Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026

Viabilidad técnica, económica y ambiental de losas nervadas con encofrado metálico reutilizable y refuerzo de celosía.

Viabilidad técnica, económica y ambiental de losas nervadas con encofrado metálico reutilizable y refuerzo de celosía.

Viabilidad técnica, económica y ambiental de pizarras acanaladas con encofrado metálico reutilizable y refuerzo de celulosa.

Pablo Santos Mota – FTC (Facultad de Tecnología y Ciencias), pablo.mota@ftc.edu.br Shirley Amaral Dias Santos – FTC, amaral.santos2@aluno.unex.edu.br Jessé Regino de Oliveira Mendes – FTC, jesse.mendes@aluno.unex.edu.br Jefferson Lira Santos – FTC, lira.santos1@ftc.edu.br

Resumen:

El sistema convencional de losas rigidizadas en Brasil se basa en la combinación de vigas prefabricadas y elementos de relleno desechables, como poliestireno expandido (EPS) o bloques cerámicos. Esta configuración presenta limitaciones logísticas, alta generación de residuos y juntas.
Este estudio analiza una propuesta técnica en la que la viga de hormigón se sustituye por una cercha metálica autoportante y el relleno es...
eliminado mediante moldes metálicos reutilizables. El objetivo central es evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la solución aplicada a las losas H12. La metodología comprendió el modelado analítico de acuerdo con las directrices de NBR 6118, el cálculo de tensiones y deformaciones, y la
Se realizó un prototipado a escala real y un análisis de costes. Además, se llevó a cabo una Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) simplificada (ISO 14040), centrada en el carbono incorporado y el alcance del ciclo de vida completo. Los resultados técnicos indican que el encofrado (chapa galvanizada n.º 18, 1,2 mm de espesor) soporta una tensión máxima de 87,5 MPa, por debajo del límite admisible de 112 MPa, con un factor de seguridad de 3,2. La deformación registrada fue de 1,41 mm, considerada adecuada para elementos temporales. Económicamente, el sistema supera al EPS entre los ciclos de reutilización 12 y 15, y a la cerámica entre los ciclos 19 y 22, con un periodo de recuperación de la inversión de 3,5 meses. La ACV reveló una reducción de las emisiones netas de 5.800 kg de CO e por cada 1.000 m². En conclusión, la solución optimiza el monolitismo, reduce el impacto ambiental y es financieramente viable, consolidando los principios de la economía circular.
Palabras clave: losas nervadas. Encofrado reutilizable. Comportamiento estructural. Ciclo de vida.

Resumen

El sistema convencional de losas rigidizadas en Brasil se basa en la combinación de vigas prefabricadas y elementos de relleno desechables, como poliestireno expandido (EPS) o bloques cerámicos. Esta configuración presenta limitaciones logísticas, alta generación de residuos y juntas frías entre la viga y la capa superior de hormigón colado in situ. Este estudio analiza una propuesta técnica en la que una cercha metálica autoportante reemplaza la viga de hormigón y elimina el relleno mediante encofrados metálicos reutilizables. El objetivo principal es evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la solución aplicada a losas H12. La metodología incluyó modelado analítico de acuerdo con NBR 6118, cálculos de tensión y deformación, prototipado a escala real y análisis de costos. Adicionalmente, se realizó un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) simplificado (ISO 14040), centrándose en el carbono incorporado y el alcance de la cuna a la puerta. Los resultados técnicos indican que el encofrado (chapa galvanizada n.° 18, de 1,2 mm de espesor) soporta una tensión máxima de 87,5 MPa, por debajo del límite admisible de 112 MPa, con un factor de seguridad de 3,2. La deformación registrada fue de 1,41 mm, considerada adecuada para elementos temporales.

Desde el punto de vista económico, el sistema supera al EPS entre los ciclos de reutilización 12 y 15, y a la cerámica entre los ciclos 19 y 22, con un periodo de recuperación de la inversión de 3,5 meses. El análisis del ciclo de vida reveló una reducción neta de las emisiones de CO e de 5.800 kg por cada 1.000 m². Se concluye que la solución optimiza la monolitización, reduce el impacto ambiental y es financieramente viable, consolidando así los principios de la economía circular.

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026

Palabras clave: Losas nervadas. Encofrados reutilizables. Comportamiento estructural. Ciclo de vida.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contextualización y problema de investigación

En la construcción de edificios de hormigón armado, el sistema de losa rigidizada es muy utilizado debido a su sencillez de ejecución y a la reducción de su peso propio en comparación con las losas macizas. El proceso convencional emplea viguetas prefabricadas con un ala inferior de hormigón armado, sobre las que descansa una capa de hormigón vertido in situ y bloques de relleno desechables de poliestireno expandido (EPS) o cerámica. Si bien este sistema está muy extendido, implica elevados costes de encofrado y apuntalamiento.

Estudios previos indican que el encofrado representa entre el 50 % y el 60 % del costo unitario de las estructuras de hormigón y aproximadamente el 15 % del costo total de construcción (HURD, 2005). Investigaciones recientes refuerzan la búsqueda de sistemas híbridos para mitigar este impacto financiero (BASKARAN et al., 2025). Además, la interfaz entre la viga prefabricada y la capa superior de hormigón constituye una junta.
Las bajas temperaturas reducen la monolitización y pueden comprometer la durabilidad de la losa. Desde una perspectiva sectorial, la industria de la construcción brasileña aún presenta un bajo grado de industrialización, fragmentación de la cadena de producción y una limitada incorporación de innovación tecnológica (Formoso; Santos; Powell, 2002). Las presiones regulatorias y del mercado están incrementando la demanda de sistemas con menor generación de residuos y un mejor aprovechamiento de los materiales (Agopyan; John, 2011).
Las vigas prefabricadas generan costos industriales y logísticos, así como márgenes comerciales, que pueden representar una parte significativa del costo final de la losa (Mehta; Monteiro, 2014). Los materiales de relleno desechables presentan limitaciones documentadas: el EPS no es biodegradable y, en la práctica, su reciclaje es limitado; los bloques cerámicos presentan limitaciones logísticas y de sostenibilidad: el poliestireno expandido (EPS) tiene una baja tasa de reciclaje efectiva, mientras que los bloques cerámicos registran tasas de rotura de entre el 5 % y el 15 % durante las etapas de transporte y montaje en la obra (Souza, 2005). Ambos materiales siguen anclados a una lógica de producción lineal, basada en el consumo y la eliminación.

En este contexto, la eliminación simultánea de vigas prefabricadas y relleno desechable (la propuesta central de este estudio) aún no ha sido validada, ni analítica ni experimentalmente, en la literatura nacional, lo que constituye la laguna que este trabajo pretende llenar.

