



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



GABRIEL PANDOLFI SPINI

**EFEITO DO MÉTODO DE MISTURA NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS
COM POLIESTIRENO EXPANDIDO**

Uberlândia

2021

GABRIEL PANDOLFI SPINI

**EFEITO DO MÉTODO DE MISTURA NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS
COM POLIESTIRENO EXPANDIDO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Eliane Betânia Carvalho Costa

Uberlândia

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, meus pais (Leonardo e Márcia) e meu irmão (Matheus) por todo o suporte durante o período na universidade e por sempre me ajudarem com o possível.

A todos os professores da Faculdade de Engenharia Civil e de outros departamentos da UFU com quem tive o privilégio de aprender durante a graduação, em especial a professora Eliane que me orientou neste trabalho e sempre se dispôs a me auxiliar quando necessário.

A Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio e disponibilização da estrutura dos laboratórios e equipamentos para realização da pesquisa.

Ao técnico do laboratório de materiais e construção civil Wanderly Geraldo da Silva e à técnica do laboratório de estruturas Cristiane Pires, da UFU pela ajuda na execução dos ensaios.

A minha colega de pesquisa e aluna do mestrado, Laís, por todo o auxílio ao longo da pesquisa, cuja ajuda foi essencial para finalizar esse trabalho.

A todos os meus amigos e amigas que fiz durante o período de faculdade e com quem compartilhei os momentos de felicidade e de adversidade.

RESUMO

Nas últimas décadas, conceitos como a gestão e eficiência energética são extremamente importantes no setor da construção civil. É evidente que a utilização de materiais e técnicas mais sustentáveis são cada vez mais necessárias em um mundo que produz cada vez mais resíduos. O poliestireno expandido (EPS), é amplamente conhecido e utilizado no setor da construção civil devido a suas propriedades como, baixa densidade, baixa condutibilidade térmica, alta capacidade de absorver deformações e versatilidade. No entanto, muitas vezes, o EPS descartado de maneira inadequada torna-se um problema ambiental. Isso, pois ocupa muito espaço tanto em lixões como em aterros e tem todo um potencial de reaproveitamento desperdiçado. Nesse contexto, esse estudo tem como objetivo analisar a influência do método de mistura nas propriedades de argamassas com EPS. Para isso, foram propostos dois modelos de mistura que alternam a ordem de adição dos materiais de argamassas onde 50% do volume dos agregados miúdos são substituídos por partículas de EPS virgem e reciclados. O processo de mistura em compósitos cimentícios tem papel fundamental para determinar o desempenho destes. Com isso em vista, a análise da influência dos dois processos de mistura propostos nas propriedades das argamassas com EPS, é o objetivo central neste trabalho. O índice de consistência foi mantido constante em todos os traços ajustando-se a dosagem de aditivo superplastificante. A análise realizada comparou argamassas com os dois tipos de EPS e dois métodos de mistura quanto a suas propriedades físicas e mecânicas. Foram realizados ensaios para verificar a consistência, densidade e retenção de água no estado fresco. Aos 28 dias, foram feitos ensaios à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, à tração na flexão, massa específica e índice de vazios. Os métodos de mistura se provaram eficazes contra os problemas de segregação e exerceram pouca influência nas propriedades avaliadas em relação ao tipo de EPS. De modo geral, argamassas com EPS reciclado apresentaram melhor desempenho em relação às pérolas virgens. Argamassas com poliestireno expandido apresentaram maior capacidade de absorver deformações, mas não foi possível perceber influência do tipo de mistura quanto à retenção de água, módulo de elasticidade e índice de vazios. Os resultados demonstraram que as argamassas com EPS perdem desempenho mecânico em relação à referência, mas ainda apresentam propriedades adequadas para serem empregadas em revestimento de paredes.

Palavras-chave: EPS. Resíduo. Reciclagem. Argamassa. Mistura. Sustentabilidade.

ABSTRACT

In recent decades, concepts such as energy management and efficiency are extremely important in construction building field. It is evident that the use of more sustainable materials and techniques are increasingly necessary in a world that produces more and more waste. Expanded polystyrene (EPS) is widely known and used in the construction industry due to its properties such as low density, low thermal conductivity, high capacity to absorb deformations and versatility. However, inappropriately discarded EPS often becomes an environmental problem. This is because it takes up a lot of space in both dumps and landfills and has a potential for wasted reuse. In this context, this study aims to analyze the influence of the mixing method on the properties of mortars with EPS. For this, two mixing models were proposed that alternate the addition order of mortar materials where 50% of the volume of fine aggregates are replaced by virgin and recycled EPS particles. The mixing process in cementitious composites plays a fundamental role in determining their performance. With this in mind, the analysis of the influence of the two proposed mixing processes on the properties of mortars with EPS is the main objective of this work. The consistency was kept constant for all mixtures by adjusting the dosage of superplasticizer additive. The analysis performed compared mortars with two types of EPS and two mixing methods regarding their physical and mechanical properties. Tests were carried out to verify consistency, density and water retention in the fresh state. At 28 days, tests were carried out on compression, dynamic modulus of elasticity, bending tension, specific mass and void index. The mixing methods proved to be effective against segregation problems and had little influence on the properties evaluated in relation to the type of EPS. In general, mortars with recycled EPS performed better than virgin pearls ones. Mortars with expanded polystyrene showed greater capacity to absorb deformations, but it was not possible to see the influence of the type of mixture on water retention, modulus of elasticity and void ratio. The results showed that mortars with EPS lose mechanical performance in relation to the reference, but still have adequate properties to be used in coating walls and ceilings, mainly.

Keywords: EPS. Waste. Recycling. Mortar. Mixture. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais alternativas para reaproveitamento de resíduos de EPS.....	15
Figura 2 – Distribuição de pérolas de EPS de matrizes com diferentes densidades de empacotamento (a) 0,3; (b) 0,4 e (c) 0,7.....	20
Figura 3 – Imagens da zona de transição entre agregado e pasta	21
Figura 4 – Estados de granulação resultante das interações líquido e sólido.....	23
Figura 5 – Esquema das etapas de granulação	24
Figura 6 – Evolução da hidratação de partículas e aglomerados ao longo do tempo: (a) e (b) 20 minutos de idade; (c) e (d) após 5 horas.	26
Figura 7 – Distribuição granulométrica das areias estudadas.....	30
Figuras 8 – Tipos de EPS virgem utilizados: (a) Pérola (P); (b) Micropérola (MP).....	31
Figura 9 – Amostras dos lotes de EPS reciclado utilizados: (a) REC1; (b) REC2.....	31
Figura 10 – Liquidificador industrial utilizado no processo de trituração (a) vista frontal e (b) vista interna.....	33
Figura 11 – Preparação do EPS após trituração (a): secagem ao ar; (b): seco em estufa a 50°C.....	34
Figura 12 – Distribuição granulométrica dos diferentes tipos de EPS utilizados.....	35
Figura 13 – Distribuição granulométrica resultante dos EPS virgem e reciclados.....	36
Figura 14 – Processos de mistura adotados	39
Figura 15 – Equipamentos utilizados nos ensaios no estado endurecido (a) resistência à tração na flexão; (b) módulo de elasticidade dinâmico e (c) resistência à compressão.....	41
Figura 16 – Variação do teor de aditivo em função do tipo de argamassa.....	42

Figura 17 – Determinação do índice de consistência de uma das argamassas com EPS reciclado.....	43
.....	43
Figura 18 – Resistência à compressão das argamassas estudadas.....	46
Figura 19 – Formas de ruptura dos corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão para os diferentes tipos de argamassa analisados	46
Figura 20 – Seção transversal de corpos de prova após ensaio de resistência à compressão para os diferentes tipos de argamassa	47
Figura 21 – Ensaio de resistência à tração por flexão em amostra VIR.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland utilizado	29
Tabela 2 – Propriedades da areia final.....	29
Tabela 3 – Propriedades do fíler calcário	30
Tabela 4 – Porcentagem de EPS virgem e reciclado	36
Tabela 5 – Massa específica dos EPS utilizados	37
Tabela 6 – Propriedades do aditivo químico utilizado	37
Tabela 7 – Características dos traços das argamassas estudadas	38
Tabela 8 – Tabela de Experimentos.....	39
Tabela 9 – Resultados médios e desvio-padrão obtidos nas propriedades das argamassas avaliadas no estado fresco	42
Tabela 10 – Resultados médios e desvio-padrão obtidos nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas estudadas	44
Tabela 11 – Classificação das argamassas estudadas segundo NBR 13281	49
Tabela A1 - Análise de variância da influência do tipo de argamassa na massa específica.	58
Tabela A2 - Análise de variância da influência do tipo de argamassa na capacidade de retenção de água.	58
Tabela A3 - Análise de variância do efeito do tipo de EPS e processo de mistura na capacidade de retenção de água.	59
Tabela A4 - Análise de variância da influência do tipo de argamassa na massa específica.	59
Tabela A5 -Análise de variância do efeito do tipo de EPS e processo de mistura na resistência à compressão.....	59
Tabela A6 - Análise de variância da influência do tipo de argamassa na absorção de água.	60

LISTA DE SÍMBOLOS E ABBREVIATURAS

EPS	- Poliestireno Expandido
WPLA	- Agregado Plástico
a/c	- Relação água cimento
CPV-ARI	- Cimento Portland V de Alta Resistência Inicial
REC1	- Lote de EPS reciclado 1
REC2	- Lote de EPS reciclado 2
(P)	- Fração de Pérolas do EPS virgem
(MP)	- Fração de Micropérolas do EPS virgem
(FC)	- Fração de Correção do EPS virgem
REC	- Traço com EPS Reciclado
VIR	- Traço com EPS Virgem
REF	- Traço de Referência
M1	- Mistura 1
M2	- Mistura 2
UR	- Umidade relativa do Ar
ρ	- Massa específica
m_{EPS}	- Massa de EPS
V_f	- Volume de Frasco
V_a	- Volume de Água adicionada
\emptyset	- Diâmetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE EPS	15
2.2	USO DE EPS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTOS .	17
2.3	SEGREGAÇÃO DAS MISTURAS CIMENTÍCIAS COM EPS.....	18
2.4	ADERÊNCIA DAS PARTÍCULAS DE EPS COM A MATRIZ.....	20
2.5	INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE MISTURA EM SISTEMAS CIMENTÍCIOS	22
2.5.1	Microestrutura do processo de mistura	22
2.5.2	Influência da mistura nas propriedades do estado fresco	24
2.5.3	Influência da mistura nas propriedades mecânicas das argamassas	25
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	28
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	28
3.1.1	Cimento.....	28
3.1.2	Areia.....	29
3.1.3	Fíler calcário.....	30
3.1.4	Poliestireno expandido (EPS)	31
3.1.5	ÁGUA E ADITIVO	37
3.2	PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	37
3.3	MÉTODOS DE ENSAIO	40
3.3.1	ESTADO FRESCO.....	40
3.3.2	ESTADO ENDURECIDO	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
4.1	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	42
4.2	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	44
4.3	CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS CONFORME NBR 13281	48

5 CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	58

1 INTRODUÇÃO

O poliestireno expandido (EPS), comercialmente conhecido como isopor, é um polímero celular rígido que é obtido após a polimerização do estireno em água. O resultado final são pequenas esferas de até três milímetros de diâmetro compostos por cerca de 98% de ar e 2% de poliestireno (PASSOS; CARASEK, 2018). Devido ao preço acessível e à propriedades como baixa densidade, baixa condutibilidade térmica, caráter hidrofóbico, alta resistência mecânica e versatilidade, tornou-se um material amplamente conhecido e utilizado no setor da construção civil e em vários outros como de embalagens, automotivo e médico hospitalar (GVR, 2021).

O EPS é presente no dia a dia da construção civil e é empregado principalmente como enchimento de lajes, execução de sistemas de vedação, isolamento térmico e acústico, entre outros. Estima-se que 46% do uso global, seja voltado para esse campo, outros 39% do consumo mundial são voltados para a indústria de embalagens e recipientes, na qual esse material promoveu uma revolução, pois as características físicas e químicas do poliestireno expandido o tornam ideal para finalidades relacionadas a armazenar, manter e transportar alimentos e bens diversos. Os demais 15% têm aplicações principalmente na indústria automotiva e médica (GVR, 2021). No Brasil, segundo a Associação Brasileira da Indústria Química, em 2017 foram produzidas 44,9 mil toneladas de EPS e o consumo total foi de 91,7 mil toneladas (ABIQUIM, 2017). Dada a quantidade de EPS consumido, é evidente que seja gerado e descartado uma quantidade elevada de resíduo anualmente.

Apesar de ser um material totalmente reciclável, há uma série de fatores que dificultam ou inviabilizam economicamente o processo. Primeiramente, o transporte tem baixo rendimento, pois os resíduos de EPS são extremamente leves, ocupando muito espaço. Portanto, o armazenamento e o transporte de tais sobras, não é eficiente (SANT'HELENA, 2009). Outro fator que dificulta a reciclagem é a escassez de processos de separação deste material antes ou após o descarte. Os resíduos estão quase sempre contaminados por uma variedade de outros materiais, limitando a sua aplicação.

Nas últimas décadas, percebe-se uma maior necessidade de utilização de materiais e técnicas mais sustentáveis (CHEN; ZENG; ZHOU, 2012). Assim sendo, a busca de tecnologias ambientalmente corretas e o reaproveitamento de resíduos, podem ter um impacto positivo nas atividades econômicas e na qualidade de vida das

peças. Nessa linha, a utilização de poliestireno expandido reciclado como substituto parcial do agregado miúdo para produção de concretos e argamassas leves pode ser uma solução viável na construção civil.

Dentre as principais vantagens, pode-se destacar uma melhor eficácia energética de edificações executadas com revestimentos termicamente mais eficientes. Segundo Passos e Carasek (2018), os revestimentos de argamassa convencionais podem ser responsáveis por até 30% do isolamento térmico do sistema de vedação de um ambiente, a depender também de sua espessura e composição. Nesse sentido, o emprego de um material com alta capacidade isolante em revestimentos, pode melhorar as condições térmicas de habitações e reduzir consideravelmente o consumo energético referente a equipamentos de climatização artificial.

No entanto, algumas pesquisas destacam alguns problemas e adversidades enfrentados quando se trabalha com o poliestireno expandido em matrizes cimentícias (CHEN; LIU, 2004); (CHEN; LIU, 2007); (CARVALHO, 2017). Um dos principais obstáculos refere-se à distribuição das partículas de EPS na mistura, que tendem a se acumular na superfície dos corpos de prova devido a menor densidade em relação à matriz. Isso resulta na segregação da argamassa e/ou concreto e, conseqüentemente, compromete o desempenho mecânico desses materiais. Estudos também apontam uma clara diferença entre o desempenho das partículas virgens e recicladas do material (CARVALHO; MOTTA, 2019; TITTARELLI *et al.*, 2016; TRUSSONI; HAYS; ZOLLO, 2012).

No caso do EPS em pérolas, as partículas têm um formato esférico e uma superfície lisa que pode dificultar a aderência agregado-pasta. Os resíduos de poliestireno costumam ter forma mais irregular e textura mais rugosa, o que pode contribuir com a melhoria da aderência com a matriz. Quando existem sistematicamente, os problemas de adesão entre agregado e matriz cimentícia, prejudicam o desempenho de concretos e argamassas nos ensaios de estado endurecido. A principal propriedade afetada é a resistência, devido a uma maior facilidade de formação de fissuras.

A influência do processo de mistura em compósitos cimentícios muitas vezes é negligenciada devido a aparente simplicidade operacional dessa etapa. No entanto, diversas pesquisas, (FERNÁNDEZ-ALTABLE; CASANOVA, 2006), (FRANÇA, 2013), (GOLDSZAL; BOUSQUET, 2001), apontam como a qualidade da mistura e

parâmetros como tempo, taxa de adição de água e velocidade de mistura do equipamento e a ordem dos componentes exercem influência direta no comportamento reológico e nas propriedades no estado endurecido.

