

Efeito do uso de esferas de poliestireno expandido na obtenção e propriedades de telhas de concreto

Ledson Leitão Batista ^{1*}, Ricardo Peixoto Suassuna Dutra ², Lizandra Fernanda Araújo Campos ²

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal da Paraíba, 58051-900, João Pessoa, Paraíba, Brasil

² Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal da Paraíba, 58051-900, João Pessoa, Paraíba, Brasil

*e-mail: ledson_33@hotmail.com

Resumo:

As telhas de concreto são empregadas mundialmente devido a sua estética e durabilidade, porém, do ponto de vista estrutural, apresentam elevado peso como desvantagem. Novas tecnologias têm sido apontadas, incluindo o estudo de formulações sustentáveis que possibilitem a fabricação de elementos construtivos de maior leveza e a consequente redução dos esforços atuantes sobre as estruturas. O concreto leve com poliestireno expandido (EPS) 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. O objetivo geral deste trabalho foi produzir telhas de concreto com utilização de EPS como agregado leve nas suas formulações, e estudar seu efeito nas propriedades tecnológicas das telhas obtidas. Para tanto, foram produzidas telhas de concreto convencionais e telhas de concreto leve com adição ou substituição de 15 e 20% de EPS em relação ao agregado miúdo (areia), em volume. As características tecnológicas das telhas foram determinadas e avaliadas de acordo com normas vigentes e as características microestruturais foram analisadas por microscopia óptica e eletrônica de varredura. Em geral, os resultados dos ensaios físicos e mecânicos das telhas produzidas atendem requisitos da norma brasileira. A adição de 20% de EPS nas formulações proporcionou maior leveza às telhas de concreto estudadas, apresentando redução de peso de 11,1% com relação às telhas sem adição de EPS. Verifica-se que a adição/substituição por EPS proporciona redução da resistência mecânica, mas não compromete a qualidade das telhas produzidas. Pode-se concluir que os teores de EPS estudados nessa pesquisa (15 e 20%) são promissores para a aplicação como agregado leve em composições de telhas cimentícias.

Palavras-chave: telha de concreto; concreto leve; EPS.

1. INTRODUÇÃO:

As telhas de concreto são amplamente utilizadas em construções residenciais, comerciais e industriais em todo o mundo. Geralmente são produzidas com um concreto específico composto por aglomerante, agregado miúdo, aditivo e água [1,2]. Entre suas vantagens, destacam-se boa resistência mecânica, durabilidade, facilidade de manuseio, variedade de cores, resistência à ação do intemperismo e isolamento acústico. No entanto, apresentam desvantagens como peso elevado e alta porosidade [3,4,5].

A utilização do poliestireno expandido (EPS) nas formulações de concreto leve 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 e acústico [6]. O poliestireno expandido (EPS) é um

polímero termoplástico obtido pelo processo de expansão do poliestireno por tratamento químico ou processos de vapor em temperaturas elevadas. As partículas de EPS são esferas com cerca de 98% de ar e 2% de poliestireno, com densidade variando de 10 a 50 kg/m³ [7,8].

As características particulares do EPS em relação ao agregado leve de ocorrência natural (como perlita, argila, caulim, xisto e ardósia) incluem suas naturezas hidrofóbicas e não absorventes [7]. O uso do poliestireno expandido como agregado leve em concreto pode ser feito por meio da utilização de esferas industrializadas ou por reaproveitamento de material descartado, o qual é previamente moído ou triturado antes de ser adicionado ao compósito cimentício [9].

O concreto leve com EPS é um material composto basicamente de cimento, areia e EPS em esferas, podendo ser adicionados aditivos. Durante seu processamento, o cimento, a areia e as partículas de EPS formam um compósito proporcionando um concreto com baixa densidade aparente que varia entre 700 a 1600 kg/m³, enquanto o concreto convencional com brita é da ordem de 2400 kg/m³ [1].

Apresenta baixa condutividade térmica, versatilidade, podendo ser moldado em vários tamanhos e modelos, apresentando facilidade de produção e boa relação custo-benefício tornando esse material atrativo para indústria de construção civil [8,10,11]. O EPS no concreto leve pode reduzir a permeabilidade e aumentar a resistência ao ataque químico devido à natureza celular, fechada e inerte das esferas de poliestireno expandido [12]. Em geral, os concretos leves têm índice de absorção de água superior a 8% e o concreto com EPS apresenta absorção entre 2,8 e 6,9% [13,14,15].

Devido à baixa ligação entre EPS e pasta de cimento, natureza hidrofóbica e baixa resistência mecânica de grânulos de EPS, há redução significativa na resistência à compressão de concretos com EPS. A resistência mecânica desse concreto também depende do tamanho e quantidade das esferas de EPS, apresentando fratura gradual e lenta [16,17].