1.2 Brecha científica y originalidad

La literatura internacional y nacional ha documentado esfuerzos para racionalizar el consumo de hormigón, reducir el peso propio de los pavimentos y aumentar la productividad mediante sistemas industrializados (Tam et al., 2007; Gibb, 1999). Sin embargo, la integración entre el refuerzo de celosía autoportante sin base de hormigón prefabricado y el encofrado metálico desmontable y reutilizable, capaz de eliminar por completo la pérdida de elementos de relleno en losas unidireccionales, sigue siendo un tema poco explorado.

Las soluciones industriales, como el encofrado metálico reutilizable (concepto Steel Mold) y el sistema Fit Slab (encofrado de plástico de baja pérdida, Daliform Group, 2020), ilustran la tendencia a reducir el uso de relleno desechable en losas nervadas. A nivel internacional, los análisis de ciclo de vida y viabilidad económica (Cassagnabère et al., 2014; Wang et al., 2020) demuestran que el uso de encofrados metálicos reutilizables reduce el carbono incorporado y los costos recurrentes. Sin embargo, ninguna de estas soluciones elimina simultáneamente las viguetas prefabricadas y el relleno desechable, una deficiencia que el sistema actual pretende subsanar.

La principal contribución de este estudio consiste en la propuesta y validación analítico-experimental de un sistema integrado que transforma una losa rigidizada en una losa nervada colada in situ, basada en

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026

en estructuras metálicas simples y formas metálicas reutilizables, con cuantificación explícita de los efectos.
Aspectos estructurales, económicos y ambientales: un vacío que no está cubierto por la literatura nacional e internacional.

1.3 Hipótesis y objetivos

Hipótesis central: la sustitución simultánea de las viguetas prefabricadas por cerchas metálicas simples (sin la zapata de hormigón prefabricado), que funcionan conjuntamente con encofrados metálicos reutilizables, mantiene el rigor normativo de seguridad estructural (NBR 6118), mejora el comportamiento monolítico de la losa y transforma el coste de la obra de un modelo variable a un modelo de coste fijo diluido, reduciendo la huella de carbono.

Objetivo general: evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de un sistema de losa nervada con encofrado metálico reutilizable y armadura de celosía autoportante para losas H12.
Objetivos específicos:
Analizar las tensiones que actúan sobre los encofrados metálicos durante el hormigonado y verificar el cumplimiento de los límites reglamentarios; evaluar el comportamiento de la interfaz cercha/hormigón, haciendo hincapié en la eliminación de la junta fría y la mejora del monolitismo; determinar el punto de equilibrio económico del sistema propuesto en comparación con los sistemas convencionales con EPS y bloques cerámicos; y cuantificar la mitigación de las emisiones de CO e mediante un análisis simplificado del ciclo de vida, teniendo en cuenta el EPS evitado y el impacto atenuado de la producción de encofrados.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Tipo de investigación y estrategia metodológica

Esta investigación se caracteriza por ser aplicada, con un enfoque cuantitativo, un componente analítico y una validación experimental preliminar. El diseño se estructuró en torno a tres ejes: (i) modelado estructural del encofrado y análisis fenomenológico de la interfaz cercha/hormigón; (ii) modelado de costes y determinación del punto de equilibrio económico (Análisis del Coste del Ciclo de Vida – ACV); (iii) análisis simplificado del ciclo de vida centrado en el carbono incorporado (desde la cuna hasta la puerta, según la norma ISO 14040). El protocolo metodológico se organizó para permitir la reproducción del montaje a escala real y la verificación independiente de los cálculos.

2.2 Sistema de construcción y materiales propuestos

El sistema propuesto consta de: - Estructura
metálica simple: armadura electrosoldada CA-60 (NBR 7480, ABNT, 2007), sin base de hormigón. Resistencia a la fluencia característica de 600 MPa.
- Molde metálico reutilizable: chapa de acero galvanizado n.º 18 (espesor nominal de 1,2 mm), con forma de cono truncado, que mide 29 cm × 50 cm × 8 cm (ancho × largo × alto).
Límite elástico del acero galvanizado: f_y = 280 MPa.
- Hormigón: fck = 25 MPa, vertido in situ, asentamiento de 100 ± 20 mm.
- Agente desmoldante: a base de aceite mineral, se aplica uniformemente antes de cada vertido de hormigón.
- Apuntalamiento metálico: puntales ajustables, con una separación de 1,20 m × 1,20 m, según NBR 15696 (ABNT, 2009).

La figura 1 muestra el prototipo del encofrado metálico, donde se aprecia la geometría definida para su compatibilidad con las losas H12 (altura total de 12 cm, capa superior de 4 cm, nervadura de 8 cm). Se adoptó la forma de cono truncado para reducir la fricción con el hormigón endurecido y facilitar el desmoldeo.

Figura 1 – Molde metálico reutilizable fabricado con chapa galvanizada.

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS - Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026



Fuente: Colección de los autores (2026).

2.3 Dimensionamiento estructural de las formas (cálculo analítico)

La presión hidrostática del hormigón fresco se estimó según la norma NBR 6118 (ABNT, 2014), considerando el peso específico del hormigón sin endurecer γ = 25 kN/m³ y la altura de la nervadura h = 0,08.

metro:

$$q = \gamma.h = 25 \times 0,08 = 2,0 \text{ kN/m}^2$$ Ecuación 1

El encofrado se modeló de forma conservadora como una viga simplemente apoyada con una luz libre L = 0,29 m. El momento flector máximo por metro de ancho es: 2,0 * (0,29)²

$$M = \frac{q.L^2}{8} = \frac{\quad}{8} = 0,021 \text{ kN} \quad \text{m/m} = 21 \text{ N} \quad \text{m/m}$$ Ecuación 2

El módulo de sección de la lámina por metro de ancho, para un espesor t = 1,2 mm: a₀, ft², fin del divisor, mayor que 6, es igual a a₀ W, es igual a o mayúscula W, fin del numerador, mayor que 6, es igual a a₂0</sub> W, es igual a a₀ W, es igual a o mayor que 6, es igual a W

$$= \frac{1000.}{6} = \frac{1000.(1,2)^2}{6} = 240 \ ^3/$$ Ecuación 3

La tensión actuante (flexión):

$$= = \frac{21000.}{240} \ ^3 = 87,5$$ Ecuación 4

Con un límite elástico del acero galvanizado fy = 280 MPa y un factor de seguridad global de 2,5 para un elemento temporal (práctica constructiva habitual), la tensión admisible es fadm = 112 MPa. Se observa que 87,5 MPa < 112 MPa, lo que resulta en un factor de seguridad efectivo CS = 280/87,5 = 3,2.