A vista das adversidades citadas de se trabalhar com EPS, e dos conceitos destacados sobre o papel fundamental do processos de mistura em compósitos cimentícios e sua influência nas propriedades dos mesmos, o presente trabalho tem como objetivo analisar como os dois procedimentos de mistura propostos podem interferir nas propriedades de argamassas com a substituição parcial do volume de agregado por EPS virgem e reciclado. Para isso, dois modelos de mistura foram analisados a fim de verificar qual deles seria mais eficaz para obtenção de uma homogeneização satisfatória e com menor impacto nas propriedades mecânicas das argamassas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

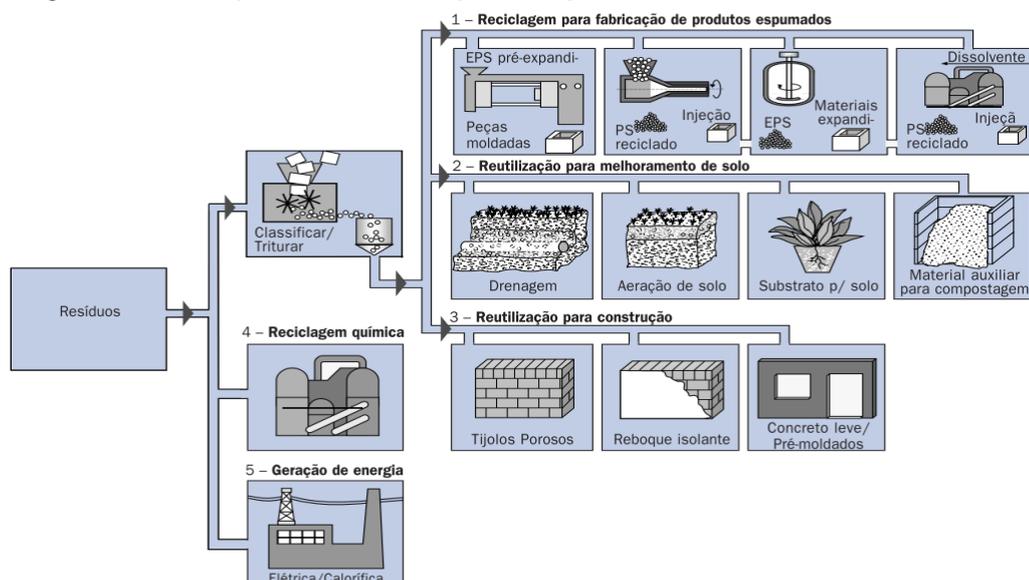
Neste capítulo são feitas considerações a respeito do aproveitamento dos resíduos de EPS, principalmente na aplicação em materiais cimentícios. Será dada ênfase aos efeitos de segregação e a importância do processo de mistura na produção de argamassas e concretos.

2.1 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE EPS

Por ser um material caracterizado como polímero na forma de espuma com micro células fechadas, inodoro, fisicamente estável e 100% reciclável, o EPS que é descartado de maneira inadequada, acaba ficando no meio ambiente indefinidamente e tem todo um potencial de reaproveitamento desperdiçado. Devido à sua baixa densidade, o poliestireno expandido pode acabar se tornando um problema ambiental, pois ocupa muito espaço e gera problemas tanto em lixões como em aterros.

De acordo com a ABIQUIM (2017), das 39.340 toneladas de poliestireno expandido consumidas no Brasil em 2014, apenas 30% foram encaminhadas para reciclagem. Nesse cenário, faz-se indispensável estimular formas alternativas de reaproveitamento e reciclagem de resíduos de EPS, objetivando mitigar seus impactos no meio ambiente. Na Figura 1 destacam-se as principais alternativas de reaproveitamento do poliestireno expandido pós-consumo.

Figura 1 – Principais alternativas para reaproveitamento de resíduos de EPS



Fonte: SILVEIRA; GROTE, 2010, p.14.

No reprocessamento para matéria-prima, os resíduos de EPS são destinados a indústrias de beneficiamento e submetidos a uma série de processos até a obtenção da matéria-prima do poliestireno expandido. No entanto, existem dificuldades para a efetivação desse processo, a principal é a questão da eficiência do transporte do EPS, visto que é um produto leve que ocupa muito espaço. Ainda assim, técnicas e equipamentos para comprimir melhor esses resíduos podem ser utilizados para viabilizar o processo. A reciclagem funciona como parte da própria cadeia produtiva das indústrias que atuam no beneficiamento e fabricação dos produtos de EPS. Os rejeitos podem ser moldados novamente em forma de blocos e injetados para formar peças de embalagens, por exemplo. Os resíduos costumam ser triturados em tamanhos menores, posteriormente o material é aglutinado, por meio de exposição ao calor e ao atrito. Em seguida, é colocado na extrusora, na qual é submetido a novo aquecimento até seu derretimento. Por fim, o agora poliestireno não expandido (sem gases) é homogeneizado e transformado em filetes, na forma de espaguete, sendo resfriados e secos, os filetes passam por uma máquina de picotes, que transforma em grânulos de poliestireno que podem ser expandidos novamente no processo industrial (SAMPER et al., 2010).

O resíduo de EPS pode ser utilizado no melhoramento geral do solo, na execução de sistemas de drenagem, substrato para plantas e aeração de solos. O poliestireno expandido juntamente com a argila faz com que a água penetre mais facilmente no solo, levando adubo para as raízes. Na jardinagem ele pode ser empregado em conjunto com a brita como substrato para plantas, principalmente para orquídeas. Em gramados e campos de futebol permite a drenagem das águas pluviais (SILVEIRA, 2005).

O aproveitamento de resíduos de EPS para combustão limpa e geração de energia termoelétrica é outra opção para evitar que esses restos acabem indo para aterros ou destinos de descarte inadequados. O poliestireno expandido é um polímero com alto poder calorífico, a energia presente em 1 kg é equivalente a 1,3 kg de óleo combustível. Por isso, ele pode ser aproveitado juntamente com outros tipos de resíduos combustíveis para fornecer energia a própria estação de processamento destes. No entanto, as emissões de poluentes resultantes dessa queima são análogas as de outros combustíveis fósseis usuais (TESSARI, 2006). Em vista disso, existe também a possibilidade de aproveitamento na reciclagem química, na qual a inserção do produto plástico diretamente no processo de produção de outro material pode

ocorrer. Com poliestireno é possível a produção de resinas de impermeabilização, óleos e copolímeros (GROTE; SILVEIRA, 2010).

Na construção civil, existem várias aplicações interessantes aos resíduos de poliestireno, como enchimento de lajes, fôrmas de elementos diversos, isolamento térmico/acústico de sistemas estruturais ou não, painéis, juntas de dilatação, fundações para estradas e fabricação de concretos e argamassas de baixa massa específica.

O concreto leve de EPS consiste na substituição total ou parcial dos agregados tradicionais por grânulos de EPS. As proporções de substituição de agregados convencionais no concreto por EPS variam em função da densidade e da resistência requerida, podendo-se cobrir uma escala larga de densidades, compreendida entre 600 a 1600 Kg/m³ (TESSARI, 2006). Esse concreto pode ser empregado na construção civil para executar elementos que não vão sofrer grandes solicitações de carga. Por isso, ele é bastante utilizado quando a intenção é aliviar o peso de uma estrutura como para enchimento de lajes, fabricação de blocos, regularização de superfícies, entre outros.

2.2 USO DE EPS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTOS

As características dos revestimentos utilizados nas edificações têm papel fundamental na determinação do desempenho térmico das mesmas, sendo esse diretamente relacionado a eficiência energética do ambiente. Segundo Passos e Carasek (2018), o setor residencial é responsável por parte importante do consumo energético brasileiro (23%) e neste segmento destaca-se o consumo devido a sistemas de condicionamento de ar, responsáveis na média nacional por 20% dos gastos com eletricidade (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA O.R, 2012). Sendo assim, melhorar propriedades térmicas dos envelopes das habitações é uma solução natural para reduzir o consumo energético relacionado a equipamentos de condicionamento de ar.

Os revestimentos de argamassa convencionais costumam ser responsáveis por até 30% do isolamento térmico do sistema de vedação, dependendo de sua espessura, composição e da disposição arquitetônica (PASSOS; CARASEK, 2018). Nesse contexto, diversas pesquisas, (ALVES, 2020); (AMIANTI; BOTARO, 2008); (CARVALHO, 2017); (TESSARI, 2006) vêm sendo desenvolvidas visando a produção

e o estudo de compósitos cimentícios leves com a utilização de resíduos de EPS. Isso em vista, o desenvolvimento de argamassas leves pode representar uma solução na medida em que é capaz de aumentar a resistência térmica em sistemas de vedação (PASSOS; CARASEK, 2018).

Em suas pesquisas de 2018, Passos e Carasek concluíram que argamassas contendo resíduos de EPS apresentaram um grande potencial para emprego como revestimento termicamente isolante em paredes maciças de concreto. Um dos revestimentos testados na pesquisa continham cerca de 90% de substituição de areia por poliestireno expandido reciclado e apresentou comportamento adequado quanto a parâmetros de transmitância térmica, aderência e durabilidade. Portanto, os resultados indicaram a possibilidade de uso deste em sistemas de vedações verticais externas.

O emprego dos resíduos de EPS em argamassas tem potencial de reduzir impactos ambientais na construção civil, considerando que argamassas incorporam em sua composição um grande volume de agregados. Isso propiciaria uma redução na extração de areia natural com essa finalidade. A utilização do poliestireno expandido como agregado miúdo em argamassas e concretos foi alvo de muitos estudos publicados (ARANTES; LEÃO, 2019); (BOITA; BELLEI, 2019); (CARVALHO; MOTTA, 2019); (CATOIA, 2012); (NEGRÃO *et al.*, 2019). Em grande parte deles, os autores destacam que muitas das propriedades do EPS, seja ele adicionado como partículas recicladas ou inalteradas (pérolas), interferem no processo de mistura e nas propriedades dos materiais.

2.3 SEGREGAÇÃO DAS MISTURAS CIMENTÍCIAS COM EPS

Uma das principais dificuldades em se trabalhar com grânulos de EPS, sejam em pérolas inalteradas (virgens) ou resíduos (recicladas), em sistemas cimentícios multifásicos, é a segregação na mistura. Isso se deve ao fato de as partículas de poliestireno expandido serem extremamente leves, com densidades entre 12-20 kg/m³ e pelo meio em que estão envoltas, ser bem mais denso.

De acordo com Le Roy, Parant e Boulay (2005) existem duas forças atuantes no equilíbrio do EPS imerso em um fluido visco-plástico: o empuxo (força de Arquimedes) e a tensão de cisalhamento resultante na matriz, especialmente na interface matriz-partícula. Para que a mistura se mantenha homogênea, é necessário

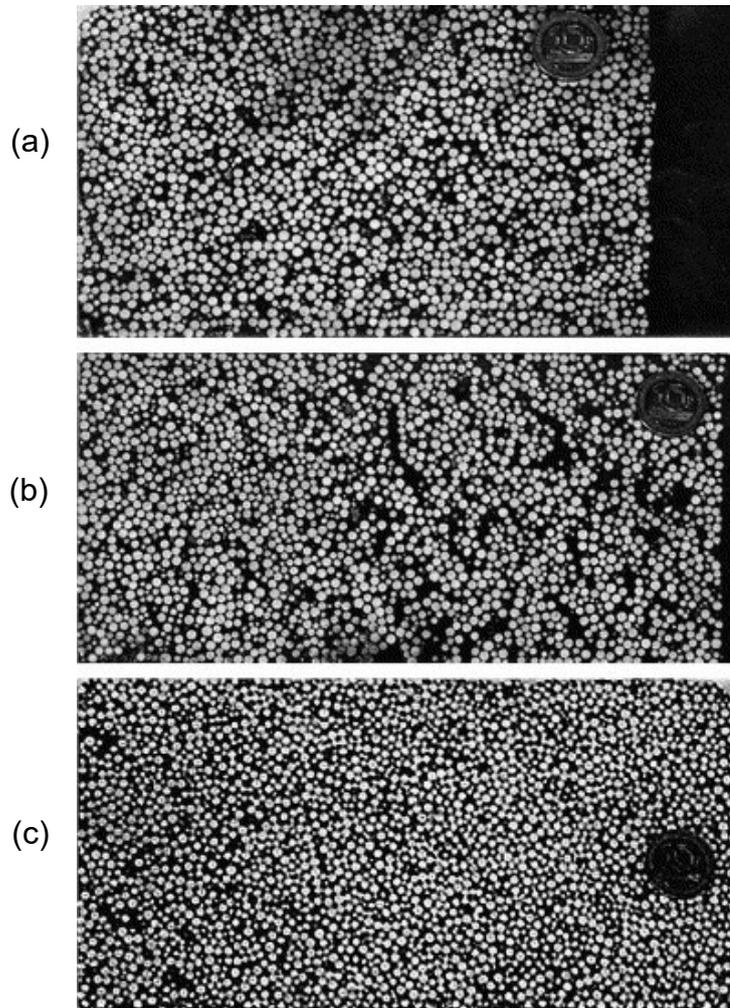
que a força resultante das partículas dispersas no meio se equilibre com a força vertical. No entanto, o empuxo dos grânulos de EPS tende a ser maior, pois deslocam um volume considerável se comparado a sua massa. Por isso, a quantidade de partículas envoltas na matriz e seus tamanhos são de suma importância. Para que fiquem bem distribuídas, é necessário que haja um número tal de partículas que possibilite elas sejam impedidas de subir por outras que estão acima. Na prática, é possível obter misturas homogêneas utilizando aditivos para modificar a fluidez da mistura, tais como os superplastificantes. A dosagem do superplastificante afeta o espalhamento da matriz, que por sua vez está diretamente ligado à resistência ao cisalhamento (LE ROY; PARANT; BOULAY, 2005).

Quando ocorre a segregação da mistura são formadas áreas de acúmulo de EPS nos corpos de prova que descaracterizam a mistura como um todo. As vantagens do uso de poliestireno expandido como agregado na argamassa só são obtidas com uma distribuição uniforme das partículas. Conseqüentemente, nas misturas onde há segregação, o desempenho mecânico não é satisfatório. Para evitar isso, é necessário desenvolver métodos de otimização da matriz para que as partículas tenham seu deslocamento impedido por outras partículas de EPS e pela própria pasta cimentícia.

Nos concretos, a dificuldade de manter a matriz coesa nesses meios é maior em relação às argamassas isso devido ao volume de material utilizado durante a aplicação. O concreto leve é comumente empregado para preencher elementos de volume superiores, conseqüentemente a probabilidade de segregação é maior. As argamassas, por sua vez, costumam ser utilizadas para revestir ou preencher, sendo executadas de modo a ter pequena espessura.

Na Figura 2 é possível observar a evolução da segregação de acordo com o número de esferas em seções de corpos cilíndricos (11 x 22 cm). A densidade do empacotamento das partículas ($\phi = 3$ mm) é crescente de cima para baixo.

Figura 2 – Distribuição de pérolas de EPS de matrizes com diferentes densidades de empacotamento (a) 0,3; (b) 0,4 e (c) 0,7



Fonte: LE ROY; PARANT; BOULAY (2005).

