



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFRAESTRUTURA E
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

MAX WEVERTON MOREIRA DA SILVA

**PLACAS CIMENTÍCIAS PRODUZIDAS COM A INCORPORAÇÃO
DE PÉROLAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)**

Tucuruí – PA

2020

MAX WEVERTON MOREIRA DA SILVA

**PLACAS CIMENTÍCIAS PRODUZIDAS COM A INCORPORAÇÃO DE PÉROLAS
DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientadora: Prof^a. Dr.^a Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro.

Tucuruí – PA

2020

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

- D111p da Silva, Max Weverton Moreira.
Placas cimentícias produzidas com a incorporação de
pérolas de poliestireno expandido (EPS) / Max Weverton
Moreira da Silva. — 2020.
94 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof^a. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro
Cordeiro
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2020.
1. placa cimentícia. 2. poliestireno expandido. 3.
argamassa leve. I. Título.

CDD 624

MAX WEVERTON MOREIRA DA SILVA

**PLACAS CIMENTÍCIAS PRODUZIDAS COM A INCORPORAÇÃO DE PÉROLAS
DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientadora: Prof^a. Dr.^a Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro.

Aprovada em _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro – Orientadora
(Universidade Federal do Pará)

Prof. Dr. Daniel Tregnago Pagnussat – Examinador Externo
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul)

Prof^a. Dra. Isaura Nazaré Lobato Paes – Examinador Externo
(Universidade Federal do Pará)

Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima de Souza – Examinador Interno
(Universidade Federal do Pará)

*Dedico este trabalho aos meus pais
Aloísio Sousa da Silva e Sandra Moreira da Silva,
que muito me apoiaram e incentivaram durante a jornada.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que me permitiu ter saúde e força para enfrentar as dificuldades durante a realização deste trabalho.

A minha família, por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuiu para a minha formação acadêmica e realização desse mestrado.

A prof. Luciana Cordeiro, pela orientação e ensinamentos durante esta jornada, que foram fundamentais para que essa pesquisa fosse realizada.

Aos amigos do Laboratório, que tornaram a jornada de trabalho mais agradável, em especial à Caroline Menezes e à Elizangela Mayara, pela amizade e suporte que me deram na realização dos experimentos desta pesquisa.

Aos meus amigos, Francisco Júnior, Elisangela Sousa, Vânia Palheta, Beatriz Pinto, Roberto Amoras, pelas partilhas e experiências partilhadas durante esse período.

À banca examinadora, pelas considerações que guiaram a confecção final deste trabalho, em especial ao prof. Paulo Sérgio, que me acompanha desde a graduação e sempre se dispôs a me ajudar com ensinamentos e conselhos.

À UFPa e ao PPGINDE por ter me proporcionado um ensino de qualidade e a oportunidade de ingressar no mundo da pesquisa científica.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agir, eis a inteligência verdadeira. Serei o que quiser. Mas tenho que querer o que for. O êxito está em ter êxito, e não em ter condições de êxito. Condições de palácio tem qualquer terra larga, mas onde estará o palácio se não o fizerem ali?

Fernando Pessoa

RESUMO

Os Sistemas de Vedação Vertical Interno e Externo (SVVIE) são as partes da edificação habitacional que a limitam verticalmente e delimitam seus ambientes, como as fachadas e paredes ou divisórias internas. O uso de vedações com menor densidade que a da alvenaria proporciona uma redução da massa deste subsistema, reduzindo a demanda por agregados e aglomerantes, além de reduzir a carga exercida sobre a estrutura, o que possibilita uma otimização do seu dimensionamento. O objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade da produção de placas cimentícias com a incorporação de pérolas de poliestireno expandido (EPS) para aplicação em elementos de vedação vertical interno. Para isso, foram produzidas argamassas com o traço 1:3 (cimento:areia), com teores de incorporação de poliestireno expandido de 0%, 10%, 20% e 30% em relação ao volume total de materiais. As argamassas foram caracterizadas no estado fresco, através da determinação da densidade de massa e índice de consistência. No estado endurecido as propriedades mensuradas foram: densidade de massa, resistência à compressão e à tração e, módulo de elasticidade. Após o conhecimento das características das argamassas, foram produzidas as placas cimentícias, reproduzindo o mesmo traço nos corpos de provas. As placas foram testadas quanto a densidade aparente, absorção de água, permeabilidade de água e resistência à flexão. Os resultados deste trabalho demonstraram que as placas cimentícias com a incorporação de até 20% de EPS apresentam características técnicas para aplicação em sistemas de vedação vertical internas.

Palavras-chave: placa cimentícia, poliestireno expandido (EPS), argamassa leve.

ABSTRACT

The Internal and External Vertical Panel Systems are the parts of the residential building that limit it vertically and delimit its environments, such as facades and walls or internal partitions. The use of seals with lower density than masonry provides a reduction in the mass of this subsystem, reducing the demand for aggregates and binders, in addition to reducing the load on the structure, which allows for optimization of its design. The objective of this work is to verify the viability of the production of cementitious slabs with the incorporation of expanded polystyrene (EPS) beads for application in internal vertical sealing elements. For this, mortars with a 1: 3 line (cement: sand) were produced, with levels of incorporation of expanded polystyrene of 0%, 10%, 20% and 30% in relation to the total volume of materials. Mortars were characterized in the fresh state, through the determination of mass density and consistency index, and in the hardened state, for knowledge of the density properties in the hardened state, resistance to compression and traction, and modulus of elasticity. After knowing the characteristics of the mortars, cementitious slabs were produced, reproducing the same trace in the specimens. The plates were tested for bulk density, water absorption, water permeability and flexural strength. The results of this work demonstrated that the cementitious slabs with the incorporation of up to 20% of EPS present technical characteristics for application in internal vertical sealing systems.

Keywords: cementitious slab, expanded polystyrene (EPS), lightweight mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Espectro dos agregados leves (MEHTA e MONTEIRO, 1994).	24
Figura 2.2 – Microscopia eletrônica do EPS.....	25
Figura 2.3 – Pérolas de poliestireno expandido.	26
Figura 2.4 – Resistência à compressão em função da deformação do EPS com diversas densidades (ACEPE, 2020).	27
Figura 2.5 – Resistência à flexão e à tração do EPS em relação a sua massa volumétrica (ACEPE, 2020).....	27
Figura 2.6 – Coeficiente de condutibilidade térmica do EPS, em função da Massa Volumétrica à temperatura de 10°C (ACEPE, 2020).	28
Figura 2.7 – Resistência à compressão, e densidade em relação ao percentual de EPS	30
Figura 2.8 – Resistência à compressão do concreto em relação a fração volumétrica de EPS f_c/f_M (Adaptado de Liu e Chen (2014)).	31
Figura 2.9 - Resistência à flexão do concreto em relação a fração volumétrica de EPS f_c/f_M (Adaptado de Liu e Chen (2014)).	32
Figura 2.10 – Módulo de elasticidade de concreto com EPS em relação a compressão axial (Adaptado de Liu e Chen, 2014).	33
Figura 2.11 – Microestrutura eletrônica de concreto com EPS (MAAROUFI <i>et al.</i> , 2018)	33
Figura 2.12 – Desenho esquemático de residência em <i>Light Steel Frame</i> (CRASTO, 2005).	36
Figura 3.1 – Planejamento experimental.	40
Figura 3.2 - Composição granulométrica do agregado miúdo natural, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003).	45
Figura 3.3 - Pérolas de poliestireno expandido usadas no programa experimental. .	47
Figura 3.4 – Esquema da distribuição volumétrica dos materiais nos traços.	48
Figura 3.5 – Fluxograma de atividades para a mistura das argamassas.	50
Figura 3.6 – Determinação do índice de consistência da argamassa leve.....	51
Figura 3.7 – Moldagem da placa (a) colocação da tela após a primeira camada de argamassa (b) aplicação da segunda camada de argamassa.	52
Figura 3.8 – Placas cimentícias após a desforma.	53

Figura 3.9 – Esquema de realização de ensaio de resistência à flexão das placas.	54
.....	54
Figura 3.10 – Esquema de realização do teste de permeabilidade de água, conforme a NBR 15498 (ABNT, 2016).	56
Figura 3.11 – Realização do experimento de permeabilidade de água das placas cimentícias: A – aparelho para medição da temperatura e umidade do ambiente; B – Ensaio em andamento.	56
Figura 4.1 – Consistência da argamassa leve com poliestireno expandido, vista lateralmente.	57
Figura 4.2 – Consistência da argamassa leve com poliestireno expandido (A₃₀EPS), com visão superior	58
Figura 4.3 – Comparações múltiplas através do Teste de Tukey para os resultados de densidade no estado endurecido das argamassas.	61
Figura 4.4 - Comparações múltiplas através do Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão das argamassas.	64
Figura 4.5 - Resistência à compressão das argamassas.	64
Figura 4.6 - Comparações múltiplas através do Teste de Tukey para os resultados de resistência à flexão das argamassas.	67
Figura 4.7 - Resistência à flexão das argamassas.	67
Figura 4.8 - Módulo de elasticidade ultrassônico, conforme NBR 15630 (ABNT, 2008).	70
.....	70
Figura 4.9 - Comparações múltiplas através do Teste de Tukey para os resultados de módulo de elasticidade das argamassas.	71
Figura 4.10 - Comparações múltiplas através do Teste de Tukey para os resultados de densidade aparente das placas cimentícias.	74
Figura 4.11 - Comparações múltiplas através do Teste de Tukey para os resultados de absorção de água das placas cimentícias.	77
Figura 4.12 - Resistência à flexão das placas cimentícias.	79
Figura 4.13 – Comparações múltiplas através do Teste de Tukey para os resultados de resistência à flexão das placas cimentícias.	80
Figura 4.14 – Teste em andamento da placa cimentícias da família A ₀ EPS: A - Verso da placa no início do experimento; B - Verso da placa no fim do experimento.	82
Figura 4.15 – Teste em andamento da placa cimentícias da família A ₁₀ EPS: A - Verso da placa no início do experimento; B - Verso da placa no fim do experimento.	82

Figura 4.16 – Teste em andamento da placa cimentícias da família A₂₀EPS: A - Verso da placa no início do experimento; B - Verso da placa no fim do experimento.82

Figura 4.17 – Teste em andamento da placa cimentícias da família A₃₀EPS: A - Verso da placa no início do experimento; B - Verso da placa no fim do experimento.83

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Requisitos de resistência à tração na flexão (NBR 15498, ABNT 2016)	37
Tabela 2.2: Dimensões dos corpos de prova (NBR 15498, ABNT 2016)	38
Tabela 3.1: Caracterização do cimento Portland CP II-E 32 fornecidas pelo fabricante.	44
Tabela 3.2: Características físicas da areia	45
Tabela 3.3: Traços, em massa, para a pesquisa experimental.	49
Tabela 3.4: Ensaio da argamassa no estado endurecido	51
Tabela 4.1: Densidade das argamassas no estado fresco em kg/m ³	59
Tabela 4.2: Densidade de massa da argamassa no estado endurecido, NBR 13280 (ABNT, 2005).	60
Tabela 4.3: Análise de Variância para o ensaio de densidade no estado endurecido.	60
Tabela 4.4: Resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova cúbicos.	62
Tabela 4.5: Análise de Variância para o ensaio de resistência à compressão	63
Tabela 4.6: Resistência à flexão das argamassas.	65
Tabela 4.7: Análise de variância (ANOVA) dos ensaios da argamassa no estado endurecido	66
Tabela 4.8: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade pelo método do ultrassom	69
Tabela 4.9: Análise de variância dos ensaios da argamassa no estado endurecido	70
Tabela 4.10: Valores médios das propriedades físicas das argamassas com EPS.	71
Tabela 4.11: Resultados do ensaio de densidade aparente.	72
Tabela 4.12: ANOVA dos resultados de densidade aparente das placas cimentícias.	73
Tabela 4.13: Resultado do ensaio de absorção de água das placas cimentícias.	75
Tabela 4.14: Análise de Variância dos resultados de absorção de água das placas cimentícias.	76
Tabela 4.15: Resultados do ensaio de resistência à flexão das placas cimentícias.	78
Tabela 4.16: Análise de Variância dos resultados de resistência à flexão das placas cimentícias.	79

Tabela 4.17: Resultados do ensaio de permeabilidade de água, NBR 15498 (ABNT, 2016)	81
---	----

LISTA DE SIGLAS

A₀EPS – Traço de argamassa com 0% de poliestireno expandido incorporado.

A₁₀EPS – Traço de argamassa com 10% de poliestireno expandido incorporado.

A₂₀EPS – Traço de argamassa com 20% de poliestireno expandido incorporado.

A₃₀EPS – Traço de argamassa com 30% de poliestireno expandido incorporado.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ACI – *American Concrete Institute*.

ANOVA - Análise de variância.

ASTM – *American Society for Testing and Materials*.

CFC – Clorofluorcarboneto.

EPS – Poliestireno Expandido.

HIPS – Poliestireno de alto impacto.

LSF – *Light Steel Frame*.

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora.

NM – Norma Mercosur.

SVVIE - Sistemas de vedação vertical interno e externo.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Justificativa	20
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	Objetivo geral	22
1.2.2	Objetivos específicos.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Agregados leves	23
2.1.1	Poliestireno expandido (EPS).....	24
2.1.2	Propriedades das Argamassas com EPS.....	28
2.2	Placas cimentícias	34
2.3	Parâmetros normativos das placas cimentícias.....	36
2.3.1	Classificação	37
2.3.2	Resistência à flexão.....	37
2.3.3	Permeabilidade de água.....	38
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
3.1	Parâmetros do experimento	41
3.1.1	Teor de incorporação de poliestireno expandido	42
3.1.2	Relação água /cimento (a/c) e consistência	42
3.1.3	Traço	42
3.1.4	Idade de realização dos testes	43
3.1.5	Espessura da placa	43
3.2	Materiais	43
3.2.1	Cimento Portland.....	43
3.2.2	Agregado miúdo natural	44
3.2.3	Aditivo.....	45

3.2.4	Pérolas de poliestireno expandido (EPS)	46
3.2.5	Água	47
3.2.6	Reforço para confecção das placas.....	47
3.3	Metodologia	48
3.3.1	Efeito do teor de EPS nas características da argamassa.....	48
3.3.2	Efeito do teor de EPS na produção de placas cimentícias	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1	Efeito do teor de EPS na produção das argamassas	57
4.2	Efeito do teor de EPS nas características das argamassas	58
4.2.1	Densidade das argamassas no estado fresco.....	58
4.2.2	Densidade das argamassas no estado endurecido	59
4.2.3	Resistência à compressão.....	62
4.2.4	Resistência à tração na flexão.....	65
4.2.5	Módulo de elasticidade dinâmico.....	68
4.3	Efeito do teor de EPS nas propriedades físicas de Placas cimentícias	72
4.3.1	Densidade aparente	72
4.3.2	Absorção de água.....	74
4.3.3	Resistência à flexão das placas.....	77
4.3.4	Permeabilidade de água.....	81
4.4	Análise geral do comportamento das placas cimentícias	83
5	CONCLUSÕES.....	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

1 INTRODUÇÃO

Se tratando de construção de edificações habitacionais, o Brasil possui uma cultura construtiva inclinada para o uso da alvenaria tradicional como principal elemento de vedação vertical, seja interna ou externa (FONTENELLE, 2012; NASCIMENTO, 2002). Por ser um método artesanal, a construção através de alvenaria de blocos é caracterizada por gerar elevados índices de desperdício de materiais e por haver recorrente necessidade de retrabalho embutido (QUAGLIO, 2018; ZATT, 2010).

Mass e Tavares (2017) relatam que a ineficiência do setor da construção em alvenaria de blocos tradicionais pode gerar índices de perda de até 30%. Sendo assim, as questões relacionadas a desperdícios na construção, atrasos e a incompatibilidade entre projeto e execução são problemas frequentes na indústria da construção e uma solução possível para estes são a implantação de alternativas de racionalização da produção (CAMILLO, 2010). Além desses pontos, a reavaliação das tecnologias construtivas é justificada pelo impacto que a extração das materiais primas destinadas a alimentar o setor da construção vem exercendo sobre o planeta, assim como pelo beneficiamento destes materiais na produção dos gases do efeito estufa (FONTENELLE, 2012).

A NBR 15575-4 (ABNT, 2013) define os Sistemas de Vedação Vertical Interno e Externo (SVVIE) como sendo as partes da edificação habitacional que limitam verticalmente a edificação e seus ambientes, como as fachadas e paredes ou divisórias internas. Nesse sentido, o uso de vedações com menor densidade que a da alvenaria proporciona uma redução da massa deste subsistema, reduzindo a demanda por agregados e aglomerantes, além de reduzir a carga exercida sobre a estrutura, o que possibilita uma otimização do seu dimensionamento.

Os sistemas de vedação vertical compostos de placas cimentícias possuem aproximadamente 25% da massa de uma alvenaria tradicional constituída por blocos de concreto para a execução de uma mesma área (FONTENELLE, 2012). Uma habitação construída em alvenaria cerâmico pode ter seu peso em até 2,7 vezes maior que uma habitação construída em *Light Steel Frame* (MASS e TAVARES, 2017).

As condições de habitabilidade que uma vedação vertical pode proporcionar ao ambiente estão diretamente relacionadas com as características de desempenho apresentado pelo conjunto que constitui esta vedação, tais como requisitos térmicos, acústicos, e estanqueidade ao ar e a água (FONTENELLE, 2012). Nesse aspecto, o uso de sistemas pré-fabricados se torna uma técnica promissora e eficiente.

Um exemplo desse processo é o *Steel Frame*, criado nos Estados Unidos, na década de 1940, que consiste em um método construtivo baseado na ideia de construção seca. Esse sistema é estruturado por perfis metálicos, os quais são revestidos interna e externamente por placas, que podem ser de gesso acartonado ou cimentícias. No Brasil, o sistema vem ganhando espaço, sendo aplicado em construções de edificações de padrões de renda média e alta, assim como em construção de galpões industriais e shoppings (OSVALDO e BERTOLINI, 2013).

Dentre as vantagens do uso desse método construtivo, estão a rapidez na construção; a facilidade de montagem, manuseio e transporte, devido a leveza dos elementos; a grande flexibilidade no projeto arquitetônico; a construção a seco, o que reduz grande parte do desperdício nos canteiros; os elementos construtivos são produzidos industrialmente, onde a matéria prima, os processos, e suas características técnicas passam por rigorosos controles de qualidade (CRASTO, 2005).

O uso de placas cimentícias, comercialmente, é condicionado ao atendimento de especificações técnicas contidas em regulamentos, como a norma de desempenho das edificações habitacionais, NBR 15575-4 (ABNT, 2013), que trata dos sistemas de vedações verticais internas e externas. Outra regulamento que condiciona o uso das placas é a NBR 15498 (ABNT, 2016) que trata, especificamente, de placas de fibrocimento trazendo os requisitos e métodos de ensaios. Essas normas especificam os parâmetros a serem seguidos, principalmente no tocante a geometria da peça, resistência à flexão, permeabilidade, estanqueidade, conforto térmico e acústico, resistência ao fogo, entre outros.

Um dos materiais que vem ganhando espaço na construção civil é o poliestireno expandido (EPS), por ser um ótimo isolante térmico, possuir uma elevada durabilidade, ser um material com elevada dilatação térmica, de baixo custo, ser impermeável e que possui facilidade de manuseio com relação a diversos materiais

de construção (KHATIB; HERKI; ELKORDI, 2019; OZÓRIO, 2016). Comercialmente, tem seu registro no ano de 1952, quando foi exibido na feira de comércio de Düsseldorf (THOMPSETT *et al.*, 1995). E, desde então, ganha espaço nos mais diversos setores da indústria. Atualmente, na indústria da construção se tem usado o EPS em lajes, como material de enchimento, em painéis monolíticos, juntas de dilatação, fôrmas e telhas termoacústicas, assim como em peças para forro, por exemplo (BARRETO, 2017; ABIQUIM, 2020).

O estudo da aplicação de materiais alternativos na construção é de grande relevância, principalmente por ser um setor que gera significativos impactos ambientais. Desse modo, esta pesquisa propõe a incorporação do EPS em argamassas para a produção de placas cimentícias.

1.1 Justificativa

Na engenharia, o EPS possui aplicabilidade diversa, incluindo uso em edificações residenciais tradicionais (telhas termoacústicas, painéis monolíticos, enchimento de lajes pré-moldadas), assim como construções de estradas como material de sub-base, estruturas flutuantes, camas de via férrea, materiais de construção para estruturas marinhas flutuantes, leitos marítimos e em obras que necessitem de materiais com satisfatória capacidade de absorção de energia (CHEN e LIU, 2007; BARRETO, 2017; ABIQUIM, 2020).

Nos últimos anos, houve um crescente interesse na aplicação do poliestireno expandido (EPS) em compósitos cimentícios na indústria da construção civil (RAMLI SULONG; MUSTAPA; ABDUL RASHID, 2019a). Isso se justifica pelo fato dele ser um agregado que possui uma menor densidade e melhor resistência térmica e acústica, quando comparado ao convencional (KHATIB *et al.*, 2019).

As vedações verticais pré-fabricadas devem ser produzidas pensando na segurança e conforto dos moradores, seja esse em relação a não abertura de fissuras em serviço, como também a manutenção de uma temperatura agradável dentro da edificação. Para serem comercializadas atendendo aos requisitos de qualidade e segurança, elas são enquadradas por meio dos requisitos normativos, a saber: NBR 15575-4 (ABNT, 2013) e NBR 15498 (ABNT, 2016). Como elemento de vedação, a

placa cimentícia, ou de fibrocimento, é definida como sendo o produto da mistura de cimento Portland, agregados, adições ou aditivos com o reforço de telas, fibras, fios ou filamentos, conforme a NBR 15498 (ABNT, 2016). E, nesse sentido, há a possibilidade de incorporar materiais alternativos, como o caso do EPS, que possam tornar o produto mais econômico e sustentável.

Do ponto de vista estrutural, os elementos de vedação são inclusos como cargas e, nesse sentido, o uso de agregados leves em argamassa ou concretos, pode atuar reduzindo a massa específica do produto final. Por outro lado, os agregados leves, em geral, costumam absorver uma grande quantidade de água durante a mistura, fazendo com que o traço necessite de mais água para possuir uma trabalhabilidade aceitável (RANJBAR e MOUSAVI, 2015). É, nesse contexto, que o EPS se destaca, visto que é um material de natureza hidrofóbica e não absorvente (LAW YIM WAN et al., 2018)

A redução da densidade de elementos construtivos gera uma economia do custo global da obra. Nesse sentido, o poliestireno expandido é um material barato, que proporciona, em elementos pré-fabricados, construções mais leves, econômicas e rápidas (RAMLI SULONG; MUSTAPA; ABDUL RASHID, 2019a). É por esse motivo que se busca sua aplicação em sistemas de vedação com agregado leve, uma vez que, se comparado com outros sistemas construtivos, os painéis leves possibilitam redução nas cargas da edificação e economia na produção dos elementos pré-fabricados.

