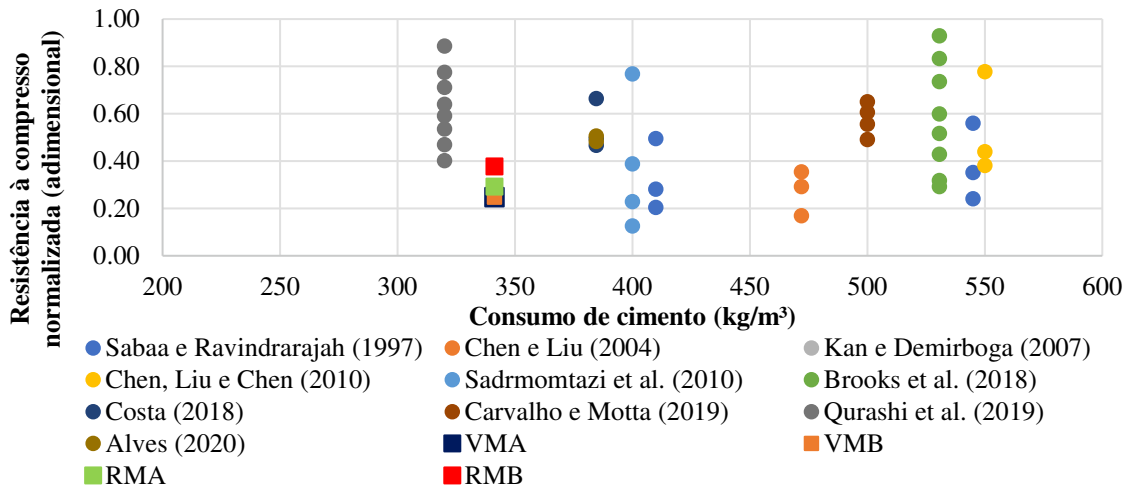


Fonte: A autora.

O padrão de fratura das amostras, das extremidades para o centro, também foi verificado por Babu, Babu e Wee (2005). Porém, nos resultados desses autores, as amostras apresentaram concentração de fissuras apenas na face superior. Nas argamassas estudadas, a fissuração foi distribuída em ambas as extremidades dos corpos de prova. Considerando que a concentração de partículas de EPS em uma região facilita o início e a propagação das fissuras, é razoável supor que as argamassas foram bem adensadas e não sofreram segregação.

Foi feita a comparação dos resultados de resistência à compressão normalizada com os obtidos por outros autores, considerando como parâmetro o consumo de cimento, como mostrado na Figura 63.

Figura 63 – Resistência à compressão normalizada para argamassas com mesmo teor de EPS ($p = 0,30$) e diferentes consumos de cimentos verificadas na literatura e na presente pesquisa

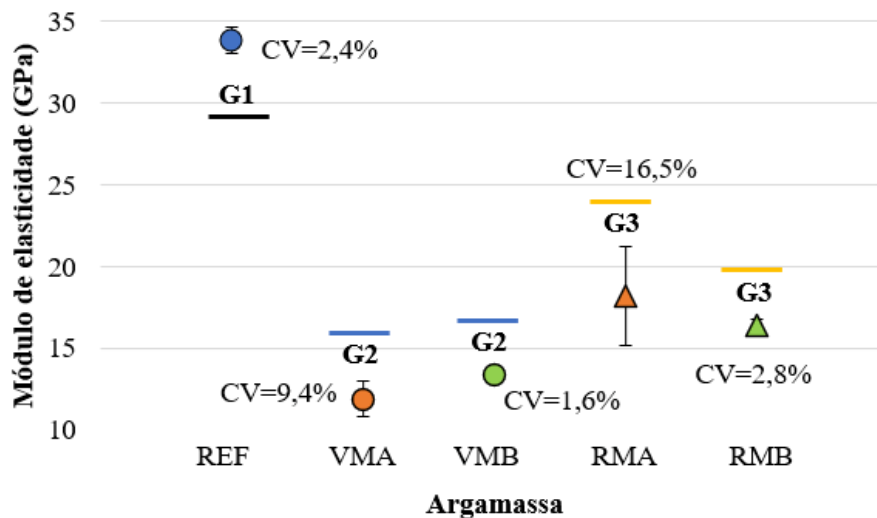


Fonte: A autora.

A variação na resistência à compressão detectada nos outros trabalhos, para um consumo de cimento constante, foi causada principalmente pela mudança de teores de EPS nas argamassas. No presente estudo, os resultados obtidos mostram uma variação considerável da resistência à compressão para o mesmo teor de EPS. Houve um aumento de 35% da resistência à compressão da argamassa RMB (maior valor) quando comparada à argamassa VMA (menor valor), apenas com a alteração dos tipos de EPS e de mistura.

Tal como indicado na literatura²⁴, o módulo de elasticidade dinâmico também aumentou com a idade e decaiu com o uso de EPS na argamassa como mostrado na Figura 64.

Figura 64 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias para as argamassas estudadas



Fonte: A autora.

²⁴ Ver Capítulo 2, Figura 26.

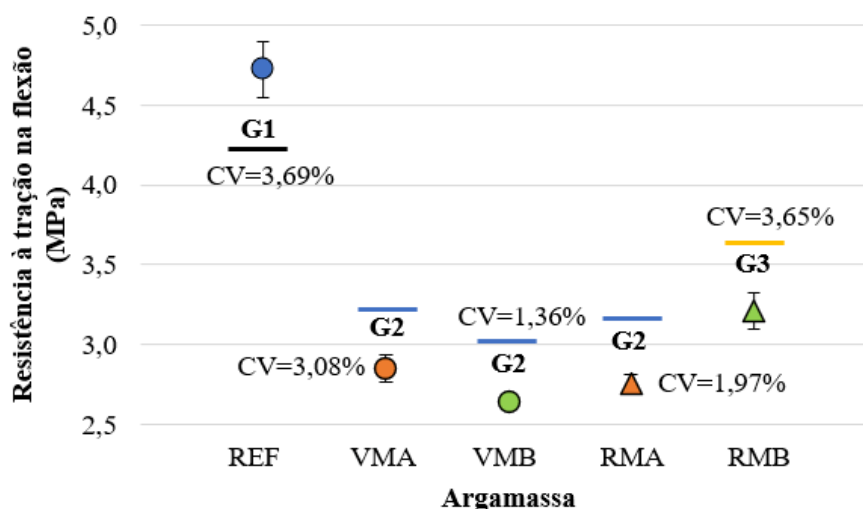
A redução do módulo de elasticidade com a presença do EPS ocorre porque uma parcela de agregado foi substituída por um material com módulo de elasticidade menor (BABU; BABU, 2003; NEVILLE, 2011).

Laukaitis, Žurauskas e Keriene (2005) também observaram em seus estudos que o módulo de elasticidade possui correlação direta com a densidade de massa dos compósitos no estado endurecido. Isso explica o fato de, apesar de ter partículas de EPS com maior massa específica, as argamassas VMA e VMB apresentaram módulo de elasticidade 25% menor que as argamassas RMA e RMB.

Essa tendência é confirmada pelo fator de eficiência²⁵: os valores são de 0,0165 (REF); 0,0085 (VMA); 0,0097 (VMB); 0,0113 (RMA) e 0,0104 (RMB), indicando claramente a correlação direta entre a massa específica no estado endurecido e o módulo de elasticidade.

Na Figura 65 são apresentados os resultados da resistência à tração na flexão aos 28 dias para as argamassas estudadas. Tal como na resistência à compressão, houve uma redução dessa propriedade para as argamassas com uso de EPS em relação à referência; a diminuição média foi de aproximadamente 40%. Dentre as argamassas com EPS, a argamassa RMB possui os maiores valores de resistência à flexão.

Figura 65 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias para as argamassas estudadas



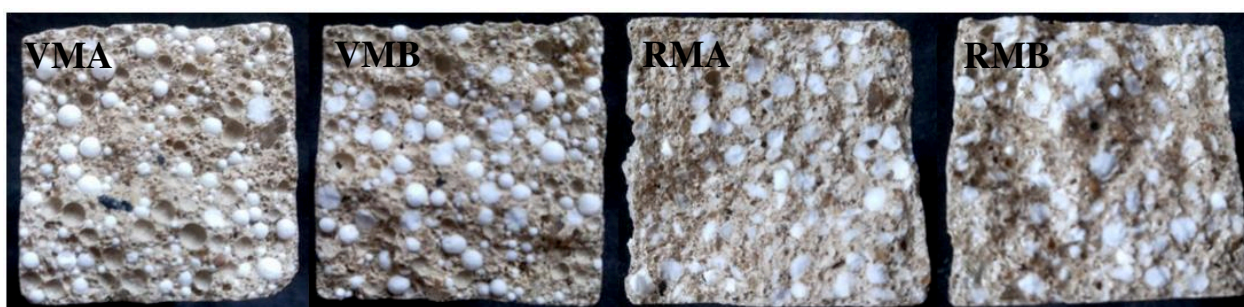
Fonte: A autora.

Na análise de variância, as argamassas VMA, VMB e RMA foram estatisticamente equivalentes, indicando que os tipos de mistura e de agregado isoladamente não provocaram

²⁵ Razão entre uma determinada propriedade e a massa específica no estado endurecido (OZÓRIO, 2016); nesse caso, é a razão entre o módulo de elasticidade e a massa específica seca.

melhoria suficiente da aderência que aumentasse a resistência à tração na flexão. Todavia, as superfícies de ruptura foram semelhantes às visualizadas na resistência à compressão, conforme a Figura 66. Houve a predominância de arrancamento das pérolas para as argamassas com EPS virgem e ruptura do agregado para as argamassas com EPS reciclado. Nas argamassas com EPS não houve a ruptura total do corpo de prova, como exemplificado na Figura 67, resultado semelhante ao encontrado por Petrella, Di Mundo e Notarnicola (2020).

Figura 66 – Superfície de ruptura dos corpos de prova das argamassas com EPS após o ensaio de tração na flexão aos 28 dias



Fonte: A autora.

Figura 67 – Ruptura da argamassa RMB após ensaio de tração na flexão



Fonte: A autora.

4.4 Propriedades Físicas das Argamassas

Os resultados médios e o desvio padrão das propriedades físicas avaliadas nas argamassas estudadas podem ser visualizados na Tabela 17. A significância estatística dos efeitos para o nível de 5% e um intervalo de confiança de 95% pode ser visualizada no Quadro 6. O detalhamento da análise estatística encontra-se no Apêndice B.

Tabela 17 – Resultados para absorção por imersão (A), índice de vazios (I_v), massa específica saturada (ρ_{sat}), seca (ρ_s) e real (ρ_r) e coeficiente de capilaridade (C) aos 28 dias

Propriedade	Argamassas				
	REF	VMA	VMB	RMA	RMB
A (%)	$5,38 \pm 0,09$	$8,51 \pm 0,02$	$9,02 \pm 0,05$	$8,44 \pm 0,03$	$9,12 \pm 0,17$
I_v (%)	$11,07 \pm 0,19$	$12,00 \pm 0,07$	$12,59 \pm 0,16$	$13,71 \pm 0,15$	$14,41 \pm 0,23$
ρ_{sat} (kg/m ³)	$2167 \pm 4,77$	$1512 \pm 2,93$	$1506 \pm 3,27$	$1749 \pm 9,08$	$1723 \pm 4,65$
ρ_s (kg/m ³)	$2058 \pm 3,92$	$1392 \pm 4,16$	$1381 \pm 3,26$	$1613 \pm 9,21$	$1579 \pm 5,68$
ρ_r (kg/m ³)	$2311 \pm 3,33$	$1583 \pm 0,63$	$1579 \pm 4,02$	$1863 \pm 6,39$	$1845 \pm 5,31$
C_{90} (g/cm ² ·min ^{0,5})	$0,065 \pm 0,00$	$0,054 \pm 0,01$	$0,078 \pm 0,00$	$0,067 \pm 0,01$	$0,076 \pm 0,02$

Fonte: A autora.

Quadro 6 – Significância dos efeitos para as propriedades físicas no estado endurecido

Propriedade	Significância dos efeitos		
	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Interação EPS × mistura
A (%)	NS	S	S
I_v (%)	S	S	NS
ρ_{sat} (kg/m ³)	S	S	S
ρ_s (kg/m ³)	S	S	S
ρ_r (kg/m ³)	S	S	S
C (g/cm ² ·min ^{0,5})	NS	NS	NS

Nota: S = efeito significativo e NS = efeito não significativo.

