



REFORÇO DE CONCRETO CELULAR POR PINOS POLIMÉRICOS E UTILIZAÇÃO COMO NÚCLEO DE PAINÉIS SANDUÍCHE

Aramburu, A. B.^{1,*}; Pereira, A. C. M.¹; Gimnecki, R. D.²; Amico, S. C.¹; Delucis, R.A.³

¹ PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. arthur.aramburu@ufrgs.br; caroline.muller@ufrgs.br; amico@ufrgs.br.

² Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), R. Sarmiento Leite, 425, Porto Alegre, Brasil. raphael.gimnecki@ufrgs.br

³ PPGCEM, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), R. Gomes Carneiro, 01, Pelotas, Brasil. rafael.delucis@ufpel.edu.br

**autor correspondente*

RESUMO

O concreto celular autoclavado (AAC) é um material leve com boas propriedades de isolamento, mas com resistência mecânica relativamente baixa. Este trabalho focou no reforço do AAC com pinos de poliéster insaturado e utilização como núcleo em painéis sanduíche com faces de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP). Para estudar a cura dos pinos dentro do AAC, análises térmicas por DSC e termografia foram conduzidas. Três diferentes espessuras de núcleo (17, 35 e 50 mm) foram testadas e os painéis foram também analisados quanto ao seu comportamento mecânico em flexão. Houve um leve aumento na T_g dos pinos curados dentro do AAC, e um aumento significativo, de até 125%, na resistência ao cisalhamento do núcleo dos painéis reforçados com pinos comparado aos não-reforçados.

Palavras-chave: Poliéster insaturado, concreto celular autoclavado, reforço com pinos, painel sanduiche.

INTRODUÇÃO

O concreto celular autoclavado (AAC) é um material de construção com densidade reduzida devido a sua estrutura porosa, proporcionando excelente isolamento acústico e térmico, alta resistência ao fogo e bom desempenho sísmico

(1). No entanto, o AAC convencional possui propriedades mecânicas relativamente baixas e necessita ser reforçado para alcançar aplicações estruturais. O AAC reforçado com barras de aço (RAAC) é amplamente utilizado para este fim, mas enfrenta problemas de corrosão pela penetração de agentes deletérios na estrutura porosa do AAC, como o dióxido de carbono, umidade e cloretos.

Nesse contexto, a aplicação do conceito de painel sanduíche pode ser uma alternativa eficaz para reforçar o AAC. Esses painéis têm duas faces finas separadas por um núcleo espesso, formando uma estrutura leve com excelente relação resistência/peso. As faces isolam o núcleo do meio exterior e suportam as tensões de tração e compressão normais, enquanto o núcleo resiste ao cisalhamento e redistribui forças normais (2).

Polímeros reforçados com fibras (FRP) são comumente usados como material da face desses painéis devido à sua alta resistência química, boas propriedades mecânicas e baixa densidade (3). O FRP pode assim melhorar as propriedades do AAC, mantendo a leveza e tornando-o adequado para diversas aplicações na construção. Além disso, o AAC pode ser reforçado com pinos poliméricos para melhorar sua performance em compressão, flexão e resistência ao impacto, e até mesmo a adesão do núcleo com as faces dependendo do método de aplicação (4).

Este estudo propõe usar conceitos de painéis sanduíche para reforçar o AAC, usando GFRP nas faces e pinos de poliéster no núcleo. Três espessuras diferentes de painel foram investigadas, e foram avaliados efeitos físicos e mecânicos dos pinos, na intenção de obter um material de construção leve e otimizado.

