

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

EWERTON MARTINS MAZONI

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE CONCRETO LEVE COM EPS
RECICLADO**

**MANAUS
2019**

EWERTON MARTINS MAZONI

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE CONCRETO LEVE COM EPS
RECICLADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes de Construção.

Orientador: Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho

**MANAUS
2019**

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M476c Mazoni, Ewerton Martins
Caracterização física e mecânica de concreto leve com EPS
reciclado / Ewerton Martins Mazoni. 2019
84 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: João de Almeida Melo Filho
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
Federal do Amazonas.

1. Concreto leve. 2. Poliestireno expandido. 3. EPS reciclado. 4.
Características físicas e mecânicas. I. Melo Filho, João de Almeida
II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

EWERTON MARTINS MAZONI

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE CONCRETO LEVE COM EPS
RECICLADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes de Construção.

Orientador: Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho

Aprovado em 09 de agosto de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho, Presidente
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos, Membro Interno
Universidade Federal do Amazonas

Profa. Dra. Luciane Farias Ribas, Membro Externo
Universidade Federal do Amazonas



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº. 013/2019

ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO AO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

DATA DO EXAME: 09/08/2019

DISCENTE: Ewerton Martins Mazoni

ORIENTADOR: Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho

BANCA EXAMINADORA: (Nome Completo)

Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho (Presidente)

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos (Membro Interno)

Profa. Dra. Luciane Farias Ribas (Membro Externo)

TITULO DA PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE CONCRETO LEVE COM EPS RECICLADO

LOCAL: Sala Multiuso II da Faculdade de Tecnologia

HORA DE INÍCIO: 14h00

De acordo com o Regimento Interno do **Programa Pós – Graduação em Engenharia Civil**, aprovados pelo Conselho de Ensino e Pesquisa/CONSEP/UFAM e CAPES, o (a) aluno (a) submeteu sua dissertação em forma escrita e oral, sendo após exposição de cerca de 46 minutos arguido oralmente pelos membros da banca, tendo tido como resultado:

Aprovação por unanimidade de sua dissertação. O (A) aluno (a) foi considerado aprovado, podendo pleitear o título de Mestre.

Reprovação de sua Dissertação. O (A) aluno (a) não foi considerado aprovado (a) na sua Defesa de Dissertação. Não podendo pleitear o título de Mestre.

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que será assinada pelos membros da banca e pelo (a) aluno (a).

Observações com correções

Manaus, 09 de agosto de 2019

Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho (Presidente)

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos (Membro Interno)

Profa. Dra. Luciane Farias Ribas (Membro Externo)

Ewerton Martins Mazoni (Discente)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que com toda sua bondade, me permitiu alçar este nível de jornada do conhecimento, na pós-graduação.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho, por todos ensinamentos, conselhos das mais diversas naturezas, dicas, paciência e compreensão, estando sempre disponível em me ajudar no desenvolvimento desta pesquisa.

À minha mãe, Gilcimar Glória, e ao meu irmão, Welton Mazoni, por serem os alicerces da minha vida e por me proporcionarem meios para alcançar os meus objetivos;

Aos meus familiares em geral, por todo apoio que tive ao longo dessa caminhada na pós-graduação e na vida;

À minha namorada, Ana Carla Jafra, por toda sua ajuda, seu apoio e sua companhia em todos os momentos que passamos juntos,

Aos amigos que fiz durante a pós-graduação, que me ajudaram de forma direta ou indireta nessa caminhada, com algum conhecimento ou direcionamento para a execução dos trabalhos.

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM), pelos seus recursos disponibilizados essenciais para a conclusão desta pesquisa.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), por me receber e conceder permissão para a utilização do Laboratório de Edificações, onde pude usufruir de equipamentos modernos para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao técnico laboratorista do IFAM, Eng. Daniel Passos, por toda assistência e compreensão para realização dos ensaios que muitas das vezes adentravam em seu horário de almoço.

Aos técnicos laboratoristas da UFAM, Nilson Braz e Jorge Oliveira, pelos ensinamentos e dicas experimentais de modo que as execuções das atividades pudessem fluir da melhor forma.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas, pelo apoio financeiro e fomento à pesquisa no Estado do Amazonas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), pela oportunidade em alcançar voos mais altos no âmbito do conhecimento.

A todos vocês, meu muito obrigado.

RESUMO

MAZONI, E. M. **Caracterização física e mecânica de concreto leve com EPS reciclado.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

O uso de materiais alternativos em concretos visando a economia e a sustentabilidade, bem como a funcionalidade do compósito para determinadas aplicações se faz constante nos dias atuais. A partir desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento concreto leve com poliestireno expandido (EPS) reciclado, a partir da caracterização física e mecânica do mesmo, para posterior utilização em aplicações dentro da construção civil. Dessa forma, inicialmente desenvolveu-se um concreto leve a partir da utilização de três tipos de EPS, pérolas de 2,5 mm, pérolas de 7 mm e EPS reciclado e, em duas quantidades distintas (30 e 60%, em relação ao volume de concreto), a fim de investigar o efeito causado por esses diferentes materiais em termos de resistência à compressão e massa específica. Para isso, fez o delineamento experimental utilizando planejamento fatorial (2^k) para analisar a influência do tipo e da quantidade de agregado leve nos resultados de resistência à compressão. Na sequência da pesquisa, após a análise comparativa inicial, enfatizou-se no estudo de caracterização do concreto leve utilizando o EPS reciclado, em três volumes (30%, 45% e 60%), de tal modo que foi avaliado parâmetros físicos como trabalhabilidade, massa específica, absorção de água por imersão e por capilaridade, como também parâmetros mecânicos, como resistência à compressão axial e diametral. Desse modo, pelos resultados encontrados, observou-se que o incremento de EPS nas misturas reduziu a trabalhabilidade, a resistência e a massa específica do concreto e aumentou a absorção de água nas duas metodologias realizadas. De modo geral, o impacto causado pela transição no volume de EPS de 45% para 60%, nas propriedades avaliadas, se deu de forma mais acentuada do que na transição do volume de 30% para 45%. Cabe salientar que a utilização do EPS no concreto reduz o peso dos elementos construtivos, estruturais ou não, e o consumo dos materiais, reforçando seu grande potencial de aplicação dentro da construção civil.

Palavras-chave: Concreto leve. Poliestireno expandido. EPS reciclado. Características físicas e mecânica.

ABSTRACT

MAZONI, E. M. **Caracterização física e mecânica de concreto leve com EPS reciclado.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

The use of alternative materials in concrete for economy and sustainability, as well as the functionality of the composite for certain applications is constant today. From this context, the present research aims to study the lightweight concrete behavior with recycled expanded polystyrene (EPS), based on the physical and mechanical characterization of the same, for later use in civil construction applications. Then for this, initially a lightweight concrete was developed from the use of three size of EPS beads, 2.5 mm, 7 mm and recycled EPS, and in two distinct amounts (30 and 60%, in relation to the volume of concrete) in order to investigate the effect of these different materials in terms of compressive strength and density. For this, the experimental design was done using factorial design (2^k) to analyze the influence of the type and amount of light aggregate on the results of compressive strength. After the initial comparative analysis, it was emphasized the characterization of the lightweight concrete using recycled EPS in three volumes (30%, 45% and 60%) and was analyzed physical parameters such as workability, density, water absorption, as well as mechanical parameters such as axial and diametral compressive strength. From the results obtained, it was observed that the increase of EPS in the mixtures reduced the workability, strength and density of the concrete and increased the water absorption in the two methodologies. In general, the impact caused by the transition in the EPS volume from 45% to 60% in the evaluated properties was more strong than in the transition from 30% to 45%. It should be noted that the use of EPS in concrete reduces the weight of the structural elements, structural or not structural, and the consumption of materials, reinforcing its great potential of application inside the civil construction.

Keywords: Lightweight Concrete. Expanded polystyrene Recycled EPS. Physical and mechanical characteristics

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos concretos leves em função da massa específica.....	19
Figura 2 – Segregação dos agregados leves em diferentes níveis de frequência de vibração.	21
Figura 3 – Pérolas de poliestireno expandido, EPS.....	24
Figura 4 – Processos de reciclagem do EPS.....	27
Figura 5 – Seção de um corpo de prova endurecido de concreto leve..	30
Figura 6 – Aplicações do concreto leve com EPS.....	35
Figura 7 – Parede construída com painéis de concreto leve com EPS.....	36
Figura 8 – Fluxograma das atividades.....	38
Figura 9 – Tipos de poliestireno expandido (EPS) utilizados.....	40
Figura 10 – Curvas de distribuições granulométricas do EPS e do agregado miúdo.....	41
Figura 11 - Determinação do volume de vazios do EPS.....	41
Figura 12 – Mistura dos materiais.....	45
Figura 13 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos	45
Figura 14 – Corpos de prova em condição de cura	46
Figura 15 – Corpos de prova com ambas as faces regularizadas após capeamento com enxofre.....	47
Figura 16 – Dimensões, em milímetros, do molde tronco de cone utilizado no ensaio de espalhamento.....	48
Figura 17 – Ensaio de espalhamento na mesa (flow table).....	48
Figura 18 – Ensaio mecânicos.....	49
Figura 19 – Corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	50
Figura 20 – Secagem dos corpos de prova em estufa com temperatura controlada.....	51
Figura 21 – Corpos de prova com face imersa em água para ensaio de absorção de água por capilaridade.....	52
Figura 22 – Perfil de percolação de água no interior do corpo de prova.....	52
Figura 23 - Trabalhabilidade das misturas de concreto leve com diferentes teores de EPS ...	53
Figura 24 - Corpos de prova rompidos após ensaio de resistência à compressão axial	55
Figura 25 – Resistência à compressão versus massa específica aparente.....	58
Figura 26 – Interpretação geométrica dos efeitos de cada fator. Respostas em MPa.....	59
Figura 27 – Gráfico de superfície: resistência à compressão x tipo de EPS x porcentagem de EPS.....	61

Figura 28 – Ensaio de espalhamento na mesa (flow table) das misturas	62
Figura 29 – Resistência à compressão por massa específica aparente	64
Figura 30 – Concreto leve com EPS-R após ruptura.....	64
Figura 31 – Resistência à compressão diametral por resistência à compressão axial	66
Figura 32 – Configuração do corpo de prova (1M60) após ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	66
Figura 33 – Absorção de água por capilaridade com curva de ajuste	70
Figura 34 – Absorção de água por capilaridade pelo tempo de imersão.....	70
Figura 35 – Perfil de percolação da água mistura M30.....	71
Figura 36 – Perfil de percolação da água mistura M45.....	71
Figura 37 – Perfil de percolação da água mistura 1M60.....	72
Figura 38 – Perfil de percolação da água mistura 2M60.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de massa específica para concreto leve.	18
Tabela 2 – Valores correspondente de resistência à compressão e massa específica aparente.	19
Tabela 3 – Propriedades normativas do EPS segundo a NBR 11752	25
Tabela 4 – Propriedades do Cimento CP-I-S-40 da marca Cemex	39
Tabela 5 – Propriedades do agregado miúdo.....	40
Tabela 6 – Propriedades do EPS.....	42
Tabela 7 – Consumo dos materiais.....	43
Tabela 8 – Identificação e descrição das misturas.....	44
Tabela 9 – Resistência à compressão e massa específica aparente para cada mistura	54
Tabela 10 – Resultados obtidos no delineamento experimental.....	57
Tabela 11 – Efeitos de cada fator e interação	59
Tabela 12 – Tabela ANOVA	60
Tabela 13 – Índice de consistência das misturas	62
Tabela 14 – Resistência à compressão aos 28 dias e massa específica aparente.....	63
Tabela 15 – Resistência à tração por compressão diametral	65
Tabela 16 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica	67
Tabela 17 – Massas saturadas medidas em cada intervalo de tempo	68
Tabela 18 – Absorção de água por capilaridade e altura de água.....	69

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	12
1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Contexto e motivação	12
1.2. Justificativa	14
1.3. Objetivos	15
1.4. Organização da dissertação	15
CAPÍTULO 2	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Concreto leve	17
2.1.1. Produção do concreto leve	20
2.1.2. Propriedades e características do concreto leve	21
2.1.3. Aplicações do concreto leve	23
2.2. Concreto leve utilizando o EPS como agregado leve	23
2.2.1. Poliestireno expandido	23
2.2.2. Vantagens e características do EPS	26
2.2.3. Reciclagem e reaproveitamento do EPS	27
2.2.4. Concreto leve com EPS	28
2.2.5. Propriedades e características do concreto leve com EPS	31
2.2.6. Aplicações do concreto leve com EPS	34
CAPÍTULO 3	37
3. METODOLOGIA	37
3.1. Materiais utilizados	39
3.1.1. Cimento Portland	39
3.1.2. Agregado miúdo	39
3.1.3. Poliestireno expandido – EPS	40

3.1.4. Água e aditivo.....	42
3.2. Métodos	42
3.2.1. Dosagem e produção dos corpos de prova.....	42
3.2.2. Procedimentos	47
3.2.2.1. Trabalhabilidade	47
3.2.2.2. Massa específica aparente no estado endurecido.....	49
3.2.2.3. Resistência à compressão axial.....	49
3.2.2.4. Resistência à tração por compressão diametral	50
3.2.2.5. Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.....	50
3.2.2.6. Absorção de água por capilaridade	51
CAPÍTULO 4.....	53
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	53
4.1. Estudo preliminar de dosagens	53
4.2. Análise estatística dos resultados preliminares.....	56
4.3. Dosagens de concreto leve com EPS reciclado	61
4.3.1. Trabalhabilidade das misturas	61
4.3.2. Resistência à compressão e massa específica aparente	63
4.3.3. Resistência à tração por compressão diametral	65
4.3.4. Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	67
4.3.5. Absorção de água por capilaridade.....	68
CAPÍTULO 5.....	73
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
5.1. Conclusões finais do trabalho	73
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	75
REFERÊNCIAS	76

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto e motivação

A necessidade social por moradias com custos cada vez menores e de rápida execução impulsiona o surgimento de novos materiais de construção, com características ainda pouco conhecidas. Nesse cenário, o concreto leve, apesar de não ser novidade, ressurge como alternativa para a execução de elementos estruturais, como, por exemplo, lajes, e de elementos não-estruturais, como paredes de vedação (SARTORTI, 2015).

O concreto leve é um material que utiliza, como principal aglomerante, o cimento Portland, e possui massa específica abaixo de 2.000 kg/m^3 , sendo a baixa densidade oriunda da substituição parcial ou até mesmo total dos agregados graúdos e miúdos por agregados leves, como, por exemplo, o poliestireno expandido ou EPS (ROSSIGNOLO, 2009; MANDLIK *et al*, 2015), ou ainda, pelo uso de aditivos químicos incorporadores de ar (OZÓRIO, 2016).

Nas obras de concreto, o peso próprio representa uma grande parcela das ações totais na estrutura e, portanto, a redução da massa específica torna-se de grande interesse. A ampla utilização do concreto leve deve-se especialmente às vantagens pela diminuição de sua massa específica que implica diretamente na redução dos esforços na estrutura e na infraestrutura das edificações, com economia de formas e escoramento, pela redução das solicitações, em comparação aos concretos convencionais, além da diminuição dos custos com transporte de montagem de elementos pré-fabricados pela redução do peso dos materiais e aumento da produtividade (CATOIA, 2012).

No geral, o concreto leve pode ser composto apenas por agregados leves ou a partir de uma combinação entre materiais leves e convencionais, onde é comum a utilização de areia, com densidade normal, como agregado miúdo e, como agregado graúdo, o agregado leve. Dentre os diversos tipos de agregados leves utilizados na composição do concreto leve, tem-se os materiais termicamente expandidos como as argilas e escórias e os materiais reutilizáveis, como a borracha e o poliestireno expandido (EPS), cuja função principal é de reduzir o peso do produto final.

O poliestireno expandido utilizado no concreto leve é uma espuma estável de baixa densidade, que consiste em 98% de ar e 2% de material poliestireno, além de possuir uma estrutura fechada e propriedades adequadas para diversas aplicações como, baixa densidade, isolamento térmico, hidrofobicidade e resistência química quando exposto a ácidos e álcalis (MULLA e SHELAKE, 2016; MAS e ALCOCEL, 2012). O poliestireno é um material biologicamente inerte e não tóxico, entretanto, causa problemas de descarte (MAS e ALCOCEL, 2012). No Brasil, a reciclagem do poliestireno expandido (isopor) ainda é bastante incipiente, uma vez que a fração do material poliestireno é muito pequena (2%) em relação ao volume total de resíduo gerado.

Nesse contexto, um gerenciamento sustentável de recursos significa um menor consumo de matérias-primas e energia, assim como a redução de resíduos. Isso pode ser alcançado integrando o desperdício aos processos de produção, como a utilização do EPS em materiais de construção tradicionais. Estes novos materiais de construção são ambientalmente mais eficientes, permitindo economizar matérias-primas, consumo de energia associado à fabricação dos produtos que substituem e à preservação de áreas naturais devido a uma menor necessidade de recursos minerais (MAS e ALCOCEL, 2012). Portanto, é eficiente a utilização do EPS na constituição de compostos cimentícios tornando-se uma alternativa sustentável para a sua correta destinação.

A literatura, no que se refere a concreto leve com EPS, apresenta estudos voltados especialmente sobre a caracterização mecânica desse material, visando melhorar os concretos que utilizam EPS de diferentes granulometrias, aditivos químicos ou outras adições como materiais pozolânicos, como apresentado em Babu *et al* (2003) e Babu *et al* (2005).

Das aplicações do concreto leve na construção civil está a fabricação de elementos pré-moldados que podem mostrar-se vantajosos em determinada finalidade devido ao seu peso

reduzido que pode facilitar e agilizar a sua execução. Dentre esses elementos, cita-se as paredes de fechamento em concreto leve que podem substituir as paredes convencionais de alvenaria, madeira, gesso, entre outros tipos. Esse recurso pode ser aplicado às moradias populares, residências personalizadas, fechamento de prédios de estruturas de concreto e metálica, podendo obter economia no custo final da obra pela redução do consumo de ferragem nas estruturas devido à redução do peso desses elementos de vedação, além de propriedades térmicas e acústicas satisfatórias (RIBEIRO, 2003).

1.2. Justificativa

De acordo com Rossignolo (2009), o concreto com agregados leves apresenta-se como um material de construção consagrado em todo o mundo, com aplicação em diversos campos da construção civil, como edificações pré-fabricadas, pontes e plataformas marítimas. A vasta utilização desse material é particularmente atribuída aos benefícios promovidos pela diminuição da massa específica do concreto, como a redução de esforços nas edificações, a economia com formas e cimbramentos, bem como a diminuição de custos com transportes e montagem das construções pré-fabricadas.

O uso do concreto com agregados leves numa estrutura geralmente resulta em custo total menor. Embora o concreto leve tenha um valor unitário superior ao concreto de peso normal, a estrutura pode custar menos como resultado da redução do peso próprio e do custo menor das fundações (CATOIA, 2012).

Atualmente, além das questões técnicas e econômicas, a escolha dos materiais de construção também está relacionada aos aspectos ambientais da aplicação e do uso dos materiais. Nesse sentido, o concreto com agregados leves artificiais, como o poliestireno expandido (isopor), implica, pela sua reduzida massa específica, em um menor consumo de aço e volume de concreto e, conseqüentemente, reduz a energia utilizada no transporte desse material e no processo construtivo, além dos benefícios energéticos de conforto térmico e acústico que podem ser adquiridos pela utilização desse material nas edificações. Portanto, esse cenário também pode abrir portas para o emprego de outros resíduos diferentemente do EPS que são capazes de proporcionar propriedades similares, como o poliuretano, além de favorecer o aspecto ambiental (ROSSIGNOLO, 2009).