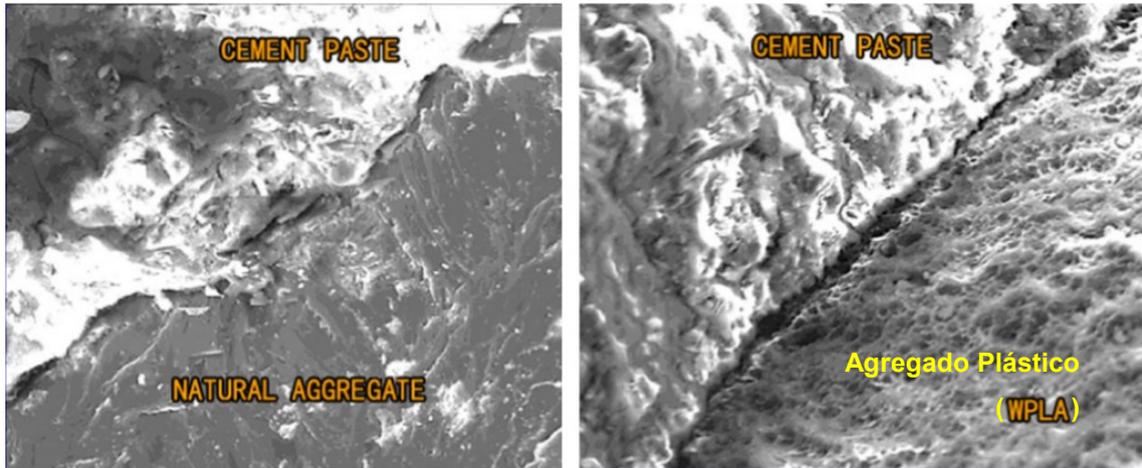
2.4 ADERÊNCIA DAS PARTÍCULAS DE EPS COM A MATRIZ

É bem documentado na literatura, (PERRY et al. 1991); (CHEN; LIU, 2004) que devido à natureza hidrofóbica dos grãos de poliestireno expandido, essas partículas têm a aderência com a matriz cimentícia prejudicada. Isso acontece, pois na zona de transição entre agregado e EPS, a água não consegue se movimentar adequadamente o que dificulta a reação de hidratação do cimento. Por essa razão, são criados pontos de ancoragem fracos dos agregados com a matriz, esse fenômeno é chamado de efeito parede (GU; OZBAKKALOGLU, 2016).

A pesquisa de Lei Gu e Togay Ozbakkaloglu (2016) demonstrou a diferença entre as zonas de transição de matrizes cimentícias com agregados naturais e agregados de natureza polimérica (com superfícies semelhantes ao EPS) com

imagens de microscopia. Nelas, é possível visualizar como a zona de transição entre o agregado plástico e a pasta foi consistentemente mais ampla do que entre a pasta de cimento e os agregados naturais (Figura 3).

Figura 3 – Imagens da zona de transição entre agregado e pasta



Fonte: (LE ROY; PARANT; BOULAY, 2005)

Outro fator que tem influência na configuração das zonas interfaciais é a textura do agregado. No caso do EPS em pérolas, as esferas têm um formato e uma superfície lisa que dificulta a adesão, já os resíduos de poliestireno costumam ter forma mais irregular e textura mais acidentada, o que pode ajudar na aderência com a matriz.

Quando existem sistematicamente, os problemas de adesão entre agregado e matriz cimentícia costumam gerar problemas no desempenho dos concretos e argamassas nos ensaios de estado endurecido. A principal propriedade afetada é a resistência, devido a uma maior facilidade de formação de fissuras entre zonas de transição a outras. No entanto, diversas pesquisas também já propuseram soluções a essa questão. A pesquisa de Chen e Liu, (2007) investigou duas maneiras à adição de emulsões aquosas de epóxi para melhorar a adesão e o pré-tratamento dos grânulos de EPS com produtos químicos para alterar sua microestrutura. Eles também chegaram à conclusão que a adição de sílica ativa pode aumentar a resistência do concreto melhorando a matriz e fortalecendo a aderência pasta-agregado.

2.5 INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE MISTURA EM SISTEMAS CIMENTÍCIOS

Esta etapa é fundamental na produção de argamassas e concretos, pois é o ponto de partida para a consolidação e o desenvolvimento microestrutural desses produtos, e tem impacto nas propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Aglomerados de partículas secas que não são dispersos durante a mistura podem permanecer não hidratados no tempo, tornando-se fonte potencial de defeitos microestruturais, pelo fato das partículas não estarem cobertas com o produto de hidratação (YANG; JENNINGS, 1995).

Dentre os fatores que influenciam nesse processo, podem ser citados aqueles que são intrínsecos como a própria formulação dos materiais, a distribuição de tamanho de partículas, a área de superfície específica e presença de agentes que podem interferir na molhagem. E os fatores extrínsecos são o tempo de mistura, a taxa de adição de líquido, a velocidade de agitação com conjunto e a sequência em que os componentes são introduzidos. A otimização de cada uma destas variáveis para um atingir uma condição específica, garante melhor desempenho de argamassas e concretos tanto no estado fresco como endurecido (FRANÇA, 2013).

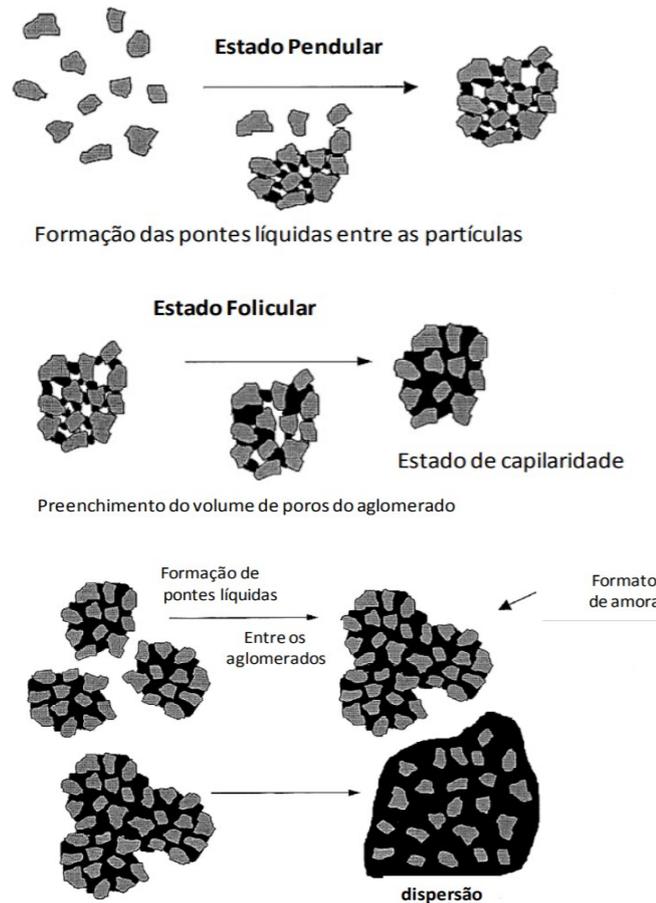
2.5.1 Microestrutura do processo de mistura

O entendimento de como ocorre a evolução da organização entre partículas dos materiais durante o processo de mistura é essencial para a realização de análises de como os fatores internos e externos ao sistema podem afetar o procedimento. Esta transformação está relacionada a formação de aglomerados que tem início com a adição de água.

O modelo proposto por Goldszal e Bousquet (2001), baseado em técnicas usadas em indústrias de alimentos, fertilizantes, químicas e farmacêuticas, visa esclarecer o processo de mistura. De acordo com os autores, existem diferentes estados de aglomeração das partículas em função do teor de umidade presente na mistura, como mostrado na Figura 4. Inicialmente, quando as partículas entram em contato com o líquido, o teor de umidade é baixo e as substâncias criam pontes líquidas entre elas e formam aglomerados que atingem um tamanho específico (estado pendular). Quando a quantidade de fluido aumenta, o espaço entre as partículas é preenchido inteiramente e o aglomerados se tornam saturados (estado de capilaridade). Posteriormente os aglomerados continuam crescendo e criam

pontes líquidas também entre eles, mas com uma certa porosidade, somente quando esses vazios são cheios, o sistema atinge um estado de dispersão líquido-sólido.

Figura 4 – Estados de granulação resultante das interações líquido e sólido

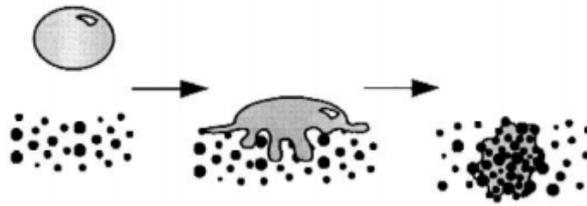


Fonte: GOLSDZAL; BOUSQUET *apud* FRANÇA (2013), p. 9.

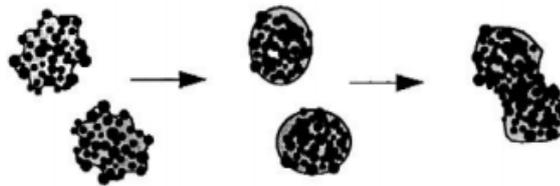
França, (2013) destaca uma linha de raciocínio similar proposta por Ivelson *et al.*, (2001). Os autores também explicaram os processos de granulação de uma mistura considerando três etapas principais. A primeira foi chamada de molhagem e nucleação que tem início quando as partículas começam a entrar em contato com o líquido e os primeiros grânulos são formados. Na segunda, consolidação e crescimento, os grânulos colidem entre si e incorporam pó em suspensão e tendem a crescer de tamanho. E na terceira etapa, atrito e quebra, compreende a fase na qual os grânulos formados são quebrados devido ao impacto durante a mistura como apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Esquema das etapas de granulação

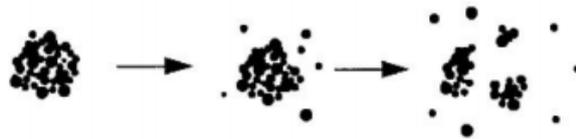
1. Molhagem e Nucleação



2. Consolidação e Crescimento



3. Atrito e Quebra



Fonte: IVELSON *et al.* *apud* FRANÇA (2013), p. 11.

Em sua pesquisa sobre a influência do processo mistura no comportamento de sistemas cimentícios multifásicos reativos, França (2013) faz uma analogia dos modelos de granulação propostos por Goldszal e Bousquet (2001) e IVELSON *et al.*, (2001) relacionando os estados e etapas descritos por cada um. Segundo a autora, é razoável propor que os estados pendular e folicular, em que são formadas as pontes líquidas entre as partículas e os vazios dos aglomerados são preenchidos, estão inseridos na etapa de molhagem e nucleação. O estado de capilaridade estaria atrelado à etapa de consolidação e crescimento, enquanto o estado de dispersão se assemelha à etapa de atrito e quebra dos aglomerados no processo de mistura.

2.5.2 Influência da mistura nas propriedades do estado fresco

A maneira como a mistura acontece está intrinsecamente relacionada com suas propriedades no estado fresco, ou seja, fatores como a sequência de adição dos insumos, tempo de preparo, velocidade de agitação, entre outros estão diretamente relacionados a obtenção de materiais cimentícios com desempenho satisfatório tanto no estado fresco com o endurecido.

Quanto mais eficiente é o procedimento de mistura, maior a dispersão das partículas e mais homogêneo o conjunto, maior a facilidade de espalhamento da matriz, como pode ser observado nos ensaios de índice de consistência ou de escoamento por compressão axial (*squeeze-flow*). Esse foi um dos conceitos confirmados na análise de Fukui *et al.* (2018). Por meio de ensaios de *squeeze flow*, os autores verificaram comportamentos distintos considerando uma mesma argamassa e dois métodos de mistura distintos. De acordo com os autores, o fator responsável pela diferença entre os resultados constatados, foi a ordem de adição dos elementos. Um dos processos de mistura considerava a inclusão dos sólidos na água, que estava presente no misturador, enquanto no outro, foi feito o inverso.

Ainda segundo Fukui *et al.* (2018), isso pode ter ocorrido pelo fato de que as partículas adicionadas primeiramente na mistura encontram água suficiente para absorver, diferente do cenário encontrado pelas últimas partículas que são adicionadas na mistura. Estas, por sua vez, encontram uma menor quantidade de água disponível para se hidratar e para lubrificar sua superfície. Devido à ausência da água para realizar a lubrificação das partículas, grânulos com interior seco tendem a se formar e o sistema se torna um material heterogêneo provocado pelas diferentes condições de hidratação e lubrificação das partículas que a constituem.

De modo geral, o comportamento da argamassa no estado fresco está associado à capacidade de fluir e de se deformar quando a mistura é submetida a tensões de cisalhamento. As propriedades das argamassas e a aderência desta com um substrato são influenciadas por tais características. Por exemplo, a aderência é otimizada quando o contato com um substrato específico é mais extenso, o que também depende de características associadas a viscosidade (SILVA *et al.*, 2005).

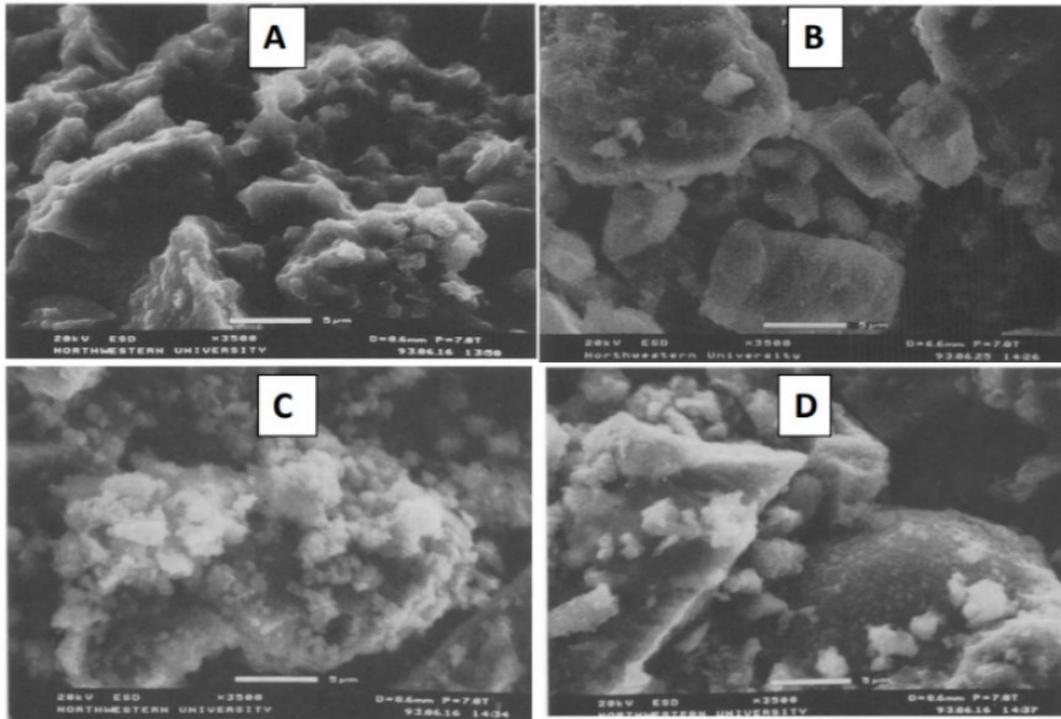
2.5.3 Influência da mistura nas propriedades mecânicas das argamassas

A interferência do processo de mistura no desempenho do estado endurecido foi investigada em diversos trabalhos. França (2013) concluiu que fatores como uma maior velocidade de mistura e taxa de adição de água geraram melhores resultados de homogeneização e trabalhabilidade. Conseqüentemente, melhor desempenho em termos de resistência mecânica, porosidade e módulo de elasticidade.