MATERIAIS E MÉTODOS

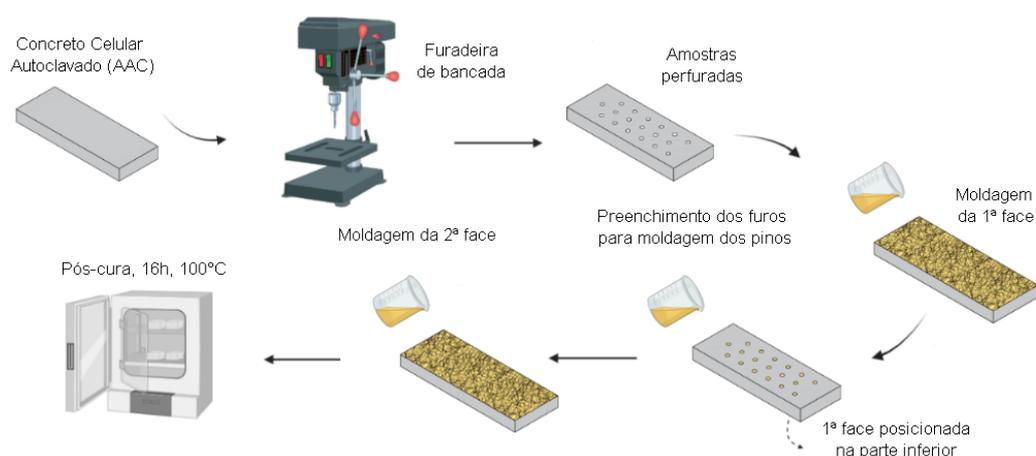
Seleção e caracterização de materiais

Resina poliéster insaturada ortoftálica (UPR, Embrapol, Brasil) com alto teor de monômero de estireno (41-47%) foi utilizada tanto nas faces quanto nos pinos poliméricos do painel sanduíche. Peróxido de metiletilcetona (MEKP) foi utilizado como iniciador para a cura da UPR, com 1,5% em peso de resina. Mantas de *E-glass* de orientação aleatória (Owens Corning, 300 g/m²) foram usadas para fabricar as faces. Blocos de AAC (dimensões: 600 × 300 × 75 mm) foram adquiridos da empresa Sical (Brasil).

Fabricação dos painéis

Os blocos de AAC foram cortados no tamanho de $17 \times 75 \times 200 \text{ cm}^3$, $35 \times 75 \times 200 \text{ cm}^3$ e $50 \times 75 \times 200 \text{ cm}^3$, e cada painel sanduíche foi fabricado separadamente como está ilustrado na Fig. 1. Para tal, os furos foram feitos com uma furadeira de bancada e a fabricação foi realizada em três etapas. Uma face foi produzida por laminação manual usando um rolo de pressão, com apenas uma camada de manta de fibra de *E-glass*. Após 24 h de cura da resina à temperatura ambiente ($\approx 23^\circ\text{C}$), as amostras foram viradas, posicionando a face para baixo para preencher os furos com UPR. Após o preenchimento dos furos, ocorreu a cura dos mesmos (24 h a $\approx 23^\circ\text{C}$). Na última etapa, a segunda face foi moldada usando o mesmo método da primeira. Todos os painéis foram posteriormente pós-curados por 16 h a 100°C em uma estufa.

Figura 1 – Processo de fabricação dos painéis sanduíche.



Os furos foram perfurados a 45° em relação ao plano do bloco para obter uma estrutura semelhante a uma treliça dentro do núcleo. Todos os pinos têm diâmetro de 6 mm e o espaçamento entre eles é de 25 mm, com base em pesquisas anteriores do grupo. Para comparação, foram fabricados painéis sanduíche sem pinos para cada espessura de núcleo estudada, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Configuração dos grupos estudados.

Grupo	Espessura AAC	Face	Pinos poliméricos
CON35	35 mm	–	–
SP17	17 mm	1 manta de <i>vidro</i>	–
SP35	35 mm	1 manta de <i>vidro</i>	–
SP50	50 mm	1 manta de <i>vidro</i>	–
SP17PIN	17 mm	1 manta de <i>vidro</i>	18 pinos, $\pm 45^\circ$, $\varnothing = 6 \text{ mm}$

SP35PIN	35 mm	1 manta de <i>vidro</i>	18 pinos, $\pm 45^\circ$, $\varnothing = 6$ mm
SP50PIN	50 mm	1 manta de <i>vidro</i>	18 pinos, $\pm 45^\circ$, $\varnothing = 6$ mm