Dessa forma, o presente trabalho consiste em desenvolver um concreto leve utilizando como agregado leve o EPS reciclado, a partir da caracterização física e mecânica a fim de nortear a aplicabilidade deste concreto leve, visando fornecer alternativas de destinação final do EPS de tal modo que reduza seu descarte incorreto na natureza. Por isso, a importância desta pesquisa é ressaltada em virtude da falta de outras pesquisas que considerem o EPS reciclado na composição do concreto leve, uma vez que o EPS em pérolas é mais difundido nesse tipo de aplicação.

1.3. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral estudar o comportamento físico e mecânico do concreto leve com EPS reciclado.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Estudar a dosagem de concreto leve com diferentes tipos de EPS;
- Avaliar o efeito do tipo e do teor de EPS na resistência à compressão e na massa específica do concreto leve;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas do concreto leve com EPS reciclado para aplicação em produtos da construção civil;

1.4. Organização da dissertação

O corpo desta dissertação está organizado em cinco capítulos. Neste primeiro, *Capítulo 1*, é feita uma breve introdução sobre concreto leve com EPS, contextualizando o assunto com a motivação da pesquisa, além da justificativa e dos objetivos deste estudo.

O *Capítulo 2*, denominado Revisão Bibliográfica, foi elaborado a partir de um levantamento aprofundado de estudos recentes e consolidados sobre o assunto, com a finalidade de compreender e apresentar características importantes e particulares do concreto leve em geral e, na sequência, especificamente do concreto leve utilizando o EPS em sua composição, além de avaliar resultados de outras pesquisas já realizadas.

O *Capítulo 3*, Metodologia, apresenta os materiais e procedimentos adotados durante o programa experimental, como também as variáveis avaliadas para caracterizar o concreto leve com EPS.

O *Capítulo 4*, Análise e Discussão dos Resultados, apresenta os resultados obtidos dos ensaios realizados no programa experimental, as análises feitas a respeito de cada uma das variáveis determinadas, comparações pertinentes e considerações sobre o assunto em questão.

Por fim, no *Capítulo 5*, denominado Conclusões, é apresentado as considerações gerais e finais sobre a análise e discussão dos resultados, além de sugestões para o desenvolvimento de pesquisas futuras sobre o assunto.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Concreto leve

O concreto é o material artificial mais consumido em todo o mundo e, por conta disso, diversos estudos já realizados ou em desenvolvimento avaliam seu comportamento mecânico, variações de dosagens e incorporação de materiais alternativos, visando racionalizar seu desempenho frente às questões de sustentabilidade e otimizar o consumo de matérias primas (OZÓRIO, 2016).

No ambiente popular, o termo “concreto” refere-se a algo sólido, rígido e com peso consideravelmente alto. No entanto, designá-lo como “leve” pode causar uma certa dúvida e até mesmo um desconforto ao público leigo, que não está acostumado com tal característica a um concreto. Entretanto, a necessidade de melhorar suas características específicas, como a redução do peso próprio, impulsionou a ciência do concreto a desenvolver soluções especiais, através de materiais não-convencionais, entre elas o concreto leve (SARTORTI *et al*, 2017).

Historicamente, as primeiras aplicações do concreto leve ocorreram por volta do ano de 1100 a.C., quando construtores pré-colombianos originários de uma região localizada no México, utilizaram uma mistura de pedra-pomes com um ligante à base de cinzas vulcânicas e cal para construção de elementos estruturais, entretanto, as aplicações históricas mais conhecidas dessa mistura foram construídas pelos romanos, durante a República Romana, o Império Romano e o Império Bizantino (ROSSIGNOLO, 2009).

Registros mais recentes apresentam a aplicação no concreto leve utilizando a argila expandida como agregado artificial leve para a fabricação de embarcações, durante a Primeira e Segunda Guerra Mundial (ROSSIGNOLO, 2009). Na construção civil, a aplicação deste material ocorreu com mais ênfase devido à necessidade da reconstrução da Europa no período pós-guerra, por volta do ano de 1960, onde diversos edifícios importantes foram executados com concreto leve estrutural (OZÓRIO, 2016).

Conceitualmente, é dito como concreto leve aquele que apresenta massa específica inferior à do concreto convencional – este possui massa específica entre 2000 e 2800 kg/m³ de acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015). A Tabela 1 apresenta os limites mínimos e máximos de massa específica para os concretos leves segundo algumas normas e publicações técnicas.

Tabela 1 – Limites de massa específica para concreto leve.

Referência	Massa específica (kg/m³)
RILEM (1975)	$\gamma < 2000$
CEB-FIP (1977)	$\gamma < 2000$
NS 3473 E (1992)	$1200 < \gamma < 2200$
Neville (1996)	$300 < \gamma < 1800$
prEN 206 (2000)	$800 < \gamma < 2000$
ACI 213 R-03 (2003)	$1120 < \gamma < 1950$
ABNT NBR 8953:2015	$\gamma < 2000$

Fonte: adaptado de ROSSIGNOLO (2009).

A norma americana ACI 213R-03 (2004) classifica os concretos leves em três grupos em função da massa específica e do tipo de agregado leve utilizado, cuja origem pode ser natural ou artificial, citado na NBR 9935 (ABNT, 2011). Esses grupos são: concretos para isolamento térmico, destinados à composição de painéis de vedação; concretos com resistências moderadas que possuem aplicações de enchimento, entre outras de menor responsabilidade; e concretos estruturais, que devem possuir resistência mínima, aos 28 dias, de 17 MPa. A Figura 1 esquematiza essa classificação da referida norma americana.

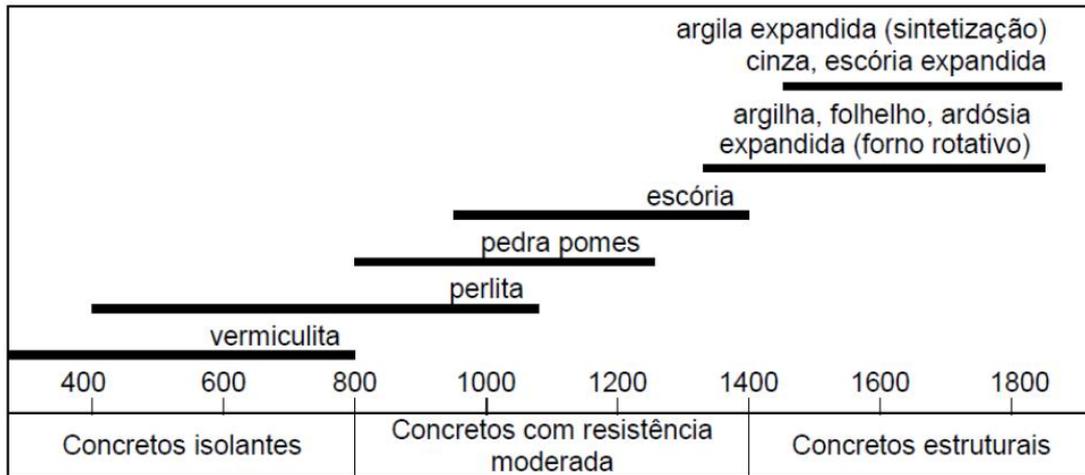


Figura 1 – Classificação dos concretos leves em função da massa específica (CATOIA, 2012).

Os agregados leves naturais, como pedra-pomes e o tufo vulcânico, são obtidos diretamente pela extração na jazida e posterior classificação granulométrica. Esse tipo de agregado possui pouca utilização em concretos estruturais uma vez que possuem uma grande variabilidade de propriedades, localização e disponibilidade nas jazidas. Os agregados leves artificiais, estes são obtidos em processos industrializados e são classificados de acordo com a matéria-prima utilizada no processo de fabricação, como as argilas expandida, escória sinterizada e o EPS (ROSSIGNOLO, 2009).

A Norma Mercosul (NBR NM 35, 1995 – Errata 1, 2008), por sua vez, apresenta valores mínimos de resistência à compressão em função dos valores de massa específica aparente, conforme está disposto na Tabela 2. Valores intermediários de resistência à compressão e de massa específica aparente correspondente podem ser obtidos por interpolação. A norma ainda especifica que os agregados leves utilizados na produção de concretos estruturais devem apresentar valores de massa unitária no estado seco e solto inferior a 1120 kg/m³, no caso de agregados miúdos, e de 880 kg/m³, para agregados graúdos.

Tabela 2 – Valores correspondente de resistência à compressão e massa específica aparente.

Resistência à compressão aos 28 dias (Valores mínimos)	Massa específica aparente (Valores máximos)
MPa	kg/m³
28	1840
21	1760
17	1680

Fonte: NBR NM 35 (1995, Errata 1, 2008).

2.1.1. Produção do concreto leve

De acordo com Rossignolo (2009), os métodos utilizados para dosagem dos concretos convencionais podem ser aplicados para os concretos com agregados leves, entretanto, quatro fatores devem ser considerados, são eles: a necessidade de projetar com concreto com massa específica particular; a absorção dos agregados leves; a variação da massa específica do agregado leve em função da sua dimensão; e as características particulares de cada agregado leve que pode influenciar nas propriedades do concreto.

De acordo com Angelin (2014) e diversos registros normativos internacionais, é recomendado que, para confecção dos concretos com agregados leves, o consumo de cimento seja superior a 300 kg/m^3 para assegurar a trabalhabilidade, proteção e ancoragem das armaduras.

Outro fator importante na dosagem de concreto leve é a relação água/cimento efetiva, em função da absorção de água dos agregados leves. No caso dos agregados leves higroscópicos, com significativa porosidade, deve-se considerar a água absorvida por esses agregados, após a preparação do concreto e, para isso, o procedimento mais comum é acrescentar mais água à mistura de tal modo que mantenha constante a relação água/cimento (ROSSIGNOLO, 2009). Segundo o mesmo autor, a retenção de parte da água pelos agregados leves beneficia a hidratação do cimento, denominada de “cura interna”, necessária para as reações químicas, inferindo, ao concreto leve, uma menor sensibilidade às variações do processo de cura nas idades iniciais. A granulometria também influencia na trabalhabilidade do concreto leve e por isso, devem ser considerados conjuntamente, uma vez que, quanto menor a granulometria dos agregados maior será a quantidade de água necessária para envolvê-los.

A segregação do agregado leve, em concretos com grande trabalhabilidade, é mais facilitada por excesso de vibração, proporcionando a sedimentação da argamassa que é mais densa que o agregado leve, ficando em falta na superfície e dificultando o acabamento das peças com grandes áreas, como as lajes. Esse fenômeno ocorre de maneira inversa quando comparado com a segregação dos agregados nos concretos convencionais, onde o excesso de argamassa se faz presente na superfície (MORAVIA, 2007), como apresenta a Figura 2, na qual é possível visualizar a estrutura de uma mistura contendo agregados leves em diferentes frequências de vibração.

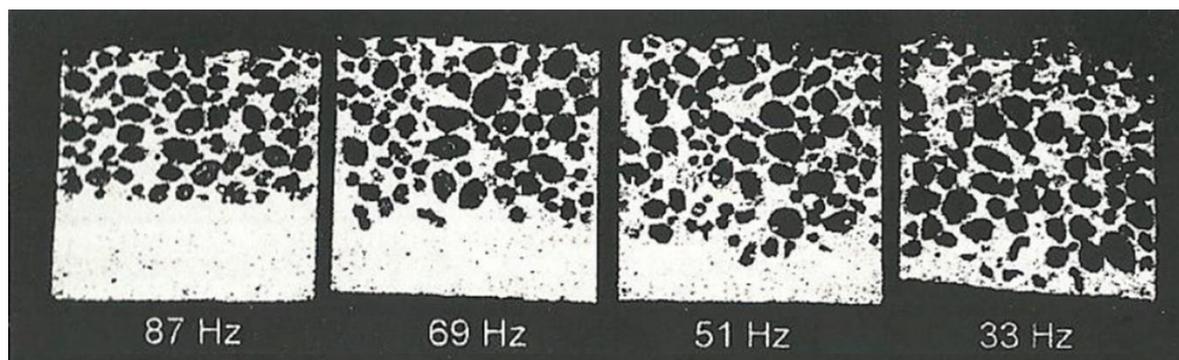


Figura 2 – Segregação dos agregados leves em diferentes níveis de frequência de vibração (Vieira, 2000 *apud* Rossignolo, 2009).

Com relação ao transporte e lançamento por bombeamento dos concretos leves, cuidados devem ser tomados de tal modo que evitem ao máximo a segregação de seus componentes, a exsudação e alteração na trabalhabilidade. Esses problemas são, geralmente, minimizados pela adição de finos, aditivos apropriados ou pela redução da relação água/cimento (ANGELIN, 2014). No entanto, o baixo peso próprio do concreto leve gera vantagens no seu manuseio devido ao menor consumo de massa, aumentando a produtividade e reduzindo as tensões nas formas (NEVILLE, 2011).

2.1.2. Propriedades e características do concreto leve

Além da redução do peso próprio devido à grande porosidade, o concreto leve apresenta uma absorção de água superior em relação ao concreto convencional, conseqüentemente, apresenta uma trabalhabilidade inferior (ANGELIN, 2014). No entanto, a autora ressalta que a elevada porosidade do concreto leve contribui para a melhor aderência na interface matriz-agregado, devido à penetração da pasta nos vazios dos agregados.

Angelin (2014) ainda cita a respeito do consumo de água na mistura do concreto leve o qual é influenciado pela textura superficial (porosidade) e forma do agregado leve. Então, para um mesmo abatimento, há um maior consumo de água nas misturas envolvendo concreto com agregados leves em relação às misturas com agregados tradicionais, o que pode contribuir para um maior grau de separação física dos componentes, onde os agregados de menor peso tendem a flutuar tornando a mistura menos homogênea e de fraca interação entre seus constituintes. Por esse motivo, de acordo com Garlet (1998), no estado fresco, a grande maioria dos concretos leves apresentam baixos valores de trabalhabilidade. No entanto, quando se faz necessário aumentar a fluidez do concreto leve é recomendável a utilização de aditivos

incorporadores de ar para baixar o consumo de água e reduzir a tendência de exsudação e segregação do material.

As resistências mecânicas diminuem a medida em que se reduz a massa específica do concreto ou a medida em que o volume de agregado leve na mistura aumenta (LIU e CHEN, 2014). Segundo Angelin (2014), é possível obter altos valores de resistências à compressão para este material através da utilização de pozolanas e aditivos redutores de água, como cita o exemplo de um concreto leve com resistência à compressão de 100 MPa, com consumo de cimento de 550 kg/m³ e massa específica de 1750 kg/m³, utilizando a argila expandida como agregado leve, desenvolvido por Zhang e Gjorv (1991).

De acordo com Sartorti (2015), o módulo de elasticidade dos concretos leves não é muito influenciado pelo módulo dos agregados leves, por possuírem valores próximos ao da matriz. No geral, os valores do módulo de elasticidade desse material variam entre 18 a 26 GPa. Já o concreto celular apresenta baixos valores de módulo de elasticidade, na ordem de 1,7 GPa a 3,5 GPa.

Angelin (2014) ainda afirma, em relação a diferença entre o caminho de ruptura do concreto leve e do convencional, enquanto que no concreto convencional a ruptura ocorre devido à diferença de deformações dos agregados e da pasta, no concreto leve a ruptura ocorre devido ao colapso da argamassa e a fratura atravessa os agregados, como acontece nos concretos de altas resistências.

Quanto as deformações causadas pela retração, Sartorti (2015) recomenda a pré-saturação dos agregados leves, que possuem elevado volume de vazios. Esta água contida no interior dos agregados pode contribuir para o processo de hidratação do cimento, reduzindo os efeitos da retração. No entanto, a quantidade excessiva de água na mistura pode fragilizar a ligação do agregado com a matriz.

A presença de vazios e a redução do peso dos concretos leves proporcionam benefícios significativos como o aumento da capacidade de absorção térmica e redução da transferência de calor, salientando a propriedade de isolamento deste material (SCHACKOW *et al*, 2014).

2.1.3. Aplicações do concreto leve

Algumas aplicações do concreto leve pelo mundo estão apresentadas em Rossignolo (2009). O autor cita que advento maior dessa tecnologia se deu a partir do período pós-guerras, por volta da década de 60, em aplicações que se beneficiam pela redução da massa específica do concreto, entre elas:

- Edificações de múltiplos pavimentos em locais com solo de baixa capacidade de suporte e com a possibilidade de diminuir as solicitações estruturais impostas por seu peso próprio;
- Elementos pré-fabricados com o intuito de reduzir custos e dificuldades operacionais de transporte e montagem das peças;
- Obras especiais, como pontes e estruturas de grandes vãos;
- Estruturas flutuantes, como plataformas e tanques.

Rossignolo (2009) ainda apresenta estudos sobre os benefícios econômicos proporcionados pela utilização do concreto leve. No caso das estruturas de concreto leve moldadas in loco houve uma redução nos custos, em média, de 5% a 10% em relação às estruturas moldadas de concreto convencional, ao passo que em pontes de grandes comprimentos, também de concreto leve moldado in loco, essa redução nos custos atingiu marcas de até 15% do valor total da obra. Em elementos pré-fabricados, as reduções nos custos apresentam-se mais significativas, podendo alcançar economias de até 50% no valor total, por conta do beneficiamento nas etapas que envolvem esses elementos, como: redução nos custos de transportes, possibilidade de produzir peças maiores utilizando os mesmos equipamentos e redução no tempo de montagem das estruturas.

2.2. Concreto leve utilizando o EPS como agregado leve

2.2.1. Poliestireno expandido

O poliestireno expandido (EPS) é um polímero celular rígido que pode apresentar uma variedade de formas e aplicações. Apresenta-se como uma espuma moldada, constituída por um aglomerado de grânulos. A sua obtenção ocorre através da transformação física do

poliestireno, de modo que suas propriedades químicas não são alteradas (SANTOS, 2008). Essa transformação acontece a partir da expansão dos grãos de poliestireno (PS) através de aquecimento por contato com vapor de água, resultando em esferas de poliestireno expandido com volume até 50 vezes maior do que no estado inicial.

De acordo com Oliveira (2013), o processo de fabricação do EPS consiste em transformação física de tal modo que não modifique as propriedades químicas do material, através das seguintes etapas:

- Pré-expansão: nesta etapa o poliestireno recebe aquecimento inicial por contato com vapor de água. A partir disso, as pérolas de poliestireno atingem volumes de até 50 vezes maior do que o estágio inicial, assumindo assim a estrutura de poliestireno expandido (Figura 3);
- Armazenamento intermediário: etapa de estabilização e resfriamento do EPS para posterior transformação;
- Moldagem: o material de EPS estabilizado é introduzido em moldes e novamente expostos em vapor de água de tal modo a proporcionar a “soldagem” das pérolas entre si, confeccionando um material rígido no formato do molde.

A estrutura celular do EPS é constituída por milhões de células fechadas com diâmetros de alguns décimos de milímetros e com paredes de 1 mm. Essa espuma é composta por, aproximadamente, 2% de poliestireno e 98% de ar (AMIANTI, 2005). Essa composição reflete na viabilidade e no pouco interesse pela reciclagem deste material, visto que existe uma pequena fração de material poliestireno.



Figura 3– Pérolas de poliestireno expandido, EPS (CUI *et al*, 2016).

O EPS em formato de pérolas esféricas é disponibilizado no mercado em diferentes diâmetros, com densidades variando entre 9 e 32 kg/m³, que podem ser escolhidos de acordo com a sua aplicabilidade. No entanto, a flamabilidade (capacidade de entrar em combustão quando exposto a uma fonte de calor) é a característica que mais se questiona a respeito desse material visando a segurança das edificações que utilizam o EPS em seus elementos construtivos (SARTORTI, 2015).

De acordo com a NBR 11752 (ABNT, 2016), existem duas categorias de EPS divididas em três classes cada uma. A primeira categoria classifica o EPS tipo P, que não é retardante à chama, a segunda por sua vez, classifica o EPS tipo F, retardante à chama (quando a fonte de calor é retirada o fogo se apaga). As classes, que são subdivisões dessas categorias, são apresentadas em função da densidade do EPS, como apresenta a Tabela 3, além de outras características dos diferentes tipos de EPS e das normas que regem os respectivos ensaios de caracterização.

