



Uso do poliestireno expandido como agregado em concreto leve: conceituação, aplicações e estado da arte

Use of expanded polystyrene as aggregate in lightweight concrete: conceptualization, applications and survey of the state of the art

Uso del poliestireno expandido como agregado en hormigón ligero: conceptualización, aplicaciones y estado del arte

Antônio Marcos da Silva Oliveira

Graduado em Engenharia Civil pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) *Campus* Curvelo/MG – Brasil. E-mail: ant.marcos.cvo@hotmail.com.

Lourdiane Gontijo das Mercês Gonzaga

Doutora em Engenharia de Estruturas pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professora do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) *Campus* Curvelo/MG – Brasil. E-mail: lourdiane@cefetmg.br.

Diêgo Fernandes Ribeiro

Graduação em Engenharia Civil pelas Faculdades Unidas do Norte de Minas e Especialização em Docência do Ensino Superior pela Faculdade Cidade de Guanhães. Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) *Campus* Curvelo/MG – Brasil. E-mail: diegofernandes008@hotmail.com.

Resumo

O concreto é um dos materiais mais consumidos no mundo. Entretanto, o uso de agregados convencionais adicionados à mistura está relacionado a uma série de impactos ambientais decorrentes da extração da matéria-prima. A utilização do poliestireno expandido (EPS) nas dosagens de concreto constitui-se como uma forma eficaz de garantir maior leveza à mistura, uma vez que possibilita a economia de agregado convencional. Embora seja um material compósito relativamente novo, o concreto leve com poliestireno expandido tem sido objeto de estudo em diversas universidades ao redor do mundo, principalmente em virtude de sua baixa massa específica e capacidade de isolamento térmico.

Palavras-chave: Compósito cimentício. Concreto leve. Poliestireno expandido.

Abstract

Concrete is one of the most consumed materials in the world. However, the use of conventional aggregates added to the mixture is related to a series of environmental impacts resulting from the extraction of the raw material. The use of expanded polystyrene (EPS) in the concrete dosages constitutes an effective way of guaranteeing greater lightness to the mixture, since it allows the economy of conventional aggregate. Although it is a relatively new composite material, lightweight concrete with expanded polystyrene has been studied in several universities around the world, mainly due to its low specific mass and thermal insulation capacity.

Keywords: Cement composite. Lightweight Concrete. Expanded polystyrene.

Resumen

El hormigón es uno de los materiales más consumidos en el mundo. Sin embargo, el uso de agregados convencionales añadidos a la mezcla está relacionado con una serie de impactos ambientales derivados de la extracción de la materia prima. La utilización del poliestireno expandido (EPS) en las dosificaciones de hormigón se constituye como una forma eficaz de garantizar mayor ligereza a la mezcla, ya que posibilita la economía de agregado convencional. Aunque es un material compuesto relativamente nuevo, el concreto ligero con poliestireno expandido ha sido objeto de estudio en diversas universidades alrededor del mundo, principalmente en virtud de su baja masa específica y capacidad de aislamiento térmico.

Palabras clave: Compuesto de cemento. Hormigón ligero. Poliestireno expandido.

1 Introdução

O concreto de cimento Portland é o segundo material mais consumido no mundo depois da água. Segundo projeções de alguns estudiosos, o material poderá ocupar o primeiro lugar a partir de 2025, superando a geração de água potável (SANTOS, 2013). Conforme destaca Rossignolo (2009), em meio aos diversos materiais de construção, o concreto é o mais utilizado. Sua importância está relacionada ao fato de ser um material compósito, versátil e moldável, diretamente relacionado à expansão da sociedade moderna, principalmente no que diz respeito à construção de moradias, espaços públicos e obras de grande porte, incluindo arranha-céus, pontes e barragens.

Dentre os diversos tipos de concreto conhecidos, o concreto leve tem se destacado justamente pela sua massa específica inferior àquela apresentada pela mistura convencional, além da sua capacidade de isolamento térmico. Rossignolo (2009) informa que nas últimas quatro décadas este tipo especial de concreto passou por uma revolução tecnológica. Hoje, as pesquisas em torno do material continuam bastante promissoras, com destaque para novos campos de investigação.

Segundo Ambrozewicz (2012), a densidade do concreto leve varia de 400 kg/m^3 a 1.800 kg/m^3 . Sua reduzida massa específica é de grande importância do ponto de vista estrutural, uma vez que possibilita a fabricação de elementos construtivos de maior leveza e a conseqüente redução dos esforços atuantes sobre as estruturas e fundações. A diminuição do custo final do projeto, principalmente em função da economia com o transporte de peças pré-moldadas, também pode ser vista como uma das vantagens oriundas da utilização desta recente tecnologia, conforme destaca o Guia para Concreto com Agregado Leve Estrutural do *American Concrete Institute* (ACI 213R-03, 2003).

Tendo em vista a enorme gama de materiais poliméricos já descobertos e produzidos em larga escala pela indústria química, o poliestireno expandido, um plástico celular rígido resultante da polimerização do estireno em água (ABRAPEX, 2017b), chama a atenção pela sua participação no mercado da construção civil. A terminologia EPS, bastante usual na literatura, refere-se à abreviação do nome do polímero em inglês -*expanded polystyrene*; embora seja mais comum entre a população a utilização da palavra Isopor®, marca registrada da empresa Knauf, para se referir a este material. Este caso, em especial, refere-se ao uso metonímico da palavra (a marca pelo produto).