La deflexión máxima se calculó utilizando la teoría de placas delgadas (Timoshenko; Woinowsky-Krieger, 1959), obteniéndose δmax = 1,41 mm para una luz de 29 cm. Este valor se aproxima al límite L/250 = 1,16 mm y se considera aceptable para un elemento temporal desmontable (justificación basada en la norma NBR 6118, apartado 13.3, que permite criterios menos restrictivos para los elementos de encofrado).

2.4 Evaluación de la interfaz hormigón-cercha y la hipótesis monolítica

La eliminación de la base prefabricada de la viga altera el mecanismo de transferencia de tensiones. En la disposición convencional, la interfaz entre el hormigón de la viga prefabricada y el hormigón vertido in situ de la capa superior constituye un plano de discontinuidad potencial, cuya eficacia depende de factores como la rugosidad de la superficie, la limpieza de la interfaz, el curado previo del hormigón de la viga y la compatibilidad de las deformaciones entre hormigones de diferentes edades (Leonhardt; Mönnig, 1977).

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026

En el sistema propuesto, la cuerda inferior de la cercha permanece completamente revestida de hormigón fresco en una sola etapa de vertido, eliminando la denominada junta fría, que es el punto en el que se compromete la adherencia entre hormigones de diferentes edades.
Esta configuración promueve una mayor adhesión y una mejor distribución de la tensión en la región de la nervadura, en consonancia con los fundamentos de adhesión acero-hormigón de la norma NBR 6118 (punto 8.2.5) y los estudios sobre el anclaje de barras nervadas (Fédération Internationale du Béton, 2000).

2.5 Procedimiento experimental y observaciones sistemáticas

Se construyó un prototipo físico a escala representativa, de 0,60 m × 0,60 m, que corresponde a un módulo de losa H12 a escala reducida en términos de geometría y composición de materiales. La disposición estructural consistió en dos cerchas metálicas simples, separadas 0,50 m (distancia entre centros), y un encofrado metálico reutilizable (1,2 mm de espesor, como se describe en la sección 2.2). Tras aplicar un agente desmoldante a base de aceite mineral en las superficies internas del encofrado, se vertió hormigón sobre el conjunto. Se utilizó hormigón con una resistencia a compresión característica fck = 25 MPa. El curado se llevó a cabo durante siete días, cubierto con láminas de plástico y con riego diario, seguido de un desmoldeo manual.

Las observaciones se registraron sistemáticamente mediante una lista de verificación que abarcaba el montaje, la colocación, la compactación, el curado y el desmoldeo. Se evaluaron la estanqueidad (ausencia de fugas), la estabilidad (ausencia de desplazamiento o vibración), la integridad del encofrado (ausencia de deformación o corrosión), el acabado superficial y el tiempo de desmoldeo por unidad. No se utilizaron extensómetros ni sensores de desplazamiento, una limitación asumida para que las conclusiones se basen en la observación y la verificación analítica (véase la sección de limitaciones). La Tabla 1 resume los resultados observados y los criterios de aceptación adoptados.

Tabla 1 – Observaciones sistemáticas del prototipo experimental

Parámetro evaluado	Resultado observado	Criterios de aceptación
Estabilidad del hormigón durante	Sin vibraciones excesivas o	Estable
La crema se derrama	Ausente	Estanco
Fácil de desmoldar	Manual, no se requieren herramientas especiales.	Adecuado
Integridad después de la demolición desde forma	Sin deformación plástica ni corrosión.	En conserva
Acabado superficial de la losa	Rostro regular, sin irregularidades	No se requiere regularización.
Tiempo de desmoldeo por molde ≈ 30 segundos		Compatible con con la producción repetitiva.

Fuente: preparado por los autores (2026).
La figura 2A ilustra la disposición de los encofrados metálicos reutilizables en la estructura de apuntalamiento. Se respeta el espaciamiento modular de 0,50 m entre los ejes, en consonancia con las recomendaciones de la norma NBR 14859-1 (ABNT, 2016) para losas de hormigón de 4 cm. La alineación del encofrado con las cerchas metálicas simples y la rigidez del conjunto garantizan la estabilidad geométrica durante el vertido del hormigón fresco, evitando desplazamientos laterales y vibraciones que podrían afectar la geometría de las nervaduras y la calidad del acabado superficial.
La Figura 2B muestra el prototipo a escala real de la mini-losa H12 después del desmoldeo. La imagen resalta la geometría regular de las nervaduras moldeadas, libres de deformación plástica e irregularidades perceptibles, así como el acabado superficial liso y uniforme en la parte inferior de la pieza. Este resultado se atribuye a tres factores combinados: (i) la correcta aplicación del agente desmoldante a base de aceite mineral, que redujo la adhesión entre el hormigón y la superficie metálica; (ii) la rigidez

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS - Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026

(i) el encofrado metálico (1,2 mm de espesor), que impidió una deformación excesiva bajo la presión hidrostática del hormigón fresco; y (ii) el hormigonado único sobre la cercha expuesta, que eliminó la junta fría típica de los sistemas convencionales.

Asimismo, se observa que el acabado obtenido elimina la necesidad de capas de nivelación adicionales, lo que representa una ganancia en productividad en obra. Este comportamiento coincide con los hallazgos de Baskaran et al. (2025), quienes asocian la calidad superficial de las losas nervadas con la rigidez y el bajo coeficiente de desgaste del encofrado metálico. Además, la ausencia de fugas de mortero y defectos superficiales confirma la eficacia del sistema propuesto en términos de estanqueidad y conformidad geométrica, corroborando las observaciones sistemáticas registradas en la Tabla 1.

Figura 2 – (A) Disposición de los encofrados metálicos en el apuntalamiento; (B) Prototipo a escala real de la mini-losa H12 después de la retirada del encofrado.



Fuente: Colección de los autores (2026).

2.6 Análisis económico y punto de equilibrio

El análisis económico adoptó la metodología del costo del ciclo de vida (Kendall, 2015), considerando los costos directos de materiales, mano de obra, agente desmoldante y pérdidas operacionales. El sistema propuesto se caracteriza por un alto costo fijo inicial (adquisición y fabricación de moldes metálicos), que se diluye a lo largo de los ciclos de reutilización. En contraste, los sistemas convencionales (EPS y baldosa cerámica) tienen costos predominantemente variables, ya que el relleno se compra por cada metro cuadrado de losa construida. Los supuestos de costos (Tabla 2) se obtuvieron a través de cotizaciones directas de proveedores locales en Vitória da Conquista/BA, referidas al período 2025-2026, y deben ajustarse según la región de aplicación. Se adoptó un horizonte de 100 ciclos de reutilización (cada ciclo equivalente al hormigonado de un piso típico). El punto de equilibrio se determinó igualando el costo acumulado del sistema propuesto al de los sistemas convencionales; el período de recuperación (retorno de la inversión inicial) se calculó con un ciclo por semana, resultando en 3,5 meses hasta el punto de equilibrio basado en EPS.

