

Concreto leve reforçado com macrofibras poliméricas

MOREIRA, Rafael Nascimento¹; LIMA, Paulo Roberto Lopes²

¹ Universidade Federal da Bahia.

² Universidade Estadual de Feira de Santana.

✉ rafaelnm@ufba.br

Resumo

A busca por edificações energeticamente eficiente tem incentivado o desenvolvimento de métodos construtivos que contribuam para um maior conforto térmico sem necessariamente aumentar o consumo de energia, principalmente em regiões de clima tropical. Diante disso, os sistemas de vedação são essenciais para obter um isolamento térmico passivo satisfatório, e a utilização de materiais com qualidades térmicas superiores são fundamentais para otimizar o desempenho térmico das paredes. O concreto leve se destaca por diminuir o peso dos componentes feitos em concreto maciço e, ao mesmo tempo, reduz a condutividade térmica. Este estudo busca desenvolver um concreto leve reforçado com macrofibras poliméricas de polipropileno, usando argila expandida como agregado leve. Foi utilizado o concreto reforçado com fibras com consumo de fibras de 10 kg/m³, e foram avaliadas três composições, a primeira sem argila expandida (AE0), a segunda composição com substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida em 50% do volume (AE50) e a última composição com 100% de argila expandida, sem brita (AE100). Foi avaliada a trabalhabilidade das misturas, foi determinada a massa específica no estado endurecido, a absorção de água e o comportamento térmico, além dos ensaios mecânicos de resistência à compressão e resistência residual à tração na flexão. Os resultados indicaram que o aumento da proporção de argila expandida causa reduções significativas na massa específica e na capacidade de condução de calor, mantendo um desempenho mecânico adequado para uso em painéis de fechamento. Também foi observada uma ligação direta entre a densidade e o comportamento térmico. O concreto leve reforçado com fibras produzido demonstra ser tecnicamente viável para uso em sistemas de fechamento vertical, contribuindo para melhorar o desempenho térmico das construções e a expandir as opções de soluções construtivas mais ecológicas e eficientes energeticamente.

Palavras-chave: Concreto reforçado com fibras, Concreto leve, Comportamento térmico.

1. Introdução

A crescente demanda por edificações energeticamente eficientes tem impulsionado o desenvolvimento de soluções construtivas que contribuam para o conforto térmico e a redução do consumo de energia. Em países tropicais como o Brasil, onde a climatização artificial é amplamente utilizada, estima-se que cerca de 49% da energia elétrica seja consumida com climatização e iluminação [1]. Nesse contexto, o uso de técnicas passivas, aliando decisões arquitetônicas ao emprego de materiais com melhores propriedades térmicas, torna-se essencial para uma construção mais sustentável [2,3].

Uma das estratégias que podem ser empregadas para melhorar o desempenho térmico dos sistemas de vedação vertical e, ao mesmo tempo, reduzir a massa dos elementos construtivos pré-moldados, é com o uso de concretos leves. Quando combinados com reforço por fibras, especialmente as macrofibras poliméricas, esses concretos podem atingir um equilíbrio entre resistência mecânica, trabalhabilidade e desempenho térmico [4,5].

Embora o uso isolado de agregados leves ou de fibras em matrizes cimentícias seja bem documentado na literatura, o impacto nas propriedades térmicas e mecânicas do uso simultâneo de elevados teores macrofibras poliméricas e argila expandida em matrizes cimentícias ainda carece de investigação sistemática [5,6]. Essa combinação tem potencial para aplicações inovadoras, como a fabricação de painéis de vedação pré-moldados, otimizando simultaneamente o peso estrutural e o isolamento térmico.

Diante disso, este artigo tem como objetivo avaliar o impacto da substituição volumétrica da brita por argila expandida (em teores de 50% e 100%) nas propriedades físicas, mecânicas e no comportamento térmico do concreto leve reforçado com macrofibras de polipropileno, visando a otimização do comportamento térmico de elementos construtivos para sistemas de vedação.

2. Metodologia

2.1. Materiais

Para a produção do concreto leve reforçado com fibras (CLRF) foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), areia fina e brita tipo pedrisco (brita 0). Também foi utilizado o aditivo superplastificante modelo MC Power Flow 3100 da MC Bauchemie. Como reforço primário foram utilizadas as macrofibras de polipropileno Kratos Macro PP 54 (Figura 1a), com 54 mm de comprimento, da marca KordSA Brasil. O agregado leve utilizado foi a argila expandida (Figura 1b) do tipo 1506 da Cinexpan. As principais propriedades da macrofibra de polipropileno e da argila expandida são indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades das macrofibras e do agregado leve.

Dados	Macrofibras de polipropileno	
Comprimento (mm)	$53,58 \pm 0,25$	
Diâmetro equivalente (mm)	$1,12 \pm 0,05$	
Área da seção transversal (mm ²)	$0,98 \pm 0,09$	
Resistência à tração direta	$350,96 \pm 27,56$	
Módulo de elasticidade	$5,35 \pm 0,42$	
Dados	Argila expandida	Brita o
Dimensão máxima (mm)	9,5	9,5
Massa específica (g/cm ³)	0,97	2,64
Absorção de água (%)	17,19	1,10



Figura 1 – Materiais: a) Macrofibras de polipropileno; b) Argila expandida.