Com isso, o objetivo geral deste trabalho é produzir telhas de concreto com utilização de EPS como agregado leve nas suas formulações, por substituição e adição em percentuais de 15 e 20% e estudar o seu efeito nas propriedades tecnológicas das telhas obtidas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

2.1. Materiais:

Neste trabalho, os materiais utilizados na produção de telhas de concreto foram os seguintes. Cimento Portland de alta resistência inicial CPV ARI; areia média, como agregado miúdo, procedente de leito de curso d'água, na cor branca/amarelada; e esferas de poliestireno expandido (EPS), com diâmetros variando de 5 a 7 mm, de acordo com os dados do fabricante. Todas as amostras foram adquiridas em comércio local. A ficha técnica do EPS, cedida pelo fabricante, é apresentada na Tab.1.

Tabela 1. Ficha técnica do EPS*

Material: EPS Poliestireno expandido em esferas Tipo 1F
Massa específica aparente: 9 a 10 kg/m ³
Resistência à compressão: 33 kPa
Resistência mínima à flexão: > 50 kPa
Resistência mínima ao cisalhamento: > 25 kPa
Flamabilidade: Material retardante à chama "Tipo 1F"
Coefficiente de condutividade térmica: 0,045 W/(m.k)
Índice de redução sonora (Rw): Rw = 35 dB

*cedida pelo fabricante

2.2. Métodos:

2.2.1. Caracterização dos materiais:

Para realizar as caracterizações, a areia foi classificada em peneira ABNT com abertura de 4,75 mm. Em seguida, a areia e o cimento foram secos em estufa a 100 °C, por 24 h.

2.2.1.1. Massa específica do agregado miúdo (areia):

Para determinação da massa específica de agregado miúdo (areia), foi adotado o ensaio do Frasco de Chapman, seguindo os padrões as normas NBR 9776 [18] e NBR NM 52 [19].

2.2.1.2. Massa unitária de agregado miúdo (areia):

A determinação da massa unitária de agregado miúdo seguiu as referências às normas NBR 16972 [20] e NBR NM 45 [21].

2.2.1.3. Curva granulométrica do agregado:

Para determinação da curva granulométrica do agregado, foi adotado o ensaio de granulometria por peneiramento seguindo a recomendação da norma NBR NM 248 [22].

2.2.1.4. Massa específica do cimento:

Para determinação da massa específica do cimento, foi adotado o ensaio do Frasco de Le Chatelier seguindo as referências das normas NBR 16605 [23] e NBR NM 23 [24].

2.2.1.5. Massa unitária do cimento:

A determinação da massa unitária do cimento seguiu padrão recomendado pela norma NBR 11579 [25].

2.2.1.6. Determinação da consistência e tempo de início e fim de pega da pasta do cimento:

A determinação da consistência e tempo de início e fim de pega da pasta do cimento teve, como parâmetro, consistência normal com índice de consistência igual a $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Utilizou-se o aparelho de Vicat com sonda de Tetmajer, agulha de Vicat e molde troncocônico seguindo as recomendações das normas NBR 7215 [26] e NBR NM 43 [27].

2.2.1.7. Classificação granulométrica das esferas de EPS:

A classificação granulométrica das esferas de EPS foi realizada por peneiramento, utilizando peneiras da série normal e intermediária.

2.2.1.8. Análise mineralógica e química:

O cimento e a areia foram submetidos aos ensaios de análise química por fluorescência de raios X (FRX) em espectrômetro EDS da Bruker (S2 Puma Series II) e análise por difração de raios X (DRX), em difratômetro Shimadzu (XRD6000), equipado com radiação de cobre ($1,5481 \text{ \AA}$). Os parâmetros usados por DRX foram: ângulo de varredura 2θ entre 10 e 90° , passo angular de $0,02^\circ$, tempo de passagem de 2 segundos e radiação monocromática $\text{CuK}\alpha$ ($1,5481 \text{ \AA}$). Para análise dos dados foi utilizado o banco de dados ICSD (Inorganic Crystal Structure database).

2.2.2. Dosagens/Formulações:

Os traços da telha de concreto, em volume (cimento:areia:%EPS:fator água/cimento - cim:areia:%eps:a/c), contêm teores de cimento (cim), areia (areia), esferas de EPS (%eps) e fator água/cimento (a/c) pré-estabelecidos conforme os ensaios de caracterização das matérias-primas. O traço da telha sem EPS (convencional), em laboratório, foi 1:3:0,67 (cim, areia, a/c), em volume.

Para obtenção das telhas de concreto com e sem EPS foram moldados, em laboratório, cinco lotes de telhas de concreto, no formato tradicional, assim distribuídos: 1º (primeiro) lote, traço convencional da pesquisa ("tcp"), cimento, areia e água (sem esferas de EPS); 2º (segundo) lote, cimento, areia, água e adição de 15% de esferas de EPS; 3º (terceiro) lote, cimento, areia, água e substituição de 15% de esferas de EPS; 4º (quarto) lote, cimento, areia, água e adição de 20% de esferas de EPS; e 5º (quinto) lote, cimento, areia, água e substituição de 20% de esferas de EPS.

Para cada lote foram confeccionadas duas telhas de concreto e seis corpos de provas cilíndricos, nos padrões estabelecidos pela NBR 13858-2 [29]. Os termos "adição" significa percentual de esferas de EPS adicionado ao "tcp", em volume, e "substituição" significa percentual de esferas de EPS substituído por areia ao "tcp", em volume.