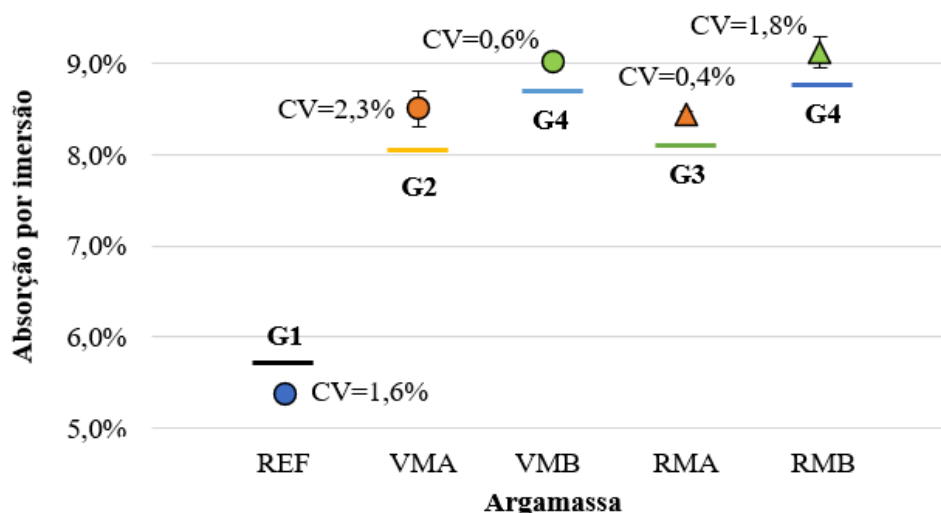
Fonte: A autora.

No que se refere à capacidade de absorção de água por imersão, o uso de EPS propiciou um aumento médio de aproximadamente 63% em comparação à argamassa de referência. Os valores médios e o coeficiente de variação estão indicados na Figura 68.

O tipo de EPS não interferiu significativamente nessa propriedade, enquanto o método de mistura teve um efeito significativo. Na literatura não há um padrão de comportamento estabelecido para a absorção por imersão com a presença de EPS; alguns autores relatam redução nos valores (BABU; BABU; TIONG-HUAN, 2006; FATHI; YOUSEFIPOUR; HEMATPOURY FAROKHY, 2017; BALTO et al., 2021). Porém, outros obtiveram um aumento da capacidade de absorção de água (TORRES; GARCÍA-RUIZ, 2009;

SADRMOMTAZI; SOBHANI; MIRGOZAR, 2013; KUMAYAMA et al., 2015; RANJBAR; MOUSAVI, 2015; OZÓRIO, 2016), mesmo que não tenha sido mensurada a capacidade de absorção de água do EPS para caracterização do material.

Figura 68 – Absorção por imersão aos 28 dias das argamassas estudadas



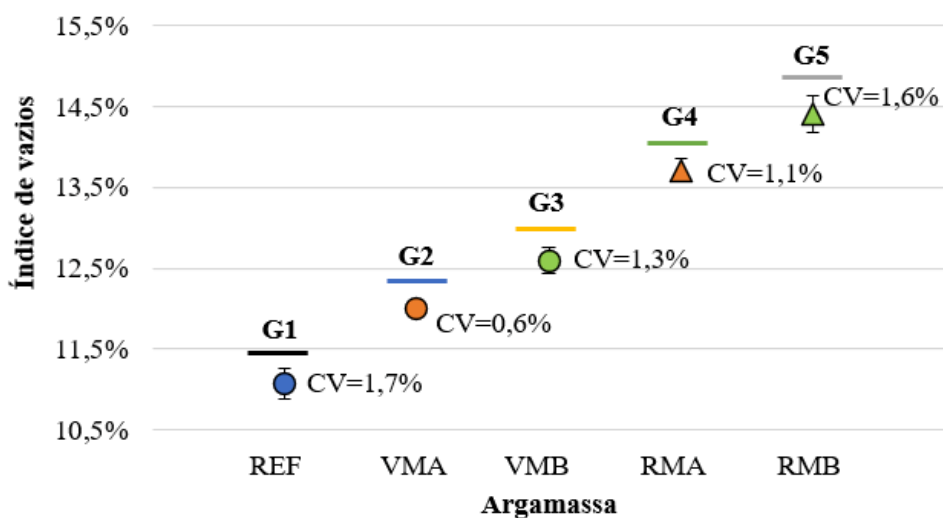
Fonte: A autora.

Também foi reportado na literatura que a estrutura de poros abertos do EPS consegue reter água em suas camadas superficiais. Morgado et al. (2021) verificaram variações na estrutura dos poros próximos à interface em ciclos de gelo-degelo e Lanzón et al. (2015) detectou uma maior concentração de hidróxido de cálcio também nessa região, sugerindo o aumento da porosidade.

Quando comparado à absorção por imersão, que mensura os poros permeáveis, o índice de vazios não apresenta a mesma tendência (Figura 69). O uso de EPS reciclado e a mistura B aumentaram os valores de porosidade total das argamassas em relação ao EPS virgem e à mistura A, respectivamente. Embora a principal hipótese para esse comportamento seja a magnitude do carreamento dos finos da pasta para o interior das partículas de EPS, os resultados do índice de vazios indicam que as variáveis adotadas também interferem nas características dos poros, como diâmetro e conectividade.

Para o índice de vazios, o tipo de EPS e método de mistura são significativos, mas a interação entre eles não é. Na análise estatística entre as argamassas, todas elas são diferentes entre si. Em relação aos valores disponíveis na literatura, era esperado que o EPS provocasse o aumento da porosidade total em relação ao compósito de referência, pois o único trabalho discrepante dessa tendência é o de Brás, Leal e Faria (2013).

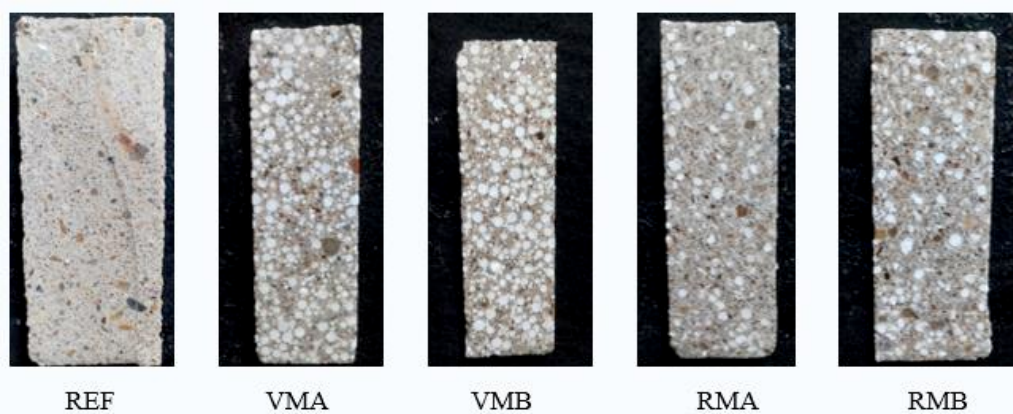
Figura 69 – Índice de vazios determinado para as argamassas estudadas aos 28 dias



Fonte: A autora.

Quanto à distribuição das partículas, todas as argamassas apresentaram homogeneidade e ausência de indícios de segregação, como pode ser observado na Figura 70. Isso indica que a consistência da pasta cimentícia foi adequada e houve resistência ao cisalhamento suficiente para evitar a flutuação das partículas de EPS após a moldagem. Nota-se na Figura 70 que as micropérolas são bastante visíveis nas argamassas VMA e VMB, enquanto a fração lamelar do agregado reciclado é coberta pela pasta cimentícia e não é visível nas argamassas RMA e RMB.

Figura 70 – Seção longitudinal das argamassas extraídas após 28 dias de moldagem



Fonte: A autora.

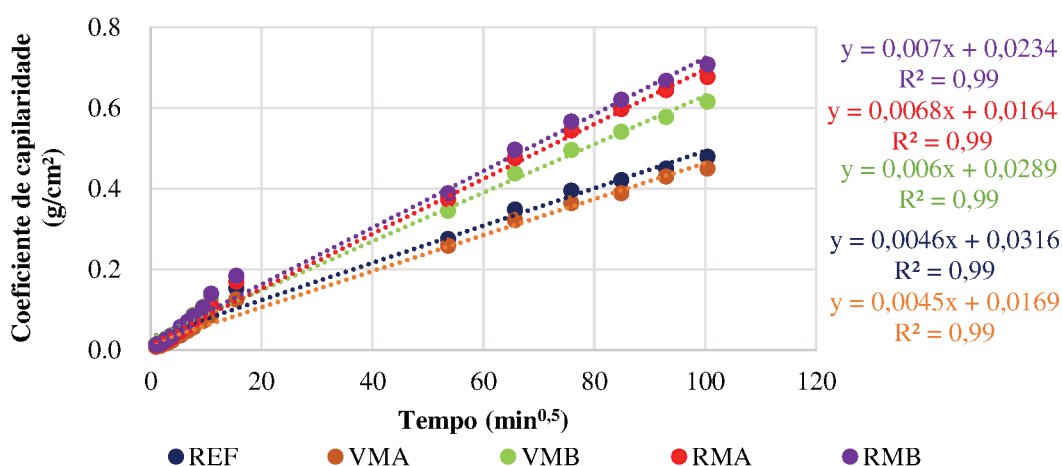
Como esperado, o EPS provocou a redução da massa específica das argamassas no estado endurecido. Todas as argamassas com EPS apresentaram massas específicas menores que a argamassa de referência, com uma redução média na massa específica seca de 33% para o EPS virgem e 22,5% para o reciclado. Em relação à análise estatística, as argamassas VMA

e VMB formam um grupo homogêneo, que difere de RMA e RMB, que também diferem entre si.

Em relação ao tipo de EPS, a menor massa específica das argamassas com EPS virgem é decorrente do menor volume de pasta cimentícia provocado pela menor deformação volumétrica decorrente dos processos de mistura e moldagem, semelhante ao que foi observado no estado fresco. Para as argamassas com EPS reciclado, a argamassa RMA apresenta uma massa específica ligeiramente superior à argamassa RMB, tendência contrária ao observado no estado fresco (valores de 1681 kg/m³ e 1719 kg/m³ - RMA e RMB, respectivamente) e que também não condiz com os valores observados por Carvalho e Motta (2019).

Na Figura 71, é possível verificar que todas as argamassas, com exceção da VMA, apresentaram coeficientes de capilaridade maiores que a argamassa de referência.

Figura 71 – Perfis de capilaridade para as argamassas estudadas



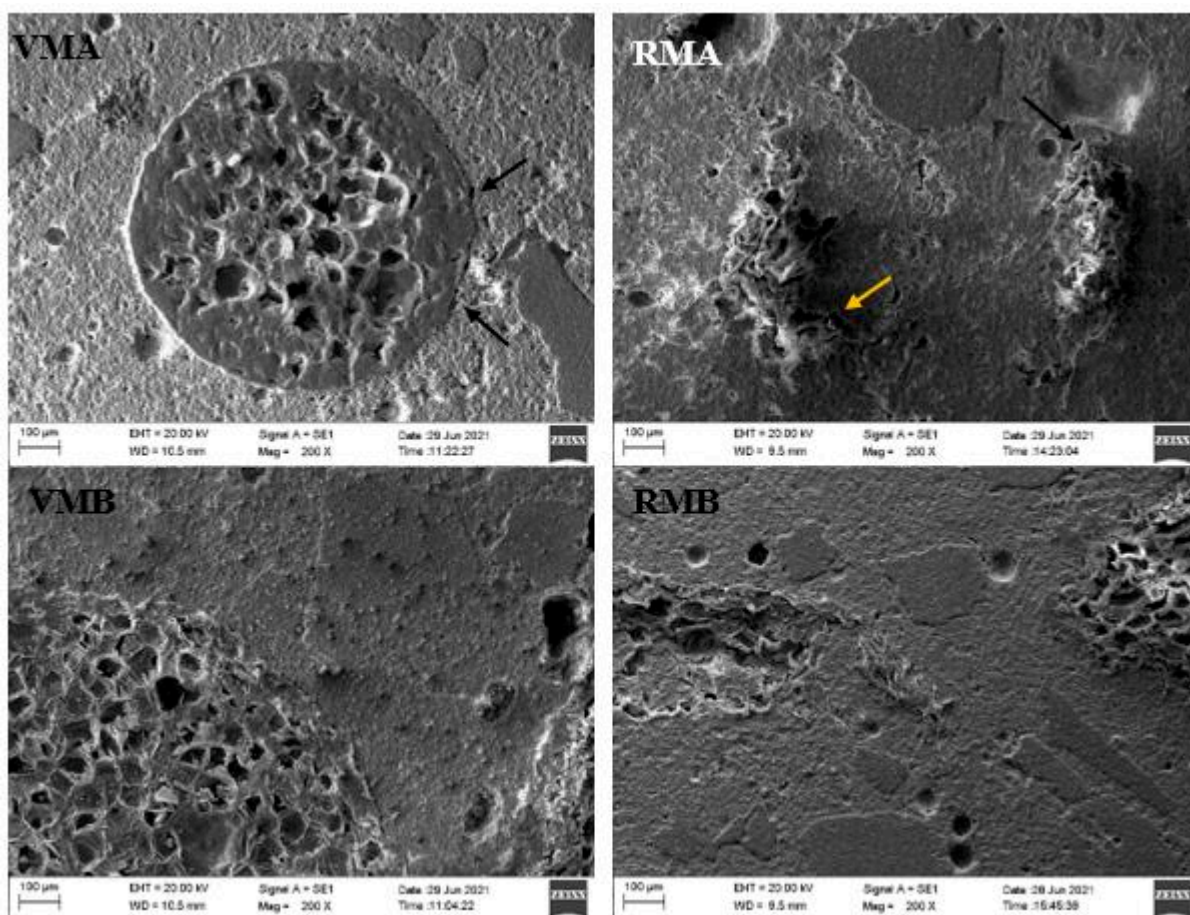
Fonte: A autora.