As características do poliestireno expandido o tornam candidato para uso em placas cimentícias. Por sua natureza não absorvente, espera-se que sua incorporação em compósitos cimentícios, podem proporcionar uma redução da permeabilidade. E, por ser um bom isolante térmico, é esperado esse mesmo comportamento em argamassas com seu uso.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo verificar a viabilidade da produção de placas cimentícias com a incorporação de pérolas de poliestireno expandido (EPS) para aplicação em elementos de vedação vertical interno.

1.2.2 Objetivos específicos

Com o intuito de alcançar o objetivo geral, a conclusão de alguns objetivos específicos é necessária, são eles:

- Verificar o efeito da incorporação de pérolas nas propriedades da argamassa no estado fresco;
- Caracterizar as argamassas produzidas com EPS, quanto as seguintes propriedades do estado endurecido:
 - Densidade de massa, conforme NBR 13278 (ABNT, 2005);
 - Resistência à flexão e à compressão, conforme NBR 13279 (ABNT, 2005);
 - Módulo de elasticidade dinâmico por meio da propagação de onda ultrassônica, conforme NBR 15630 (ABNT, 2008).
- Caracterizar as placas cimentícias produzidas com a incorporação de EPS, segundo os seguintes ensaios da NBR 15498 (ABNT, 2016):
 - Densidade aparente;
 - Absorção de água;
 - Permeabilidade de água.
- Verificar se as placas cimentícias com incorporação de EPS atingem os valores mínimos de resistência à flexão requeridos na norma NBR 15498 (ABNT, 2016).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agregados leves

Os agregados são materiais granulares, sem forma e volume definidos, que possuem dimensões e propriedades estabelecidas para uso em obras de engenharia. Eles podem ser classificados quanto a sua origem em naturais (se encontram de forma particulada na natureza, como areia, cascalho ou pedregulho) ou artificiais (sofrem processos industriais, como pedras britadas, areias artificiais, escória de alto-forno, argilas expandidas) (SERNA; REZENDE, 2009). Uma outra forma de classificação dos agregados é quanto ao seu peso e podem ser classificados como agregados de densidade leve, normal, pesado.

Conforme ASTM C331 (2017), os agregados leves miúdos (que passam na peneira 4,75mm) limitam-se a massas unitárias de 1120kg/m^3 , os agregados leves graúdos (9,5mm - 2,36mm) devem ter densidade aparente máxima de 880kg/m^3 e, quando combinados, graúdos e miúdos, devem ter densidade máxima de 1140kg/m^3 . A ACI 213 R-03 (1979) aponta que a absorção de água desses agregados é geralmente entre 5% e 25%, em contraste com agregados de massa normal que apresentam, em sua maioria, valores inferiores a 2%. A sua menor densidade se deve ao fato de possuir uma microestrutura celular altamente porosa (MEHTA e MONTEIRO, 1994). E essa estrutura porosa pode facilitar a passagem de água em seu meio, o que explica, em termos gerais, a diferença na absorção, se comparado aos agregados convencionais.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), os agregados leves naturais são produzidos através do beneficiamento de rochas ígneas vulcânicas como pumicita, escória ou tufo. Por outro lado, os leves sintéticos podem ser fabricados por tratamento térmico de uma variedade de materiais, por exemplo, argilas, folhelhos, ardósia, diatomita, perlita, vermiculita, escória de alto-forno e cinza volante.

Mehta e Monteiro (1994) apresentam um espectro de agregados leves, variando conforme sua massa unitária (Figura 2.1). Nessa figura, os agregados muito porosos, que estão na extremidade mais leve do espectro, são geralmente fracos e, portanto, mais indicados para a produção de concretos isolantes não estruturais. No lado direito da imagem, estão aqueles agregados leves que são, relativamente, menos

porosos, ou que é formado por um conjunto de poros finos uniformemente distribuídos, o que os tornam usualmente resistentes e capazes de produzir concreto estrutural.

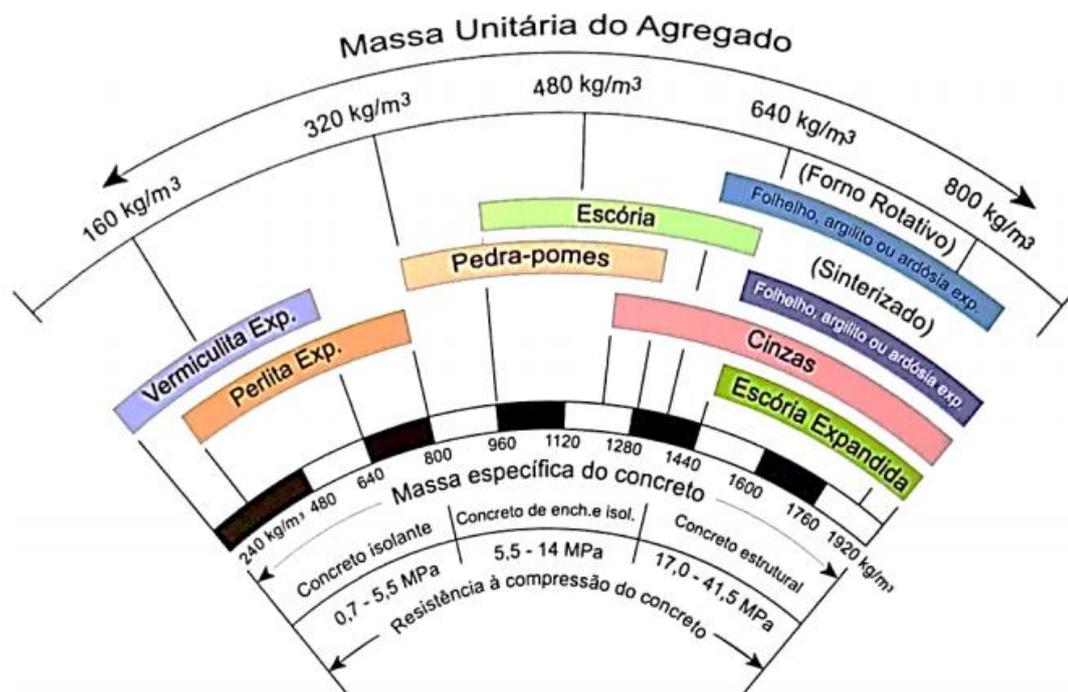


Figura 2.1 – Espectro dos agregados leves (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Além desses agregados, têm-se usado agregado sintético de poliestireno expandido (que possuem densidade inferiores aos dos agregados leves convencionais) para a produção de concretos leves com massas unitárias entre 600 kg/m³ a 1800 kg/m³ (K. G. BABU e BABU, 2004).

2.1.1 Poliestireno expandido (EPS)

O EPS é a sigla internacional para o Poliestireno Expandido, que fora descoberto em 1949, na Alemanha, pelos químicos Fritz Stasny e Karl Buchholz. Trata-se de um plástico celular, resultado da polimerização do estireno em água. O processo produtivo não utiliza o gás e CFC ou qualquer um de seus substitutos. Como resultado os produtos finais do EPS são inertes, não contaminam o solo, água ou ar (ABIQUIM, 2020).

O poliestireno expandido é um material de natureza hidrofóbica, não absorvente, composto em sua grande parte por ar, cerca de 98% do material (LAW YIM WAN et al., 2018). Sua morfologia é dada por um conjunto de células fechadas (Figura 2.2). Ao ser utilizado como agregado, o EPS reduz a densidade da matriz cimentícia, assim como a permeabilidade, melhorando suas características frente aos ataques químicos, devido à natureza celular e inerte fechada destes agregados (K. G. BABU e BABU, 2004).

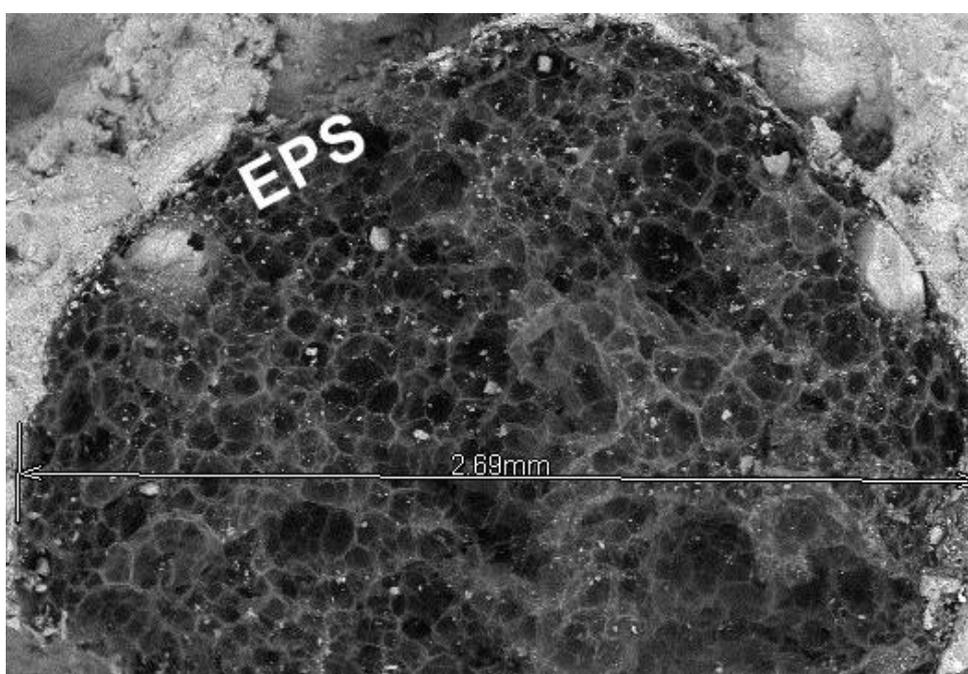


Figura 2.2 – Microscopia eletrônica do EPS.

Diferente do agregado natural, o poliestireno é um material de natureza orgânica, produzido a partir do monômero de estireno. O conteúdo de monômero pode variar entre 88% a 97% (KHATIB et al., 2019). O processo de fabricação do EPS é constituído de três fases: a pré-expansão, repouso intermediário e estabilização e a expansão e modelagem final. As pérolas de EPS são produtos da primeira fase desse processo (ACEPE, 2020).

Na pré-expansão a matéria prima é aquecida em máquinas com os pré-expansores, com vapor de água a temperaturas entre 80 e 110°C. Conforme a temperatura, sua densidade pode chegar até 50 vezes menor que a da matéria prima.

Nesse processo as pérolas compactadas se expandem e formam esferas de plástico celular contendo células fechadas com ar em seu interior (Figura 2.3) (ACEPE, 2020).



Figura 2.3 – Pérolas de poliestireno expandido.

Em relação a suas propriedades físicas, na compressão, o EPS é um material que tem comportamento elástico até a deformação atingir cerca 2% da espessura da placa, ou seja, uma vez retirada a carga que provoca a deformação, o material recupera-se a sua forma original. Na Figura 2.4 é apresentada a resistência à compressão de EPS de diversas densidades, em função da sua deformação. É visto nesse gráfico que este material polimérico possui baixa resistência à compressão, se comparado às argamassas de cimento Portland, porém altamente deformável.

Os valores de resistência à flexão e à tração comportam-se linearmente em função da densidade do material (Figura 2.5). Apesar de ser pouco resistente, as demais características do EPS como baixa densidade, capacidade de isolamento térmico, resistência à ataques químicos o tem tornado objeto de pesquisas recentes que buscam sua inserção em matrizes cimentícias (FERNANDO; JAYASINGHE; JAYASINGHE, 2017a; KAYA; KAR, 2016; KHATIB; HERKI; ELKORDI, 2019; MAAROUFI *et al.*, 2018)

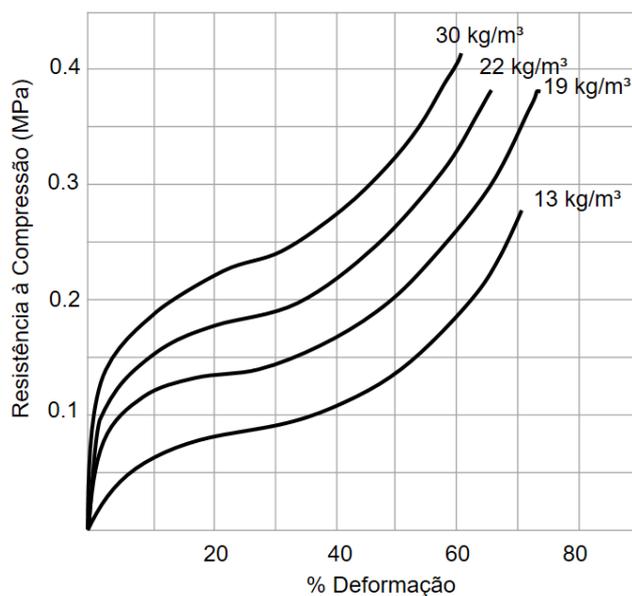


Figura 2.4 – Resistência à compressão em função da deformação do EPS com diversas densidades (ACEPE, 2020).

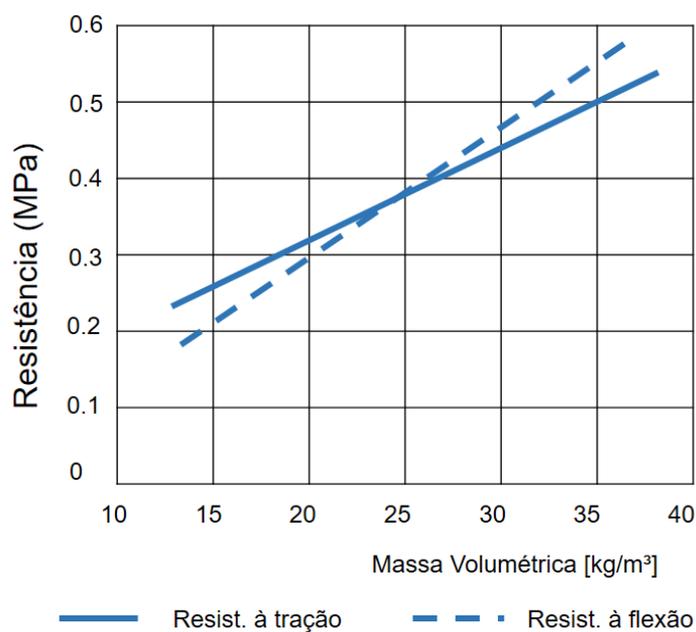


Figura 2.5 – Resistência à flexão e à tração do EPS em relação a sua massa volumétrica (ACEPE, 2020).

A capacidade de transferência de calor de um material pode ser expressada pelo seu coeficiente de condutibilidade térmica (λ), medido em Watt por metro grau

Celsius [W/m°C]. Nesse caso, quanto menor o coeficiente de calor de um material, maior será sua capacidade de isolamento térmico. O coeficiente de condutibilidade térmica do EPS depende, principalmente, da sua massa volúmetrica, como mostra a Figura 2.6.

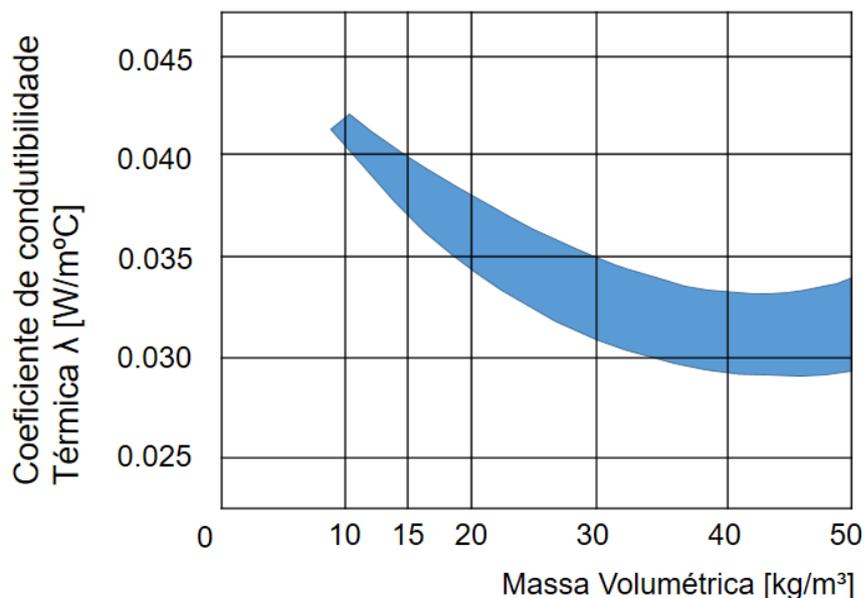


Figura 2.6 – Coeficiente de condutibilidade térmica do EPS, em função da Massa Volumétrica à temperatura de 10°C (ACEPE, 2020).

2.1.2 Propriedades das Argamassas com EPS

Dentre os componentes de uma argamassa, o cimento é o constituinte que causa maior impacto ambiental, devido às elevadas emissões de dióxido de carbono durante sua fabricação. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), o caminho da sustentabilidade na indústria do concreto passa pela redução do consumo de cimento no concreto, a redução do concreto nas estruturas e redução do teor de clínquer no cimento. Nesse contexto, o uso de materiais alternativos associado a redução do consumo de cimento torna-se de extrema relevância para alcançar a sustentabilidade na construção.

A adição de agregados leves provoca variações na estrutura da argamassa, sobretudo na região entre a superfície do agregado e a pasta, pelo fato de que esses

possuem natureza porosa, que exigem adição de mais água de amassamento na mistura, e, assim, interação de modo diferente dos agregados naturais (WANG et al., 2012). Essa adição, ou até mesmo substituição dos agregados convencionais por estes, provoca a redução da massa unitária assim como redução da resistência à compressão, devido ao fato de que o agregado leve possui densidade inferior ao do agregado natural (MO et al., 2018).

Em relação ao poliestireno expandido, algumas pesquisas já foram realizadas com a incorporação desse material para produção de concretos leves (BABU et al., 2006; MILED et al., 2007; LIU; CHIA; ZHANG, 2011; OZÓRIO, 2016; KAYA e KAR, 2016; FERNANDO et al., 2017; MAAROUFI et al., 2018; KHATIB et al., 2019). Em argamassas, esse material já tem sido estudado para conhecimento de suas propriedades mecânicas e de durabilidade (ELSHARIEF et al. 2005; FERRÁNDIZ-MAS; GARCÍA-ALCOCEL, 2013; MO, 2018; TITTARELLI, 2019; TORRES; GARCÍA-RUIZ, 2009; WANG, MEYER, 2012; WANG, 2012). Em suma, esses materiais possuem em sua composição formada pela mistura de Cimento Portland, agregado miúdo, aditivo e/ou adições e o poliestireno expandido. Uma vez que esses concretos não possuem agregados graúdos, a denominação de concretos leves com EPS se confunde com a de argamassas leves. Essas pesquisas mostram uma tendência na produção de materiais leves com a incorporação desse material.

Em relação ao teor de incorporação do EPS em concretos ou argamassas leves, observou-se, nas pesquisas correlatas, que sua incorporação em altos teores modifica significativamente as propriedades mecânicas do compósito cimentícios formado. Como exemplo, N. Liu e Chen (2014) observaram que a resistência à compressão do concreto leve com EPS reduz de forma exponencial à medida em que o teor de EPS aumenta, o que, dependendo da aplicação desejada, inviabiliza o uso (N. LIU e CHEN, 2014).

Ao estudar o efeito da dimensão das partículas, N. Liu e Chen (2014) trabalharam com uma proporção volumétrica de EPS de até 46% em relação ao volume total do material. Ao analisarem o efeito do uso de fibras de aço na resistência de concreto leve, usaram teores de EPS de até 55%, em volume. Miled et al. (2007) com o intuito de estudar o efeito da dimensão das partículas e modelagem na resistência à compressão de concreto leve com EPS, realizaram o estudo com proporção de incorporação de poliestireno expandido de até 50%, em volume. Ranjbar

e Mousavi (2015), Madandoust et al. (2011) ao pesquisarem as propriedades no estado fresco de autoadensável leve, trabalharam com faixas de proporção volumétrica entre 10% e 30% em relação ao volume total da matriz.

Ranjbar e Mousavi (2015) produziram concreto autoadensável com a incorporação de poliestireno expandido. Nesse trabalho, o uso do EPS variou entre 10% a 30%, em volume, com consumo de cimento entre 400kg/m^3 a 434kg/m^3 . Nesse caso, foi observada uma queda de resistência proporcional ao aumento do teor de EPS (Figura 2.7).

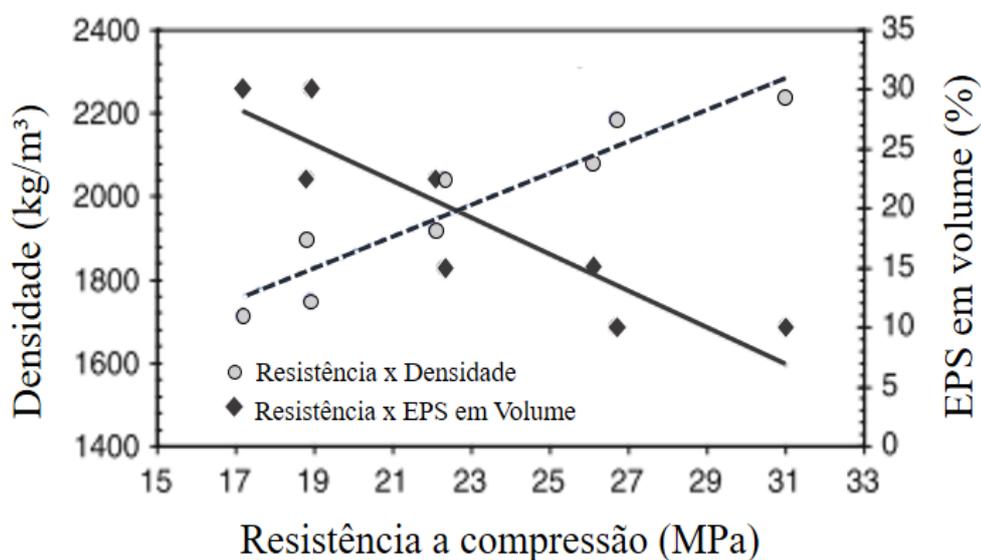


Figura 2.7 – Resistência à compressão, e densidade em relação ao percentual de EPS (RANJBAR e MOUSAVI, 2015).