Foram preparadas 3 misturas com diferentes proporções entre a brita e a argila expandida (Tabela 2), sendo uma mistura do concreto reforçado com fibras sem argila expandida (AEO), outra com substituição de 50% da brita por 50% da argila expandida em volume (AE50), e a última mistura sem brita, substituindo todo volume da brita por argila expandida (AE100). Todas as misturas foram produzidas com relação água/cimento de 0,5 e teor de aditivo superplastificante de 0,3% em relação à massa do cimento.

Tabela 2 – Composição das misturas (kg/m³).

Dados	AEo	AE50	AE100
Cimento	460,75 (1,00)	460,75 (1,00)	460,75 (1,00)
Areia	970,33 (2,11)	970,33 (2,11)	970,33 (2,11)
Brita	646,89 (1,40)	323,44 (0,7)	-
Argila expandida	-	118,84 (0,26)	237,68 (0,52)

2.2. Ensaios

Para avaliar o impacto da argila expandida na trabalhabilidade das misturas foram realizados os ensaios de espalhamento (*slump flow*) de acordo com a NBR 15823-2 [7], abatimento do tronco de cone (*slump test*) conforme a NBR 16889 [8], e espalhamento pela mesa Graff conforme descrito na NBR NM 68 [9].

Para caracterização física, foram realizados os ensaios de absorção de água por imersão [10] e absorção de água por capilaridade [11], utilizando 3 amostras com dimensões 10x20 cm para cada ensaio, ilustrados na Figura 2. Foram produzidos 2 painéis para cada composição com dimensões de 400x400x100 mm para avaliação do comportamento térmico. Foi desenvolvida uma câmara térmica, com estrutura central isolada em XPS para favorecer a condução pelo painel, posicionado entre as câmaras quente e fria. A câmara quente foi mantida a $(45 \pm 2) ^\circ\text{C}$ por 8 h, seguida de 16 h de resfriamento, totalizando 24 h de ensaio. O monitoramento foi realizado por sistema automatizado com Arduino e oito sensores de temperatura distribuídos nas câmaras e nas faces do painel, com controle da fonte de calor por relé.

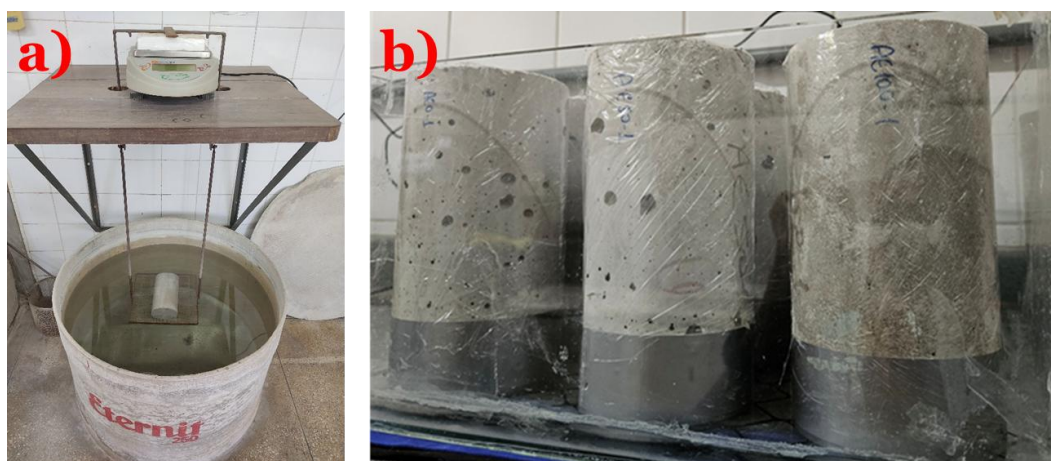


Figura 2 – Ensaios físicos: a) Absorção de água por imersão; b) Capilaridade.