Tabela 3 – Propriedades normativas do EPS segundo a NBR 11752 (ABNT, 2016)

Propriedades	Unid.	Classe P			Classe F		
		I	II	III	I	II	III
Massa específica aparente	kg/m ³	13-16	16-20	20-25	13-16	16-20	20-25
Resistência à compressão com 10 de deformação	kPa	≥ 60	≥ 70	≥ 100	≥ 60	≥ 70	≥ 100
Resistência à flexão	kPa	≥ 150	≥ 190	≥ 240	≥ 150	≥ 190	≥ 240
Absorção de água imerso em água	g/cm ² .100	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Permeabilidade ao vapor de água	Ng/Pa.s.m	≤ 7	≤ 5	≤ 5	≤ 7	≤ 5	≤ 5
Coefficiente de condutividade térmica a 23 °C	W/(m.K)	0,042	0,039	0,037	0,042	0,039	0,037
Flamabilidade	-	Não retardante à chama			Retardante à chama		

Fonte: Catoia (2012).

A respeito da aplicação do poliestireno expandido na construção, Sartorti (2015) cita que o EPS é utilizado principalmente como material de enchimento de lajes nervuradas, formas para concreto, isolante térmico e acústico, regularização de piso, juntas de dilatação, forros, painéis divisórios, plataformas flutuantes, agregados leves para composição do concreto leve,

entre outros. O autor ainda reforça o emprego desse material, na construção civil, como elemento redutor do peso próprio das estruturas e dos elementos não estruturais, gerando economia em vigas, pilares e fundações, justificando sua utilização com grande relação custo-benefício.

2.2.2. Vantagens e características do EPS

Amianti (2005), Oliveira (2013), Mas e Alcocel (2012) citam algumas das vantagens e características já verificadas no EPS, como:

- Baixa condutibilidade térmica: a estrutura celular de células fechadas, cheia de ar, dificulta a passagem de calor, configurando-o em um bom material isolante;
- Baixo peso específico: apresenta densidade na ordem de 9 a 40 kg/m³ o qual promovem redução substancial no peso das estruturas que os incorporam;
- Elevada resistência à compressão: apesar de sua leveza, o EPS possui boa resistência mecânica específica e alta compressibilidade;
- Baixa absorção de água: quando imerso absorve pouca quantidade de água, o que lhe garante manter suas características térmicas e mecânicas mesmo sob a ação da umidade;
- Resistência ao envelhecimento: possui vida útil de 150 a 200 anos;
- Versatilidade: podem possuir diferentes tamanhos e formatos e sua leveza beneficia o seu manuseio;
- Resistência química: possui compatibilidade com a maioria dos materiais, é considerado inerte e apresenta afinidade com materiais aglutinadores como cimento, cal e gesso, além de apresentar resistência à ácidos e álcalis;
- Comportamento microbiológico: não embolora, não é solúvel em água e nem libera substâncias ao meio ambiente, é um material totalmente inócuo.
- Sustentabilidade: é totalmente reciclável, seu manuseio não põe riscos à saúde humana e nem ao meio ambiente.

2.2.3. Reciclagem e reaproveitamento do EPS

Materiais de poliestireno expandido, como as embalagens, tem ciclo de vida bastante curto e isso implica em sérios problemas ambientais, pois o EPS não é biodegradável. A disposição em aterros e a incineração deste material não podem ser métodos para solucionar os problemas de poluição ambiental uma vez que estes podem causar facilmente poluição secundária (CRUZ, 2015).

De acordo com Oliveira (2013), a principal solução de destino correto do EPS é a reciclagem ou o reaproveitamento do mesmo. A reciclagem ocorre a partir da transformação do EPS, mantendo as características iniciais do poliestireno e pode ser feita de três tipos: reciclagem mecânica, química e energética.

Em linhas gerais, a reciclagem mecânica é a transformação do material em matéria prima para a fabricação de novos produtos. Na reciclagem química aplica-se solventes no EPS de tal modo a provocar uma despolimerização ou ruptura das macromoléculas do polímero e assim produzir gases e óleos. A reciclagem energética utiliza do alto poder calorífico do EPS para a recuperação de energia em usinas termelétricas (CRUZ, 2015). A Figura 4 esquematiza os diferentes processos de reciclagem do EPS, adaptado de Cruz (2015).

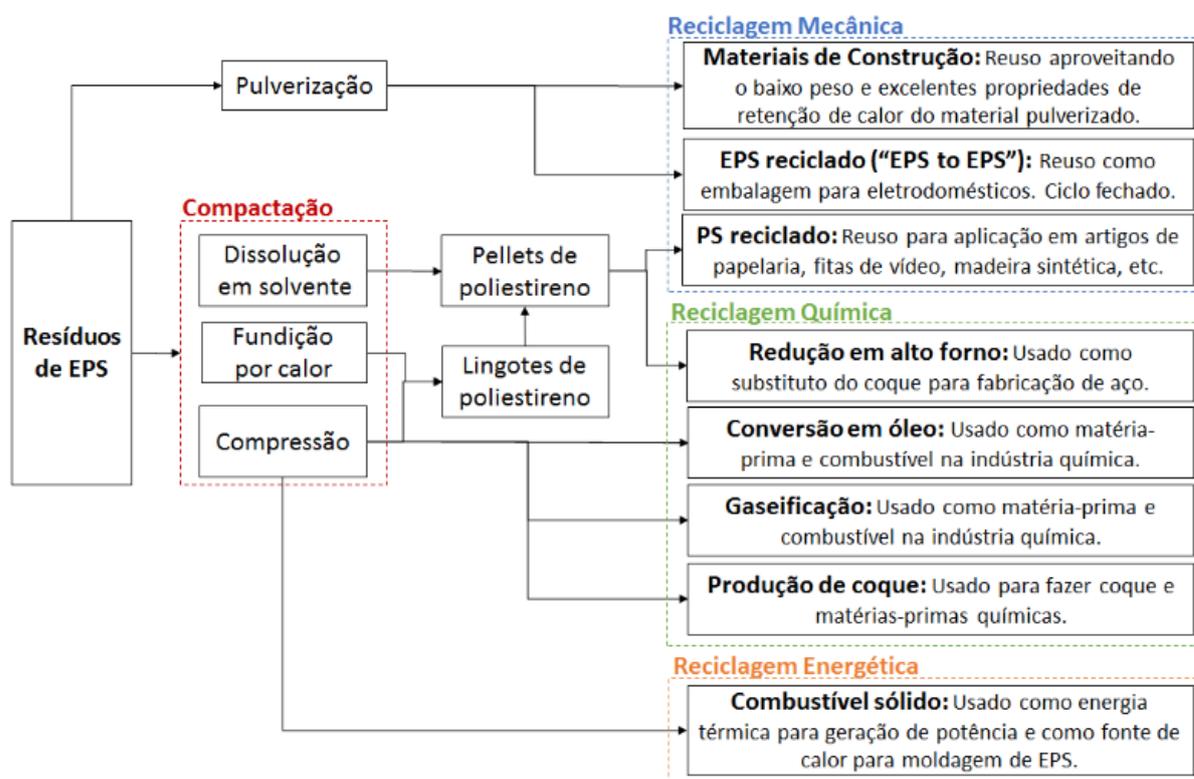


Figura 4 – Processos de reciclagem do EPS (CRUZ, 2015).

Segundo a pesquisa da empresa Plastivida (2012), o Brasil reciclou 34,5% de todo EPS consumido neste ano no país (13.570 toneladas das 39.340 toneladas de EPS pós-consumo). Nesta mesma pesquisa, foi constatado que a construção civil é o maior mercado para o EPS reciclado, com cerca de 80%, aplicado em argamassas, concreto leve, lajotas, telhas termo acústicas, rodapés e “decks” de piscina. A outra parte desse material reciclado são destinados para as indústrias de calçados (solados e chinelos), móveis (enchimento) e utilitários domésticos (vasos, molduras de quadro) entre outros.

Diversos autores relatam os principais desafios e dificuldades enfrentadas a respeito da reciclagem do EPS no Brasil, como:

- Falta de informação, necessidade de disseminação da informação que o material é reciclável (MAY, 2016);
- A baixa relação massa/volume desestimula a ação dos catadores, a separação da coleta seletiva e o transporte, encarecendo o processo de logística reversa (SARKIS, 2009);
- As dimensões continentais do Brasil demandam a existência de diversos pontos de coleta do material (TERMOTÉCNICA, 2012);
- Necessidade de investimentos em equipamentos de reciclagem (TERMOTÉCNICA, 2012);
- Limpeza e higienização do EPS que esteve em contato com alimentos, líquidos e outros produtos encarecem a reciclagem (MORGADO, 2016).

2.2.4. Concreto leve com EPS

A concepção do concreto leve com o poliestireno expandido (EPS) surgiu com o desenvolvimento da tecnologia do concreto e as constantes preocupações com a sustentabilidade (SARTORTI *et al*, 2017). No geral, o tipo de EPS mais utilizado como agregado nos concretos leves se encontra em formato de pérolas ou esferas, como mostra a Figura 3, no entanto, estudos recentes reforçam a utilização de resíduos de EPS em compósitos cimentícios, como apresentados em Gonçalves (2018), Oliveira (2013) e Kan *et al* (2009).

A Associação Brasileira de Poliestireno Expandido – ABRAPEX (2006), define concreto leve como um material constituído por cimento e areia que, no lugar do agregado graúdo, utiliza-se EPS na forma de pérolas expandidas ou de flocos reciclados. Ao endurecer, a mistura de cimento e areia envolve as pérolas de EPS, proporcionando um concreto de baixa densidade.

O concreto com EPS enquadra-se na classe dos concretos com porosidade presente nos agregados. Normalmente, o EPS é inserido na composição do concreto em fração volumétrica parcial ou total dos agregados graúdos ou ainda, dos agregados miúdos, devido às semelhanças granulométricas (GONÇALVES, 2018).

É importante ressaltar a definição de argamassa como produto de uma mistura homogênea entre material aglomerante, agregado miúdo e água, podendo ainda conter adições e aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, portanto, neste estudo, ao ser mencionado “concreto leve com EPS” na verdade trata-se de uma “argamassa leve com EPS”.

A definição de concreto considera o resultado de uma mistura homogênea entre material aglomerante, agregado miúdo, agregado graúdo e água, podendo ainda conter adições e aditivos a fim de promover diversas melhorias em suas propriedades, além de possuir razoável resistência e durabilidade.

Ressaltando que diversos trabalhos nacionais e internacionais tratam o objeto em estudo como um tipo de concreto, optou-se por manter a nomenclatura “Concreto Leve com EPS” (do inglês, *lightweight concrete with expanded polystyrene*). Mesmo podendo ser considerado como um concreto especial há possibilidade de utilização do agregado graúdo em sua composição, porém não foi considerado nesta pesquisa.

De acordo com Catoia (2012), o EPS no concreto leve atua como um incorporador de ar (característica encontrada na classe dos concretos com porosidade em massa), contribuindo para suas propriedades isolantes. Benefícios aos ataques químicos e à corrosão das armaduras são observados por Sayadi *et al* (2016) quando se substituí os agregados tradicionais por poliestireno expandido.

O concreto leve com EPS enquadra-se no conceito de material inovador, motivo pelo qual não há normas específicas que certifiquem sua utilização como material estrutural. Por conta disso, faz-se necessário a comprovação de suas propriedades e características de

desempenho de acordo com a finalidade e utilização do material, levando em consideração todos os fatores que viabilizam o emprego do mesmo dentro da construção civil (CATOIA, 2012).

Para a produção do concreto leve com EPS, um fator relevante a ser considerado é o alto potencial de segregação do agregado. Diversos autores reportaram que as esferas de EPS tendem a flutuar, o que pode resultar em uma mistura heterogênea. Para minimizar este efeito, recomendam-se evitar o excesso de vibração e a utilização de aditivos modificadores que beneficiem o envolvimento das partículas de EPS no interior da mistura. Dentre esses aditivos modificadores, o mais utilizado e facilmente encontrado no mercado, é a cola branca tipo PVA que deve ser dissolvida na água de amassamento para que o cimento comece a aderir ao EPS, e somente após esse momento, a parcela de areia da mistura deverá ser acrescentada, como recomenda o autor (STOCCO *et al*, 2009).

Catoia (2012) afirma que a diminuição do peso específico das estruturas é obtida em função da sua aplicação, sendo mais densos aqueles que necessitam de maiores resistências. A Figura 5a ilustra a seção transversal de um corpo de prova de concreto leve com pérolas de EPS, já a Figura 5b apresenta a seção longitudinal de um corpo de prova de concreto leve com EPS reciclado, a partir das quais é possível verificar a distribuição do EPS ao longo de toda matriz cimentícia.

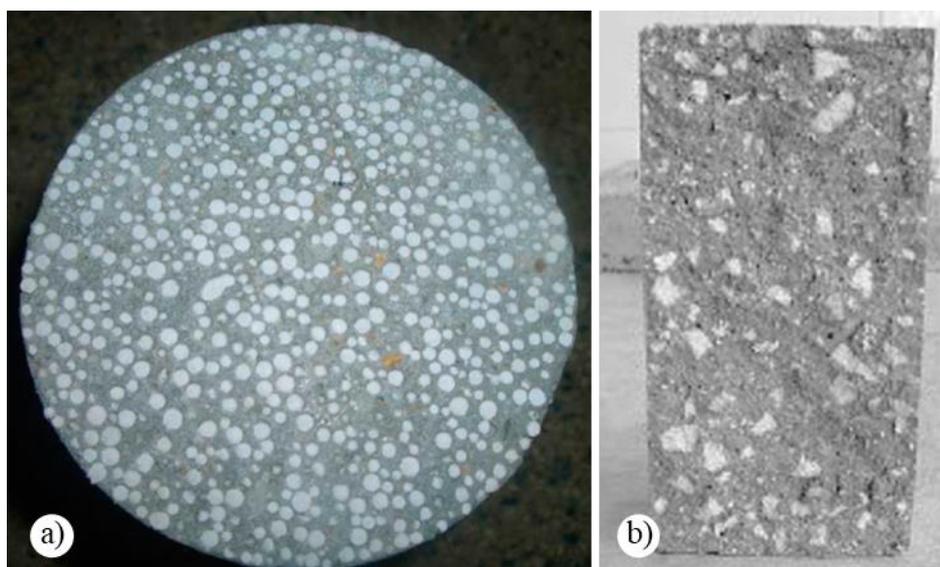


Figura 5 – Seção de um corpo de prova endurecido de concreto leve. a) Com pérolas de EPS (CATOIA, 2012). b) Com EPS reciclado (KAN *et al*, 2009).

2.2.5. Propriedades e características do concreto leve com EPS

Dentre as principais características e propriedades que sofrem alteração em função da substituição parcial ou total do agregado tradicional pelo poliestireno expandido, em termos de estado fresco (reologia) e endurecido, são: trabalhabilidade, massa específica, resistência à compressão, resistência à tração indireta, porosidade e absorção de água (GONÇALVES, 2018).

a. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto leve com EPS diminui à medida em que aumenta a quantidade de agregado leve na composição do concreto. Mas e Alcocel (2012) afirmam que o excessivo volume de EPS na mistura (superior a 60% do volume total do concreto) pode contribuir para que o compósito apresente má trabalhabilidade e perda de fluidez da massa. Entretanto, em quantidades inferiores, a perda de trabalhabilidade não se faz evidente já que o EPS não absorve água.

A perda de trabalhabilidade pode ocorrer devido ao processo de pega, que se faz acelerado quando a relação água-cimento é mais baixa que o normal em concretos convencionais, principalmente quando se utiliza cimento de alta resistência inicial (SARTORTI, 2015).

Esse tipo de propriedade pode ser determinado através do ensaio de espalhamento (na mesa ou *slump test*). O espalhamento medido representa a capacidade de o concreto escoar pela ação do peso próprio e conformar-se adequadamente nos moldes, preenchendo-os livremente. Além disso, nesse ensaio é possível observar outros parâmetros, como: homogeneidade da mistura, ausência de segregação do EPS, ausência de exsudação nas bordas da porção espalhada, e o formato do espalhamento, que deve ser arredondado devido à coesão da mistura (CATOIA, 2012).

Trussoni *et al* (2012), verificaram que, com a utilização de resíduos de EPS, de formato irregular, como agregado leve, a perda de trabalhabilidade foi maior em relação aos concretos moldados utilizando EPS no formato de pérolas. Essa informação foi confirmada posteriormente por Tamut *et al* (2014), que usaram pérolas de EPS no volume de 30% do agregado graúdo e obtiveram melhores resultados de abatimento, e por Demirboga *et al.* (2012),

que produziram concretos leves utilizando resíduos de EPS os quais apresentaram dificuldades de moldagem. Por conta disso, a utilização de aditivos superplastificantes ou ajustes no fator água-cimento podem ser alternativas para atingir melhores níveis de trabalhabilidade e minimizar as dificuldades anteriormente citadas.

b. Massa específica

A massa específica dos concretos com agregados leves de EPS não apresenta uma faixa de densidade padronizada, sendo modificada a depender do teor de EPS e da aplicação do material final. No entanto, diversos autores estabelecem o limite máximo para massa específica, não sendo superior a 2000 kg/m^3 (OLIVEIRA, 2013; SARTORTI, 2015).

A massa específica está diretamente ligada à granulometria do agregado (quanto menor a dimensão do EPS, maior a massa específica), como observaram os autores Tang *et al* (2008) e Babu *et al* (2006) que investigaram o efeito do tamanho do agregado de poliestireno expandido sobre as características de compósitos cimentícios em ampla faixa de densidade, variando entre 1000 kg/m^3 e 1900 kg/m^3 . O alto teor de EPS no concreto leve pode proporcionar compósitos com densidades inferiores a 1000 kg/m^3 , como afirmam os autores Chen e Liu (2004), que obtiveram concreto leve com EPS e massa específica de 800 kg/m^3 , e Babu *et al* (2004) que desenvolveram concretos leves com EPS e massa específica a partir de 550 kg/m^3 , os quais apresentaram propriedades satisfatória para aplicações em elementos não estruturais.

c. Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma das propriedades mais afetadas em concretos leves com EPS, apresentando uma relação inversa com a quantidade do agregado na mistura. Sartorti (2015) afirma que a resistência à compressão dos concretos com EPS é ditada pela resistência da matriz e, portanto, maximizada à medida que se obtém a matriz com melhores níveis de compactidade e resistência. O mesmo autor ainda menciona a respeito do mecanismo de ruptura do concreto leve com EPS que é concentrado em falhas e desvio da matriz, não sofrendo maiores influências por esse tipo de agregado. Além disso, para pequenas deformações, a linha de ruptura não chega a dividir o corpo de prova pelo efeito de aderência do EPS e a matriz, como também, a ruptura dos corpos de prova passou de um estado frágil para um em que se percebe ductilidade, favorecendo as questões de segurança do material (XU *et al*, 2012).

Babu *et al* (2003) estudaram as propriedades mecânicas do concreto leve com a adição de dois tipos de pérolas de EPS, areia fina de granulometria inferior a 2,3 mm e fator água-cimento entre 0,278 e 0,44, visando reduzir ao máximo a segregação dos agregados leves. Como resultado, obtiveram compósitos cimentícios cujas densidades variaram entre 1500 kg/m³ e 2000 kg/m³ e resistência à compressão entre 10 MPa e 20 MPa, para adições de poliestireno expandido na faixa de 20% a 40%.

Chen e Liu (2004) obtiveram compósitos cimentícios com densidades entre 800 kg/m³ e 1800 kg/m³ e resistência à compressão de 10 MPa a 25 MPa, para adições de poliestireno expandido na faixa de 25% a 55% em volume e fator água-cimento de 0,37.