Miled et al. (2007) estudaram o efeito das dimensões das partículas de EPS na resistência à compressão em concretos leves. Concluíram que os concretos com agregados de dimensões inferiores, para a mesma quantidade incorporada, apresentaram melhores resultados. Esse comportamento também foi constatado pelo trabalho de Liu e Chen (2014).

Liu e Chen (2014) propuseram um modelo matemático para determinação da resistência à compressão de concretos com a incorporação de pérolas de poliestireno expandido (Equação 2.1). Nessa pesquisa, os agregados presentes eram somente

areia natural e as pérolas de EPS. Os concretos foram moldados com duas faixas granulométricas de agregados leves, uma com pérolas com dimensão de 1 mm e outra com a mistura de pérolas com 1 mm e 5 mm de diâmetro, com proporção volumétrica de 12% de pérolas de 1mm e 88% de 5mm.

No modelo presente na Equação (2.1), f_c representa a resistência à compressão (MPa) do concreto leve com EPS, p é a fração volumétrica de EPS no compósito; α é um parâmetro relativo a dimensão da partícula que, para o a dimensão de 1mm, equivale a 0,28 e para a mistura de grãos com os diâmetros de 1mm+5mm equivale a 0,24; f_M é o valor da resistência à compressão da matriz (Liu e Chen, 2014).

$$f_c = [1,05 \exp\left(\frac{-p}{\alpha}\right) - 0,05] f_M \quad (2.1)$$

Liu e Chen (2014) observaram que há a ocorrência de queda exponencial de resistência à compressão de acordo com a fração volumétrica de agregado leve incorporado (Figura 2.8). Em relação a resistência à flexão, observou-se, no trabalho de Liu e Chen (2014) uma redução linear proporcional a incorporação volumétrica de EPS no concreto leve (Figura 2.9).

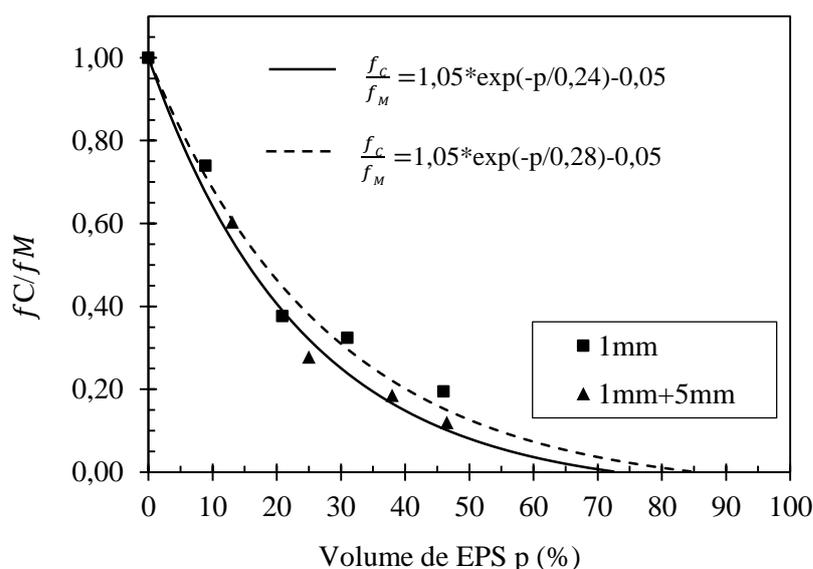


Figura 2.8 – Resistência à compressão do concreto em relação a fração volumétrica de EPS f_c/f_M (Adaptado de Liu e Chen (2014)).

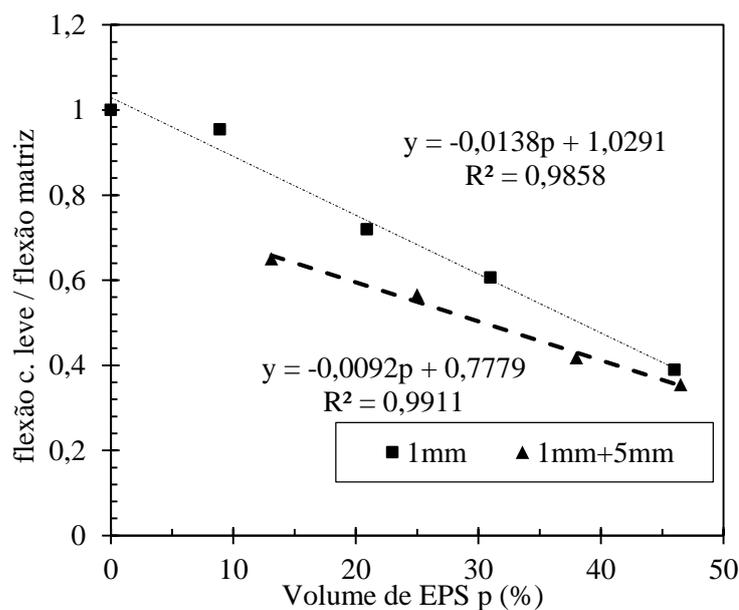


Figura 2.9 - Resistência à flexão do concreto em relação a fração volumétrica de EPS f_c/f_M (Adaptado de Liu e Chen (2014)).

R. Wang e Meyer (2012) produziram argamassas com poliestireno de alto impacto (HIPS), substituindo o agregado miúdo, em até 50%, em volume. Apesar de decréscimo considerável na resistência à compressão, outras propriedades a tornam aptas ao uso em compósitos leves. Constatou-se que o HIPS faz com que a argamassa se torne mais dúctil e aumenta a capacidade de dissipação de energia. Os resultados mostraram também que o HIPS diminui a densidade, o módulo de elasticidade dinâmico, a condutividade térmica e a permeabilidade ao vapor de água, mas não afeta a resistência aos ciclos de congelamento e descongelamento.

O módulo de elasticidade é a relação entre a tensão e deformação do concreto no estado endurecido, abaixo do limite de proporcionalidade (ASTM E6, 2015). Em uma matriz cimentícia, os materiais que o compõem são fatores que influenciam o valor do módulo, como por exemplo, o tipo de agregado e a pasta de cimento. Existe uma relação entre a densidade e o módulo de elasticidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Desse modo, o uso de agregados leves modifica esse parâmetro, como verificado por alguns autores que constata que a incorporação de pérolas de poliestireno expandido reduz o módulo de elasticidade do concreto (MO et al., 2018; WANG e MEYER, 2012). Esse fenômeno ocorre devido ao fato do agregado leve ser

mais deformável que o agregado natural. Assim, para concretos ou argamassas com mesmos valores de resistência à compressão, os que possuem EPS tem módulo de elasticidade inferiores (Figura 2.10).

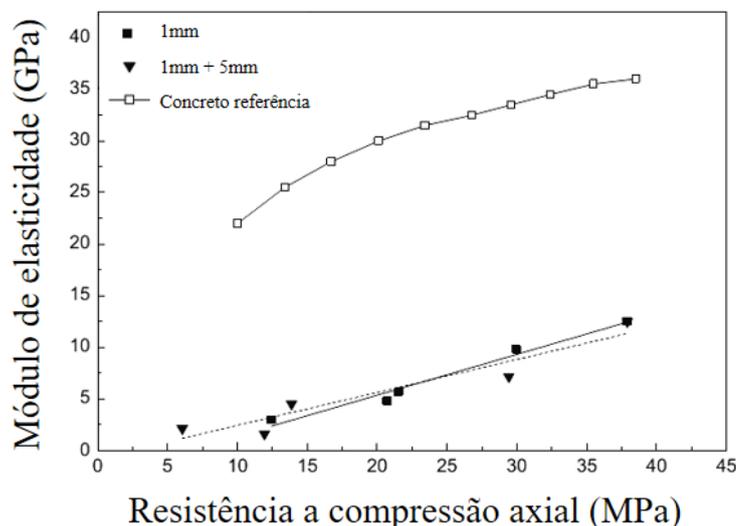


Figura 2.10 – Módulo de elasticidade de concreto com EPS em relação a compressão axial (Adaptado de Liu e Chen, 2014).

Estudos da microestrutura de argamassas ou concretos de baixa densidade são realizados a fim de verificar as fazes constituintes, a aderência do material com o substrato, assim como a zona de transição entre o material incorporado e a matriz de argamassa (Figura 2.11). Apesar da natureza hidrofóbica do poliestireno expandido, observa-se uma satisfatória aderência aos 28 dias.

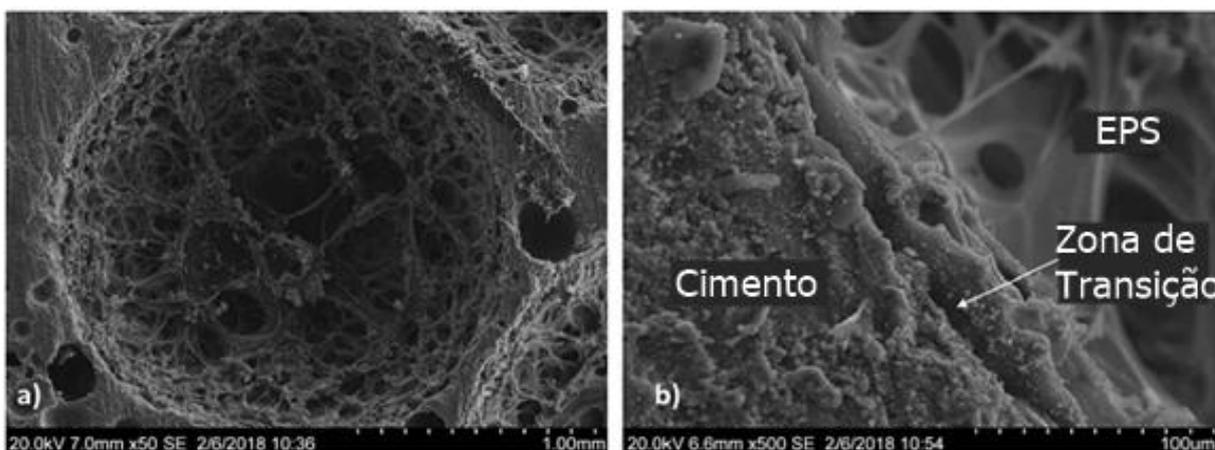


Figura 2.11 – Microestrutura eletrônica de concreto com EPS (MAAROUFI *et al.*, 2018)

O desempenho de concretos e argamassas submetidos a ambientes agressivos depende em grande parte da capacidade de penetração desses agentes para o interior da estrutura, esse mecanismo de transporte está diretamente relacionado com as características dos poros. Pode-se dizer que penetração é descrita por três sistemas de transporte: (1) permeabilidade, (2) difusão e (3) absorção. A permeabilidade é a medida do fluxo de água sob um gradiente de pressão, enquanto a difusão é o movimento de íons devido a uma concentração gradiente. A absorção pode ser descrita como a capacidade de materiais de absorver água por sucção capilar (ASTM C1585, 2004).

A absorção de água é fator fundamental para quantificar a durabilidade em compostos cimentícios (BENTZ *et al.*, 2001; NEITHALATH, 2006). A absorção depende de muitos fatores, incluindo: (a) proporção de materiais na mistura; b) a presença de aditivos químicos e de materiais cimentícios suplementares; c) a composição e as características físicas dos componentes cimentícios e dos agregados; d) teor de ar incorporado; e) o tipo e a duração da cura; f) o grau de hidratação ou idade; g) a presença de microfissuras; h) a presença de tratamento de superfície, como a presença de selantes; e i) método de aplicação, incluindo consolidação e acabamento (ASTM C1585, 2004).

Elsharief *et al.* (2005) constatou uma menor absorção capilar de concretos leves em relação ao de densidade convencional. Ferrándiz-Mas e García-Alcocel (2013) observaram a redução significativa da absorção em argamassas contendo poliestireno expandido. Nesse mesmo sentido, o trabalho de Torres *et al.* (2009) constatou uma forte relação entre a densidade de concretos leves e a sua absorção.

2.2 Placas cimentícias

Os Sistemas de Vedação Vertical Interno e Externo (SVVIE) são as partes de uma edificação que limitam verticalmente a edificação e seus ambientes, como as fachadas e as paredes ou divisórias internas (NBR 15575-4, ABNT 2013). No Brasil, quando se trata da construção de edifícios residenciais, o método construtivo mais adotado nos SVVIE é o convencional, com estrutura reticulada em concreto armado e vedação externa em alvenaria de blocos cerâmicos ou de cimentos não estruturais. Em grande parte, o método executivo é feito no canteiro de obras, mediante

ferramentas simples e emprego de grande contingente de mão de obra pouco qualificada, caracterizando uma construção artesanal (CASSAR, 2018).

As placas cimentícias ou de fibrocimento podem ser definidas como sendo o produto da mistura entre cimento Portland, agregados, aditivos e adições, com o uso de fibras, telas ou filamentos e que não utilizam amianto em sua composição (ABNT NBR, 15498, 2016). Estas placas podem ser aplicadas em sistemas de vedação vertical interno e externo, assim como em forros e divisórias simples, em construção de *shafts* para instalações prediais e brises (AZEVEDO, 2018).

As placas cimentícias disponíveis no mercado possuem, geralmente, largura nominal de 1,2m e comprimento de até 3,00m. Elas são fornecidas com espessuras de 6, 8, 10 e 12 mm, com um índice de absorção de água que pode chegar a 30%, variando conforme o fabricante (FONTENELLE, 2012). A densidade aparente do material disponibilizada pela indústria nacional possui valores entre 1,4 a 2,04g/cm³ e com indicação de uso em paredes internas e externas, assim como platibandas, beirais, dutos, *shafts* e áreas molháveis.

Essas placas cimentícias são os elementos de vedação (fechamento) do sistema construtivo denominado *Light Steel Frame (LSF)*, cuja principal característica é ser constituído de uma estrutura de perfis formados a frio de aço galvanizado que são utilizados para a composição de painéis estruturais e não-estruturais, vigas de pisos, vigas secundárias, tesouras de telhado e demais componentes (Figura 2.12). É um sistema industrializado, que possibilita uma construção a seco com grande rapidez de execução (CRASTO, 2005).

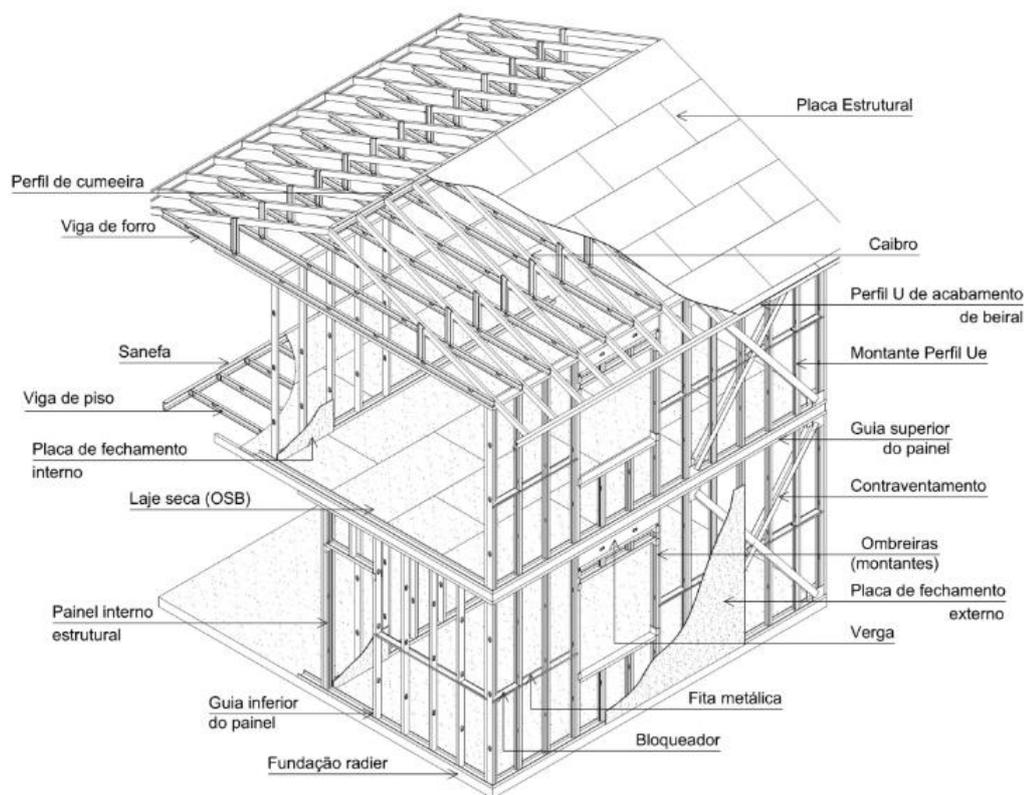


Figura 2.12 – Desenho esquemático de residência em *Light Steel Frame* (CRASTO, 2005).

As paredes que constituem a estrutura do LSF são denominadas de painéis estruturais ou autoportantes e são compostos por grande quantidade de perfis galvanizados denominados montantes, que são separados entre si 400 ou 600mm. Além das placas cimentícias, o fechamento das paredes pode ser feito por vários materiais, como placas de OSB (*oriented strand board*) externamente, e chapas de gesso acartonado internamente (CRASTO, 2005).

2.3 Parâmetros normativos das placas cimentícias

Como parte integrante dos sistemas de vedação, as placas cimentícias seguem as diretrizes da norma de desempenho, a NBR 15575-4 (ABNT 2016). A NBR 15498 (ABNT, 2016), por sua vez, apresenta os requisitos, métodos de ensaio e condições de recepção das placas de fibrocimento.

2.3.1 Classificação

A NBR 15498 (ABNT, 2016) classifica as placas em duas classes, A e B, dispostas em cinco categorias, de acordo com sua resistência à flexão (Tabela 2.1). As placas da classe A são indicadas para aplicações externas, nas quais são sujeitas a ação direta do sol, chuva, calor e umidade. Elas podem ser fornecidas com ou sem revestimento. Por outro lado, as placas da classe B são indicadas para aplicações nas quais não há ação direta do sol, chuva, calor e umidade, ou seja, ambientes internos. Ao todo, são classificadas em cinco categorias. A caracterização e fornecimento dessas especificações é de responsabilidade do fabricante (NBR 15498 (ABNT, 2016)).

Tabela 2.1: Requisitos de resistência à tração na flexão (NBR 15498, ABNT 2016)

CATEGORIA	CLASSE A (MPa)	CLASSE B (MPa)
1	-	4
2	4	7
3	7	10
4	13	16
5	18	22

2.3.2 Resistência à flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão devem ser realizados no estado de equilíbrio e no estado saturado. Segundo a norma, o estado de equilíbrio é aquele no qual os corpos de prova estão em condição de manutenção em atmosfera controlada, com temperatura de $23 \pm 10^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $50 \pm 20\%$, estocados de modo que todas as faces sejam corretamente ventiladas. Já o estado saturado é aquele em que os corpos de prova são imersos em água a uma temperatura de até 40°C por período de 24h, para espessuras inferiores a 20mm. Desse modo, as placas da classe A devem ser ensaiadas no estado saturado e as placas da classe B, no estado de equilíbrio (NBR 15498, ABNT 2016).

Para realização do ensaio de resistência à flexão, os corpos de prova podem ser quadrados ou retangulares. Se a placa cimentícia tiver a espessura entre 9 e

30mm, o corpo de prova pode ser quadrado ou retangular, para espessuras inferiores ou iguais a 9mm, a recomendação é que o corpo de prova seja quadrado (Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Dimensões dos corpos de prova (NBR 15498, ABNT 2016)

Forma do corpo de prova	Comprimento (mm)	Largura (mm)
Quadrado	250 ± 20	250 ± 20
Retangular	Distância entre apoios + 40	≥ 100

2.3.3 Permeabilidade de água

A permeabilidade pode ser definida como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso. Em pasta endurecida de cimento, o tamanho dos poros e a sua continuidade a qualquer ponto irão controlar o coeficiente de permeabilidade durante o processo de hidratação. O coeficiente de permeabilidade da pasta de cimento quando a maioria dos vazios capilares são pequenos e não interconectados é da ordem de 10^{-12} cm/s.

Em concretos de resistência moderada (consumo de cimento de 356 k/m³ e relação água/cimento de 0,5) a permeabilidade é da ordem de 10^{-10} cm/s. A permeabilidade da argamassa ou concreto é maior que a permeabilidade da pasta de cimento correspondente. Isso se explica pelo fato de que nos concretos e argamassas existem microfissuras na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Nas placas cimentícias, o conhecimento desta propriedade é fundamental para a garantia de sistemas de vedação impermeáveis, que não permitam a presença de umidade excessiva nos interiores das edificações.

Nesse sentido, a NBR 15498 (ABNT, 2016) e a 15575-4 (ABNT, 2016) apresentam procedimentos de ensaios que visam a avaliação da permeabilidade de água. O teste apresentado pela NBR 15498 (ABNT, 2016) consiste em selar uma caixa sobre o corpo de prova e submetê-lo a um determinado nível de água, sobre pressão atmosférica, e observar visualmente se transporte de água percorreu a espessura da placa. Como critério de aceitação da placa cimentícia, do lado oposto a lâmina de água não pode ocorrer a presença de gotas de água, após o tempo de 24 horas.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Um experimento pode ser definido como uma série de testes em que são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de controle, ou de entrada de um processo ou sistema, de modo que seja possível observar e identificar as mudanças e suas razões nas variáveis de resposta. Dentre os objetivos de um experimento se têm o de identificar a relação causa e efeito entre as variáveis, assim como determinar qual o grau e como ocorre essa relação (MONTGOMERY, 2001). Assim sendo, o programa experimental desta pesquisa tem como intuito contribuir para o entendimento do comportamento de placas cimentícias com EPS.

Para realização de um programa experimental, com um número de testes que sejam suficientes para explicar a relação entre as variáveis e que não seja oneroso, é necessária a realização de um planejamento prévio. Com o planejamento estatístico de experimentos, é possível a realização de análises mais refinadas dos dados por meio de modelagens das variáveis de resposta, permitindo também uma otimização dos recursos (DAL MOLIN et al., 2005).

Os experimentos realizados nesta pesquisa tiveram por objetivo verificar a viabilidade da produção de placas cimentícias com a incorporação de pérolas de poliestireno expandido (EPS) para aplicação em elementos de vedação vertical interno.

Para alcançar esse objetivo, uma das etapas da pesquisa se baseou na caracterização da argamassa, onde foram realizados testes para verificar o efeito da incorporação de pérolas sobre as propriedades no estado fresco e endurecido. Outra etapa do experimento consistiu em verificar se as placas cimentícias com incorporação de EPS atingem os valores mínimos de resistência à flexão requeridos na norma NBR 15498 (ABNT, 2016), assim como caracterizá-las quanto a densidade aparente, absorção de água e permeabilidade. Na Figura 3.1 é apresentado um esquema do programa experimental adotado para este trabalho.