Alguns autores também verificaram o aumento da capilaridade com o uso de EPS (TORRES; GARCÍA-RUIZ, 2009; OZÓRIO, 2016). Em relação ao tipo de EPS, é provável que as partículas alongadas de EPS reciclado facilitem a formação de poros interconectados que aumentem a capilaridade. Quanto ao método de mistura, é provável no tipo B haja a formação de poros de diâmetro menor e mais interconectados quando comparados ao tipo A, o que facilitaria o processo de absorção por capilaridade. Investigações adicionais para verificação da distribuição dos poros e partículas de EPS nas argamassas são necessárias para maiores explicações.

4.5 Análise Microestrutural das Argamassas

Na Figura 72 são apresentadas micrografias da zona de transição entre a argamassa e as partículas de EPS. É possível observar um contorno nítido entre os agregados e a matriz cimentícia, mas com alguns pontos em que a zona de transição entre a argamassa e o EPS é mais porosa em relação à matriz cimentícia e os contornos com o agregado natural. Esse aumento de porosidade diminui o desempenho mecânico do material. Não foi possível verificar diferenças expressivas nas interfaces produzidas com EPS reciclado e virgem, bem como nas interfaces dos tipos de mistura A e B.

Figura 72 – Zonas de transição das argamassas VMA, RMA, VMB e RMB. Ampliação de 200×



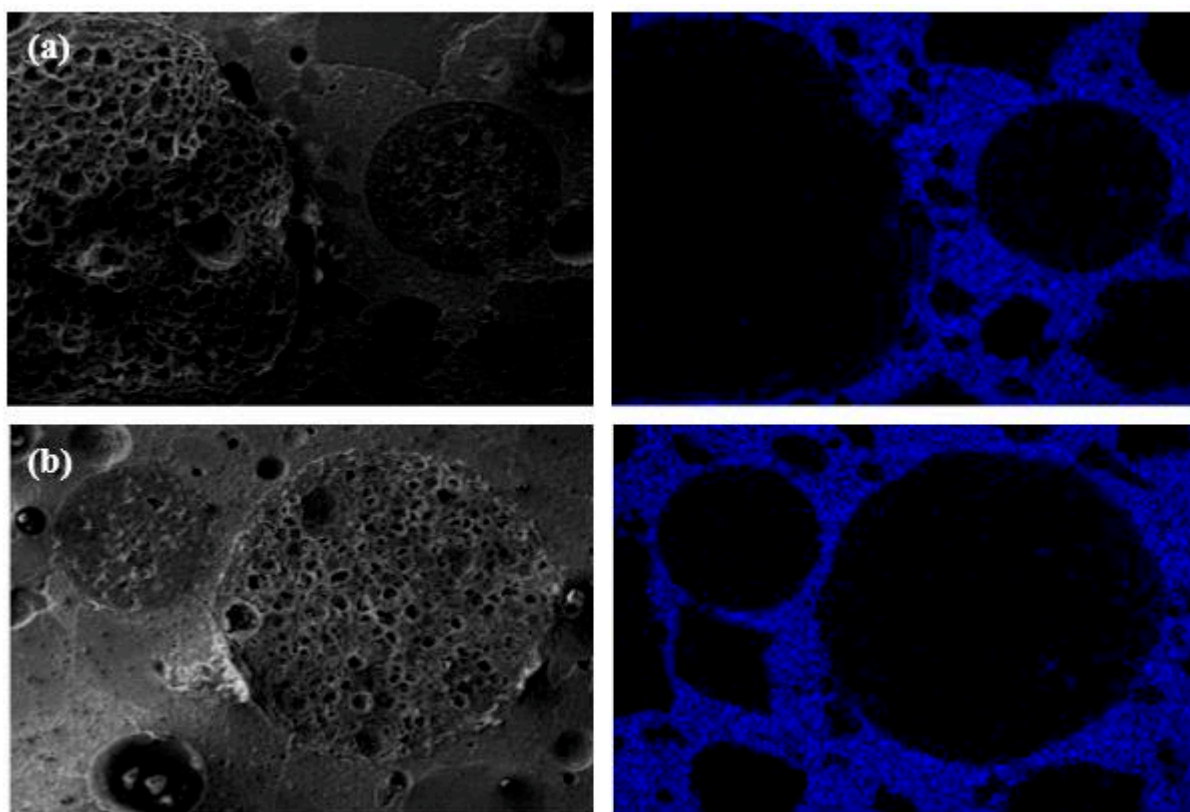
Fonte: A autora.

Outro aspecto observado foi a formação de hidratos no interior das partículas do EPS, principalmente para o EPS reciclado, por apresentar uma estrutura superficial mais aberta em

comparação ao EPS virgem. Isso foi detectado tanto nas imagens do MEV quanto na análise da composição química qualitativa via EDS.

Na Figura 73 é possível visualizar a micrografia das pérolas de EPS presentes nas argamassas VMA e VMB, imagens à esquerda; e na direita, o mapeamento do elemento cálcio representado pelos pontos em azul, indicando a formação de produtos hidratados. Observa-se também que há uma distorção do formato esférico das partículas de pérola e micropérola, que pode ser ocasionada durante o processo de homogeneização e/ou de compactação, uma vez que a moldagem dos corpos de prova foi realizada por meio de golpes com soquete metálico. Por fim, nota-se que a concentração dos hidratos é bem maior próximo à zona de transição para as pérolas. Nas micropérolas, a concentração é bem distribuída em toda a área, mesmo que nas bordas haja uma quantidade maior de poliestireno, formando um invólucro com menor porosidade quando comparado ao centro da micropérola.

Figura 73 – Distribuição do elemento cálcio (em azul) para a argamassa (a) VMA e (b) VMB, sendo a imagem da esquerda a micrografia obtida e a esquerda o mapeamento do elemento cálcio realizado via EDS

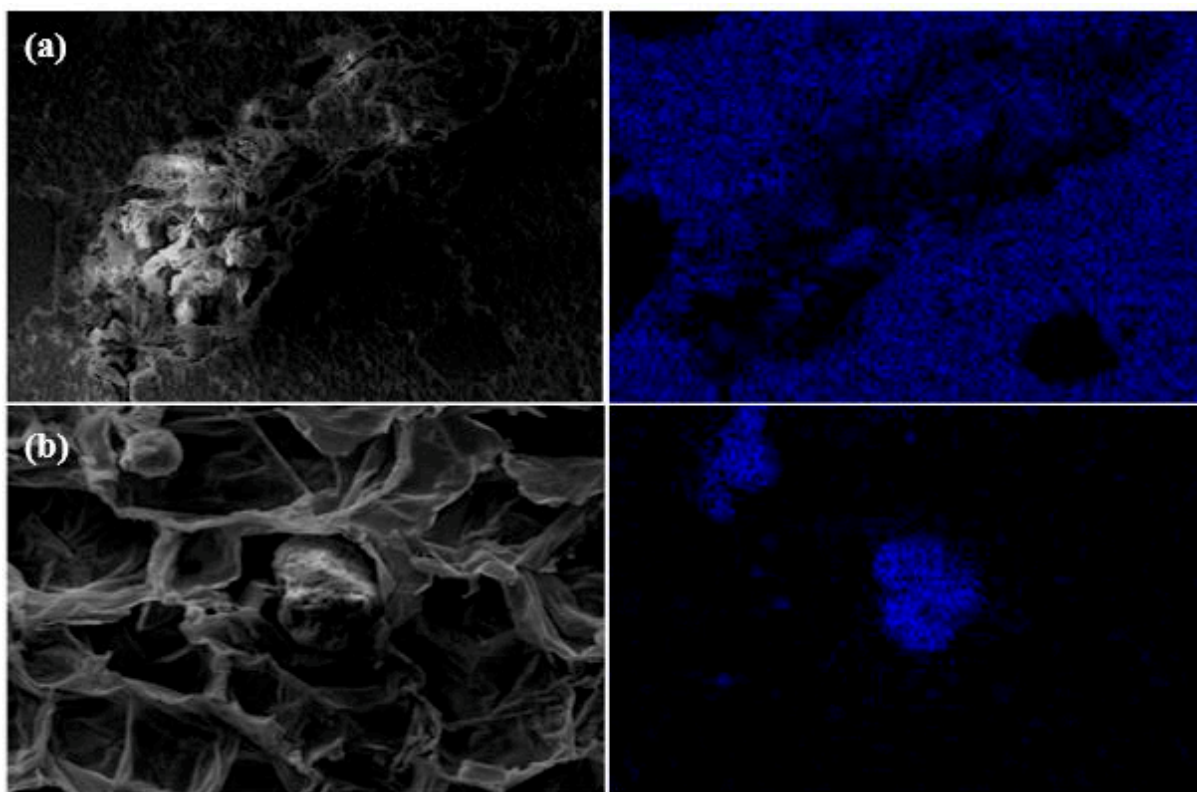


Nota: Composição qualitativa – (a) VMA: C = 74,86%; O = 22,83%; Ca = 1,08%; (b) VMB: C = 66,45%; O = 30,14%; Ca = 1,58%

Fonte: A autora.

Na Figura 74 são apresentadas as micrografias e mapeamento do elemento cálcio para as argamassas RMA e RMB, que evidenciam a ocorrência de produtos hidratados no interior das partículas do EPS reciclado de forma mais acentuada quando comparada com as argamassas VMA e VMB devido à morfologia das partículas. Tal como verificado nas imagens de MEV, o EPS reciclado possui uma estrutura mais aberta e, durante a mistura, parte da pasta cimentícia pode penetrar no interior da partícula, consolidando-se com o avanço da idade. Esse acréscimo de material pode ter contribuído com o aumento da massa específica das argamassas com EPS reciclado em comparação às argamassas com EPS virgem.

Figura 74 – Distribuição do elemento cálcio (em azul) para a argamassa (a) RMA e (b) RMB, sendo a imagem da esquerda a micrografia obtida e a esquerda o mapeamento do elemento cálcio realizado via EDS



Nota: Composição qualitativa (a) RMA - C = 54,30%; O = 39,75%; Al = 0,25%; Si = 1,20% Ca = 4,33% e Fe = 0,17%; (b): C = 54,30%; O = 39,75%; Al = 0,25%; Si = 1,20% Ca = 4,33% e Fe = 0,17%.

Fonte: A autora.

