



Recibido 12/05/2026
Aceptado 14/09/2026

DESEMPEÑO TÉRMICO Y DURABILIDAD DE PERFILES DE ACERO CON RECUBRIMIENTO CERÁMICO NANO-REFORZADO PARA CONSTRUCCIÓN MODULAR

THERMAL PERFORMANCE AND DURABILITY OF STEEL PROFILES WITH NANO-REINFORCED CERAMIC COATING FOR MODULAR CONSTRUCTION

Orlando García Cano

RESUMEN

Los perfiles de acero son ampliamente utilizados en sistemas de construcción modular debido a su resistencia mecánica y compatibilidad con procesos industrializados de fabricación. Sin embargo, su elevada conductividad térmica puede favorecer la transferencia de calor a través de elementos estructurales ligeros. En este trabajo se aplicó un recubrimiento cerámico reforzado con nanopartículas de SiO_2 sobre perfiles estructurales de acero y se evaluó experimentalmente bajo condiciones controladas de laboratorio. El recubrimiento fue depositado mediante aspersión neumática e inmersión controlada, seguido de curado térmico entre 180 y 200 °C.

Las mediciones térmicas mostraron reducciones de temperatura superficial entre 3 y 5 °C respecto a perfiles sin recubrimiento. Las muestras recubiertas también presentaron valores de adhesión superiores a 6 MPa y mejoras en resistencia al desgaste después de las pruebas de abrasión.

Los resultados obtenidos indican que los recubrimientos cerámicos nano-reforzados pueden contribuir al mejoramiento del comportamiento térmico y la durabilidad superficial de perfiles metálicos utilizados en aplicaciones de construcción modular

PALABRAS CLAVE

recubrimientos cerámicos, nanopartículas de SiO_2 , perfiles de acero, construcción modular, desempeño térmico.

ABSTRACT

Steel profiles are commonly used in modular construction due to their mechanical strength and compatibility with industrialized building systems. However, their high thermal conductivity can increase heat transfer through lightweight structural elements.

In this work, a ceramic coating reinforced with SiO_2 nanoparticles was applied onto structural steel profiles and experimentally evaluated under controlled laboratory conditions. The coating was deposited by pneumatic spraying and controlled immersion, followed by thermal curing between 180 and 200 °C.

Thermal measurements showed surface temperature reductions between 3 and 5 °C compared with uncoated steel profiles. The coated samples also exhibited adhesion values above 6 MPa and improved wear resistance after abrasion testing.

The obtained results indicate that ceramic nano-reinforced coatings may contribute to improving the thermal behavior and surface durability of steel profiles employed in modular construction applications.

KEYWORDS

ceramic coatings, SiO_2 nanoparticles, steel profiles, modular construction, thermal performance.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de perfiles de acero en sistemas de construcción modular y estructuras ligeras ha aumentado debido a su resistencia mecánica, estabilidad dimensional y compatibilidad con métodos de fabricación industrializada [1]. Estos componentes se emplean en bastidores, muros, cubiertas, marcos estructurales y ensambles prefabricados, donde la rapidez de instalación y la repetibilidad geométrica son factores relevantes.

A pesar de estas ventajas, los perfiles de acero presentan una limitación importante: su elevada conductividad térmica. En aplicaciones expuestas a radiación solar, variaciones de temperatura o cargas térmicas elevadas, el acero puede favorecer la transferencia de calor a través de la envolvente constructiva, afectando el desempeño térmico de sistemas ligeros [2]. Además, la exposición ambiental puede acelerar la degradación superficial, deteriorar recubrimientos convencionales y aumentar la necesidad de mantenimiento.

Para mejorar el desempeño de sustratos metálicos se han utilizado distintas tecnologías de protección superficial, incluyendo pinturas poliméricas, galvanizados, tratamientos anticorrosivos, recubrimientos cerámicos y sistemas de barrera térmica. Entre estas alternativas, los recubrimientos cerámicos reforzados con nanopartículas han despertado interés por su capacidad para mejorar resistencia superficial, estabilidad ambiental y comportamiento térmico con espesores relativamente bajos [3,4,8-12].

Diversos estudios han reportado que aditivos cerámicos de tamaño nanométrico, como SiO_2 y TiO_2 , pueden modificar la microestructura de matrices cerámicas o poliméricas, mejorar la compactación del recubrimiento y contribuir a cambios en sus propiedades térmicas y mecánicas [5-7,13-16]. Sin embargo, una parte importante de la literatura se concentra en recubrimientos de laboratorio, componentes de alta temperatura o sistemas



de fachada, sin abordar de manera específica su aplicación sobre perfiles de acero utilizados en construcción modular y aplicaciones de eficiencia energética en envolventes ligeras [10,14,17].