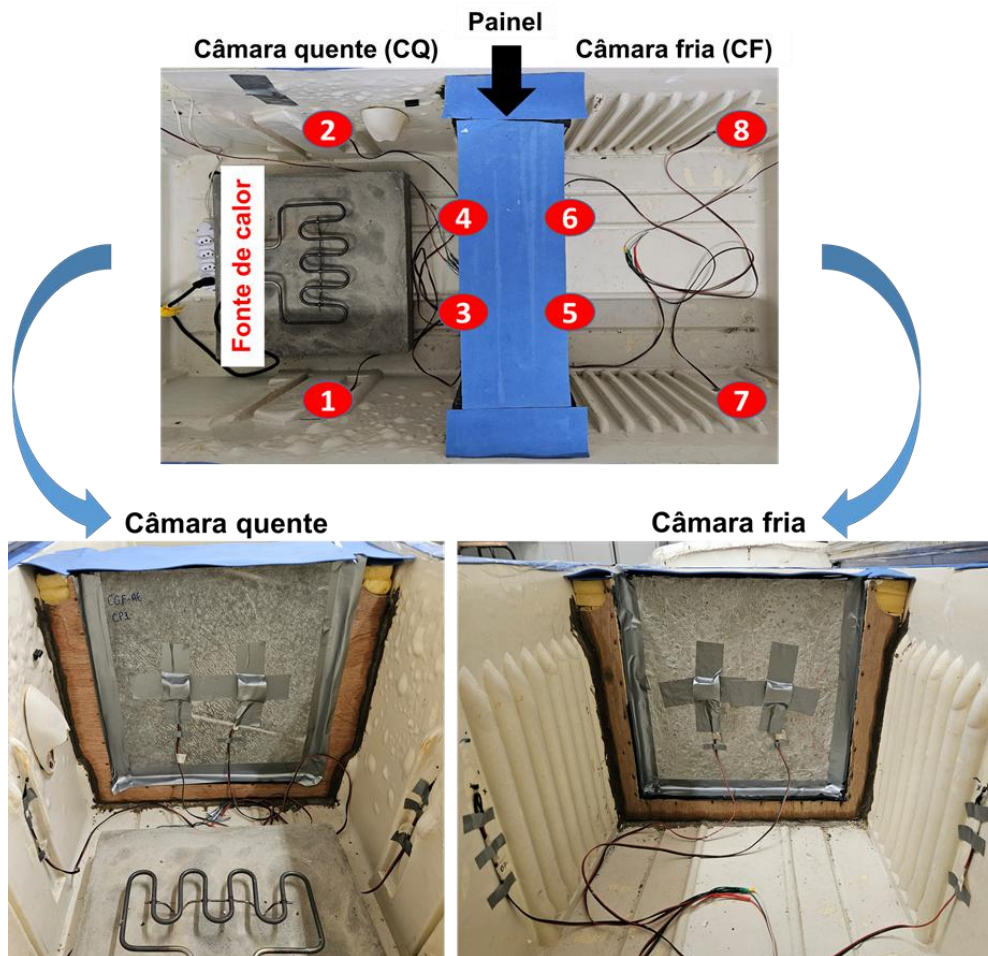


Figura 3 – Câmara para determinação do comportamento térmico.

Para a caracterização mecânica foram realizados os ensaios de resistência à compressão e a determinação da resistência residual à tração na flexão. O ensaio de compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739 [12], utilizando 3 corpos de prova de 10x20 cm para cada composição e uma máquina de ensaio universal servo eletro-hidráulica da marca Sinotest, modelo WAW-1000D, com capacidade de 1000 kN, com taxa de aplicação de carga de 0,45 MP/s. A determinação da resistência residual à tração na flexão seguiu as recomendações da NBR 16940 [13], foram produzidas 2 vigas de 150x150x550 mm para cada composição. O ensaio consiste em uma flexão em 3 pontos, com entalhe na região central inferior, carregamento centrado e distância entre apoios de 500 mm. Foi utilizada uma máquina de ensaio universal da marca Shimadzu, modelo AG-IC, com capacidade de 100 kN, com controle de deslocamento utilizando uma velocidade de carregamento de 2 mm/min.



Figura 4 – Ensaio mecânicos: a) Compressão axial; b) Tração na flexão em 3 pontos.

3. Resultados e discussão

3.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade das misturas AEO, AE50 e AE100 obtidas através dos ensaios *slump test*, *slump flow* e espalhamento na mesa Graff são apresentados na Figura 5. Foi observado que o *slump test* apresentou pouca diferença entre as misturas devido as variações da proporção entre brita e argila expandida, com diferença máxima de apenas 10 mm entre as misturas, enquanto os ensaios de *slump flow* e mesa Graff mostraram variações mais expressivas, de 65 mm e 75 mm, respectivamente, indicando maior sensibilidade quanto ao efeito da argila expandida na trabalhabilidade.

Embora a mistura AE100 apresentasse maior teor de agregado leve, foi a AE50 que demonstrou menor trabalhabilidade nos ensaios de espalhamento. Esse comportamento pode estar associado à água adicionada para compensar a absorção dos agregados leves e ao tempo necessário para sua saturação, sugerindo que, na AE100, parte da água pode não ter sido totalmente absorvida durante a mistura, elevando a relação água/materiais secos e, conseqüentemente, os valores de espalhamento.