2.2.3. Moldagem, desmoldagem e cura:

Foram confeccionados corpos de prova padronizados. A normativa para telha de concreto segue as recomendações das NBR 13858-1 (parte 1) [28] e a NBR 13858-2 (parte 2) [29]. Nos procedimentos de moldagem, desmoldagem e cura dos corpos de provas cilíndricos, foi seguida a norma NBR 5738:2015, concreto, procedimento para moldagem e cura de corpos de prova [30]. Os moldes devem ser de aço ou material não absorvente e que não reajam com o cimento Portland, resistentes, mantendo sua forma durante a operação de moldagem; devem ser abertos na face superior, com o fundo e a lateral estanques quando fechados, e de fácil desmoldagem, para não danificar o corpo de prova. A base do molde deve ser plana, com tolerância de 0,05 mm.

A moldagem dos corpos de prova foi feita com uma prévia mistura dos materiais utilizados, cimento, areia, adição e/ou substituição de esferas de EPS, a fim de garantir a uniformidade da mistura. A mistura foi introduzida no molde, com camadas e golpes para adensamento dos corpos de prova cilíndricos, seguindo a norma NBR 5738:2015 [30].

A quantidade de camadas e de golpes de adensamento usada na moldagem foi definida conforme as dimensões dos corpos de prova e o tipo de adensamento (manual ou mecânico). Os golpes foram aplicados uniformemente, na seção transversal do corpo de prova, com o cuidado de não golpear a base do molde, na primeira camada. Já nas demais camadas, o adensamento ocorreu em toda sua espessura e a haste penetrou em 2 cm da camada anterior, aproximadamente.

Após obtenção dos corpos de prova, os moldes cilíndricos para os ensaios para determinação de resistência à compressão foram posicionados na bancada plana e seca, em laboratório, durante 24 h, protegidos do sol, respingos d'água e vibrações ou contatos.

Após a moldagem, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e submetidos à cura por, no mínimo, 24 h, sendo acondicionados em câmara úmida em temperatura ambiente e umidade relativa do ar superior a 95%. Depois do processo de cura, as telhas e os corpos de prova cilíndricos foram submetidos aos ensaios de absorção de água, permeabilidade, e carga de ruptura à flexão.

2.2.4. Ensaios físicos e mecânicos:

2.2.4.1. Empenamento:

O ensaio de empenamento das telhas foi realizado conforme o parâmetro do anexo A da NBR 13858-2 [29].

2.2.4.2. Absorção da água e redução de peso após adição/substituição de EPS:

Para o ensaio de absorção de água (AA, em %) foi utilizada a técnica de imersão do corpo de prova, a telha de concreto (amostra), submerso em água, por 24 h, à temperatura ambiente, relacionando as massas da amostra inicial úmida (M_u , em kg) e da amostra seca (M_s , em kg). O ensaio seguiu o anexo B da NBR 13858-2 [29].

2.2.4.3. Permeabilidade:

O ensaio de permeabilidade seguiu os procedimentos da norma NBR 13858-2 [29]. O ensaio foi mantido por 24 h, em temperatura ambiente.

2.2.4.4. Ensaio mecânico de resistência à flexão:

Para realização do ensaio mecânico de resistência à flexão, as telhas de concreto leve produzidas foram imersas em água por 24 h. Na máquina de ensaios mecânicos, marca Shimadzu (UH F1000kNI), a telha foi posicionada sobre barras de apoio de aço (38 mm de diâmetro e 380 mm de comprimento), fixas e centralizadas, transversalmente, carga centralizada e progressiva, com velocidade de 100 N/s. A carga de ruptura foi expressa em N (anexo D da norma NBR 13858-2) [29]. O ensaio foi executado para as telhas curadas por 28 dias.

2.2.4.5. Ensaio mecânico de resistência à compressão:

Para o ensaio mecânico de resistência à compressão utilizou-se a prensa hidráulica, com capacidade de 100 tf (Solotest Ref. 1504230). Foram ensaiados corpos de prova cilíndricos de concreto moldados e curados, cujas bases foram preparadas para garantir a planicidade e a perpendicularidade com o eixo longitudinal. Os corpos de prova foram mantidos em processo de cura úmida (NBR 5738) [30]. Os corpos cilíndricos foram curados por 3, 7 e 28 dias. O carregamento foi contínuo, e cessado após a ruptura do corpo de prova. A resistência à compressão axial, em MPa, e o ensaio para determinação da resistência à compressão axial seguiram a norma NBR 5739:2018 [31].

2.2.5. Análise microestrutural das telhas:

As telhas produzidas foram analisadas por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. A análise de microscopia óptica foi realizada em equipamento Olympus BX41M LED. A análise de microscopia eletrônica de varredura foi realizada em equipamento Tescan Vega S5123, e acelerador com voltagem 10 kV. A preparação do corpo cerâmico envolveu a diminuição de suas dimensões e a deposição de uma fina película de ouro sobre as superfícies a serem analisadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

3.1. Propriedades físicas das matérias-primas:

A Fig.1 apresenta o gráfico da curva granulométrica da areia, considerando a massa retida acumulada (MR) e os limites inferior e superior, zonas utilizável e ótima (ZU e ZO).