O uso do poliestireno expandido como agregado leve em concreto pode ser feito por meio da utilização de pérolas industrializadas ou através do reaproveitamento de material descartado, o qual é previamente moído ou triturado antes de ser adicionado ao compósito cimentício. Conforme descrevem Miled, Sab e Le Roy (2007) e Trussoni, Hays e Zollo (2012), as propriedades mecânicas do material dependerão de uma série de fatores, incluindo o tipo de EPS utilizado, diâmetro e regularidade da superfície de suas partículas.

O estudo do concreto com adição de EPS teve um avanço proeminente a partir da década de 90, principalmente com o trabalho de Sri Ravindrarajah e Tuck (1994), quando os autores investigaram a interferência do tamanho das pérolas sobre as propriedades mecânicas do material. Mais tarde, durante os anos 2000, foi observado um considerável avanço das pesquisas do concreto leve com adições especiais, como sílica ativa (GANESH BABU; SARADHI BABU, 2003), fibras de aço (CHEN; LIU, 2004) e cinza volante (SARADHI BABU; GANESH BABU; WEE, 2005).

Dentre os estudos brasileiros de maior relevância, faz-se a menção a dois importantes trabalhos desenvolvidos por pesquisadores da Escola de Engenharia de São Carlos durante os anos 2012 e 2016. O primeiro, desenvolvido por Catoia (2012), investiga diferentes misturas com alta resistência à compressão; o segundo, elaborado por Ozório (2016), apresenta uma análise das propriedades do material quando colocado em estufa sob diferentes temperaturas.

O estudo dos materiais compósitos cimentícios com adições de EPS ainda carece de muitas informações significativas com relação à sua exposição à radiação solar ou condições de incêndio, bem como sua utilização em ambientes agressivos, ricos em cloretos e/ou sulfatos. O estudo dos processos de impermeabilização desse concreto, tendo em vista a composição química dos produtos impermeabilizantes que podem ocasionar a degradação química do EPS, é um aspecto que merece a devida atenção, assim como a análise do comportamento do material em contato com o solo. Salienta-se ainda a vital relevância para a comunidade científica das pesquisas de viabilidade econômica de aplicação do material em pequenas, médias e grandes obras da construção civil.

2 Composição e Características do Poliestireno Expandido

No mecanismo de pesquisa *Google*, a busca pela palavra “poliestireno” sucedida pelo termo “expandido” apresenta aproximadamente 2.720.000 resultados. Ao se utilizar o nome em inglês, isto é, “*expanded polystyrene*”, o mecanismo de busca oferece cerca de 7.080.000 resultados. Isso demonstra a grande popularidade deste produto plástico, permitindo afirmar que é um material amplamente difundido, tendo uma vasta gama de aplicações nos mais diversos setores da sociedade, desde o setor alimentício e farmacêutico, como embalagens para alimentos e remédios, até o setor de eletrodomésticos e equipamentos, como material para proteção e amortecimento de impactos. Conforme destaca a ABRAPEX (2017b), devido à elevada capacidade de isolamento térmico, o EPS tem uma ampla aplicabilidade em artigos de consumo, incluindo caixas térmicas, porta-garrafas, baldes para gelo e até mesmo pranchas esportivas. Cita-se ainda a aplicação do EPS no setor da agricultura, como bandejas para mudas e material de aeração do solo, sendo este incorporado às argilas (ABIQUIM, 2017).

Segundo informa a Associação Brasileira do Poliestireno Expandido (ABRAPEX, 2017b), o EPS foi descoberto em 1949 nos laboratórios da Basf, na Alemanha, por dois químicos: Fritz Stastny e Karl Buchholz. Tal composto é na realidade um polímero em que o monômero (a pequena molécula a partir da qual se forma a gigantesca cadeia polimérica) é o estireno ou fenileno, um hidrocarboneto aromático insaturado.

A norma DIN EN ISO 1043-1 (*Plastics – Symbols and abbreviated terms*) preconiza que seja utilizada a sigla *PS* para representar o “poliestireno” (do inglês, *polystyrene*). Antes do termo básico do polímero, deve-se utilizar o símbolo que possa indicar características especiais do plástico. No caso em estudo, a letra *E* representa a palavra “expandido” (do inglês, *expanded*). Assim sendo, a abreviação do poliestireno expandido, conforme prescreve a norma internacional, é adequadamente feita por meio da simbologia *EPS*.

De acordo com Callister e Rethwisch (2012), o poliestireno (PS) encontra-se entre alguns dos exemplos mais comuns de termoplásticos. Quanto às suas características químicas, pode-se afirmar que corresponde a um homopolímero bifuncional, resultado de uma síntese de adição. Segundo Tessari (2006), a produção deste plástico depende do monômero estireno, havendo no mercado mundial dois processos fundamentais de fabricação: por meio do etil-benzeno ou do óxido de propeno. A primeira forma é a mais comum, sendo utilizada por 80% dos fabricantes.

O EPS pode ser definido como uma espuma criada a partir do poliestireno, com uma porcentagem relativamente alta de bolhas de gás aprisionadas. Segundo a ABRAPEX (2017b), em 1,0 m³ de EPS pode haver até seis bilhões de células fechadas e preenchidas por ar. De acordo com Callister e Rethwisch (2012), durante o processo de formação da espuma, um agente de insuflação adicionado ao material é responsável por gerar bolhas de gás que permanecerão no sólido após o processo de resfriamento. A estrutura final da espuma é semelhante à de uma esponja.

A reação de polimerização do estireno é realizada em água e o agente de insuflação utilizado para inserção das bolhas de ar na matriz de poliestireno é o pentano (C₅H₁₂). Este composto sofre deterioração quando exposto aos raios solares, de forma que não causa impactos diretos sobre o meio ambiente. Após passar por todo o processo de fabricação, as pérolas com três milímetros de diâmetro máximo aumentam em até 50 vezes seu tamanho original, sendo compostas por 98% de ar e somente 2% de poliestireno em volume (ABRAPEX, 2017b).