Deficiências durante o processo de mistura podem provocar falhas na microestrutura, sendo seus efeitos são mais perceptíveis nas idades iniciais. Yang e

Jennings (1995), por meio de microscopia investigaram as consequências do não rompimento de alguns aglomerados de partículas finas de cimento no desenvolvimento da microestrutura de pastas cimentícias, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Evolução da hidratação de partículas e aglomerados ao longo do tempo: (a) e (b) 20 minutos de idade; (c) e (d) após 5 horas.



Fonte: YANG; JENNINGS, 1995.

Na Figura 6a verifica-se a presença de partículas molhadas e com produtos de hidratação, e na Figura 6b de um aglomerado onde a superfície das partículas internas estão secas e não houve a precipitação de produtos hidratados. Após 5 horas, as partículas praticamente estavam cobertas com produtos de hidratação, no entanto ainda havia partículas secas e não hidratadas no interior do aglomerado. A não hidratação das partículas podem gerar defeitos microestruturais, ou seja, maior porosidade que tende a minimizar as propriedades mecânicas dos materiais de base cimentícia.

Uchikawa, Hanehara e Hirao (1997) avaliaram a influência de mudanças na microestrutura de pastas de cimento endurecidas após aplicação de diferentes taxas de carregamento em ensaios de resistência à compressão. Os resultados mostraram que materiais mais compactos, com menor quantidade de poros, apresentam maior

módulo de elasticidade e menor propagação das microfissuras. Segundo os autores, estruturas porosas potencializaram a ocorrência de fissuração. Essa diferença foi atribuída a misturas executadas de forma inadequada que acabaram criando um maior volume de vazios.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este trabalho tem como objetivo analisar a influência do processo de mistura nas propriedades de argamassas com substituição parcial do volume de agregado por EPS virgem e reciclado. Para isso, foram produzidas cinco argamassas, sendo uma de referência com traço 1: 0,5: 4,5: 0,7 (cimento: fíler calcário: areia: água) em massa e duas argamassas com substituição de 51% do volume de areia por EPS virgem ou reciclado, variando-se o procedimento de mistura.

O índice de consistência das argamassas foi mantido constante e igual a 260 ± 10 mm. Dado que a quantidade de água também foi uma constante, a consistência foi ajustada por meio da adição de aditivo superplastificante.

As propriedades das argamassas foram avaliadas no estado fresco e endurecido, bem como obtenção de imagens da seção transversal dos corpos de prova para verificação da distribuição das partículas de EPS.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

As argamassas foram produzidas utilizando cimento, fíler calcário, areia natural, EPS (virgem ou reciclado), água e aditivo superplastificante. Foram utilizadas duas frações de areia para obtenção de uma distribuição granulométrica mais adequada à produção de argamassas. O EPS virgem foi constituído por partículas esféricas de duas granulometrias: 4,8 e 2,4 mm, comercializadas sob o nome de pérolas e micro pérolas, respectivamente. O EPS reciclado foi obtido junto a uma fábrica e lajes treliçadas situada na cidade de Uberlândia, sendo necessário ajuste granulométrico para uso como agregado miúdo. A seguir, são descritos os materiais utilizados, os métodos de preparação e as propriedades desses.

3.1.1 Cimento

Foi utilizado o cimento Portland CPV-ARI em decorrência de sua pureza (ausência de compostos de escorias, pozolanas, etc) que é composto por clínquer, sulfato de cálcio e material de carbonático de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018). Na Tabela 1, estão apresentadas as propriedades físicas e mecânicas do cimento utilizado e as referências normativas utilizadas em sua determinação.

Tabela 1 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland utilizado

Propriedade	Valor	Referência
Superfície específica (cm ² /g)	5200	NBR 16372:2015
Resistência à compressão, 1 dia (MPa)	23,2	NBR 7215:2019
Resistência à compressão, 3 dias (MPa)	37,3	NBR 7215:2019
Resistência à compressão, 7 dias (MPa)	46,7	NBR 7215:2019
Resistência à compressão, 28 dias (MPa)	58,1	NBR 7215:2019
Massa específica (g/cm ³)	3,06	NBR NM 52:2009

Fonte: Autor (2021).

3.1.2 Areia

Foram utilizadas areias naturais de origem quartzosa de duas granulometrias, denominadas média e fina, provenientes da região do triângulo mineiro. Essas foram secas em estufa a temperatura média de 90°C, homogeneizadas, armazenadas em sacos plásticos até a sua utilização.

A caracterização da granulometria das areias foi realizada com base na NBR NM248 (ABNT, 2003), incluindo as peneiras de 2,00; 0,75; 0,42 e 0,25 milímetros utilizadas na determinação da composição granulométrica de solos (NBR 7181, ABNT, 2018). Na Figura 7 são exibidas as curvas granulométricas das areias fina e média, bem como a curva resultante da proporção 45% e 55% adotadas nessa pesquisa. Esta proporção foi adotada porque a areia média apresentava deficiência de partículas (menores que 0,6 mm), essa constatação foi feita com base na experiência empírica do pesquisador ao verificar que a areia média tinha maior quantidade de partículas grossas.

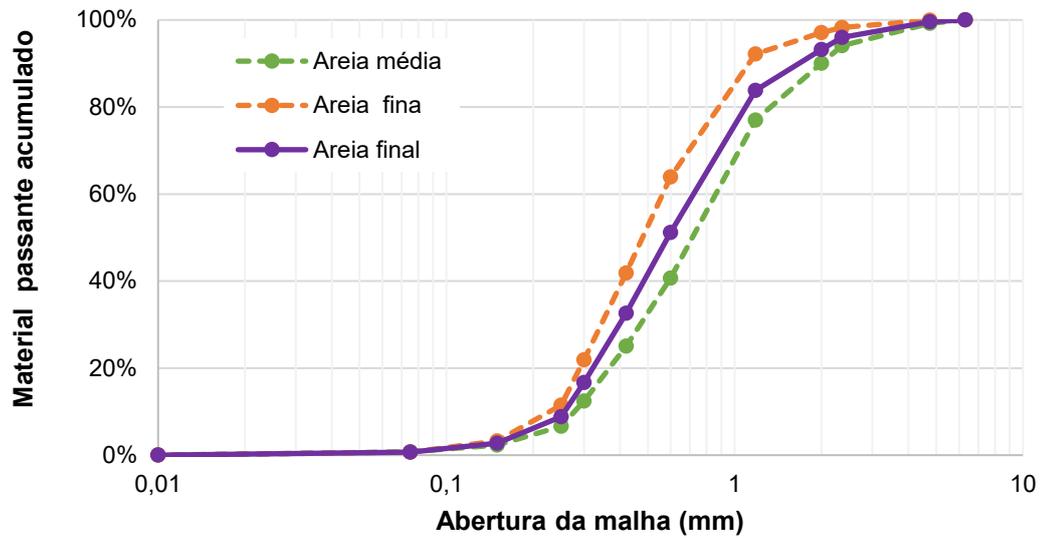
Na Tabela 2 são relacionadas as propriedades da areia final utilizada, classificada como média grossa e as normas empregadas para a determinação das mesmas.

Tabela 2 – Propriedades da areia final

Propriedades	Valor	Referência
Dimensão máxima característica (mm)	4,75	NBR NM 248:2003
Módulo de finura	2,74	NBR NM 248:2003
Coefficiente de uniformidade	2,94	NBR NM 248:2003
Massa específica (g/cm ³)	2,62	NBR NM 52:2009
Massa unitária (g/cm ³)	1,48	NBR NM 45:2006

Fonte: Autor (2021).

Figura 7 – Distribuição granulométrica das areias estudadas



Fonte: Autor (2021)

A areia final tem porcentagens em massa retida acumulada dentro dos limites da zona ótima da norma NBR 7211(ABNT, 2005), cerca de 0,5% retido na malha 4,75 mm e 95% retido na abertura de 150 μ m, portanto classifica-se como média.

3.1.3 Fíler calcário

O fíler calcário foi utilizado como adição mineral a fim de acrescentar maior proporção de finos nas misturas de argamassa. O material utilizado foi Procarb 5 obtido comercialmente, junto a *Provale Mining Group*. De acordo com o fabricante este material é constituído por 80% de carbonato de cálcio (CaCO_3); 15,5% de carbonato de magnésio (MgCO_3) e resíduo insolúvel igual a 4,5%. Na Tabela 3 são mostradas algumas propriedades físicas e o pH do fíler calcário utilizado.

Tabela 3 – Propriedades do fíler calcário

Propriedade	Valor	Referência
Massa específica (g/cm^3)	2,7	NBR NM 52:2009
Superfície específica (cm^2/g)	932470	NBR 16372:2015
Diâmetro médio (μm)	5,5 – 6,5	Fabricante
Densidade aparente (g/cm^3)	1,2-1,5	Fabricante
pH	9,0-10,0	Fabricante

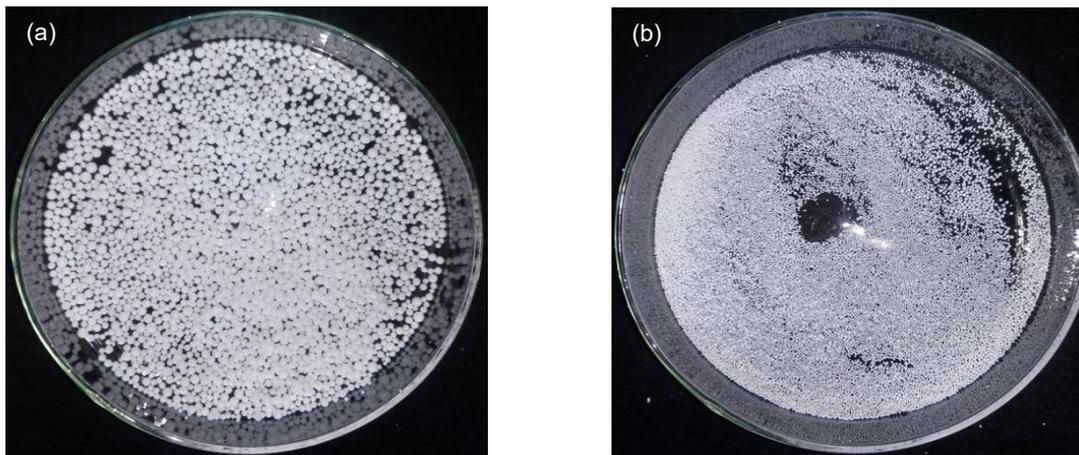
Fonte: Autor (2021); Dados do fabricante.

3.1.4 Poliestireno expandido (EPS)

Na produção das argamassas foram utilizados dois tipos de EPS, o virgem e o reciclado. O poliestireno expandido virgem foi obtido comercialmente por meio da empresa *Styroform*, em duas granulometrias: a pérola (Figura 8 a) e a micropérola (Figura 8 b).

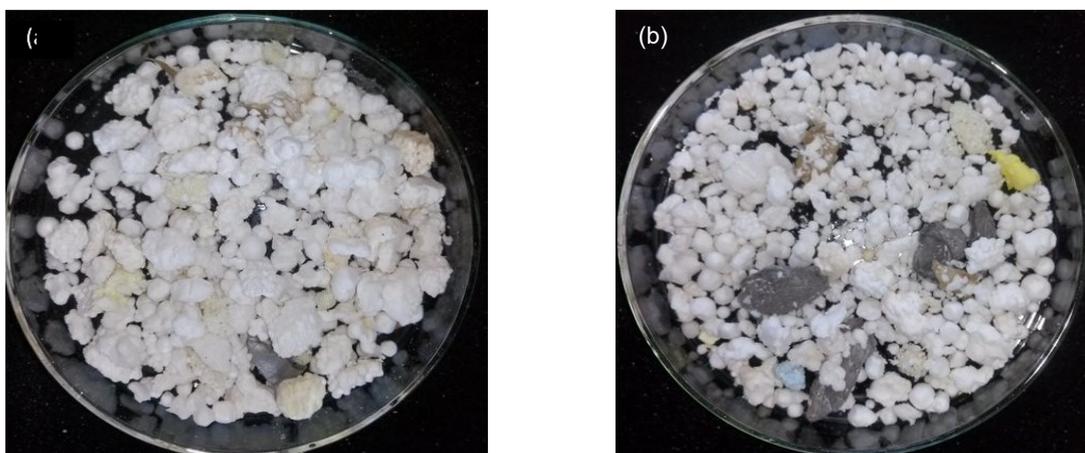
O EPS reciclado foi adquirido na empresa Premon, uma fábrica de lajes treliçadas situada na cidade de Uberlândia. O material é resultante da trituração de resíduos de EPS utilizados na produção de componentes para a construção civil. Para a pesquisa, foi feita a homogeneização dos materiais a partir de dois lotes distintos, como mostrado nas Figura 9 a e b.

Figuras 8 – Tipos de EPS virgem utilizados: (a) Pérola (P), com diâmetros de 5 a 2 mm; (b) Micropérola (MP), com diâmetros de 2 a 0,5 mm.



Fonte: Autor (2021).

Figura 9 – Amostras dos lotes de EPS reciclado utilizados: (a) REC1; (b) REC2



Fonte: Autor (2021).

Nos dois lotes analisados de poliestireno expandido reciclado (REC1 e REC2), é possível verificar que: no primeiro lote, além das partículas de EPS, também estão presentes espuma de poliuretano (pontos em amarelo visualizados na Figura 9 a) e uma grande quantidade de flocos resultantes da aglomeração de pérolas. No lote 2 (REC2), também é possível visualizar algumas partículas de EPS na coloração cinza, provavelmente de espuma de polietileno expandido e/ou borracha alveolar, mais achatadas e alongadas (Figura 9 b). Tais impurezas nos lotes são oriundas da falta de separação dos resíduos na fábrica.

Os resíduos de EPS 1 e 2 apresentavam dimensão máxima característica, determinada conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003), equivalente à 19 mm e 12,5 mm, respectivamente. Sendo assim, foi necessário a redução das partículas para utilização como agregado miúdo em argamassas. O método utilizado é apresentado no tópico a seguir.

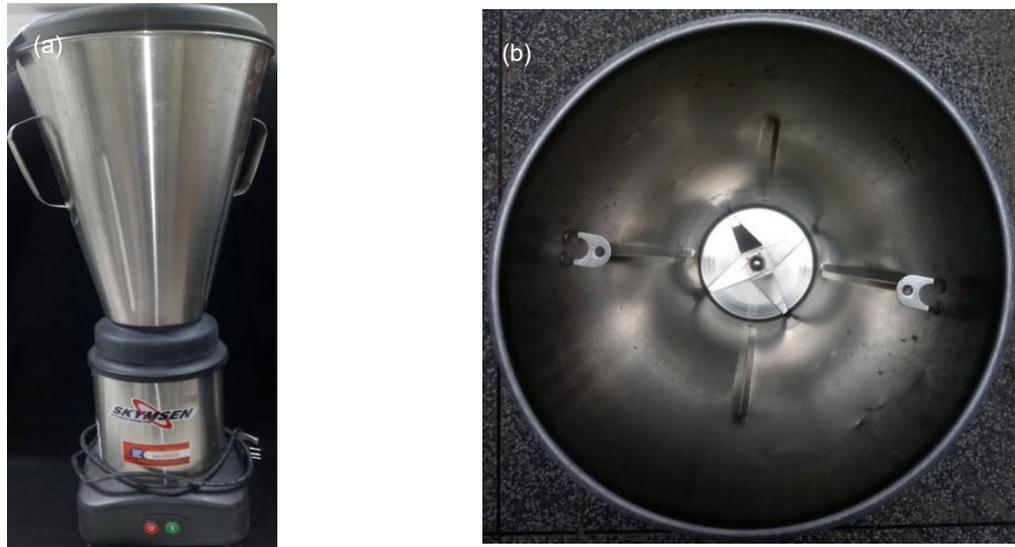
3.1.4.1 Redução das partículas de EPS reciclado

Como mencionado anteriormente, para que o EPS reciclado pudesse ser empregado adequadamente na produção das argamassas, foi necessário triturá-lo para reduzir a dimensão das partículas (flocos aglomerados) obtendo-se dimensões similares ao EPS virgem em pérolas. Esse procedimento também foi importante para homogeneização dos lotes de resíduos recebidos.