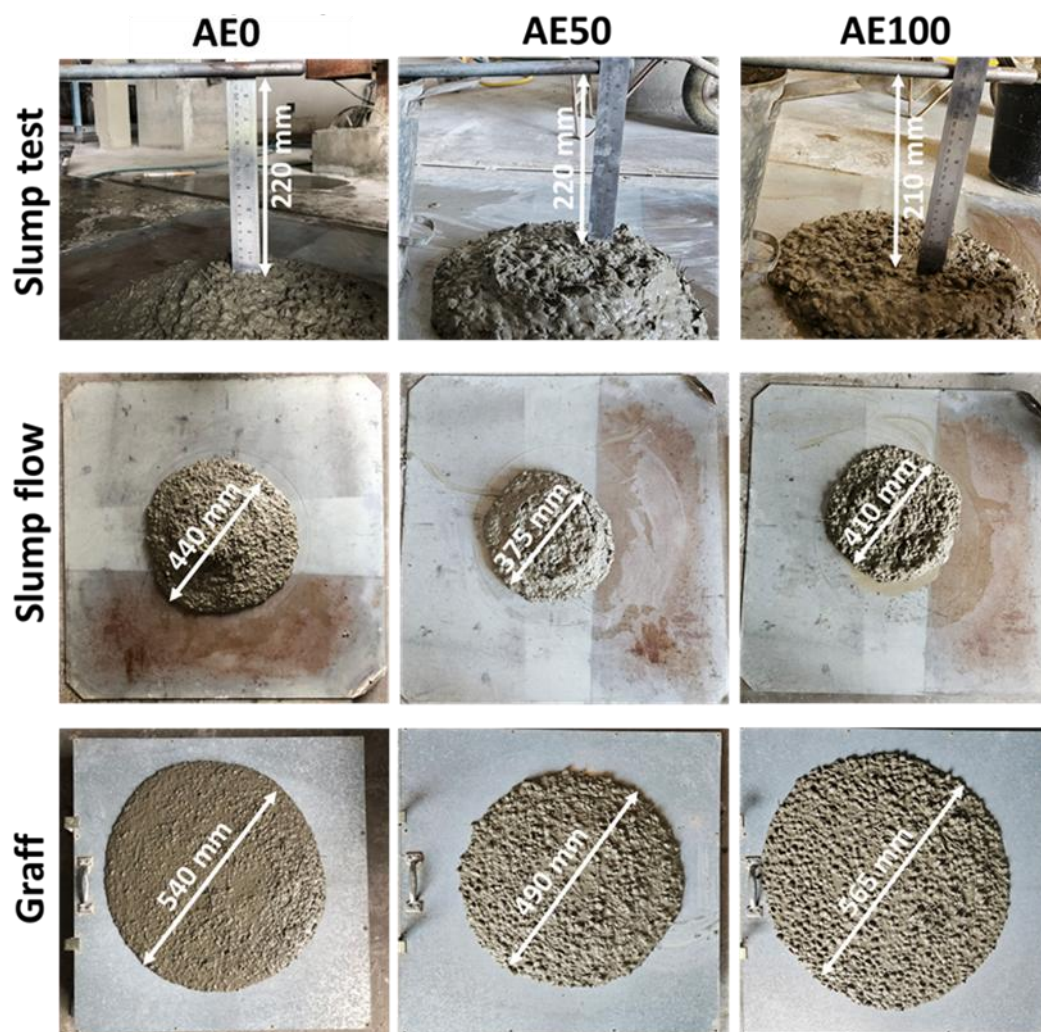


Figura 5 – Slump test, Slump flow e Graff das misturas CLRF.

3.2. Propriedades físicas

A Figura 6 apresenta os resultados de variação da massa específica seca das misturas, confirmando a capacidade da argila expandida de reduzir expressivamente a massa específica do concreto. Tanto a composição AE50 quanto a AE100 produziram concreto com massa específica seca abaixo de 2000 kg/m^3 , sendo considerado concreto leve de acordo com a NBR 8953 [14]. A diferença observada entre as composições foi de 12% entre AE0 e AE50 e de 19% entre AE0 e AE100. Ahmadi, Reisi e Sajadi [15], alcançou uma redução de 33% de densidade utilizando argila expandida com substituição simultânea nas faixas de agregado graúdo (5-12 mm) e agregado miúdo (0-5 mm). Assunção (2016) também observou uma redução de 27%.

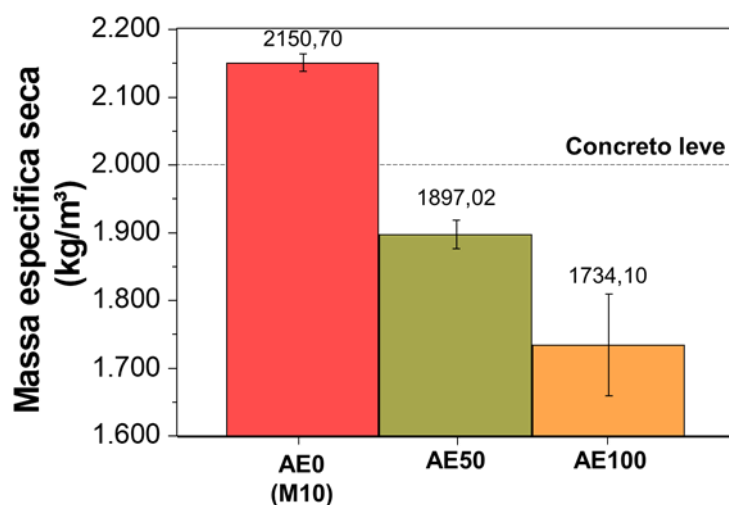


Figura 6 – Massa específica seca das misturas CLRF.

A absorção de água por imersão e o índice de vazios das amostras são indicados na Figura 7. Em relação a absorção de água, apenas as amostras AE100 apresentaram um aumento significativo em relação as composições AE0 (+32,7%) e AE50 (+30,8%). No índice de vazios, a única diferença confirmada estatisticamente através do teste Tukey foi entre AE50 e AE100, com um aumento de cerca de 20% com o aumento do teor volumétrico de argila expandida de 50% para 100%.

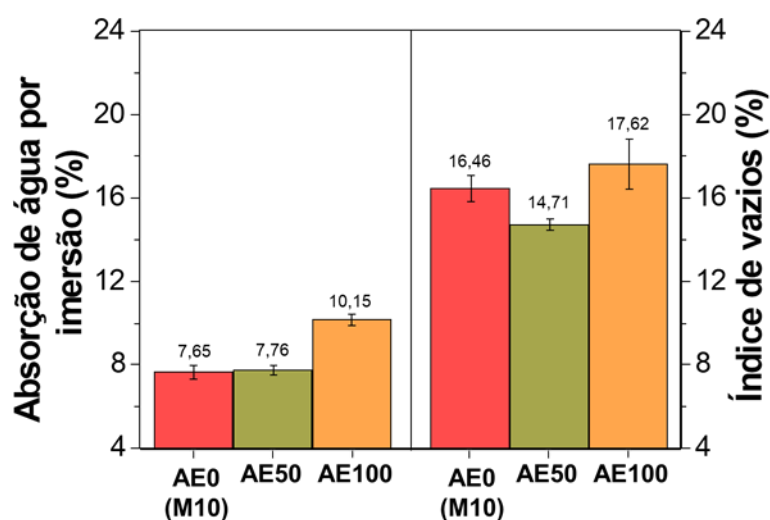


Figura 7 – Absorção de água por imersão e índice de vazios das misturas CLRF.