Tabela 1. Características exigíveis para o EPS

| Propriedades | Método de Ensaio | Unidade | Classe P | | | Classe F | | |
|--|------------------|-------------------------|----------------------------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|
| | | | I | II | III | I | II | III |
| Tipo de material | - | - | I | II | III | I | II | III |
| Massa específica aparente | NBR 11949 | kg/m ³ | 13-16 | 16-20 | 20-25 | 13-16 | 16-20 | 20-25 |
| Resistência à compressão com 10% de deformação | NBR 8082 | kPa | ≥ 60 | ≥ 70 | ≥ 100 | ≥ 60 | ≥ 70 | ≥ 100 |
| Resistência à flexão | ASTM C-203 | kPa | ≥ 150 | ≥ 190 | ≥ 240 | ≥ 150 | ≥ 190 | ≥ 240 |
| Absorção de água | NBR 7973 | g/cm ² x 100 | ≤ 1 | ≤ 1 | ≤ 1 | ≤ 1 | ≤ 1 | ≤ 1 |
| Permeabilidade ao vapor d'água | NBR 8081 | ng/Pa.s.m | ≤ 7 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 7 | ≤ 5 | ≤ 5 |
| Coefficiente de condutividade térmica a 23°C | NBR 12094 | W/(m.K) | 0,042 | 0,039 | 0,037 | 0,042 | 0,039 | 0,037 |
| Flamabilidade | NBR 11948 | - | Material não-retardante à chama. | | | Material retardante à chama. | | |

Fonte: NBR 11752 (ABNT, 2007, p. 4)

No Brasil, as características do EPS são normalizadas pela NBR 11752 (ABNT, 2016), de forma a atender as necessidades de isolamento térmico na construção civil e em câmaras frigoríficas. As características exigidas para o polímero estão sintetizadas na Tabela 1, conforme a antiga NBR 11752 (ABNT, 2007). De acordo com esta norma, o EPS é enquadrado em duas versões: classe P (não retardante à chama) e classe F (retardante à chama). Com relação à massa específica, divide-se o material em três grandes grupos: Grupo I – de 13 a 16 kg/m³, Grupo II – 16 a 20 kg/m³ e Grupo III – 20 a 25 kg/m³.

Segundo a Comissão Setorial do EPS da Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM, 2017), o EPS é uma espuma polimérica com propriedades físicas bastante desejáveis para uso nas mais diversas construções e obras de engenharia, considerando principalmente sua leveza e capacidade de isolamento térmico. Algumas das vantagens relativas ao uso deste polímero no setor construtivo estão elencadas a seguir:

- boa relação custo/volume útil: maior competitividade do metro cúbico quando comparado ao concreto usinado ou argamassa industrializada em volume;
- boa resistência à tração, compressão e flexão, associada a uma maior leveza;
- resiliência elevada e excelente estabilidade dimensional, sendo capaz de dissipar tensões e de sofrer deformações sem se romper;
- facilidade de uso, incluindo ótima manuseabilidade, produtividade e ergonomia;
- grande compatibilidade físico-química com outros materiais da construção civil;
- boa capacidade isolante, associada à manutenção da integridade física frente a mudanças de temperatura¹;
- sustentabilidade: reciclabilidade, economia de energia, não emissão de CFC (clorofluorcarboneto) e não emissão de COV (composto orgânico volátil).

Diante da enorme aplicabilidade do EPS nos variados segmentos da economia, Tessari (2006) destaca o preocupante problema associado ao enorme volume de resíduos produzido continuamente pelas cidades. A autora menciona o importante papel da indústria da construção civil como forma de absorver esses descartes, evitando os efeitos deletérios do acúmulo desse material plástico na natureza.

O EPS pode ser utilizado na construção de civil de diversas formas, incluindo: enchimento de laje e fôrmas para concreto; uso em lajes industrializadas e nervuradas em edifícios; isolamento térmico de telhados, dutos de ar-condicionado, tubulações, reservatórios e câmaras frigoríficas (ABRAPEX, 2017a); produção de concreto leve (Figura 1); fabricação de painéis monolíticos, autoportantes e divisórios (ABIQUIM, 2017); fabricação de forros isolantes e decorativos; isolamento acústico em piso flutuante; drenagem; juntas de dilatação; fundação para estradas, etc. (ABRAPEX, 2017a). Dentre as aplicações mais recentes do EPS no setor da construção civil e geotecnia, citam-se ainda o sistema *Wall System*, o *Geofoam* e os chamados pisos radiantes (ABIQUIM, 2017).



Figura 1. Superfície de um corpo de prova de concreto leve com EPS

Fonte: Elaborado pelos autores

¹ A espuma rígida de EPS, um produto reconhecido pela sua excelente capacidade de isolamento térmico, pode suportar variações de temperatura de -50 °C a 80 °C (ABIQUIM, 2017).

3 Concreto Leve com Poliestireno Expandido

O termo pérolas de EPS é geralmente utilizado para fins comerciais como sinônimo de esferas. Segundo informa a ABRAPEX (2017b), durante o processo de fabricação dos blocos de EPS, ocorre a produção de pérolas de distintos diâmetros, os quais variam de 1 a 8 mm, aproximadamente (Figura 2). As esferas de poliestireno expandido podem ser utilizadas como agregado leve, permitindo a produção do chamado Concreto Leve com EPS (CLE). Além disto, em vez de se utilizar pérolas industrializadas, pode-se fazer o reaproveitamento do próprio EPS descartado como resíduo, por meio de moagem ou trituração. Este último método pode se mostrar ainda mais vantajoso economicamente.