A moagem foi realizada seguindo o método a úmido proposto por Hernández Zaragoza *et al.* (2013) e foi feita utilizando um liquidificador industrial da marca *Skymesen*, 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 litros, exibido na Figura 10.

Ambos os lotes de EPS reciclado foram triturados. O tempo de moagem foi determinado experimentalmente. Cada processo de trituração foi limitado ao volume de 6 litros, pois com a capacidade total, parte da água no copo transbordava. A proporção de água/EPS escolhida para a moagem foi de 3 litros de cada e foi definida após a constatação que, durante os testes, pouca água fazia com que o EPS não circulasse dentro do copo e somente as partículas em contato direto com as lâminas fossem trituradas. No entanto, quando era adicionado um excesso de água, o EPS fluava e se acumulava na superfície e não era triturado.

Figura 10 – Liquidificador industrial utilizado no processo de trituração (a) vista frontal e (b) vista interna

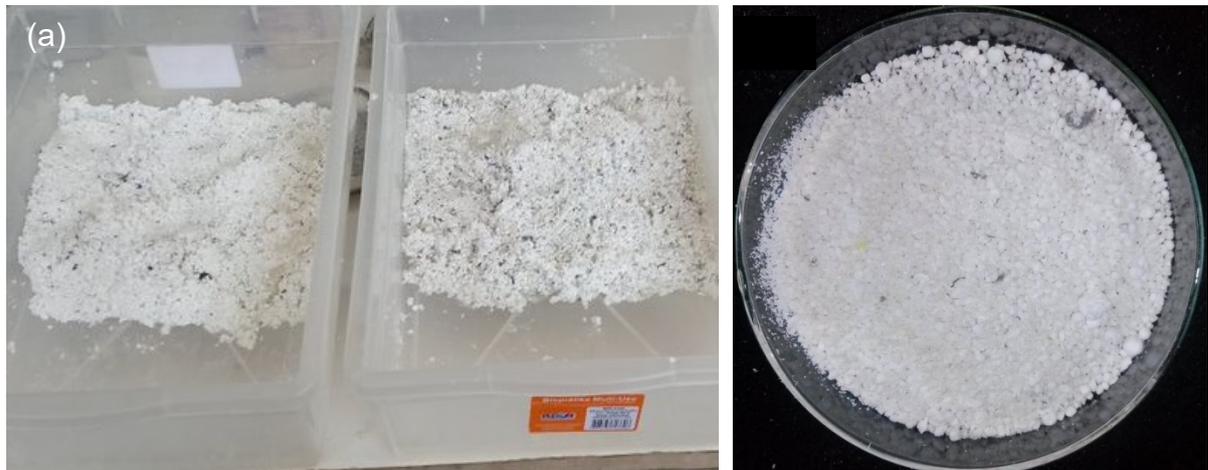


Fonte: Autor (2021).

Durante o processo de trituração, buscou-se atingir o limite máximo de redução de partículas de EPS que o equipamento permitia, pois, a literatura destaca a tendência do melhor desempenho de materiais cimentícios nessa condição. Nos testes, foi determinado um tempo limite de 6 minutos para o lote REC1 e de 4,5 minutos para o lote REC2. A diferença entre os tempos limites de moagem entre esses lotes pode ser atribuída à dimensão máxima dos aglomerados presentes no lote REC1 (DMC = 19 mm) e que demoram mais tempo para serem destruídos em relação ao lote REC2 (DMC = 12,5 mm).

Após a finalização do processo de trituração, foi feita a separação das partículas para a retirada do material com granulometria inferior a 0,075 milímetros. A parte retida nesta peneira, foi colocada para secar apoiada em uma superfície inclinada por cerca de duas horas (Figura 11 a). A água em excesso escoava por gravidade e, posteriormente, o EPS foi seco em estufa com temperatura constante de 50°C por 48 horas. Em seguida, os mesmos permaneciam ao ar até atingir temperatura ambiente (Figura 11 b). Os lotes, então, foram armazenados em sacos plásticos, coletadas amostras para os ensaios de caracterização.

Figuras 11 – Preparação do EPS após trituração (a): secagem ao ar; (b): seco em estufa a 50°C



Fonte: Autor (2021).

3.1.4.2 Caracterização do EPS

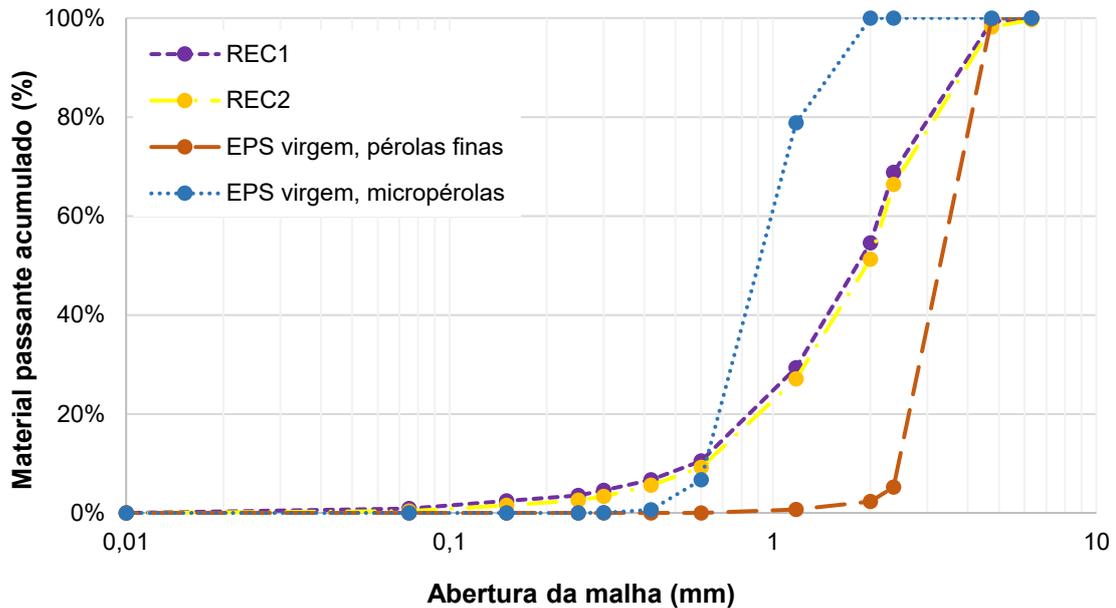
A caracterização dos EPS utilizados, virgem e reciclado, foi realizada pelos ensaios de granulometria e massa específica. O método utilizado para avaliar a distribuição granulométrica foi adaptado das normas: NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7181 (ABNT, 2016).

A adaptação do ensaio de granulometria foi necessária para evitar que o material ficasse acumulado nas peneiras. Por isso, a massa de poliestireno expandido foi limitada em cada ensaio, para o EPS reciclado e as pérolas virgens foram utilizados 5 g e para as micropérolas virgens 10 g. Além disso, em decorrência da facilidade das pérolas em aderir às superfícies devido à eletricidade estática, aumentou-se o tempo de vibração do conjunto de peneiras para quinze minutos.

A determinação da composição granulométrica das partículas de EPS recicladas (REC1 e REC2) foi feita com a seleção de dez amostras coletadas de forma aleatória após o processo de trituração e secagem. Para o EPS virgem foram feitas duas determinações de cada material utilizado.

As curvas granulométricas obtidas para os diferentes tipos de EPS utilizados são exibidas na Figura 12.

Figura 12 – Distribuição granulométrica dos diferentes tipos de EPS utilizados

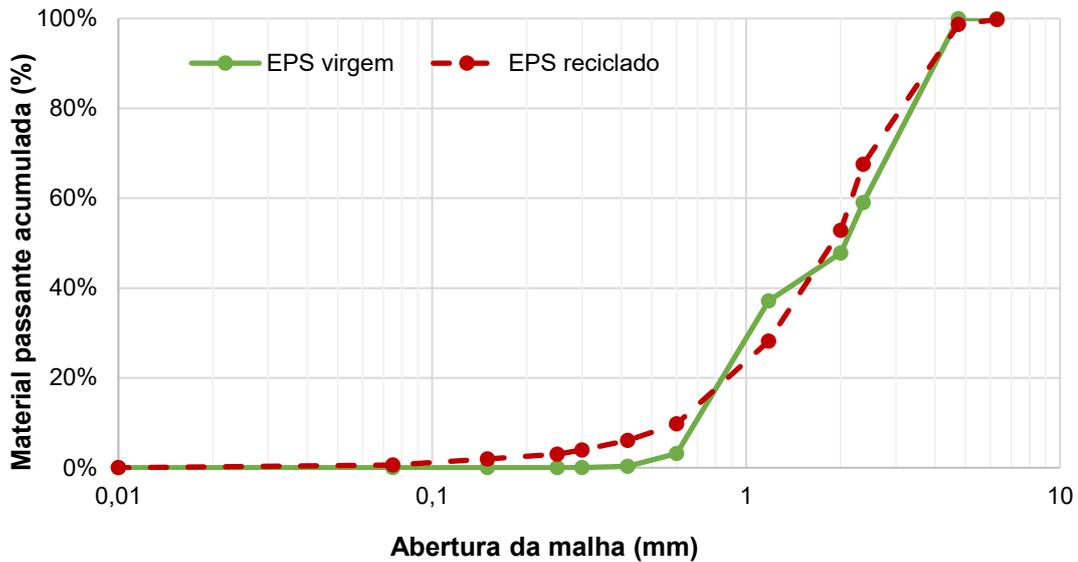


Fonte: Autor (2021).

Para que as propriedades das argamassas produzidas com EPS virgem e reciclado fossem comparáveis, era essencial que a granulometria desses fosse semelhante. Deste modo, a partir das curvas granulométricas obtidas individualmente para cada EPS, foram compostas duas novas curvas: uma de EPS reciclado, constituída pelos lotes 1 e 2; e a outra de EPS virgem elaborada a partir das pérolas finas e micropérolas. Para isso, foi feito um ajuste nas proporções dos lotes de cada material de forma que o desvio padrão entre as curvas resultantes fosse inferior a 5%. Para atingir esse objetivo, foi preciso adicionar uma fração de correção (FC) de partículas com diâmetro de 1,2 mm na curva do EPS virgem. Isso porque havia uma deficiência destas em comparação a curva do EPS reciclado. Esta fração de correção foi obtida por meio do peneiramento da micropérola. Com uma quantidade específica dessa fração, a granulometria final do EPS virgem tornou-se comparável à do reciclado.

Na Figura 13 estão apresentadas as curvas granulométricas resultantes do proporcionamento dos lotes de EPS utilizados para a produção das argamassas, e na Tabela 4 as proporções de cada material para a composição dessas curvas.

Figura 13 – Distribuição granulométrica resultante dos EPS virgem e reciclados



Fonte: Autor (2021).

Tabela 4 – Porcentagem de EPS virgem e reciclado

Tipo de EPS	Lote	Porcentagem final
Virgem	Pérola (P)	43%
	Micropérola (MP)	47%
	Fração de correção (FC)	10%
Reciclado	REC1	45%
	REC2	55%

Fonte: Autor (2021).

Após a definição da composição granulométrica dos EPS virgem e reciclado, foi feita a homogeneização e a determinação da massa específica. O procedimento empregado foi uma adaptação do método descrito na NBR NM 52 (ABNT, 2020).

Antes do ensaio, as amostras secas em estufa a 50°C foram armazenadas por 24 h em dessecador a uma temperatura de $22 \pm 2^\circ\text{C}$. A massa adotada para o ensaio foi equivalente a 0,5 g, que corresponde a aproximadamente a 1/3 da altura do frasco. Após a inserção do material no frasco, o mesmo foi preenchido com água até a marcação de 500 mL. Então, o conjunto foi vibrado, utilizando um agitador mecânico, durante cinco minutos para facilitar a acomodação das partículas no frasco e eliminar as bolhas de ar. Em seguida, completou-se o recipiente com água até a linha de 500 mL. A massa específica foi determinada pela Equação 1:

$$\rho = \frac{m_{EPS}}{V_f - V_a} \quad (1)$$

em que ρ é a massa específica, m_{EPS} é a massa de EPS, V_f o volume do frasco e V_a o volume de água adicionado ao frasco. Os resultados obtidos estão indicados na Tabela 5:

Tabela 5 – Massa específica dos EPS utilizados

Tipo de EPS	Massa específica (g/cm³)
EPS virgem	0,049
EPS reciclado	0,030

Fonte: Autor (2021).

3.1.5 ÁGUA E ADITIVO

A água utilizada na produção das argamassas foi proveniente da rede de abastecimento público da cidade de Uberlândia-MG. O aditivo utilizado foi o Master *Glenium* 3500 da BASF. De acordo com as informações técnicas, esse aditivo é denominado como superplastificante, com e tem alto índice de redução de água. Na Tabela 6 estão apresentadas algumas especificações do aditivo utilizado fornecidas pelo fabricante.

Tabela 6 – Propriedades do aditivo químico utilizado

Características	Informações
Aspecto	Líquido
Cor	Amarelo escuro
Base química	Éter policarboxilato
Massa específica (g/cm ³)	1,00 -1,20

Fonte: Fabricante (2021).

3.2 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

As argamassas produzidas para os procedimentos seguiram alguns padrões definidos para atender requisitos de desempenho da NBR 16541 (ABNT, 2016) e possibilitar a comparação entre as propriedades destas. Foram estudados três traços de argamassa, sendo um de referência (REF) e dois com a substituição 51,2% do

volume total de areia por EPS virgem e reciclado (VIR e REC, respectivamente). Esse percentual corresponde a uma substituição de 30% em relação ao volume total.

A relação água/cimento, o teor de fíler calcário e o consumo de cimento foram mantidos constantes em todas as misturas. O consumo de cimento foi estabelecido para obtenção de um valor inferior a 350 kg/m³. O teor de aditivo superplastificante foi definido para obtenção de um índice de consistência constante igual a 260±10 mm. Na Tabela 7 estão apresentadas algumas características dos traços estudados.

Tabela 7 – Características dos traços das argamassas estudadas

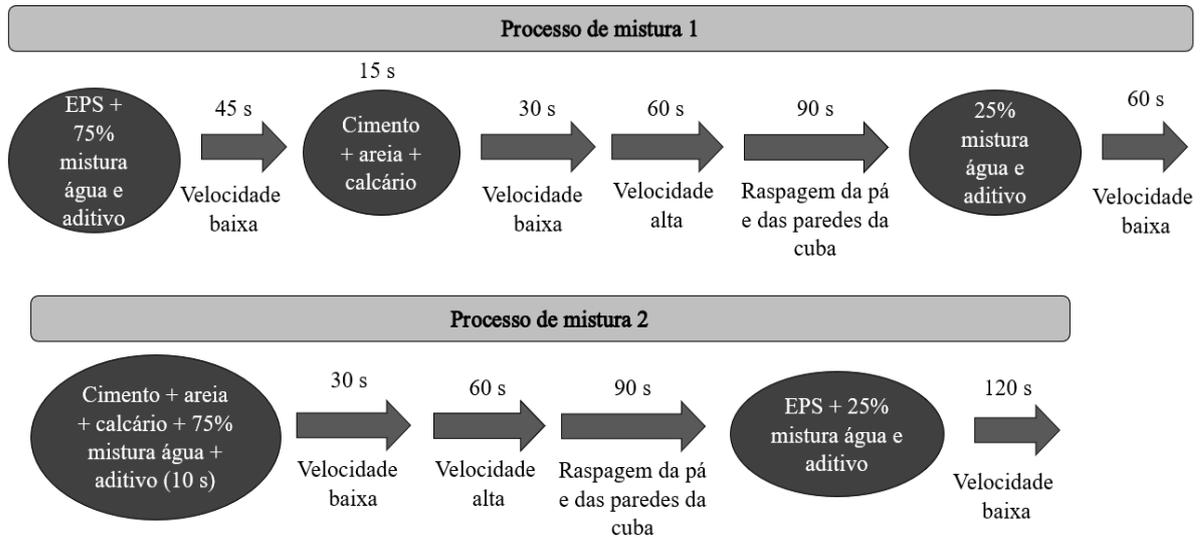
	Materiais	REF	REC	VIR
Proporção em massa (%)	Cimento	1,00	1,00	1,00
	Areia	4,50	2,19	2,19
	Fíler calcário	0,50	0,50	0,50
	EPS	-	0,03	0,04
	Relação a/c	0,70	0,70	0,70
	Teor aditivo (%) ¹	0,34	0,20	0,01
Proporção em volume (%)	Cimento	1,00	1,00	1,00
	Areia	5,85	2,56	2,56
	Fíler calcário	0,57	0,57	0,57
	EPS	-	2,69	2,68
	Relação a/c	2,14	2,14	2,14
Consumo de cimento (kg/m³)		341,53	341,36	341,36

¹ Em relação à massa de cimento.