Caracterização

Como os pinos de UPR estão confinados no AAC, um material isolante térmico, é importante que as condições de pós-cura sejam suficientes para uma adequada reticulação da resina poliéster. Para isso, foram fabricados corpos-de-prova e comparados tempos de pós-cura de 2 h e 16 h, mantendo a temperatura em 80 °C. Após, os pinos poliméricos foram removidos do AAC e preparados para análise por calorimetria diferencial de varredura (DSC). Para fins de comparação, uma amostra de UPR puro foi curada com os mesmos parâmetros e pós-curada fora do AAC por 2 h a 80 °C. A análise de DSC foi realizada em um calorímetro Q20 (TA Instruments) sob atmosfera de nitrogênio a uma taxa de fluxo de 50 mL.min⁻¹. As amostras foram aquecidas, resfriadas e novamente aquecidas na faixa de 25 a 200 °C, a uma taxa de 10 °C.min⁻¹.

A temperatura que os pinos atingem dentro do AAC deve ser suficiente para induzir a reticulação da cadeia polimérica. Para avaliar esse parâmetro, os espécimes SP17PIN, SP35PIN e SP50PIN foram fabricados com apenas a face inferior, permitindo que a superfície superior fosse analisada por processamento de imagem. As amostras foram curadas por 24 h à temperatura ambiente e 2 h a 80 °C. Imediatamente após esse tempo, uma câmera térmica Fluke Ti400 foi usada para monitorar a temperatura durante o resfriamento das amostras.

A morfologia da superfície das faces e sua interface com o AAC foi analisada utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM). A SEM foi realizada em um equipamento ZEISS EVO MA10 com uma tensão de 10 kV, uma distância de trabalho de 8,5 mm e com ampliações de 200–5000×.

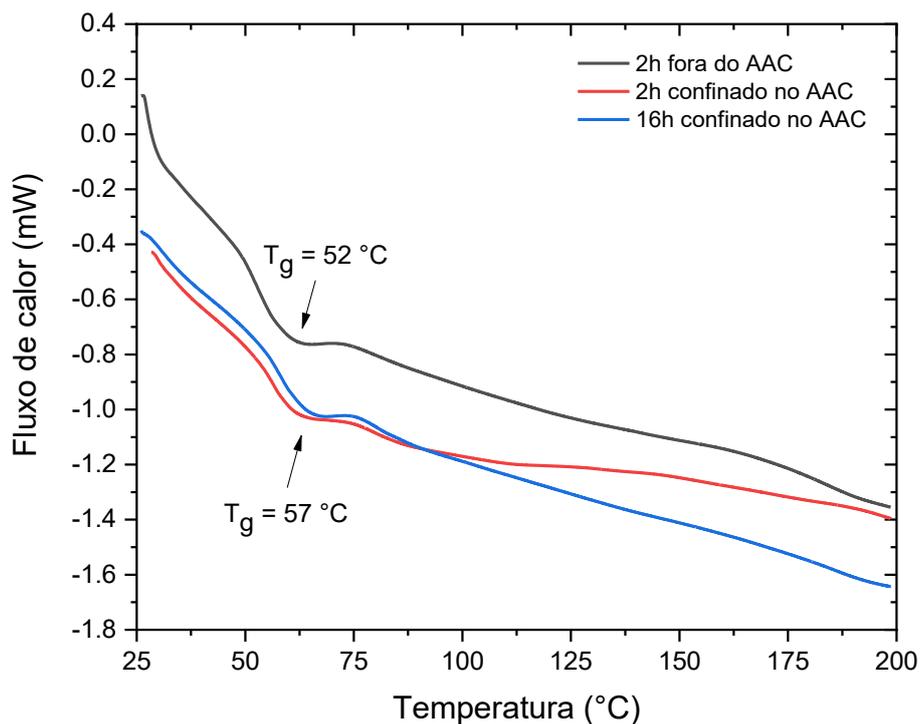
Testes de flexão em três pontos foram realizados em painéis sanduíche não-reforçados e reforçados usando as amostras SP17, SP35, SP50, SP17PIN, SP35PIN, e SP50PIN, com dimensões 75 mm × 200 mm (comprimento × largura). Foi utilizado um vão fixo de 150 mm, conforme a norma ASTM C393, para induzir falhas por cisalhamento no núcleo dos painéis. Cinco espécimes de cada grupo foram testados em uma máquina de ensaio universal Instron 3382 a uma velocidade de 1 mm/min.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Efeito do AAC na pós-cura do UPR