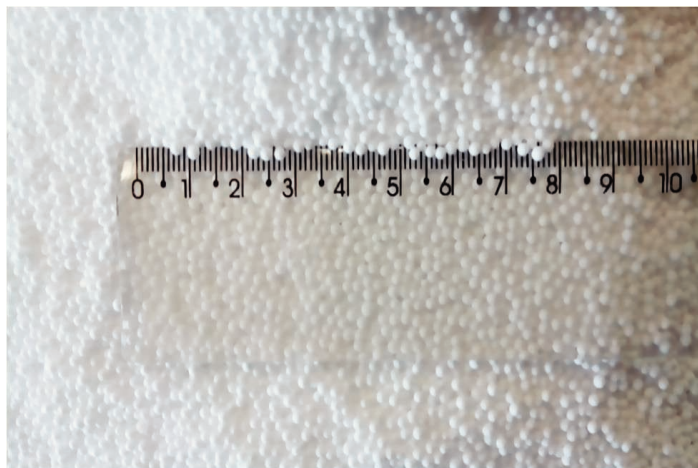


Figura 2. Pérolas de EPS para utilização em concreto leve

Fonte: Elaborada pelos autores

Catoia (2012) informa que apesar de o CLE ser um material inovador, sua composição frente aos outros concretos leves difere-se apenas com relação ao tipo de agregado utilizado. De fato, para o caso do CLE, o poliestireno expandido entra na composição da mistura substituindo uma parcela considerável do agregado graúdo e/ou miúdo, tendo duas funções principais, a saber:

- aumento da leveza das peças estruturais e elementos pré-moldados, na medida em que atua como incorporador de ar no concreto;
- redução nos custos finais de projeto, tendo em vista as diversas vantagens oferecidas a curto, médio e longo prazo.

Dentre os materiais que podem entrar na composição do concreto leve com EPS para fins estruturais, Catoia (2012) indica que podem ser utilizados os mais variados tipos de cimento, sendo que o EPS poderá ser adicionado tanto em pérolas quanto em flocos. Existe ainda outro tipo de CLE, caracterizado pela elevada leveza e versatilidade: o Concreto Ultraleve[®]. De acordo com Kerbaury (2010² apud CATOIA, 2012), dá-se o nome de Concreto Ultraleve[®] ou Concreflex[®] ao concreto com adição de EPS que tenha massa específica, variando entre 400 kg/m³ e 1.300 kg/m³, valores inferiores àqueles apresentados para o concreto leve estrutural.

4 Estado da Arte do Concreto Leve com Poliestireno Expandido

A pesquisa sobre o uso do EPS como agregado leve em concreto remonta a Cook (1972³ apud SHI et al., 2016). Contudo, o estudo sistemático do CLE tem início na década de 90, na academia francesa, quando Parant e Le Roy (1999⁴ apud MILED et al., 2007) investigaram a influência de diferentes proporções de EPS sobre a resistência à compressão

² KERBAURY, M. J. *Concreto estrutural ultraleve[®] com desmoldagem rápida destinado à fabricação de placas, painéis e lajes*. BR n. PI 1004268-7, 2010.

³ COOK, D. J. *Expanded polystyrene beads as lightweight aggregate for concrete*. School of Civil Engineering, University of New South Wales, 1972.

⁴ PARANT, E.; LE ROY, R. *Optimisation des bétons de densité inférieure à 1*. Paris, France: Tech. rep., Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1999.

e porosidade de concretos com densidades variando entre 600 kg/m^3 e 1.400 kg/m^3 . A descoberta de que a resistência estava sujeita ao tamanho das pérolas foi chamada pelos autores de fenômeno de escala. A análise se baseou no fato de que concretos com partículas de EPS de dimensões reduzidas mostraram-se mais resistentes, com exceção dos concretos de baixa densidade, para os quais a influência do tamanho das pérolas tornava-se desprezível.

Ainda na década de 90, Sri Ravindrarajah e Tuck (1994) analisaram as propriedades do CLE, observando a influência do fator água-cimento (A/C) na mistura. Os autores verificaram uma relação inversamente proporcional entre a resistência à compressão e a quantidade de água utilizada para preparo. Além disso, a elevação da relação água-cimento mostrou ligação com a diminuição do módulo de elasticidade e da densidade do material, em virtude de um possível aumento da incorporação de ar. As análises de resistência química indicaram um perceptível ataque por ácido clorídrico, com perdas de peso diretamente proporcionais ao aumento do fator A/C de cada amostra.

No estudo de Sabaa e Sri Ravindrarajah (1997) foi verificada a influência do EPS triturado, em substituição ao agregado graúdo, sobre as propriedades do CLE. Observou-se uma diminuição da trabalhabilidade do concreto fresco, sendo necessário o uso de aditivo superplastificante. As amostras com maiores percentuais de EPS exibiram maiores retrações, assim como maiores valores de fluência.

Ganesh Babu e Saradhi Babu (2003) estudaram as propriedades de resistência e durabilidade do CLE com adição de sílica ativa. Em se tratando do tamanho das pérolas, nos concretos com esferas de menor diâmetro os autores verificaram maior resistência, assim como nos concretos com agregados graúdos de maior dimensão. A resistência à tração por compressão diametral demonstrou ser diretamente proporcional à resistência à compressão, e a análise da ruptura apontou uma larga compressibilidade do material. Tal comportamento foi inteiramente distinto daquele observado para o concreto convencional, o qual é um material tipicamente frágil. A análise da absorção mostrou que as misturas com adição de sílica ativa tendem a ser menos permeáveis e menos susceptíveis à ação de cloretos.