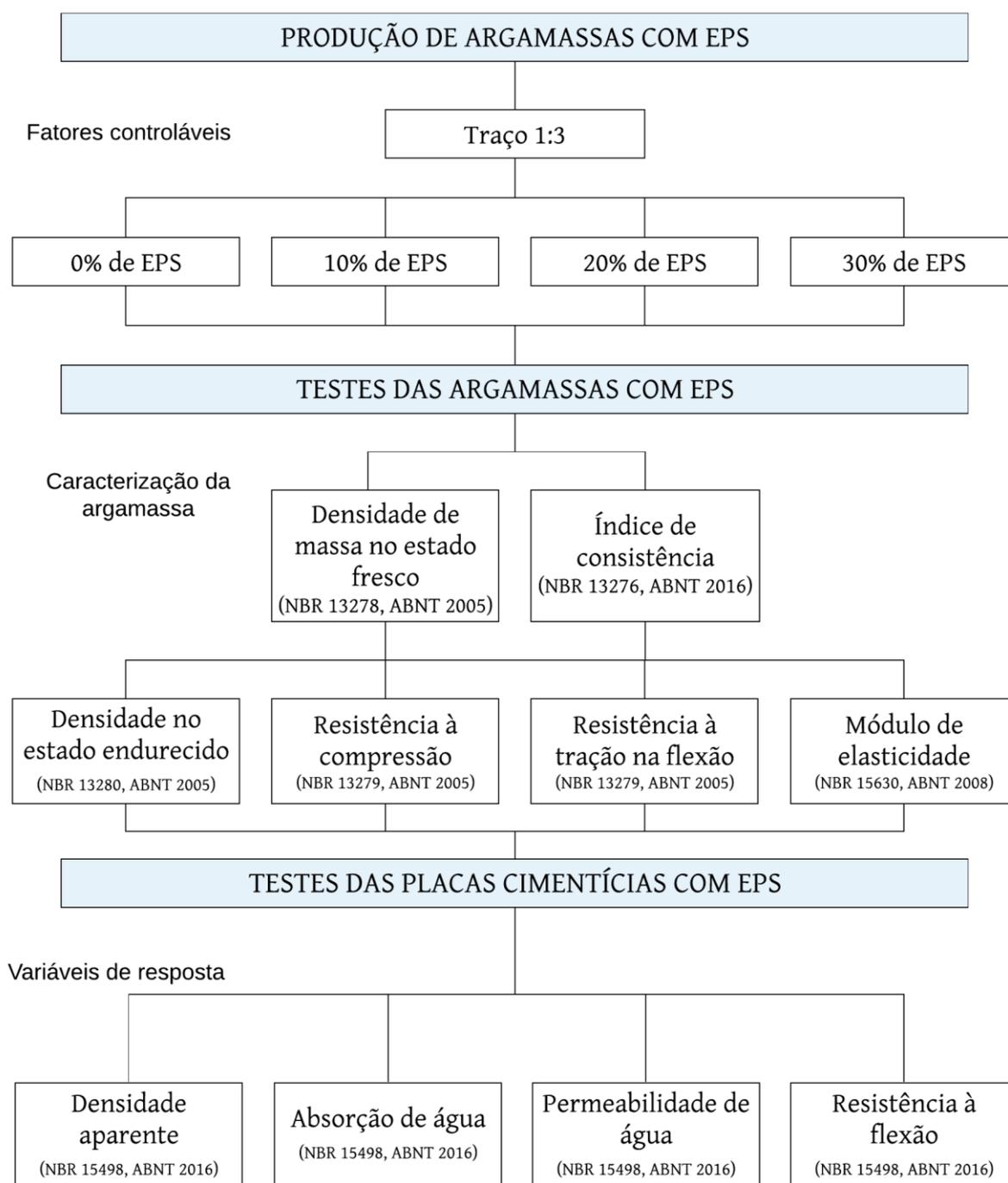


Figura 3.1 – Planejamento experimental.

O programa é dividido em duas fases principais: a caracterização da argamassa e a caracterização das placas cimentícias. Na primeira etapa foram realizados os ensaios no estado fresco da argamassa, assim como no estado endurecido, cujo objetivo foi determinar as propriedades da matriz que compõe a placa

cimentícia. Na etapa subsequente, foram moldadas placas cimentícias para realização de ensaios de caracterização, com o objetivo de verificar se as placas alcançariam os valores mínimos de resistência à flexão estabelecidos em normas para serem aplicadas com a finalidade do trabalho, assim como a realização de testes com fim a obter as especificações das placas quanto a absorção de água, permeabilidade e densidade.

Os dados experimentais passaram por tratamentos estatísticos, que possibilitaram uma maior confiabilidade na análise dos resultados. Para cada formulação foram tratadas, geralmente, três repetições, as quais se aplicaram algumas ferramentas estatísticas, como média, desvio padrão, coeficiente de variação, Análise de Variância (ANOVA) e teste de Tukey.

3.1 Parâmetros do experimento

Nesta pesquisa, tem-se como parâmetros do experimento os fatores controláveis, os fatores constantes, os ruídos e as variáveis de resposta. Desse modo, foram adotados como fatores controláveis:

- a) Teores de incorporação de poliestireno expandido (0%, 10%, 20% e 30%).

Por outro lado, os parâmetros fixos (constantes) são estes:

- b) Relação água/cimento (a/c) (0,43);
- c) Tipo de cimento (CP II-E 32);
- d) Traço (1:3);
- e) Idade de realização dos testes (28 dias);
- f) Reforço (Tela hexagonal de polietileno de alta densidade);
- g) Consistência da argamassa (240mm);
- h) Tipo de aditivo (Superplastificante);
- i) Espessura da placa (15mm).

Os fatores de ruídos deste trabalho são:

- a) Variações de temperatura;
- b) Variações de umidade.

Por fim, tem-se como variáveis de respostas, as seguintes propriedades:

- a) Densidade aparente;
- b) Absorção de água;
- c) Permeabilidade;
- d) Resistência à flexão da placa cimentícia.

3.1.1 Teor de incorporação de poliestireno expandido

Para esta pesquisa experimental, na qual o teor de incorporação é uma variável de controle, os traços foram produzidos de modo que os teores de EPS fossem de 10%, 20% e 30%, em relação ao volume total da argamassa, tal qual Ranjbar e Mousavi (2015) e Madandoust et al. (2011), que limitaram o teor de incorporação máximo de agregado leve a 30%.

3.1.2 Relação água /cimento (a/c) e consistência

A consistência de uma argamassa é uma propriedade diretamente ligada a quantidade de água adicionada a mistura, portanto foram dois parâmetros dependentes entre si. Desse modo, a quantidade de água para os traços foi determinada através de teste de dosagem preliminar, por meio do traço que possui uma menor quantidade de finos, traço "A_{30EPS}". Sendo assim, foi adicionada água na argamassa até a obtenção de uma consistência que possibilitasse a formação de uma argamassa trabalhável e homogênea, com a presença das pérolas de EPS.

3.1.3 Traço

A escolha do traço de argamassa de cimento e areia foi baseada na literatura e através de testes preliminares em laboratório. Como o produto desta pesquisa se trata de placas cimentícias, se faz necessário que estas atinjam uma resistência à flexão mínima, tenham bom acabamento superficial e que as pérolas de EPS se distribuam homoganeamente na pasta. Com isso, optou-se por usar um traço rico em cimento, que consiste na proporção entre aglomerante e agregado miúdo de 1:3.

3.1.4 Idade de realização dos testes

Foi estipulada a idade mínima de 28 dias para a realização dos testes desta pesquisa. Isso foi motivado pelo fato de que, neste momento, já se tem ocorrido a maioria das reações de hidratação do cimento e, assim, o produto terá resistência adequada.

3.1.5 Espessura da placa

Foi estipulada uma espessura dentro do intervalo aceito pela NBR 15498 (ABNT, 2016), assim como visto em literatura. Como a incorporação de EPS em matrizes cimentícias promove a redução da resistência, optou-se por um valor de 15mm, maior espessura dentre as placas encontradas comercialmente.

3.2 *Materials*

3.2.1 Cimento Portland

O aglomerante usado na pesquisa foi o Cimento Portland CP II-E 32, cujo requisitos são estabelecidos através da NBR 16697 (ABNT, 2018). Esse material apresenta características conforme a Tabela 3.1. Trata-se de um aglomerante mais fino e com maior área específica que a média dos valores disponíveis no mercado, para este tipo, entretanto dentro dos parâmetros normativos exigidos. Isso se traduz em um material com maior reatividade e, conseqüentemente, maior resistência à compressão. Por outro lado, tem-se um material que produz um maior calor de hidratação, que pode interferir na reologia da pasta, e proporcionar formação de microfissuras.

Tabela 3.1: Caracterização do cimento Portland CP II-E 32 fornecidas pelo fabricante.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA – Teor (% em massa)			
CARACTERÍSTICAS AVALIADAS	Limites da NBR 16697 (ABNT, 2018)	CP II-E 32	
Resíduo insolúvel (RI)	≤ 5	2,2	
Perda ao fogo (PF)	≤ 8,5	8,0	
Óxido de magnésio (MgO)	---	4,4	
Trióxido de enxofre (SO ₃)	≤ 4,5	2,4	
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA			
CARACTERÍSTICAS AVALIADAS	Limites da NBR 16697 (ABNT, 2018)	Valores médios de mercado CP II-E 32 (Battagin e Battagin, 2017)	CP II-E 32
Finura Resíduo na peneira 75 µm	≤ 12,0	1,5	0,4
Blaine (cm ² /g)	≥ 2600	3899	4594
Tempo de início de pega (min.)	≥ 60	232	231
Massa Específica (g/cm ³)	---	3,1	3,01
Expansibilidade a quente (mm)	≤ 5	0,4	0
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			
CARACTERÍSTICAS AVALIADAS	Limites da NBR 16697 (ABNT, 2018)	CP II-E 32	
3 dias	10	20,2	
7 dias	20	26,2	
28 dias	32	34,9	

3.2.2 Agregado miúdo natural

Para esta pesquisa foi utilizado o agregado miúdo de origem quartzosa, disponível na região metropolitana de Belém. Sua caracterização foi determinada por meio da realização de ensaios de massa específica, segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009), massa unitária, conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006) e composição granulométrica, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

As características físicas obtidas nos testes estão apresentados na Tabela 3.2. A curva granulométrica pode ser observada na Figura 3.2. Trata-se de uma areia fina, com limites granulométricos fora das faixas indicadas pela NBR 7211 (ABNT 2009). Desse modo, é uma areia que pode proporcionar um melhor acabamento

superficial do produto desta pesquisa, assim como contribuir para a distribuição homogênea do agregado leve.

Tabela 3.2: Características físicas da areia

Massa específica	2,66g/cm ³
Massa unitária	1,64g/cm ³
Dimensão máxima característica	600 µm
Módulo de finura	2,20

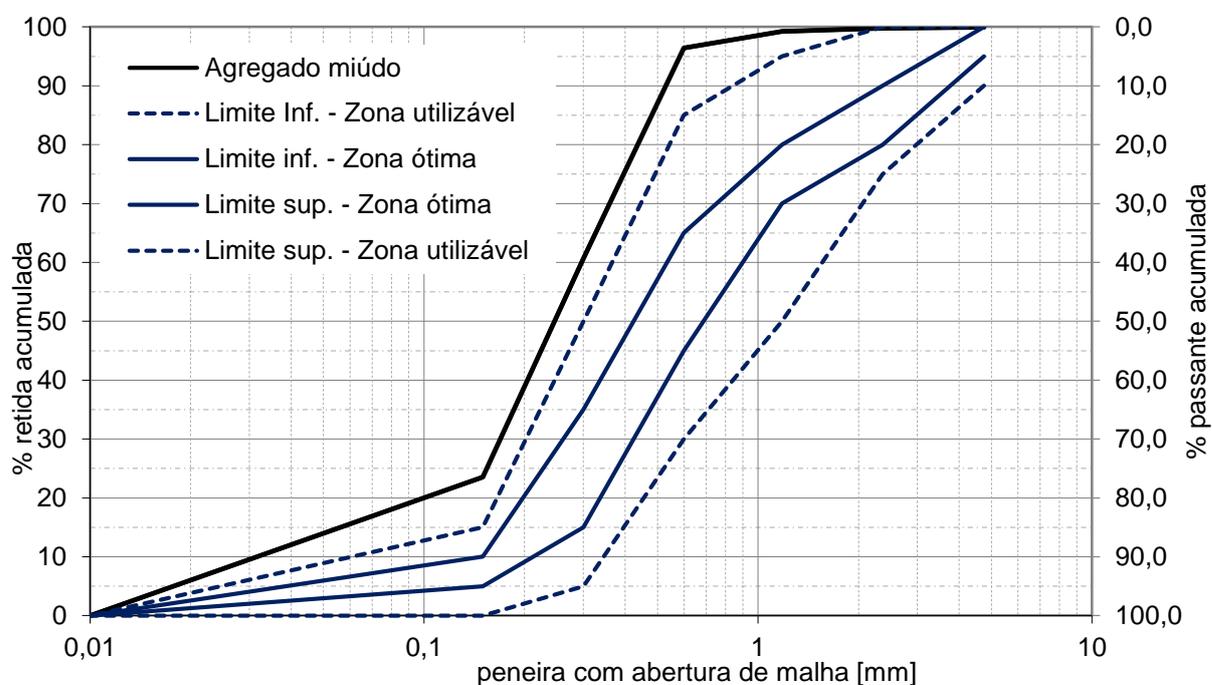


Figura 3.2 - Composição granulométrica do agregado miúdo natural, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

3.2.3 Aditivo

Utilizou-se um superplastificante de alto desempenho (reductor de água) a base de polímeros policarboxilatos. Sua densidade, é de 1,09 g/cm³ e dosagem recomendada entre 0,2 e 5% em relação ao peso do cimento. É um material disponível no estado líquido, solúvel em água, com a cor marrom.

A escolha deste tipo baseou-se pelas características fornecidas, além do fato de que as pesquisas publicadas na área, usaram também esse tipo aditivo (FERRÁNDIZ-MAS e GARCÍA-ALCOCEL, 2012; N. LIU e CHEN, 2014; MILED et al., 2007; VAN et al., 2018).

3.2.4 Pérolas de poliestireno expandido (EPS)

Nesta pesquisa, as pérolas de EPS foram incorporadas ao compósito em relação ao volume total da mistura. Esse processo foi realizado substituindo-se, parcialmente, o agregado miúdo natural. Por ser um material com densidade muito baixa e por não haver normas específicas para a caracterização deste, foram necessárias adaptações para determinar suas características físicas. As pérolas de EPS utilizadas possuem diâmetro de até de 3mm (Figura 3.3).

A densidade do material foi determinada com o auxílio de uma proveta de 500ml, uma balança de precisão (com precisão de 0,1g) e água. O teste foi realizado a partir de um adaptação do ensaio da NBR 6508 (ABNT, 1984), que determina a densidade de grãos dos agregados com o auxílio de um picnômetro.

Para isso, as pérolas foram inseridas na proveta até o preenchimento de toda o volume e vedada a abertura com uma placa de vidro, deixando uma pequena abertura para a entrada de água. Logo em seguida, fora inserida a água até preencher todos os espaços vazios. Para calcular a densidade do material, foram determinados as massas do recipiente e da placa de vidro, assim como da proveta cheia de água, para conhecimento de seu volume, da proveta com as pérolas e, posteriori, do conjunto formado pela proveta cheia EPS com os espaços vazios preenchidos pela água. A densidade obtida das pérolas de EPS foi de 15kg/m^3 e usada como parâmetro para obtenção das quantidades desse material nos traços.



Figura 3.3 - Pérolas de poliestireno expandido usadas no programa experimental.

3.2.5 Água

A água utilizada na pesquisa, para a produção das argamassas e, conseqüentemente, das placas, foi a disponível na rede de abastecimento pública, da cidade de Belém (PA).

3.2.6 Reforço para confecção das placas

Para este programa experimental optou-se pela utilização de telas plásticas como reforço para as placas a serem produzidas. Esta escolha tomou por base o trabalho realizado por Azevedo (2018), que comparou o uso de telas de polietileno de alta densidade e telas metálicas na produção de placas cimentícias e concluiu que as telas plásticas obtiveram melhores resultados em termos de resistência à flexão nos painéis. Ele argumentou que o fato de as telas metálicas serem compostas por fios entrelaçados provocam criação de pontos frágeis nos nós.

Desse modo, foi usada tela de polietileno de alta densidade hexagonal com malha de $\frac{1}{2}$ polegada. Além do mais, esta tela se mostra vantajosa em relação a metálica pelo fato de não sofrer influência de agentes degradadores, como o CO_2 .

3.3 Metodologia

3.3.1 Efeito do teor de EPS nas características da argamassa

Para esta pesquisa experimental, na qual o teor de incorporação é uma variável de controle, os traços foram produzidos de modo que os teores de EPS fossem de 10%, 20% e 30%, em relação ao volume total da argamassa. Com isso, pretendeu-se reduzir a densidade do compósito tal qual a proporção de incorporação do EPS. Nos traços produzidos, a inserção do EPS foi em substituição à massa da areia, por compensação de volume (Figura 3.4). Com o objetivo de compensar a queda nos valores das propriedades mecânicas de resistência à compressão, assim como à tração, optou-se por usar um traço rico em cimento, que consiste na proporção entre aglomerante e agregado miúdo de 1:3.

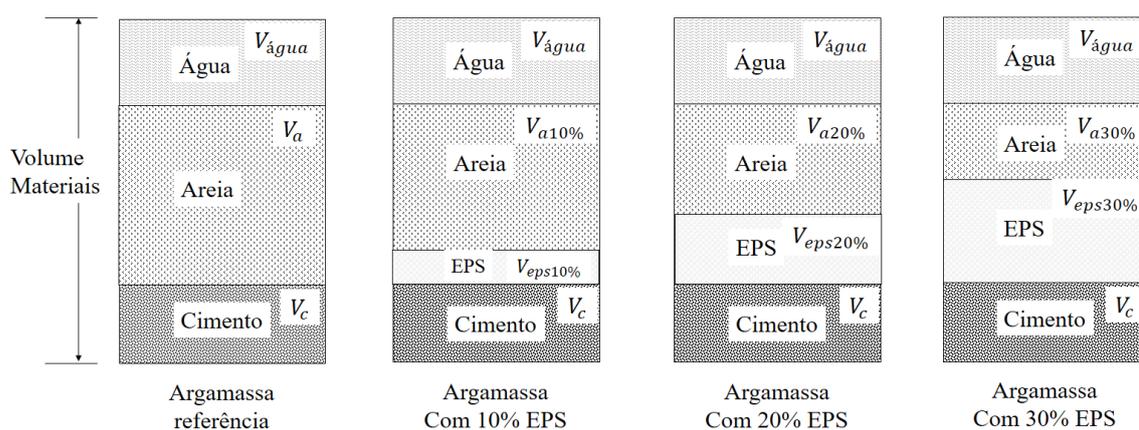


Figura 3.4 – Esquema da distribuição volumétrica dos materiais nos traços.

A quantidade de água para os traços foi fixada e determinada através de estudo preliminar, por meio do traço “A₃₀EPS”, com a determinação de uma consistência que possibilitasse uma boa trabalhabilidade e homogeneidade da argamassa. A manutenção da consistência nos demais traços foi dada com o uso do aditivo superplastificante (Tabela 3.3).

Tabela 3.3: Traços, em massa, para a pesquisa experimental.

Família	Cimento	Areia	EPS	Água / Cimento	Superplastificante
A ₀ EPS	1	3,00	0,000000	0,43	0,87%
A ₁₀ EPS	1	2,15	0,002968	0,43	0,15%
A ₂₀ EPS	1	1,98	0,006562	0,43	0,147%
A ₃₀ EPS	1	1,47	0,009842	0,43	0%

3.3.1.1 Produção da argamassa

O procedimento de mistura da argamassa foi executado através do método estabelecido pela NBR 16541 (ABNT, 2016), com uma adaptação na ordem de inclusão dos materiais, devido à baixa densidade do poliestireno expandido, que não permite realizar uma prévia homogeneização com os demais materiais secos.

Portanto, com os materiais previamente pesados, realizou-se o preparo conforme as seguintes etapas:

- Homogeneização do cimento e areia, na cuba do misturador em velocidade baixa, equivalente a 140 rpm;
- Inserção de 75% da água de mistura a argamassa, com auxílio de proveta, nos 10 segundo iniciais, misturando até completar o tempo de 30 segundos, desde o acionamento do misturador;
- Inclusão das pérolas de poliestireno expandido, em um tempo de até 30 segundos, em velocidade baixa, para que esse material seja disperso homogeneamente sobre a argamassa;
- Alteração da velocidade para a alta, equivalente a 285 rpm, e misturada por mais 60 segundos;
- Retirada da pá e raspagem de toda a superfície interna da cuba e da pá, durante um tempo máximo de 90 segundos, com o misturador parado;
- Acionamento do misturador na velocidade baixa, com a inclusão do restante de água, em um intervalo de tempo de 10 segundos, deixando o material misturar por um tempo total de 60 segundos, nessa etapa (Figura 3.5).

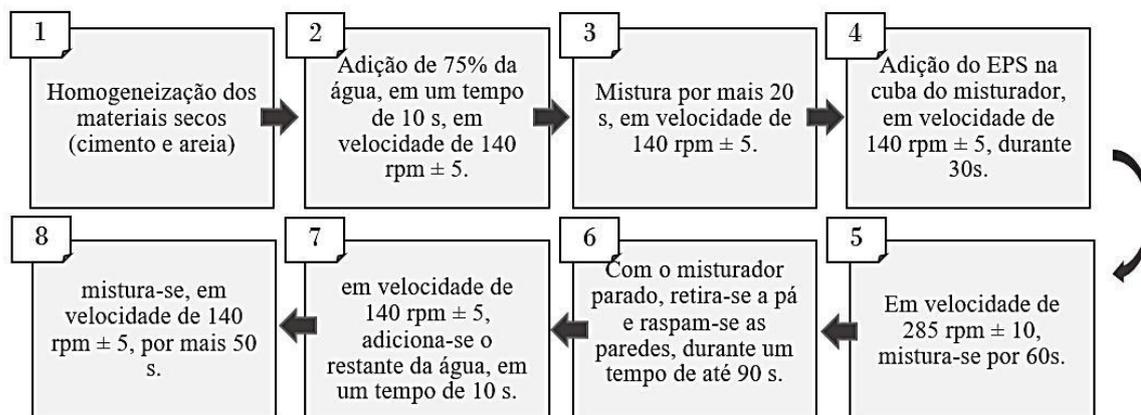


Figura 3.5 – Fluxograma de atividades para a mistura das argamassas.