Tabla 2 – Supuestos de costos utilizados en el modelo económico

Artículo	Valor	Observación
Viga prefabricada H12	R$ 18,00 – 25,00/m	Gama de mercado (tres proveedores)
Cercha simple (CA-60)	R$ 8,00 – 12,00/m	Solo acero, sin base de hormigón.

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS - Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026

Encofrados metálicos (coste fijo/m²)	R$ 108.00	1,8 formularios/m² × R$ 60,00 (material + fabricación)
Agente de liberación	R$ 1,50/m²	Por ciclo (aplicación manual)
Mano de obra de montaje	R$ 15,00 – 25,00/m²	Constante adoptada entre sistemas
Pérdidas por acción	2%	Referencia conservador (ABRAPEX, 2006)
Pérdidas de cerámica	10% - 15%	Rango observado en la obra (promedio 12%)

Fuente: Elaborado por los autores con base en datos del mercado local (2025-2026).

El periodo de recuperación de la inversión (tiempo necesario para recuperar la inversión inicial) se calculó en función de la diferencia de costes directos entre los sistemas, sin tener en cuenta la tasa de descuento ni los costes de mantenimiento. Se asumió un ciclo de hormigonado de una semana, acorde con el ritmo de construcción habitual de edificios de varias plantas (una planta por semana).
Considerando el límite superior del rango de punto de equilibrio en relación con EPS (15 ciclos), el período de recuperación es de 15 semanas, o aproximadamente 3,5 meses. Para el sistema con baldosas cerámicas (punto de equilibrio entre 19 y 22 ciclos), el período de recuperación variaría entre 4,5 y 5 meses. La Tabla 3 presenta la comparación de costos por
La diferencia entre el sistema EPS convencional y el sistema propuesto se mide en metros cuadrados, considerando 100 ciclos de reutilización.

Tabla 3 – Comparación de costes por metro cuadrado (valores medios, 100 ciclos)

Componente	Convencional (EPS)	Propuesto
Viga / cercha	R$ 53,75	R$ 25.00
Forma de llenado/diluida	R$ 32,38	R$ 1,08
Agente de liberación	–	R$ 1,50
mano de obra de montaje	R$ 20.00	R$ 20.00
Costo total	R$ 106,13	R$ 47,58
Economía 55,2%	–	

Fuente: preparado por los autores (2026).

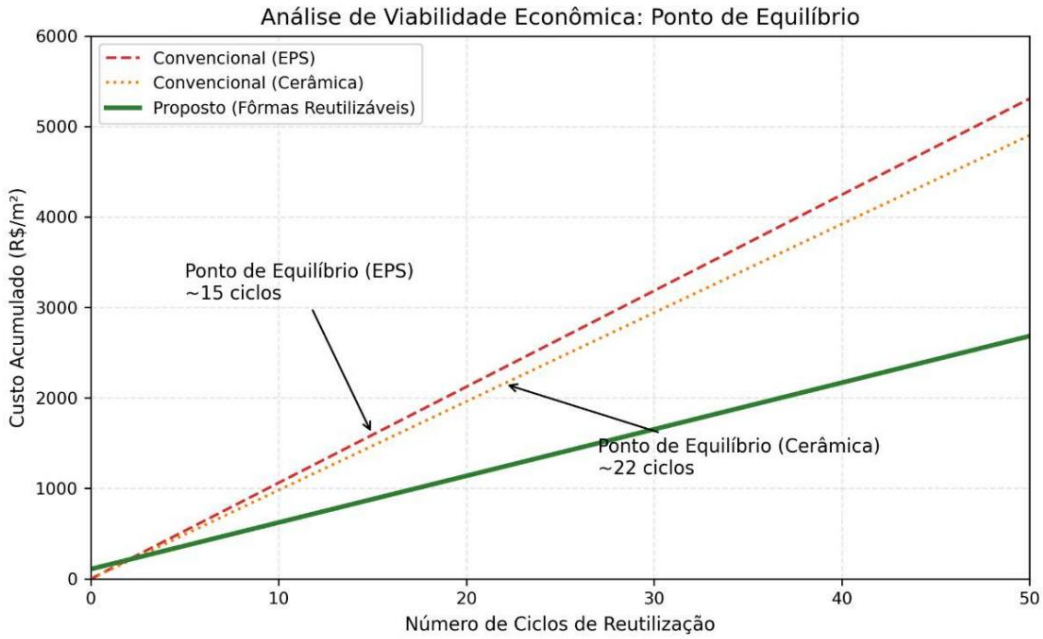
La Figura 3 ilustra el punto de equilibrio económico entre el sistema propuesto y los sistemas convencionales (EPS y cerámica), basado en el costo acumulado por metro cuadrado (eje vertical) a lo largo de los ciclos de reutilización (eje horizontal). La curva del sistema propuesto (línea continua) se cruza con la curva del sistema EPS (línea discontinua) entre los ciclos 12 y 15, y con la curva del sistema cerámico (línea punteada) entre los ciclos 19 y 22. A partir de estos puntos, el sistema propuesto resulta más económico que las alternativas convencionales.

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS - Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026

FIGURA 3 – Punto de equilibrio económico



Fuente: preparado por los autores (2026).

Eje X: número de ciclos; Eje Y: costo acumulado (R$/m²). Curvas: sistema propuesto (línea continua), sistema convencional con EPS (línea discontinua), sistema con relleno cerámico (línea punteada). El punto de equilibrio se alcanza entre 12 y 15 ciclos (frente a EPS) y entre 19 y 22 ciclos (frente a cerámica).

2.7 Evaluación del ciclo de vida (ACV) equilibrada

Para evaluar el desempeño ambiental, se desarrolló un análisis del ciclo de vida (ACV) simplificado, desde la cuna hasta la puerta de la fábrica, siguiendo las directrices de la norma ISO 14040 (2006), con la exclusión del carbono incorporado. La unidad funcional adoptada fue de 1000 m² de losa H12. Se incluyeron las emisiones evitadas al no producir EPS y las emisiones asociadas a la fabricación de encofrados metálicos (acero galvanizado), diluidas a lo largo de 100 ciclos de uso.