No ensaio de absorção de água por capilaridade apresentado na Figura 8, é possível observar que a taxa de absorção capilar nas primeiras horas é semelhante para todas as composições, mas a diferença entre elas tende a aumentar ao longo do tempo, com diferença significativa após 72h.

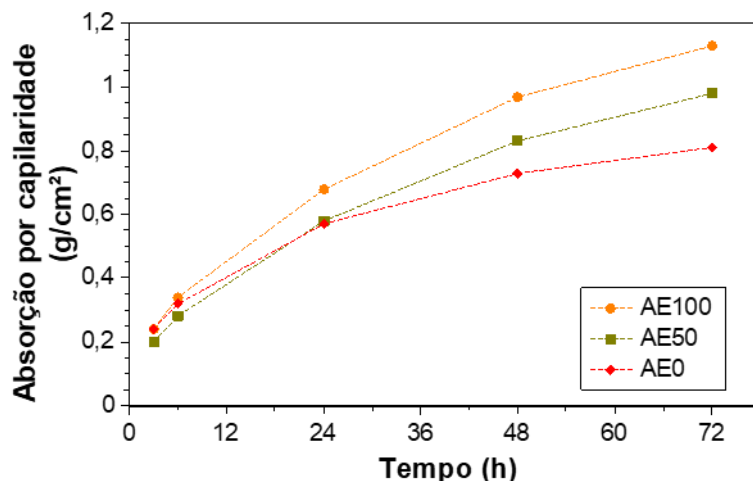


Figura 8 – Absorção de água por capilaridade das misturas CLRF.

Os resultados das propriedades físicas indicam que, embora a substituição parcial ou total por agregados leves seja eficaz para reduzir a densidade do concreto, ela deve ser cuidadosamente balanceada, especialmente quando o desempenho relacionado à durabilidade e à absorção de água for um requisito crítico. A composição com 50% de argila expandida (AE50) parece apresentar um maior equilíbrio entre a massa específica e o controle da porosidade.

3.3. Comportamento térmico

A Figura 9 apresenta a variação de temperatura (ΔT) registrada entre a face quente e a face fria das amostras produzidas com o CLRF. É possível observar inicialmente um aumento da diferença de temperatura entre os lados da placa, alcançando um pico por volta de 1h de ensaio, correspondendo ao tempo necessário para o fluxo de calor atravessar toda a espessura do painel (10 cm) e começar a esquentar o lado oposto da fonte de calor (câmara fria). A partir deste ponto, os sensores da câmara fria passam a elevar a sua temperatura gradualmente, reduzindo a diferença entre os lados da placa. Após 8h de ensaio, a fonte de calor é desligada e as câmaras tendem ao equilíbrio térmico, alcançando as temperaturas iniciais por volta de 24h.

Os resultados indicam uma tendência de aumento da diferença de temperatura entre as faces dos painéis com o aumento da fração volumétrica de agregado leve em relação ao agregado convencional, a variação de temperatura máxima ($\Delta T_{\text{máx}}$), alcançada em aproximadamente 50 minutos de ensaio, foi de 6,1°C, 7,6°C e 8,7°C para o AE0, AE50 e AE100, respectivamente. Entretanto, dentro do tempo de ensaio investigado, essa diferença entre as composições tende a reduzir, com ΔT após 8h de 4,8°C, 5,5°C e 6,0°C para o AE0, AE50 e AE100.

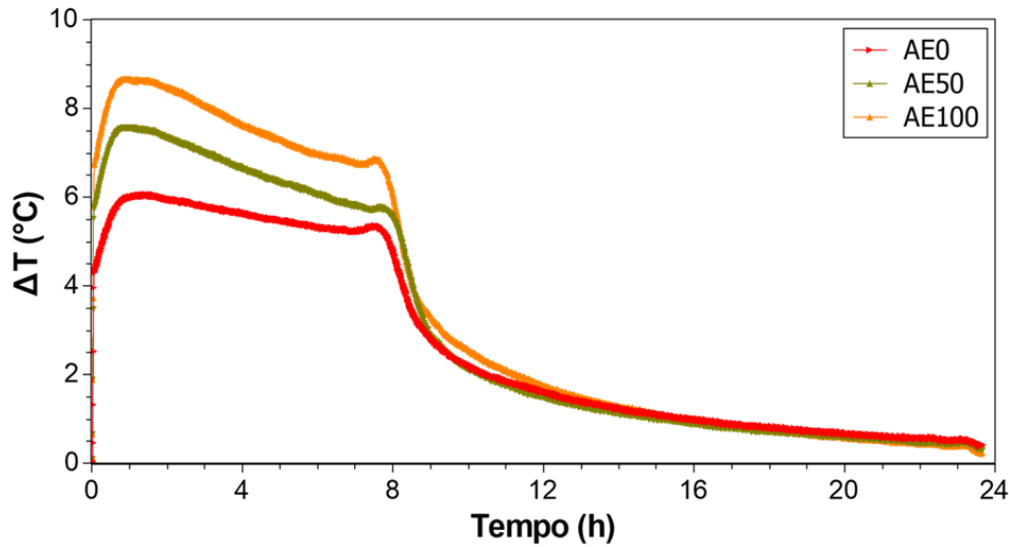


Figura 9 – Comportamento térmico dos painéis em CLRF.