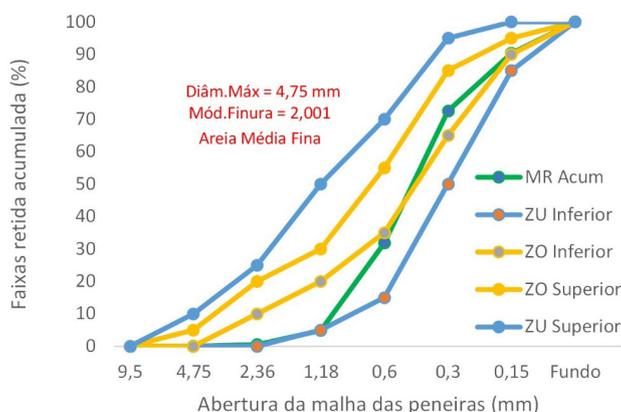


Figura 1. Curva granulométrica do agregado miúdo

Na curva apresentada na Fig.1, o diâmetro máximo obtido para o agregado miúdo foi de 4,75 mm, enquanto o módulo de finura foi de 2,001 (zona utilizável inferior). Portanto, o agregado utilizado pode ser classificado como "areia média fina", conforme recomendação padrão da NBR NM 248 [22]. As diferentes características granulométricas das matérias-primas utilizadas neste trabalho podem contribuir com o fator de empacotamento dos materiais com formulações envolvendo essas matérias-primas. A Tab.2 apresenta, detalhadamente, os resultados obtidos das propriedades físicas da areia, do cimento e do EPS.

Tabela 2. Resultados das propriedades físicas da areia, do cimento e do EPS

Propriedades	Areia	Cimento	EPS
Massa específica (g/cm ³)	2,59	3,03	0,01 (*)
Massa unitária (g/cm ³)	1,57	0,89	0,00841
Tempo de pega inicial (min)	-	49	-
Tempo de pega final (min)	-	156	-
Resistência mínima à flexão (kPa)	-	-	> 50 (*)
Resistência à compressão (kPa)	-	-	33 (*)

3.1.2. Classificação granulométrica das esferas de EPS:

Com base no resultado da classificação granulométrica das esferas de EPS, por peneiramento, foi possível constatar que 40% das esferas de EPS passaram na peneira de abertura 6,3 mm e ficaram retidas na peneira de abertura 4,75 mm, enquanto 60% das esferas de EPS passaram na peneira de abertura 9,5 mm e ficaram retidas na peneira 6,3 mm.

3.2. Análise mineralógica e química:

A Fig.2 apresenta os difratogramas de raios X (DRX) da areia e do cimento.

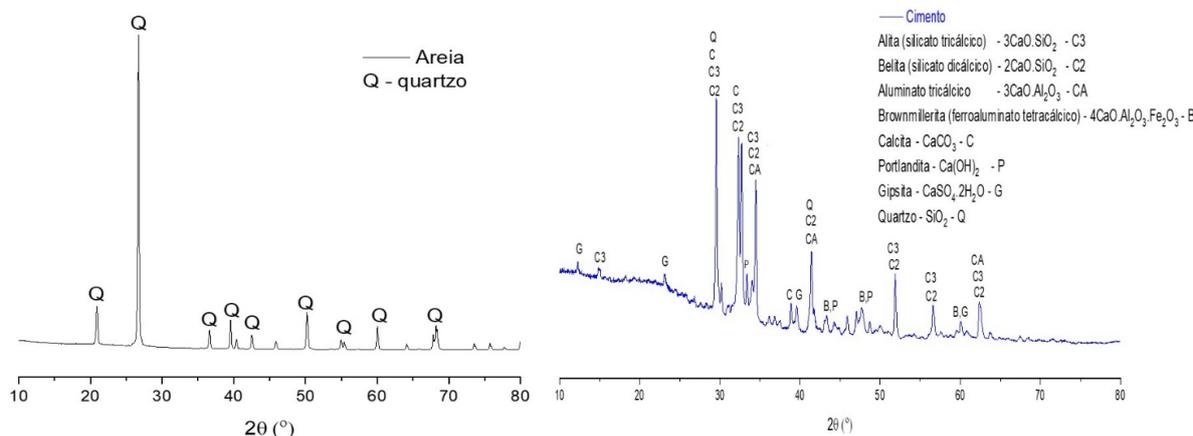


Figura 2. DRX da areia e do cimento

Na Fig.2 observa-se que a areia apresentou, predominantemente, o mineral quartzo. Observa-se a presença da alita (C3S, silicato tricálcico), belita (C2S, silicato dicálcico), aluminato tricálcico, brownmillerita (ferroaluminato tetracálcico, C4AF), calcita, portlandita, gipsita e quartzo na amostra de cimento. A alita é responsável pela resistência do concreto em todas as idades, mas, principalmente, nas idades iniciais, liberando calor após a aplicação. A belita é responsável pela resistência final do concreto.

Na Tab.3 apresentam-se os resultados da análise química da areia e do cimento obtidos por fluorescência de raios X (FRX), em percentual, de seus constituintes principais na forma de óxidos.