Chen e Liu (2004) analisaram as propriedades do CLE com incorporação de sílica ativa e fibras de aço. Constatou-se que as amostras com adição de sílica tendem a alcançar maiores resistências durante as primeiras idades. Nos ensaios de tração por compressão diametral observou-se maiores valores de resistência decorrente da adição das fibras de aço, além de rupturas menos abruptas. A retração por secagem também mostrou ser inferior à do concreto normal para as amostras reforçadas com fibras.

Miled et al. (2004) analisaram o mecanismo de fratura e o fenômeno de escala em modelo idealizado de CLE, considerando-o como um material isotrópico homogêneo por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). A análise contou com simulação, adotando a existência de vazios esféricos em substituição às pérolas de EPS. Os autores observaram curvas de tensão-deformação próximas àquelas plotadas durante a investigação experimental. Além disso, pôde-se constatar a existência de uma possível relação entre a resistência à compressão e as propriedades físicas e químicas da zona de transição ao redor das pérolas de EPS.

Le Roy, Parant e Boulay (2005) também observaram a influência do tamanho das pérolas sobre a resistência à compressão e propuseram um modelo empírico baseado nos testes experimentais, com o propósito de garantir um suporte de dosagem para o CLE. Os resultados em laboratório mostraram-se de acordo com aqueles previstos pelo modelo, tendo sido verificada uma interdependência entre o desempenho do concreto e o tamanho das inclusões de EPS na mistura.

As interferências do EPS sobre as propriedades do concreto espumoso foram investigadas por Laukaitis, Žurauskas e Kerienė (2005). A estrutura de interação entre o concreto e o EPS foi analisada por meio de técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia Óptica (MO). Os autores constataram que a coesão entre a matriz de concreto e o agregado leve depende do tamanho e formato das partículas. A zona de contato mostrou maior resistência, haja vista que ela se manteve intacta, enquanto o EPS foi extraído da matriz. Cumpre ressaltar que as amostras com maiores percentuais de EPS apresentaram menor condutividade térmica.

O uso de cinzas volantes em misturas de CLE foi estudado por Saradhi Babu, Ganesh Babu e Wee (2005), que investigaram as propriedades mecânicas do material, com a finalidade de compará-lo ao concreto com cimento Portland comum. Foram verificadas diferenças significativas no processo de ruptura durante os ensaios de resistência à tração por compressão diametral. Enquanto nos testes com concreto convencional, as amostras se separaram em duas partes durante a fratura, tal fenômeno não foi observado nas amostras de CLE com adição de cinzas volantes. Observou-se que as curvas exibidas nos gráficos de tensão-deformação mostram-se menos inclinadas para o caso de misturas de concreto com maiores porcentagens de EPS, indicando diminuição do módulo de elasticidade.

O fenômeno de escala foi novamente investigado por Miled, Sab e Le Roy (2007). A investigação experimental foi feita com base em três tipos de CLE, com diferentes porosidades e três tamanhos de pérolas. Os autores informam que o fenômeno

não se deve apenas ao tamanho das esferas, mas também à porosidade do material, de maneira que o efeito se torna mais perceptível em concretos menos porosos. Cabe salientar ainda que nas amostras de porosidade reduzida foi verificado modo de ruptura quase frágil, caracterizado por fissuras longitudinais localizadas. Entretanto, nos concretos de alta porosidade foram detectadas microfissuras distribuídas por toda matriz, o que indica um modo de ruptura tipicamente dúctil.

O CLE com adição de cinzas volantes foi novamente investigado por Ganesh Babu, Saradhi Babu e Tiong-Huan (2006), num estudo sobre a influência do tamanho do agregado poliestireno (expandido e não expandido) sobre as propriedades de resistência e porosidade do concreto. Os autores destacam que o poliestireno não expandido corresponde ao material polimérico de maior densidade e sem inserção de bolhas de ar. Foi observado que o concreto com este último tende a exibir um comportamento menos dúctil, além de maior resistência. A comparação das amostras de CLE revelou maior absorção e maior retração para misturas com maiores quantidades de EPS e pérolas de maiores dimensões.

O uso de modelagens e simulações como forma de prever algumas das características mecânicas e térmicas do CLE, além da análise de sua microestrutura, foi apresentado num estudo de Bouvard et al. (2007). Os autores investigaram a condutividade térmica do material por meio do Método do Fio Quente e, conforme esperado, observou-se uma diminuição da condutividade mediante o decréscimo da densidade. Bonacina et al. (2003)⁵ apud BOUVARD et al., (2007) haviam proposto um modelo de transferência de calor capaz de prever as propriedades térmicas do concreto leve. A acurácia de predição de tal modelo pôde ser constatada por meio de testes experimentais com CLE de baixa densidade. A comparação do material frente ao concreto celular autoclavado (CCA) indicou que este último possui maior resistência térmica, em virtude de seus poros diminutos e isolados, geralmente preenchidos por ar.

Kligys et al. (2008) verificaram o risco de incêndio do concreto aerado com adição de resíduos de poliestireno expandido, provenientes de embalagens trituradas. Os ensaios foram executados seguindo o Comitê de Padronização Europeu. Nos testes de alta combustão foi observado que o tempo necessário para que o material atingisse altas temperaturas era dependente de sua capacidade de retenção de calor. Nas amostras com matrizes mais espessas constatou-se que o processo de queima se deu de forma mais vagarosa. A perda de integridade das peças ocorreu para temperatura em torno de 800 °C, para concreto de menor densidade.

