

Impacto Ambiental Del Sistema SERMAP – PRFV Y Su Comparación Con Otros Sistemas De Viviendas

Environmental Impact Of SERMAP – PRFV System And Its Comparison With Other House Systems

Autores

Gabriel Martínez Licea¹, Hugo Rafael Wainshtok Rivas², Isel del Carmen Díaz Pérez³, Sergio Alfredo Marrero Osorio⁴

¹ Ingeniero Civil, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), Calle 114 % Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, email: gamarlic2709@gmail.com

² Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), Calle 114 % Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, email: hugow@tesla.cujae.edu.cu

³ Ingeniera Civil, Doctora en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), Calle 114 % Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, email: iseldiaz77@gmail.com.

⁴ Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), Calle 114 % Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, email: smarrero@mecanica.cujae.edu.cu

RESUMEN

Con la premisa humana de contribuir al desarrollo sostenible de la sociedad, ingenieros e investigadores trabajan en la búsqueda de alternativas ecológicas para la construcción de viviendas. El sistema de edificios residenciales de mortero armado prefabricado con barras de polímero reforzado con fibras de vidrio (SERMAP - PRFV) se basa en el uso de elementos ligeros de forma canal como solución de cimentación, pared, viga de cerramiento, entepiso y cubierta. El pequeño espesor de los elementos (25 – 35mm) conlleva a un ahorro de cemento que pudiera llegar a ser de hasta un 45% del que se necesitaría para construir con el sistema convencional bloques y losa de hormigón armado con acero, y por su poco peso no se hace necesario el uso de costosos equipos de izaje. Mediante la aplicación de un análisis de ciclo de vida (ACV) se demuestra que, para el ambiente agresivo de las zonas cercanas a las costas cubanas, el sistema SERMAP – PRFV genera menor impacto ambiental que el sistema tradicional y los sistemas prefabricados Sandino, y Viguetas y bovedillas.

Palabras claves: Análisis del ciclo de vida, sistema SERMAP - PRFV, impacto ambiental, sostenibilidad

ABSTRACT

With the human premise of contributing to the sustainable development of society, engineers and researchers work looking for ecological alternatives for the housing construction. The SERMAP – PRFV system is based on the use of precast lightweight panels for foundations, walls, beams and slabs solutions. The small thickness of the elements leads to an economy of cement that could be up to 45% of what would be needed to build with conventional concrete block wall and reinforced concrete slab system, and in consequence to its low weight it is not necessary the use of expensive lifting equipment. With the application of a Life Cycle Assessment (LCA), it is shown that, for the aggressive environment of the areas near the Cuban coasts, the SERMAP – PRFV system generate less environmental impact than conventional system, Sandino and small beams and lightweight bricks prefabricated systems.

Keywords: Life cycle assessment, SERMAP – PRFV system, environmental impact, sustainability

Nota Editorial: Recibido: Marzo 2022 Aceptado: Marzo 2022

1. Introducción

La corrosión del acero de refuerzo en el hormigón armado es la principal causa del deterioro de las estructuras construidas con este material. El mayor impacto se genera en las zonas cercanas a las costas debido a la agresividad del ambiente marino. Este fenómeno ocurre por la deposición de iones de cloruro en el hormigón, lo cual provoca que se afecte la capa pasivante del acero y en consecuencia se inicie la corrosión.

Son variados los métodos investigados para mitigar la corrosión de las barras de acero. El uso de inhibidores de corrosión, resinas protectoras aplicadas al hormigón, propuestas de diseño de mezcla de hormigón menos poroso, incremento del recubrimiento neto de las barras, entre otros, han probado ser métodos efectivos para retardar la corrosión; sin embargo, no se logra eliminar del todo. Otra práctica disponible es el empleo de barras de acero inoxidable, con las que sí se logra eliminar, pero su costo es muy superior al del acero ordinario [1, 2].

El desarrollo de las barras de polímero reforzado con fibras (PRF) en los últimos años y su uso validado como refuerzo del hormigón, permitió contar con una nueva alternativa para enfrentar y eliminar el fenómeno de la corrosión en las estructuras, ya que se trata de un material inoxidable [3-8]. Los PRF son materiales compuestos por fibras embebidas en una matriz de resina epóxica, de poliéster o de vinyl, cuya principal ventaja con respecto a las barras de acero es su durabilidad [9-12]. Las fibras de vidrio son las más empleadas por poseer la mejor relación resistencia/costo.