O ensaio da determinação do índice de consistência foi realizado com a finalidade de garantir a dosagem de aditivo para se atingir a consistência pré-determinada. Este ensaio foi realizado conforme indicações da NBR 13276 (ABNT, 2016). Além desse ensaio, foi realizado também o teste de densidade de massa no estado fresco (NBR 13278, ABNT 2005).

O valor da consistência pré-fixado foi determinado após a realização de testes preliminares, nos quais chegaram a um valor de consistência no qual é possível a realização de um bom adensamento das placas sem que ocorresse a segregação das pérolas de EPS ou exsudação (Figura 3.6). Desse modo fixou-se o valor da consistência da argamassa em $240\text{mm} \pm 10\text{mm}$. O procedimento de ensaio seguiu conforme recomenda a norma NBR 13276 (ABNT, 2016).



Figura 3.6 – Determinação do índice de consistência da argamassa leve.

O conhecimento das propriedades da argamassa no estado endurecido foi necessário para poder correlacioná-las com os resultados obtidos nos experimentos das placas cimentícias. Para isso, uma série de ensaios foram realizadas nesta etapa do trabalho (Tabela 3.4). Ao final dos ensaios, ferramentas estatísticas foram usadas para realização do tratamento dos dados, como média, desvio padrão, Análise de variância (ANOVA) e Teste de Tukey.

Tabela 3.4: Ensaios da argamassa no estado endurecido.

Ensaio	Nº de Repetições	Norma ABNT
Densidade de massa no estado endurecido	3	NBR 13280 (ABNT, 2005)
Resistência à compressão	3	NBR 13279 (ABNT, 2005)
Módulo de elasticidade	3	NBR 15630 (ABNT, 2008)
Resistência à tração na flexão	3	NBR 13279 (ABNT, 2005)

3.3.2 Efeito do teor de EPS na produção de placas cimentícias

A moldagem das placas foi realizada a partir de uma adaptação do método usado por Azevedo (2018). Desse modo, a moldagem consistiu na inclusão de argamassa no molde em duas camadas e adensamento através da mesa de consistência.

Nesse sentido, o molde com a argamassa foi disposto sobre a mesa de consistência, preenchido com a argamassa e, logo em seguida, foi acionada a manivela da mesa, a fim de possibilitar que a mesa suba e caia a um determinado número de vezes. Essa quantidade de quedas foi definida em testes preliminares, onde encontrou-se um número ao qual não ocorresse segregação evidente de EPS e que houvesse o melhor adensamento da argamassa sobre o molde. Portanto, definiu-se a seguinte metodologia para produção das placas: após a primeira camada, são aplicadas 10 quedas na mesa. Logo em seguida, coloca-se a tela sobre a argamassa e, finalmente, aplica-se a última camada de argamassa, aplicando mais 10 quedas na mesa de consistência. O acabamento superficial é realizado através de uma régua metálica e auxiliada através de uma espátula de aço (Figura 3.7).

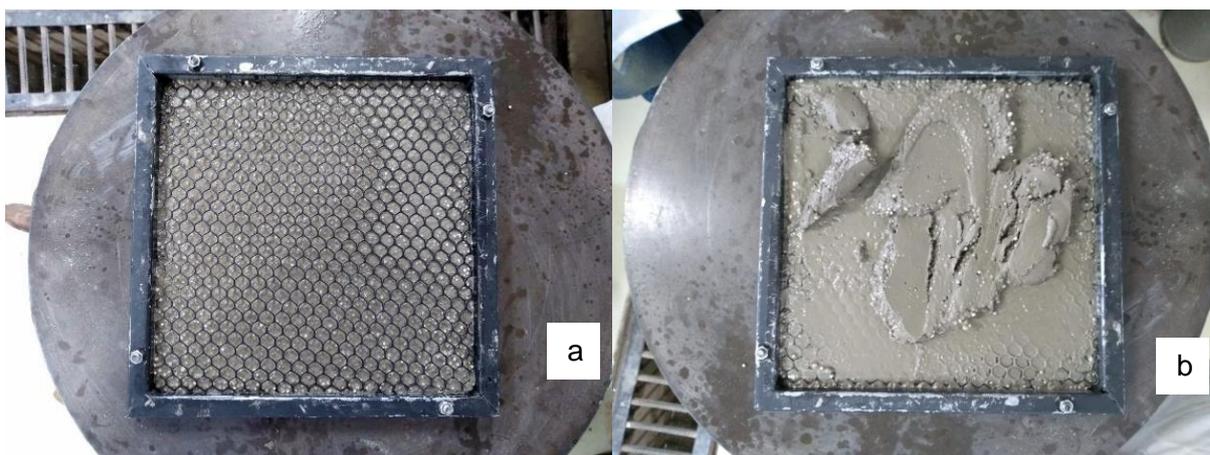


Figura 3.7 – Moldagem da placa (a) colocação da tela após a primeira camada de argamassa (b) aplicação da segunda camada de argamassa.

Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos com plástico, a fim de evitar a perda de água da argamassa para o ambiente. Posteriormente a isso, os corpos foram submetidos a temperatura ambiente durante 24 horas, tempo ao qual foi possível a desforma sem que ocasionasse danos às placas. Logo em seguida, foi realizada a desforma e os espécimes foram submetidos a cura submersa, até completarem a idade de 28 dias (Figura 3.8).

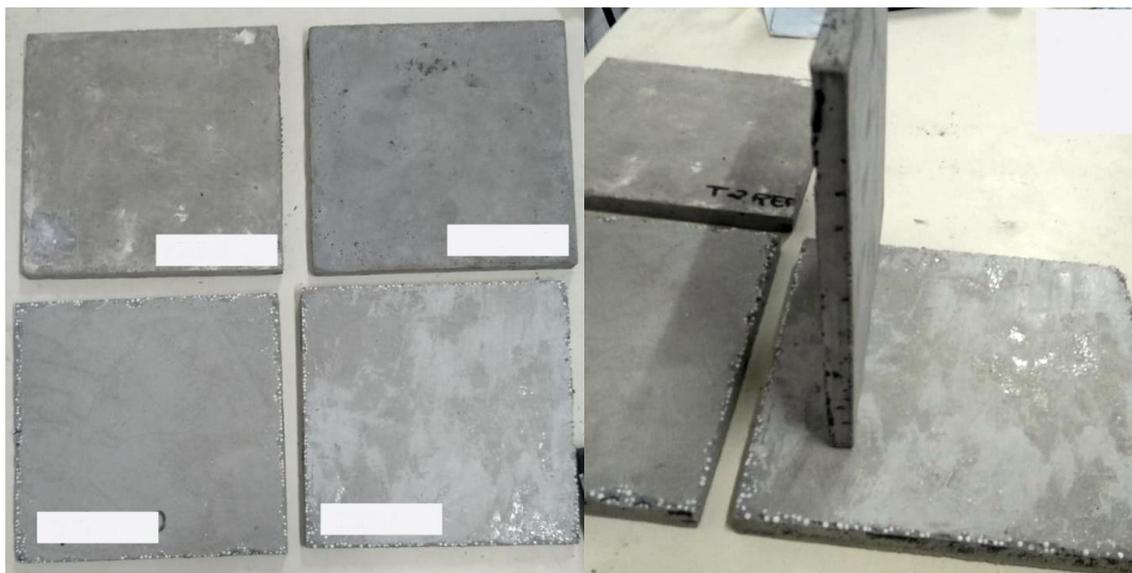


Figura 3.8 – Placas cimentícias após a desforma.

A norma de placa de fibrocimento (NBR 15498, ABNT 2016) diz que devem constar na apresentação das placas comerciais informações como absorção de água e de densidade aparente. Além disso, devido diferença na estrutura do agregado leve em comparação aos agregados naturais, espera-se que seu comportamento seja diferente no tocante à absorção de água e, por isso, é um parâmetro fundamental a ser medido nessa etapa do trabalho. Em relação a densidade aparente, além de ser um ensaio de caracterização da placa, servirá pra verificar a redução da densidade seca do material após a incorporação do EPS.

3.3.2.1 Efeito do teor de EPS na resistência à flexão de placas cimentícias

Para avaliar o efeito do teor de pérolas de EPS na resistência à tração na flexão foram usados corpos de prova quadrados, com dimensões de 250 mm x 250 mm x 15 mm, e testados conforme método proposto pela NBR 15498 (ABNT, 2016). Para essa dimensão de corpo de prova, a distância entre os apoios recomendada foi de 215 mm, podendo variar em mais ou menos 5 mm (Figura 3.9).

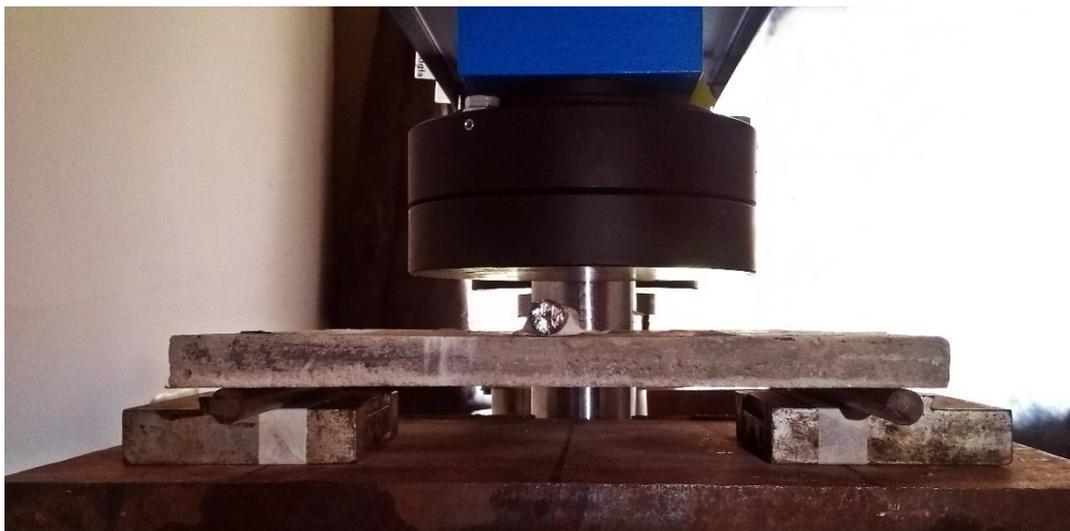


Figura 3.9 – Esquema de realização de ensaio de resistência à flexão das placas.

Conforme indicação da norma de placas de fibrocimento, a determinação da resistência à flexão foi realizada em corpos de prova na condição de equilíbrio, com o objetivo de classifica-los de acordo com os valores de resistência alcançados. Para atingir a condição de equilíbrio, as placas foram mantidas por 3 dias a temperatura de 24°C ($\pm 10^\circ\text{C}$) e umidade relativa de 50% ($\pm 20\%$). As placas da classe B, ensaiadas na condição de equilíbrio, são indicadas para aplicações internas e externas não sujeitas a ação direta de sol, chuva, calor e umidade (NBR, 15498, ABNT, 2016). Foram moldadas três placas para cada traço em análise, totalizando 12 corpos.

3.3.2.2 Efeito do teor de EPS na densidade aparente e absorção de água de placas cimentícias

Afim de avaliar o efeito do teor de EPS na densidade aparente e na capacidade de absorção de água das placas cimentícias, foram usados os mesmos corpos de prova do ensaio de flexão (25cm x 25cm x 1,5cm). Esses experimentos foram realizados antes do ensaio de flexão, afim de garantir que as amostras estariam sem danos.

Para o teste de absorção de água, foi utilizado o método proposto pela NBR 15498 (ABNT, 2016). Em relação a temperatura de secagem, mencionada na norma, o ensaio passou por uma adaptação, visto que as pérolas de poliestireno expandido presentes nas placas, à temperatura de 100° C, no intervalo de 24h, sofrem danos.

Desse modo, adotou-se uma temperatura de 60°C, durante um tempo de 48 horas ou até que as placas atingissem uma constância de massa.

Após os 28 dias de cura submersa, os corpos de prova estavam saturados e, dessa forma realizou-se a primeira pesagem para a determinação do ensaio de densidade aparente. A secagem dos corpos de prova foi realizada a temperatura de 60°C, em estufa, uma vez que o EPS é um material sensível a altas temperaturas, com a duração de tempo que garantisse a constância de massa.

3.3.2.3 Efeito do teor de EPS na permeabilidade de água em placas cimentícias

A permeabilidade de água é uma propriedade da placa cimentícias que pode ser verificada por teste disponível tanto na norma de desempenho (NBR 15575-4, ABNT 2013) quanto na norma de placa de fibrocimento (NBR 15498, ABNT 2016). Motivado pelo fato de que a norma de placas de fibrocimento tratar do tema específico e a de desempenho ser mais genérica a todos os tipos de vedação vertical, como também pelo fato dessa ser mais recente que a outra, optou-se por realizar o ensaio de permeabilidade segundo os critérios da NBR 15498 (ABNT, 2016).

Para esse experimento, foram utilizados corpos de provas de com largura (L_{cp}) de 50cm e comprimento (C_{cp}) de 60cm (Figura 3.10). O caixote do experimento é fabricado de vidro e o material usado para selar o perímetro foi silicone acético transparente. Antes da execução do experimento, os corpos de prova foram submetidos ao condicionamento, aos quais foram conservados ao abrigo do sol, da chuva e do vento durante o período de três dias, em temperatura ambiente. A execução do teste contou com a leitura da temperatura e umidade no início e término do experimento (Figura 3.11).



Figura 3.10 – Esquema de realização do teste de permeabilidade de água, conforme a NBR 15498 (ABNT, 2016).

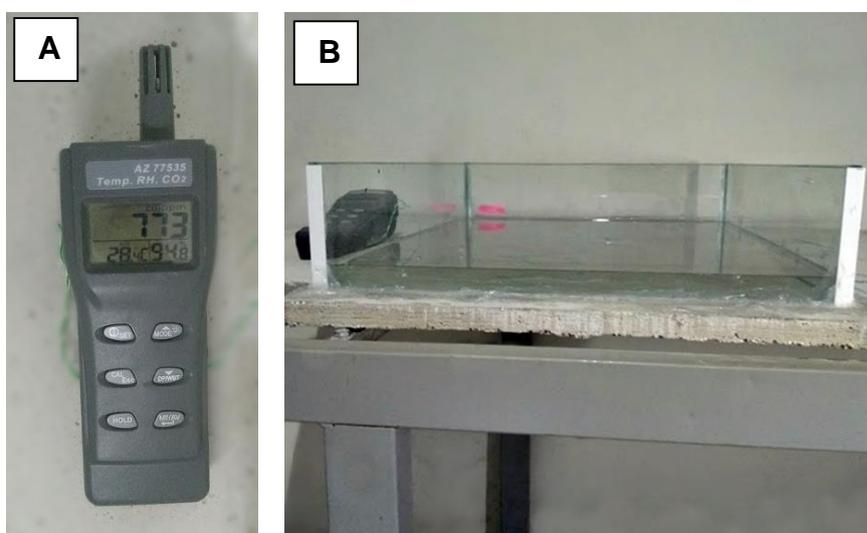


Figura 3.11 – Realização do experimento de permeabilidade de água das placas cimentícias: A – aparelho para medição da temperatura e umidade do ambiente; B – Ensaio em andamento.

Quanto ao critério de aceitação, segundo a norma de placas de fibrocimento, finalizado o tempo de ensaio as amostras podem aparecer traços de umidade na face inferior das placas, mas em nenhum caso deve haver formação de gotas de água nessa face (NBR 15498, ABNT 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Efeito do teor de EPS na produção das argamassas

Com os materiais empregados e a consistência fixada foi possível obter uma argamassa com boa trabalhabilidade para a produção das placas cimentícias. A incorporação de pérolas de EPS, em diferentes teores, não afetou a homogeneidade das argamassas. As misturas mostraram-se coesa e com capacidade de retenção de água satisfatória, conforme mostra a Figura 4.1.



Figura 4.1 – Consistência da argamassa leve com poliestireno expandido, vista lateralmente.

Outro fenômeno de destaque da argamassa no estado fresco foi a ausência da ocorrência de “flutuação dos agregados”, que ocorre durante a mistura ou manuseio o concreto leve, com a sedimentação da argamassa, uma vez que ela possui densidade muito superior à dos agregados leves. Rossignolo (2009) afirma que esse fenômeno pode ser evitado realizando a dosagem de concretos com coesão e consistência adequados, pelo controle da relação água/cimento, teor de agregados miúdos e ainda, o uso de adições minerais. No caso deste experimento, o controle da água, usando o aditivo superplastificante como mecanismo de compensação para a garantia da consistência, foi fundamental para a garantia da homogeneidade (Figura 4.2).



Figura 4.2 – Consistência da argamassa leve com poliestireno expandido (A_{30EPS}), com visão superior

No estudo de K. G. Babu e Babu (2003), os autores destacam a relevância do uso de aditivo superplastificante como mecanismo de compensação da natureza hidrofóbica do EPS, uma vez que o aditivo teve por uma de suas funções a melhorar a coesão da mistura. Outras pesquisas anteriores envolvendo poliestireno expandido em matrizes cimentícias também optaram pelo uso de aditivo superplastificante (ALEXANDRE BOGAS; GOMES; REAL, 2015; CHOI *et al.*, 2006; OZÓRIO, 2016). Assim como nesses trabalhos, as argamassas leves produzidas nesta pesquisa apresentaram uma boa coesão e homogeneidade entre os materiais, o que reafirma a importância da opção pelo uso do aditivo superplastificante em argamassas leves produzidos com pérolas de poliestireno expandido.

4.2 Efeito do teor de EPS nas características das argamassas

4.2.1 Densidade das argamassas no estado fresco

Os resultados do ensaio de densidade de massa no estado fresco realizados conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005) estão apresentados na Tabela 4.1. Foi

constatado que a incorporação de pérolas de poliestireno expandido nas argamassas provoca alterações sobre esta variável de resposta. Nesse sentido, para a mistura com maior teor de EPS (A_{30EPS}), ocorreu uma redução da densidade da argamassa no estado fresco na grandeza de 18%, em comparação à de referência (A_{0EPS}).

Tabela 4.1: Densidade das argamassas no estado fresco em kg/m³.

Família	A_{0EPS}	A_{10EPS}	A_{20EPS}	A_{30EPS}
Densidade (kg/m ³)	2189,66	2049,48	1933,72	1797,93

O estudo realizado por Ferrándiz-Mas e García-Alcocel (2012) corrobora os resultados encontrados nesse ensaio. Ao incorporar o EPS em argamassa de cimento, o autor observou que a densidade do compósito é inversamente afetada, ou seja, quanto maior o teor, menor será o valor obtido na densidade no estado fresco. As reduções mais significativas são alcançadas em teores de incorporação elevados. Além disso, o autor também menciona que o teor de ar incorporado na argamassa é aumentado a medida em que se acrescenta o EPS na argamassa, o que proporciona certa influência sobre a trabalhabilidade e densidade do material produzido.

4.2.2 Densidade das argamassas no estado endurecido

Os resultados do ensaio de densidade de massa no estado endurecido NBR 13278 (ABNT, 2005) podem ser vistos na Tabela 4.2. Conforme apresentado, a incorporação de poliestireno expandido tem importante relevância na redução da densidade no estado endurecido. Tais resultados foram imprescindíveis para o entendimento e correlação entre as demais propriedades físicas da argamassa leve.

Os resultados refletem o comportamento outrora evidenciado por outros pesquisadores, uma vez que apresentaram o EPS como responsável pela redução significativa da densidade de massa no estado endurecido (Ferrándiz-Mas e García-Alcocel, 2012; Van et al., 2018). Desse modo, esperava-se essa redução da densidade a medida em que fosse incluso o EPS no compósito. Nesse sentido, o EPS possibilitou a redução da densidade da argamassa em até 19%, no caso do traço

A_{30EPS}, em comparação ao traço controle A_{0EPS}. Nos demais casos, a redução da densidade foi de 4%, para o A_{10EPS}, e de 14%, para o A_{20EPS}, em comparação ao traço controle.

Tabela 4.2: Densidade de massa da argamassa no estado endurecido, NBR 13280 (ABNT, 2005).

Traço	Densidade da argamassa (g/cm ³)	Média aritmética (g/cm ³)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
A _{0EPS}	2,10	2,07	0,018	1%
	2,07			
	2,06			
A _{10EPS}	1,95	1,99	0,033	2%
	2,00			
	2,02			
A _{20EPS}	1,78	1,79	0,060	3%
	1,85			
	1,73			
A _{30EPS}	1,68	1,68	0,015	1%
	1,67			
	1,70			

Na Tabela 4.3 é observado, através da Análise de Variância (ANOVA), que o teor de EPS exerce influência significativa nos resultados de densidade no estado endurecido.

Tabela 4.3: Análise de Variância para o ensaio de densidade no estado endurecido.

	SQ	GL	SQM	F-Valor	P-Valor
Entre grupos	0,29	3	0,0980972	70,07	0,00000438
Erro	0,01	8	0,0014		
Total	0,30	11			

O teste de Tukey, por sua vez, ao nível de 5% de significância, demonstrou, estatisticamente, que a inserção de poliestireno expandido modifica a propriedade de densidade no estado endurecido das argamassas (Figura 4.3). A figura apresenta as comparações múltiplas entre os tratamentos, no eixo das ordenadas estão presentes os pares de tratamentos comparados e no eixo das abcissas os intervalos de confiança alcançados. Através da figura, tem-se que os tratamentos comparados possuem diferença significativas entre eles se seus limites não cruzarem o valor zero no intervalo de confiança, marcado por uma linha vertical vermelha.

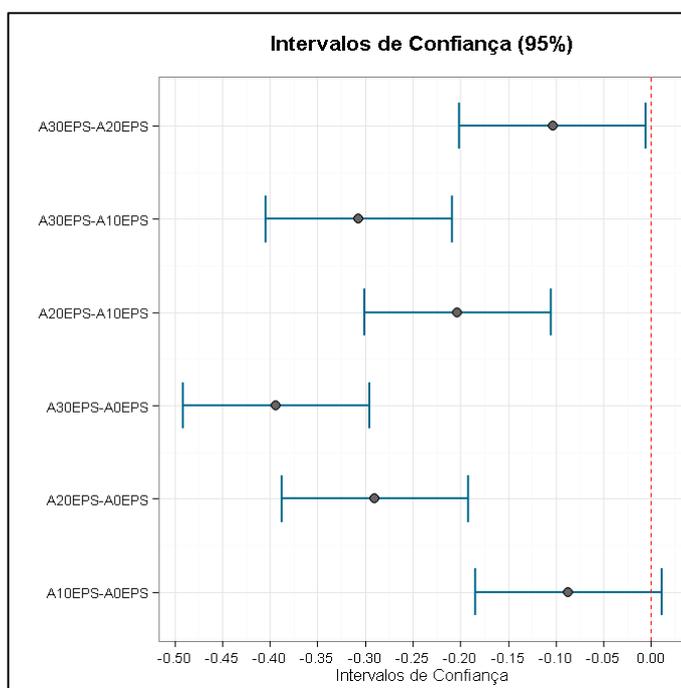


Figura 4.3 – Comparações múltiplas através do Teste de Tukey para os resultados de densidade no estado endurecido das argamassas.