Tabela 3. Composição química da areia e do cimento

Óxidos	Areia (%)	Cimento (%)
Al ₂ O ₃	2,435	4,173
CaO	-	70,293
Fe ₂ O ₃	0,425	3,810
K ₂ O	-	1,660
MgO	-	1,550
SiO ₂	94,311	13,645
SO ₃	0,268	4,429
TiO ₂	1,320	0,300
Outros óxidos	1,241	0,140

Com base na Tab.3, os principais óxidos que compõem a areia são óxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃). Já para o cimento, os principais óxidos são óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de enxofre (SO₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃).

Confrontando os resultados obtidos por DRX e FRX, os componentes químicos determinados no ensaio de FRX podem ser confirmados na análise por DRX e estão presentes nas suas fórmulas mineralógicas.

3.3. Propriedades físicas e mecânicas das telhas de concreto:

3.3.1 Empenamento:

Os resultados do ensaio de empenamento das telhas de concreto atenderam aos requisitos mínimos da norma NBR 13858-2. Essa norma estabelece que para a telha, quando apoiada sobre um plano horizontal, com sua face inferior voltada para baixo, o afastamento entre o plano e qualquer ponto de contato não deve exceder 3 mm [29].

3.3.2. Absorção da água e redução de peso após adição/substituição de EPS:

Nos resultados dos ensaios de absorção de água das telhas de concreto, o menor percentual de absorção da água determinado entre as telhas estudadas foi de 5,71%, enquanto o maior percentual foi de 6,76%, atendendo o anexo B da NBR 13858-2 [29], ou seja, as telhas de concreto não devem ter absorção de água superior a 10%, conforme a Tab.4.

Tabela 4. Absorção de água e redução de peso, após adição/substituição de EPS (NBR 13858-2 anexo B)

Telhas de concreto	Amostra úmida Mu (kg)	Amostra seca Ms (kg)	Absorção de água AA (%)	Redução de peso (%)
Telha de concreto com 0% de EPS (T0)	6,44	6,04	6,61	-
Telha com substituição de 15% de esferas EPS (TS15)	5,81	5,45	6,64	9,77
Telha com adição de 15% de esferas EPS (TA15)	6,08	5,76	5,71	4,64
Telha com substituição de 20% de esferas EPS (TS20)	5,74	5,38	6,76	10,93
Telha com adição de 20% de esferas EPS (TA20)	5,68	5,37	5,75	11,10

Comparando os dados de absorção de água da telha com 0% de EPS com os dados das telhas com adição ou substituição do agregado miúdo pelo EPS, não ocorreu modificação significativa na absorção de água das telhas. A redução de peso das telhas, comparando com a telha com 0% de EPS,

após adição/substituição com EPS variou de 4,64% e 11,10%. O teor de 20% de EPS proporcionou uma maior leveza das telhas, o que já era esperado, visto a adição de um componente mais leve nas formulações das telhas.

As telhas de concreto com substituição de 15 e 20% em esferas de EPS, em volume, tiveram maiores percentuais de absorção de água, provavelmente, pelo aumento da porosidade na microestrutura formada quando o agregado miúdo (areia) é substituído, em parte, pelo EPS. Segundo Ranjbar e Mousavi [13], os concretos leves têm índice de absorção de água superior a 8% e o concreto com EPS apresenta absorção entre 2,8 e 6,9%. Os dados das telhas produzidas se enquadram nessa faixa de absorção.

3.3.3. Permeabilidade:

Com base nos resultados da permeabilidade através da pressão de coluna d'água, as telhas de concreto, sem e com EPS, não apresentaram vazamentos nem formações de gotas nas faces inferiores, atendendo os requisitos do anexo C da NBR 13858-2 [29].

3.3.4. Resistência à flexão das telhas:

Na Tabela 5 são apresentados os resultados da carga de ruptura à flexão das telhas de concreto.

Tabela 5. Carga de ruptura à flexão das telhas de concreto (NBR 13858-2 anexo D; requisito: carga de ruptura à flexão ≥ 2500 N)

Corpo de prova	Carga de ruptura à flexão após 28 dias (N)
Telha de concreto com 0% de esferas EPS (T0)	2900
Telha de concreto com substituição de 15% de esferas EPS (TS15)	2700
Telha de concreto com adição de 15% de esferas EPS (TA15)	2800
Telha de concreto com substituição de 20% de esferas EPS (TS20)	2500
Telha de concreto com adição de 20% de esferas EPS (TA20)	2600

As telhas de concreto apresentam cargas de rupturas à flexão variando, em newton (N), de 2500 N (telha de concreto com substituição de 20% de esferas EPS) a 2900 N (telha de concreto sem EPS), aos 28 dias. Após introdução do EPS nas formulações, ocorreu uma redução máxima de 13,8% na resistência à flexão. Constatou-se, ainda, que quanto maior o teor de EPS menor a resistência à flexão, possivelmente, pela maior quantidade de imperfeições introduzidos na telha. As telhas de concreto apresentaram carga de ruptura à flexão maior ou igual a 2500 N, atendendo as recomendações da NBR 13858-2 [29]. Diante de dados da literatura pode-se concluir que os teores de EPS estudados (15 e 20%) são promissores para a aplicação como agregado leve em composições de telhas cimentícias.