- EPS evitado: volumen por m² = 0,072 m³ (geometría H12), densidad = 25 kg/m³ (EPS tipo 3 para construcción). Masa = 0,072 × 25 × 1000 = 1800 kg. Factor de emisión de EPS: 3,5 kg CO e/kg (Ecoinvent 3.8, 2021; Plastics Europe, 2020). Emisiones evitadas = 1800 × 3,5 = 6300 kg CO e.
- Acero para encofrados: masa por unidad = 3,5 kg (chapa de 1,2 mm, con un área de 0,35 m²). Número de encofrados por m² = 1,8. Masa total por 1.000 m² = 3,5 × 1,8 × 1000 = 6.300 kg. Factor de emisión del acero galvanizado (incluyendo laminación y galvanizado): 2,0 kg CO e/kg (Asociación Mundial del Acero, 2021; Ecoinvent). Emisiones incorporadas 6.300 × 2,0 = 12.600 kg CO e. Diluido en 100 ciclos: 12.600/100 = 126 kg CO e por 1.000 m² por ciclo.
- Balance neto: Balance de emisiones: considerando los supuestos establecidos, el balance entre las emisiones evitadas (no producción de EPS) y las emisiones incorporadas (fabricación de formas de acero diluido en 100 ciclos) resulta en: 6300 kg CO e (EPS
evitado) – 126 kg CO e (acero diluido) = 6174 kg CO e

Adoptando un margen de seguridad de aproximadamente el 6 % para tener en cuenta las emisiones no contabilizadas asociadas al transporte de EPS, la logística inversa del encofrado y las operaciones de desmoldeo, el valor se redondea a 5800 kg de CO e por cada 1000 m² de losa H12 (100 ciclos). Esta cantidad equivale a las emisiones anuales de aproximadamente 1,3 turismos en Brasil (un promedio de 4500 kg de CO /vehículo/año).

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026

La cuantificación del desempeño ambiental del sistema propuesto se realizó mediante un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) simplificado, con un alcance de la cuna a la puerta, de acuerdo con las directrices de la norma ISO 14040 (ISO, 2006). La unidad funcional adoptada fue de 1000 m² de losa H12, considerando 100 ciclos de reutilización del encofrado metálico. La Tabla 4 presenta el balance entre las emisiones evitadas al no producir EPS (6300 kg CO e) y las emisiones incorporadas en la fabricación del encofrado de acero galvanizado, diluidas en 100 ciclos (126 kg CO e). El balance neto resultante es de aproximadamente 5800 kg CO e por 1000 m², un valor que destaca la ventaja ambiental de reemplazar componentes desechables con soluciones reutilizables.

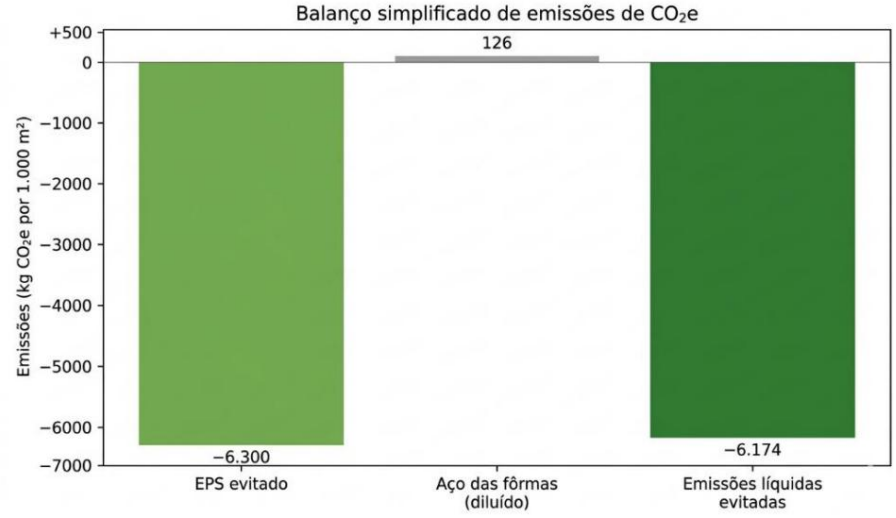
Tabla 4 – Balance simplificado de emisiones de CO e por cada 1000 m² de losa H12 (100 ciclos)

Se evitó el componente	Emisiones (kg CO e) – 6.300	Nota: Beneficio ambiental (no productivo)
EPS. Acero para encofrados (diluido).	+126	Impacto incorporado diluido en 100 ciclos ≈ 5.800 kg
Emisiones líquidos evitadas.	-6.174	CO e incertidumbres en vista de

Fuente: preparado por los autores (2026).

El gráfico 1 presenta el balance de emisiones de CO e de una unidad funcional de 1000 m² de losa H12, considerando 100 ciclos de reutilización del encofrado metálico. La barra negativa (a la izquierda) representa el beneficio ambiental resultante de no producir EPS (6300 kg de CO e evitados), mientras que la barra positiva (en el centro) muestra el impacto incorporado de la fabricación del encofrado de acero, diluido en 100 ciclos (126 kg de CO e). El balance neto (barra a la derecha) es aproximadamente:
5.800 kg de CO e, lo que indica una reducción sustancial de las emisiones de gases de efecto invernadero. Este resultado demuestra que la estrategia de reutilización prolongada de los encofrados metálicos compensa con creces el impacto inicial de su producción, en consonancia con los principios de la economía circular y la descarbonización de la construcción civil.

GRÁFICO 1 – Gráfico de barras que muestra el beneficio de no generar EPS (ganancias por acción).



Fuente: preparado por los autores (2026).

Emisiones netas de CO e por cada 1000 m² de losa durante 100 ciclos. El gráfico de barras muestra el beneficio de no producir EPS y el impacto atenuado de las fórmulas de acero. El balance neto de aproximadamente -5800 kg de CO e resalta la ventaja ambiental del sistema. Fuente: elaborado por los autores (2026).

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026

3 RESULTADOS

3.1 Comportamiento estructural de las formas y el monolitismo

Los ensayos analíticos indicaron una tensión máxima de 87,5 MPa en el encofrado metálico, inferior a la tensión admisible de 112 MPa, con un factor de seguridad de 3,2. La deflexión calculada fue de 1,41 mm para una luz de 29 cm. Si bien 1,41 mm > L/250 = 1,16 mm, esta deformación se consideró aceptable, ya que se trata de un elemento temporal desmontable cuya función es exclusivamente dar forma al hormigón fresco, sin integrarse en la estructura final (justificación basada en la norma NBR 6118).
artículo 13.3).
Un único vertido de hormigón sobre la cercha expuesta elimina la junta fría inherente a las vigas prefabricadas convencionales. El cordón inferior de la cercha permanece completamente revestido de hormigón nuevo, lo que indica una mayor adherencia y una menor susceptibilidad a la delaminación en la interfaz.