Sendo assim, entre as comparações realizadas, nota-se somente na argamassa A₁₀EPS a inserção das pérolas não promoveu influência significativa na densidade. Esse comportamento era esperado, uma vez que a diferença entre eles foi pouco expressiva.

4.2.3 Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão, realizados conforme procedimentos da NBR 13279 (ABNT, 2005), estão descritos na Tabela 4.4. Os resultados apontam para uma queda na resistência à compressão das argamassas a medida em que o percentual de EPS no compósito é aumentado.

Sabe-se que a resistência à compressão de concretos leves com EPS é governada pela quantidade de EPS, seguida pela relação água/cimento (RAMLI SULONG; MUSTAPA; ABDUL RASHID, 2019b). Como nesse experimento a relação água/cimento foi uma variável fixa para todos os traços, o teor de poliestireno expandido teve fundamental relevância nos resultados obtidos.

Tabela 4.4: Resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova cúbicos.

Traço	Resistência à Compressão (MPa)	Média aritmética (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
A₀EPS	32,36	32,97	2,218	7%
	31,11			
	35,42			
A₁₀EPS	22,19	22,77	0,499	2%
	23,07			
	23,04			
A₂₀EPS	21,84	20,26	1,379	7%
	19,64			
	19,30			
A₃₀EPS	15,48	16,96	1,902	11%
	19,11			
	16,30			

A partir dos resultados do teste de resistência à compressão das argamassas leves, aos 28 dias, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) e, posteriormente, o teste de Tukey, afim de verificar, estatisticamente, se os tratamentos (teor de

incorporação de poliestireno expandido) exercem influência significativa sobre esta propriedade. Os resultados da Análise de Variância, ao nível de 5% de significância, estão apresentados na Tabela 4.5.

A análise demonstrou que existe diferença significativa entre os tratamentos para este experimento, uma vez que o P-Valor, da ANOVA, resultou em um valor abaixo de 0,05. Com isso, podemos inferir que o teor de incorporação de EPS exerce influência significativa sobre a propriedade de resistência à compressão.

Tabela 4.5: Análise de Variância para o ensaio de resistência à compressão.

	SQ	GL	SQM	F-Valor	P-Valor
Entre grupos	429,13	3	143,04	53,51	0,0000123
Erro	21,38	8	2,67		
Total	450,51	11			

Como a análise foi realizada a partir de quatro tratamentos, realizou-se o teste de Tukey, ao nível de 5% de significância, a fim de complementar a análise estatística e determinar como eles se comportam entre si. A partir das comparações múltiplas, nota-se que há diferença significativa entre a maioria dos tratamentos. Estatisticamente, não houveram diferença entre os tratamentos “A_{30EPS}” e “A_{20EPS}”, assim como entre os traços “A_{20EPS}” e “A_{10EPS}”, mostrados na Figura 4.4.

Como apresentado, as argamassas de referência atingiram uma resistência à compressão média de 32,97 MPa, com um desvio padrão de 2,22 MPa. Em comparação com os as argamassas com EPS, houve uma redução percentual de 31%, para o traço A_{10EPS}. Para a família A_{20EPS} a queda foi de 39% e para a família A_{30EPS} foi de, aproximadamente, 49%.

Como visto na Figura 4.5, a redução da resistência ocorreu de forma exponencial, o que reitera o exposto por Liu e Chen (2014). A partir dos dados, pode-se expressar um modelo matemático que representasse o comportamento entre as propriedades de resistência à compressão e densidade. Esse modelo obteve um coeficiente de correlação de 86,22%, valor ao qual o modelo representa a variabilidade dos dados.

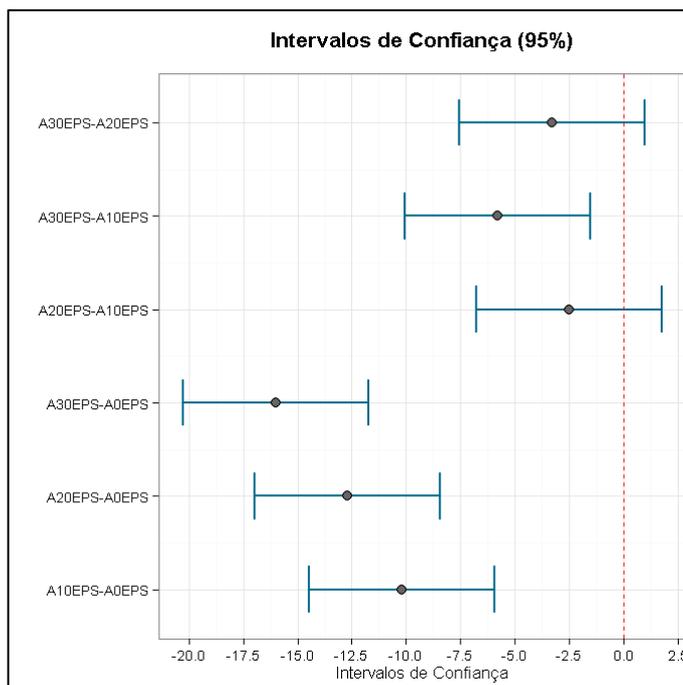


Figura 4.4 - Comparações múltiplas através do Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão das argamassas.

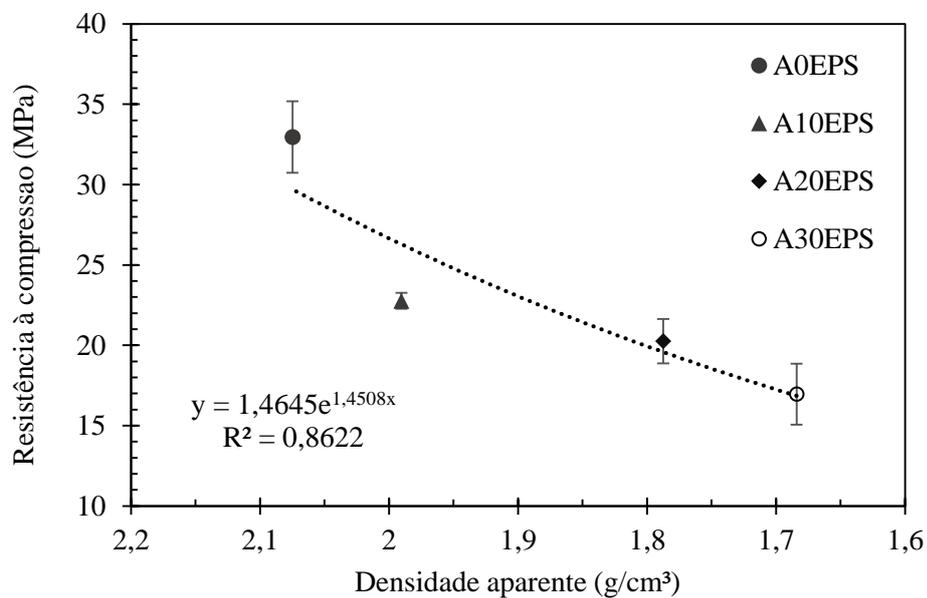


Figura 4.5 - Resistência à compressão das argamassas.

Em suma, os resultados do experimento para essa propriedade corroboram os de pesquisas anteriores, uma vez que a resistência das argamassas leves reduziu

conforme a aumento do teor de poliestireno expandido, assim como ocorre com a densidade (Figura 4.5) (Ranjbar e Mousavi, 2015; Tittarelli et al., 2016). Para os três traços estudados, a influência da adição de EPS na resistência à compressão ocorre de modo similar, visto que o EPS tem natureza inerte, flexível e que não possui resistência mecânica, atuando como vazios ao longo da matriz.

4.2.4 Resistência à tração na flexão

Os valores encontrados no ensaio de resistência à tração na flexão, realizado conforme procedimento descrito na norma NBR 13279 (ABNT, 2005), estão apresentados Tabela 4.6, assim como os valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação. Nessa tabela, pode-se observar uma tendência a queda na resistência à tração na flexão a medida em que o teor de incorporação de poliestireno é aumentado.

Tabela 4.6: Resistência à flexão das argamassas.

Traço	Resistência à Flexão (MPa)	Média aritmética	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
A_{0EPS}	7,53	7,62	0,09	1%
	7,64			
	7,70			
A_{10EPS}	7,01	6,69	0,34	5%
	6,33			
	6,73			
A_{20EPS}	6,33	5,65	0,59	10%
	5,24			
	5,38			
A_{30EPS}	5,32	5,24	0,09	2%
	5,15			
	5,26			

As argamassas de referência (A_{0EPS}) atingiram uma resistência à flexão média de 7,62 MPa, com um desvio padrão de 0,09 MPa. Quanto aos traços das argamassas com EPS, a argamassa A_{10EPS} resultou em um valor 12,2% inferior a A_{0EPS}. Por outro

lado, para a família A₂₀EPS, a queda foi de 26% e para a família A₃₀EPS foi de, aproximadamente, 31%.

Estatisticamente, através da Análise de Variância, constatou-se que existe diferença significativa entre os traços analisados. Com isso pode-se dizer que o teor de incorporação de poliestireno expandido exerce influência significativa sobre a resistência à flexão desses compósitos. Com a probabilidade de significância inferior a 0,05, sabe-se que ao menos um dos tratamentos analisados apresenta diferença significativa em relação a outro(s) (Tabela 4.7).

Tabela 4.7: Análise de variância (ANOVA) dos ensaios da argamassa no estado endurecido.

		SQ	GL	SQM	F-Valor	P-Valor
Tração na flexão	Entre grupos	9,71453	3	3,23818	26,69	0,0001614
	Erro	0,970733	8	0,121342		
	Total	10,6853	11			

O teste de Tukey, por sua vez, confirmou a diferença entre os tratamentos, especificando quais possuem diferença estatísticas entre si. Dentre as comparações múltiplas, a análise apontou que os tratamentos A₃₀EPS e A₂₀EPS não apresentaram diferenças significativas entre si, conforme ilustrado na Figura 4.6.

A tração na flexão foi uma propriedade que se relacionou inversamente proporcional a densidade aparente no estado endurecido (Figura 4.7). A relação entre as propriedades pôde ser explicada por uma função linear, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,96. Isso quer dizer que o modelo expresso no gráfico da Figura 4.7 explica 96% da variância dos dados. N. Liu e Chen (2014) constataram existir uma linearidade na correlação entre a resistência à tração e o volume de EPS introduzido na argamassa.

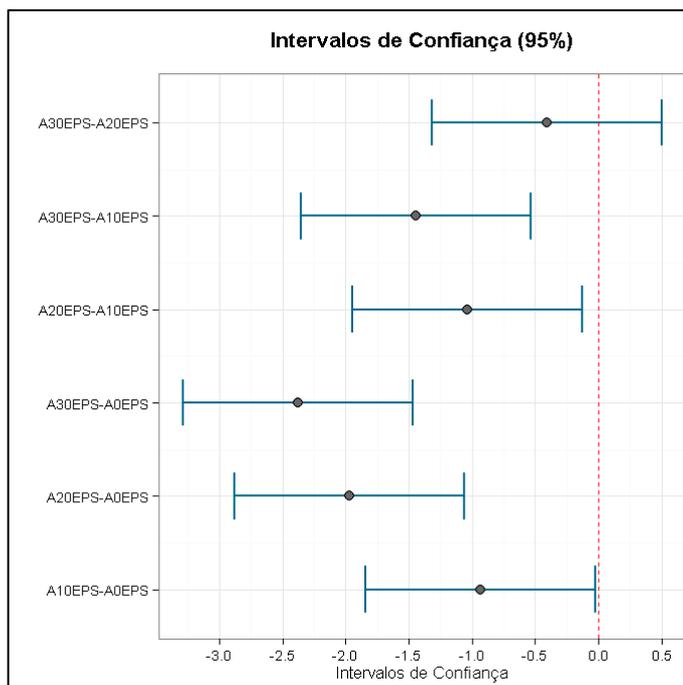


Figura 4.6 - Comparações múltiplas através do Teste de Tukey para os resultados de resistência à flexão das argamassas.

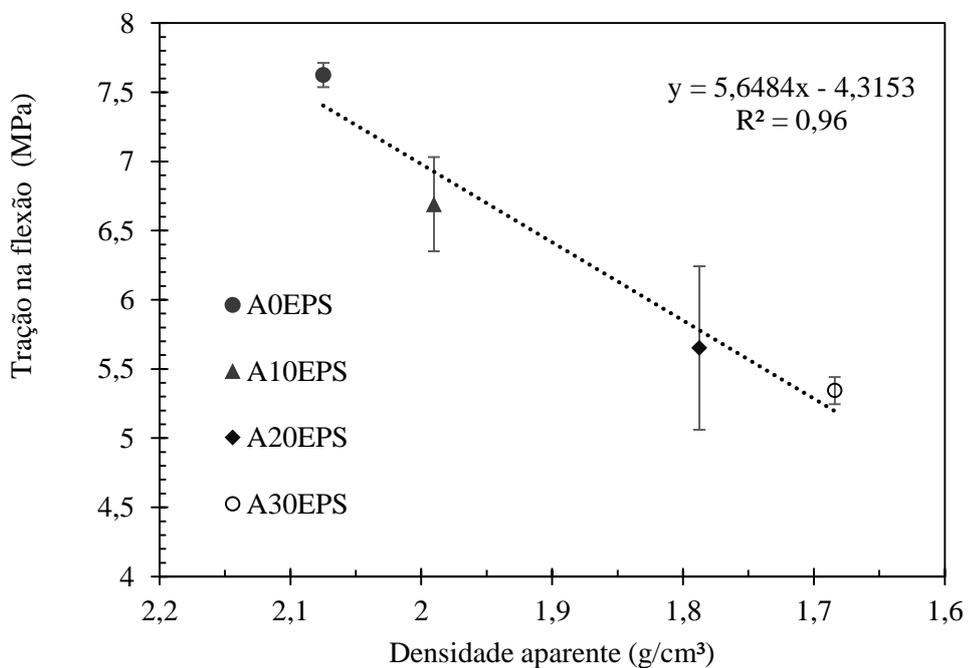


Figura 4.7 - Resistência à flexão das argamassas.

Desse modo, a incorporação de EPS nas matrizes cimentícias mostrou ser um fator que influencia de modo significativo nos resultados de resistência à flexão. Tal comportamento já era esperado, uma vez que outros autores constataram essa relação entre a densidade do compósito e a resistência à tração (N. Liu e Chen, 2014; Ozório, 2016; Ranjbar e Mousavi, 2015). Por outro lado, esse experimento é essencial para que se possa ter uma primeira resposta do que se aguardar dos resultados de resistência à flexão das placas cimentícias, uma vez que esta será produzida com os mesmos traços.

Por fim, comparando os resultados do teste de resistência à compressão com os de tração na flexão, notou-se que o efeito da incorporação de EPS é mais evidente nos resultados de resistência à compressão que à tração, ou seja, as argamassas leves são mais frágeis a esforços de compressão que tração. Nesse sentido, enquanto o decréscimo da resistência à compressão foi de 31%, 39%, e 49% para as argamassas A_{10EPS}, A_{20EPS} e A_{30EPS}, respectivamente, a queda na resistência à flexão foi de 12%, 26% e 31%, para as argamassas A_{10EPS}, A_{20EPS} e A_{30EPS}, respectivamente. Esse comportamento é anteriormente evidenciado pelo trabalho feito por R. Wang e Meyer (2012), o que ratifica essa relação entre as duas propriedades.

4.2.5 Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados de módulo de elasticidade dinâmico foram obtidos através do procedimento de propagação de onda ultra-sônica, conforme NBR 15630 (ABNT, 2008) e estão apresentados na Tabela 4.8. Nessa tabela, estão apresentados a densidade de massa aparente do corpo-de-prova médio ($\rho_{\text{méd.}}$), o tempo de propagação de onda, registrado pelo mostrador digital (t), a velocidade de propagação da onda ultra-sônica (v), o módulo de elasticidade dinâmico de cada corpo de prova (E_d) e o módulo de elasticidade dinâmico médio ($E_{d\text{méd.}}$), assim como o desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados. Vale ressaltar que foi considerado que todos os corpos de prova possuíam coeficiente de Poisson equivalente a 0,2, conforme indica a NBR 15630 (ABNT, 2008).

Tabela 4.8: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade pelo método do ultrassom.

Traço	ρ méd. (kg/m ³)	t (μ s)	v (mm/ μ s)	E _d (GPa)	E _d méd. (GPa)	Desv. Pad.	C.V.
A ₀ EPS	2.075	23,9	4,18	32,63	32,63	0,94	3%
		23,6	4,24	33,57			
		24,3	4,12	31,70			
A ₁₀ EPS	1.990	25,7	3,89	27,10	26,12	2,08	8%
		25,5	3,92	27,52			
		27,5	3,64	23,73			
A ₂₀ EPS	1.788	28,8	3,47	19,38	19,91	0,82	4%
		27,8	3,6	20,86			
		28,7	3,48	19,49			
A ₃₀ EPS	1.684	28,6	3,5	18,57	18,27	1,64	9%
		30,3	3,3	16,50			
		27,7	3,61	19,75			

De acordo com os resultados apresentados, houve variação significativa sobre o valor do módulo de elasticidade das argamassas, quando se incorporou o EPS. Nesse sentido, o EPS possibilitou a redução do módulo dinâmico em até 44%, aproximadamente, no caso do traço A₃₀EPS, em comparação ao traço controle A₀EPS. Nos demais casos, a redução do módulo de elasticidade dinâmico foi de 20%, para o A₁₀EPS e de 39%, para o A₂₀EPS, aproximadamente, em comparação ao traço A₀EPS.

Assim como nas demais propriedades mecânicas, constatou-se que as pérolas de poliestireno expandido atuam reduzindo o módulo de elasticidade dinâmico da argamassa. Conseqüentemente, observou-se uma relação inversamente proporcional entre o módulo e a densidade aparente do material (Figura 4.8). Nesse sentido, há uma relação linear entre as duas propriedades, que podem ser explicadas através do modelo apresentado na Figura 4.8, com um R² de 0,94.

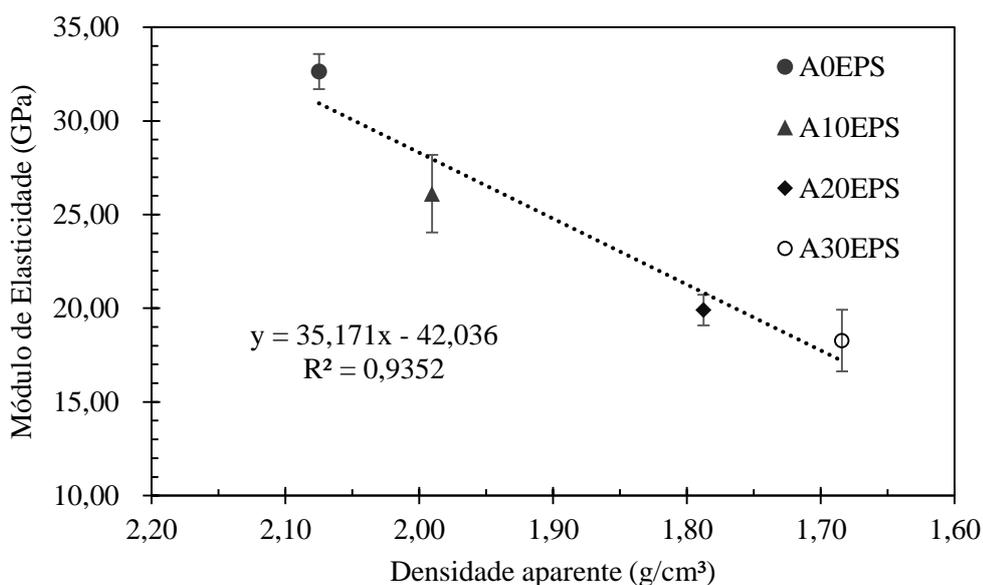


Figura 4.8 - Módulo de elasticidade ultrassônico, conforme NBR 15630 (ABNT, 2008).

A Análise de Variância confirmou a diferença entre os tratamentos analisados. Nesse sentido, o teor de poliestireno expandido exerce influência significativa sobre o valor do módulo de elasticidade das argamassas leves, conforme apresenta a Tabela 4.9, ao nível de significância de 5%.

Tabela 4.9: Análise de variância dos ensaios da argamassa no estado endurecido.

		SQ	GL	SQM	F-Valor	P-Valor
Módulo de elasticidade	Entre grupos	384,959	3	128,32	59,84	0,000008
	Erro	17,154	8	2,14425		
	Total	402,113	11			

A partir das comparações múltiplas, nota-se que há diferença significativa entre a maioria dos tratamentos, aos quais são identificados na Figura 4.9. Estatisticamente, não houveram diferença entre os tratamentos “A30EPS” e “A20EPS”, para ensaio módulo de elasticidade.

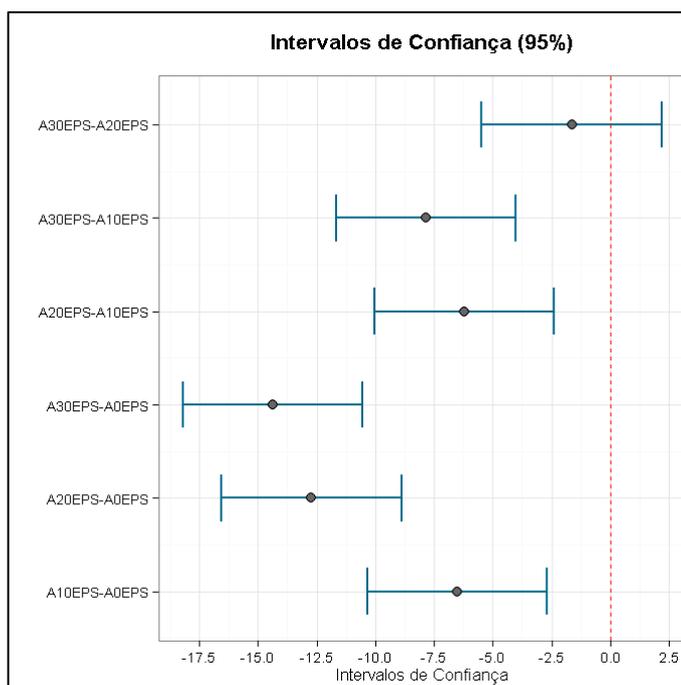


Figura 4.9 - Comparações múltiplas através do Teste de Tukey para os resultados de módulo de elasticidade das argamassas.