Fonte: Autor (2021).

A argamassa de referência foi misturada conforme os procedimentos descritos pela NBR 16541 (ABNT, 2016). Nas misturas com EPS, foram avaliados dois procedimentos de misturas (M1 e M2) definidos em função da ordem de colocação dos materiais. Na mistura 1, os materiais foram adicionados conforme estabelecido por Babu *et al.* (2005). Primeiramente, colocava-se parte da água de amassamento, o aditivo superplastificante e as partículas de EPS secos na cuba; estes eram homogeneizados em velocidade baixa durante 45 segundos para o umedecimento dos agregados. Em seguida, eram adicionados ao misturador o cimento, a areia e o calcário, previamente homogeneizados em embalagem plástica. Efetuava-se a mistura durante 180 s. O restante da água era adicionado gradualmente e, o material misturado por mais 60 s em velocidade baixa. A mistura 2 seguiu as recomendações da NBR 16541 (ABNT, 2016), adicionando-se o EPS na etapa final. O detalhamento das misturas executadas pode ser verificado na Figura 14.

Figuras 14 – Processos de mistura adotados



Fonte: Autor (2021).

O tempo total de ambos processos de mistura foi mantido constante e igual a cinco minutos. Houve o acréscimo de 1 min em relação ao tempo estabelecido pela NBR 16541 (ABNT, 2016) para que as misturas contendo EPS fossem homogeneizadas adequadamente. Todas as misturas foram realizadas utilizando uma argamassadeira de bancada (Pavitest, modelo C3010) em ambiente com temperatura e umidade controladas ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $60\pm 5\%$).

Portanto, nesse procedimento experimental existem duas variáveis, a primeira é o tipo de mistura a ser utilizado, e a segunda o tipo de EPS (virgem ou reciclado) que substitui determinado volume de areia final. O traço sem EPS (REF) foi incluso para que o efeito da adição EPS possa ser melhor investigado. Dessa forma o número de experimentos conduzidos é dado pelas combinações representadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Tabela de Experimentos

Número de Experimentos	Variáveis	
	Tipo de EPS	Tipo de Mistura
1	EPS reciclado (REC)	Mistura 1 (M1)
2	EPS reciclado (REC)	Mistura 2 (M2)
3	EPS virgem (VIR)	Mistura 1 (M1)
4	EPS virgem (VIR)	Mistura 2 (M2)
REF	Traço de Referência (Mistura seguindo a NBR 165414:2016)	

Fonte: Autor (2021).

3.3 MÉTODOS DE ENSAIO

Para avaliação das propriedades das argamassas foram realizados ensaios nos estados fresco e endurecido.

3.3.1 ESTADO FRESCO

Os ensaios no estado fresco foram realizados para cada argamassa estudada, sendo feitas três repetições para cada mistura realizada. O ensaio de índice de consistência foi executado conforme a metodologia prescrita pela NBR 13276 (ABNT, 2016).

A determinação da massa específica da mistura seguiu às disposições da NBR 13278 (ABNT, 2005), o recipiente cilíndrico utilizado possui volume de 370,8 cm³ e era não absorvente. Por fim, a capacidade de retenção de água das argamassas foi calculada conforme as especificações da NBR 13277 (ABNT, 2005).

3.3.2 ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios no estado endurecido foram realizados aos 28 dias, sendo realizadas cinco repetições com cada uma das combinações estudadas. Para a realização dos ensaios foram moldados corpos de prova cilíndricos de dimensões nominais de 5 × 10 cm (diâmetro × altura) e prismáticos de dimensões nominais 4×4×16 cm (altura × largura × comprimento). Nos corpos cilíndricos, o adensamento foi executado com 30 golpes de soquete por camada, considerando quatro camadas, de acordo com NBR 7215 (ABNT, 2019). Para a moldagem dos corpos prismáticos foram consideradas duas camadas para adensamento, aplicando-se também trinta golpes em cada camada. Depois da moldagem, esses tiveram a superfície selada com plástico filme e foram curados ao ar em ambiente de laboratório por 24 horas (20±2°C e 60±5%). Após esse período, foram desmoldados e imersos em uma solução de água e cal hidratada, onde permaneciam até atingiram a idade estipulada para os ensaios.

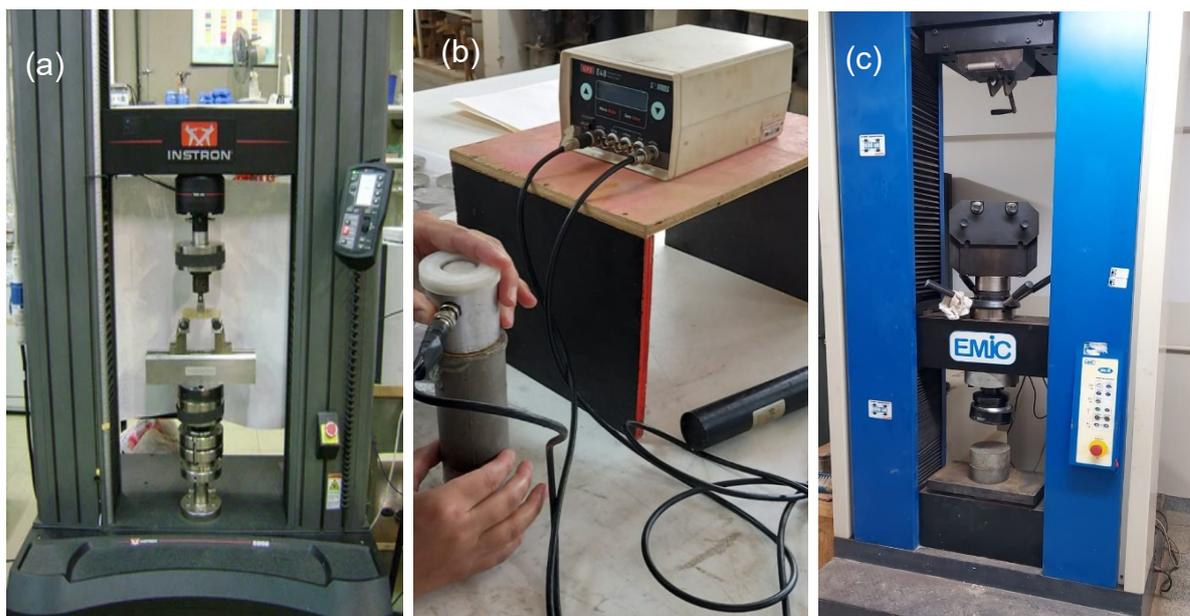
Os corpos de prova prismáticos foram utilizados para a determinação da resistência à tração na flexão. O ensaio foi executado seguindo as recomendações da NBR 13279 (ABNT, 2005), utilizando a máquina universal *Instron* 5982 100 KN com

célula de carga de 5 kN (Figura 14 a). Foram feitas quatro repetições, totalizando vinte corpos de prova.

O módulo de elasticidade dinâmico foi realizado conforme o procedimento da NBR 15630 (ABNT, 2008), utilizando equipamento de ultrassom UPV, modelo 58-E48 da marca *Controls* (Figura 14 b) e os mesmos corpos de prova moldados para o ensaio de resistência à compressão. Esse último seguiu as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018), utilizando máquina universal de ensaios EMIC DL 600 KN (Figura 14 c). Os corpos de prova foram retificados empregando-se um disco de neoprene entre as faces dos corpos de prova e o prato metálico.

Na Figura 15 estão ilustrados os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios do estado endurecido.

Figura 15 – Equipamentos utilizados nos ensaios no estado endurecido (a) resistência à tração na flexão; (b) módulo de elasticidade dinâmico e (c) resistência à compressão



Fonte: Autor (2021).

A determinação do índice de vazios e da absorção por imersão foi realizada em corpos de provas cilíndricos, conforme a metodologia proposta pela NBR 9778 (ABNT, 2009). No entanto, o processo de secagem que normativamente ocorre a 105°C na estufa foi realizado a 50°C e a saturação foi feita sem fervura. Isso pois, quando exposto a altas temperaturas, o EPS sofre retração e perde suas características.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

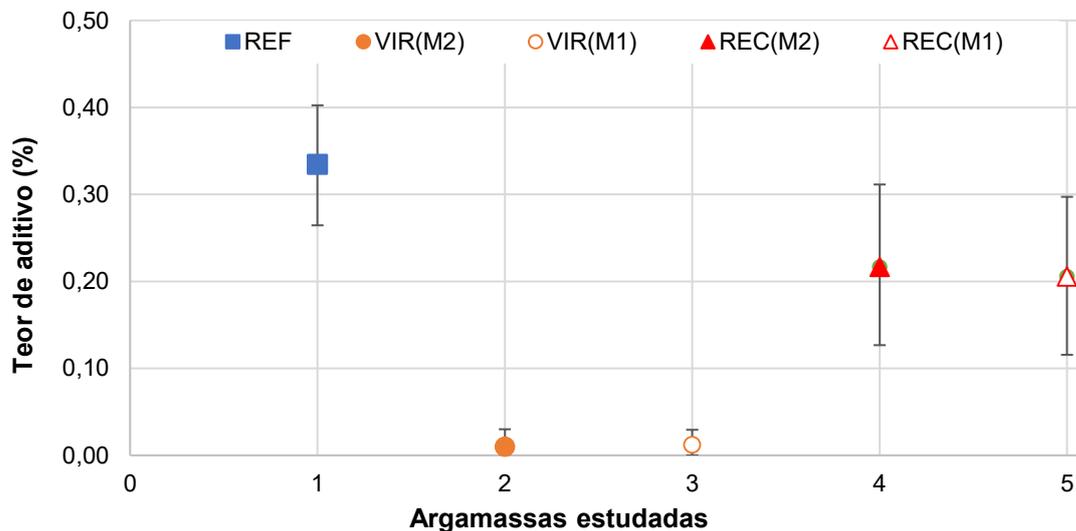
Na Tabela 9 estão apresentados os resultados médios e o desvio padrão das propriedades das argamassas avaliadas no estado fresco, e na Figura 16 a variação do teor de aditivo superplastificante para um mesmo tipo de mistura.

Tabela 9 – Resultados médios e desvio-padrão obtidos nas propriedades das argamassas avaliadas no estado fresco

Argamassas	Teor médio de aditivo (%)	Espalhamento (mm)	Densidade de massa (kg/m ³)	Retenção de água (%)
REF	0,33	258±5,45	2101±42,98	93,77±1,83
VIR(M1)	0,01	267±3,28	1446±24,00	92,50±2,49
VIR(M2)	0,01	255±3,00	1462±12,55	90,34±0,49
REC(M1)	0,22	252±6,15	1671±40,35	90,82±0,50
REC(M2)	0,21	258±7,15	1719± 47,86	91,92±0,50

Fonte: Autor (2021).

Figura 16 – Variação do teor de aditivo em função do tipo de argamassa



Fonte: Autor (2021).

Para obtenção do índice de consistência pré-estabelecido (260 ± 10 mm), observa-se que o teor de aditivo variou em função do tipo de agregado utilizado na produção das argamassas. As argamassas de referência produzidas com a areia natural tiveram um consumo superior às com o uso de EPS. Como reportado por

Catoia (2012) e Carvalho; Motta (2019), quando o agregado miúdo convencional é substituído por pérolas de EPS, o caráter hidrofóbico deste aumenta a disponibilidade de água na matriz e, como resultado, a argamassa tende a ter maior fluidez.

As misturas com EPS virgem propiciaram um menor consumo em relação ao reciclado, sendo esse equivalente a 0,01% em relação à massa de cimento. Isso provavelmente é explicado pelas características da textura das pérolas, que tem superfícies mais esféricas e menos porosas e irregulares do que as partículas de reciclado.

Outro aspecto que pode ser observado na Figura 16 é que, para um mesmo tipo de agregado, não houve variação significativa o teor de aditivo superplastificante, indicando que o procedimento de mistura não interferiu na dosagem do mesmo.

Foi verificado que as argamassas obtiveram fluidez satisfatória e que os procedimentos de mistura foram eficazes em garantir o equilíbrio da matriz, de modo que não houve segregação das partículas de EPS como exemplificado na Figura 17.

Figura 17 – Determinação do índice de consistência de uma das argamassas com EPS reciclado



Fonte: Autor (2021).

Nota-se que houve uma redução na densidade de massa das argamassas contendo o EPS, assim como era esperado. Porém, quando comparados entre si, as argamassas com EPS reciclado apresentaram densidade ligeiramente superior às respectivas proporções com EPS virgem, um resultado diferente do constatado por Carvalho e Motta (2019). Tal distinção pode estar relacionada às características das superfícies das partículas de cada material adquirido. Carvalho e Motta (2019) produziram o poliestireno reciclado a partir da trituração, e posterior peneiramento de

EPS virgem. O EPS reciclado utilizado no presente estudo, faz parte de lotes de resíduo derivados da construção civil constituídos por fragmentos de outros materiais, conforme dito anteriormente. Vale destacar ainda que houve diferença estatística¹ entre as argamassas estudadas em relação à massa específica; aplicando-se o teste de Duncan, verifica-se a formação de quatro grupos distintos: (1) EPSVM2 e EPSVM1; (2) EPSRM2; (3) EPSRM1; e (4) REF.

A retenção de água é uma propriedade relacionada principalmente com a quantidade de finos em argamassas, como a proporção de cimento e fíler calcário foi mantida constante nos traços, as únicas variáveis que poderiam influenciar na retenção de água seria o tipo de EPS ou tipo de mistura empregado. No entanto, a partir dos resultados obtidos, não foi possível verificar diferença estatística dessa propriedade entre as argamassas estudadas.

4.2 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados das propriedades físicas e mecânicas das argamassas estudadas aos 28 dias.

Tabela 10 – Resultados médios e desvio-padrão obtidos nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas estudadas

Traço	Massa Específica (kg/m ³)	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Absorção Imersão (%)	Índice de Vazios (%)
REF	2314±8,25	33,86±0,84	27,51±0,78	4,72±0,17	5,38±0,01	11,07±0,02
VIR(M1)	1589±29,49	13,36±0,21	6,88±0,51	2,65±0,04	9,02±0,01	12,59±0,01
VIR(M2)	1594±29,49	11,91±1,92	6,68±0,38	2,85±0,09	8,51±0,02	12,00±0,01
REC(M1)	1845±12,32	16,36±0,45	10,40±0,26	3,21±0,12	9,12±0,02	14,41±0,02
REC(M2)	1867±5,94	18,20±1,38	8,43±0,21	2,76±0,05	8,44±0,03	13,71±0,03

Fonte: Autor (2021).