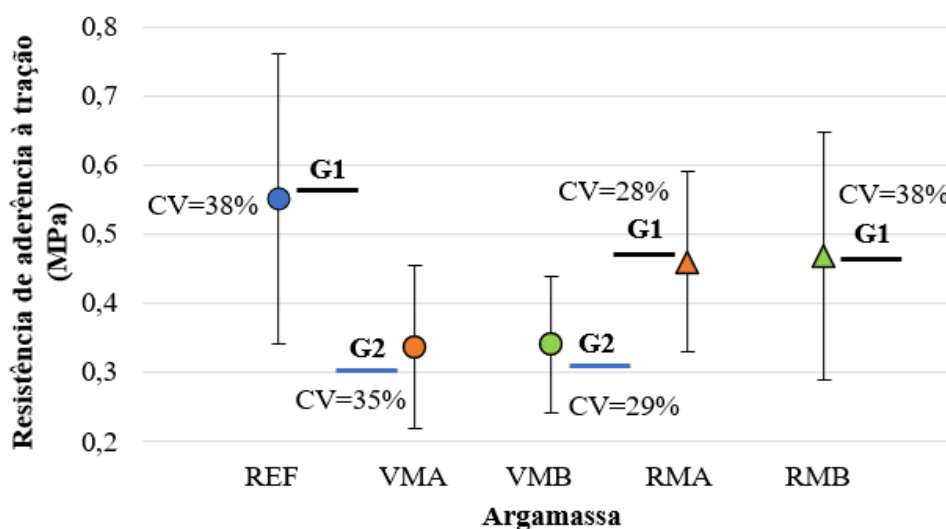
É provável que a ocorrência de penetração de pasta cimentícia nas partículas de EPS não ocorreu de forma substancial para alterar a resistência à compressão e a porosidade das argamassas. O método de mistura B pode ter contribuído para o aumento da deposição das partículas no interior do EPS reciclado, haja vista que a argamassa RMB apresentou maior

resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção por imersão e índice de vazios em comparação às demais argamassas. No entanto, considerando os resultados mecânicos e físicos apresentados anteriormente, a penetração de pasta cimentícia nas partículas de EPS não afetou a porosidade do sistema.

4.6 Aderência Argamassa-substrato

Considerando as variações nas propriedades que foram analisadas, as argamassas com EPS podem ter seu uso otimizado como argamassas de revestimento por uma série de fatores: redução de massa específica, maior capacidade de deformação e melhoria do desempenho térmico. No entanto, é necessário que apresentem aderência satisfatória quando aplicadas sobre um determinado substrato. Na Figura 75 são apresentados os resultados de resistência de aderência à tração para as argamassas estudadas aos 28 dias quando aplicadas sobre uma superfície de concreto.

Figura 75 – Resistência de aderência à tração das argamassas estudadas



Fonte: A autora.

Em relação aos valores de resistência de aderência à tração, todas as argamassas apresentam médias maiores que os limites mínimos estabelecidos pela NBR 13528-3 (ABNT, 2019) para aplicação em paredes externas (0,30 MPa). Houve predominância de ruptura na interface substrato-argamassa para todas as argamassas, inclusive a de referência. Os valores elevados do coeficiente de variação encontram-se dentro dos limites típicos desse tipo de ensaio, da ordem de 35% (VAZ; CARASEK, 2019).

A análise estatística indicou que o tipo de EPS teve efeito significativo nos resultados. As argamassas com EPS reciclado apresentaram uma resistência de aderência 41% superior às com EPS virgem, independentemente do tipo de mistura utilizado, formando um grupo homogêneo com a argamassa de referência, enquanto as argamassas VMA e VMB formaram o segundo grupo homogêneo. O aumento da resistência de aderência à tração das argamassas com EPS reciclado em relação às argamassas com EPS virgem provavelmente foi ocasionado pelo aumento da área de contato EPS-matriz cimentícia, proporcionado pelas irregularidades superficiais desse tipo de EPS. O método de mistura não interferiu nos resultados, indicando que ambos os métodos adotados proporcionaram misturas homogêneas e com reologia adequada de forma a não prejudicar a aderência.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do tipo de EPS (virgem e reciclado) e do método de mistura nas propriedades das argamassas, considerando os resultados obtidos no programa experimental desenvolvido são tecidas as seguintes conclusões:

- o tempo de trituração para redução das partículas de EPS reciclado depende do tamanho inicial das partículas. Foi necessário um tempo de 6 min para obtenção de uma DMC de 4,8 mm, partindo-se de uma DMC de 19 mm, enquanto para uma DMC de 12,5 mm esse tempo foi igual a 4,5 min, considerando a mesma proporção EPS: água e equipamento. As curvas granulométricas de amostras de mesmo lote submetidas ao tempo de processamento estabelecido não apresentaram desvios superiores a 5%;
- as partículas de EPS virgem apresentaram massa específica 38% superior às do reciclado. Quanto à morfologia, o EPS reciclado possui partículas mais alongadas e irregulares em comparação ao EPS virgem, ocasionada pelo processo de trituração que o material foi submetido. Ambos os tipos de EPS analisados obtiveram capacidade de absorção de água superior à areia utilizada; o maior valor foi observado para o EPS virgem (7,5%);
- as curvas granulométricas dos agregados utilizados não foram equivalentes: a areia possui maior porcentagem de partículas inferiores a 1,5 mm em relação ao EPS virgem e reciclado; o EPS virgem utilizado apresenta uma distribuição mal graduada, com deficiência de partículas entre 1 e 2 mm; a distribuição de partículas do EPS reciclado foi bem graduada;
- para a obtenção de um mesmo índice de consistência, foi necessário um menor teor de aditivo superplastificante nas argamassas com uso de EPS em relação à referência; dentre os tipos de EPS, o consumo foi mais elevado para o EPS reciclado. Isso provavelmente foi ocasionado pela forma das partículas, visto que além da hidrofobicidade, essas possuem uma esfericidade próxima a 1;
- as argamassas com EPS apresentaram menor densidade de massa em relação à referência: 31% quando utilizado EPS virgem e 19% para o reciclado. Essa diferença entre tipos de EPS pode estar relacionada à granulometria e a morfologia das partículas. O método gravimétrico proposto pela NBR 13278 (ABNT, 2005c) não se mostrou satisfatório para determinação do teor de ar das argamassas com EPS;

- a substituição da areia por EPS, tanto virgem como reciclado, não alterou a capacidade de retenção de água da argamassa;
- os resultados obtidos pelo método *squeeze-flow* mostraram que as argamassas com EPS apresentam maior capacidade de deformação para uma mesma carga aplicada quando comparada à de referência; o tipo de EPS e método de mistura não acarretaram alterações relevantes nesta propriedade;
- os métodos de mistura analisados não exerceram influência significativa nas propriedades das argamassas estudadas no estado fresco; quanto ao tipo de EPS, houve diferença significativa entre eles quando avaliada a densidade de massa e o teor de aditivo necessário para o mesmo índice de consistência;
- no estado endurecido, as argamassas com EPS apresentaram redução do desempenho mecânico: reduções de 71%, 56% e 39% aos 28 dias para a resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão, respectivamente. As argamassas com EPS reciclado apresentaram maior massa específica em relação às com EPS virgem (aumento médio de 15%), o que provocou melhor desempenho mecânico, com acréscimo de 36%, 37% e 9% para a resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão, respectivamente. Tal resultado também é devido à maior aderência mecânica do EPS reciclado provocada pelas características superficiais e morfológicas das partículas;
- o uso de EPS promoveu um aumento de 63% da capacidade de absorção de água da argamassa e 19% do índice de vazios em relação à argamassa de referência. Comparando-se com o EPS virgem, o aumento para as argamassas com EPS reciclado foi de 14% para o índice de vazios, mas a absorção por imersão não apresentou aumento relevante (0,21%);
- o método de mistura B propiciou um aumento de 16% na resistência à compressão e 4% na resistência à tração na flexão, aos 28 dias, em comparação ao método de mistura A. Não houve diferença significativa no que se refere ao módulo de elasticidade;
- as micrografias indicaram áreas com alta porosidade na interface entre as partículas de EPS/ argamassa. Em ambos os tipos de EPS foi constatada a formação de produtos hidratados na superfície e no interior das partículas, porém com ocorrência mais acentuada para o EPS reciclado. Não foi possível observar alterações na zona de transição provocadas pela variação do tipo de mistura ou determinar se o acúmulo de

pasta dentro do agregado de EPS provocou alterações suficientes para afetar as propriedades das argamassas;

- em relação à resistência de aderência à tração, todas as argamassas estudadas atendem os limites mínimos estabelecidos por norma para aplicação como argamassa de revestimento de paredes externas. As argamassas com EPS reciclado, para essa propriedade, são estatisticamente equivalentes à argamassa sem EPS e apresentaram uma resistência de aderência 41% superior às argamassas com EPS virgem, independentemente do tipo de mistura utilizado. Porém, como houve aumento da absorção por imersão e do índice de vazios das argamassas com EPS em relação à argamassa de referência, são necessários estudos de durabilidade e desempenho para determinar se essas argamassas realmente são adequadas para uso em paredes externas;
- o EPS reciclado apresentou características satisfatórias quanto às propriedades das argamassas, apresentando potencial de utilização em substituição ao EPS virgem. Portanto, a aplicação como agregado miúdo, além de ser viável do ponto de vista técnico, contribui para a minimização do impacto ambiental de diversas formas: reduz a demanda por agregado natural, o volume de material destinado a aterros sanitários e agrega valor econômico ao resíduo.

5.1 Sugestões Para Futuras Pesquisas

A partir das conclusões, são sugeridos os seguintes estudos para trabalhos futuros:

- análise da variabilidade de EPS reciclado nas propriedades de argamassas;
- avaliação da distribuição de tamanho de poros das argamassas com uso de EPS;
- uso de tratamentos superficiais para otimização da interface EPS-argamassa;
- análise do comportamento reológico e aderência de argamassas com uso de EPS aplicado em diferentes substratos;
- avaliação da durabilidade de argamassas com uso de EPS reciclado em diferentes condições de exposição.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 213. **Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete**. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014.

AECWEB. **Painéis de EPS para construção: vantagens e desvantagens**. [S.l.]: AECweb, 2020. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/paineis-de-eps-para-construcao-vantagens-e-desvantagens/11168>. Acesso em: 13 out. 2020.

ALVES, C. **Avaliação do comportamento higrotérmico de concretos produzidos com resíduos de borracha de pneu e poliestireno expandido para aplicação em paredes de concreto**. 2020. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.358>. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/29046>. Acesso em: 04 abr. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA. Comissão setorial de EPS. **EPS na construção civil: O que é EPS**. São Paulo: ABIQUIM, 2020. Disponível em: <http://www.epsbrasil.eco.br/eps/index.html>. Acesso em: 05 out. 2020.

_____. Comissão setorial de EPS. **Mercado**. São Paulo: ABIQUIM, 2020b. Disponível em: <http://www.epsbrasil.eco.br/mercado.html>. Acesso em: 05 out. 2020.

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

_____. **ABNT NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **ABNT NBR 13277**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **ABNT NBR 13278**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005c.

_____. **ABNT NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005d.

_____. **ABNT NBR 15259**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005e.

_____. **ABNT NM 45**. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **ABNT NBR 15630**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **ABNT NBR 15839**. Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **ABNT NBR NM 18**. Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **ABNT NBR ISO 12677**. Análise química de produtos refratários por fluorescência de raios X (XRF) — Método do corpo de prova fundido. Rio de Janeiro, 2012.

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

_____. **ABNT NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016a.

_____. **ABNT NBR 16541**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016b.

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

_____. **ABNT NBR 16697**. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018a.

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

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

_____. **ABNT NBR 13528-3**. Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Parte 3: Aderência superficial. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **ABNT NBR 16866**. Poliestireno expandido (EPS) - Determinação das propriedades - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **ABNT NBR 16972**. Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021a.

_____. **ABNT NBR NM 16916**. Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021b.

BABU, D.; BABU, K.; TIONG-HUAN, W. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 28, n. 6, p. 520-527, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946506000497>. Acesso em: 11 fev. 2020.

BABU, D.; BABU, K.; WEE, T. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 35, n. 6, p. 1218-1223, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884605000177>. Acesso em: 11 fev. 2020.

BABU, K.; BABU, D. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 33, n. 5, p. 755-762, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01055-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01055-4). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884602010554>. Acesso em: 11 fev. 2020.

BABU, K.; BABU, D. Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 26, n. 6, p. 605-611, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00034-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946503000349>. Acesso em: 11 fev. 2020.

BALTO, Y. *et al.* Experimental investigation of discarded additive material combination and composition to appropriate thermal insulating properties of the composite cement mortar. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 25, n. 7, p. 1318-1328, 7 jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1577182>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19648189.2019.1577182?journalCode=tece20>. Acesso em: 11 ago. 2021.

BAPTISTA JUNIOR, G. **Placa Cimentícia Com Resíduos de Poliestireno Expandido (EPS): Estudo das Propriedades Físicas e Mecânicas**. 2019. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/handle/10/11292>. Acesso em: 11 fev. 2020.