3.3.5. Resistência mecânica à compressão:

A Tab.6 apresenta os dados de tensão de ruptura à compressão e da carga de ruptura à compressão dos corpos cilíndricos obtidos com as formulações cimentícias.

Com base na Tab.6, os corpos cerâmicos, com e sem EPS, após três dias de cura, apresentaram tensão de ruptura à compressão variando de 8,63 MPa (corpos cilíndricos com substituição da areia por 20% de EPS) a 16,71 MPa (corpos cilíndricos sem EPS), assim, ocorreu uma redução máxima na resistência mecânica à compressão de 48,36%, após introdução de EPS nas formulações. Após sete dias de cura, apresentaram tensão de ruptura à compressão variando de 9,45 MPa (corpos cilíndricos com substituição da areia por 20% de EPS) a 17,88 MPa (corpos cilíndricos sem EPS), assim, ocorreu uma redução máxima na resistência mecânica à compressão de 47,15%, após introdução de EPS nas formulações. E, após vinte e oito dias de cura, apresentaram tensão de

ruptura à compressão variando de 13,61 MPa (corpos cilíndricos com substituição da areia por 20% de EPS) a 27,79 MPa (corpos cilíndricos sem EPS), nessas condições ocorreu uma redução máxima na resistência mecânica à compressão de 48,97%, após introdução de EPS nas formulações. Portanto, a adição/substituição por EPS proporciona redução da resistência mecânica confirmando dados da literatura [12].

Tabela 6. Resistência mecânica à compressão dos corpos cilíndricos (NBR 5738 e NBR 5939)

Corpo de Prova	Resistência à compressão (MPa)		
	Idade 3 dias	Idade 7 dias	Idade 28 dias
Referência	16,71	17,88	27,79
Corpo cilíndrico com 0% de EPS (T0)			
Corpo cilíndrico com substituição de 15% de esferas EPS (TS15)	11,85	12,75	15,70
Corpo cilíndrico com adição de 15% de esferas EPS (TA15)	13,29	14,09	24,99
Corpo cilíndrico com substituição de 20% de esferas EPS (TS20)	8,63	9,45	13,61
Corpo cilíndrico com adição de 20% de esferas EPS (TA20)	11,01	12,03	15,19

Observa-se, ainda, que a média da resistência mecânica aumentou com o decorrer dos dias de cura, independentemente, das telhas com (TS15, TS20, TA15, TA20) e sem adição de EPS (T0), podendo ser considerado um comportamento esperado, uma vez que a cura proporciona uma melhora significativa nas propriedades mecânicas de materiais cimentícios.

A Fig.3 apresenta o comportamento da resistência à compressão dos corpos cilíndricos com diferentes percentuais de EPS, adicionado ou substituído, representado graficamente.

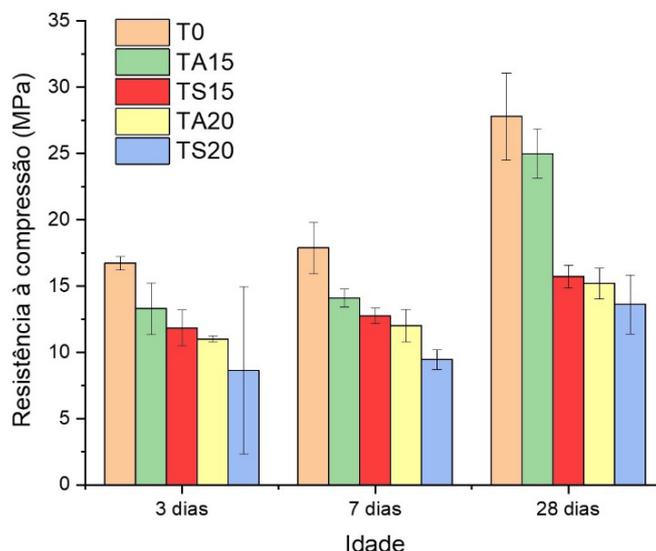


Figura 3. Gráfico comparativo da resistência mecânica à compressão dos corpos cilíndricos, sem e com diferentes percentuais de EPS, adicionado e substituído

Os resultados apresentados para resistência à compressão são similares aos apresentados por Ozório [32], nas formulações semelhantes ao referido estudo.

3.4. Análise microestrutural das telhas:

A Fig.4 apresenta as imagens comparativas da matriz cimentícia das telhas de concreto sem e com EPS, obtidas por microscopia óptica.



Figura 4. Micrografias das telhas de concreto (a) sem EPS e (b) com EPS

Na Fig.4, as imagens obtidas por microscopia óptica permitem visualizar o EPS na matriz cimentícia. Na região apresentada, o EPS está bem aderido à matriz cimentícia, não apresentando vazios/espacos aparentes na interface que une esses materiais. Contudo, devido à natureza hidrofóbica e à baixa densidade do EPS, os concretos de EPS podem apresentar problemas de aderência entre a matriz cimentícia e o EPS, gerando estruturas não homogêneas e comprometendo a durabilidade da telha.