La sostenibilidad de un producto puede medirse según el gasto económico y el impacto medioambiental que provoca desde el principio hasta el final de su vida útil. El precio de las barras de polímero reforzado con fibras de vidrio (PRFV) es superior al del acero ordinario en la actualidad [2, 13]; sin embargo, se ha demostrado en investigaciones realizadas que el PRFV puede resultar ser más económico en un análisis de costos del ciclo de vida (ACCV), debido en lo fundamental a los gastos por reparaciones y reconstrucción de los elementos de hormigón armado con acero [2, 14]. El impacto medioambiental puede ser evaluado al aplicar un análisis del ciclo de vida (ACV), herramienta que ha sido utilizada anteriormente para demostrar las ventajas ecológicas de los elementos de hormigón armado con PRFV con respecto a su homólogo con barras de acero [15-17]. Así mismo, debe tenerse en cuenta que la industria de la construcción es responsable por la emisión de cerca del 7% del dióxido de carbono del mundo debido a la alta demanda de la producción del hormigón, de ahí la necesidad de reducir el consumo de este material [18]. Con el uso de los PRFV es posible conformar elementos de mortero armado de pequeño espesor (25 – 35mm), debido a su excelente durabilidad, lo cual implica una reducción notable del consumo de hormigón [12].

En Cuba el fenómeno de la corrosión tiene especial importancia debido a su condición de archipiélago, sus características meteorológicas y su posición geográfica [19]. Por ello, en los últimos años ha cobrado fuerza la idea de crear las condiciones necesarias para producir barras de PRFV en el país, respaldado además por la experiencia adquirida en la construcción de estructuras empleando este material. Como respuesta a la situación actual, se desarrolla el sistema de edificios residenciales de mortero armado prefabricado con barras de polímero reforzado con fibras de vidrio (SERMAP - PRFV) por un equipo de ingenieros e investigadores del Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT), de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Este está conformado por paneles ligeros prefabricados de sección transversal canal de pequeño espesor, que son utilizados como solución de cimentación, pared, viga de cerramiento, entrepiso y cubierta.

El objetivo de este trabajo es cuantificar el impacto ambiental que generaría una construcción con el sistema SERMAP en una zona de muy alta agresividad, y compararlo, en este aspecto, con el sistema convencional muros de bloques y losa de hormigón armado con acero, con el sistema prefabricado de entrepisos y cubierta con viguetas y bovedillas, y con la solución constructiva prefabricada Sandino, ya que son las variantes más empleadas en Cuba para construir viviendas. Para ello se realiza el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de un proyecto de vivienda unifamiliar que se solucionará con los sistemas mencionados

2. Desarrollo

2.1. Sistema SERMAP-PRFV

El sistema SERMAP – PRFV es un sistema en desarrollo, totalmente prefabricado, compuesto por elementos que se caracterizan por su sección transversal canal de dimensiones reducidas (Figura 1) que se destacan por su ligereza en comparación con los elementos de hormigón armado debido a su pequeño espesor, entre 25 y 35mm.



a) Armadura de refuerzo de PRFV. b) Elementos de entrepiso o cubierta.
Figura 1. Elementos principales del sistema SERMAP.

Los paneles de pared, entrepiso y cubierta pueden ser conformados por una máquina vibro – compactadora (Figura 2) cuya productividad es aproximadamente de un metro de panel por minuto. Además de la semi-mecanización de la producción y la facilidad de su operación, la máquina moldea los elementos de tal forma que, al rellenar las juntas entre los paneles de entrepiso y cubierta, se produce el efecto conocido como llave de cortante para transmitir los esfuerzos a los laterales de la estructura, y con ello mejorar el trabajo del conjunto [20]. Otra de las ventajas es que la misma máquina puede conformar los moldes donde posteriormente se producen los paneles estructurales, con solo un cambio de aditamento.