A análise DSC dos pinos sob diferentes condições de pós-cura, apresentada na Fig. 2, revelou um pequeno aumento da temperatura de transição vítrea (T_g) para a UPR confinada do AAC, comparado ao UPR não-confinado. Tipicamente, a T_g tende a aumentar à medida que a temperatura e a duração da pós-cura aumentam (6). Uma pós-cura mais intensa, envolvendo temperatura mais altas e tempos mais longos, resultariam em um maior grau de reticulação, o que restringe o movimento das cadeias poliméricas e leva a uma T_g mais alta (7). Com relação ao tempo de pós-cura, observou-se que a amostra confinada pós-curada por 2 h apresentou uma T_g semelhante àquela pós-curada por 16 h no concreto celular confinado. Assim, a duração da pós-cura não foi o fator determinante nos resultados obtidos.

Figura 2 – Análise DSC de UPR sob diferentes condições de pós-cura.

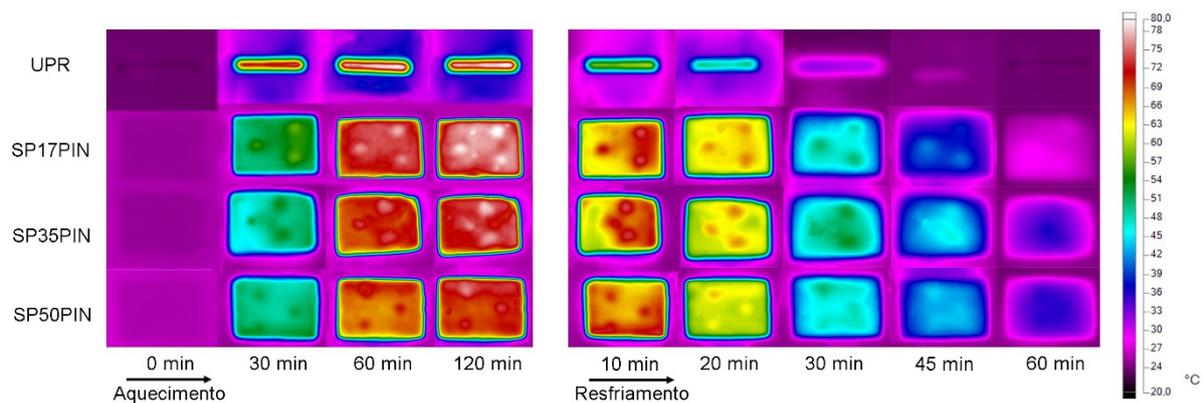


Para complementar essa análise, foram investigados os perfis de aquecimento/resfriamento de amostras com diferentes tamanhos de núcleo, juntamente com uma amostra de UPR não-confinada, todas pós-curadas por 2 h. Os resultados estão apresentados na Fig. 3, onde nota-se que a amostra de UPR pós-curada fora do AAC apresentou um aumento mais rápido de temperatura, atingindo temperaturas superiores a 70 °C em apenas 30 min, sendo que esse nível de

temperatura requereu quase 60 min no caso das amostras sanduíche. Além disso, a temperatura dos pinos confinados dentro do AAC permaneceu mais alta que a do próprio AAC durante todo o teste.

Após o término das 2 h de pós-cura, as amostras foram colocadas à temperatura ambiente ($\approx 23\text{ }^{\circ}\text{C}$), reduzindo sua temperatura lentamente, porém a uma taxa mais alta à medida que a espessura do painel diminuía, como esperado pela razão entre volume do bloco e a área de superfície do núcleo de AAC. Essa variação mais é benéfica e provavelmente contribuiu para uma T_g mais alta observada nos resultados de DSC. Além disso, é possível que os componentes minerais do AAC tenham interferido na T_g do material (8).