En este contexto, el presente trabajo evalúa el desempeño térmico y la durabilidad de un recubrimiento cerámico reforzado con nanopartículas de SiO_2 aplicado sobre perfiles estructurales de acero. El estudio analiza el comportamiento del sistema bajo condiciones controladas representativas de uso, considerando espesor de recubrimiento, reducción de temperatura superficial, adhesión, resistencia al desgaste, exposición ambiental y ciclos térmicos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

MATERIALES

Se utilizaron perfiles estructurales comerciales de acero al carbono de bajo contenido de carbono, comúnmente empleados en sistemas de construcción modular y estructuras ligeras. Los perfiles evaluados incluyeron secciones tipo omega y perfiles rectangulares con espesores comprendidos entre 1.2 y 2.0 mm.

Antes de la aplicación del recubrimiento, las superficies metálicas fueron sometidas a limpieza mecánica y desengrase mediante solvente industrial con el fin de eliminar contaminantes, residuos de aceite y óxidos superficiales. La preparación superficial se realizó para mejorar la adherencia del recubrimiento y reducir defectos interfaciales durante el curado térmico.

FORMULACIÓN DEL RECUBRIMIENTO CERÁMICO

El recubrimiento cerámico se formuló a partir de una matriz inorgánica alúmina-sílice reforzada con aditivos nanoestructurados de SiO_2 con tamaño promedio cercano a 20 nm. Adicionalmente, se incorporaron cargas minerales y aglutinantes inorgánicos para mejorar la estabilidad del sistema y favorecer la adhesión sobre el sustrato metálico.

La formulación fue preparada mediante agitación mecánica controlada durante aproximadamente 40 min hasta obtener una dispersión homogénea de partículas cerámicas y nanopartículas. La suspensión final presentó viscosidad adecuada para aplicación mediante aspersión neumática e inmersión controlada.

PROCESO DE APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO

Se evaluaron dos métodos de deposición del recubrimiento: aspersión neumática e inmersión controlada.

En el proceso de aspersión, el recubrimiento fue aplicado mediante aire comprimido a una presión entre 2 y 3 bar y una distancia aproximada de 20 cm respecto a la superficie del perfil metálico. Se realizaron múltiples pasadas delgadas para favorecer uniformidad y minimizar defectos superficiales.

Para el método de inmersión, los perfiles fueron sumergidos en la suspensión cerámica durante aproximadamente 10-15 s y posteriormente retirados a velocidad controlada con el propósito de obtener espesores homogéneos.

Después de la deposición, las muestras recubiertas fueron sometidas a secado intermedio a temperatura ambiente durante aproximadamente 20 min antes del proceso de curado térmico.

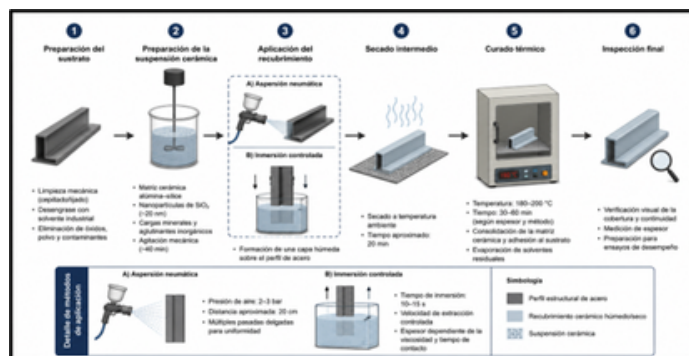


Figura 1. Esquema general del proceso de aplicación y curado térmico del recubrimiento cerámico sobre perfiles estructurales de acero.

CURADO TÉRMICO

El curado térmico se realizó en horno de laboratorio con temperatura controlada entre 180 y 200 °C durante periodos de 30 a 60 min, dependiendo del espesor del recubrimiento y del método de aplicación empleado.

Esta etapa permitió consolidar la matriz cerámica, favorecer la evaporación de solventes y mejorar la adherencia entre el recubrimiento y el sustrato metálico.

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL

Las muestras recubiertas fueron caracterizadas mediante ensayos térmicos y mecánicos bajo condiciones controladas de laboratorio.

El espesor del recubrimiento fue medido mediante microscopía óptica y medidores digitales de espesor en diferentes zonas de la superficie del perfil.