Em seu estudo sobre o uso do Concreto Ultraleve® com finalidade estrutural, sem adição de agregado graúdo, Catoia (2012) afirma que o CLE no estado fresco se comporta como um material reodinâmico, potencialmente autoadensável, com considerável fluidez e capaz de se espalhar pelas fôrmas com bastante facilidade. Dentre as vantagens decorrentes de tais características, tem-se a economia proporcionada com relação ao projeto de cimbramento, fator que também se relaciona à menor massa específica do material. O CLE pode apresentar boa homogeneidade e resistência, o que dependerá de uma correta dosagem, além do maior uso de aglomerante. Nos testes de resistência à compressão realizados por Catoia (2012), foram utilizados três concretos com massas específicas diferentes (concretos A, B e C). Na idade de referência de 28 dias, executou-se o ensaio de resistência à compressão de 25 corpos de prova, obtendo-se a média e o desvio-padrão para os dados analisados. Os valores encontrados estão condensados na Tabela 2.

Tabela 2. Características do CLE endurecido aos 28 dias

| Características do concreto endurecido aos 28 dias | Unidades | Concretos | | |
|--|-------------------------|-----------|------|------|
| | | A | B | C |
| Massa específica aparente | kg/m ³ | 1191 | 1279 | 1355 |
| Resistência média à compressão | MPa | 13,3 | 15,9 | 17,2 |
| | Desvio-padrão | 1,13 | 0,91 | 0,26 |
| Fator de eficiência | MPa.dm ³ /kg | 11,2 | 12,4 | 12,7 |

Fonte: Adaptado de Catoia (2012, p. 82)

⁵ BONACINA, C.; CAMPANALE, M.; MORO, L. Analytical and experimental investigations on the heat transfer properties of light concrete. *International Journal of Thermophysics*, v. 24, n. 5, p. 1407-1414, 2003.

Catoia (2012) destaca que o consumo de cimento da ordem de 450 kg/m^3 para CLE com finalidades estruturais decorre da necessidade de melhora da resistência, além de ser uma maneira de compensar os vazios criados pelas esferas de EPS, que não resistem bem às tensões impostas ao concreto. O autor conclui em seu estudo que é possível a utilização do CLE com quase metade da massa específica do concreto convencional em peças sujeitas a tensões moderadas de compressão, além de lajes maciças e pré-moldadas.

Trussoni, Hays e Zollo (2012) desenvolveram um estudo comparativo, observando as propriedades apresentadas pelo concreto leve com esferas industrializadas de EPS e aquele com polímero sob a forma de resíduo, obtido de embalagens trituradas. Conforme informado no estudo, as diferenças perceptíveis observadas entre os dois concretos possuem ligação com o tipo de superfície exibida por cada um dos agregados. A imagem do CLE após ruptura mostra superfície danificada dos resíduos na matriz, diferentemente das pérolas de EPS. Os autores constataram maior trabalhabilidade do concreto com pérolas, em virtude da menor entrada de ar. Além disso, para as amostras com esferas industrializadas teve-se maior resistência à compressão.

Em outro estudo, Trussoni, Hays e Zollo (2013) investigaram o processo de ruptura do CLE sem o uso de incorporadores de ar e demais aditivos. Os resultados foram analisados por meio de Análise de Variância (ANOVA). Foi observado aumento da ductilidade diante da incorporação das pérolas de EPS. A investigação experimental levou à conclusão de que o uso do EPS no concreto provoca aumento da absorção de energia nos ensaios de resistência à compressão, reduzindo assim a sua fragilidade.

Numa pesquisa realizada por Elsalah et al. (2013), investigou-se a resistência à flexão, absorção de água e retração do CLE, sem utilização de aditivos ou superplastificantes. Os resultados experimentais levaram à constatação de que um aumento na quantidade de EPS, em substituição ao agregado graúdo, ocasiona perda da resistência à flexão. Além disso, as misturas de concreto com maiores quantidades de EPS mostraram maior capacidade de absorção e retração. Por meio de análise visual de porções do concreto foi possível constatar uma redução da dimensão das pérolas, decorrente da perda de sua expansibilidade.

A predição da resistência à compressão do CLE através de modelos matemáticos aliados a ferramentas computacionais foi proposta por Sadrmomtazi, Sobhani e Mirgozar (2013), de forma que os autores fizeram a comparação de três diferentes modelos: regressão paramétrica, ANN (*artificial neural network*) e ANFIS (*adaptive network-based inference system*). Destaca-se que a mistura de concreto contou com adição de sílica ativa, cinza de casca de arroz e fibras de polipropileno (PP). Foi constatado que a aplicação do ANN e ANFIS, para estimativa da resistência à compressão aos 28 dias, pode conduzir a resultados satisfatórios. Salienta-se, porém, que a regressão paramétrica não demonstrou eficácia quanto à capacidade de predição da resistência do material.

Em estudo realizado por Liu e Chen (2014), foi observada maior capacidade de deformação do CLE em comparação ao concreto comum. Os modos de fratura exibidos pelas amostras indicaram que quanto maior a proporção de poliestireno expandido em volume, maior a plasticidade do material compósito durante a deformação. Além disso, as partículas de EPS de maiores dimensões mostraram relação com a diminuição da resistência à flexão. Com base nos testes de resistência à compressão e da constatação de seu decaimento exponencial em função do aumento do volume de EPS, os autores deduziram uma expressão matemática capaz de descrever o fenômeno observado.

A relação tensão-deformação para o concreto leve com EPS foi investigada por Cui et al. (2016). Tendo em vista os estudos teóricos desenvolvidos, os autores propuseram uma expressão analítica ou equação-modelo para a curva de tensão-deformação do CLE. Foi constatada uma boa concordância entre os trechos ascendentes das curvas teórica e experimental para concretos com diferentes densidades. Verificou-se a capacidade de acurácia do modelo como forma de fazer uso do diagrama para fins de análises e projetos estruturais. Ressalta-se que este apresentou significativa precisão, tendo sido capaz de prever os resultados obtidos experimentalmente.