Em sua pesquisa, Mo *et al* (2017) abordou algumas propriedades do concreto leve no estado fresco e endurecido utilizando diferentes tipos de material suplementar em substituição parcial do cimento, reduzindo o consumo deste material e da produção de hidróxido de cálcio. Dentre os materiais utilizados estão a sílica ativa, cinzas volantes, escórias de alto forno, metacaulim, cinza da casca do arroz entre outros. A partir desse estudo, os autores obtiveram diferentes resultados para cada material. Merece destaque as melhorias observadas na resistência à compressão, aos 28 dias, numa taxa de substituição de cimento entre 10 a 20% por sílica ativa, cinzas volante, metacaulim ou escória de alto-forno.

Em se tratando de concreto leve com EPS e adições minerais, Momtazi *et al* (2010) e Sadrmomtazi *et al* (2012) obtiveram resultados de resistências mecânicas satisfatórios para 15% de EPS e 20% de cinzas da casca do arroz, como também, para 25% de EPS e 10% de sílica ativa.

Miled *et al* (2007) estudaram a influência do tamanho da granulometria do EPS nas propriedades mecânicas do concreto leve. Para isso, utilizaram pérolas de EPS com diâmetros de 1,0 mm, 2,5 mm e 6,3 mm, na quantidade em volume entre 10 a 50%, e os melhores resultados de resistência à compressão foram obtidos com as menores granulometrias (LE ROY *et al*, 2005; LIU e CHENG, 2014).

d. Resistência à tração

Assim como na resistência à compressão, a resistência à tração sofre uma redução substancial à medida em que os volumes de EPS aumentam na composição da mistura. Como

afirma Sartorti (2015), a relação entre a resistência à tração, quando obtida por ensaio de compressão diametral, é algo em torno de 6% a 9% da resistência à compressão axial, e de 8% a 11%, quando obtida por ensaio de tração na flexão.

O concreto leve com EPS desenvolvido por Catoia (2012) apresentou resultados entre 1 MPa e 1,3 MPa para resistência à tração por compressão diametral e, de 1,2 MPa a 1,5 MPa para o ensaio de tração na flexão. Ozório (2016), desenvolveu concretos leves com EPS e diferentes tipos de adições, obtendo resultados de resistência à tração por compressão diametral entre 1 MPa e 1,5 MPa.

e. Porosidade e absorção de água

A porosidade e a absorção de água são afetadas à medida em que é alterado a quantidade de EPS na composição do concreto leve e estão diretamente relacionadas com a durabilidade do material. Sadrmomtazi *et al* (2012) constataram que o aumento da quantidade de EPS produz um ganho na absorção de água, causado pelo aumento da porosidade interna do concreto, o que pode estar relacionado à presença de maiores bolhas de ar e microtrincas resultantes da compressão ou esmagamento dos grãos de EPS.

De modo complementar, Momtazi *et al* (2010) verificaram que o incremento de microssílica, pela substituição de 10% cimento comum, resultou na redução de 7,4% da absorção de água do concreto. Esse decréscimo na absorção de água pode ser explicado devido à finura e ao alto poder pozolânico da microssílica, que preenche e diminui os vazios do concreto. Por outro lado, a utilização da cinza da casca do arroz, adição de baixo potencial pozolânico, proporcionou efeitos contrários, produzindo mais vazios e ganho em absorção de água.

2.2.6. Aplicações do concreto leve com EPS

O concreto com agregados leves de EPS pode ser utilizado em diversos elementos dentro da construção civil (arquitetônicos e/ou estruturais) como também em elementos decorativos. Lajes, painéis de vedação, vasos ornamentais são alguns dos exemplos da aplicabilidade deste material que, aliado com a sua leveza, proporciona um bom acabamento superficial (SARTORTI, 2015). Na Figura 6 constam três imagens de aplicabilidade do concreto leve com EPS em elementos pré-moldados, na qual a Figura 6a apresenta um modelo

de laje seção pi, a Figura 6b ilustra um elemento de laje maciça e, a Figura 6c, um elemento de vedação.



Figura 6 – Aplicações do concreto leve com EPS. a) Laje seção pi. b) Laje maciça em situação de içamento. c) Painel de vedação (CATOIA, 2012).

Liu e Chan (2014) apresentam outras aplicações desse material nos mais diversos tipos de estruturas, sistemas de pisos compostos, blocos de concreto para suporte de cargas, material de sub-base para pavimentos, estruturas marinhas flutuantes e camadas protetoras e resistentes ao impacto devido às suas boas características de absorção de energia. A alvenaria de blocos cerâmicos é o sistema de vedação mais tradicionalmente utilizado na construção civil. Este sistema é caracterizado por consumir uma quantidade enorme de tempo durante a execução da obra além de gerar um quantitativo de resíduos sólidos significativo (SIQUEIRA, 2017). Por conta disso, novos métodos construtivos se fazem cada vez mais necessários, visando uma construção mais facilitada, rápida e com menor geração de resíduos. Lima (2010) cita o desenvolvimento de elementos de alvenaria utilizando o concreto leve com EPS para aumentar o rendimento da argamassa e reduzir consideravelmente o peso da estrutura.

Por conta do seu grande potencial de isolamento térmico e por proporcionar menores cargas às estruturas, o concreto leve com poliestireno expandido é aplicado em diversos campos da construção civil, seja para elementos internos ou externos de uma edificação, com finalidade estrutural, de vedação ou apenas de isolamento (SANT'HELENA, 2009).

Em perspectiva ao atual cenário da indústria da construção civil de grande consumo de recursos naturais e energia, Dissanayake *et al* (2017) propôs um novo sistema de parede utilizando concreto leve com 50% de poliestireno expandido para produzir painéis leves. Dissanayake *et al* (2017) realizou ainda um estudo detalhado para determinar a energia incorporada nesses painéis e comparou uma casa unifamiliar de piso único feita de materiais de construção diferentes, concluindo que os painéis pré-moldados de concreto leve com EPS podem ser um bom concorrente e, portanto, tem o potencial de serem promovidos a um material de parede convencional, como apresenta a Figura 7.

Os painéis de concreto leve com EPS, podendo ser configurados como painéis tipo sanduíche, ganham espaço por proporcionar, além da leveza, propriedades térmicas e acústicas satisfatórias (CARBONARI *et al*, 2012).



Figura 7 – Parede construída com painéis de concreto leve com EPS (DISSANAYAKE *et al*, 2017)

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa experimental desta dissertação, de modo que são indicados os materiais utilizados, os ensaios realizados, assim como os procedimentos adotados de dosagem e mistura.

A pesquisa experimental foi dividida em duas etapas, como apresentado no fluxograma da Figura 8. A primeira etapa consistiu em um estudo preliminar de dosagens utilizando os seguintes materiais: cimento, agregado miúdo, água, superplastificante e EPS em formatos de pérolas e EPS reciclado. Na segunda etapa ocorreu um estudo mais direcionado e específico para dosagens de concreto leve utilizando os mesmos materiais da primeira etapa, no entanto, apenas o EPS reciclado como agregado leve.

Na primeira etapa foi analisado a resistência à compressão axial e a massa específica aparente, de modo comparativo, dos concretos desenvolvidos utilizando três tipos de poliestireno expandido individualmente (pérolas em duas granulometrias distintas e EPS reciclado); na segunda etapa, com enfoque no estudo utilizando o EPS reciclado como agregado leve, foi analisado a resistência à compressão axial, resistência à compressão diametral (tração na compressão), massa específica aparente, massa específica real, índice de vazios, absorção de água por imersão total e por capilaridade dos concretos leves desenvolvidos.

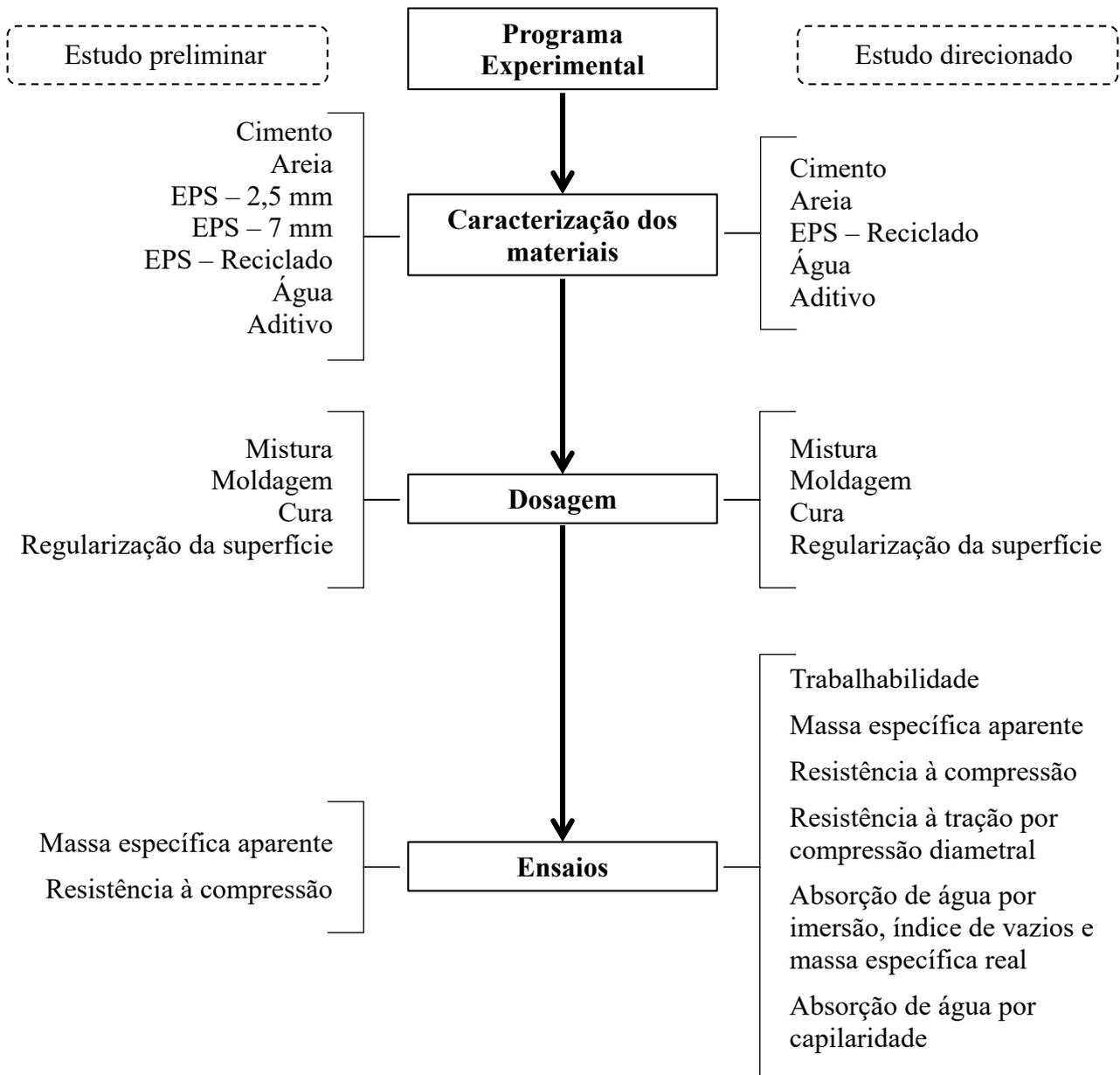


Figura 8 – Fluxograma das atividades

3.1. Materiais utilizados

Nos traços de concreto leve com EPS foram utilizados os seguintes materiais devidamente caracterizados e especificados.

3.1.1. Cimento Portland

Em todo o estudo foi utilizado cimento Portland comum do tipo CP-I-S-40 composto por 95 a 100% de clínquer e entre 0 e 5% de compostos secundários (material pozolânico) da marca Cemex, adquirido no comércio local da cidade de Manaus. A respeito desse material, são apresentadas suas principais propriedades na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades do Cimento CP-I-S-40 da marca Cemex

Propriedades	Unidade	Valor	Norma base
Massa específica	g/cm ³	3,10	NBR 16605:2017
Índice de finura	%	4,42	NBR 11579:2012
Tempo de início de pega	min	156	NBR 16607:2018

3.1.2. Agregado miúdo

Para essa pesquisa, foi utilizado uma areia fina, adquirida também no comércio local, após quarteada, seca em estufa por 24 horas a 100 °C e passante na peneira de malha 1,19 mm (NBR NM 248, 2003). Tanto a areia quanto o cimento foram acondicionados em recipientes plásticos com tampa e vedação quase hermética a fim de preservar suas propriedades e evitar ao máximo o contato com a umidade do ar.

Vale ressaltar que todo o material retido na peneira de malha 1,19 mm foi descartado e que o agregado foi inserido na dosagem em unidade de peso e em estado seco. As propriedades que caracterizam este material estão dispostas na Tabela 5, a curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo está apresentada na Figura 10 juntamente com as curvas de distribuição granulométrica do EPS, determinadas de acordo com a norma NBR NM 248 (ABNT, 2008).

Tabela 5 – Propriedades do agregado miúdo

Propriedades	Unidade	Valor	Norma base
Massa unitária solta	g/cm ³	1,62	NM 45:2006 - C
Massa específica real	g/cm ³	2,61	NM 52:2009
Teor de umidade	%	0,00	NBR 9775:2011
Índice de vazios	%	38,14	NM 45: 2006
Teor de absorção	%	3,33	NM 30:2001
Teor de impurezas orgânicas	-	<i>igual à solução padrão</i>	NM 49:2001

3.1.3. Poliestireno expandido – EPS

Este estudo contempla a utilização de três tipos de EPS. Dois tipos são originários diretamente da produção industrial, em outras palavras, da expansão do poliestireno através de vapor de água, diferindo-os entre si apenas pelo tamanho das partículas (ou pérolas, como é conhecido), e portanto, foram referidos neste trabalho como EPS-2,5 e EPS-7 (numeração em função do tamanho médio das pérolas – D₅₀), apresentados na Figura 9; o terceiro tipo de EPS utilizado é oriundo da trituração de embalagens de EPS ou reciclagem mecânica, referido neste trabalho como EPS-R (reciclado), apresentado na Figura 9.



Figura 9 – Tipos de poliestireno expandido (EPS) utilizados.

A curva de distribuição granulométrica dos três tipos de EPS utilizados nesta pesquisa foram determinadas a partir de uma adaptação da norma NBR NM 248 (ABNT, 2008) e estão apresentadas na Figura 10, bem como também a curva granulométrica do agregado miúdo.

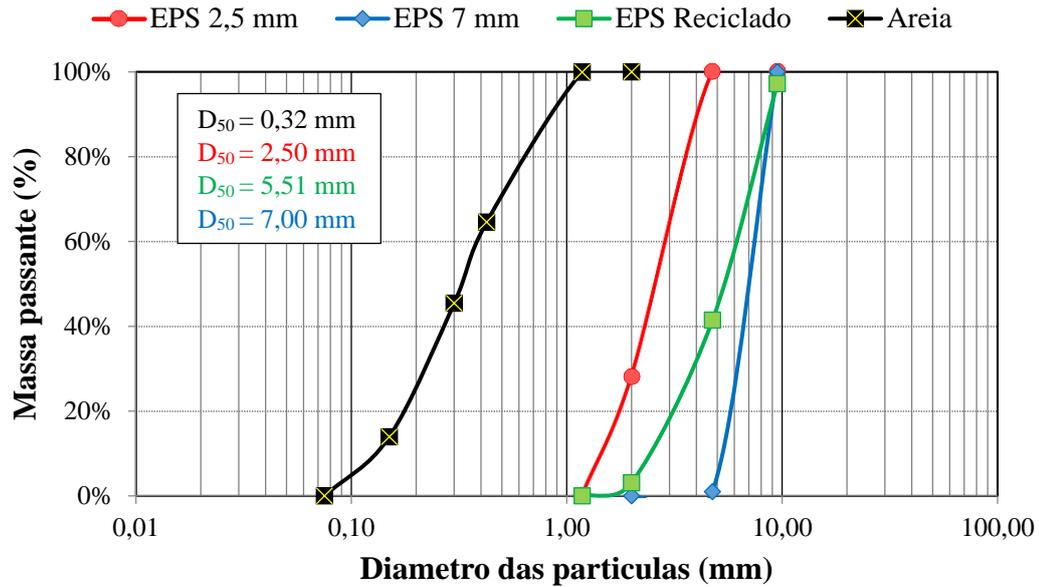


Figura 10 – Curvas de distribuições granulométricas do EPS e do agregado miúdo.

O volume de vazio do EPS foi determinado por adaptação à norma NBR NM 45 (ABNT, 2006) devido à leveza do material. Inicialmente um recipiente de volume conhecido foi totalmente preenchido com cada tipo de EPS, tomando cuidado para não haver compactação do material, como mostra a Figura 11a, em seguida uma malha metálica foi colocada acima do recipiente para impedir a movimentação do EPS e, posteriormente, os recipientes foram preenchidos completamente por água (Figura 11b), de tal modo que o volume de água inserido seria correspondente ao volume de vazios do EPS, anotados na Tabela 6. Outras informações adicionais como a massa específica aparente, índice de forma e absorção de água foram determinadas a fim de ampliar a caracterização do material, que também estão contidas na Tabela 6.



Figura 11 - Determinação do volume de vazios do EPS. a) recipiente preenchido totalmente por EPS. b) recipiente preenchido por EPS + água

Tabela 6 – Propriedades do EPS

Propriedades	Unidade	EPS-2,5	EPS-7	EPS-R	Norma base
Massa específica aparente	g/cm ³	0,016	0,013	0,011	NM 45:2006
Volume de vazios	¹ cm ³	0,80	1,00	0,90	-
Índice de forma	-	Arredondadas	Predominantemente arredondadas		NBR 7809:2006
Teor de absorção	-	Material impermeável			NM 30: 2001

¹em relação à porcentagem de EPS na mistura

3.1.4. Água e aditivo

Para as misturas dos materiais sólidos utilizou-se água, proveniente da rede pública de abastecimento local, na proporção (fator água-cimento) de 0,3. Para conferir uma melhor trabalhabilidade em virtude da baixa quantidade de água, considerando ainda que a mistura não pode estar muito fluida ao passo que facilitaria a segregação do EPS em relação aos demais constituintes, foi utilizado aditivo superplastificante da marca ADVA do tipo 175, com teor de sólidos de 0,4. Esse aditivo é um superplastificante a base de policarboxilatos para concretos com alto poder de redução de água desenvolvido para fornecer excelente manutenção de abatimento e resistência a segregação. A quantidade de aditivo inserida nas dosagens foi um percentual do consumo de cimento de cada traço.

3.2. Métodos

3.2.1. Dosagem e produção dos corpos de prova

Os traços de concreto leve com EPS desenvolvidos nesta pesquisa foram considerados em termos de massa, com a parcela de EPS inserida em volume. Para manter condições satisfatórias mínimas de trabalhabilidade, resistência e durabilidade, como indicado em Angelin (2014), o consumo de cimento foi superior a 300 kg/m³ em todos os traços de concreto leve, obedecendo ainda o mínimo consumo de cimento de 280 kg/m³ estabelecido pela NBR 12655 (ABNT, 2015) para uma classe de agressividade moderada.

Na primeira etapa da pesquisa experimental, além da caracterização individual de cada material, foram desenvolvidos traços preliminares a fim de avaliar visualmente o

comportamento do material no estado fresco, durante o processo de mistura e moldagem, presença de exsudação ou segregação do EPS. Posteriormente, os traços desenvolvidos foram caracterizados quanto à massa específica aparente e à resistência à compressão.

Em virtude da facilidade de segregação do agregado leve a principal dificuldade foi estabelecer um traço que evite ou minimize tal efeito. Para isso, estabeleceu-se um traço padrão fixo de 1:1:0,3 (cimento : areia : água), baseado na pesquisa de Ozório (2016), na qual a autora testou diferentes fatores água-cimento variando entre 0,25 e 0,31, como também estudou diferentes teores de superplastificante.