La adhesión fue evaluada mediante ensayos tipo pull-off con procedimientos equivalentes a ASTM D4541. La resistencia al desgaste se analizó mediante ciclos controlados de abrasión bajo carga constante.

La estabilidad ambiental del recubrimiento fue evaluada mediante exposición a niebla salina y ciclos térmicos con el propósito de simular condiciones representativas de operación en aplicaciones de construcción modular.

El comportamiento térmico fue analizado mediante termografía infrarroja y medición de temperatura superficial bajo exposición térmica controlada. La reducción de temperatura entre perfiles recubiertos y perfiles sin recubrimiento fue utilizada como indicador comparativo de desempeño.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ESPOSOR DEL RECUBRIMIENTO Y CALIDAD SUPERFICIAL

Después del proceso de curado, el recubrimiento presentó continuidad superficial adecuada y cobertura homogénea sobre los perfiles metálicos evaluados. Durante la inspección visual no se observaron desprendimientos, ampollamiento ni agrietamiento significativo bajo las condiciones de laboratorio utilizadas.

Los valores promedio de espesor obtenidos mediante microscopía óptica y medición digital se presentan en la Tabla 1.



El método de inmersión generó espesores mayores debido al mayor tiempo de contacto entre el perfil metálico y la suspensión cerámica, mientras que la aspersión neumática produjo capas más delgadas y uniformes.

Las muestras mantuvieron integridad superficial durante las etapas posteriores de manipulación y caracterización experimental.

Tabla 1. Espesor promedio del recubrimiento para diferentes métodos de aplicación

Método de aplicación	Espesor promedio (µm)	Uniformidad superficial
Aspersión neumática	45-70	Alta
Inmersión controlada	80-110	Moderada-Alta

DESEMPEÑO TÉRMICO

Las pruebas térmicas mostraron una reducción medible de temperatura superficial en los perfiles recubiertos respecto a los perfiles sin recubrimiento bajo condiciones controladas de exposición térmica.

Las mediciones realizadas mediante termografía infrarroja indicaron reducciones de temperatura entre 3 y 5 °C dependiendo del espesor y método de aplicación del recubrimiento. Los perfiles obtenidos mediante inmersión presentaron ligeramente mayor resistencia térmica debido al incremento en espesor de la capa cerámica.

La disminución en transferencia de calor puede asociarse a la presencia de la matriz cerámica y al efecto del refuerzo cerámico basado en SiO₂ sobre la compactación y comportamiento térmico del recubrimiento [5-7,10,12,17].

Tabla 2. Desempeño térmico de perfiles recubiertos

Muestra	Reducción de temperatura superficial (°C)	Mejora térmica relativa (%)
Recubrimiento por aspersión	3.0-3.8	18-25
Recubrimiento por inmersión	4.0-5.0	25-35

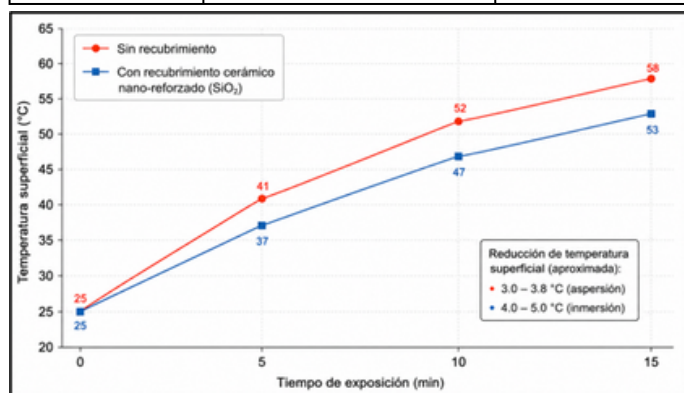


Figura 2. Comparación de temperatura superficial entre perfiles recubiertos y perfiles sin recubrimiento bajo exposición térmica controlada.

Los ensayos de adhesión realizados después del curado térmico mostraron una unión estable entre el recubrimiento cerámico y el sustrato metálico. Las pruebas tipo pull-off registraron valores superiores a 6 MPa para ambos métodos de aplicación, indicando compatibilidad adecuada entre la matriz cerámica y la superficie de acero.

Las pruebas de abrasión mostraron mejoras en resistencia al desgaste respecto al acero sin recubrimiento. Después de múltiples ciclos de desgaste controlado, las muestras recubiertas conservaron continuidad superficial y menor deterioro visible en comparación con las muestras sin protección superficial.