A durabilidade do CLE quando submetido a carregamento dinâmico cíclico foi investigada por Shi et al. (2016). O agregado polimérico mostrou relação com a capacidade de absorção de energia do concreto, tendo sido constatado que quanto maior a carga dinâmica cíclica aplicada, maior a diferença entre os valores de resistência à compressão antes e após os testes de fadiga. Foi verificada boa durabilidade do CLE com relação a este tipo de ensaio, o qual apresenta grande relevância para a pesquisa em torno dos modernos materiais com finalidades estruturais, incluindo elementos que atendam às condições de sismos.

Em estudo realizado por Xavier, Bassani e Mendes (2016), foi feita a avaliação do concreto leve estrutural com EPS reciclado tipo F. Os autores constataram um menor abatimento de tronco de cone em comparação ao concreto convencional. Isso porque o concreto leve se encontra menos sujeito à deformação pela gravidade. Cita-se ainda a baixa aderência existente entre a pasta de cimento e o EPS, o que permite a formação de vazios em volta do agregado polimérico. A absorção de água mostrou-se maior para misturas com maior quantidade de EPS.

O comportamento do CLE baseado em diferentes dosagens foi investigado por Ozório (2016). Ao todo foram analisados 45 traços, tendo sido verificadas as alterações nas propriedades mecânicas mediante a inserção de sílica ativa, fibras de aço, fibras de polipropileno, ajustes na granulometria dos agregados e utilização de diferentes quantidades de EPS. Observou-se que o Fator de Eficiência (FE) foi igual ou superior àquele apresentado pelo concreto de referência, com exceção para o concreto com fibras de polipropileno.

Ozório (2016) destaca em seu estudo a influência da temperatura sobre as propriedades do CLE, incluindo retração das pérolas (Figura 3), perda de massa, diminuição da resistência e maior absorção. Os resultados observados para amostras secas a 50 °C indicaram concreto de boa qualidade, com baixa absorvência e maior durabilidade. Contudo, para ensaios executados em concordância à NBR 9778 (2005), sob temperatura de 105 °C, teve-se concretos com alta absorção, de baixa qualidade e durabilidade reduzida. A otimização das dosagens foi feita com base na redução do consumo de cimento, de modo a aumentar a competitividade econômica do CLE e de torná-lo um produto mais sustentável, além de garantir uma maior aplicabilidade do material em estruturas pré-moldadas.

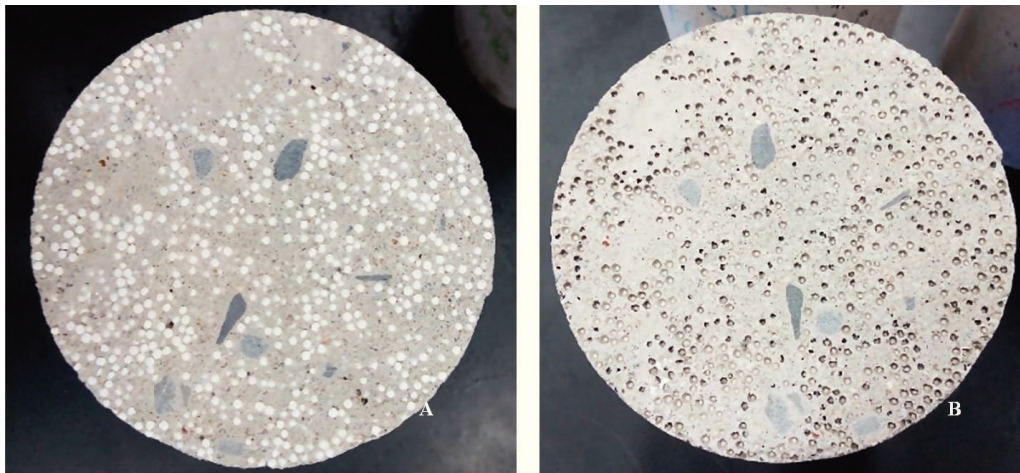


Figura 3. Exemplo de retração das pérolas de EPS em corpo de prova exposto a diferentes temperaturas - (A) exposição a 50 °C, (B) exposição a 105 °C

Fonte: Elaborada pelos autores

5 Considerações Finais

Constata-se que a principal vantagem advinda do uso do poliestireno expandido no concreto é a redução de sua massa específica. A maior leveza do material, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, permite a economia de agregado convencional, bem como facilita o preparo e utilização no canteiro de obras. Cabe salientar ainda os benefícios econômicos relativos a transporte, principalmente para o caso de empresas fabricantes de elementos pré-moldados.

É importante mencionar que o referencial teórico em torno dos concretos com adição de EPS ainda carece de muitas informações contundentes, principalmente aquelas que dizem respeito ao comportamento do material do ponto de vista microestrutural, bem como os aspectos de durabilidade e vida útil dos elementos. Embora já tenham sido realizadas algumas pesquisas a respeito de tais características, ainda não existe uma base teórica sólida capaz de prever o comportamento do material em idades mais avançadas. Destaca-se, por isso, a importância da realização de novos estudos e de pesquisas mais aprofundadas com o objetivo de serem investigados os parâmetros em questão.

Em última análise, é relevante destacar que as pesquisas relacionadas à utilização do EPS na fabricação de materiais compósitos de baixa e média resistência também possibilitam a economia de agregado convencional e consequente redução dos impactos ambientais decorrentes da extração da matéria-prima. Frente a essa recente tecnologia, a qual permite economia de matéria e energia, deve ser dado especial destaque aos aspectos relativos à qualidade de vida da população humana e ao desenvolvimento sustentável, incluindo a otimização de recursos.