Quanto ao agregado leve na mistura, este fora adicionados em duas quantidades, 30 e 60% em relação ao volume total, nos seguintes tipos: EPS-2,5, EPS-7 e EPS-R. O teor de superplastificante, esteve entre de 0,4 a 0,6% em relação ao consumo de cimento e ao volume de EPS na composição. Os consumos dos materiais para cada uma das misturas, determinado pelo método convencional de dosagens (TUTIKIAN, 2004), estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Consumo dos materiais

Mistura	Tipo de EPS	Vol. de EPS	Cimento ¹	Areia ¹	Sup. ¹	a/c	Água ¹	EPS ¹
M-Ref	Referência	0%	994,31	994,31	3,98	0,30	292,32	0,00
M30E-2,5	Pérolas 2,5 mm	30%	696,02	696,02	2,78	0,30	204,62	4,80
M30E-7	Pérolas 7 mm	30%	696,02	696,02	2,80	0,30	204,62	3,90
M30E-R	Reciclado	30%	696,02	696,02	2,80	0,30	204,62	3,30
M60E-2,5	Pérolas 2,5 mm	60%	397,72	397,72	2,39	0,30	115,73	9,60
M60E-7	Pérolas 7 mm	60%	397,72	397,72	2,39	0,30	115,73	7,80
M60E-R	Reciclado	60%	397,72	397,72	2,39	0,30	115,73	6,60

¹medidas em kg/m³

Na segunda etapa da pesquisa experimental, o estudo direcionado objetivou avaliar as propriedades físicas e mecânicas do concreto leve com EPS reciclado a fim de conhecer o comportamento do material a partir da caracterização de cada traço.

Nesse contexto, para dar continuidade ao desenvolvimento da pesquisa, foi definido um estudo específico envolvendo uma caracterização mais abrangente das misturas utilizando o EPS-R (reciclado). O estudo compreendeu quatro diferentes dosagens de concreto leve com adição de EPS-R atuando como agente incorporador de vazios no qual foi avaliado a trabalhabilidade, a resistência à compressão axial, resistência à compressão diametral, massa

específica aparente, massa específica real, absorção de água, índice de vazios e absorção de água por capilaridade.

A Tabela 8 apresenta a nomenclatura atribuída a cada uma das novas misturas, bem como é identificada a proporção de cada material no traço, o elemento diferencial e o tipo de EPS utilizado (no caso, EPS-R).

Tabela 8 – Identificação e descrição das misturas

Identificação das misturas	Proporção dos materiais (cimento : areia : EPS : superplastificante : água)	Característica da mistura	EPS utilizado
M30	1 : 1 : 30% : 0,4% : 0,30	Referência	EPS-R
M45	1 : 1 : 45% : 0,7% : 0,30	Aumento de 15% de EPS e 0,3% de superplastificante	EPS-R
1M60	1 : 1 : 60% : 1% : 0,30	Aumento de 30% de EPS e 0,6% de superplastificante	EPS-R
2M60	1 : 1 : 60% : 1% : 0,36	Aumento de 30% de EPS, 0,6% de superplastificante e aumento de 0,06 no fator a/c	EPS-R

Vale ressaltar que a mistura M30 foi considerada como referência, pelo estudo preliminar, ter apresentado melhores resultados e, portanto, mantida as mesmas configurações de dosagens. As demais misturas tiveram aumento na quantidade de EPS, superplastificante e água (2M60) a fim de tentar aproximar as características de trabalhabilidade da mistura de referência.

a) Mistura

Para todas as misturas foi utilizado um misturador de eixo vertical, do tipo argamassadeira, com capacidade para 20 litros (Figura 12a). A colocação dos materiais obedeceu a seguinte sequência: primeiramente os materiais sólidos (cimento, areia e EPS) foram misturados por cerca de 2 minutos e, em seguida, adicionou-se gradativamente a solução líquida composta por superplastificante diluído na quantidade de água de cada traço, com o misturador em funcionamento graduado para velocidade lenta, misturando todos os materiais

por mais 3 minutos, resultando em uma melhor distribuição dos materiais, como apresenta a Figura 12b.



Figura 12 – Mistura dos materiais. a) Equipamento argamassadeira. b) Distribuição dos materiais na mistura

b) Moldagem

A moldagem dos corpos de prova foi realizada por adensamento manual, como preconiza a norma ABNT NBR 5738:2015, em moldes metálicos padronizados em formato cilíndricos com dimensões de 5,0 cm de diâmetro por 10,0 cm de altura (Figura 13).



Figura 13 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos

c) Cura

Em todas as misturas analisadas, no dia seguinte à moldagem, após aproximadamente 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados, pesados, identificados e levados à cura que ocorreu em condição saturada em meio aquoso à temperatura ambiente (ABNT NBR 5738, 2015) até a data dos ensaios, como apresenta a Figura 14, sendo executada a retirada dos mesmos dessa condição para procedimento de regularização da superfície ou capeamento.



Figura 14 – Corpos de prova em condição de cura

d) Regularização da superfície ou capeamento

Na véspera de completar a idade de 28 dias, após secagem em temperatura ambiente, os corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à compressão axial foram novamente pesados e tiveram suas dimensões medidas com auxílio de um paquímetro digital e, no entanto, pela falta de um equipamento de retífica de precisão, todos esses corpos de provas foram revestidos com capeamento de enxofre (ABNT NBR 5738, 2015) nas duas faces a fim de evitar irregularidades e concentração de tensão durante a execução do ensaio, como apresenta a Figura 15.

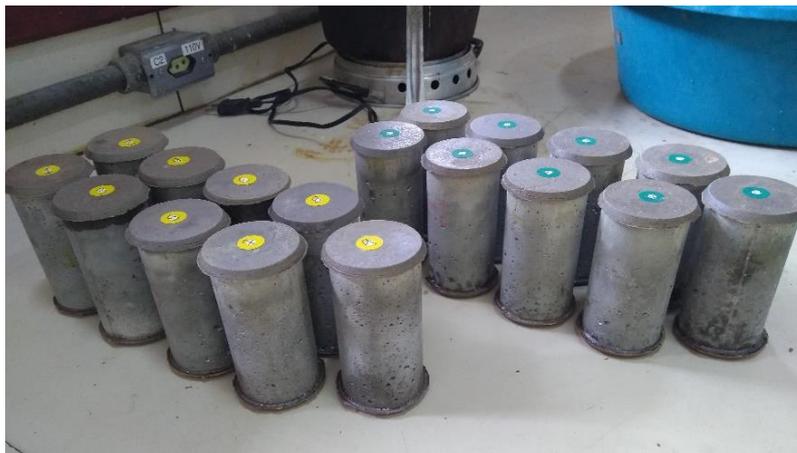


Figura 15 – Corpos de prova com ambas as faces regularizadas após capeamento com enxofre

3.2.2. Procedimentos

Os ensaios realizados para todos os traços desenvolvidos nesta pesquisa seguiram rigorosamente o que preconiza as respectivas normas vigentes que os regulamentam, conforme descrito individualmente na sequência do texto.

3.2.2.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma das principais propriedades do concreto e da argamassa no estado fresco, pois representa uma combinação de características reológicas com coesão, consistência, plasticidade e viscosidade.

Nessa pesquisa, a trabalhabilidade dos concretos leves desenvolvidos foi determinada a partir do ensaio da mesa de consistência, seguindo as recomendações normativas apresentadas na ANBT NBR 7215:1996, utilizando um molde metálico em formato tronco de cone cujas dimensões estão apresentadas na Figura 16. Nesse ensaio, a consistência da argamassa é quantificada através do índice de consistência obtido pela medição do diâmetro da argamassa espalhada após 30 quedas sucessivas da mesa de espalhamento (flow table), como apresenta as Figura 17a), b) e c).

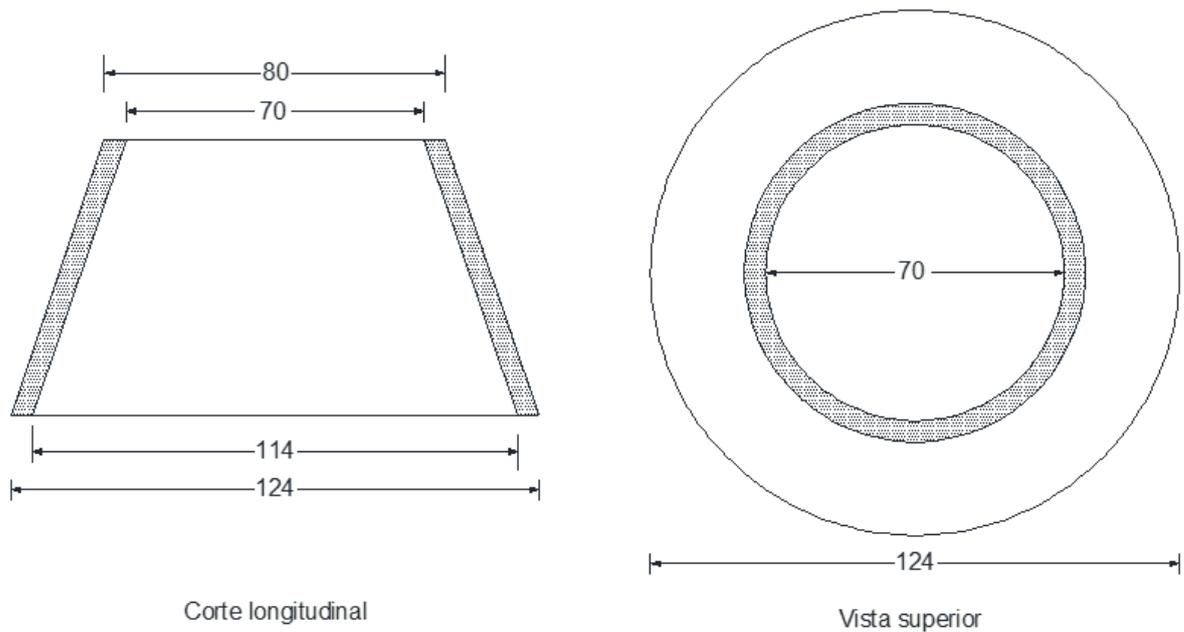


Figura 16 – Dimensões, em milímetros, do molde tronco de cone utilizado no ensaio de espalhamento.



Figura 17 – Ensaio de espalhamento na mesa (flow table). a) Mistura contendo 30% de EPS. b) 45% de EPS. c) 60% de EPS

A escolha desse tipo de ensaio para determinar a consistência dos concretos desenvolvidos se deu com base em trabalhos realizados por outros autores, como apresenta Babu *et al* (2005), uma vez que o concreto não apresenta agregados graúdos em sua composição e o EPS pode proporcionar melhor fluidez a mistura, desde que seja inserido em baixas quantidades.

3.2.2.2. Massa específica aparente no estado endurecido

Todos os corpos de prova, após a secagem em temperatura ambiente, foram devidamente identificados, pesados e tiveram suas dimensões (diâmetro e altura) medidas através de paquímetro digital. Desse modo, a massa específica aparente do concreto leve endurecido foi determinada pela razão entre a massa, em gramas, e o volume, em centímetros cúbicos, de cada corpo de prova.

3.2.2.3. Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão foi executado conforme as diretrizes normativas prescritas na ABNT NBR 5739:2007 nos corpos de prova moldados, curados e com superfície nivelada em consonância com a ABNT NBR 5738:2015.

Aos 28 dias, os corpos de prova foram ensaiados sequencialmente em prensa universal com capacidade de até 60 toneladas, da marca Contenco (Figura 18a), no entanto, foi acoplado ao equipamento uma célula de carga de 5 toneladas a fim de proporcionar maior precisão aos resultados; a velocidade de deslocamento da máquina foi de 1,39 mm/min e incremento de carga constante de 0,45 MPa/s durante todo o ensaio (Figura 18b).



Figura 18 – Ensaio mecânicos. a) Prensa universal da marca Contenco. b) Ensaio de resistência à compressão axial

3.2.2.4. Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração na compressão diametral foi executado nos corpos de prova seguindo as recomendações normativas estabelecidas na ABNT NBR 7222:2011, realizado através do mesmo equipamento utilizado no ensaio de resistência a compressão axial, porém com os corpos de prova corretamente posicionados, como apresentado na Figura 19, e com velocidade de incremento de carga constante de 0,05 MPa/s.

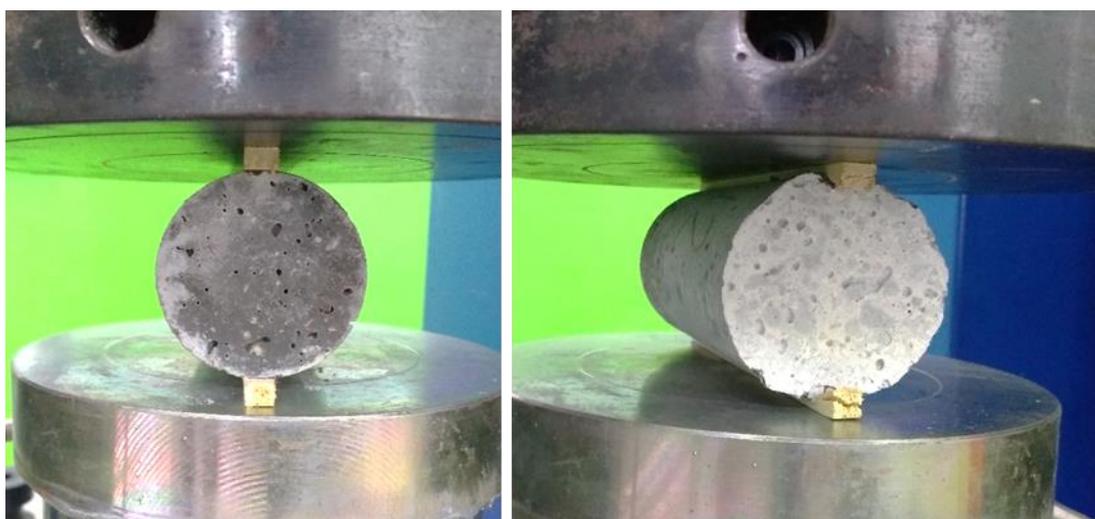


Figura 19 – Corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Na Figura 19 é apresentado o modelo de sollicitação que ocorre em corpos de prova submetidos à compressão diametral, em que a força produzida pelo equipamento é transmitida por meio de duas chapas de madeira posicionadas ao longo de duas faces diametralmente opostas do corpo de prova, desse modo, a ruptura do corpo de prova é provocada por tensões de tração que surgem no mesmo (CATOIA, 2012).

3.2.2.5. Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica do concreto leve endurecido foram realizados de acordo com a ABNT NBR 9778:2005. No entanto, no ensaio de absorção de água fez-se necessário diminuir a temperatura de secagem do material para 50 °C durante um período de 72 horas, e posterior imersão com aquecimento nessa temperatura, seguindo recomendações de Ozório (2016), como apresenta a Figura 20,

uma vez que seria difícil prever se a temperatura de secagem recomendada pela norma citada (105 °C) poderia influenciar nas características de absorção do concreto leve com EPS, por conta de uma alteração na forma dos agregados leves, como cita Sadrmomtazi *et al* (2012).



Figura 20 – Secagem dos corpos de prova em estufa com temperatura controlada

3.2.2.6. Absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados em consonância com a ABNT NBR 9779:2012. Primeiramente os corpos de prova foram submetidos à secagem em condições similares às apresentadas no item 3.3.5 e por mesmo período de tempo até a estabilização da massa em leituras sucessivas. Após a constância da massa dos corpos de prova, os mesmos foram resfriados à temperatura ambiente.

Na sequência, os corpos de prova foram inseridos em um recipiente de tal modo que ficaram com a face inferior imersa até uma altura de água igual a 5 mm, com variação de 1 mm, como apresenta a Figura 21. Ao longo da realização do ensaio, os corpos de prova foram pesados e suas massas registradas nos tempos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h a contar a partir do instante de início da imersão. Nesses períodos de tempo, verificou-se a percolação de água, pelas faces laterais dos corpos de prova, uma vez que a sequência do ensaio somente poderia ocorrer se a ascensão capilar for inferior a altura total do corpo de prova.



Figura 21 – Corpos de prova com face imersa em água para ensaio de absorção de água por capilaridade

Na fase final do ensaio, após a pesagem no tempo de 72h, os corpos de prova foram submetidos à fratura por tração na compressão diametral, para que o perfil de percolação de água no interior pudesse ser determinado, como apresenta a Figura 22.



Figura 22 – Perfil de percolação de água no interior do corpo de prova

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente capítulo desta dissertação são apresentados, descritos e analisados os resultados obtidos no programa experimental a respeito dos diferentes traços de concreto leve com EPS desenvolvidos no estudo.

4.1. Estudo preliminar de dosagens

No estado fresco, a partir de observação visual das misturas desenvolvidas, Figura 23, foi possível perceber que o aumento da quantidade de EPS diminuiu significativamente a trabalhabilidade do concreto leve, mesmo mantendo o consumo de cimento superior ao mínimo recomendado por normas e trabalhos científicos para garantir padrões mínimos adequados de trabalhabilidade.

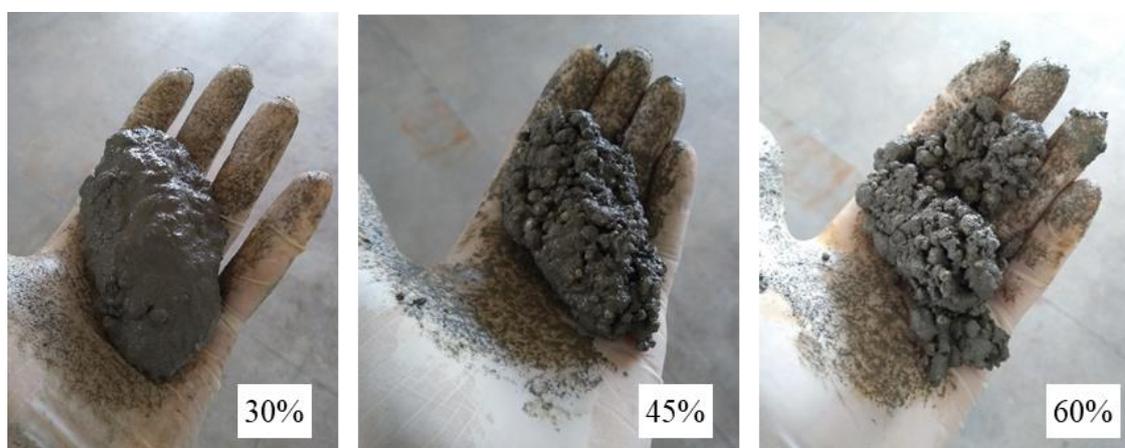


Figura 23 - Trabalhabilidade das misturas de concreto leve com diferentes teores de EPS

Na mesma proporção de EPS, as misturas com EPS-2,5 apresentaram melhor trabalhabilidade pelo fato das pérolas possuírem menor granulometria e, conseqüentemente, menores volume de vazios.