3.2 Evidencia experimental del prototipo

El prototipo confirmó la viabilidad del proceso de fabricación: no se observaron fugas de lechada, deformaciones plásticas permanentes, desplazamientos significativos ni dificultades de desmoldeo.
La pieza desmoldada presentaba una superficie y geometría regulares, consistentes con el encofrado utilizado (Tabla 1).
La estabilidad durante el hormigonado se confirmó por la ausencia de vibraciones excesivas o desplazamiento del encofrado.

3.3 Desempeño económico

Con base en los costos promedio de materiales y mano de obra, el costo total por metro cuadrado del sistema propuesto fue un 55,2 % menor que el del sistema EPS, considerando 100 ciclos de reutilización (Tabla 3). Como se ilustra en la Figura 3, el sistema propuesto resulta más ventajoso que el convencional a partir del ciclo 15.

El punto de equilibrio se alcanza entre el ciclo 12 y el 15 con EPS, y entre el ciclo 19 y el 22 con baldosas cerámicas. El período de recuperación de la inversión inicial es de 3,5 meses, considerando un ciclo por semana (ritmo de construcción típico para edificios de varias plantas). Para 100 ciclos, el ahorro acumulado en comparación con el sistema EPS alcanza aproximadamente R$ 5.800 por cada 1.000 m².

3.4 Equilibrio ambiental

La Tabla 4 muestra que la adopción del sistema propuesto evita la emisión de aproximadamente 5.800 kg de CO e por cada 1.000 m² de losa. Este valor equivale a las emisiones anuales de 1,3 automóviles de pasajeros en Brasil (promedio de 4.500 kg de CO /vehículo/año, Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2022). La dilución del impacto de la fabricación de los moldes de acero a lo largo de 100 ciclos prácticamente neutraliza el aumento de las emisiones, lo que demuestra que la estrategia de reutilización compensa el impacto incorporado del acero al amortizarse a lo largo de múltiples ciclos.

4. DISCUSIÓN

4.1 Comparación con los sistemas existentes y ventajas del monolitismo

La tabla 5 sitúa el sistema propuesto en relación con las alternativas consolidadas.

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026

Tabla 5 – Comparación cualitativa entre sistemas de construcción

Criterio	Sistema Propuesto	Molde de acero (Concepto Industrial)	Adaptar Losa (Daliforme, 2020)	Convencional (EPS)
Elimina las vigas prefabricadas	Sí	No	No	No
Molde reutilizable	Sí	Sí	No (perdido)	No
Generación de residuos	Muy bajo Bajo		Promedio	Alto
Monolitismo estructural total		Parcial	Parcial	Parcial

Fuente: Elaborado por los autores con base en Daliform Group (2020).

El sistema Steel Mold elimina el relleno pero conserva la viga prefabricada, preservando así la junta fría. El sistema Fit Slab utiliza encofrados desechables de polipropileno combinados con vigas prefabricadas; tiene un peso propio reducido, pero genera residuos plásticos y depende de elementos perdidos (Daliform Group, 2020). El sistema convencional combina vigas y EPS, generando un gran volumen de residuos de espuma y requiriendo una eliminación adecuada. El sistema propuesto elimina ambos componentes perdidos, lo que resulta en un monolito integral y una losa completamente colada in situ.

4.2 Comparación en profundidad con la literatura internacional

El uso de encofrados metálicos y sistemas híbridos altamente reutilizables ha sido objeto de debate en investigaciones recientes. Baskaran et al. (2025) analizaron diferentes combinaciones de materiales (madera, acero, aluminio y plástico) mediante un análisis del ciclo de vida (ACV) integrado con BIM. Los autores destacaron que el coste y las emisiones de los encofrados representan una parte significativa del impacto total de las estructuras de hormigón, pudiendo suponer entre el 50 % y el 60 % de los costes de construcción. En la misma investigación, los encofrados se clasificaron como tradicionales, flexibles y reciclables, y se observó que las opciones híbridas, que combinan acero, aluminio y plástico, presentaban una mayor reutilización y un menor coeficiente de desgaste.

En la literatura europea, los sistemas de losas huecas, como Cobiax y BubbleDeck, reducen el consumo de hormigón y el peso propio mediante insertos plásticos, pero mantienen la necesidad de un refuerzo complejo y, en muchas aplicaciones, preservan la interfaz entre el hormigón prefabricado y
Hormigón colado in situ (SCHNELLENBACH-HELD et al., 2000; CHUNG et al., 2015). A nivel internacional, la investigación sobre la viabilidad de los sistemas de encofrado metálico reutilizables (CASSAGNABÈRE et al., 2014; WANG et al., 2020) valida la reducción de los impactos ambientales y los costes operativos; sin embargo, estas soluciones suelen estar vinculadas al uso de elementos de relleno o métodos de viguetas tradicionales. Por lo tanto, la propuesta de este trabajo se diferencia al eliminar simultáneamente la vigueta prefabricada y el relleno desechable (EPS/cerámica), utilizando una cercha metálica autoportante integrada con encofrado metálico desmontable, con validación experimental y cuantificación explícita de los beneficios ambientales.

En cuanto a la sostenibilidad, Wu et al. (2021) demostraron que la prefabricación reduce los residuos de construcción y demolición en un promedio del 52 %, y que la integración de tecnologías digitales (BIM, RFID, IoT) permite monitorizar los componentes y reducir los residuos en origen. Estos hallazgos coinciden con la estrategia del sistema propuesto, que elimina la pérdida de elementos y permite el seguimiento de los ciclos de reutilización de los encofrados metálicos.

Nam et al. (2023) compararon el encofrado de resina sintética con el encofrado metálico (Euro Form) y concluyeron que, considerando el número de reutilizaciones, las emisiones de CO del encofrado de resina pueden ser aproximadamente un 32 % menores que las del encofrado metálico. Sin embargo, la mayor durabilidad y resistencia mecánica del acero (más de 150 ciclos, según Direct Scaffold Supply, 2025) siguen favoreciendo al sistema metálico en aplicaciones de alta repetición, como edificios de varias plantas, contexto para el que se diseñó el sistema actual.