A condutividade térmica dos materiais foi determinada através da Equação 1. Asadi et al. [16] desenvolveram essa expressão a partir da correlação de 185 dados experimentais disponíveis na literatura, apresentando um $R^2 = 0,81$. Além da condutividade térmica, a transmitância de cada painel foi calculada através das Equações 2 e 3.

$$\lambda = 0,0625 \exp^{0,0015\rho} \quad (1)$$

$$R_t = \frac{e}{k} \quad (2)$$

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (3)$$

Onde λ é a condutividade térmica do material (W/mK); ρ é a massa específica do material (kg/m^3); R_t é a resistência térmica do painel ($\text{m}^2\text{K/W}$); U é a transmitância térmica do painel ($\text{W/m}^2\text{K}$); R_T é a resistência térmica total do painel ($\text{m}^2\text{K/W}$), que corresponde a soma da resistência térmica do painel (R_t) com as resistências superficiais interna (R_{si}) e externa (R_{se}). A NBR 15220-2 [17] apresenta valores médios recomendados de resistências térmicas superficiais, portanto, considerando o fluxo de calor horizontal, foi adotado $R_{si} = 0,13$ e $R_{se} = 0,04$.

A Tabela 3 indica os valores estimados de condutividade e transmitância térmica do concreto leve reforçado com fibras. Houve uma redução expressiva na condutividade térmica, reduzindo cerca de 31% com o AE50 e 46% com o AE100. Valores semelhantes podem ser observados na literatura para substituições com esses mesmos teores, com redução da condutividade em torno de 28-41% para um teor de substituição de 50% de argila expandida e reduções de 34-48% para 100% de substituição entre os agregados [15,18,19]. Esse comportamento pode estar associado à redução da redução da massa específica (Figura 6) e ao aumento do índice de vazios (Figura 7). Como a argila expandida é um agregado mais poroso que a brita, sua substituição introduz maior volume de ar aprisionado no concreto. O ar aprisionado no interior do concreto atua como uma barreira física que dificulta o fluxo de calor através do painel de concreto [20–22].

Tabela 3 – Propriedades térmicas do CLRF.

Dados	ρ_s (kg/m ³)	λ (W/mK)	R_t (m ² K/W)	U (W/m ² K)
Painel de concreto (10 cm)*	2400,00	1,75	0,06	4,40
AEo (CRF M10)	2150,70	1,57	0,06	4,28
AE50	1897,02	1,08	0,09	3,80
AE100	1734,10	0,84	0,12	3,46

Em relação a transmitância térmica, considerando somente o sistema de vedação, sem revestimento, a composição AE100 foi a única que atendeu ao limite de desempenho térmico mínimo de 3,70 W/m²K [23]. Apesar de não alcançar o valor mínimo, houve uma redução de 11% na transmitância térmica dos painéis AEO para o AE50 e de 14% do AEO em relação ao valor de referência da norma.

Os resultados destacam o potencial da argila expandida como alternativa viável para otimizar as propriedades térmicas dos sistemas de vedação compostos por painéis pré-moldados, especialmente em contextos que demandam maior eficiência energética das edificações.

3.4. Resistência à compressão

A resistência à compressão do CLRF é apresentada na Figura 10, indicando uma tendência de redução da resistência à compressão com o aumento do teor de argila expandida, com efeito estatisticamente significativo entre AEO e AE100.

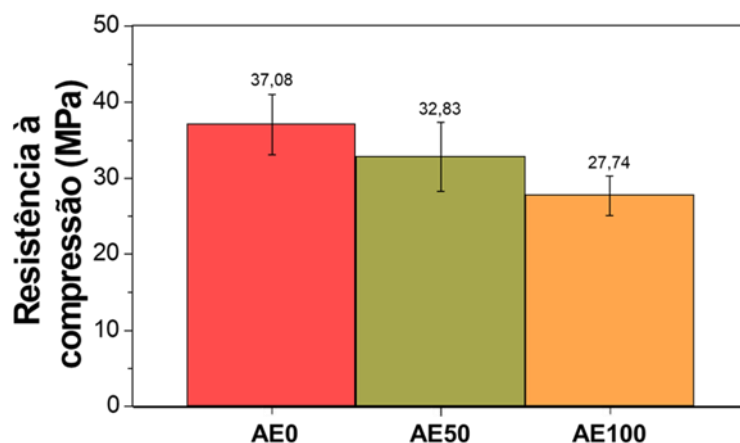


Figura 10 – Resistência à compressão do CLRF.

Essa redução é esperada quando se utiliza argila expandida como agregado no concreto, tanto no concreto leve comum, quanto no concreto leve reforçado com fibras [4,5,15,18]. Contudo, mesmo na composição AE100, foi possível alcançar resistência à compressão acima de 20 MPa com massa específica abaixo de 2000 kg/m³, podendo ser classificado como concreto leve estrutural [14].

A eficiência estrutural (f_c/ρ) é um parâmetro frequentemente utilizado para na caracterização de concreto leve. A eficiência dos CLRF foram de 17,24 MPa.dm³/kg, 17,31 MPa.dm³/kg e 16,00

MPa.dm³/kg, para AEO, AE50 e AE100, respectivamente. Portanto, foi possível constatar que todos os CLRF apresentaram o fator de eficiência compatível com o concreto leve estrutural, entre 10 MPa.dm³/kg e 25 MPa.dm³/kg [24]. Grabois, Cordeiro e Toledo Filho [4] encontrou uma eficiência do semelhante do concreto leve com argila expandida e fibras de aço, com 18,56 MPa.dm³/kg.

A Figura 11 ilustra o modo de ruptura das amostras CLRF. As rupturas da maioria das amostras foram do tipo ruptura cisalhada e cisalhada com formação de colunas. Na ruptura do concreto leve com argila expandida, a zona de transição geralmente não é danificada e a ruptura tende a acontecer na argamassa, com a superfície de fratura atravessando os agregados, como em concretos de alta resistência [4,25].