Agradecimentos

Os singelos agradecimentos dos autores à empresa Knauf Isopor Ltda, pela doação das pérolas de EPS apresentadas nas ilustrações deste artigo.

Referências

- AMBROZEWICZ, P. H. L. *Materiais de construção*. São Paulo: PINI, 2012. 457 p., il.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI. *ACI 213R-03: Guide for structural lightweight-aggregate concrete*. Farmington Hills, MI, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA. ABIQUIM. Comissão Setorial de EPS. *O que é EPS?* Disponível em: <<http://www.epsbrasil.eco.br/eps/index.html>>. Acesso em: 15 jun. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11752: Materiais celulares de poliestireno para isolamento térmico na construção civil e em câmaras frigoríficas (Cancelada)*. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água por imersão: Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11752: Materiais celulares de poliestireno para isolamento térmico na construção civil e refrigeração industrial: Especificação*. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO. ABRAPEX. *O EPS na construção civil*. Disponível em: <<http://www.abrapex.com.br/31Constra.html>>. Acesso em: 04 jun. 2017a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO. ABRAPEX. *O que é EPS?* Disponível em: <<http://www.abrapex.com.br/01OqueeEPS.html>>. Acesso em: 04 jun. 2017b.
- BOUVARD, D. et al. Characterization and simulation of microstructure and properties of EPS lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 37, p. 1666-1673, 2007.
- CALLISTER, W. D., Jr.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares; Revisão de José Roberto Moraes D'Almeida. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 817 p.
- CATOIA, T. *Concreto ultraleve® estrutural com pérolas de EPS: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes*. 2012, 154 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 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.
- CUI, C. et al. Stress-strain relationship in axial compression for EPS concrete. *Construction and Building Materials*, v. 105, p. 377-383, 2016.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. *ISO 1043-1: 2001: Plastics: Symbols and abbreviated terms. Part 1: Basic polymers and their special characteristics*. Berlin, Germany, 2001.
- ELSALAH, J. et al. The influence of recycled expanded polystyrene (EPS) on concrete properties: influence on flexural strength, water absorption and shrinkage. In: INTERNATIONAL ADVANCES IN APPLIED PHYSICS AND MATERIALS SCIENCE CONGRESS, 3., 2013. *AIP Conf. Proc.* 1569... p. 181-185, 2013.
- GANESH BABU, K.; SARADHI BABU, D. Behavior of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, v. 33, p. 755-762, 2003.
- GANESH BABU, K.; SARADHI BABU, D.; TIONG-HUAN. W. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete. *Cement & Concrete Composites*, v. 28, p. 520-527, 2006.

- KLIGYS, M. et al. Investigations into the fire hazard of a composite made from aerated concrete and crushed expanded polystyrene waste. *Mechanics of Composite Materials*, v. 44, n. 2, p. 173-180, 2008.
- LAUKAITIS, A.; ŽURAUSKAS, R.; KERIENĖ, J. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement & Concrete Composites*, v. 27, p. 41-47, 2005.
- 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.
- 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. 68, p. 227-232, 2014.
- MILED, K. et al. Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effects and failure mode. *Mechanics of Materials*, v. 36, p. 1031-1046, 2004.
- MILED, K.; SAB, K.; LE ROY, R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: experimental investigation and modelling. *Mechanics of Materials*, v. 39, p. 222-240, 2007.
- OZÓRIO, B. P. M. *Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecânicas*. 2016, 154 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- ROSSIGNOLO, J. A. *Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações*. 1. ed. São Paulo: PINI, 2009. 144 p.
- SABAA, B. A.; SRI RAVINDRARAJAH, R. Engineering properties of lightweight concrete containing crushed expanded polystyrene waste. In: SYMPOSIUM MM: ADVANCES IN MATERIALS FOR CEMENTITIOUS COMPOSITES, 1997, Boston, USA. Boston: Materials Research Society, 1997. p. 1-11.
- SADRMOMTAZI, A.; SOBHANI, J.; MIRGOZAR, M. A. Modeling compressive strength of EPS lightweight concrete using regression, neural network and ANFIS. *Construction and Building Materials*, v. 42, p. 205-216, 2013.
- SANTOS, A. Pesquisa ressalta presente e futuro do concreto. *Cimento Itambé*, 2013. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/pesquisa-ressalta-presente-e-futuro-do-concreto/>>. Acesso em: 14 jun. 2017.
- SARADHI BABU, D.; GANESH BABU, K.; WEE, T. H. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 1218-1223, 2005.
- SHI, W. et al. Durability of modified expanded polystyrene concrete after dynamic cyclic loading. *Shock and Vibration*, v. 2016, Article ID 2391476, p. 1-7, 2016.
- SRI RAVINDRARAJAH, R.; TUCK, A. J. Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads. *Cement and Concrete Composites*, v. 16, p. 273-277, 1994.
- TESSARI, J. *Utilização de poliestireno expandido e potencial de aproveitamento de seus resíduos pela construção civil*. 2006. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- TRUSSONI, M.; HAYS, C. D.; ZOLLO, R. F. Comparing lightweight polystyrene concrete using engineered or waste materials. *ACI Materials Journal*, v. 109, n. 1, p. 101-107, 2012.
- TRUSSONI, M.; HAYS, C. D.; ZOLLO, R. F. Fracture properties of concrete containing expanded polystyrene aggregate replacement. *ACI Materials Journal*, v. 110, n. 5, p. 549-557, 2013.
- XAVIER, B. C.; BASSANI, F.; MENDES, A. S. Avaliação do concreto estrutural leve com EPS reciclado. *Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 12, n. 3, p. 59-75, 2016.