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026

Desde una perspectiva medioambiental, el resultado está en consonancia con los debates sobre la economía circular en el entorno construido (Pomponi; Moncaster, 2017; Fundación Ellen MacArthur, 2019), en los que la reutilización de componentes temporales tiende a ser preferible al consumo recurrente de unidades desechables, siempre que el impacto inicial del material reutilizado se amortice adecuadamente a lo largo de su uso.
A pesar de los beneficios técnicos, económicos y ambientales demostrados, la adopción generalizada de sistemas de encofrado metálico reutilizables aún enfrenta importantes barreras. Entre ellas se encuentran la resistencia cultural al cambio de los métodos de construcción establecidos, la necesidad de una elevada inversión inicial por parte de las empresas constructoras y la ausencia de mecanismos de financiación o incentivos fiscales específicos para las prácticas de economía circular en la industria de la construcción brasileña (Pinto; González, 2018). Además, la estandarización dimensional del encofrado y la certificación de calidad por terceros (por ejemplo, sellos de conformidad para sistemas reutilizables) aún son incipientes en el mercado nacional, a diferencia de los países de la Unión Europea, donde directrices como el Reglamento de Productos de Construcción (UE) n.º 305/2011 establecen requisitos para la comercialización de sistemas de encofrado basados en el rendimiento y la durabilidad. Los estudios futuros deberían investigar modelos de negocio basados en el arrendamiento de encofrados y consorcios, así como políticas públicas que fomenten la sustitución de materiales desechables por soluciones reutilizables, alineando la industria de la construcción con los objetivos de descarbonización de Brasil en el marco del Acuerdo de París.

4.3 Implicaciones prácticas y condiciones de aplicación

El sistema es especialmente adecuado para edificios residenciales o comerciales de varias plantas (≥ 4), construcciones en serie (condominios, complejos de viviendas) y modelos de negocio basados en el alquiler de encofrados. En estas condiciones, el número de ciclos supera rápidamente el punto de equilibrio, convirtiendo el coste inicial en una ventaja competitiva.

Su uso en viviendas unifamiliares aisladas, pequeñas reformas o trabajos de baja repetición (< 10 ciclos) presenta una rentabilidad económica limitada. Para maximizar los beneficios, se recomienda capacitar al equipo de montaje, implementar un plan de mantenimiento preventivo para el encofrado y adoptar una plataforma digital (BIM) para planificar la logística y controlar el número de ciclos, como sugieren Wu et al. (2021).

La generalización del método para losas H16, H20, H25 y H30 es conceptualmente plausible, siempre que se recalibren la geometría del encofrado, la rigidez de la losa, la malla de apuntalamiento y la verificación de deformaciones para las nuevas alturas de las nervaduras y las cargas asociadas. Para alturas mayores, se recomienda la inclusión de nervaduras de refuerzo en la losa o un aumento del espesor a 1,5 mm.

4.4 Limitaciones del estudio

- Escala experimental: el prototipo de 0,60 m × 0,60 m no representa completamente el comportamiento de las losas continuas con luces de 4 m y 6 m, especialmente en lo que respecta a las deflexiones globales, la vibración y la redistribución de tensiones.

- Instrumentación: no se utilizaron galgas extensométricas, LVDT ni sensores de presión; las conclusiones experimentales se basan en la observación sistemática y la verificación analítica.
- Alcance simplificado del ACV: el análisis se centró en el carbono incorporado del EPS y el acero del encofrado evitados, sin considerar completamente el transporte, la logística inversa, el mantenimiento, cualquier galvanizado adicional ni el final de la vida útil. Sería necesario un ACV integral (de la cuna a la tumba) para una consolidación ambiental definitiva.

- Variabilidad macroeconómica: el punto de equilibrio (entre 12 y 22 ciclos) es sensible a
Fluctuaciones regionales en los precios del acero (encofrados) y de los derivados del petróleo (EPS). En escenarios de aumento de los precios del acero, la curva de equilibrio podría desplazarse hacia la derecha.
- Rendimiento en el estado límite último (ULS): el estudio no incluyó ensayos destructivos para cuantificar la ganancia real en la resistencia al corte horizontal en el ULS.

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026

- Curva de aprendizaje y mano de obra: el costo marginal adoptado presupone la presencia de trabajadores capacitados. Los estudios de tiempos y movimientos son necesarios para cuantificar la pérdida de productividad en los primeros ciclos de montaje y desmontaje.

CONCLUSIONES

El sistema analizado demostró viabilidad técnica en cuanto al comportamiento de las formas metálicas, con una tensión de trabajo de 87,5 MPa, inferior a la tensión admisible de 112 MPa, y un factor de seguridad de 3,2. La deflexión calculada (1,41 mm) se mantuvo dentro de un rango compatible con la naturaleza temporal del componente.

La sustitución de la viga prefabricada por una simple cercha metálica, combinada con un único vertido de hormigón, eliminó la característica de junta fría del sistema convencional, lo que indica una ganancia en monoliticidad y una mejora potencial en la adherencia entre el acero y el hormigón, de acuerdo con los principios de la norma NBR 6118 y... literatura clásica.

La viabilidad económica dependía del número de ciclos de reutilización, alcanzándose el punto de equilibrio entre el ciclo 12 y el 15 en comparación con el sistema EPS, y entre el ciclo 19 y el 22 en comparación con el sistema cerámico. El periodo de recuperación estimado fue de 3,5 meses (ciclo semanal). Para 100 ciclos, el ahorro alcanzó el 55,2 % en comparación con el sistema EPS.

Un análisis ambiental simplificado indicó que se evitaron emisiones netas de aproximadamente 5800 kg de CO e por cada 1000 m² de losa H12, lo que demuestra que la estrategia de reutilización puede compensar el impacto ambiental del acero a lo largo de múltiples ciclos. Este valor equivale a las emisiones anuales de aproximadamente 1,3 automóviles de pasajeros.

Este estudio consiste en la propuesta y validación analítico-experimental de un sistema que integra una cercha autoportante y un encofrado metálico reutilizable, eliminando simultáneamente los dos componentes con mayor impacto económico y ambiental del sistema convencional de losa de cercha: la viga prefabricada y el relleno desechable. Se diferencia de las soluciones internacionales (Steel Mold, Fit Slab, Cobiax, BubbleDeck) al no depender de vigas prefabricadas ni de elementos perdidos, y al presentar una cuantificación explícita de los costos, el ciclo de vida y las emisiones, con referencias actualizadas hasta 2025.

Como desarrollos naturales de este estudio, se recomienda lo siguiente para trabajos futuros: realizar ensayos de flexión a escala real (luz de 5 m) con instrumentación completa (galgas extensométricas, LVDT) para calibrar modelos de elementos finitos; evaluar el comportamiento dinámico (vibraciones) de pisos en edificios comerciales y hospitalarios; ampliar el análisis a losas H16, H20, H25 y H30, recalibrando la geometría del encofrado y el apuntalamiento; desarrollar un análisis completo del ciclo de vida (de la cuna a la tumba) con escenarios para transporte, mantenimiento, logística inversa y reciclaje de acero; cuantificar la curva de aprendizaje de la mano de obra mediante estudios de tiempo y movimiento; y desarrollar un manual ejecutivo para la fabricación, montaje, desmoldeo y mantenimiento de encofrados metálicos.