Os resultados mostram que a substituição da areia por EPS reduziu a massa específica e as propriedades mecânicas das argamassas estudadas. Este resultado era esperado e segue a mesma tendência que os valores de densidade de massa determinada no estado fresco. As argamassas com EPS reciclado, com maior massa

¹ Análise estatística apresentada no anexo A.

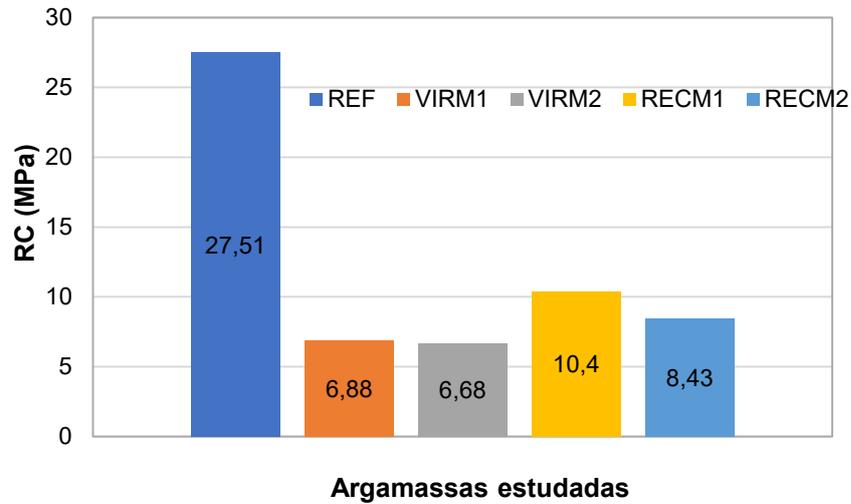
específica, tiveram maior desempenho mecânico em relação às com poliestireno expandido virgem. Percebe-se que assim como nos resultados de massa específica do estado fresco, nos do estado endurecido, a densidade das argamassas com EPS reciclado foram maiores que as com pérolas virgens. Essa diferença não é explicada pelas massas específicas de cada tipo de EPS calculadas para a caracterização desses materiais, portanto, é sensato propor que outro fator não considerado pela pesquisa é responsável por esse efeito. Uma análise das microestruturas de ambas as partículas poderia verificar, por exemplo, se os grânulos de EPS reciclado tem um perfil superficial com diversas descontinuidades que eram vazias anteriormente ao processo de mistura e que foram preenchidas por pasta de cimento durante a produção das argamassas.

A redução do módulo de elasticidade das argamassas com EPS indicam que essas possuem maior capacidade de absorver deformações. Essa redução foi mais acentuada para os traços com partículas virgens, provavelmente devido seu formato esférico regular. Quanto ao método de mistura, percebe-se que não houve alteração das propriedades mecânicas em relação aos métodos estudados no que se refere ao uso do EPS virgem. No que se refere ao uso de EPS reciclado, houve uma pequena variação nos valores de resistência à compressão. A M1 apresentou uma resistência média 23% superior a mistura M2, porém o módulo de elasticidade foi 11% inferior (Tabela 10).

Na Figura 18 estão apresentados os valores de resistência à compressão aos 28 dias das argamassas estudadas. Observa-se que o uso do EPS reciclado apresentou uma resistência 1,5 vezes superior ao EPS virgem (mistura 1) e 1,23 vezes para a mistura 2.

Uma hipótese que pode elucidar a diferença entre os desempenhos mecânicos das argamassas com os dois tipos de EPS, é uma melhor aderência das partículas de reciclado. Enquanto estas tendem a possuir uma superfície mais irregular com possíveis pontos de ancoragem onde a matriz cimentícia pode penetrar como descrevem Gu e Ozbakkaloglu, (2016), as pérolas de poliestireno expandido virgem tem superfície esférica mais regular que dificulta a aderência à pasta de cimento. Dessa forma, a matriz com EPS reciclado é mais coesa e por isso apresentou melhores resultados nos ensaios de resistência a compressão.

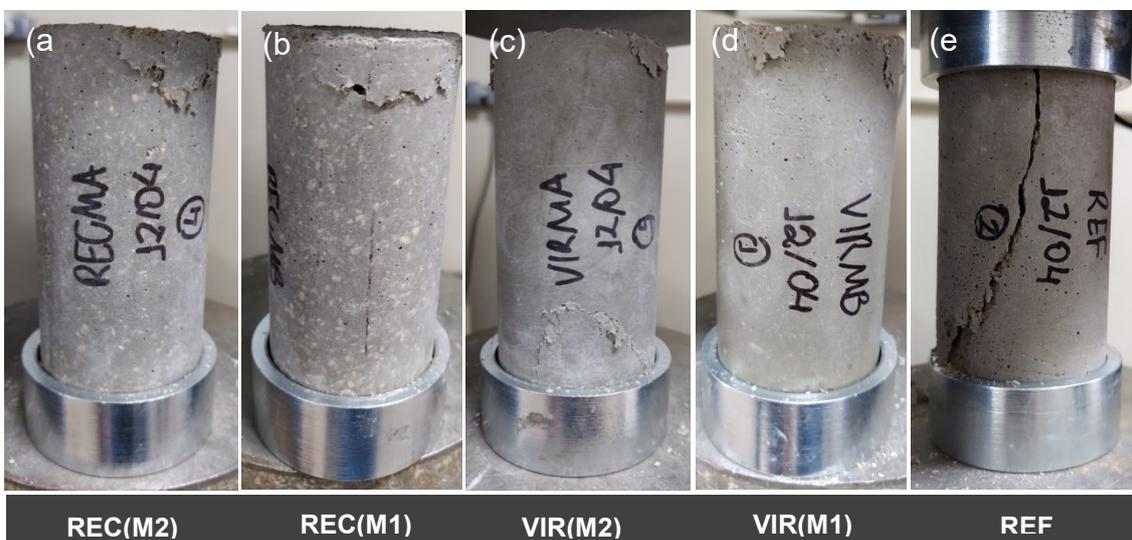
Figura 18 – Resistência à compressão das argamassas estudadas



Fonte: Autor (2021).

Analisando a forma de ruptura dos corpos de prova, após o ensaio de resistência à compressão, foi possível perceber que as amostras com uso de EPS apresentam rupturas localizadas nas extremidades dos corpos de prova, já os de referência, tiveram uma ruptura característica, ou seja sem grandes deformações e a 45° em relação ao eixo de aplicação de carga (Figura 19). Isso também foi constatado por Pires, (2017) e Bussolo, (2020). Segundo Tecnocell (2019), o poliestireno expandido comporta-se de uma maneira elástica até a deformação atingir cerca 2%, mas quando a força de compressão supera o limite de elasticidade, provoca uma deformação permanente nos corpos de prova.

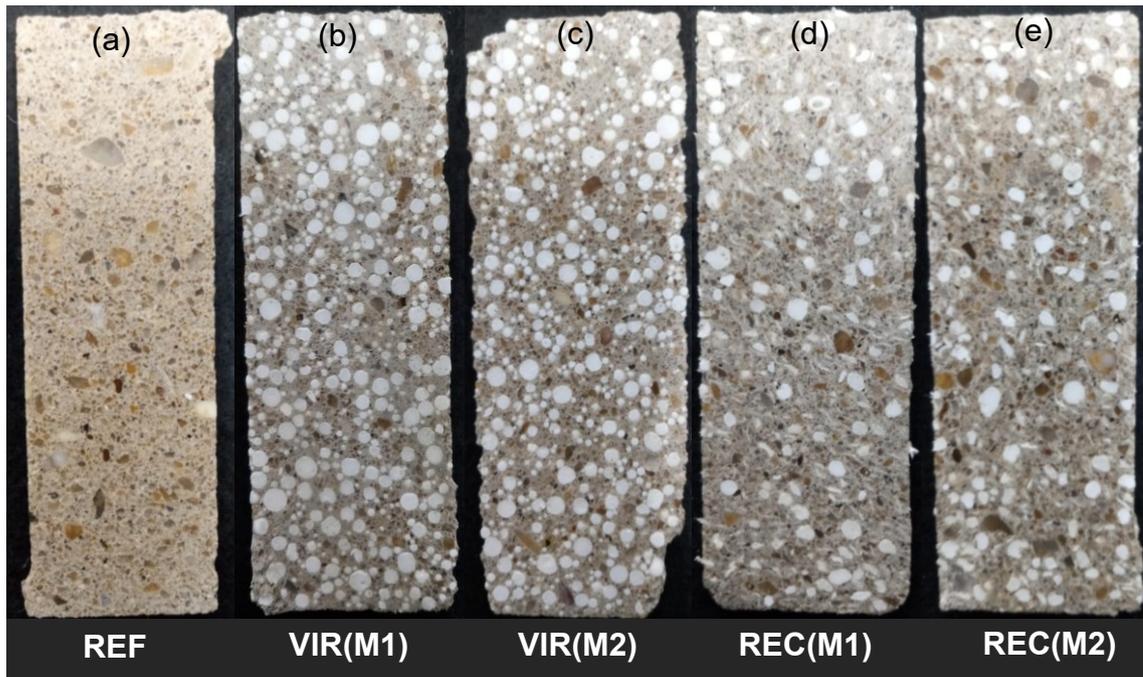
Figura 19 – Formas de ruptura dos corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão para os diferentes tipos de argamassa analisados



Fonte: Autor (2021).

Todas amostras ensaiadas à compressão apresentaram distribuição uniforme das partículas de EPS, sejam elas recicladas ou virgem, como mostram as seções longitudinais de alguns corpos de prova selecionados ao acaso após a ruptura (Figura 20).

Figura 20 – Seção longitudinal de corpos de prova após ensaio de resistência à compressão para os diferentes tipos de argamassa



Fonte: Autor (2021).

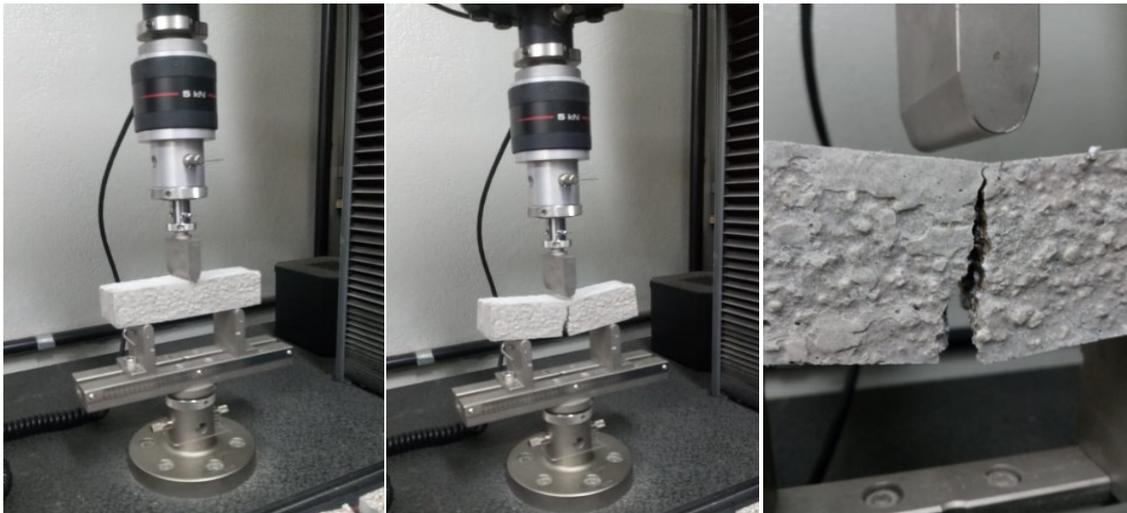
Em relação à resistência à tração na flexão, a argamassa de referência (REF) apresentou cerca de 17% do valor da resistência à compressão. Ao comparar as argamassas com EPS, constatou-se que VIR e REC apresentaram valores de resistência à tração de cerca de 40% e 31% da resistência à compressão, respectivamente. Esse comportamento está relacionado a menor rigidez das argamassas com EPS e foi semelhante aos obtidos por Boita e Bellei, (2019). Segundo os mesmos, as partículas de EPS absorvem parte das deformações causadas nas amostras submetidas aos esforços mecânicos de tração.

Além disso, assim como constatado nos resultados de resistência à compressão, as argamassas com EPS reciclado preparadas conforme M1 ensaiadas à tração, também tiveram melhores desempenhos, de 9 a 14% maior que a contraparte que seguiu M2.

As propriedades mecânicas dos materiais estão relacionadas ao índice de vazios. Quanto maior a porosidade, menor a resistência mecânica de um material. Isso foi constatado para a argamassa de referência que apresentou menor índice de vazios em relação às misturas com EPS. Os valores de absorção de água e índice de vazios das argamassas com EPS não explicaram o desempenho mecânico dessas. A argamassa RECM1 apresentou maior resistência mecânica em relação às demais misturas com EPS, porém maior índice de vazios e capacidade de absorção. Uma hipótese é que tal fato pode ser ocasionado pelas características superficiais do EPS reciclado, carecendo de mais investigações.

A Figura 21 mostra um dos os corpos de prova prismáticos com EPS virgem durante o ensaio de resistência a tração por flexão com a célula de carga de 5KN.

Figura 21 – Ensaio de resistência a tração por flexão em amostra VIR



Fonte: Autor (2021).

4.3 CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS CONFORME NBR 13281

A NBR 13281 (ABNT, 2005) especifica os requisitos para a classificação das argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos em seis classes de acordo com cada uma das suas propriedades, seja no estado fresco ou endurecido. No presente tópico, foi feita a classificação das argamassas estudadas com base nessa norma. As classes em que se enquadraram são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Classificação das argamassas estudadas segundo NBR 13281

Propriedade	REF	VIRM1	VIRM2	RECM1	RECM2
Densidade de massa ¹	Classe D6	Classe D3	Classe D3	Classe D4	ClasseD4
Retenção de água ²	Classe U4				
Rc (MPa) ³	Classe P6	Classe P5	Classe P5	Classe P6	Classe P5
Rt (MPa) ⁴	Classe R6	Classe R3	Classe R3	Classe R4	Classe R4
Massa específica ⁵	Classe M6	Classe M4	Classe M4	Classe M5	Classe M5

¹ Densidade de massa: D1 \leq 1400 kg/m³; D3 – 1400 a 1800 kg/m³; D4 – 1600 a 2000 kg/m³.

² Retenção de água: U1 \leq 78%; U4 – 86 a 94%; U6 – 95 a 100%;

³ Resistência à compressão: P1 \leq 2 MPa; P5 – 5,5 a 9,0 MPa; P6 > 8 MPa;

⁴ Resistência à tração na flexão: R1 \leq 1,5 MPa; R3 – 1,5 a 2,7 MPa; R4 -2,0 a 3,5 MPa; R6 >3,6 MPa;

⁵ Massa específica: M1 \leq 1200 kg/m³; M4 – 1400 a 1800 kg/m³; M5 – 1600 a 2000 kg/m³; M6 > 1800 kg/m³.

Fonte: Autor (2021).

Tendo em vista as principais vantagens citadas em relação ao uso de poliestireno expandido em argamassas (maior leveza, desempenho térmico superior e economia de materiais) e as maiores limitações (baixa resistência), conclui-se que a aplicação mais promissora para esses compósitos é para revestimentos de paredes e tetos. Portanto, os resultados de propriedades do estado fresco e endurecido encontrados nesta pesquisa foram comparados com os exigidos pela NBR 13281 (ABNT, 2005).