No estado endurecido foi avaliado a massa específica aparente e a resistência à compressão axial dos corpos de prova a fim de comparar física e mecanicamente cada uma das misturas elaboradas e os resultados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resistência à compressão e massa específica aparente para cada mistura

Mistura	Volume de EPS	Massa específica aparente (g/cm ³)		Resistência à compressão (MPa)	
			CV		CV
M-Ref	0%	2,28	2,38%	93,25	2,36%
M30E-2,5	30%	1,72	1,71%	32,17	7,32%
M30E-7	30%	1,58	2,88%	21,38	8,61%
M30E-R	30%	1,69	1,39%	22,17	7,58%
M30E-2,5	60%	1,31	2,18%	14,78	6,12%
M30E-7	60%	1,15	4,39%	10,81	8,59%
M30E-R	60%	1,30	0,77%	10,30	9,40%

a) *Massa específica aparente*

Observando os resultados de massa específica aparente da Tabela 9, nota-se que a utilização do EPS como agregado leve reduz substancialmente o peso do concreto. Analisando o impacto dos três tipos de EPS na massa específica, para 30% do volume, a mistura M30E-7 resultou em um concreto mais leve, diferindo em quase 1,00 g/cm³ quando comparado à massa específica já conhecida do concreto convencional utilizando agregados graúdos, diferindo ainda em 0,70 g/cm³ da mistura referência, uma argamassa altamente resistente e com um elevado consumo de cimento. Com o dobro de EPS, no volume de 60%, a mistura M60E-7 também apresentou o menor valor de massa específica aparente. Esse comportamento pode ser resultado das diferentes granulometrias dos três tipos de EPS utilizados. De modo geral, a taxa da redução da massa específica do concreto se faz aproximadamente igual com o volume de EPS nas misturas M30E-2,5, M30E-7 e M30E-R, nas demais misturas, essa relação direta não ocorre.

b) Resistência à compressão

A partir dos resultados de resistência a compressão axial observa-se que a mistura de referência (M-Ref), matriz cimentícia sem EPS, apresenta uma resistência bastante elevada em relação às demais. Isso acontece pelo fato de o traço básico ser de proporção 1:1 de cimento e areia, com alto consumo desses dois materiais (Tabela 7). Com a presença do EPS na composição, o traço torna-se economicamente mais viável para diversas aplicações.

Alguns corpos de provas rompidos estão apresentados na Figura 24, onde é possível verificar, em escala macroscópica, que a grande parte do EPS foi “rasgado” no momento da ruptura devido a sua boa aderência na matriz. A ruptura dos corpos de prova de concreto leve com EPS se deu pelo colapso da argamassa, de maneira semelhante ao que acontece nos concretos de alta resistência, nos quais a região de ruptura secciona os agregados graúdos mantendo-os aderidos na argamassa ou, como neste caso, pelo rasgamento das pérolas de EPS e estas mantidas aderidas na argamassa, como apresenta a Figura 24a), b) e c).

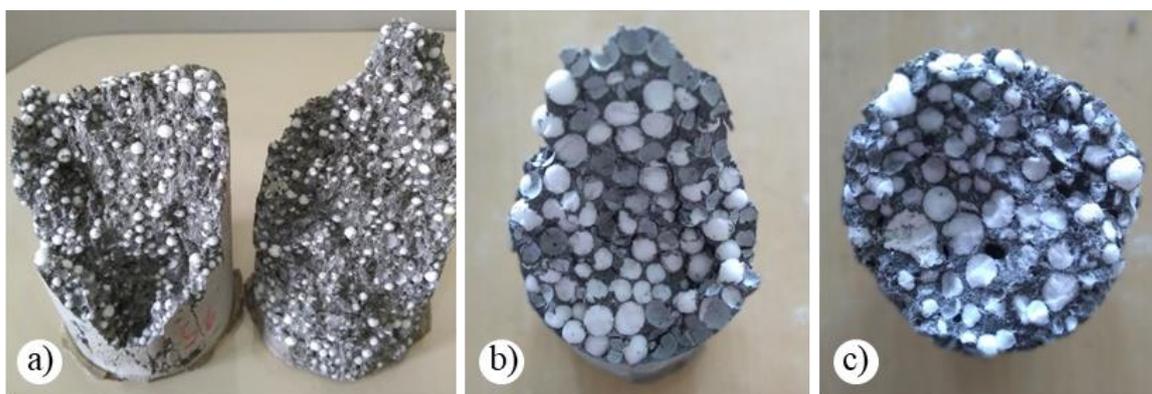


Figura 24 - Corpos de prova rompidos após ensaio de resistência à compressão axial. a) pérolas de 2,5 mm. b) pérolas de 7 mm. c) EPS reciclado.

Analisando individualmente os resultados de resistência à compressão para as misturas utilizando os três tipos de EPS, como apresentado na Tabela 9, observa-se que os corpos de prova com EPS de 2,5 mm obtiveram as melhores resistências à compressão. Os corpos de prova com os demais tipos de EPS apresentaram resistências com um grau de aproximação muito elevado. Era de se esperar que as misturas com EPS reciclado (M30E-R e M60E-R) apresentassem valores de resistência inferiores em relação aos demais, haja visto que esse material passou por procedimentos operacionais que poderiam ter danificado sua estrutura. Entretanto, o EPS reciclado apresenta uma distribuição de partículas mais adequada e não

uniforme que favorece o empacotamento da mistura final e um volume de vazios ligeiramente menor que pode justificar tal semelhança nos resultados.

Analisando os resultados como um todo, observa-se que ao dobrar a quantidade de EPS a resistência a compressão diminuiu em 46% para a mistura M60E-2,5, 51% para M60E-7 e 46% para M60E-R. Quantitativamente, a diferença no resultado de resistência da mistura M30E-2,5 para as misturas M30E-7 e M30E-R é de 10,79 e 10,00 MPa, respectivamente. A diferença no resultado da mistura M60E-2,5, com o dobro de EPS, para as misturas M60E-7 e M60E-R é de 3,97 e 4,48 MPa, respectivamente.

Esses resultados confirmam os obtidos por Miled *et al* (2007) no qual os autores analisaram concretos leves com pérolas de EPS em três granulometrias distintas e constataram que com o menor tamanho do agregado as resistências à compressão mostraram-se maiores. Além disso, observaram que o efeito da granulometria do agregado torna-se insignificante a medida em que a porosidade do concreto leve aumenta.

4.2. Análise estatística dos resultados preliminares

A partir dos resultados iniciais obtidos e do estudo das variáveis consideradas, constatou-se que a variabilidade da resistência à compressão do concreto leve desenvolvido está relacionada tanto pelo tipo de EPS utilizado quanto pela quantidade desse agregado na mistura. Por conta disso, uma metodologia de planejamento de experimentos foi adotada para investigar o efeito desses dois fatores (tipo e quantidade de EPS), no entanto, pelos resultados preliminares, o EPS de 7 mm foi desconsiderado da análise por apresentar resistências próximas ao EPS-R (reciclado) e este último, além de possuir menor valor econômico, agrega consigo questões ambientais relevantes. Desse modo, fez-se uma análise estatística e comparativa entre as misturas utilizando o EPS-2,5 e o EPS-R sob a ótica da resistência a compressão.

a) Delineamento experimental

O planejamento fatorial utilizado foi do tipo 2², onde há duas variáveis controladas em dois níveis cada uma. Os procedimentos anteriormente citados de moldagem e cura dos corpos de prova foram repetidos sob as mesmas condições. No entanto, cada mistura foi reproduzida

três vezes, configurando o ensaio em triplicata, a fim de proporcionar maior valor estatístico aos resultados ($2^2 = 4$ ensaios x 3 repetições = 12 observações).

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 10 correspondentes aos 24 corpos de prova confeccionados, sendo dois para cada porcentagem e tipo de EPS, porém, foi escolhido, aleatoriamente, um corpo de prova de cada par para compor a análise. Apesar do estudo ter se mantido em apenas uma variável de resposta (resistência à compressão), a massa específica também é relevante para o estudo e por isso, um gráfico relacionando tais variáveis foi construído a fim de verificar a relação entre elas, apresentado na Figura 25.

Tabela 10 – Resultados obtidos no delineamento experimental

Corpo de Prova	Tipo de EPS	Quantidade (%)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Resistência à compressão (MPa)	Média da resistência dos CP escolhidos
1	EPS-2,5	60	1,22	12,22	10,93
2	EPS-2,5	60	1,24	12,22	
3	EPS-2,5	60	1,30	13,73	
4	EPS-2,5	60	1,23	11,28	
5	EPS-2,5	60	1,25	10,23	
6	EPS-2,5	60	1,23	9,30	
7	EPS-2,5	30	1,77	33,21	30,90
8	EPS-2,5	30	1,79	33,20	
9	EPS-2,5	30	1,77	36,32	
10	EPS-2,5	30	1,79	30,86	
11	EPS-2,5	30	1,79	28,58	
12	EPS-2,5	30	1,73	28,63	
13	ESP-R	60	1,30	8,45	9,25
14	ESP-R	60	1,30	8,58	
15	ESP-R	60	1,24	10,41	
16	ESP-R	60	1,24	10,21	
17	ESP-R	60	1,25	8,96	
18	ESP-R	60	1,25	8,96	
19	ESP-R	30	1,68	23,63	23,83
20	ESP-R	30	1,70	23,87	
21	ESP-R	30	1,73	22,66	
22	ESP-R	30	1,65	19,25	
23	ESP-R	30	1,70	24,96	
24	ESP-R	30	1,68	19,72	

No planejamento experimental, para quantificar a variável nominal "tipo de EPS" o EPS-2,5 foi considerado como 1 e o EPS-R como -1.

Pelo gráfico da Figura 25 é possível observar uma semelhança na disposição das curvas de tendência obtidas para os 24 corpos de prova utilizando os dois tipos de EPS, com a taxa de variação da resistência maior para as misturas utilizando o EPS-2,5, variando em aproximadamente 20 MPa pelas duas quantidades de EPS analisadas (redução de 65% da resistência quando dobra a quantidade de EPS), enquanto que a média das resistências para as misturas utilizando o EPS-R variou em 14,58 MPa (redução de 61%). A relação entre as variáveis é melhor ajustada em um gráfico linear.

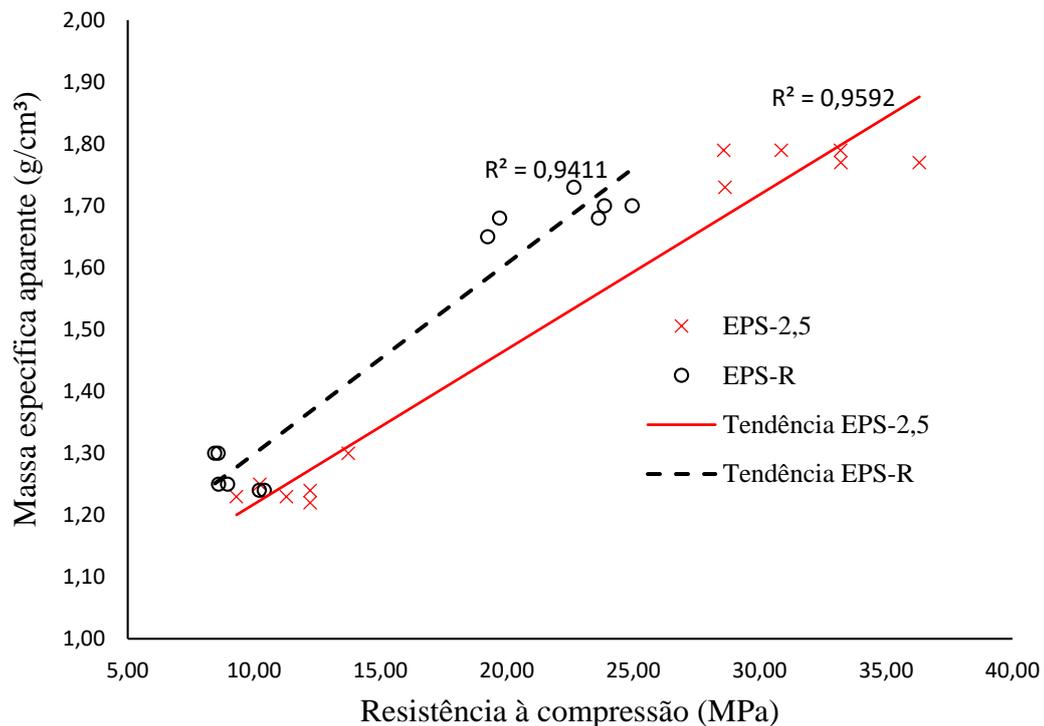


Figura 25 – Resistência à compressão versus massa específica aparente.

b) Influência dos fatores

Geometricamente, pode-se interpretar e visualizar o efeito do tipo e da quantidade de EPS na resistência à compressão num sistema cartesiano, como mostra a Figura 26, onde os eixos da abscissa e da ordenada são representados por cada um desses fatores e, cada uma das médias das respostas dos quatro ensaios, dispostas no vértice de um quadrado. Por essa Figura, observa-se que a transição da porcentagem de EPS é mais impactante nos resultados que a mudança do tipo de EPS.

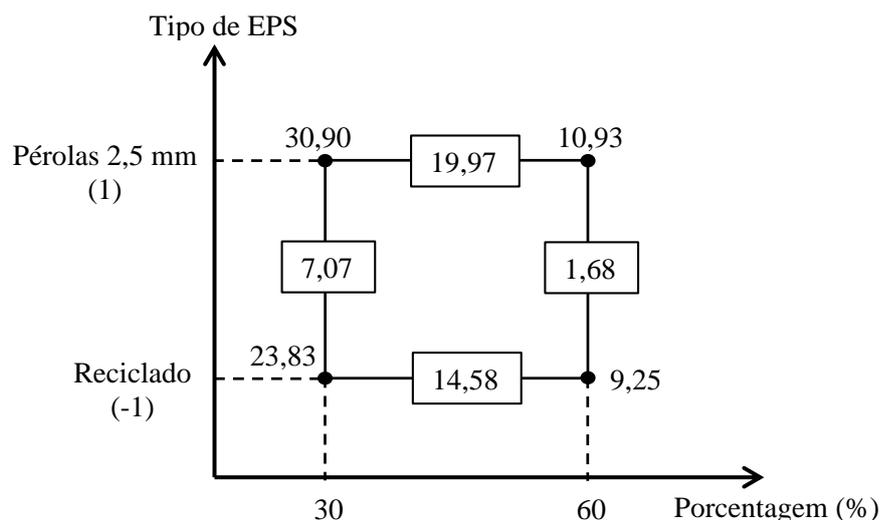


Figura 26 – Interpretação geométrica dos efeitos de cada fator. Respostas em MPa.

O efeito individual de cada fator está apresentado na Tabela 11, obtidos a partir do *software* Statistica 12. É importante atentar que o sinal negativo no efeito da porcentagem de EPS confirma que quanto maior a quantidade de EPS menor será a resistência à compressão do concreto leve. Como há diferença nas respostas tanto para porcentagem quanto para o tipo de EPS, pode-se afirmar que a interação desses dois fatores também influencia nos resultados, como apresenta a Tabela 11, com valor negativo de 2,69, representando a redução da resistência na maior porcentagem e com o EPS reciclado.

Tabela 11 – Efeitos de cada fator e interação

	Efeito	Lim. Inferior	Lim. Superior	Erro padrão (Sefeito)
Média global	18,728	17,701	19,755	0,4453
Efeito da % de EPS	-17,27	-19,327	-15,220	0,8906
Efeito do tipo de EPS	4,38	2,323	6,430	0,8906
Efeito da interação % e EPS	-2,69	-4,747	-0,640	0,8906

$t_8 \cdot S_{efeito} = 2,054$

Fonte: Statistica 12.

Com o erro padrão (S_{efeito}) e a distribuição de Student para 8 graus de liberdade, pode-se construir o intervalo de confiança para os valores dos efeitos. Portanto, todos os efeitos, em valores absolutos, que são superiores a 2,054 são estatisticamente significativos com 95% de confiança. De modo geral, pode-se observar, na Figura 26 e na Tabela 11, que o efeito da quantidade de EPS é o de maior influência nos resultados de resistência à compressão. O efeito

do tipo de EPS possui maior relevância nas menores quantidades de EPS, justificando o sinal positivo deste efeito.

A influência de cada fator e o seu efeito na resistência à compressão também pode ser verificada pela análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 12. Por esta tabela, o resultado do Teste F aponta, ao nível de 95% de confiança, que todos os efeitos são significativos e diferentes entre si, e confirma o fator porcentagem de EPS como o mais expressivo e impactante nos resultados investigados. Vale observar, pela Tabela 12, o valor do coeficiente de determinação (R^2) calculado pelo *software*, sendo bem próximo a 1, que reforça a significância dos resultados obtidos neste programa experimental.

Tabela 12 – Tabela ANOVA

Tratamentos	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Teste F	p-Valor
Porcentagem de EPS	895,1041	1	895,1041	376,1712	0,000000
Tipo de EPS	57,4656	1	57,4656	24,1502	0,001172
Interação Porcentagem x Tipo de EPS	21,7621	1	21,7621	9,1456	0,016455
Resíduos	19,0361	8	2,3795		
Total	993,3680	11			
$F_{0,05;1,8} = 5,32$ (tabelado)					
$R^2=0,980838$					

Fonte: Statistica 12.

Um gráfico de superfície de resposta pode ser gerado para o modelo desenvolvido considerando os fatores estudados. A partir desse gráfico, Figura 27, pode-se observar a linearidade do modelo em função da resistência à compressão, da porcentagem e do tipo de EPS. Por esse gráfico, faz-se também uma análise da relação entre a resistência à compressão e os fatores observados no concreto leve, no qual a declividade do gráfico se faz mais acentuada na direção da maior porcentagem de EPS do que no eixo que representando o tipo de EPS, confirmando, o impacto do fator de maior influência. As cores mais quentes correspondem as melhores combinações dos fatores para obter os maiores resultados.

Pelo gráfico da Figura 27, pode-se então, estimar a resistência à compressão de novos corpos de prova produzidos nas mesmas condições de dosagem e cura, para diferentes quantidades de EPS e para os dois tipos desse material, a partir de uma modelagem matemática linear que considera todos os efeitos significativos.

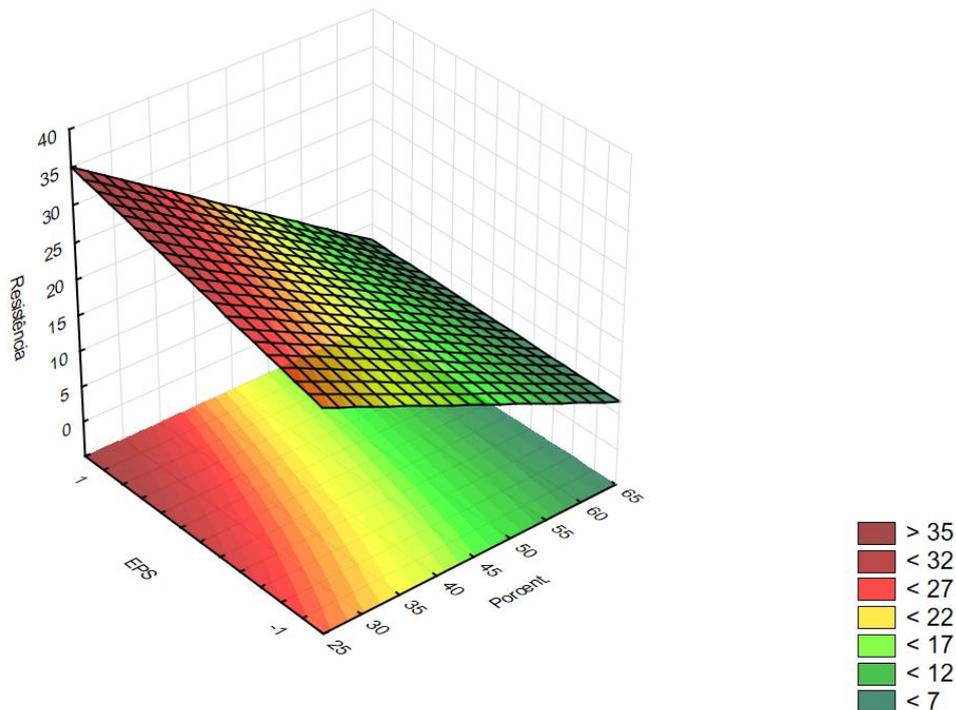


Figura 27 – Gráfico de superfície: resistência à compressão x tipo de EPS x porcentagem de EPS. Fonte: Statistica 12.