BOUCHONNEAU, N. *et al.* Análise da absorção de água em dois polímeros expandidos: desenvolvimento do módulo de flutuabilidade de um mini-robô submarino. **Polímeros**, [S.l.], v. 20, n. 3, p. 181-187, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282010005000032>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/y3Whg4QFS3pQsfgzScC3jBH/?lang=pt>. Acesso em: 05 out. 2020.

BRÁS, A; LEAL, M; FARIA, P. Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 49, p. 315-327, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813007368>. Acesso em: 11 fev. 2020.

BROOKS, A.; ZHOU, H; HANNA, D. Comparative study of the mechanical and thermal properties of lightweight cementitious composites. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 159, p. 316-328, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817321566>. Acesso em: 11 fev. 2020.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento**: manual de utilização. São Paulo: Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia da Construção Civil, 2010.

CARVALHO, C.; MOTTA, L. Study about concrete with recycled expanded polystyrene. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 12, n. 6, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000600010>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952019000601390&tlng=en. Acesso em: 11 fev. 2020.

CHEN, B.; FANG, C. Mechanical properties of EPS lightweight concrete. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, [S.l.], v. 164, n. 4, p. 173-180, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1680/coma.900059>. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/coma.900059>. Acesso em: 11 fev. 2020.

CHEN, B.; LIU, J. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 34, n. 7, p. 1259-1263, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884603004381>. Acesso em: 11 fev. 2020.

CHEN, B.; LIU, J.; CHEN, L. Z. Experimental study of lightweight expanded polystyrene aggregate concrete containing silica fume and polypropylene fibers. **Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)**, Xangai, v. 15, p. 129-137, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12204-010-9550-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12204-010-9550-3>. Acesso em: 11 fev. 2020.

CHEN, N. *et al.* Water Retention Mechanism of HPMC in Cement Mortar. **Materials**, [S.l.], v. 13, n. 13, p. 2918, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13132918>. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7372461/>. Acesso em: 14. ago. 2021.

CHOPIN, D.; DE LARRARD, F.; CAZACLIU, B. Why do HPC and SCC require a longer mixing time? **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 34, n. 12, p. 2237-2243, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884604000912>. Acesso em: 11 fev. 2020.

COSTA, E. B. C. *et al.* Squeeze flow of mortars on brick substrate and its relation with bond strength. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 265, p. 120298, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120298>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820323035#!>. Acesso em: 09 ago. 2021.

COSTA, E. B. C.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. Influence of high contents of limestone fines on rheological behaviour and bond strength of cement-based mortars. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 156, p. 1114-1126, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.029>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817318317?via%3Dihub>. Acesso em: 08 ago. 2021.

COSTA, M. **Estudo das propriedades do concreto com substituição de parte do agregado gráudo por agregado reciclado de poliestireno expandido para aplicação em paredes de concreto**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

CUI, C. *et al.* Stress-strain relationship in axial compression for EPS concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 105, p. 377-383, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.159>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815308291>. Acesso em: 11 fev. 2020.

EXPANDED POLYSTYRENE AUSTRALIA INC. **How is EPS made**. Hobart: EPSA, 2014. Disponível em: <http://epsa.org.au/about-eps/what-is-eps/how-is-eps-made/>. Acesso em: 6 mar. 2021.

_____. **EPS Recycling**. Hobart: EPSA, 2014. Disponível em: <http://epsa.org.au/about-eps/eps-recycling/>. Acesso em: 6 mar. 2021.

FABRICATED PACKAGING MATERIALS INC. **How is EPS Manufactured?** Disponível em: <https://www.fpmfoam.com/FPM-how-is-eps-manufactured.html>. Lancaster: Fabricated Packaging Materials, 2020. Acesso em: 4 mar. 2021.

FATHI, M.; YOUSEFIPOUR, A.; HEMATPOURY FAROKHY, E. Mechanical and physical properties of expanded polystyrene structural concretes containing Micro-silica and Nano-silica. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 136, p. 590–597, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.040>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817300545>. Acesso em: 30 jul. 2021.

FERRÁNDIZ-MAS, V. *et al.* Design of bespoke lightweight cement mortars containing waste expanded polystyrene by experimental statistical methods. **Materials and Design**, [S.l.], v. 89, p. 901-912, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.044>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127515306225>. Acesso em: 11 fev. 2020.

FERRÁNDIZ-MAS, V. *et al.* Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 61, p. 285-292, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.028>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814002827>. Acesso em: 11 fev. 2020.

FRANÇA, M. *et al.* Influence of mixing process on mortars rheological behaviour through rotational reometry. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 223, n. 30, p. 81-90, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.213>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819316411>. Acesso em: 11 fev. 2020.

FRANÇA, M.; CARDOSO, F.; PILEGGI, R. Influence of the addition sequence of PVA-fibers and water on mixing and rheological behavior of mortars. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 9, n. 2, p. 226-243, 2016. DOI:

<https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000200005>. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/riem/a/6RXyx7868zYTCXNjnzj6Wmk/?lang=en>. Acesso em: 11 fev. 2020.

FRANÇA, M.; CARDOSO, F.; PILEGGI, R. Avaliação do comportamento de mistura de argamassas através de reometria rotacional. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 165-174, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000200011>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1678-86212012000200011&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 11 fev. 2020.

FRANÇA, M. S. DE; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Influência do procedimento de mistura em laboratório nas propriedades de argamassas. **Ambiente Construído**, [S.l.], v. 13, p. 111-124, jun. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000200009>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/GFfYJrQ4XKQKLkDkgR8YyWm/?lang=pt>. Acesso em: 13 jul. 2021.

GARCIA, E. *et al.* **PS, XPS e EPS para contato com alimentos**. São Paulo: Centro de Tecnologia de Embalagem - CETEA/ITAL, 2017. Disponível em: <http://www.plastivida.org.br/index.php/conhecimento/artigos-e-publicacoes?lang=pt>. Acesso em: 14 ago. 2021.

GARCIA, K. **Determination on the Recyclability of Food-Service Foam**. New York: NYC Department of Sanitation, 2017. Disponível em: https://www1.nyc.gov/assets/dsny/docs/2017-05-12FoamDetermination_FINAL.pdf. Acesso em: 13 out. 2020.

GARSDIE, M. **Global production capacity of expandable polystyrene 2018 & 2023**. Hamburgo: Statista, 2020. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1063653/expandable-polystyrene-production-capacity-globally/>. Acesso em: 05 out. 2020.

GRAND VIEW RESEARCH INC. **Expanded Polystyrene Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (White, Grey), By Application (Construction, Automotive, Packaging), By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027**. São Francisco: Grand View Research, Inc., 2020. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/expanded-polystyrene-eps-market>. Acesso em: 05 out. 2020.

GUL, M. *et al.* Enhancement of Albedo for Solar Energy Gain with Particular Emphasis on Overcast Skies. **Energies**, [S.l.], v. 11, n. 11, p. 2881, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11112881>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/2881>. Acesso em: 21 jul. 2021.

HAWLITSCHKE, G. *et al.* Análise de imagens dinâmica - caracterização da distribuição de tamanho e forma de partículas. **HOLOS**, [S.l.], v. 3, n. 0, p. 22-29, 2015. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2015.1781>. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1781>. Acesso em: 22 jul. 2021.

HERKI, B.; KHATIB, J.; NEGIM, E. Lightweight concrete made from waste polystyrene and fly ash. **World Applied Sciences Journal**, [S.l.], v. 21, n. 9, p. 1356-1360, 2013. DOI:

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.787.131>. Disponível em:
<https://www.scientific.net/AMR.787.131>. Acesso em: 11 fev. 2020.

HERNÁNDEZ-ZARAGOZA, J. B. et al. Cellular Concrete Bricks with Recycled Expanded Polystyrene Aggregate. **Advances in Materials Science and Engineering**, [S.l.], v. 2013, p. e160162, 30 dez. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/160162>. Disponível em:
<https://www.hindawi.com/journals/amse/2013/160162/>. Acesso em: 14 mai. 2021.

JAPAN EXPANDED POLYSTYRENE ASSOCIATION. **JEPSA Country Report 2018**. [S.l.]: JEPSA, 2019. Disponível em: <https://epsrecycling.org/eps-recycling>. Acesso em: 05 out. 2020.

_____. **About EPS: EPS Recycling**. [S.l.]: JEPSA, 2021. Disponível em:
https://www.jepsa.jp/en/eps_recycling.html. Acesso em: 6 mar. 2021.

KAN, A.; DEMIRBOĞA, R. A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. **Journal of Materials Processing Technology**, [S.l.], v. 209, n. 6, p. 2994-3000, 2009b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.017>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013608005645>. Acesso em: 11 fev. 2020.

_____. A novel material for lightweight concrete production. **Cement and Concrete Composites**, [S.l.], v. 31, n. 7, p. 489-495, 2009a. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.002>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946509000808>. Acesso em: 11 fev. 2020.

_____. Effect of cement and EPS beads ratios on compressive strength and density of lightweight concrete. **Indian Journal of Engineering and Materials Sciences**, [S.l.], v. 14, n. 2, p. 158-162, 2007. Disponível em: <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/172>. Acesso em: 11 fev. 2020.

KISKU, N. *et al.* A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v.131, p. 721-740, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816317810>. Acesso em: 11 fev. 2020.

KNAUF INDUSTRIES. **Reciclagem de EPS Isopor®: Tudo o que você precisa saber**. [S.l.]: Mundo Isopor, 2018. Disponível em:
<https://www.mundoisopor.com.br/sustentabilidade/reciclagem-de-eps-isopor-tudo-o-que-voce-precisa-saber>. Acesso em: 6 mar. 2021.

KUMAYAMA, R. *et al.* Estudo da viabilidade do emprego de pó de mármore para produção de concreto auto-adensável e substituição parcial dos agregados por pérolas de poliestireno expandido (EPS). **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [S.l.], v. 10, n. 2, p. 56-71, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5216/reec.v10i2.33117>. Disponível em:
<https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/33117>. Acesso em: 11 fev. 2020.

LAJES ESTEVES. **Painel treliçado com isopor (EPS)**. Guarulhos: Lajes Esteves, 2020. Disponível em: <https://www.lajeseesteves.com.br/pt/produtos/painel-treli%C3%A7ado-com-isopor>. Acesso em: 13 out. 2020.

LAM, T. V. *et al.* Properties and thermal insulation performance of light-weight concrete. **Magazine of Civil Engineering**, [S. l.], v. 84, n. 8, p. 173–191, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.84.17>. Disponível em: <https://engstroy.spbstu.ru/en/article/2018.84.17/>. Acesso em: 11 fev. 2020.

LANZÓN, M. *et al.* Microstructural examination and potential application of rendering mortars made of tire rubber and expanded polystyrene wastes. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 94, p. 817–825, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.086>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815301082>. Acesso em: 11 fev. 2020.

LAUKAITIS, A.; ŽURAUSKAS, R.; KERIENE, J. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 41–47, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.09.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946504000101?via%3Dihub>. Acesso em: 11 fev. 2020.

LE ROY, R.; PARANT, E.; BOULAY, C. Taking into account the inclusions' size in lightweight concrete compressive strength prediction. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 35, n. 4, p. 770–775, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884604002480>. Acesso em: 11 fev. 2020.

LEVIN, E. M.; CLARKE, W. F.; WELLS, L. S. **Plasticity and water retentivity of hydrated limes for structural purposes**. Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards, 1956. DOI: <https://doi.org/10.6028/nbs.bms.146>. Disponível em: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/BMS/nbsbuildingmaterialsstructures146.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2021.

LI, C. *et al.* Effects of viscosity modifying admixture (VMA) on workability and compressive strength of structural EPS concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 175, p. 342–350, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.176>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818309954>. Acesso em: 11 fev. 2020.

LI, W. *et al.* Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 35, p. 1045–1055, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.022>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181200414X?via%3Dihub>. Acesso em: 10 out. 2021.

LIU, J. *et al.* Recent advance of chemical admixtures in concrete. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 124, 2019, art. n° 105834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105834>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884619308385?via%3Dihub>. Acesso em: 11 fev. 2020.

LIU N.; CHEN, B. Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v.68, p. 227-232, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.062>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814006813>. Acesso em: 11 fev. 2020.

MAAROUFI, M. *et al.* Characterization of EPS lightweight concrete microstructure by X-ray tomography with consideration of thermal variations. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 178, p. 339-348, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.142>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818312182>. Acesso em: 11 fev. 2020.

MADANDOUST, R.; RANJBAR, M. M.; MOUSAVI, S.Y. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 125, n. 9, p. 3721-3731, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061811001589>. Acesso em: 11 fev. 2020.