5 CONCLUSÃO

Com base na literatura e nos resultados obtidos, para os diferentes traços de argamassa estudados, foram feitas as seguintes considerações sobre a influência do processo de mistura nas propriedades de argamassas com substituição parcial de agregado por EPS virgem e reciclado:

- Foi possível obter um índice de consistência adequado (260 ± 10 mm) para as argamassas e evitar a segregação do EPS ao controlar a fluidez com a dosagem de aditivo superplastificante.
- Argamassas com EPS necessitaram de menos aditivo para atingir a consistência desejada do que o traço de referência, sendo que o traço com partículas virgens precisou de cerca de 0,01% em relação à massa de cimento e o EPS reciclado cerca de 0,20%. Esse comportamento está relacionado à substituição de areia por um agregado miúdo de conhecido caráter hidrofóbico o que aumenta a disponibilidade de água na matriz. Por sua vez, a diferença constatada entre o uso de partículas virgens e recicladas provavelmente ocorre devido as características superficiais do EPS reciclado.
- Para um mesmo tipo de EPS, não houve variação significativa do teor de aditivo superplastificante, indicando que o procedimento de mistura não interferiu na dosagem do mesmo.
- Assim como esperado, as argamassas contendo EPS apresentaram menor densidade no estado fresco e endurecido, porém, quando comparadas entre si, as argamassas com EPS reciclado apresentaram densidade ligeiramente superior às respectivas proporções com EPS virgem. Tal distinção pode estar relacionada às características das superfícies das partículas de cada material adquirido.
- Não foi verificada diferença estatística entre as massas específicas das argamassas quando comparadas somente quanto ao tipo de mistura (M1 e M2).
- Quanto à retenção de água das argamassas não foi possível constatar diferenças significativas dessa propriedade entre os traços estudados.
- No estado endurecido, as propriedades mecânicas das argamassas com EPS apresentaram menor desempenho em relação à argamassa de referência,

assim como o esperado. No entanto, os traços com poliestireno expandido reciclado, desempenharam melhor que os traços com partículas virgens. Essa diferença pode estar relacionada a melhor aderência entre matriz e agregado que a superfície irregular do EPS reciclado propicia. A diferença entre densidades também é um fator importante para essa constatação.

- A mistura (M1) teve melhor desempenho que sua contraparte (M2), quanto aos resultados à compressão, principalmente ao analisar as argamassas com EPS reciclado. REC(M1) apresentou uma resistência média 23% superior àquela atingida por REC(M2).
- Quanto ao módulo de elasticidade dinâmico, as argamassas com EPS apresentaram maior capacidade de deformação que o traço de referência, isso porque o poliestireno expandido é capaz de absorver maiores deslocamentos que o restante da matriz e se comportar de forma elástica e plástica por mais tempo. O EPS com partículas virgens demonstrou ser ligeiramente melhor em absorver as tensões, provavelmente devido ao formato regular de esfera. O tipo de mistura não influenciou significativamente essa propriedade.
- Ao se analisar a ruptura dos corpos de prova, constatou-se que as amostras com EPS apresentaram fraturas localizadas mais nas extremidades, enquanto os corpos de prova de referência tiveram uma ruptura mais destrutiva. Esse comportamento também está relacionado à diminuição do módulo de elasticidade e, por conseguinte, a rigidez.
- Em relação a resistência à tração na flexão, as argamassas com EPS tiveram um desempenho melhor ao se verificar proporcionalmente as reduções de resistência à compressão. Enquanto a referência teve uma resistência à tração de cerca de 17% do valor da resistência à compressão, as argamassas com EPS virgem e reciclado apresentaram valores de 40% e 31%, respectivamente. Mais uma vez, a possível explicação é a menor rigidez.
- Seguindo a mesma tendência identificada nos ensaios de compressão, a argamassa com reciclado e com a mistura M1, teve um desempenho 14% melhor que sua contraparte com a mistura M2.
- O índice de vazios e absorção de água encontradas para as argamassas do estudo foram maiores para aquelas com substituição parcial de EPS. Não foi possível explicar o melhor desempenho mecânico dos traços com partículas

de reciclado com base nessas propriedades, visto que a argamassa com poliestireno que apresentou melhores resultados mecânicos, também foi a com maior índice de vazios.

- Por fim, todas as argamassas estudadas apresentaram propriedades físicas e mecânicas que se enquadram nas exigências da norma NBR 13281 (ABNT, 2005), e, portanto, têm potencial para aplicação em campo, principalmente para revestimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIQUIM. **Associação Brasileira da Indústria Química**. Levantamento da indústria química e de resíduos. São Paulo, 2017.

ABRAPEX. **Associação Brasileira do Poliestireno Expandido**. Manual de Utilização EPS na Construção Civil. São Paulo: Pini, 2006.

ABRAPEX. **Associação Brasileira do Poliestireno Expandido**. O EPS na Construção Civil: Características do poliestireno expandido para utilização em edificações. ACEPE. São Paulo, 2020.

ABRELPE. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos especiais**. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>>. Acesso em: 20 abril 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT**. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. p. 6, 2003.

ABNT. NBR 7211: Aggregates for concrete-Specification. p. 1–15, 2005a.

ABNT. NBR 13278 : Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 2005b.

ABNT. NBR 13277 : Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. 2005c.

ABNT. NBR 13281 : Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Requisitos. p. 8, 2005d.

ABNT. NBR 9778 : Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. 2009.

ABNT. NBR 16372 : Cimento Portland e outros materiais e pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). p. 12, 2015.

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

ABNT. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes

e tetos – Índice De Consistência. p. 1–2, 2016b.

ABNT. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. 2018.

ABNT. ABNT NBR 7215 - Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica. p. 8, 2019.

ABNT. NBR-16826: Aditivos para argamassas inorgânicas - Definição, classificação e métodos de ensaio. p. 12, 2020.

ABNT. NBR 7181. Solo — Análise granulométrica. p. 12, 2018.

ABNT. NBR NM 45. Agregados : Determinação da massa unitária e do volume de vazios. p. 8, 2006.

ABNT. NBR NM 52 : Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. v. 0002, p. 85, 2009.

ALVES, C. D. R. Avaliação do comportamento higrotérmico de concretos produzidos com resíduos de borracha de pneu e poliestireno expandido para aplicação em paredes de concreto. p. 201, 2020.

AMIANTI, M.; BOTARO, V. R. Concreto impregnado com polímero (CIP): uso e aplicação do EPS reciclado para redução da permeabilidade de superfícies de concreto. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 13, n. 4, p. 664–673, 2008.

ARANTES, I. S. C.; LEÃO, L. S. Dosagem experimental de concreto com agregado de EPS : estudo de propriedades mecânicas e parâmetros de durabilidade. Artigo – Seminário 2 Microestrutura e dosagem de concreto, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

BABU, D. S.; GANESH BABU, K.; WEE, T. H. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1218–1223, 2005.

BOITA, A.; BELLEI, P. ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) NA ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO. **Revista Tecnológica**, v. N.9, p. 42–55, 2019.

BUSSOLO, C. DE S. INFLUÊNCIA DO USO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COMO AGREGADO EM ARGAMASSA. Trabalho de conclusão de curso –

Centro Tecnológico de Joinville. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Joinville. 2020.

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

CARVALHO, C. H. R.; MOTTA, L. A. C. Study about concrete with recycled expanded polystyrene. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 6, p. 1390–1407, 2019.

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

CHEN, B.; LIU, J. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 7, p. 1259–1263, 2004.

CHEN, B.; LIU, J. Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 1, p. 7–11, 2007.

CHEN, R.; ZENG, Z.; ZHOU, K. A review on the research of concrete with expanded polystyrene beads as aggregate. **Advanced Materials Research**, v. 374–377, p. 1598–1601, 2012.

FERNÁNDEZ-ALTABE, V.; CASANOVA, I. Influence of mixing sequence and superplasticiser dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1222–1230, 2006.

FRANÇA, M. S. D. E. COMPORTAMENTO DE MISTURA DE SISTEMAS CIMENTÍCIOS MULTIFÁSICOS REATIVOS. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. p. 133. 2013.

FUKUI, E. et al. Efeito do procedimento de mistura no comportamento no estado fresco de argamassas de revestimento produzida em obra e industrializada. Artigo. **Revista Matéria**, v. 23, n. 1, p. 2-10, 2018.

GVR. **Global Expanded Polystyrene Market Size Report, 2021-2028**. Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/expanded-polystyrene-eps-market>>. Acesso em: 13 abr. 2021.

GOLDSZAL, A.; BOUSQUET, J. Wet agglomeration of powders: From physics toward process optimization. **Powder Technology**, v. 117, n. 3, p. 221–231, 2001.

GROTE, Z. V; SILVEIRA, J. L. Exergética De Um Processo De Reciclagem De Poliestireno. **Revista Mackenzie de engenharia e computação**, p. 9–27, 2010.

GU, L.; OZBAKKALOGLU, T. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. **Waste Management**, v. 51, p. 19–42, 2016.

HERNÁNDEZ-ZARAGOZA, J. B. et al. Cellular concrete bricks with recycled expanded polystyrene aggregate. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2013, n. December, 2013.

IVESON, S. M. et al. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review. **Powder Technology**, v. 117, n. 1–2, p. 3–39, 2001.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA O.R, F. Livro. Procel – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3° Edição, p. 50–70, 2012.

LE ROY, R.; PARANT, E.; BOULAY, C. Taking into account the inclusions' size in lightweight concrete compressive strength prediction. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 770–775, 2005.

NEGRÃO, J. et al. Incorporação do Poliestireno Expandido (EPS) em Argamassas Cimentícias Incorporation of Expanded Polystyrene (EPS) in Cement Mortars. **IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**, v. 03, 2019.

PASSOS, P. M.; CARASEK, H. Argamassas com resíduos para revestimento isolante térmico de parede pré-moldada de concreto. **Cerâmica**, v. 64, n. 372, p. 577–588, 2018.

PIRES, R. DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE POLIESTIRENO EXPANDIDO. Trabalho de conclusão de curso – Engenharia de Infraestrutura. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, p. 51, Joinville (SC), 2017.

SAMPER, M. D. et al. Recycling of expanded polystyrene from packaging. **Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology**, v. 26, n. 2, p. 83–92, 2010.

SANT’HELENA, M. **Estudo para aplicação de Poliestireno Expandido (EPS) em concretos e argamassas**. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, 2009.

SILVA, R. P. et al. Avaliação Do Comportamento Da Argamassa No Estado Fresco Através Dos Métodos De Mesa De Consistência , Dropping Ball E Squeeze Flow. **VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas**, p. 106–120, 2005.

TESSARI, J. Utilização de poliestireno expandido e potencial de aproveitamento de seus resíduos na construção civil. Dissertação (Mestrado). **Universidade Federal De Santa Catarina**. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil, p. 100, Florianópolis, 2006.

TITTARELLI, F. et al. Effect of Using Recycled Instead of Virgin EPS in Lightweight Mortars. **Procedia Engineering**, v. 161, p. 660–665, 2016.

TRUSSONI, M.; HAYS, C. D.; ZOLLO, R. F. Comparing lightweight polystyrene concrete using engineered or waste materials. **ACI Materials Journal**, v. 109, n. 1, p. 101–107, 2012.

YANG, M.; JENNINGS, H. M. **Influences of Mixing Methods on the Microstructure and Rheological Behavior of Cement Paste**. *Advanced Cement Based Materials*, v. 2, 1995.

ANEXO A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Foi feita análise de variâncias (ANOVA) a um nível de probabilidade de 5% e teste de comparação múltipla de médias (teste de Duncan) utilizando o programa Statistica 9.0 da Statsoft®.

Existe diferença significativa entre as argamassas estudadas em relação à massa específica; aplicando-se o teste de Duncan, verifica-se a formação de quatro grupos distintos: (1) EPSVM2 e EPSVM1; (2) EPSRM2; (3) EPSRM1; e (4) REF.

Tabela A1 - Análise de variância da influência do tipo de argamassa na massa específica.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{cal}</i>	<i>F_{tab}</i>	<i>Resultado</i>
<i>Entre grupos (tipo de argamassa)</i>	2,15	4	0,54	426,85	2,09	Significativo
<i>Dentre grupos (resíduo)</i>	0,05	37	0,00	-		
<i>Total</i>	2,20	41	0,54	-		

Fonte: Autor (2021).

Em relação à capacidade de retenção de água, a análise estatística mostrou que não há diferença significativa entre as argamassas estudadas; sendo o tipo de EPS utilizado e o processo de mistura fatores que não exerceram influência sobre essa propriedade.

Tabela A2 - Análise de variância da influência do tipo de argamassa na capacidade de retenção de água.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{cal}</i>	<i>F_{tab}</i>	<i>Resultado</i>
<i>Entre grupos (tipo de argamassa)</i>	24,1	4	6,0	2,00	2,60	Não Significativo
<i>Dentre grupos (resíduo)</i>	30,2	10	3,0	-		
<i>Total</i>	54,3	14	0,54	-		

Fonte: Autor (2021).

Tabela A3 - Análise de variância do efeito do tipo de EPS e processo de mistura na capacidade de retenção de água.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{cal}</i>	<i>F_{tab}</i>	<i>Resultado</i>
<i>Tipo de EPS</i>	1,23	1	1,23	0,38	3,28	Não Significativo
<i>Processo de mistura</i>	3,02	1	3,02	0,94	3,28	Não Significativo
<i>EPS x Mistura</i>	5,93	1	5,93	1,85	3,28	Não Significativo
<i>Erro</i>	22,38	7	3,20	-		
<i>Total</i>	32,56	10		-		

Fonte: Autor (2021).

Existe diferença significativa entre as argamassas estudadas em relação à resistência à compressão; aplicando-se o teste de Duncan, verifica-se a formação de três grupos distintos: (1) EPSVM2; EPSVM1; EPSRM2; (2) EPSRM1; e (3) REF.

Tabela A4 - Análise de variância da influência do tipo de argamassa na massa específica.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{cal}</i>	<i>F_{tab}</i>	<i>Resultado</i>
<i>Entre grupos (tipo de argamassa)</i>	1597,09	4	399,27	415,05	2,25	Significativo
<i>Dentre grupos (resíduo)</i>	19,24	20	0,96	-		
<i>Total</i>	1616,33	24	400,23	-		

Fonte: Autor (2021).

Os resultados mostram que tanto o efeito isolado do tipo de EPS, virgem ou reciclado, ou do procedimento de mistura interferem significativamente na resistência à compressão das argamassas.

Tabela A5 -Análise de variância do efeito do tipo de EPS e processo de mistura na resistência à compressão.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{cal}</i>	<i>F_{tab}</i>	<i>Resultado</i>
<i>Tipo de EPS</i>	21,619	1	21,619	29,85	3,05	Significativo
<i>Processo de mistura</i>	13,504	1	13,504	18,65	3,05	Significativo
<i>EPS x Mistura</i>	10,315	1	10,315	14,25	3,05	Significativo
<i>Erro</i>	11,587	16	11,587	-		
<i>Total</i>		19		-		

Fonte: Autor (2021).

Existe diferença significativa entre as argamassas estudadas em relação à absorção de água; aplicando-se o teste de Duncan, verifica-se a formação de três grupos distintos: (1) EPSVM2; EPSRM2; (2) EPSRM1; EPSVM1 e (3) REF. Independentemente do tipo de EPS, o procedimento de mistura interfere significativamente nos valores de absorção de água das argamassas.

Tabela A6 - Análise de variância da influência do tipo de argamassa na absorção de água.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{cal}</i>	<i>F_{tab}</i>	<i>Resultado</i>
<i>Entre grupos (tipo de argamassa)</i>	0,004	4	0,004	431,75	2,25	Significativo
<i>Dentre grupos (resíduo)</i>	0,000	20	0,000	-		
<i>Total</i>	0,004	24		-		

Fonte: Autor (2021).