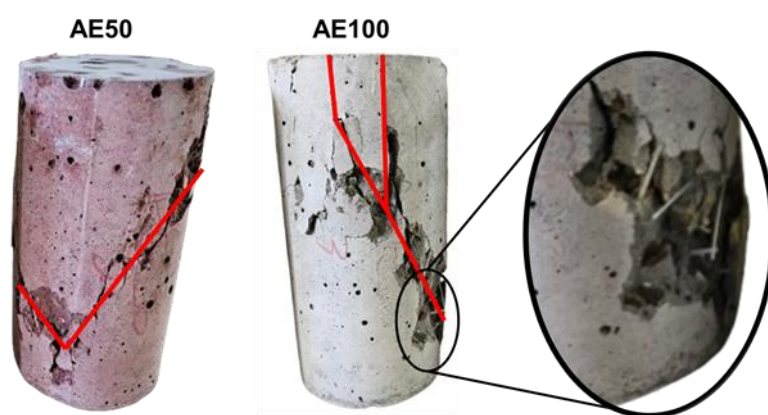


Figura 11 – Modo de ruptura sob compressão do CLRF.

3.5. Resistência residual à tração na flexão

A Tabela 4 e Figura 12 apresentam os resultados resistência residual à tração na flexão das amostras de CLRF. O limite de proporcionalidade apresenta uma redução estatisticamente significativa com o aumento do teor volumétrico de argila expandida. Geralmente este parâmetro é comandado pela resistência da matriz, como houve uma redução expressiva da resistência no AE100, o mesmo comportamento é observado no limite de proporcionalidade. Por outro lado, não foi identificada diferença significativa entre as resistências residuais no CMOD₃ (f_{R3}), visto que após a fissuração quem comanda a resistência residual são as fibras, e o teor em todas as composições foi o mesmo, com 10 kg/m³ de macrofibras de polipropileno.

Tabela 4 – Resistência e tenacidade na flexão do CLRF.

Dados	f _L (MPa)	f _{R,1} (MPa)	f _{R,3} (MPa)	T _f (N/mm)
AEO (CRF M10)	4,92 ± 0,55 (11,14)	3,18 ± 0,05 (1,65)	4,64 ± 0,31 (6,77)	17,01 ± 0,76 (4,46)
AE50	3,66 ± 0,06 (1,69)	3,07 ± 0,02 (0,58)	4,67 ± 0,40 (8,52)	16,70 ± 0,76 (4,57)
AE100	2,67 ± 0,13 (4,89)	2,62 ± 0,08 (2,93)	4,12 ± 0,08 (1,88)	14,32 ± 0,05 (0,35)

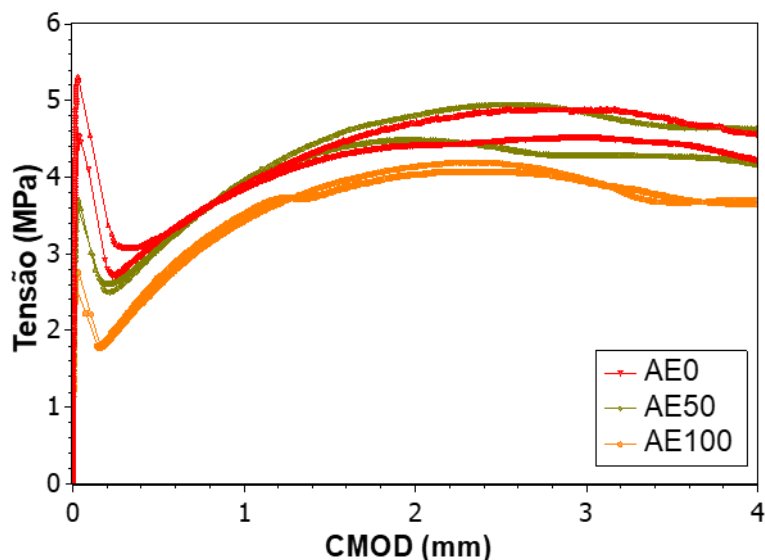


Figura 12 – Resistência residual à tração na flexão do CLRF.

Apesar de não haver diferença estatisticamente significativa na resistência residual, é possível observar uma perceptível diferença no diagrama da Figura 12, com a curva do AE100 posicionada um pouco abaixo das demais. Essa diferença de comportamento no pós-fissuração pode ser identificada ao determinar a tenacidade na flexão (T_f), obtida através da integração numérica entre 0-4 mm e apresentada na Tabela 4, sendo observado uma redução de 16% entre a AE0 e AE100.

Os resultados mecânicos indicam que, embora a substituição do agregado graúdo por argila expandida reduza a resistência da matriz, o uso de macrofibras de polipropileno é eficaz em preservar a capacidade resistente após a fissuração, mantendo o desempenho em flexão em níveis adequados para aplicações estruturais.

4. Conclusões

A partir dos resultados apresentados é possível destacar:

- A composição AE50 apresentou menor trabalhabilidade em comparação com o AE0 e o AE100, mas essa diferença pode estar relacionada ao tempo de saturação dos agregados leves, fazendo com que a água adicionada para correção da absorção de água do agregado leve não seja absorvida por completo durante o tempo de mistura, elevando a trabalhabilidade da mistura AE100.
- Houve redução contínua da massa específica com o aumento do teor de argila expandida, mantendo-se abaixo de 2000 kg/m^3 nas composições AE50 e AE100, podendo ser classificadas como concretos leves. A absorção de água por imersão aumentou significativamente apenas na AE100 e o índice de vazios também cresceu de forma significativa entre AE50 e AE100.