Em síntese, a incorporação de EPS, em diferentes teores, modificou significativamente as propriedades físicas das argamassas estudadas neste trabalho. Na Tabela 4.10, é apresentado um resumo dos os valores médios das propriedades físicas estudadas nesta seção. Com efeito, nota-se que o EPS reduz o valor destas propriedades à medida em que é incorporado. Estes dados foram fundamentais para o entendimento do comportamento das placas cimentícias.

Tabela 4.10: Valores médios das propriedades físicas das argamassas com EPS.

	A₀EPS	A₁₀EPS	A₂₀EPS	A₃₀EPS
Densidade no estado fresco (kg/m ³)	2186,66	2049,48	1933,72	1797,93
Densidade no estado endurecido (kg/cm ³)	2070,00	1990,00	1790,00	1680,00
Resistência à compressão (MPa)	32,97	22,77	20,26	16,96
Resistência à flexão (MPa)	7,62	6,69	5,65	5,24
Módulo de elasticidade (MPa)	32,63	26,12	19,91	18,27

4.3 Efeito do teor de EPS nas propriedades físicas de Placas cimentícias

4.3.1 Densidade aparente

Em relação a esta propriedade, a incorporação de EPS teve influência considerável na redução da densidade aparente das placas cimentícias. Assim, o traço controle apresentou uma densidade aparente média de 2,18 g/cm³, e as placas produzidas com poliestireno expandido mostraram uma redução na densidade a medida em que foi aumentado o teor de incorporação, o que reproduz o comportamento ocorrido nos testes de densidade no estado endurecido das argamassas. Desse modo, foi possível uma redução percentual na densidade aparente média de 8,72%, 16,06% e 23,39%, entre as famílias “A₁₀EPS”, “A₂₀EPS” e “A₃₀EPS”, respectivamente (Tabela 4.11).

Tabela 4.11: Resultados do ensaio de densidade aparente.

Traço	Densidade Aparente (g/cm ³)	Média aritmética (g/cm ³)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
A ₀ EPS	2,19	2,18	0,007	0%
	2,19			
	2,18			
A ₁₀ EPS	2,00	1,99	0,013	1%
	1,98			
	1,99			
A ₂₀ EPS	1,89	1,85	0,039	2%
	1,82			
	1,83			
A ₃₀ EPS	1,66	1,67	0,023	1%
	1,70			
	1,67			

O baixo valor do coeficiente de variação dos resultados do ensaio indica matematicamente que os materiais foram misturados suficientemente para garantir que o EPS tenha se distribuído uniformemente entre as matrizes de argamassa (Tabela 4.11).

A NBR 15498 (ABNT, 2016) não fixa valores de densidade das placas cimentícias para serem aptas ao uso, entretanto exige que o fabricante especifique na documentação técnica o seu valor. Desse modo, não há impedimento quanto a essa propriedade para uso em vedação vertical das placas com EPS.

Por outro lado, é de conhecimento comum que quanto menor a densidade da vedação vertical, menor será a carga permanente atribuída a estrutura da edificação. Sendo assim, o uso de painéis leves pode possibilitar economia no custo global de construção. Outros benefícios relativos ao uso de componentes leves e pré-fabricados estão na facilidade na execução das instalações, alta produtividade e facilidade de manutenção (LIMA, 2012).

A partir dos valores obtidos no experimento, realizou-se uma análise estatística, através da Análise de Variância, ao qual foram verificadas as diferenças estatísticas entre as placas, no que se refere a densidade aparente. A análise confirmou que existe diferença significativa entre os tratamentos, uma vez que o P-valor resultou em um valor abaixo de 0,05 (Tabela 4.12).

Tabela 4.12: ANOVA dos resultados de densidade aparente das placas cimentícias.

	SQ	GL	SQM	F-valor	P-valor
Entre grupos	0,4215	3	0,1405	281	>0,01
Erro	0,004	8	0,0005		
Total	0,4255	11			

As comparações múltiplas realizadas entre os tratamentos, através do método de Tukey, ao nível de significância de 5%, estão apresentados na Figura 4.10. Através da ilustração, nota-se que todos os tratamentos são distintos entre si.

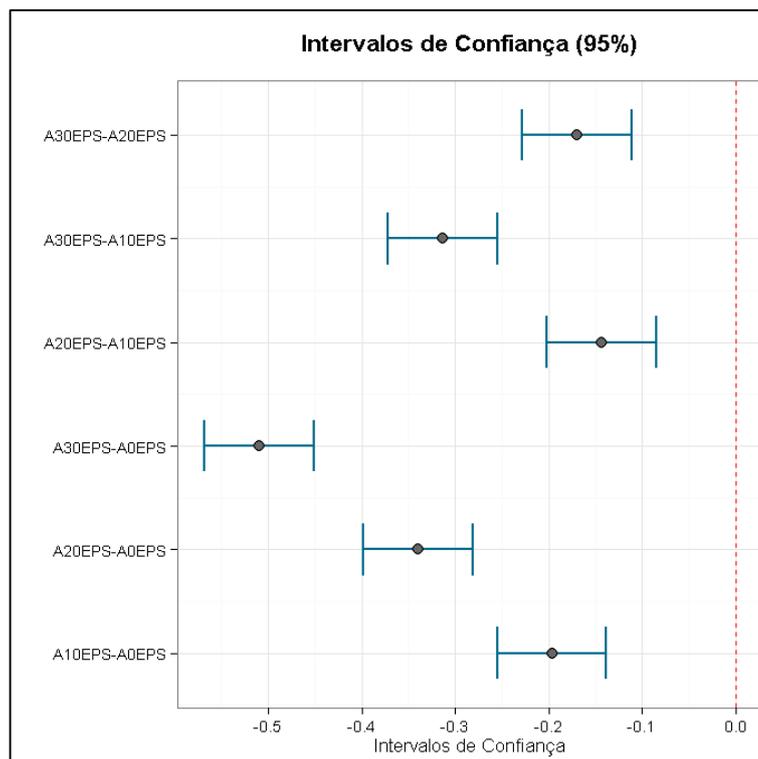


Figura 4.10 - Comparações múltiplas através do Teste de Tukey para os resultados de densidade aparente das placas cimentícias.

Em comparação com os resultados das argamassas, observou-se que houve uma variação no comportamento da densidade no estado endurecido, se comparado com a densidade aparente das placas cimentícias. Enquanto as argamassas A₀EPS e A₁₀EPS mostraram-se estatisticamente iguais, as placas cimentícias produzidas com esses traços apresentaram-se diferente. Entre os fatores que podem ter contribuído para essa diferença estão a presença das telas nas placas cimentícias e, também, a diferença do modo de moldagem entre os espécimes.

4.3.2 Absorção de água

Os resultados de absorção de água das placas cimentícias com incorporação de pérolas de poliestireno expandido estão apresentados na Tabela 4.13. Pode-se observar que a absorção de água não sofreu variação significativa entre os traços estudados (Tabela 4.13).

As placas compostas da argamassa com o traço “A₀EPS” tiveram uma absorção de água média de 2,90%. Por outro lado, as placas “A₁₀EPS”, obtiveram uma absorção média de 3,79%, o que representa um aumento percentual de 30% em relação à placa de referência. No tocante ao “A₂₀EPS”, a absorção de água média foi de 3,54%, o que corresponde a um aumento da absorção de água em 22%, em relação ao traço de referência. Por último, as placas do traço “A₃₀EPS%”, que apresentaram os maiores valores, resultaram em uma absorção média de 4,65%, correspondente a um aumento de 60% na absorção, em relação ao traço controle.

Tabela 4.13: Resultado do ensaio de absorção de água das placas cimentícias.

Traço	Absorção de água (%)	Média aritmética	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
A₀EPS	2,95%	2,90%	0,001	3%
	2,94%			
	2,81%			
A₁₀EPS	4,23%	3,79%	0,004	10%
	3,57%			
	3,58%			
A₂₀EPS	3,63%	3,54%	0,002	6%
	3,68%			
	3,31%			
A₃₀EPS	5,25%	4,65%	0,006	12%
	4,13%			
	4,58%			

Nesse caso, o agregado leve foi o material que exerceu influência sobre a variação da absorção de água entre as placas estudadas. Os resultados do ensaio de absorção mostram um aumento na absorção de água nas famílias das placas com EPS. Ferrándiz-Mas e García-Alcofel (2012) e K. G. Babu e Babu (2004) evidenciaram em suas pesquisas o fato de que concretos com EPS podem ter maior capacidade de absorção de água, se comparadas com concretos convencionais.

Se tratando de compósito cimentício com EPS, o conceito entre concretos e argamassas com EPS se confundem, uma vez que, na literatura, o concreto com EPS não apresenta agregado graúdo. Desse modo alguns comportamentos dos concretos leves podem ser reproduzidos nas argamassas.

Apesar da natureza hidrofóbica do poliestireno expandido, a má adesão de sua superfície com a pasta de cimento pode criar um caminho preferencial para a passagem de água, o que pode ser responsável por esse aumento na permeabilidade. Contudo para confirmação da hipótese seria necessário análises microestruturais.

A partir dos valores obtidos no experimento, realizou-se uma análise estatística, através da Análise de Variância, ao qual foram verificadas as diferenças estatísticas entre as placas, no que se refere a absorção de água. A análise confirmou que existe diferença significativa entre os tratamentos, uma vez que o P-valor resultou em um valor inferior a 0,05 (Tabela 4.14).

Tabela 4.14: Análise de Variância dos resultados de absorção de água das placas cimentícias.

	SQ	GL	SQM	F-Valor	P-Valor
Entre grupos	4,74383	3	1,58128	12,47	0,00219
Erro	1,01413	8	0,126767		
Total	5,75797	11			

O teste de Tukey pode certificar, estatisticamente, a diferença entre as variáveis analisadas. Assim, confirmou-se que entre as famílias “T3 0%” e “T3 30%”, assim como entre as famílias “T3 20%” e “T3 30%”, existem diferenças significativas (Figura 4.11).

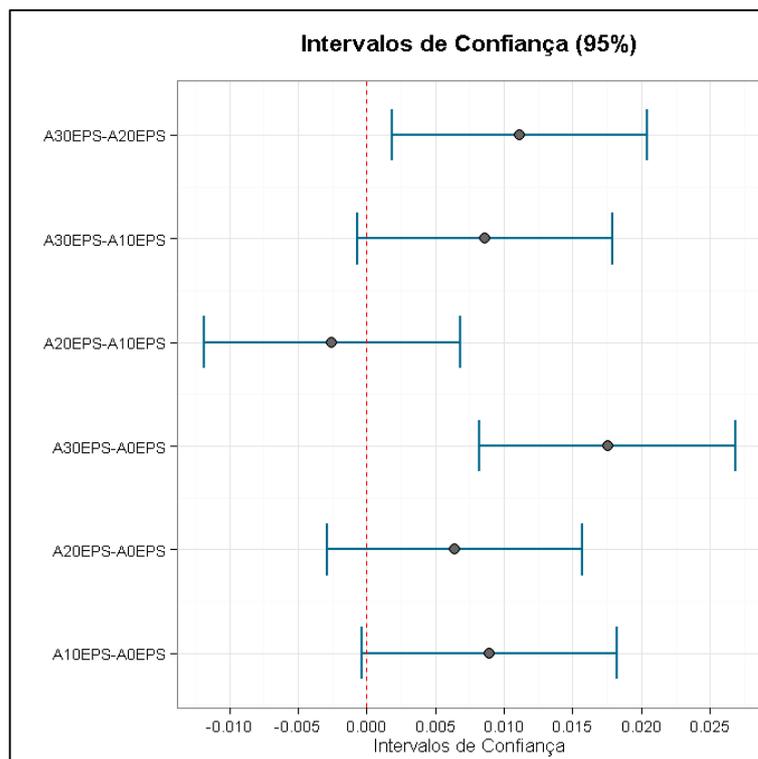


Figura 4.11 - Comparações múltiplas através do Teste de Tukey para os resultados de absorção de água das placas cimentícias.

Apesar dessa diferença estatística entre as famílias de placas cimentícias, nota-se que a incorporação de EPS, para os teores usados neste experimento, não inviabilizam as placas para a finalidade desta pesquisa. A proposta de aplicação é para ambientes internos, ao qual não há incidência de água constantemente sobre a superfície. Do mesmo modo, para compensar a absorção de água, pode ser aplicado materiais de acabamentos, como tintas, seladores e outros materiais, que podem tornar a superfície da placa mais impermeável.

4.3.3 Resistência à flexão das placas

Os resultados dos testes de resistência à flexão das placas cimentícias são apresentados na Tabela 4.15. Conforme esperado, as placas com EPS apresentaram resistência inferiores que as placas produzidas com o traço de referência (A₀EPS).

Tabela 4.15: Resultados do ensaio de resistência à flexão das placas cimentícias.

Traço	Resistência à flexão (g/cm³)	Média aritmética	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
A₀EPS	5,68	6,56	0,801	12%
	7,25			
	6,74			
A₁₀EPS	6,58	6,30	0,468	7%
	5,76			
	6,56			
A₂₀EPS	4,15	4,79	0,617	13%
	4,86			
	5,38			
A₃₀EPS	2,19	2,86	0,891	31%
	2,52			
	3,87			

Observa-se, também, que os valores de resistência à flexão das placas foram inferiores aos resultados de resistência à flexão apresentados pelas argamassas. Esse fato pode ter ocorrido pela presença da tela plástica que, por sua natureza polimérica, não contribuiu mecanicamente para a resistência do material. Uma vez que esse material tem baixa resistência mecânica, cria-se uma zona frágil ao longo do material e o torna mais frágil.

Houve uma redução média de 82% da resistência à flexão das placas cimentícias em comparação à resistência das argamassas. A amplitude foi mais evidente para o traço A₃₀EPS, uma vez que a resistência à flexão média decresceu de 5,24 MPa (resistência das argamassas) para o valor de 2,86 MPa das placas cimentícias. Pode ser possível que algum fator de ruído tenha interferido nesses dados, uma vez que o coeficiente de variação para este traço foi de 31%, o valor mais expressivo entre os dados.

A resistência à flexão das placas cimentícias, assim como a resistência das argamassas, mostrou ser uma propriedade que se relaciona de modo linear em função da densidade aparente. Através de uma correlação linear entre as variáveis, pôde-se

obter um coeficiente de correlação de 92%, isso quer dizer que a função linear explica até 92% da variabilidade dos dados. Na função disposta na Figura 4.12, “y” representa a resistência à flexão das placas e “x” a densidade aparente. Portanto, para os materiais utilizados nesta pesquisa, pode-se estimar a resistência de placas cimentícias neste intervalo de densidade com a função apresentada (Figura 4.12).

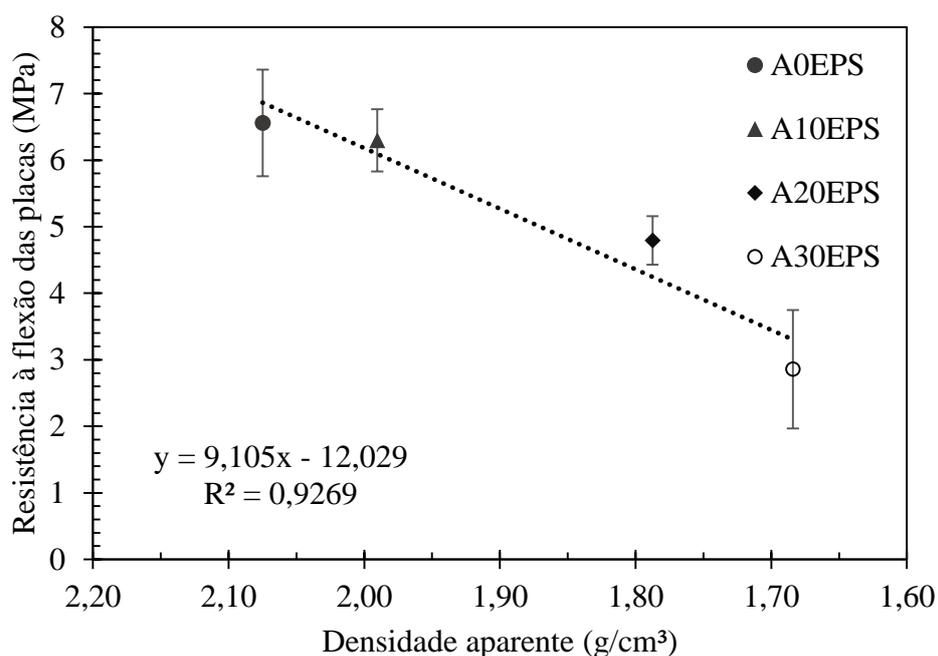


Figura 4.12 - Resistência à flexão das placas cimentícias.

Por sua vez, a Análise de Variância mostra que existem tratamentos que diferem entre si, uma vez que o P-valor resultou em valores abaixo de 0,05 (Tabela 4.16).

Tabela 4.16: Análise de Variância dos resultados de resistência à flexão das placas cimentícias.

	SQ	GL	SQM	F-Valor	P-Valor
Entre grupos	26,0048	3	8,66828	17,05	0,00077
Erro	4,06753	8	0,508442		
Total	30,0724	11			

O teste de Tukey apontou, estatisticamente, quais das variáveis estudadas apresentam diferenças significativas entre elas. O resultado do teste pode ser visto na Figura 4.13, a qual apresenta a comparação entre os tratamentos no eixo vertical do gráfico e os intervalos de confiança no eixo horizontal. As comparações possuem diferença significativa quando os limites cruzam o Assim, pode-se notar que as comparações entre os demais traços e o traço A_{30EPS} mostraram ser, estatisticamente, diferentes.

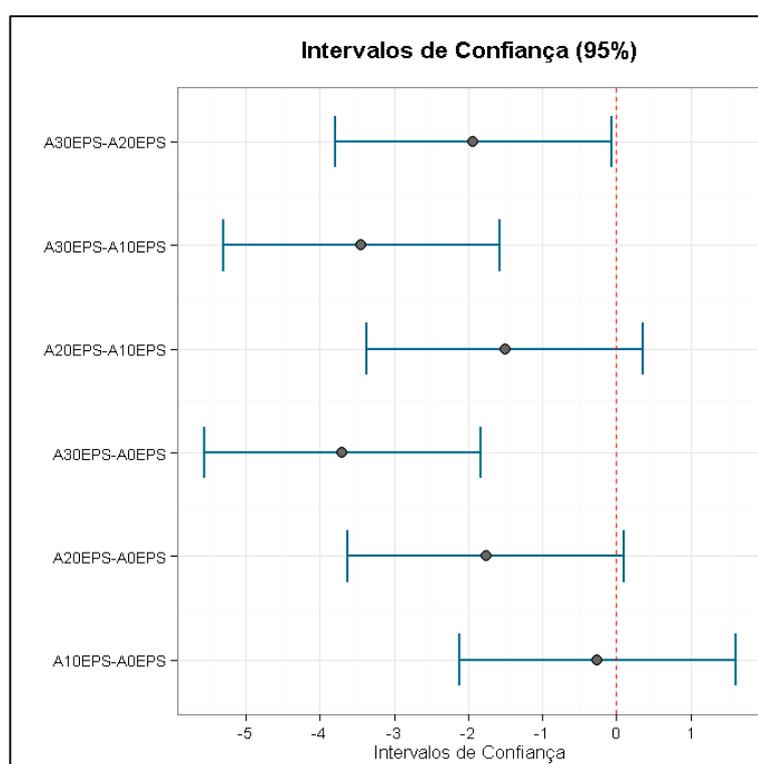


Figura 4.13 – Comparações múltiplas através do Teste de Tukey para os resultados de resistência à flexão das placas cimentícias.

Com base nas indicações da norma NBR 15498 (ABNT, 2016), pode-se dizer, portanto, que as placas produzidas com os traços “A_{10EPS}” e “A_{20EPS}”, assim como o traço controle, são aptas para aplicação em sistemas de vedação vertical, no tocante a resistência à flexão. Desse modo, essas placas são classificadas na Classe B, inclusas na Categoria 1, por possuírem resistência à flexão média entre 4MPa e 7MPa. Com essa classificação, elas são indicadas para aplicações internas e externas não sujeitas a ação direta de sol, chuva, calor e umidade. As placas produzidas com o

traço A₃₀EPS não atendem este requisito da norma, deste modo não são indicadas para o uso em vedações verticais.

4.3.4 Permeabilidade de água

Os resultados do experimento podem ser visualizados na Tabela 4.17. O experimento foi realizado em um local protegido dos intempéries, do vento e sol, e tiveram monitoramento de temperatura e umidade durante a realização do teste. Em relação as indicações normativas, a temperatura manteve-se dentro dos padrões exigidos, porém, a umidade medida manteve-se superior a recomendação da NBR 15498 (ABNT, 2016).

Tabela 4.17: Resultados do ensaio de permeabilidade de água, NBR 15498 (ABNT, 2016)

Placa	Temp. inicial (°C)	U. inicial (%)	Temp. final (°C)	U. final (%)	Traços de umidade na face inferior	Formação de gotas de água na face interior
A ₀ EPS	27,9	94,0	28	95,1	Não	Não
A ₁₀ EPS	27,4	95,0	27,7	99,9	Não	Não
A ₂₀ EPS	28	87	28	91	Não	Não
A ₃₀ EPS	28,4	94,8	29,1	86,8	Sim	Não

Em relação a permeabilidade de água, todas as placas testadas mostraram-se aptas para o uso, uma vez que não apresentaram formação de gotas de água na face inferior da placa durante a execução do experimento. Realizou-se registro fotográfico da face oposta à que teve contato direto com a água, a fim de verificar os possíveis pontos de manchas ou permeabilidade de água e podem ser vistas nas seguintes imagens: Figura 4.14, Figura 4.15, Figura 4.16 e Figura 4.17.

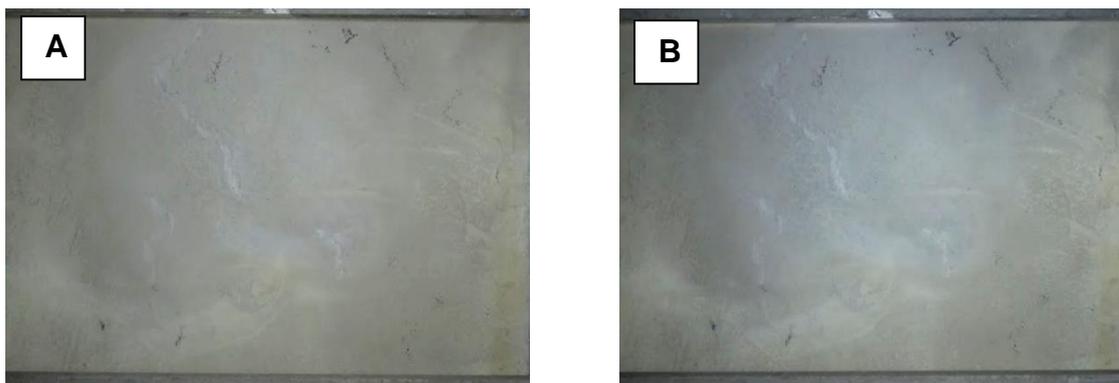


Figura 4.14 – Teste em andamento da placa cimentícias da família A_{0EPS} : A - Verso da placa no início do experimento; B - Verso da placa no fim do experimento.