La mejora observada puede relacionarse con la naturaleza cerámica del recubrimiento y con el efecto de refuerzo asociado a la dispersión de nanopartículas de SiO₂ dentro de la matriz inorgánica [3,7,11,15,16].

ADHESIÓN Y RESISTENCIA AL DESGASTE

Los ensayos de exposición a niebla salina y ciclos térmicos fueron utilizados para evaluar la estabilidad ambiental del recubrimiento bajo condiciones representativas de operación.

Después de la exposición acelerada, las muestras recubiertas conservaron integridad superficial aceptable sin evidencia significativa de delaminación o falla del recubrimiento. Aunque se observaron ligeros cambios superficiales después de ciclos térmicos prolongados, las muestras conservaron funcionalidad térmica y adherencia adecuada durante el periodo de evaluación.

Estos resultados sugieren que el sistema cerámico nano-reforzado puede mantener comportamiento estable bajo condiciones ambientales asociadas a aplicaciones de construcción modular [11,18,19].

Tabla 3. Desempeño mecánico de perfiles recubiertos

Propiedad	Acero no recubierto	Aspersión neumática	Inmersión controlada
Adhesión (MPa)	—	>6	>6
Resistencia relativa al desgaste	10	13	165

DURABILIDAD AMBIENTAL

Los ensayos de exposición a niebla salina y ciclos térmicos fueron utilizados para evaluar la estabilidad ambiental del recubrimiento bajo condiciones representativas de operación.

Después de la exposición acelerada, las muestras recubiertas conservaron integridad superficial aceptable sin evidencia significativa de delaminación o falla del recubrimiento. Aunque se observaron ligeros cambios superficiales después de ciclos térmicos prolongados, las muestras conservaron funcionalidad térmica y adherencia adecuada durante el periodo de evaluación.

Estos resultados sugieren que el sistema cerámico nano-reforzado puede mantener comportamiento estable bajo condiciones ambientales asociadas a aplicaciones de construcción modular [11,18,19].



DISCUSIÓN

Los resultados experimentales obtenidos indican que el recubrimiento cerámico reforzado con nanopartículas puede mejorar simultáneamente el comportamiento térmico y la durabilidad superficial de perfiles estructurales de acero utilizados en sistemas de construcción modular [3,5,8,10,14,20].

En comparación con recubrimientos poliméricos convencionales, la matriz cerámica mostró mayor estabilidad térmica durante la exposición al calor y mejor resistencia superficial frente al desgaste. La incorporación de sílice nanoestructurada probablemente contribuyó a reducir la difusividad térmica y mejorar la compactación del sistema [5,7,10,12,17,20], disminuyendo parcialmente la transferencia de calor a través del sustrato metálico.

El proceso de inmersión produjo espesores mayores y una ligera mejora en desempeño térmico; sin embargo, la aspersión neumática generó capas más uniformes y potencialmente más compatibles con procesos industriales continuos de aplicación.

Aunque las reducciones de temperatura obtenidas fueron moderadas, los resultados son relevantes para sistemas ligeros de construcción donde los puentes térmicos metálicos pueden influir de manera importante sobre el comportamiento térmico global de la envolvente.

Los resultados obtenidos muestran que los recubrimientos cerámicos nano-reforzados representan una alternativa viable para incrementar la durabilidad superficial y contribuir a mejorar el desempeño térmico de perfiles metálicos utilizados en construcción modular.

CONCLUSIONES

La evaluación experimental realizada en este trabajo mostró que el recubrimiento cerámico reforzado con nanopartículas de SiO_2 permitió mejorar el comportamiento térmico y la durabilidad superficial de perfiles estructurales de acero utilizados en sistemas de construcción modular.

Los perfiles recubiertos presentaron reducciones medibles de temperatura superficial bajo condiciones controladas de exposición térmica, así como mejoras en adherencia y resistencia al desgaste respecto al acero sin recubrimiento. Los ensayos ambientales también indicaron estabilidad adecuada del sistema después de exposición a niebla salina y ciclos térmicos acelerados.

Los resultados obtenidos para los métodos de aspersión neumática e inmersión controlada sugieren que el sistema puede integrarse a procesos industriales de aplicación sin requerir modificaciones complejas en equipos convencionales.

Aunque aún son necesarios estudios complementarios de exposición prolongada en condiciones reales de operación, los resultados obtenidos indican que los recubrimientos cerámicos nano-reforzados representan una alternativa viable para contribuir al mejoramiento térmico y a la protección superficial de perfiles metálicos empleados en construcción modular.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo técnico y experimental proporcionado por el personal de Fortacero S.A. de C.V. durante el desarrollo y evaluación del recubrimiento estudiado.