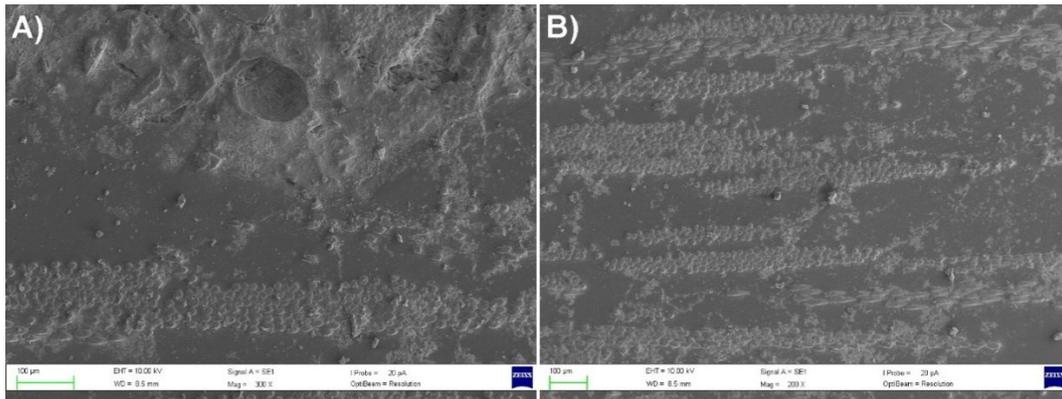
Figura 3 – Imagens de termografia de UPR puro e de painéis reforçados com pinos após 2 h de pós-cura e 1 h de resfriamento à temperatura ambiente.



Impregnação da resina e qualidade da face composta

A Fig. 4 mostra uma imagem de MEV da seção transversal da interface entre a face de GFRP e o núcleo de AAC, onde se nota uma boa ancoragem mecânica, que pode ser atribuída à baixa viscosidade da resina, que permitiu sua permeação nos poros do AAC. A elevada porosidade do concreto estudado favorece essa adesão, pelo travamento mecânico significativo (5). As imagens também mostram que as fibras foram bem impregnadas pela UPR, o que é crucial para formar a interface que permita a transmissão de carga da UPR para as fibras de vidro.

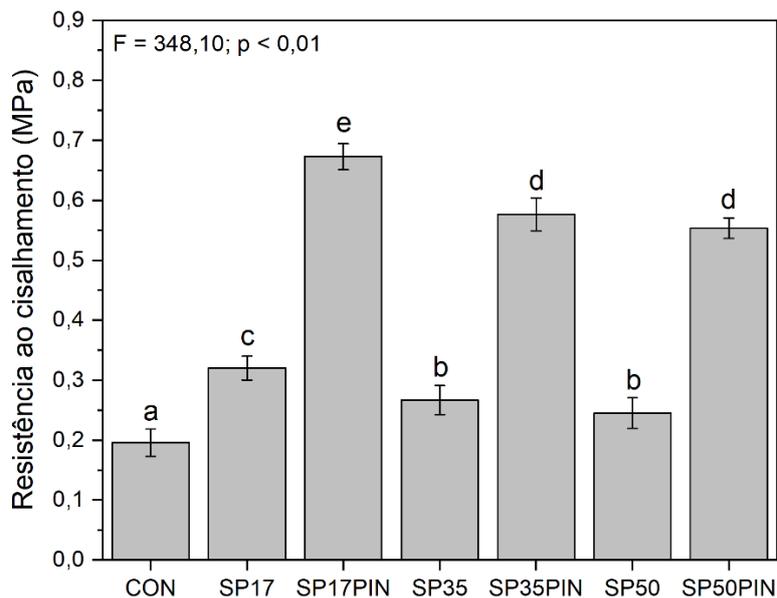
Figura 4 –MEV da interface AAC/face (A), e distribuição de fibras na face (B).



Comportamento em flexão

No ensaio de flexão, o mecanismo de falha observado em todas as amostras foi o cisalhamento no núcleo, como esperado pela configuração do ensaio, com um vão pequeno entre os apoios. Ao reforçar o núcleo de AAC com pinos poliméricos de 6 mm de diâmetro, a resistência ao cisalhamento do núcleo dos painéis aumentou em relação aos painéis não-reforçados, como mostra a Fig. 5. De fato, melhorias de 110%, 116% e 125% foram observadas para os painéis de 17 mm, 35 mm e 50 mm, respectivamente. Ou seja, há uma tendência de que a capacidade de reforço dos pinos aumenta para núcleos mais espessos. Esse comportamento pode estar relacionado também ao momento de inércia do bloco, que aumenta exponencialmente com sua espessura.