- O aumento da proporção de agregado leve melhorou o desempenho térmico dos painéis, reduzindo a condutividade e a transmitância térmica, contudo, a composição AE100 foi a única a atender ao requisito mínimo da norma de desempenho referente a transmitância térmica em sistemas de vedação vertical sem revestimento.
- A substituição do agregado convencional por argila expandida reduziu a resistência à compressão do CLRF, mas manteve todas as composições com resistência acima de 20 MPa, podendo ser classificado como concreto leve estrutural.
- O limite de proporcionalidade diminuiu com o aumento da fração de agregado leve, refletindo a menor resistência da matriz. Em contrapartida, as resistências residuais (f_{R3}) não apresentaram variação significativa entre as composições, indicando que o comportamento pós-fissuração continua sendo comandado pelas fibras.

Portanto, o estudo demonstra que a utilização da composição AE100 com macrofibras de polipropileno viabiliza a produção de painéis pré-moldados de vedação vertical mais leves e que atendem aos requisitos normativos de conforto térmico. Esta solução construtiva promove uma maior eficiência energética nas edificações, entregando um material com comportamento mecânico adequado e redução direta na carga estrutural das construções.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESB, ao CNPq e a UEFS pelo auxílio financeiro. Os autores também agradecem a KordSA Brasil e a MC Bauchemie pelos materiais disponibilizados.

Referências

- [1] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Balanço Energético Nacional, (2022). <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf> (accessed September 19, 2022).
- [2] P.K. Latha, Y. Darshana, V. Venugopal, Role of building material in thermal comfort in tropical climates - A review, *Journal of Building Engineering* 3 (2015) 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.06.003>.
- [3] G. Torelli, M.G. Fernández, J.M. Lees, Functionally graded concrete: Design objectives, production techniques and analysis methods for layered and continuously graded elements, *Constr. Build. Mater.* 242 (2020) 118040. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118040>.

- [4] T.M. Graboios, G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers, *Constr. Build. Mater.* 104 (2016) 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.060>.
- [5] P. Shafigh, Z.C. Muda, S. Beddu, A. Zakaria, Z. Almkahal, Thermo-mechanical efficiency of fibre-reinforced structural lightweight aggregate concrete, *Journal of Building Engineering* 60 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105111>.
- [6] T.M. Ismael, S.D. Mohammed, Structural performance of fiber-reinforced lightweight concrete slabs with expanded clay aggregate, in: *Mater. Today Proc.*, Elsevier Ltd, 2021: pp. 2901–2908. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.746>.
- [7] NBR 15823-2, Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams, (2017) 5.
- [8] NBR 16889, Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, (2020).
- [9] NBR NM 68, Concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento na Mesa de Graff, (1998) 10.
- [10] NBR 9778, Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, (2005) 4.
- [11] NBR 9779, Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água por capilaridade, (2012).
- [12] NBR 5739, Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, (2018).
- [13] NBR 16940, Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio, (2021).
- [14] NBR 8953, Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência, (2015) 3.
- [15] S.F. Ahmadi, M. Reisi, S.M. Sajadi, Comparing properties of foamed concrete and lightweight expanded clay aggregate concrete at the same densities, *Case Studies in Construction Materials* 19 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02539>.
- [16] I. Asadi, P. Shafigh, Z.F. Bin Abu Hassan, N.B. Mahyuddin, Thermal conductivity of concrete – A review, *Journal of Building Engineering* 20 (2018) 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.002>.

- [17] NBR 15220-2, Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo de transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações, (2005).
- [18] A.F. Angelin, R.C.C. Lintz, L.A.G. Barbosa, Uso da argila expandida e sílica ativa no melhoramento dos desempenhos mecânicos, físicos e térmicos de concretos leves estruturais, *Revista Materia* 22 (2017). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170005.0276>.
- [19] H.M. Sacht, J.A.; Rossignolo, W.N.; Santos, Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida, *Revista Matéria* (2010) 31–039. <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11099AutorResponsável:HeleniceMariaSachtDatadeenvio:30/05/08Datadeaceite:08/03/10>.
- [20] S.K. Adhikary, D.K. Ashish, H. Sharma, J. Patel, Ž. Rudžionis, M. Al-Ajamee, B.S. Thomas, J.M. Khatib, Lightweight self-compacting concrete: A review, *Resources, Conservation and Recycling Advances* 15 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200107>.
- [21] M. Davraz, M. Koru, A.E. Akdağ, The Effect of Physical Properties on Thermal Conductivity of Lightweight Aggregate, *Procedia Earth and Planetary Science* 15 (2015) 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.022>.
- [22] S. Real, J.A. Bogas, G.M. Glória, B. Ferrer, Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete, *Magazine of Concrete Research* 68 (2016) 798–808. <https://doi.org/10.1680/jmacr.15.00424>.
- [23] NBR 15575-4, Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE, (2013).
- [24] H.K.S. Rodrigues, H.A. de Oliveira, F.M.C. de Melo, V.G. de O. Almeida, Properties of structural lightweight concrete with expanded clay and the granite cut waste, *Revista Materia* 27 (2022). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220001.1353>.
- [25] J.A. Bogas, A. Gomes, Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete - Characterization and strength prediction, *Mater. Des.* 46 (2013) 832–841. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.004>.