A Fig.5 apresenta as imagens da fronteira entre a matriz cimentícia das telhas de concreto com EPS, obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

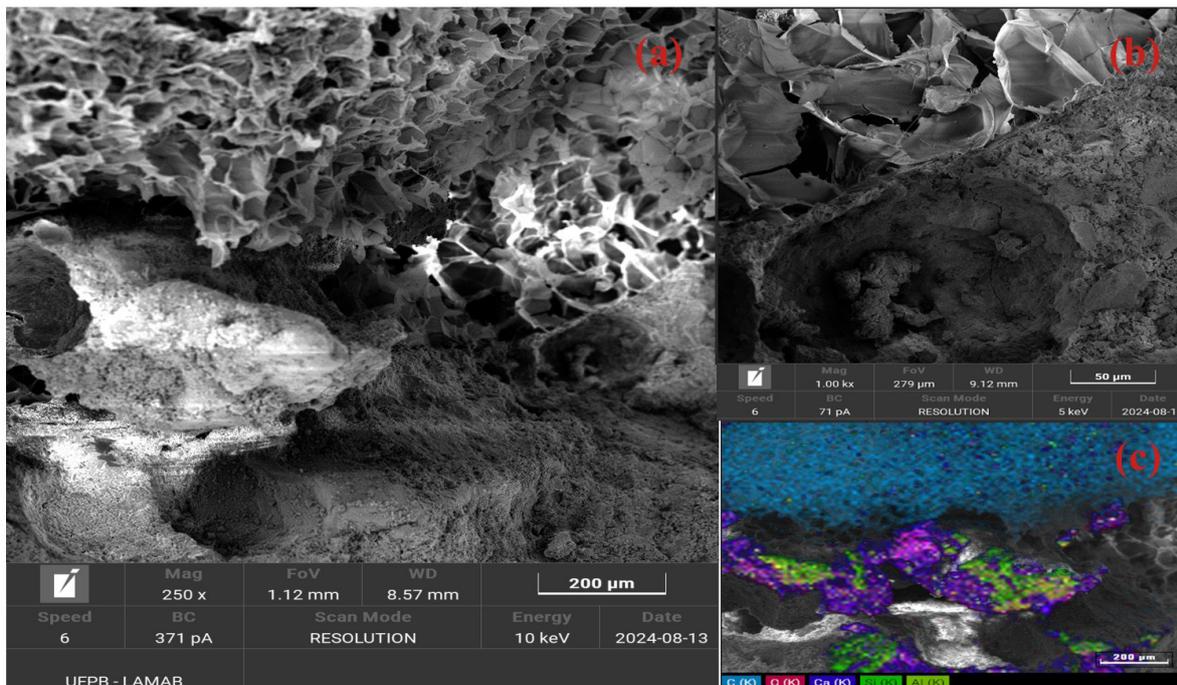


Figura 5. Fronteira entre a matriz cimentícia e o EPS da telha de concreto: (a) micrografia com ampliação de 250x; (b) micrografia com ampliação de 1000x; (c) distribuição química dos elementos na micrografia com 250x

Com base na Fig.5(a), a imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura com ampliação de 250x, a amostra apresenta morfologia heterogênea e a junção entre o EPS e a matriz cimentícia está bem definida, gerando, possivelmente, uma zona de transição entre os diferentes tipos de materiais. O EPS é visualizado na parte superior da imagem e apresenta uma texturização aberta do tipo “favo de mel” separada uma da outra por películas finas, bem diferente da matriz cimentícia que apresenta uma textura rugosa, que pode ser melhor visualizada na ampliação da imagem em 1000x, conforme Fig.5(b).

O uso de espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) possibilitou a análise qualitativa dos elementos, carbono (azul-claro), cálcio (azul-escuro) silício (verde-escuro), alumínio (verde-claro) presentes na amostra. Na Fig.5(c), o carbono está todo concentrado na parte superior da amostra,

característico do EPS. Já os outros elementos (Ca, Si e Al) estão distribuídos na matriz cimentícia. As micrografias apresentaram características semelhantes à de outros autores, como os trabalhos desenvolvidos por Laukaitis et al. [33] e Ferrándiz-Mas e García-Alcocel [34].

4. CONCLUSÃO:

Com o objetivo de produzir telhas de concreto com utilização de EPS, como agregado leve nas suas formulações, e estudar o efeito desse agregado nas propriedades tecnológicas das telhas obtidas, os resultados dos ensaios físicos e mecânicos das telhas produzidas atendem os requisitos da NBR 13858-2 [29]. A adição de 20% de EPS nas formulações proporcionou maior leveza às telhas de concreto estudadas, apresentando redução de peso de 11,10% com relação às telhas sem adição de EPS. A adição/substituição por EPS proporciona redução da resistência mecânica, mas não compromete a qualidade das telhas produzidas. Os teores de EPS estudados nessa pesquisa (15 e 20%) são promissores para a aplicação como agregado leve em composições de telhas cimentícias. De maneira geral, as propriedades encontradas para as telhas de concreto com EPS foram satisfatórias e estão de acordo com as normativas, podendo, assim, serem utilizadas na indústria da construção civil, tendo como principal vantagem uma maior leveza com relação às telhas de concreto convencionais e, possivelmente, melhor isolamento térmico.