REFERENCIAS

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. El desafío de la sustentabilidad en la construcción civil. São Paulo: Blucher, 2011.

Asociación Brasileña de Normas Técnicas. NBR 6118: Diseño de estructuras de hormigón – Procedimiento. Río de Janeiro: ABNT, 2014.

Asociación Brasileña de Normas Técnicas. NBR 7480: Acero destinado al refuerzo de estructuras de hormigón armado – Especificación. Río de Janeiro: ABNT, 2007.

Asociación Brasileña de Normas Técnicas. NBR 14859-1: Losa prefabricada – Requisitos – Parte 1: Losas unidireccionales. Río de Janeiro: ABNT, 2016.

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026

Asociación Brasileña de Normas Técnicas. NBR 15696: Encofrados y apuntalamiento para estructuras de hormigón – Diseño, dimensionamiento y procedimientos de ejecución. Río de Janeiro: ABNT, 2009.

ABRAPEX. Manual para el uso de EPS en la construcción civil. 1ª ed. São Paulo: PINI, 2006.
BASKARAN, D.; CHOCKKALINGAM, U.; SENTHIL MUTHALVAN, R. Evaluación de sistemas de encofrado híbridos sostenibles mediante el análisis del ciclo de vida y el coeficiente de desgaste: un estudio de caso. Buildings, vol. 15, pág. 1630, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings15101630.
CARVALHO, R.C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. Cálculo y detalle de estructuras comunes de hormigón armado. 4ª edición. São Carlos: EdUFSCar, 2014.
CASSAGNABÈRE, C. et al. Análisis del costo y la huella de carbono de los sistemas de encofrado de hormigón. Organization, Technology and Management in Construction, vol. 6, n.º 1, págs. 913–925, 2014. DOI: https://doi.org/10.5592/otmcj.2014.1.3.

CHUNG, J.-H. et al. Diseño de un sistema de losa aligerada y su comportamiento estructural. Applied Sciences, vol. 5, n.º 4, págs. 1445–1461, 2015. DOI: https://doi.org/10.3390/app5041445.
GRUPO DALIFORM. Fit Slab: losas aligeradas bidireccionales – Manual técnico para losas de hormigón prefabricado. Treviso, Italia: Grupo Daliform, 2020. Disponible en: https://www.daliform.com.
Consultado el 4 de abril de 2026.
Suministro directo de andamios. Encofrados de acero: resistentes, reutilizables y económicos. Houston: DSS Inc., 2025. Disponible en: https://dss.net/steel-formwork/. Consultado el 3 de abril de 2026.
ECOINVENT. Base de datos Ecoinvent versión 3.8. Zúrich: Centro Suizo de Inventarios del Ciclo de Vida, 2021.

FUNDACIÓN ELLEN MACARTHUR. Economía circular en el entorno construido. Cowes: Fundación Ellen MacArthur, 2019.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Adhesión de armaduras en hormigón. Lausana: fib, 2000. (fib Boletín 10).

FORMOSO, C. T.; SANTOS, A.; POWELL, J. Un estudio exploratorio sobre la aplicabilidad de la transparencia de procesos en obras de construcción. Journal of Construction Research, vol. 3, n.º 1, págs. 35-54, 2002. DOI: https://doi.org/10.1142/S1609945102000102.
GIBB, A. G. F. Fabricación fuera de obra: prefabricación, preensamblaje y modularización. Loughborough: CIRIA, 1999.
HURD, MK Encofrados para hormigón. 7.ª edición. Farmington Hills: American Concrete Institute (ACI SP-4), 2005.

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN. ISO 14040: Gestión ambiental – Evaluación del ciclo de vida – Principios y marco. Ginebra: ISO, 2006.
KENDALL, A. Análisis del coste del ciclo de vida para ingenieros. Boca Raton: CRC Press, 2015.
LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. Construcciones de hormigón: principios básicos del diseño de estructuras de hormigón armado. Río de Janeiro: Interciência, 1977. v.1.
MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Hormigón: microestructura, propiedades y materiales. 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. Factores de emisión de CO en Sector transporte. Brasilia: MCTI, 2022.
NAM, K.Y.; LIM, M. K. Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida y aplicabilidad de los encofrados de resina sintética. Materials, vol. 16, n.º 2, pág. 696, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/ma16020696.
PIMENTEL, M.; PEREIRA, C.; SOUSA, C. Losas aligeradas biaxiales: estado del arte y consideraciones de diseño. Engineering Structures, págs. 98-112, DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.024. 2015.

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google

Año VII, vol. 1, 2026 | Envío: 9 de abril de 2026 | Aceptación: 13 de abril de 2026 | Publicación: 16 de abril de 2026

PLASTICS EUROPE. Perfiles ecológicos y declaraciones medioambientales de los fabricantes europeos de plásticos. Bruselas: Plastics 2020. https://plasticseurope.org/resources/eco-profiles/. Consultado el 4 de abril de 2026. Disponible en:

POMPONI, F.; MONCASTER, A. Economía circular para el entorno construido: un marco de investigación. Journal of Cleaner Production, vol. 143, págs. 710-718, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055.

SCHNELLENBACH-HELD, M.; PFEIFFER, K.; KARAKAS, A. Sistemas de losas huecas: diseño y construcción. Beton- und Stahlbetonbau, v. 95, núm. 8, pág. 467–475, 2000. DOI: https://doi.org/10.1002/best.200000820.

SOUZA, UEL. Cómo reducir las pérdidas en las obras de construcción. São Paulo: PINI, 2005.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M.; ZENG, S. X.; NG, W. C. Y. Hacia la adopción de la prefabricación en la construcción. Building and Environment, vol. 42, n.º 10, págs. 3642-3654, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.003.

TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. Teoría de placas y láminas. 2.ª ed. Nueva York: McGraw-Hill, 1959.

WANG, Y.; ZHANG, H.; CHEN, J. Evaluación económica y ambiental de encofrados de acero reutilizables en la construcción china. Journal of Cleaner Production, vol. 248, pág. 120789, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120789.

ASOCIACIÓN MUNDIAL DEL ACERO. Informe sobre la metodología de evaluación del ciclo de vida. Bruselas: Worldsteel, 2021. Disponible en: https://worldsteel.org/publications/. Consultado el 4 de abril de 2026.

Wu, Z.; LUO, L.; LI, H.; WANG, Y.; BI, G.; ANTWI-AFARI, M. F. Un análisis sobre la promoción de la implementación de la prefabricación en la industria de la construcción hacia la sostenibilidad. International Journal of Environmental Research and Public Health, vol. 18, n.º 21, pág. 11493, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph182111493.

Este es un artículo de acceso abierto publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.