MAZONI, E. **Caracterização física e mecânica de concreto leve com EPS reciclado**. 2019. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/7383>. Acesso em: 11 fev. 2020.

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

METAL BARRIER. **Flutuador de doca flutuante**. [S. l.]: Metal Barrier, 2020. Disponível em: <http://www.metalbarrier.com.br/1-6-floating-dock-floater.html>. Acesso em: 13 out. 2020.

MILED, K.; SAB, K.; LE ROY, R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling. **Mechanics of Materials**, [S.l.], v. 39, n. 3, p. 222-240, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2006.05.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167663606000676>. Acesso em: 11 fev. 2020.

MOHAMMED, H.; ZAIN, M. Experimental application of EPS concrete in the new prototype design of the concrete barrier. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 124, p. 312-342, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.105>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816312065>. Acesso em: 11 fev. 2020.

MORGADO, A. *et al.* Durability of Thermal Renders with Lightweight and Thermal Insulating Aggregates: Regranulated Expanded Cork, Silica Aerogel and Expanded Polystyrene. **Gels**, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 35, jun. 2021. DOI:

<https://doi.org/10.3390/gels7020035>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2310-2861/7/2/35>. Acesso em: 09 ago. 2021.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 5. ed. England: Pearson, 2011.

NEW YORK STATE. **Governor Cuomo Unveils 5th Proposal of 2020 State of the State: Banning the Use of Single-Use Styrofoam Food Containers in New York State**. Albany: The Governor's Press Office, 2019. Disponível em: <https://www.governor.ny.gov/news/governor-cuomo-unveils-5th-proposal-2020-state-state-banning-use-single-use-styrofoam-food>. Acesso em: 05 out. 2020.

NIKBIN, I.; GOLSHEKAN, M. The effect of expanded polystyrene synthetic particles on the fracture parameters, brittleness and mechanical properties of concrete. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, [S.l.], v. 94, p. 160-172, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.02.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167844217304615>. Acesso em: 11 fev. 2020.

OZÓRIO, B. **Concreto leve com pérolas de EPS**: estudo de dosagens e de características mecânicas. 2016. 155 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. DOI: <https://doi.org/10.11606/t.18.2017.tde-07032017-102857>. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-07032017-102857/pt-br.php>. Acesso em: 11 fev. 2020.

PECCE, M. *et al.* Steel–concrete bond behaviour of lightweight concrete with expanded polystyrene (EPS). **Materials and Structures**, [S.l.], v. 48, p. 139-152, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0173-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-013-0173-7>. Acesso em: 11 fev. 2020.

PETRELLA, A.; DI MUNDO, R.; NOTARNICOLA, M. Recycled Expanded Polystyrene as Lightweight Aggregate for Environmentally Sustainable Cement Conglomerates. **Materials**, Basel, Switzerland, v. 13, n. 4, p. E988, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13040988>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32098376/>. Acesso em: 22 jul. 2021.

PINTO, C. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PLASTIVIDA. **Posicionamento sobre o banimento de produtos de EPS em Nova York**. São Paulo: Plastivida, 2015. Disponível em: <http://www.plastivida.org.br/index.php/conhecimento/artigos-e-publicacoes?lang=pt>. Acesso em: 05 out. 2020.

PROVALE. **Caracterização físico-química de filer calcário**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.grupoprovale.com/wp-content/uploads/2020/06/Moldagem.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2021.

QURASHI, M. *et al.* Sustainable design and engineering: A relationship analysis between digital destructive and non-destructive testing process for lightweight concrete. **Processes**, [S.l.], v. 7, n. 11, art. n° 791, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr7110791>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/11/791>. Acesso em: 11 fev. 2020.

RANJBAR, M.; MOUSAVI, S. Strength and durability assessment of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. **Materials and Structures**, [S.l.], v. 48, p. 1001-1011, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0210-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-013-0210-6>. Acesso em: 11 fev. 2020.

REMESAR, J.; VERA, S.; LOPEZ, M. Assessing and understanding the interaction between mechanical and thermal properties in concrete for developing a structural and insulating material. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 132, p. 353-364, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.116>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816318852>. Acesso em: 11 fev. 2020.

RETSCH TECHNOLOGY. **Manual Evaluation Software CAMSIZER® P4**. 0002. ed. Germany: Retsch Technology, 2018.

RUBIO, M. R. **Trends in Recycling of EPS Foam**. Doha: EcoMENA, 2020. Disponível em: <https://www.ecomena.org/recycling-eps-foam/>. Acesso em: 6 mar. 2021.

SABAA, B.; RAVINDRARAJAH, R. Engineering properties of lightweight concrete containing crushed expanded polystyrene waste. In: MATERIALS RESEARCH SOCIETY 1997 FALL MEETING, SYMPOSIUM MM: ADVANCES IN MATERIALS FOR CEMENTITIOUS COMPOSITES, 1997, Boston, USA. **Anais [...]**. Boston: Materials Research Society, 1997. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265916085_Engineering_properties_of_lightweight_concrete_containing_crushed_expanded_polystyrene_waste. Acesso em: 11 fev. 2020.

SADRMOMTAZI, A. *et al.* Properties of multi-strength grade EPS concrete containing silica fume and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 35, p. 211-219, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.049>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061812001262>. Acesso em: 11 fev. 2020.

SADRMOMTAZI, A.; SOBHANI, J.; MIRGOZAR, M. Modeling compressive strength of EPS lightweight concrete using regression, neural network and ANFIS. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 42, p. 205-216, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.016>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813000792>. Acesso em: 11 fev. 2020.

SAYADI, A. *et al.* Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 112, p. 716-724, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.218>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816302756>. Acesso em: 11 fev. 2020.

SCHACKOW, A. *et al.* Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 35, p. 211-219, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.009>. Disponível

em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181400141X>. Acesso em: 11 fev. 2020.

SHI, W. et al. Durability of Modified Expanded Polystyrene Concrete after Dynamic Cyclic Loading. **Shock and Vibration**, [S.l.], v. 2016, art. n° 2391476, 7 p., 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/2391476>. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/sv/2016/2391476/>. Acesso em: 11 fev. 2020.

SOUSA JUNIOR, P. **Efeito da Fibra de Buriti e do Poliestireno Expandido nas Propriedades Mecânicas e na Condutividade Térmica de Argamassas de Revestimento**. 2015. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, São Luís, 2015. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=3592525. Acesso em: 11 fev. 2020.

TAM, V.; GAO, X.; TAM, C. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 35, n. 6, p. 1195–1203, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884604004788>. Acesso em: 26 mar. 2021.

TAM, V.; TAM, C. M. Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. **Journal of Materials Science**, [S. l.], v. 42, n. 10, p. 3592–3602, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0379-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-006-0379-y>. Acesso em: 10 out. 2021.

TANG VAN, L. et al. “Combined Effects of Bottom Ash and Expanded Polystyrene on Light-weight Concrete Properties”, In: MATEC WEB OF CONFERENCES - VI INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE “INTEGRATION, PARTNERSHIP AND INNOVATION IN CONSTRUCTION SCIENCE AND EDUCATION” (IPICSE-2018), 2018, [S.l.]. **Anais [...]**. [S.l.]: MATEC Web of Conferences, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825101007>. Disponível em https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/110/mateconf_ipicse2018_01007/mateconf_ipicse2018_01007.html. Acesso em: 11 fev. 2020.

TITTARELLI, F. et al. Effect of Using Recycled Instead of Virgin EPS in Lightweight Mortars. **Procedia Engineering**, [S.l.], v. 161, p. 660-665, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.728>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816329575?via%3Dihub>. Acesso em: 11 fev. 2020.

TORRES, M.; GARCÍA-RUIZ, P. Lightweight pozzolanic materials used in mortars: Evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption. **Cement and Concrete Composites**, [S.l.], v. 31, n. 2, p. 114-119, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.11.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095894650800139X>. Acesso em: 11 fev. 2020.

TRISTÃO, F. A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. 234 f. 2005. Tese (Doutorado) - Centro Tecnológico,

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/102089>. Acesso em: 11 ago. 2021.

TRUSSONI, M.; HAYS, C.; ZOLLO, R. Comparing lightweight polystyrene concrete using engineered or waste materials. **ACI Materials Journal**, [S.l.], v. 109, n. 1, p. 101-107, 2012. DOI: <https://doi.org/10.14359/51683575>. Disponível em: <https://miami.pure.elsevier.com/en/publications/comparing-lightweight-polystyrene-concrete-using-engineered-or-wa>. Acesso em: 11 fev. 2020.

TRUSSONI, M.; HAYS, C. D.; ZOLLO, R. F. Fracture Properties of Concrete Containing Expanded Polystyrene Aggregate Replacement. **ACI Materials Journal**, [S.l.], v. 110, n. 5, p. 549–557, 2013. DOI: <https://doi.org/10.14359/51685906>. Disponível em: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=51685906>. Acesso em: 18 ago. 2021.

UNEP, 2019. **Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources**. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/28163>. Acesso em: 8 ago. 2021.

VAZ, F.; CARASEK, H. Bond strength of renderings - contribution through mapping and systematic literature review for future research on the subject. **Cerâmica**, [S.l.], n. 65, p. 303-318, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653742508>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/TG5Tthbng3SW86DL6S7GkFm/abstract/?lang=en>. Acesso em: 23 ago. 2021.

WOLFF, P. **Resistência, densidade e desempenho termo-acústico do concreto com espuma de poliestireno expandido (EPS) aplicado às construções**. 2008. 137 f. - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2008. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/handle/tede/2754>. Acesso em: 11 fev. 2020.

XU, Y. *et al.* Experimental study and modeling on effective thermal conductivity of EPS lightweight concrete. **Journal of Thermal Science and Technology**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. JTST0023–JTST0023, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1299/jtst.2016jtst0023>. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jtst/11/2/11_2016jtst0023/_article/-char/en. Acesso em: 23 ago. 2021.

XU, Y. *et al.* Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 27, n. 1, p. 32-38, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.030>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061811004636>. Acesso em: 11 fev. 2020.

YANG, M.; JENNINGS, H. Influences of mixing methods on the microstructure and rheological behavior of cement paste. **Advanced Cement Based Materials**, [S.l.] v. 2, n. 2, p. 70-78, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/1065-7355\(95\)90027-6](https://doi.org/10.1016/1065-7355(95)90027-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/1065735595900276>. Acesso em: 11 fev. 2020.

YOON, J. *et al.* Lightweight concrete produced using a two-stage casting process. **Materials**, [S.l.], v. 8, n. 4, p. 1384-1397, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma8041384>. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5507045/>. Acesso em: 11 fev. 2020.

ZHANG, J; SCHERER, G. Comparison of methods for arresting hydration of cement. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 41, n. 10, p. 1024-1036, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884611001645>. Acesso em: 11 out. 2020.

ZHAO, X., TIAN, W., JIANG, X. *et al.* Effects of vibration technology and polyvinyl acetate emulsion on microstructure and properties of expanded polystyrene lightweight concrete. **Transactions of Tianjin University**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 145–149, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12209-009-0026-1>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12209-009-0026-1>. Acesso em: 8 mar. 2021.

ZHOU, J. *et al.* Improved fiber distribution and mechanical properties of engineered cementitious composites by adjusting the mixing sequence. **Cement and Concrete Composites**, [S.l.], v. 34, n. 3, p. 342-348, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.019>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946511002204>. Acesso em: 11 fev. 2020.