4.3. Dosagens de concreto leve com EPS reciclado

O estudo preliminar e comparativo entre as misturas utilizando EPS no formato de pérolas e EPS reciclado demonstrou que, embora o EPS em pérolas tenha apresentado melhores níveis de resistência, chegando a atingir valores estruturais, a utilização do EPS reciclado se mostrou bastante interessante do ponto de vista capaz de proporcionar um produto bastante leve e ainda com resistências ideais para diversas aplicações, até mesmo estruturais haja visto que a ABNT NBR 6118:2014 considera concreto estrutural aquela com resistência igual ou superior a 20 MPa aos 28 dias, sem levar em consideração a vantagem ambiental que esse material agrega, o que o torna uma alternativa sustentável de aplicação.

4.3.1. Trabalhabilidade das misturas

Os resultados estão apresentados na Tabela 13 e, a partir deles, percebe-se que com elevada adição de EPS-R o concreto leve perde fluidez, uma vez que o peso do concreto é reduzido e o volume de vazios aumentado.

Entre as misturas desenvolvidas, a M30 foi a que apresentou melhor trabalhabilidade, com boa consistência e coesão, como demonstra a Figura 28a. A mistura 1M60 apresentou uma trabalhabilidade bastante ineficiente ou quase inexistente devido ao seu alto teor de EPS e grandes quantidades de vazios (Figura 28c). Em situação intermediária, a trabalhabilidade da mistura M45 (Figura 28b) aproximou-se mais da mistura M30 do que da mistura 1M60, podendo observar uma queda brusca na trabalhabilidade na transição de 45% para 60% de EPS. Na tentativa de aumentar a trabalhabilidade da mistura 1M60 fez-se a mistura 2M60 (Figura 28d), nas mesmas condições da anterior, mas com fator água-cimento de 0,36. Vale ressaltar o incremento de superplastificante em cada mistura se deu também na tentativa de melhorar a trabalhabilidade. A grande dificuldade em melhorar a trabalhabilidade do concreto leve com EPS é evitar a segregação do material haja visto seu baixo peso.

Tabela 13 – Índice de consistência das misturas

Mistura	Quantidade de EPS	Consumo de cimento (kg/m ³)	Espalhamento (mm)		Média
M30	30%	700,04	216	216	216
M45	45%	550,03	202	206	204
1M60	60%	400,02	122	120	121
2M60	60%	377,38	145	147	146

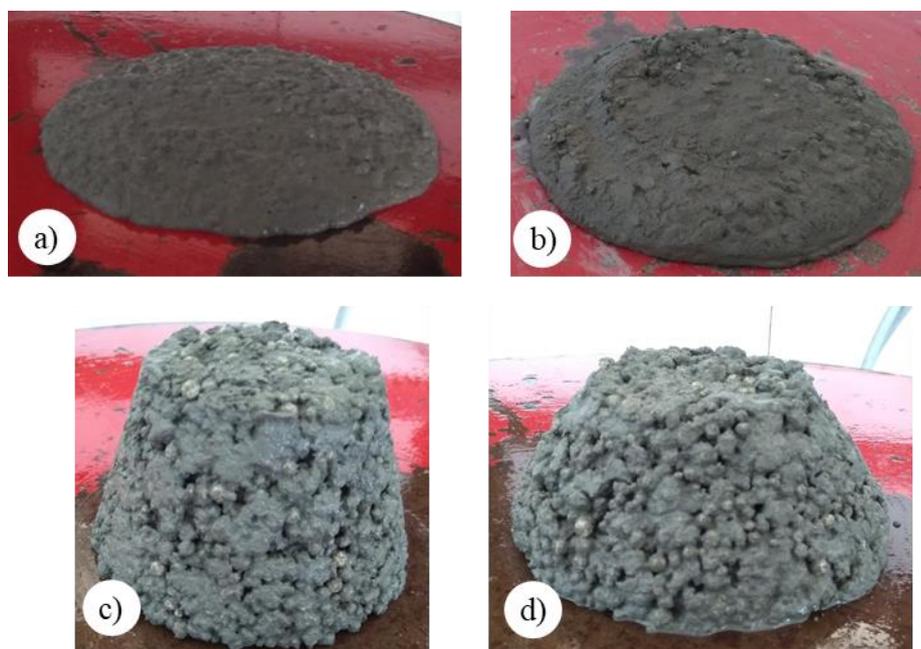


Figura 28 – Ensaio de espalhamento na mesa (flow table) das misturas a) M30, b) M45, c) 1M60, d) 2M60

4.3.2. Resistência à compressão e massa específica aparente

Na Tabela 14 são apresentados os resultados da resistência à compressão axial e da massa específica aparente dos corpos de prova confeccionados nas quatro misturas definidas (M30, M45, 1M60 e 2M60), na idade de 28 dias.

Pelos resultados dispostos na Tabela 14 juntamente com o gráfico apresentado na Figura 29, observa-se uma grande tendência de linearidade envolvendo esses dois parâmetros analisados (resistência e massa específica aparente). Com a determinação do ponto central, a partir dos resultados obtidos para a mistura M45, a linearidade da curva apresentada na Figura 25 pode ser melhor ajustada, confirmando tal relação entre essas variáveis.

Tabela 14 – Resistência à compressão aos 28 dias e massa específica aparente

Mistura	CP	Resistência à compressão (MPa)	Média	Coefficiente de variação	Massa específica aparente (g/cm ³)	Média	Coefficiente de variação
M30	1	23,63	25,10	8,09%	1,68	1,74	3,42%
	2	23,87			1,70		
	3	22,66			1,73		
	4	24,96			1,70		
	5	28,51			1,82		
	6	26,96			1,83		
M45	7	15,02	14,31	6,06%	1,48	1,47	0,85%
	8	13,09			1,47		
	9	14,82			1,45		
1M60	10	7,45	8,16	7,97%	1,30	1,26	2,49%
	11	8,58			1,30		
	12	8,96			1,25		
	13	8,60			1,25		
	14	8,24			1,22		
	15	7,15			1,23		
2M60	16	5,14	5,19	0,79%	1,25	1,21	2,56%
	17	5,24			1,18		
	18	5,19			1,19		

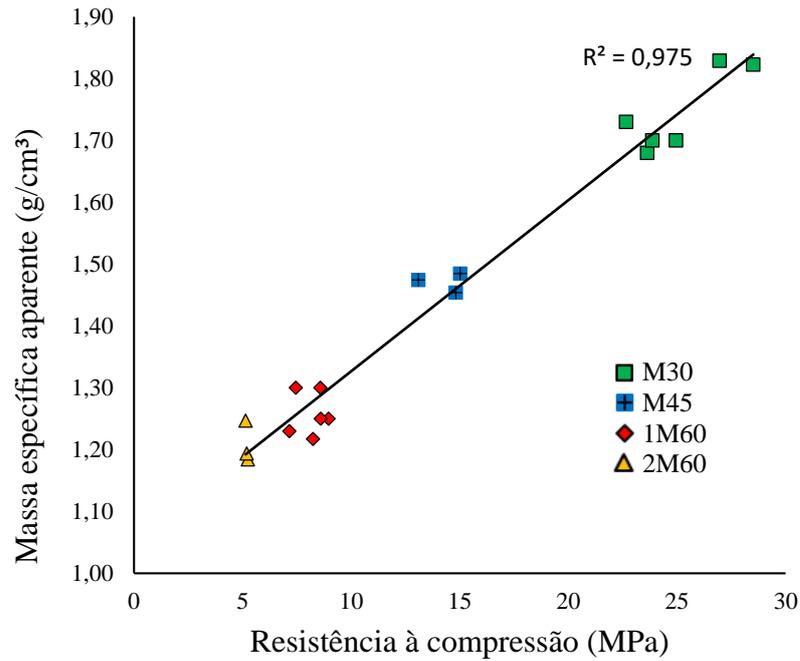


Figura 29 – Resistência à compressão por massa específica aparente

No geral, a análise feita no estudo preliminar para as misturas utilizando EPS-R pode ser mantida. Em relação à referência considerada, M30, a mistura M45 apresentou uma redução de 43% na resistência à compressão, já as misturas 1M60 e 2M60 tiveram redução de 67% e 79%, respectivamente. A redução da massa específica aparente ocorreu de maneira proporcional ao incremento de EPS na composição de cada mistura.

Outro fato que deve ser ressaltado é que o concreto leve com EPS reciclado, após a ruptura, permanece na forma de moldagem, sem lascamento ou desprendimento das partes, conforme apresentado na Figura 30a) e b).



Figura 30 – Concreto leve com EPS-R após ruptura. a) com volume de 30% de EPS. b) 60% de EPS.

4.3.3. Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados encontrados de resistência à tração por compressão diametral para cada mistura realizada estão apresentados na Tabela 15.

Avaliando os resultados obtidos, verifica-se que a resistência à tração por compressão diametral para as misturas M30 e M45 corresponde aproximadamente aos 10% da resistência à compressão axial como é conhecido no comportamento dos concretos convencionais. No entanto, para as misturas com 60% de EPS-R (1M60 e 2M60), a relação entre essas propriedades mecânicas foi superior, da ordem de 21% e 19%, respectivamente, como consequência do elevado volume de EPS que tornaram o concreto mais deformável e resistente à tração.

De modo geral, o efeito do incremento de EPS na resistência à tração se deu de forma semelhante aos efeitos observados na resistência à compressão, houve diminuição de resistência à medida em que há aumento no volume de EPS. A relação entre esses dois tipos de resistências avaliadas está apresentado no gráfico da Figura 31, onde observa-se que o aumento da resistência à tração é diretamente proporcional ao aumento da resistência à compressão..

Tabela 15 – Resistência à tração por compressão diametral

Mistura	CP	Resist. à compressão diametral (MPa)	Média	Coefficiente de variação	Resist. diametral por Resist. axial
M30	1	3,07	2,90	9,54%	11,55%
	2	2,51			
	3	3,12			
M45	4	1,32	1,52	10,25%	10,62%
	5	1,70			
	6	1,54			
1M60	7	1,71	1,76	6,83%	21,57%
	8	1,93			
	9	1,65			
2M60	10	0,90	0,99	8,49%	19,08%
	11	0,96			
	12	1,10			

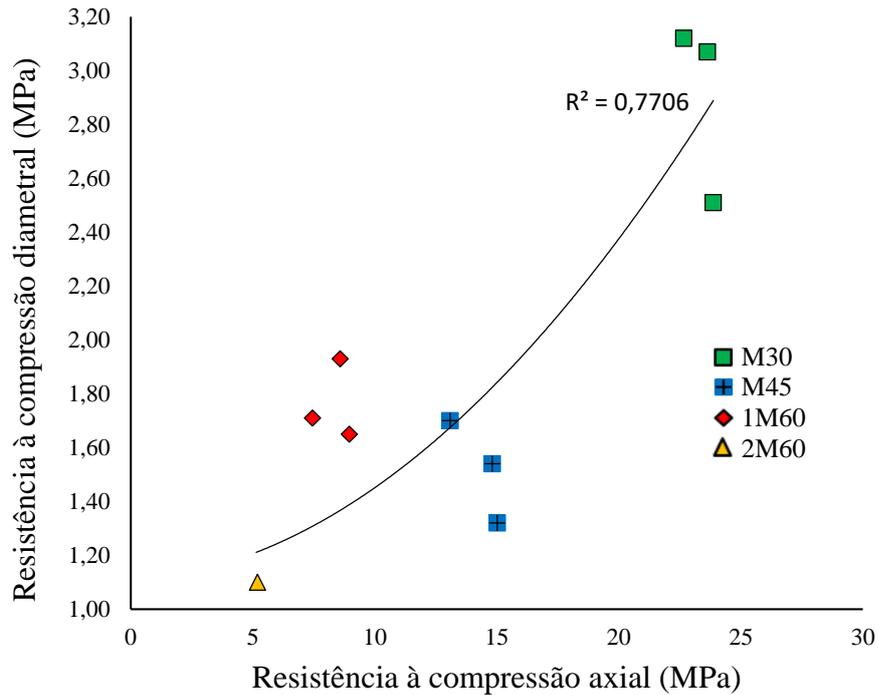


Figura 31 – Resistência à compressão diametral por resistência à compressão axial

Também foi observado que os corpos de prova dessa mistura apresentaram uma deformação bastante visível antes de sua ruptura, apresentada na Figura 32, onde as propriedades de deformabilidade do EPS estiveram mais presentes. Através dos ensaios, observou-se que nos concretos com maiores volumes de EPS não houveram separação das partes do corpo de prova após a ruptura no ensaio de compressão diametral, ao contrário do que ocorre nos concretos convencionais.



Figura 32 – Configuração do corpo de prova (1M60) após ensaio de resistência à tração por compressão diametral, à direita.

4.3.4. Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Os resultados obtidos para esses ensaios estão organizados na Tabela 16. A menor massa específica real obtida foi na mistura 1M60, representando $1,19 \text{ g/cm}^3$ que corresponde a aproximadamente 63% da massa específica da mistura de referência, em outras palavras, uma redução de $0,69 \text{ g/cm}^3$ da mistura de maior massa específica, a M30.

A partir da Tabela 16, observa-se que o incremento de EPS reciclado em cada uma das misturas proporcionou um aumento na absorção de água e no índice de vazios, mesmo o material possuindo características de baixo potencial de absorção de água outros fatores podem ter influenciado nessa propriedade como a alteração na trabalhabilidade do concreto leve (baixa quantidade de pasta cimentícia) e redução da aderência do EPS na matriz, produzindo vazios, causada por diminuição volumétrica do EPS durante a secagem em estufa, como relatou Babu *et al* (2004). Além disso, em concretos com alta quantidade de EPS, a distância entre os grãos é menor, logo, a espessura da matriz cimentícia que os envolvem é menor, como consequência, apresenta maiores volumes de vazios e absorção de água.

Tabela 16 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Mistura	CP*	Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Mas. Esp. Seca (g/cm^3)	Mas. Esp. Saturada (g/cm^3)	Mas. Esp. Real (g/cm^3)
M30	Média	1,34%	2,46%	1,83	1,86	1,88
	C. V. (%)	2,28%	2,30%	0,68%	0,67%	0,69%
M45	Média	1,85%	2,77%	1,49	1,52	1,54
	C. V. (%)	5,61%	5,10%	1,47%	1,43%	1,45%
1M60	Média	2,84%	3,27%	1,15	1,18	1,19
	C. V. (%)	8,76%	9,09%	1,01%	1,09%	1,15%
2M60	Média	2,76%	3,38%	1,22	1,26	1,27
	C. V. (%)	1,97%	2,25%	1,26%	1,26%	1,30%

**Valores médios obtidos a partir de três corpos de prova para cada mistura*

De acordo com a norma internacional CEB-192 (1998), *apud* Silva (2006), a qualidade dos concretos pode ser considerada em função da sua propriedade de absorção de água por imersão. Os concretos são considerados de baixa absorção e de boa qualidade quando apresentam absorção de água inferior a 3%; absorção de água entre 3% e 5% os concretos são considerados de média absorção e de média qualidade; acima de 5% o concreto é considerado como de alta absorção e de qualidade pobre.

Segundo Helene (1983), *apud* Levy (2001), os concretos ainda podem ser classificados, quanto a absorção de água, em duráveis, quando a absorção de água é inferior a 4,2%; normais, quando a absorção compreende entre 4,2% e 6,3%; e deficientes, quando a absorção é superior a 6,3%. Sobre o índice de vazios, o concreto é considerado durável para valores abaixo de 10%; normal, com porosidade entre 10% e 15%; e deficiente quando a porosidade é superior a 15%.

Desse modo, nas condições realizadas, e observando a média dos resultados, os concretos leves desenvolvidos em todas as misturas podem ser classificados como de baixa absorção, boa qualidade e duráveis.

Vale ressaltar que a temperatura máxima suportada pelo EPS sem prejudicar suas propriedades é aproximadamente de 85 °C (OZÓRIO, 2016). Portanto, submeter esse material nas condições normais de temperatura de secagem como estabelece a norma, afetaria as características do EPS e aumento significativo nos poros permeáveis, principalmente no fundo e no topo dos corpos de prova de concreto leve, como foi observado em alguns testes avulsos.

4.3.5. Absorção de água por capilaridade

Os resultados individuais de cada corpo de prova estão organizados nas Tabela 17 e Tabela 18. Na Tabela 17 são apresentados os valores das massas saturadas de cada corpo de prova medido em um específico intervalo de tempo. A partir desses valores, a absorção de água por capilaridade pode ser calculada, dispostas na Tabela 18.

Tabela 17 – Massas saturadas medidas em cada intervalo de tempo

Mistura	CP*	Massa seca (g)	Massa saturada (g)				
			3h	6h	24h	48h	72h
M30	Média	351,28	351,49	351,54	351,86	351,89	351,95
	C. V. (%)	2,07	2,07	2,07	2,06	2,06	2,06
M45	Média	302,11	302,36	302,41	302,74	302,77	302,83
	C. V. (%)	3,66	3,65	3,65	3,65	3,65	3,63
1M60	Média	241,54	241,84	241,93	242,42	242,53	242,59
	C. V. (%)	4,15	4,13	4,14	4,14	4,14	4,14
2M60	Média	242,23	242,59	242,63	243,12	243,22	243,26
	C. V. (%)	1,48	1,47	1,47	1,47	1,46	1,46

**Valores médios obtidos a partir de três corpos de prova para cada mistura*

Ao analisar a Tabela 18, pode-se observar que as misturas 1M60 e 2M60 apresentaram maiores índices de absorção de água por capilaridade, no entanto, a 2M60, com fator água cimento de 0,36, apresentou valor ligeiramente maior, próximo de 0,06 g/cm², após 72h de imersão.

Mesmo a absorção de água por imersão total da mistura M45 ser superior à mistura M30 (item 4.3.4) ambas apresentaram valores de absorção de água por capilaridade bem próximos, como pode ser observado na Tabela 18. Isso pode ser justificado pelo bom acabamento no fundo e na lateral dos corpos de prova que essas misturas proporcionaram além de suas semelhanças em termos de trabalhabilidade. Na transição da quantidade de EPS das misturas M45 para a 1M60 observa-se um salto maior na absorção do que quando comparado à transição de M30 para M45.

Tabela 18 – Absorção de água por capilaridade e altura de água

Mistura	CP*	Altura de água (cm)	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)				
			3h	6h	24h	48h	72h
M30	Média	1,33	0,01053	0,01325	0,02921	0,03074	0,03396
	C. V. (%)	9,35	2,28	8,31	7,17	7,93	7,38
M45	Média	2,40	0,01257	0,01511	0,03175	0,03362	0,03634
	C. V. (%)	3,40	5,66	5,76	1,46	2,07	6,99
1M60	Média	3,20	0,01715	0,01885	0,04228	0,05043	0,05468
	C. V. (%)	4,56	9,80	3,82	4,92	1,65	3,07
2M60	Média	3,23	0,01868	0,02089	0,04755	0,05366	0,05519
	C. V. (%)	6,42	4,64	7,18	3,94	5,04	4,61

**Valores médios obtidos a partir de três corpos de prova para cada mistura*

Na Figura 33 estão ilustradas as curvas de absorção de água por capilaridade em função do tempo de imersão dos corpos de prova. A partir dessa Figura, é possível, de modo geral, verificar dois estágios de absorção de água de acordo com a inclinação de cada uma dessas curvas. Para todas as misturas, observou-se que, no primeiro estágio, identificado nas horas iniciais de imersão, a taxa de absorção de água por capilaridade foi maior, a curva possui inclinação mais acentuada. No segundo estágio, a taxa de absorção foi menor em relação ao primeiro, assim como a inclinação da curva. Desse modo, observa-se que todas as misturas apresentaram maior absorção de água nas horas iniciais pela saturação dos poros maiores (estágio 1) seguido da saturação dos poros menores (estágio 2) que ocorre de maneira mais lenta.