Figura 2. Hormigonado del elemento con máquina vibro compactadora

De su antecesor, el sistema de edificios residenciales de ferrocemento (SERF) (Figuras 3 y 4), se obtuvo como experiencia la posibilidad de construir una vivienda en un tiempo reducido con un mínimo de personal calificado. Las dimensiones de la sección transversal de los elementos del sistema SERF son similares a los del sistema SERMAP – PRFV. Entre las ventajas constructivas del sistema SERMAP - PRFV se mencionan: la rapidez y comodidad con que se prepara la armadura de PRFV, debido al menor peso específico del material, y la posibilidad de prescindir de equipos de izaje de alto costo en el montaje de los elementos debido a su relativo poco peso, al igual que en el sistema SERF.



a) Losa de entepiso o cubierta.

b) Paneles verticales para paredes.

Figura 3. Montaje de los elementos estructurales del sistema SERF.



Figura 4. Vivienda unifamiliar con el sistema SERF.

2.2. Materiales y métodos

La base para la comparación del impacto ambiental generado por los sistemas mencionados anteriormente, es un proyecto de vivienda típica unifamiliar rectangular: $6,50m \times 5,55m$, de área $36m^2$, puntal $2,5m$ y cubierta plana, que será construida en una zona de muy alta agresividad según la Norma Cubana NC-207 [21]. Su planta arquitectónica se muestra en la figura 5.

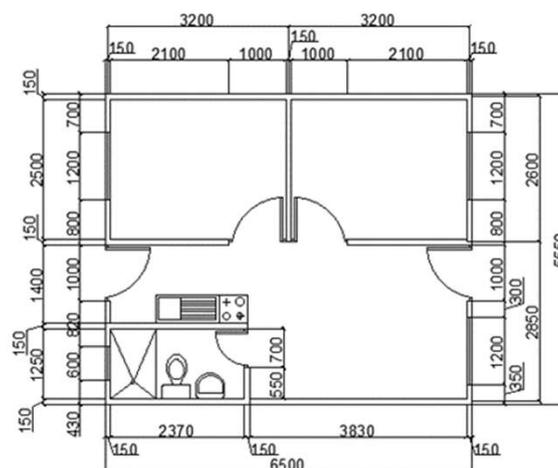


Figura 5. Planta arquitectónica de la vivienda unifamiliar

Solución estructural con sistema SERMAP – PRFV.

Los elementos componentes del sistema SERMAP – PRFV requeridos son: las losas de cubierta, viga canal para cerramiento y cimentación corrida, y los paneles verticales de pared. El mortero diseñado para conformar los elementos tiene una dosificación en peso de 1:3 y una relación agua/cemento de 0,45, con lo cual se logra una resistencia característica de 25MPa. Para conformar la armadura se consideraron barras y mallas tridimensionales de PRFV producidas en la fábrica de Yaroslavl, Rusia, cuyas propiedades mecánicas son las siguientes: resistencia última a tracción, 800 MPa; resistencia última a cortante, 150 MPa; módulo de elasticidad, 50 000 MPa y deformación última a tracción de 1,6%.

Los elementos se diseñaron mediante el método gráfico hiporreforzado [22] y las indicaciones de la norma del American Concrete Institute ACI 440-R15 [23], para soportar una carga de uso de $0,80 \text{ kN/m}^2$ el peso propio de la estructura y una carga permanente de $0,11 \text{ kN/m}^2$ correspondiente a la solución de impermeabilización a través de mantas asfálticas y hormigón celular como conformador de pendiente. En la figura 6 se muestran los resultados del diseño.