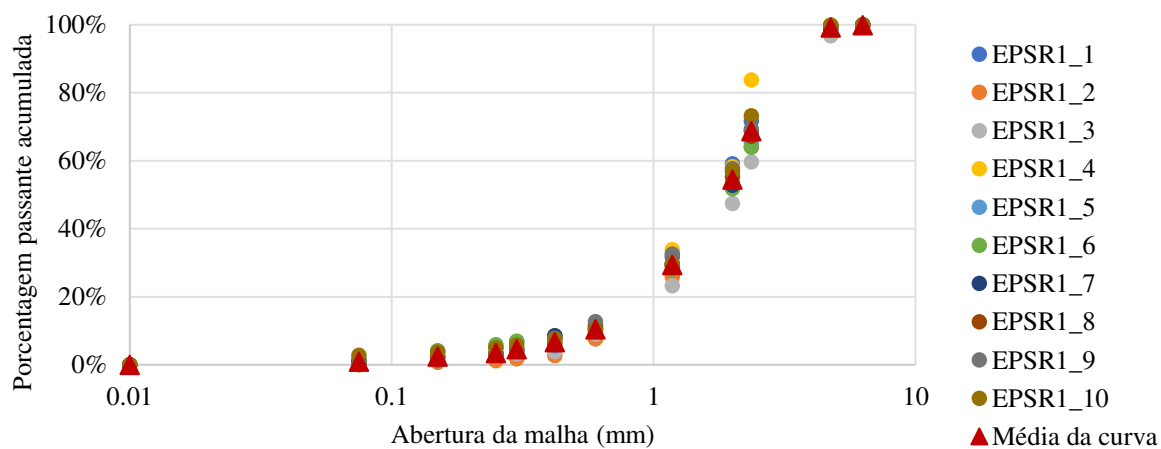
APÊNDICE A – DETALHAMENTO DA GRANULOMETRIA

Tabela A.1 – Desvio padrão entre as curvas granulométricas para diferentes tempos de trituração do EPS reciclado para o lote R1

Abertura da malha (mm)	Tempo de trituração			Desvio padrão	
	3 min	4,5 min	6 min	3-4,5 min	4,5-6 min
6,3	1,00	1,00	1,00	0,21%	0,03%
4,75	0,97	0,99	0,99	0,63%	0,24%
2,36	0,47	0,64	0,68	8,64%	2,08%
2,00	0,33	0,48	0,54	7,62%	2,91%
1,18	0,17	0,22	0,29	2,58%	3,45%
0,60	0,06	0,07	0,10	0,54%	1,64%
0,42	0,04	0,04	0,06	0,25%	1,16%
0,30	0,02	0,03	0,05	0,38%	0,72%
0,25	0,02	0,02	0,03	0,26%	0,58%
0,15	0,01	0,02	0,02	0,34%	0,34%
0,075	0,00	0,01	0,01	0,13%	0,12%
Fundo	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%

Fonte: A autora.

Figura A.1 – Curvas granulométricas para diferentes amostras de trituração do EPS reciclado para o lote R1



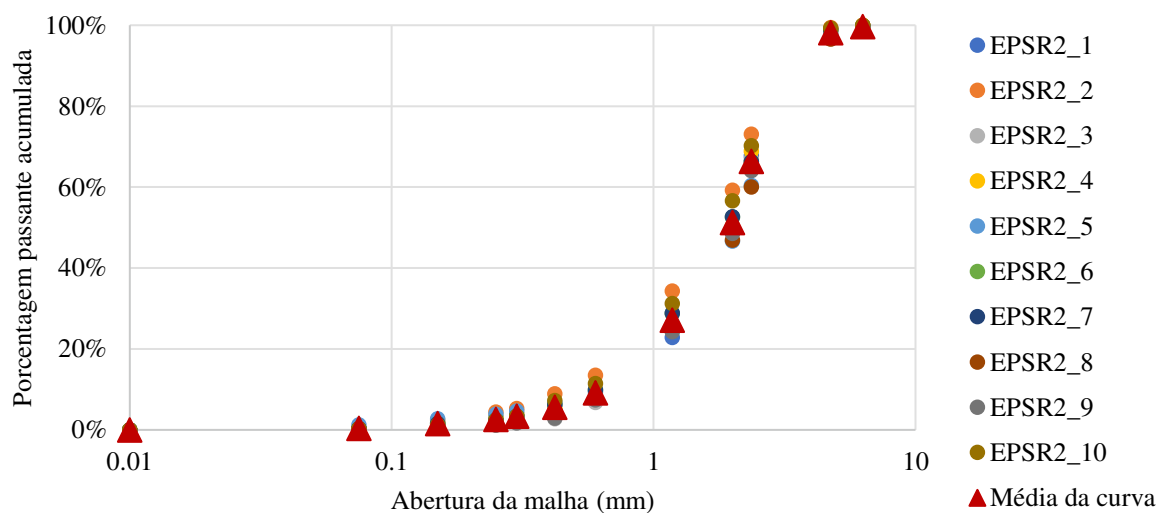
Fonte: A autora.

Tabela A.2 – Desvio padrão entre as curvas granulométricas para diferentes tempos de trituração do EPS reciclado para o lote R2

Abertura da malha (mm)	Tempo de trituração			Desvio padrão	
	1,5 min	3 min	4,5 min	1,5-3 min	3-4,5 min
6,3	0,97	0,99	1,00	1,08%	0,32%
4,75	0,93	0,98	1,00	2,32%	1,01%
2,36	0,50	0,69	0,66	9,34%	1,55%
2,00	0,39	0,56	0,53	8,59%	1,51%
1,18	0,18	0,30	0,22	6,31%	3,84%
0,60	0,05	0,11	0,08	3,22%	1,72%
0,42	0,03	0,07	0,05	1,96%	1,13%
0,30	0,02	0,05	0,04	1,44%	0,22%
0,25	0,01	0,03	0,04	1,11%	0,35%
0,15	0,00	0,02	0,03	0,77%	0,72%
0,075	0,00	0,00	0,01	0,00%	0,37%
Fundo	0,00	0,00	0,00	0,00%	0,00%

Fonte: A autora.

Figura A.2 – Curvas granulométricas para diferentes amostras de trituração do EPS reciclado para o lote R2



Fonte: A autora.

Tabela A.3 – Desvio padrão entre as curvas granulométricas finais de EPS virgem e EPS reciclado

Abertura da malha (mm)	Tipo de EPS		Desvio padrão
	EPS virgem	EPS reciclado	
6,3	100,00%	99,77%	0,11%
4,75	99,93%	98,70%	0,62%
2,36	59,06%	67,54%	4,24%
2,00	47,77%	52,82%	2,52%
1,18	37,16%	28,18%	4,49%
0,60	3,13%	9,81%	3,34%
0,42	0,30%	6,10%	2,90%
0,30	0,02%	3,94%	1,96%
0,25	0,00%	3,03%	1,51%
0,15	0,00%	1,98%	0,99%
0,075	0,00%	0,64%	0,32%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%

APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela B.1 – Análise de variância²⁶ do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura no teor de aditivo para a mesma faixa do índice de consistência

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	0,444444	0,444444	98,37073	0,000000
Tipo de EPS	1	0,360000	0,360000	79,68030	0,000000
Tipo de mistura	1	0,000178	0,000178	0,03935	0,844015
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	0,000400	0,000400	0,08853	0,767973
Erro	32	0,144578	0,004518		
Total	35	0,505156			

Tabela B.2 – Grupos homogêneos para o teor de aditivo

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1	Grupo 2
VMA	virgem	A	0,010000	****	
VMB	virgem	B	0,012222	****	
RMA	reciclado	A	0,216667		****
RMB	reciclado	B	0,205556		****

Tabela B.3 – Diferenças significativas para o teor de aditivo

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	0,010000	0,012222	0,216667	0,205556
VMA	virgem	A		0,944608	0,000055	0,000062
VMB	virgem	B	0,944608		0,000062	0,000135
RMA	reciclado	A	0,000055	0,000062		0,728270
RMB	reciclado	B	0,000062	0,000135	0,728270	
Erro: Entre MQ = 0,00452, GL = 32,0000						

²⁶ Nas tabelas desse apêndice, Constante = valor do modelo quando todos os fatores são iguais a zero (parâmetro do *software* Statistica). GL = graus de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; p = nível de significância a 5%; se o valor de p está na cor vermelha, o efeito é estatisticamente significativo. Grupos homogêneos são formados pela repetição dos asteriscos em linhas e/ou colunas. Esses grupos e as diferenças significativas entre eles foram determinados pelo teste de Duncan para o nível de significância de 5%.

Tabela B.4 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura na massa específica no estado fresco

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	29214005	29214005	95460,29	0,000000
Tipo de EPS	1	132545	132545	433,11	0,000000
Tipo de mistura	1	180	180	0,59	0,464986
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	67	67	0,22	0,651546
Erro	8	2448	306		
Total	11	135241			

Tabela B.5 – Grupos homogêneos para a massa específica no estado fresco

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1	Grupo 2
VMA	virgem	A	1453,69	****	
VMB	virgem	B	1458,36	****	
RMA	reciclado	A	1659,14		****
RMB	reciclado	B	1671,63		****

Tabela B.6 – Diferenças significativas para a massa específica no estado fresco

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	1453,7	1458,4	1659,1	1671,6
VMA	virgem	A		0,838417	0,000100	0,000077
VMB	virgem	B	0,838417		0,000223	0,000100
RMA	reciclado	A	0,000100	0,000223		0,407689
RMB	reciclado	B	0,000077	0,000100	0,407689	

Erro: Entre MQ = 306,03, GL = 8,0000

Tabela B.7 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura na retenção de água

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	101261,5	101261,5	34781,32	0,000000
Tipo de EPS	1	0,7	0,7	0,24	0,636272
Tipo de mistura	1	4,7	4,7	1,63	0,237433
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	8,5	8,5	2,93	0,125447
Erro	8	23,3	2,9		
Total	11	37,3			

Tabela B.8 – Grupos homogêneos para a retenção de água

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1
VMA	virgem	A	90,63	****
VMB	virgem	B	93,58	****
RMA	reciclado	A	91,83	****
RMB	reciclado	B	91,41	****

Tabela B.9 – Diferenças significativas para a retenção de água

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	90,631	93,575	91,833	91,405
VMA	virgem	A		0,082599	0,432013	0,593973
VMB	virgem	B	0,082599		0,246605	0,173596
RMA	reciclado	A	0,432013	0,246605		0,766910
RMB	reciclado	B	0,593973	0,173596	0,766910	

Erro: Entre MQ = 2,9114, GL = 8,0000

Tabela B.10 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura na carga *squeeze-flow*

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	365586,9	365586,9	160,8279	0,000001
Tipo de EPS	1	1867,8	1867,8	0,8217	0,391174
Tipo de mistura	1	1500,0	1500,0	0,6599	0,440103
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	2460,7	2460,7	1,0825	0,328561
Erro	8	18185,3	2273,2		
Total	11	24013,7			

Tabela B.11 – Grupos homogêneos para a carga *squeeze-flow*

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1
VMA	virgem	A	130,2509	****
VMB	virgem	B	173,0508	****
RMA	reciclado	A	177,9206	****
RMB	reciclado	B	185,0434	****

Tabela B.12 – Diferenças significativas para a carga *squeeze-flow*

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	130,251	173,051	177,921	185,0434
VMA	virgem	A		0,244363	0,926998	0,948667
VMB	virgem	B	0,244363		0,259026	0,231238
RMA	reciclado	A	0,926998	0,259026		0,881204
RMB	reciclado	B	0,948667	0,231238	0,881204	

Erro: Entre MQ = 2273,20, GL = 8,0000

Tabela B.13 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura na resistência à compressão aos 3 dias

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	519,0562	519,0562	684,3453	0,000000
Tipo de EPS	1	22,4136	22,4136	29,5511	0,000286
Tipo de mistura	1	1,0337	1,0337	1,3629	0,270115
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	0,4698	0,4698	0,6194	0,449516
Erro	8	7,5847	0,7585		
Total	11	33,3943			

Tabela B.14 – Grupos homogêneos para a resistência à compressão aos 3 dias

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1	Grupo 2
VMA	virgem	A	4,414020	****	
VMB	virgem	B	5,333286	****	
RMA	reciclado	A	7,341007		****
RMB	reciclado	B	7,519931		****

Tabela B.15 – Diferenças significativas para a resistência à compressão aos 3 dias

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	4,414020	5,333286	7,341007	7,519931
VMA	virgem	A		0,197203	0,001805	0,001408
VMB	virgem	B	0,197203		0,013092	0,010322
RMA	reciclado	A	0,001805	0,013092		0,793543
RMB	reciclado	B	0,001408	0,010322	0,793543	

Erro: Entre MQ = 0,75847, GL = 10,0000

Tabela B.16 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura no módulo de elasticidade dinâmico aos 3 dias

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	1995,162	1995,162	24296,70	0,000000
Tipo de EPS	1	16,329	16,329	198,85	0,000000
Tipo de mistura	1	0,001	0,001	0,01	0,928473
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	0,211	0,211	2,57	0,139659
Erro	8	0,821	0,082		
Total	11	17,733			

Tabela B.17 – Grupos homogêneos para o módulo de elasticidade dinâmico aos 3 dias

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1	Grupo 2
VMA	virgem	A	10,85333	****	
VMB	virgem	B	11,08741	****	
RMA	reciclado	A	13,02140		****
RMB	reciclado	B	13,28398		****

Tabela B.18 – Diferenças significativas para o módulo de elasticidade dinâmico aos 3 dias