Figura 5 – Resistência ao cisalhamento do núcleo dos painéis estudados.



CONCLUSÃO

Esta pesquisa focou na melhoria do comportamento em flexão plana de painéis sanduíche de face GFRP e núcleo AAC reforçado com pinos de UPR. Pinos de 6 mm de diâmetro, orientados a 45°, foram avaliados, e a interação entre GFRP, AAC e UPR foi analisada. A análise DSC confirmou que os pinos estavam totalmente curados, com pequeno aumento na temperatura de transição vítrea para os pinos de UPR confinados no AAC. Os pinos poliméricos no AAC aumentaram significativamente a resistência ao cisalhamento dos núcleos, com melhoras de 110%, 116% e 125% para espessuras de núcleo de 17 mm, 35 mm e 50 mm, respectivamente.

Os resultados obtidos apontam para benefícios práticos do uso de pinos de poliéster como reforço de painéis GFRP/AAC em termos de capacidade de carga, flexibilidade de design e integridade estrutural, tornando esses painéis uma opção atraente para várias aplicações na construção, mantendo ainda a leveza e o baixo custo característicos do AAC.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- (1) CHAI, G. B.; ZHU, S. A review of low-velocity impact on sandwich structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, PART L: JOURNAL OF MATERIALS: DESIGN AND APPLICATIONS*, v. 225, p. 207–230, 2011. doi.org/10.1177/1464420711409985.
- (2) BIRMAN, V.; KARDOMATEAS, G. A. Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *COMPOSITES PART B: ENGINEERING*, v. 142, p. 221–240, 2018. doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.027.
- (3) PATIL, A.; PATEL, A.; PUROHIT, R. An overview of Polymeric Materials for Automotive Applications. *MATERIALS TODAY: PROCEEDINGS*, v. 4, p. 3807–3815, 2017. doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.278.

- (4) WU, Y.-F.; HUANG, Y. Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures. *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION*, v. 12, p. 266–273, 2008. doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:3(266).
- (5) DELUCIS R.A, TONATTO M.L.P, TRINDADE R.S, AMICO S.C. In situ L-RTM manufacturing of sandwich panels with PET foam core reinforced by polymeric pins. *J SANDW STRUCT MATER* 2021;23:241–54. doi.org/10.1177/1099636219830145.
- (6) FURTOS, G. et al. Influence of filler/reinforcing agent and post-curing on the flexural properties of woven and unidirectional glass fiber-reinforced composites. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*, v. 47, p. 3305–3314, 2012. doi.org/10.1007/s10853-011-6169-1.
- (7) STARK, W. Investigation of the curing behaviour of carbon fibre epoxy prepreg by Dynamic Mechanical Analysis DMA. *POLYMER TESTING*, v. 32, p. 231–239, 2013. doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.11.004.
- (8) DJOUANI, F. et al. Cement paste-epoxy adhesive interactions. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, v. 25, p. 411–423, 2011. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.035.

REINFORCEMENT OF CELLULAR CONCRETE BY POLYMERIC PINS AND USE AS CORE FOR SANDWICH PANELS

ABSTRACT

Autoclaved aerated concrete (AAC) is a lightweight material with good insulation properties, but with relatively low mechanical strength. This study focused on reinforcing AAC with unsaturated polyester pins and its use as core for sandwich panel with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) facings. Thermal analyses, namely DSC and thermography, were conducted to study the curing of the pins within the AAC. Three different core thicknesses (17, 35, and 50 mm) were evaluated, and the panels were analyzed for their mechanical behavior in a bending test. A slight improvement in T_g of the pins cured within the AAC was observed, along with an improvement in shear strength of the panels with pin-reinforced cores compared to those non-reinforced, achieving enhancement of up to 125%.

Keywords: Unsaturated polyester, autoclaved aerated concrete, pin reinforcement, sandwich panel.