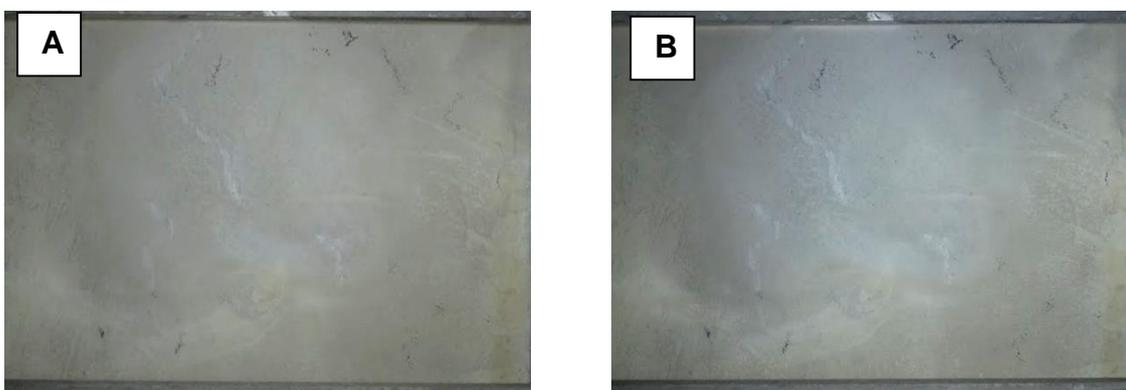


Figura 4.15 – Teste em andamento da placa cimentícias da família A_{10EPS} : A - Verso da placa no início do experimento; B - Verso da placa no fim do experimento.

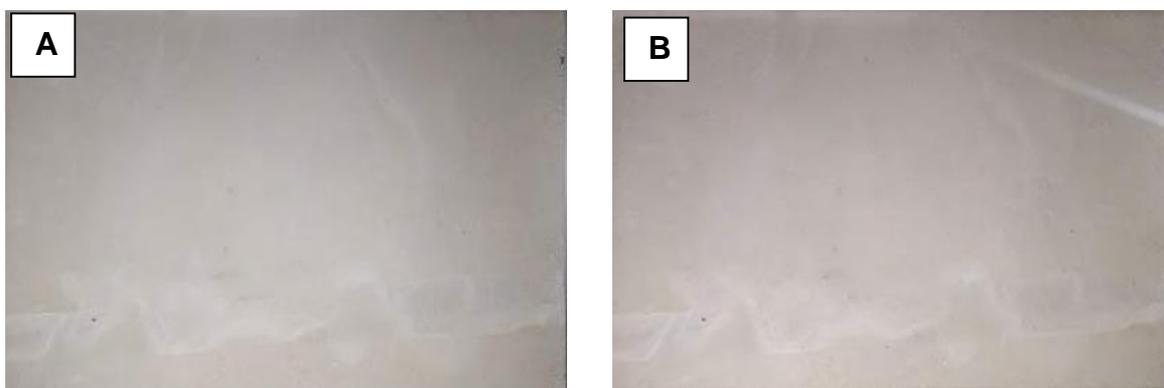


Figura 4.16 – Teste em andamento da placa cimentícias da família A_{20EPS} : A - Verso da placa no início do experimento; B - Verso da placa no fim do experimento.

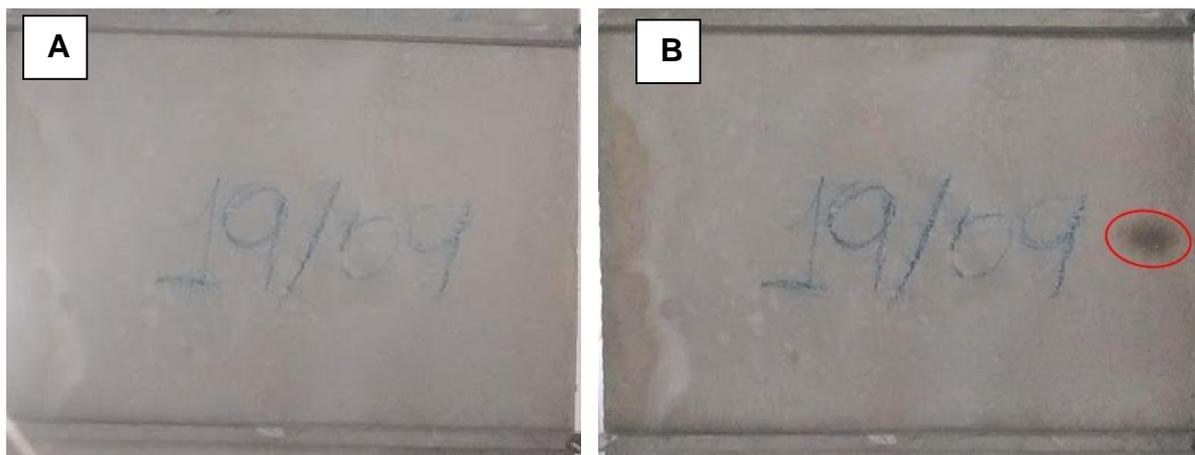


Figura 4.17 – Teste em andamento da placa cimentícia da família A_{30EPS}: A - Verso da placa no início do experimento; B - Verso da placa no fim do experimento.

Apesar de a placa cimentícia do traço “A_{30EPS}” não apresentar gotas de água na face inferior, surgiu nela uma pequena mancha de umidade após o tempo de 24 horas de ensaio como mostra a Figura 4.17b. Esse fenômeno entra em concordância com o experimento de absorção de água, uma vez que foi o traço em que teve a maior absorção.

4.4 Análise geral do comportamento das placas cimentícias

A partir da experiência durante a execução desse projeto de pesquisa, dos produtos concorrentes de mercado e da literatura sobre o assunto, pode-se fazer algumas considerações quanto ao comportamento geral do produto gerado.

A produção de placas cimentícias a partir de argamassas de cimento e areia com a incorporação de poliestireno expandido tem como pontos fortes, frente as placas comerciais:

- Facilidade de produção, uma vez que foram utilizados poucos recursos, frente a indústria do segmento;
- Uso de materiais de fácil acesso;
- Baixo custo de investimento.

Por outro lado, ao comparar com as placas comercialmente disponíveis no mercado com o produto gerado neste trabalho, observa-se que a placa cimentícia de argamassa com EPS não é um produto competitivo, frente as propriedades analisadas, visto que:

- Observou-se que as placas cimentícias com EPS resultantes da pesquisa não apresentaram um bom acabamento superficial;
- Apesar da redução da densidade do compósito com a incorporação de EPS, as placas hoje comercializadas possuem densidade equivalente ou até inferior, pois são produzidas com outra tecnologia e outros materiais (Cimento Reforçado com Fibra);
- A placa cimentícia de argamassa com EPS é um material frágil, o que dificulta o uso de materiais perfurantes em seus cantos para instalação;
- O tempo de cura necessário faz com que a placa tenha um tempo de produção elevado.

A pesquisa mostrou que a incorporação do EPS modifica as propriedades da matriz cimentícia, o que mostra o potencial do compósito frente a diversas aplicações. Porém, dentro das análises desenvolvidas e com literatura e produtos disponíveis no mercado, apesar do atendimento às normas, a incorporação do EPS em placas cimentícias tem baixo potencial de uso.

5 CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho demonstraram que as placas cimentícias com a incorporação de até 20% de EPS apresentam características técnicas para aplicação em sistemas de vedação vertical internas.

Em relação ao estado fresco das argamassas produzidas, foi possível obter misturas homogêneas, coesas e com boa capacidade de retenção de água. O superplastificante colaborou para possibilitar homogeneidade e manutenção da consistência nos traços analisados. A incorporação de EPS permitiu a redução da densidade no estado fresco de até 18%, em relação a argamassa de referência.

Em relação ao estado endurecido das argamassas, a incorporação de EPS permitiu a redução da densidade no estado endurecido de até 19% em relação a argamassa de referência. No que se refere a resistência à compressão, foram obtidas argamassas com resistência variando entre 32,97 MPa (A_{0EPS}) e 16,96 MPa (A_{30EPS}), com uma correlação entre essa propriedade e a densidade de massa da argamassa, a qual o coeficiente de determinação foi de 86,22%.

Por outro lado, a resistência à flexão média das argamassas foi de 7,62 MPa, para a família A_{0EPS} , e 5,24 MPa, para a família A_{30EPS} . Essa propriedade mostrou-se relacionar de modo linear em relação a densidade de massa no estado endurecido da argamassa, obtendo coeficiente de correlação de determinação de 96%.

Quanto ao módulo de elasticidade, a incorporação de poliestireno expandido permitiu produzir argamassas com módulo de elasticidade entre 32,63 MPa (A_{0EPS}) e 18,27 MPa (A_{30EPS}). Assim como as demais propriedades, determinou-se uma relação linear com a densidade de 94%.

Os sistemas de vedação vertical interno com até 20% de EPS atendem a classificação B, categoria 1 da NBR 15498 (ABNT, 2016). Das placas analisadas nesse trabalho, apenas a A_{30EPS} não atingiu a resistência à flexão mínima exigida pela norma. Então, foi possível a obtenção de placas com densidade aparente variando de 2,18 g/cm³ a 1,67g/cm³. Todas as placas mostraram-se aptas para o uso em vedação vertical interna, no que se diz respeito a permeabilidade de água. A absorção de água variou entre 2,9% a 4,65%.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Manual de Revestimentos de argamassa, 2013. Disponível em: <http://www.comunidade-da-construcao.com.br/upload/ativos/279/anexo/ativosmanu.pdf>

ABIQUIM - Associação Brasileira da Indústria Química: Comissão Setorial de EPS. O que é EPS. Disponível em < <http://www.epsbrasil.eco.br/eps/index.html>> Acesso em: 21 de maio de 2020.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15498: Placa de fibrocimento sem amianto. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-4: Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 4: Sistemas de vedações verticais externas e internas. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

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

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

ABNT. NBR 15575-4 2013 Edificações Habitacionais - Desempenho Parte 4: Sistemas de vedações verticais externas e internas. p. 51, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/annrheumdis-2013-203217.14>

ACEPE - Associação Industrial do Poliestireno Expandido. Propriedades e Qualidades. Disponível em <<https://acepe.pt/propriedades-qualidades/>> Acesso em: 19 de maio de 2020.

ACI 213R-03. Guide for structural lightweight aggregate concrete: report of ACI committee 213. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, v. 1, n. 1, p. 5–6, 1979.

ALEXANDRE BOGAS, J.; GOMES, M. Glória; REAL, Sofia. Capillary absorption of structural lightweight aggregate concrete. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, v. 48, n. 9, p. 2869–2883, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0364-x>

ASTM C1585. Standard Test Method for Measurement of Rate Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. Annual Book of ASTM Standards, v. 04, n. 147, p. 1–6, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/C1585-13.2>

ASTM C331. Standard Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units. ASTM Standard Book, v. 04, p. 1–4, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/C0331>

ASTM E6. E6 - Standard Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing. ASTM Standards, p. 1–12, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/C0071-12.2>

AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez de. Desenvolvimento de placas cimentícias reforçadas com incorporação do lodo primário da indústria de papel de celulose afonso rangel garcez de azevedo. p. 168, 2018.

BABU, Daneti Saradhi; GANESH BABU, K.; TIONG-HUAN, Wee. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete. Cement and Concrete Composites, v. 28, n. 6, p. 520–527, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.018>

BABU, K. Ganesh; BABU, D. Saradhi. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. Cement and Concrete Research, v. 33, n. 5, p. 755–762, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01055-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01055-4)

BABU, K. Ganesh; BABU, D. Saradhi. Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates. Cement and Concrete Composites, v. 26, n. 6, p. 605–611, 2004. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00034-9)

BARRETO, Monalisa Nogueira. Casa EPS: edifício residencial em painéis monolíticos de poliestireno expandido. 2017. - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.

BATTAGIN, Arnaldo Forti; BATTAGIN, Inês L. da Silva. Cimento Portland. Argamassas. In: ISAIA, GERALDO C. (org.). Materiais de construção civil e Princípios de Ciência dos Materiais. 3º ed. ed. . p. 761–792. São Paulo, IBRACON, 2017.

BAUER, Elton. Revestimentos de Argamassa: Características e Peculiaridades. Revestimentos de Argamassa: Características e Peculiaridades, p. 7, 2005.

BENTZ, Dale P. et al. Sorptivity-based service life predictions for concrete pavements. 7th International Conference on Concrete Pavements—Orlando, Florida, USA, Sept, v. 1, p. 9–13, 2001. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.23.8113&rep=rep1∓type=pdf>

CAMILLO, Maiara Gizeli Dallazen. Análise da utilização de chapas e placas industrializadas nas vedações verticais internas em construções residenciais na Região Sul do Brasil. 2010. - Dissertação de Mestrado, Florianópolis, 2010.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, GERALDO C. (org.). Materiais de construção civil e Princípios de Ciência dos Materiais. 3° ed. ed. . p. 922–969. São Paulo, IBRACON, 2017.

CASSAR, Bernado Camargo. Análise Comparativa De Sistemas Construtivos Para Empreendimentos Habitacionais: Alvenaria Convencional X Light Steel Frame. 2018. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

CHEN, Bing; LIU, Juanyu. Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads. *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 1, p. 7–11, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.001>

CHOI, Yun Wang et al. An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 36, n. 9, p. 1595–1602, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.003>

CRASTO, Renata Cristina Moraes De. Arquitetura e Tecnologia em Sistemas Construtivos Industrializados: Light Steel Framing. 2005. - Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coutinho; KULAKOWSKI, Marlova Piva; RIBEIRO, José Luis Duarte. Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa de engenharia civil. *Ambiente Construído*, v. 5, p. 37–49, 2005.

DISSANAYAKE, D. M. K. W.; JAYASINGHE, C.; JAYASINGHE, M. T. R. A comparative embodied energy analysis of a house with recycled expanded polystyrene (EPS) based foam concrete wall panels. *Energy and Buildings*, v. 135, p. 85–94, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.044>

ELSHARIEF, Amir; COHEN, Menashi D.; OLEK, Jan. Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 7, p. 1368–1376, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.011>

FERNANDO, P. L. N.; JAYASINGHE, M. T. R.; JAYASINGHE, C. Structural feasibility of Expanded Polystyrene (EPS) based lightweight concrete sandwich wall panels. *Construction and Building Materials*, v. 139, p. 45–51, 2017 a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.027>

FERNANDO, P. L. N.; JAYASINGHE, M. T. R.; JAYASINGHE, C. Structural feasibility of Expanded Polystyrene (EPS) based lightweight concrete sandwich wall panels. *Construction and Building Materials*, v. 139, p. 45–51, 2017 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.027>

FERRÁNDIZ-MAS, V.; GARCÍA-ALCOCEL, E. Caracterización física y mecánica de morteros de cemento Portland fabricados con adición de partículas de poliestireno expandido (EPS). *Materiales de Construcción*, v. 62, n. 308, p. 547–566, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.3989/mc.2012.04611>

FERRÁNDIZ-MAS, V.; GARCÍA-ALCOCEL, E. Durability of expanded polystyrene mortars. *Construction and Building Materials*, v. 46, p. 175–182, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.029>

FONTENELLE, Heitzmann. Sistema de fixação e juntas em vedações verticais constituídas por placas cimentícias: estado da arte, desenvolvimento de um sistema e avaliação experimental. 2012. - Universidade de São Paulo, 2012.

IZZATI, M. Y. N.; HANI, A. S.; SHAHIRON, S.; SHAH, A. S.; HAIRI, O M.; AZLINA, A H N; AKASYAH, M N; AMIRAH, K. N. Strength and water absorption properties of lightweight concret brick. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 513–1, 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/ez3.periodicos.capes.gov.br/article/10.1088/1757-899X/513/1/012005/meta>

KAYA, Ayse; KAR, Filiz. Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. *Construction and Building Materials*, v. 105, p. 572–578, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.177>

KHATIB, J. M.; HERKI, B. A.; ELKORDI, A. Characteristics of concrete containing EPS. Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete, p. 137–165, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102676-2.00007-4>

KIM, J. H.; CHOI, K. S. Flexural strength for insulated concrete sandwich wall panel reinforced with glass-fiber-reinforced polymer shear grids: roughness-induced mechanical bonding. Materials Research Innovations, v. 19, n. sup8, p. S8-397-S8-400, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/1432891715z.0000000001707>

LAW YIM WAN, Dominic Stefan; ASLANI, Farhad; MA, Guowei. Lightweight Self-Compacting Concrete Incorporating Perlite, Scoria, and Polystyrene Aggregates. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 30, n. 8, p. 04018178, 2018. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002350](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002350)

LEE, Ji Hyung et al. Structural Behavior of Durable Composite Sandwich Panels with High Performance Expanded Polystyrene Concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 12, n. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0255-6>

LIMA, Vivian Cabral. Análise Comparativa entre alvenaria em bloco cerâmico e painéis em gesso acartonado para uso como vedação em edifícios: Estudo de caso em edifício de multipavimentos na cidade de Feira de Santana. 2012. - Universidade de Feira de Santana, 2012.

LIU, Ning; CHEN, Bing. Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. Construction and Building Materials, v. 68, p. 227–232, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.062>

LIU, Xuemei; CHIA, Kok Seng; ZHANG, Min Hong. Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete. Construction and Building Materials, v. 25, n. 1, p. 335–343, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.020>

MAAROUFI, Maroua et al. Characterization of EPS lightweight concrete microstructure by X-ray tomography with consideration of thermal variations. Construction and Building Materials, v. 178, p. 339–348, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.142>

MADANDOUST, Rahmat; RANJBAR, Malek Muhammad; YASIN MOUSAVI, S. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 9, p. 3721–3731, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.018>

MASS, Bárbara Holzmann; TAVARES, Sergio Fernando. Quantidade de resíduos de construção na obra de uma habitação de LSF comparada com uma em alvenaria convencional. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, v. 2, p. 1–18, 2017.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. 1º Edição. Editora: PINI. 1994.

MILED, K.; SAB, K.; LE ROY, R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling. *Mechanics of Materials*, v. 39, n. 3, p. 222–240, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2006.05.008>

MO, Kim Hung et al. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. *Construction and Building Materials*, v. 179, p. 302–306, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.219>

MONTGOMERY, Douglas C. *Design and analysis of experiments*. 5a ed. ed. New York: 2001. E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qre.4680030319>

NASCIMENTO, Otávio Luiz do. *Alvenarias*. 2. ed. Rio de Janeiro: 2002. E-book.

NEITHALATH, Narayanan. Analysis of Moisture Transport in Mortars and Concrete Using Sorption-Diffusion Approach. *Materials Journal*, v. 103, n. 3, p. 209–217, 2006.

OSVALDO, Hibrán; BERTOLINI, Lima. *Construção via obras secas como fator de produtividade e qualidade*. Hibrán Osvaldo Lima Bertolini. 2013.

OZÓRIO, Bianca Pereira Moreira. *Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecânicas*. Tese de Doutorado, p. 156, 2016.

QUAGLIO, Jaqueline de Pieri. *Produção em escala da habitação e racionalização de canteiros de obras*. 2018. - Universidade de São Paulo, 2018.

RAMLI SULONG, Nor Hafizah; MUSTAPA, Siti Aisyah Syaerah; ABDUL RASHID, Muhammad Khairi. Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and

constructions: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 136, n. 20, p. 1–11, 2019 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.47529>

RAMLI SULONG, Nor Hafizah; MUSTAPA, Siti Aisyah Syaerah; ABDUL RASHID, Muhammad Khairi. Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 136, n. 20, 2019 b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/app.47529>

RANJBAR, Malek Mohammad; MOUSAVI, S. Yasin. Strength and durability assessment of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 48, n. 4, p. 1001–1011, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0210-6>

ROSSIGNOLO, João Adriano. *Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações* (2009). São Paulo: 2009. E-book.

SERNA, Humberto Almeida de La; REZENDE, Márcio Marques. Agregados para a Construção Civil. *Sumário Mineral do Brasil*, n. 11, p. 602–635, 2009. Disponível em: <http://anepac.org.br/wp/wp-content/uploads/2011/07/DNPM2009.pdf>

SISWOSUKARTO, Suprpto; SAPUTRA, Ashar; KAFRAIN, I. Gede Yohan. Utilization of Polystyrene Waste for Wall Panel to Produce Green Construction Materials. *Procedia Engineering*, v. 171, p. 664–671, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.406>

TESSARI, Janaina. *Utilização De Poliestireno Expandido E Potencial De Aproveitamento De Seus Resíduos Na Construção Civil*. Universidade Federal De Santa Catarina Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil, p. 100, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/88811/234096.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

THOMPSETT, D. J. et al. Design and construction of expanded polystyrene embankments. Practical design methods as used in the United Kingdom. *Construction and Building Materials*, v. 9, n. 6, p. 403–411, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00069-0](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00069-0)

TITTARELLI, Francesca et al. Effect of Using Recycled Instead of Virgin EPS in Lightweight Mortars. *Procedia Engineering*, v. 161, p. 660–665, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.728>. Acesso em: 29 jan. 2019.

TORRES, MARCOS LANZÓN; GARCÍA-RUIZ, P. A. Lightweight pozzolanic materials used i...chanical strength and water absorption. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 114–119, p. 114–119, 2009.

TORRES, Marcos Lanzón; GARCÍA-RUIZ, P. A. Lightweight pozzolanic materials used in mortars: Evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 2, p. 114–119, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.11.003>

VAN, Lam Tang et al. Combined Effects of Bottom Ash and Expanded Polystyrene on Light-weight Concrete Properties. v. 01007, 2018.

WANG, Ru; MEYER, Christian. Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 9, p. 975–981, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.014>

WANG, Xiao Feng et al. Effect of Admixture Additive on Properties of Polymer-Modified Lightweight Cement Mortar. *Applied Mechanics and Materials*, v. 253–255, p. 417–420, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.253-255.417>

ZATT, Gustavo. Fechamento De Paredes De Vedação: Sistema Light Steel Frame utilizando placas cimentícias. 2010. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28576/000769123.pdf?...1>