REFERÊNCIAS:

- [1] Muller H M B, Schneider K W S, 2018. Análise de viabilidade técnica da utilização de telhas de concreto leve com adição de EPS como agregado miúdo em SINOP, MT. *Revista Construindo* 10 (2) 76-103.
- [2] Savastano Jr H, Agopyan V, Nolasco A M, Pimentel L L, 1999. Plant fibre reinforced cement components for roofing. *Construction & Building Materials* 13 (6) 433-438. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(99\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(99)00046-X)
- [3] Peixoto R A F, Tinoco I F F, Saraz J O, Paula M O, Gates R, 2010. Elaboración y evaluación de tejas de concreto en arcilla expandida para uso como coberturas de estructuras pecuárias. *Revista Facultad Nacional de Agronomía* 65 (2) 5651-5660
- [4] Damasceno F A, Macedo O A P, Oliveira J L, Oliveira C E A, Brandão L F, 2015. Propriedades físicas, mecânicas e térmicas de telhas de concreto fabricadas com adição de diferentes materiais isolantes. *Engenharia na Agricultura* 23 (5) 406-417. <https://doi.org/10.13083/reveng.v23i5.578>
- [5] Muniz-Gaal L P, Pezzuto C C, Carvalho M F H, Mota L T M, 2018. Eficiência térmica de materiais de cobertura. *Ambiente Construído* 18 (1) 503-518. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000100235>
- [6] Oliveira A M S, Gonzaga L G M, Ribeiro D F, 2018. Uso do poliestireno expandido como agregado em concreto leve: conceituação, aplicações e estado da arte. *Revista Vértices* 20 (3) 293-303. <https://doi.org/10.19180/1809-2667.v20n32018p293-303>
- [7] Assaad J J, Chakar E, Zehil G P, 2018. Testing and modeling the behavior of sandwich lightweight panels against wind and seismic loads. *Eng. Struct.* 175 (15) 457-466. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.041>
- [8] Youmna A Y A, Fahmy E H A, Abouzeid M N, Shaheen Y B I, Mooty M N A, 2020. Use of expanded polystyrene wastes in developing hollow block masonry units. *Construction and Building Materials* 241, 118149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118149>
- [9] Lakshmikandhan K N, Harshavardhan B S, Prabakar J, Saibabu S, 2017. Investigation on wall panel sandwiched with lightweight concrete. *Mater Sci Eng* 225, 1-15. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/225/1/012275>
- [10] Fathi M, Yousefipour A, Farokhy E H, 2017. Mechanical and physical properties of expanded polystyrene structural concretes containing micro-silica and nano-silica. *Construction and Building Materials* 136, 590-597. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.040>
- [11] Gonçalves P, Vasconcelos R, 2019. Avaliação térmica, física e mecânica de blocos de concreto com poliestireno expandido reciclado. *Ambiente Construído* 19 (4) 249-269. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000400249>
- [12] Babu D S, Babu K G, Tiong-Huan W, 2006. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites* 28 (6) 520-527. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.018>
- [13] Ranjbar M M, Mousavi S Y, 2015. Strength and durability assessment of self compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. *Materials and Structures* 48 (4) 1001-1011. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0210-6>
- [14] Chen B, Liu J, 2004. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cement and Concrete Research* 34 (7) 1259-1263. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.014>
- [15] Ravindrarajah R S, Tuck A J, 1994. Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads. *Cement and Concrete Composites* 16 (4) 273-277. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0958-9465(94)90039-6)
- [16] Chen B, Liu J, 2014. Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. *Construction and Building materials* 68, 227-232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.062>
- [17] Moutassem F, 2020. Ultra-lightweight EPS concrete: mixing procedure and predictive models for compressive strength. *Civil Engineering and Architecture* 8 (5) 963-972. <https://doi.org/10.13189/cea.2020.080523>
- [18] NBR 9776, 1987. Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

- [19] NBR NM 52, 2021. Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [20] NBR 16972, 2021. Agregados: determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [21] NBR NM 45, 2021. Agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [22] NBR NM 248, 2003. Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [23] NBR 16605, 2017. Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [24] NBR NM 23, 2001. Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [25] NBR 11579, 2021. Cimento Portland: determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [26] NBR 7215, 2019. Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [27] NBR NM 43, 2003. Cimento Portland: determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [28] NBR 13858-1 (parte 1), 1997. Telhas de concreto parte 01: projeto e execução de telhados. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [29] NBR 13858-2 (parte 2), 1997. Telhas de concreto parte 02: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [30] NBR 5738, 2015. Concreto: procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [31] NBR 5739, 2018. Concreto: ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [32] Ozório B P M, 2016. Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecânicas. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.18.2017.tde-07032017-102857>
- [33] Laukaitis A, Žurauskas R, Kerien J, 2005. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement and Concrete Composites* 27, 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.09.004>
- [34] Ferrándiz-Mas V, García-Alcoel E, 2012. Physical and mechanical characterization of Portland cement mortars made with expanded polystyrene particles addition (EPS). *Materiales de Construcción* 62, 547-566. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.04611>