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	10,85333	11,08741	13,02140	13,28398
VMA	virgem	A		0,310091	0,000188	0,000100
VMB	virgem	B	0,310091		0,000100	0,000068
RMA	reciclado	A	0,000188	0,000100		0,258047
RMB	reciclado	B	0,000100	0,000068	0,258047	

Erro: Entre MQ = 0,08212, GL = 10,0000

Tabela B.19 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura na resistência à compressão aos 7 dias

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	789,6370	789,6370	2380,438	0,000000
Tipo de EPS	1	19,3684	19,3684	58,388	0,000018
Tipo de mistura	1	1,3022	1,3022	3,926	0,075709
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	1,5369	1,5369	4,633	0,056827
Erro	8	3,3172	0,3317		
Total	11	27,4201			

Tabela B.20 – Grupos homogêneos para a resistência à compressão aos 7 dias

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
VMA	virgem	A	6,372981	****		
VMB	virgem	B	6,426224	****		
RMA	reciclado	A	8,133488		****	
RMB	reciclado	B	9,419295			****

Tabela B.21 – Diferenças significativas para a resistência à compressão aos 7 dias

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	6,372981	6,426224	8,133488	9,419295
VMA	virgem	A		0,906194	0,003206	0,000152
VMB	virgem	B	0,906194		0,003303	0,000123
RMA	reciclado	A	0,003206	0,003303		0,015384
RMB	reciclado	B	0,000152	0,000123	0,015384	

Erro: Entre MQ = 0,33172, GL = 10,0000

Tabela B.22 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura no módulo de elasticidade dinâmico aos 7 dias

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	2410,702	2410,702	20359,03	0,000000
Tipo de EPS	1	23,720	23,720	200,32	0,000000
Tipo de mistura	1	1,588	1,588	13,41	0,004371
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	0,684	0,684	5,77	0,037120
Erro	8	1,184	0,118		
Total	11	29,494			

Tabela B.23 – Grupos homogêneos para o módulo de elasticidade dinâmico aos 7 dias

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
VMA	virgem	A	11,37948		****	
VMB	virgem	B	12,50669			****
RMA	reciclado	A	14,45633	****		
RMB	reciclado	B	14,69037	****		

Tabela B.24 – Diferenças significativas para o módulo de elasticidade dinâmico aos 7 dias

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	11,37948	12,50669	14,45633	14,69037
VMA	virgem	A		0,001732	0,000100	0,000068
VMB	virgem	B	0,001732		0,000200	0,000106
RMA	reciclado	A	0,000100	0,000200		0,394290
RMB	reciclado	B	0,000068	0,000106	0,394290	

Erro: Entre MQ = 0,11841, GL = 10,0000

Tabela B.25 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura na resistência à compressão aos 28 dias

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	915,8631	915,8631	3773,259	0,000000
Tipo de EPS	1	19,8173	19,8173	81,645	0,000004
Tipo de mistura	1	5,2942	5,2942	21,811	0,000880
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	4,6157	4,6157	19,016	0,001419
Erro	8	2,4272	0,2427		
Total	11	35,6650			

Tabela B.26 – Grupos homogêneos para a resistência à compressão aos 28 dias

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
VMA	virgem	A	6,92874	****		
VMB	virgem	B	7,01110	****		
RMA	reciclado	A	8,17264		****	
RMB	reciclado	B	10,57555			****

Tabela B.27 – Diferenças significativas para a resistência à compressão aos 28 dias

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	6,92874	7,01110	8,17264	10,57555
VMA	virgem	A		0,831295	0,010018	0,000069
VMB	virgem	B	0,831295		0,011654	0,000101
RMA	reciclado	A	0,010018	0,011654		0,000248
RMB	reciclado	B	0,000069	0,000101	0,000248	

Erro: Entre MQ = 0,24272, GL = 10,0000

Tabela B.28 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura no módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	3168,422	3168,422	977,9684	0,000000
Tipo de EPS	1	80,318	80,318	24,7910	0,000554
Tipo de mistura	1	2,677	2,677	0,8263	0,384733
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	12,586	12,586	3,8847	0,077022
Erro	8	32,398	3,240		
Total	11	125,431			

Tabela B.29 – Grupos homogêneos para o módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
VMA	virgem	A	12,26352	****		
VMB	virgem	B	13,29582	****	****	
RMA	reciclado	A	16,21994		****	****
RMB	reciclado	B	19,01949			****

Tabela B.30 – Diferenças significativas para o módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	12,26352	13,29582	16,21994	19,01949
VMA	virgem	A		0,470197	0,000996	0,020248
VMB	virgem	B	0,470197		0,002569	0,059470
RMA	reciclado	A	0,000996	0,002569		0,069211
RMB	reciclado	B	0,020248	0,059470	0,069211	

Erro: Entre MQ = 3,2398, GL = 10,0000

Tabela B.31 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura na resistência à tração na flexão aos 28 dias

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	112,7623	112,7623	11433,25	0,000000
Tipo de EPS	1	0,1914	0,1914	19,41	0,001324
Tipo de mistura	1	0,0528	0,0528	5,35	0,043281
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	0,3740	0,3740	37,92	0,000107
Erro	8	0,0986	0,0099		
Total	11	0,7512			

Tabela B.32 – Grupos homogêneos para a resistência à tração na flexão aos 28 dias

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
VMA	virgem	A	2,646202	****		
VMB	virgem	B	2,758417	****	****	
RMA	reciclado	A	2,852417		****	
RMB	reciclado	B	3,212751			****

Tabela B.33 – Diferenças significativas para a resistência à tração na flexão aos 28 dias

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	2,646202	2,758417	2,852417	3,212751
VMA	virgem	A		0,026351	0,243678	0,000928
VMB	virgem	B	0,026351		0,169981	0,000093
RMA	reciclado	A	0,243678	0,169981		0,000262
RMB	reciclado	B	0,000928	0,000093	0,000262	

Erro: Entre MQ = 0,00986, GL = 10,0000

Tabela B.34 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura na absorção por imersão aos 28 dias

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	0,099681	0,099681	76053,59	0,000000
Tipo de EPS	1	0,000000	0,000000	0,35	0,568593
Tipo de mistura	1	0,000096	0,000096	72,98	0,000013
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	0,000010	0,000010	7,47	0,023095
Erro	9	0,000012	0,000001		
Total	12	0,000122			

Tabela B.35 – Grupos homogêneos para a absorção por imersão aos 28 dias

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
VMA	virgem	A	0,084450		****	
VMB	virgem	B	0,086578			****
RMA	reciclado	A	0,090296	****		
RMB	reciclado	B	0,091666	****		

Tabela B.36 – Diferenças significativas para a absorção por imersão aos 28 dias

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	0,084450	0,086578	0,090296	0,091666
VMA	virgem	A		0,002796	0,043374	0,000496
VMB	virgem	B	0,002796		0,000237	0,164388
RMA	reciclado	A	0,043374	0,000237		0,000100
RMB	reciclado	B	0,000496	0,164388	0,000100	

Erro: Entre MQ = 0,00000, GL = 9,0000

Tabela B.40 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura na massa específica saturada aos 28 dias

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	33699306	33699306	1242095	0,000000
Tipo de EPS	1	163816	163816	6038	0,000000
Tipo de mistura	1	610	610	22	0,001057
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	357	357	13	0,005510
Erro	9	244	27		
Total	12	164134			

Tabela B.41 – Grupos homogêneos para a massa específica saturada aos 28 dias

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
VMA	virgem	A	1507,827	****		
VMB	virgem	B	1511,071	****		
RMA	reciclado	A	1723,523		****	
RMB	reciclado	B	1747,890			****

Tabela B.42 – Diferenças significativas para a massa específica saturada aos 28 dias

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	1507,827	1511,071	1723,523	1747,890
VMA	virgem	A		0,451211	0,000092	0,000210
VMB	virgem	B	0,451211		0,000070	0,000092
RMA	reciclado	A	0,000092	0,000070		0,000399
RMB	reciclado	B	0,000210	0,000092	0,000399	

Erro: Entre MQ = 27,131, GL = 9,0000

Tabela B.43 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura na massa específica seca aos 28 dias

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	31057102	31057102	745742,7	0,000000
Tipo de EPS	1	376178	376178	9032,8	0,000000
Tipo de mistura	1	40435	40435	970,9	0,000000
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	47065	47065	1130,1	0,000000
Erro	9	375	42		
Total	12	511783			

Tabela B.44 – Grupos homogêneos para a massa específica seca aos 28 dias

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
VMA	virgem	A	1381,805	****		
VMB	virgem	B	1390,671	****		
RMA	reciclado	A	1612,260		****	
RMB	reciclado	B	1845,945			****

Tabela B.45 – Diferenças significativas para a massa específica seca aos 28 dias

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	1381,805	1390,671	1612,260	1845,945
VMA	virgem	A		0,116415	0,000210	0,000092
VMB	virgem	B	0,116415		0,000092	0,000070
RMA	reciclado	A	0,000210	0,000092		0,000210
RMB	reciclado	B	0,000092	0,000070	0,000210	

Erro: Entre MQ = 27,131, GL = 9,0000

Tabela B.46 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura na massa específica real aos 28 dias

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	37818436	37818436	1431564	0,000000
Tipo de EPS	1	239218	239218	9055	0,000000
Tipo de mistura	1	372	372	14	0,004553
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	232	232	9	0,015822
Erro	9	238	26		
Total	12	239973			

Tabela B.47 – Grupos homogêneos para a massa específica real aos 28 dias

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
VMA	virgem	A	1581,050	****		
VMB	virgem	B	1583,305	****		
RMA	reciclado	A	1845,945		****	
RMB	reciclado	B	1865,240			****

Tabela B.48 – Diferenças significativas para a massa específica real aos 28 dias

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	1581,050	1583,305	1845,945	1865,240
VMA	virgem	A		0,592539	0,000092	0,000210
VMB	virgem	B	0,592539		0,000070	0,000092
RMA	reciclado	A	0,000092	0,000070		0,001198
RMB	reciclado	B	0,000210	0,000092	0,001198	

Erro: Entre MQ = 26,418, GL = 9,0000

Tabela B.49 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura na absorção por capilaridade aos 28 dias

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	0,000006	0,000006	166,8945	0,000000
Tipo de EPS	1	0,000000	0,000000	0,1101	0,747596
Tipo de mistura	1	0,000000	0,000000	3,2321	0,105758
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	0,000000	0,000000	0,2009	0,664593
Erro	9	0,000000	0,000000		
Total	12	0,000000			

Tabela B.50 – Grupos homogêneos para a absorção por capilaridade aos 28 dias

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1
VMA	virgem	A	0,000541	****
VMB	virgem	B	0,000623	****
RMA	reciclado	A	0,000764	****
RMB	reciclado	B	0,000776	****

Tabela B.51 – Diferenças significativas para a absorção por capilaridade aos 28 dias

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	0,000541	0,000623	0,000764	0,000776
VMA	virgem	A		0,171297	0,594811	0,183506
VMB	virgem	B	0,171297		0,347322	0,936340
RMA	reciclado	A	0,594811	0,347322		0,365034
RMB	reciclado	B	0,183506	0,936340	0,365034	
Erro: Entre MQ = 26,418, GL = 9,0000						

Tabela B.49 – Análise de variância do efeito da variação dos tipos de EPS e mistura na resistência de aderência à tração aos 28 dias

	GL	SQ	MQ	F	p
Constante	1	12,57216	12,57216	634,6821	0,000000
Tipo de EPS	1	0,30841	0,30841	15,5694	0,000178
Tipo de mistura	1	0,00072	0,00072	0,0364	0,849112
Tipo de EPS×Tipo de mistura	1	0,00017	0,00017	0,0086	0,926248
Erro	75	1,48564	0,01981		
Total	78	1,79570			

Tabela B.50 – Grupos homogêneos para a resistência de aderência à tração aos 28 dias

Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	Média	Grupo 1	Grupo 2
VMA	virgem	A	0,336539	****	
VMB	virgem	B	0,339659	****	
RMA	reciclado	A	0,459160		****
RMB	reciclado	B	0,468191		****

Tabela B.51 – Diferenças significativas para a resistência de aderência à tração aos 28 dias

			VMA	VMB	RMA	RMB
Argamassa	Tipo de EPS	Tipo de mistura	0,336539	0,339659	0,459160	0,468191
VMA	virgem	A		0,945005	0,010911	0,007786
VMB	virgem	B	0,945005		0,009794	0,007666
RMA	reciclado	A	0,010911	0,009794		0,841612
RMB	reciclado	B	0,007786	0,007666	0,841612	

Erro: Entre MQ = 0,01981, GL = 75,0000