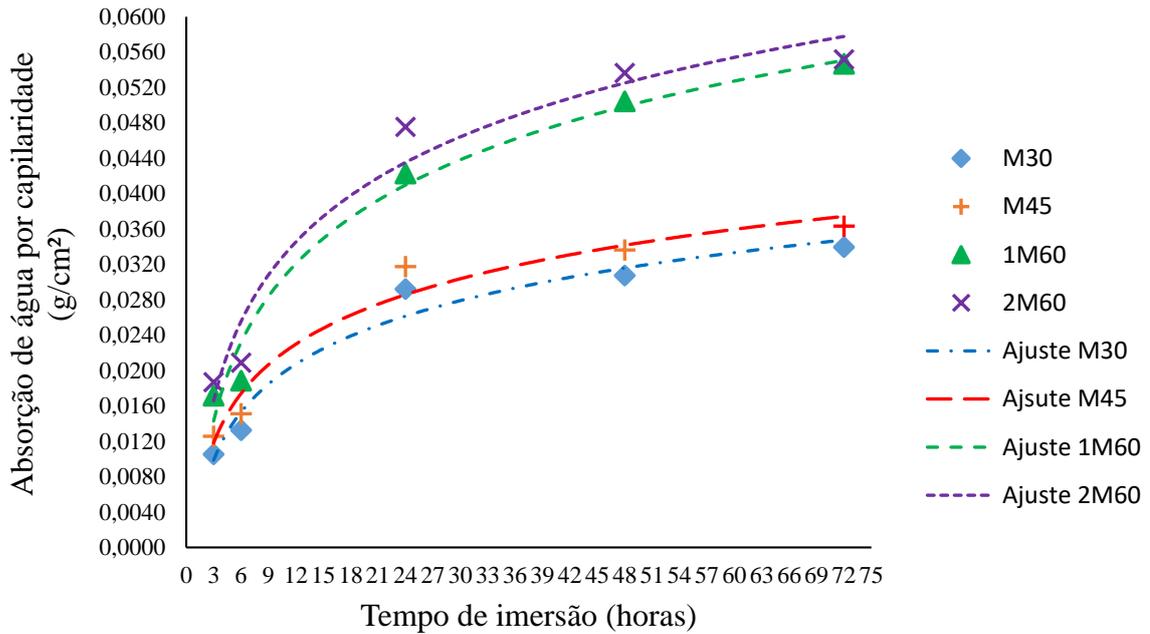


Figura 33 – Absorção de água por capilaridade com curva de ajuste

A Figura 34 apresenta o comportamento da absorção de água por capilaridade por tempo de imersão para cada mistura analisada. Vale salientar que em todas as misturas, quanto maior foi o tempo de imersão, maior foi a absorção de água do concreto leve.

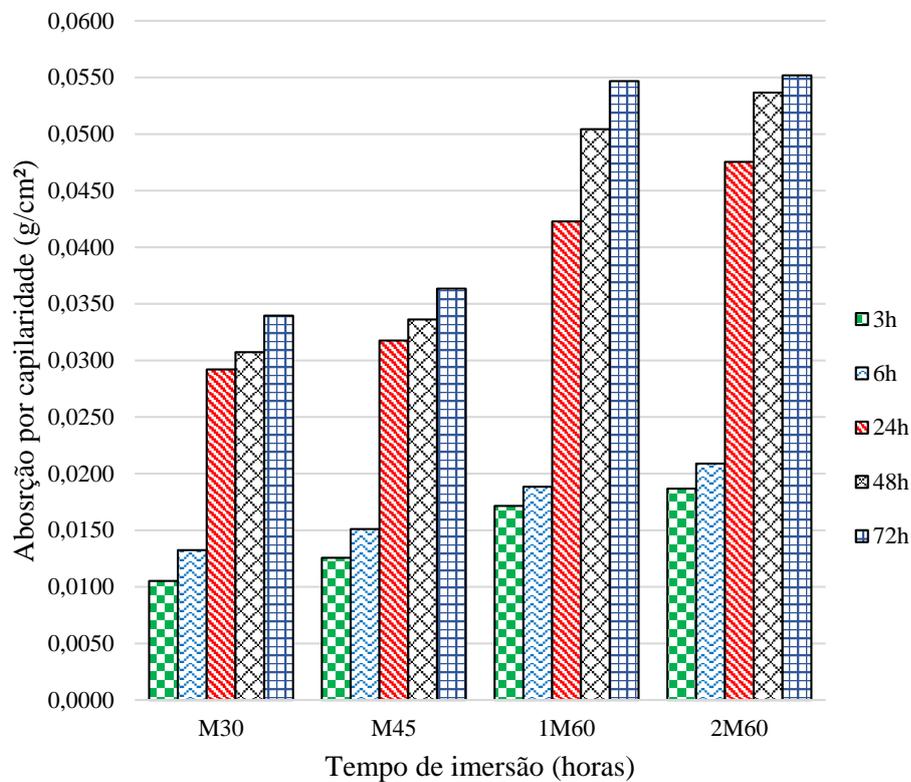


Figura 34 – Absorção de água por capilaridade pelo tempo de imersão

De acordo com Helene (1993), em princípio, quanto maior os diâmetros dos poros capilares maior será a absorção de água, porém menor profundidade de penetração. Na prática, essa relação depende, além do tamanho, da proximidade dos poros entre si, algo difícil de ser mensurado. No caso das misturas desenvolvidas, é possível considerar que o tamanho médio dos poros seja o mesmo, uma vez que a proporção de cimento, areia e fator água-cimento é mantida, além de ser utilizado o mesmo tipo de EPS. Desse modo, observa-se que o aumento no volume de EPS proporcionou aumento na quantidade dos poros permeáveis resultando no aumento da profundidade de percolação da água, anotadas na Tabela 18. A partir desses valores, observa-se que os maiores valores de absorção de água proporcionaram os maiores valores de percolação.

O perfil de percolação da água das misturas M30, M45, 1M60 e 2M60 estão apresentados, respectivamente, nas Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38.



Figura 35 – Perfil de percolação da água mistura M30



Figura 36 – Perfil de percolação da água mistura M45

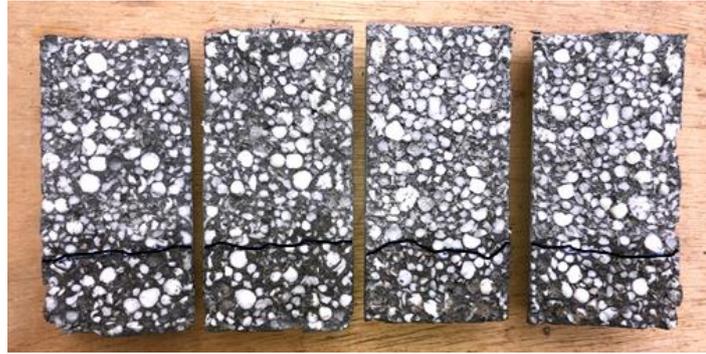


Figura 37 – Perfil de percolação da água mistura 1M60



Figura 38 – Perfil de percolação da água mistura 2M60

CAPÍTULO 5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do EPS em elementos de concreto reduz o peso próprio das construções e o consumo dos materiais aglomerantes e agregados, como o cimento e a areia. Com os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados para as diferentes misturas envolvendo concreto leve com EPS pode-se, como um dos objetivos específicos, comparar os efeitos na resistência à compressão e na massa específica causados pela adição do EPS em formato de pérolas, o qual já é bastante utilizado em diversas pesquisas e aplicações, e do EPS reciclado, na composição do concreto leve. Na sequência, para atender ao objetivo geral desta pesquisa juntamente com outros objetivos específicos, concentrou-se em um estudo direcionado de dosagem de concreto leve com EPS reciclado, realizando ensaios de caracterização física e mecânica.

5.1. Conclusões finais do trabalho

Com base nos resultados obtidos no programa experimental e nas análises realizadas, o concreto leve com EPS reciclado apresentou características similares ao concreto leve com EPS em pérolas, que é mais utilizado em diversas aplicações.

Algumas características são importantes no que se diz respeito ao estudo de concreto leve com adição de poliestireno expandido. Como verificado, destacam-se o efeito da granulometria do EPS que, para concretos com mesma massa específica, maiores diâmetros produziram concretos leves com menores resistências à compressão; a relação inversa entre o teor de EPS e a massa específica juntamente com a resistência à compressão; e a

trabalhabilidade que pode se tornar inexistente ou bastante deficiente à medida em que elevados volumes de EPS são introduzidos nas misturas.

Foi possível obter dosagens que tornam o concreto leve com EPS reciclado adequado para aplicações estruturais, tornando seu uso promissor, pois contempla diversas condições para ser utilizado em vários tipos de construções. Além dos parâmetros analisados nesta pesquisa, vale ressaltar no potencial energético que esse material pode promover às construções, como o conforto térmico, investigado por diversos autores. Dessa forma, o concreto leve com EPS reciclado também pode ser aplicado em elementos não estruturais, como paredes de vedação, com a finalidade de redução do peso dos elementos construtivos atrelado aos benefícios energéticos provenientes desse material.

Como o concreto leve com EPS é considerado um material inovador, é importante salientar que ainda não existe uma norma específica consolidada que norteie ensaios, valores mínimos e condições de aplicabilidade para fins estruturais, devendo-se então realizar adequações às normas existentes para concretos convencionais e concretos leves em geral mediante a comparações de resultados e análises, como fora realizado nesta pesquisa.

Dessa forma, conclui-se que o objetivo geral de analisar o comportamento físico e mecânico do concreto leve com EPS reciclado e os objetivos específicos foram atingidos. Por fim, além dos benefícios ambientais de sustentabilidade e destinação do EPS, está evidenciado o elevado potencial de aplicação deste material, com a possibilidade de redução da massa específica do concreto convencional em até 50%, apresenta características físicas e mecânicas que o torna compatível com a produção e aplicação em elementos estruturais, como lajes maciças e pré-moldadas ou outros elementos submetidos a moderadas tensões de compressão, e em elementos não estruturais, como as paredes divisórias em painéis sanduíche.

É conveniente que em um futuro próximo mais elementos da engenharia civil sejam desenvolvidos a partir do concreto leve com poliestireno expandido, pois a leveza proporcionada por esse material pode se tornar um atrativo econômico fundamental para sua utilização, mesmo embora seu custo de produção possa ser mais elevado uma vez que necessite de cuidados operacionais mais precisos.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como a pesquisa é voltada para a utilização de um material de cunho inovador, muitos parâmetros ainda devem ser avaliados, sugeridos para orientação de trabalhos futuros. São eles:

- a) Caracterização do concreto leve com EPS reciclado com adição de material pozolânico (como metacaulim, sílica ativa, entre outros), para avaliação física e mecânica;
- b) Produção de concreto leve com EPS reciclado com alto nível de trabalhabilidade (autoadensável);
- c) Análise da durabilidade do concreto leve com EPS reciclado, como carbonatação, penetração de íons cloreto e envelhecimento;
- d) Estudo da ancoragem da armadura com o concreto leve com EPS reciclado;
- e) Estudar o comportamento do concreto leve com EPS reciclado submetido às cargas dinâmicas;
- f) Elaboração de modelos para aplicação do material em compósitos com fibras vegetais;

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 213R-03: Guide for structural lightweight aggregate concrete**, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C330: Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete**. Philadelphia, 2009.

AMIANTI, M. **Uso e aplicação do poliestireno expandido (EPS) reciclado para impermeabilização por impregnação de superfície de concreto pré-fabricado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Minas Gerais. Ouro Preto, 2005.

ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural – Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira nº 200**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 11752: Materiais celulares de poliestireno para isolamento térmico na construção civil e refrigeração industrial – Especificação**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

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

_____. **NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200).** Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupo de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 9775: Agregado Miúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 7809: Agregado Graúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 2012

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

_____. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9935: Agregados – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO – ABRAPEX. Manual de utilização do EPS na construção civil. Editora Pini. São Paulo, 2006.

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

BABU, G. K.; BABU, D. S. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 755-762, 2003.

BABU, G. K.; BABU, D. S. Performace of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, p. 605-611, 2004.

BABU, G. K.; BABU, S. D. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, p. 520-527, 2006.

CARBONARI, G.; CAVALARO, S. H. P.; CANSARIO, M. M.; AGUADO, A. Flexural behaviour of light-weight sandwich panels composed by concrete and EPS. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 792-799, 2012.

CATOIA, T. **Concreto Ultraleve® estrutural com pérolas de EPS: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo (EESC-USP). 31pp. 2012.

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

CRUZ, T. T. **Uso da avaliação do ciclo de vida para a determinação da redução de emissões de gases do efeito estufa e do consumo de energia associados à reciclagem do EPS**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2015.

CUI, C.; HUANG, Q.; LI, D.; QUAN, C.; LI, H. Stress–strain relationship in axial compression for EPS concrete. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 377–383, 2016.

DEMIRBOGA, R.; KAN, A. Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, vol. 35, p.730-734, 2012.

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.

GARLET, G. **Aproveitamento de resíduos de E.V.A (Ethylene Vinyl Acetate) como agregado para concreto leve na construção civil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

GONÇALVES, P. J. S. **Emprego de EPS reciclado em blocos vazados de concreto para otimização do conforto térmico das edificações**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2018.

HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

KAN, A.; DEMIRBOGA, R. A novel material for lightweight concrete production. *Cement & Concrete Composite*, vol 31, p. 489-495, 2009.

KAN, A.; DEMIRBOGA, R.. Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, vol. 35, p.730-734, 2012.

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

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

LIMA, I. G. C. A. **Um estudo sobre produção do concreto leve estrutural**. Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, 2010.

LIU, N.; CHEN, B. Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 227-232, 2014.

MANDLIK, A.; SOOD, T. S.; KARADE, S. K.; NAIK, S.; KULKARNI, A. Lightweight concrete using EPS. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, v. 4, n. 3, p. 2007-2010, 2015.

MAS, V. F.; ALCOCEL, E.G. Physical and mechanical characterization of Portland cement mortars made with expanded polystyrene particles addition (EPS). **Materiales de construcción**, v. 62, p. 308, 547-566, 2012.

MAY, F. P. **Como e por que reciclar o EPS – a experiência da Santa Luzia**. 2º Workshop de EPS – Sustentabilidade e Tendências. São Paulo, 2016.

Disponível em: <http://www.epsbrasil.eco.br/files/4-2-Workshop-de-EPS-Sustentabilidade-e-Tendencias-Santa-Luzia.pdf>

Acesso em: 09 jul. 2019.

MENDES, A. S.; TUTIKIAN, B. F.; XAVIER, B. C.; SANTOS, D. A.; D'OLIVEIRA, M. C. E.; SARAGOZO, E. S. A. Desenvolvimento de concretos leves para o Concrebol. **CONCRETO & Construções**, p. 84-90, 2017.

MILED, K.; SAB, K.; LE ROY, R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling. **Mechanic of Materials**, v. 39, p. 222-240, 2007.

MO, K. H.; LING, T. C.; ALENGARAM, U. J.; YAP, S. P.; YUEN, C. W. Overview of supplementary cementitious materials usage in lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 403-418, 2017.

MOMTAZI, A. S.; LANGRUDI, M. A. M.; HAGGI, A. K.; ATIGH, H. R. Durability of Lightweight Concrete Containing EPS In Salty Exposure Conditions. **Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies**, 2010.

MORAVIA, W. G. **Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade de concreto leve produzido com argila expandida**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

MORGADO, M. **Fomentado a reciclagem do EPS através de ação legislativa**. 2º Workshop de EPS – Sustentabilidade e Tendências. São Paulo, 2016.

Disponível em: <http://www.epsbrasil.eco.br/files/2-2-Workshop-de-EPS-Sustentabilidade-e-Tendencias-Marcelo-Morgado.pdf>

Acesso em: 09 jul. 2019.

MULLA, A.; SHELAKE, A. Lightweight Expanded Polystyrene Beads Concrete. **International Journal of Research in Advent Technology**, Special Issue, p. 17-21, 2016.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 5 ed. Pearson. 2011.

NORMA MERCOSUL. **NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NM 30: Agregado Miúdo – Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NM 35: Agregados leves para concreto estrutural – Especificação (1995)**. Errata 1. Rio de Janeiro, 2008.

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

_____. **NM 49: Agregado Miúdo – Determinação de impurezas orgânicas**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

OLIVEIRA, L. S. **Reaproveitamento de resíduos de poliestireno expandido (isopor) em compósitos cimentícios**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São João Del-Rei. São João Del-Rei, 2013.

OZÓRIO, B. P. M. **Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecânicas**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo (EESC-USP). 29pp. 2016.

PLASTIVIDA. Instituto Sócio Ambiental dos Plásticos. **Monitoramento dos índices de reciclagem mecânica de plástico no Brasil**. 2012.

Disponível em: http://www.plastivida.org.br/images/temas/Apresentacao_IRMP2011.pdf

Acesso em: 08 de jul. 2019.

RIBEIRO, J. **Paredes de fechamento em concreto leve**. Depositante: Jairo Ribeiro. MU 8102023-6. Depósito: 04 mai. 2001. Publicação: 11 fev. 2003.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. Editora Pini. São Paulo, 2009.

SADRMOMTAZI, A.; SOBHANI, J.; MIRGOZAR, M. A.; NAJIMI, N. Properties of multi-strength grade EPS concrete containing silica fume and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 211–219, 2012.

SANT'HELENA, M. **Estudo para aplicação de poliestireno expandido (EPS) em concretos e argamassas**. Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2009.

SANTOS, R. D. **Estudo térmico e de materiais de um compósito a base de gesso e EPS para a construção de casas populares**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

SARKIS, C. E. **Reciclagem do poliestireno expandido (EPS) para o uso na fabricação de perfilados de poliestireno (PS)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

SARTORTI, A. L. **Comportamento dinâmico de lajes maciças de concreto leve com pérolas de EPS**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo (EESC-USP). 27pp. 2015.

SARTORTI, A. L.; PINHEIRO, L. M.; DA SILVA, R. M.; FREITAS, S. B.; CESAR, T. G. Aderência de barras de aço e concreto leve com pérolas de EPS. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 1, p. 122-159, 2017.

SAYADI, A. A.; TAPIA, J. V.; NEITZERT, T. R.; CLIFTON, G. C. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 716–224, 2016.

SCHACKOW, A.; EFFTING, C.; FOLGUERAS, M. V.; GÜTHS, S.; MENDES, G. A. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agente. **Construction and Building Materials**, v. 57, p. 190-197, 2014.

SILVA, F. G. Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

SIQUEIRA, T. E. **Análise de desempenho e custos de sistema de vedação com EPS**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

STOCCO, W.; RODRIGUES, D.; CASTRO, A. P. A. S. Concreto leve com uso de EPS. **Congresso Brasileiro de Engenharia – COBENGE**, 2009.

TAMUT, T. et al. Partial replacement of coarse aggregates by expanded polystyrene beads in concrete. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, vol. 3, n. 2, p.238-241, 2014.

TANG, W. C.; LO, Y.; NADEEM, A. Mechanical and drying shrinkage properties of structural graded polystyrene aggregate concrete. **Cement & Concrete Composities**, v. 30, p. 403-409, 2008.

TERMOTÉCNICA. **Reciclagem do EPS em países com dimensões continentais**. 2012. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/1241292/>
Acesso em: 09 jul. 2019.

TRUSSONI, M.; HAYS, C. D.; ZOLLO, R. F. Comparing lightweight polystyrene concrete using engineered or waste materials. **American Concrete Institute Materials Journal**, vol. 109, n. 1, p.101-107. 2012.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos autoadensáveis**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

XU, Y.; JIANG, L.; XU, J.; LI, Y. Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. **Construction and Building Materials**, vol. 27, p. 32-38, 2012.

ZHANG, M. H.; GJORV, O. E. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. **ACI Materials Journal**, vol. 88, p. 240-247, 1991.