REFERENCIAS

- [1] R. C. Veloso et al., "Impact of SiO_2 , TiO_2 and ZnO nanoparticles incorporation on the thermo-optical properties of dark-coloured façade coatings," *Journal of Building Engineering*, vol. 84, p. 108517, 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.108517.
- [2] I. Asadi et al., "Thermal conductivity of concrete – A review," *Journal of Building Engineering*, vol. 20, pp. 81–93, 2018, doi: 10.1016/j.jobe.2018.07.002.
- [3] K. Srinivasulu and M. Vidyavathy, "Advanced Ceramic Coatings on Stainless Steel: A Review of Research Methods, Materials, Applications and Opportunities," *International Journal of Advanced Engineering Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 126–141, 2016.
- [4] M. A. Alam et al., "Effects of SiO_2 and ZnO Nanoparticles on Epoxy Coatings and Its Corrosion Resistance Performance," *Polymers*, vol. 13, no. 10, p. 1605, 2021, doi: 10.3390/polym13101605.
- [5] A. Hasananezhad et al., "Boosting the efficiency of water-based intumescent coatings using fumed silica nanoparticles," *Results in Engineering*, vol. 24, p. 103103, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103103.
- [6] B. Wu et al., "Influences of SiO_2 Additions on the Structures and Thermal Properties of AlTaO_4 Ceramics as EBC Materials," *Coatings*, vol. 15, no. 10, p. 1204, 2025, doi: 10.3390/coatings15101204.
- [7] L. Zhai et al., "Effect of nano-silica on the mechanical properties of acrylic polyurethane coatings," *Progress in Organic Coatings*, vol. 64, no. 2–3, pp. 327–331, 2009, doi: 10.1016/j.porgcoat.2008.08.008.
- [8] Y. Wang et al., "Preparation and characterization of nano- SiO_2 modified thermal insulating coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 206, no. 6, pp. 1309–1315, 2011, doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.08.052.
- [9] M. Montazer and M. B. Moghadam, "Nano titanium dioxide and silica modified textile materials," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 42, no. 4, pp. 333–349, 2013, doi: 10.1177/1528083712444711.
- [10] H. Li et al., "Thermal insulation performance of nano-ceramic coatings for energy-efficient buildings," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 10, pp. 2630–2636, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.06.017.
- [11] S. Kumar et al., "Corrosion protection performance of nano-structured ceramic coatings on steel substrates," *Ceramics International*, vol. 46, no. 12, pp. 18844–18853, 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.04.213.
- [12] P. Zhao et al., "Mechanical and thermal properties of silica nanoparticle reinforced coatings," *Materials Today Communications*, vol. 26, p. 102091, 2021, doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102091.
- [13] J. Robertson, "Diamond-like amorphous carbon," *Materials Science and Engineering R*, vol. 37, no. 4–6, pp. 129–281, 2002, doi: 10.1016/S0927-796X(02)00005-0.
- [14] A. F. Gross et al., "Thermal barrier coatings for structural applications," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 23, no. 5, pp. 745–756, 2014, doi: 10.1007/s11666-014-0078-2.
- [15] X. Chen et al., "Durability enhancement of ceramic coatings reinforced with nano-silica," *Coatings*, vol. 11, no. 4, p. 415, 2021, doi: 10.3390/coatings11040415.



[16] M. Ramezanzadeh et al., "Nano silica reinforced epoxy coating with improved corrosion resistance," Progress in Organic Coatings, vol. 77, no. 1, pp. 69–75, 2014, doi: 10.1016/j.porgcoat.2013.08.015.

[17] T. Wang et al., "Infrared thermal analysis of coated steel structures," Infrared Physics & Technology, vol. 91, pp. 168–175, 2018, doi: 10.1016/j.infrared.2018.04.014.

[18] A. Yabuki et al., "Self-healing coatings for corrosion protection of metallic materials," Progress in Organic Coatings, vol. 72, no. 4, pp. 493–498, 2011, doi: 10.1016/j.porgcoat.2011.05.006.

[19] J. R. Davis, Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2001.

[20] A. Bahrami et al., "Evaluation of nano-ceramic coatings for thermal management applications," Journal of Coatings Technology and Research, vol. 19, no. 2, pp. 455–468, 2022, doi: 10.1007/s11998-021-00573-9.