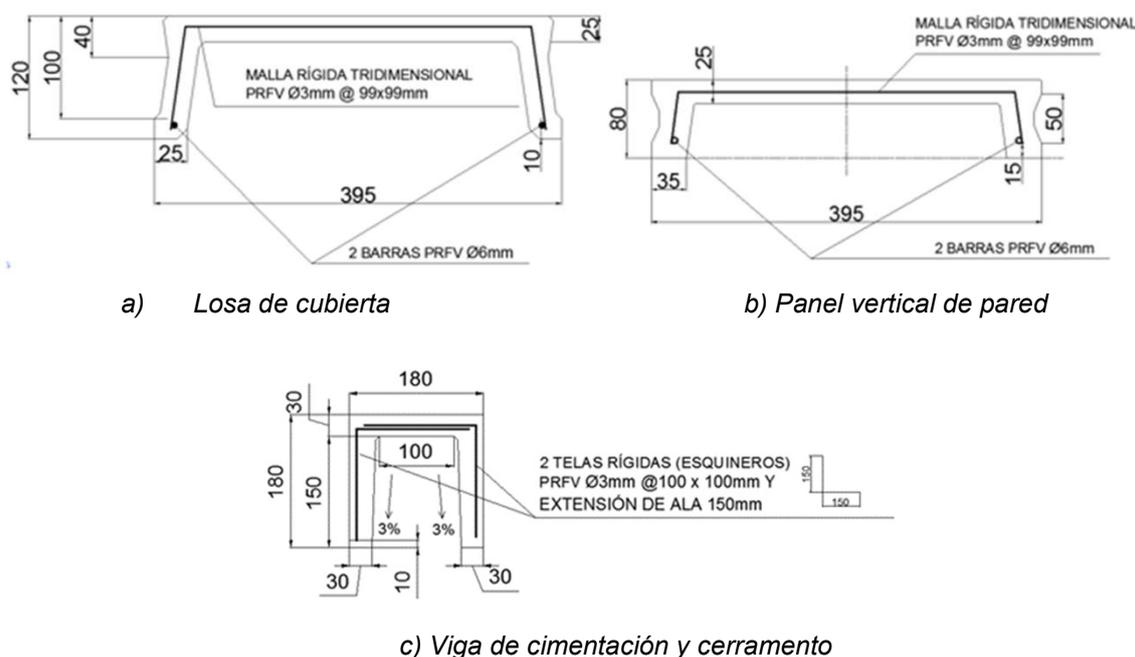


Figura 6. Armadura de refuerzo de los elementos estructurales.

La armadura de refuerzo de la losa de cubierta y el panel vertical de pared consiste en dos barras rectas de PRFV $\varnothing 6\text{mm}$ unidas al extremo inferior de la malla rígida tridimensional con espaciamiento de $100 \times 100\text{mm}$ entre sus barras de diámetro 3mm. Para la viga de cimentación y cerramiento se usarán dos telas de malla rígidas de PRFV en forma de esquinero con espaciamiento $100 \times 100\text{mm}$ entre sus barras de 3mm, y cuya extensión de ala es de 150mm.

Para construir la vivienda con el sistema SERMAP se necesitan 108m de losa de cubierta, 188m de paneles verticales para las paredes y 73m de vigas de cimentación y cerramiento. Se consideró que las fibras de vidrio componen aproximadamente el 75% del peso del PRFV, y la resina epóxica los restantes 25%.

Solución estructural con sistema convencional.

La decisión por proyecto es usar bloques de 15cm de ancho para los muros de la vivienda, elaborados con un hormigón de dosificación 1: 6,2: 2,0 y relación agua/cemento 0,35. El hormigón diseñado para los elementos "in situ" es de calidad 30MPa, según las indicaciones de la norma cubana NC-207 [21] para zonas de muy alta agresividad. En correspondencia, la dosificación que se decidió emplear es 1: 1,5: 2,0: 0,40. El recubrimiento neto del refuerzo establecido fue de 40mm [21]. Para el refuerzo se consideraron barras de acero de calidad G40 cuya tensión de fluencia es de 300MPa.

La separación entre las columnas es de un metro en todo caso. Estas son de longitud 2400mm y sección transversal 110 x 110mm. Para una vivienda unifamiliar, su refuerzo está constituido por 4 barras longitudinales de acero Ø10mm y cercos de acero Ø6mm. Se colocarán 3 cercos separados a 150mm en los extremos, y el resto espaciado a 300mm. En el extremo superior se coloca una barra de acero Ø12mm embebida en la columna, con un saliente de 100mm para mejorar el vínculo estructural entre la columna y la viga de cerramiento que será hormigonada “in situ” posteriormente. Los paneles de cierre son de espesor 60mm y sección plana de 960 x 490mm. Para las columnas se empleará el mismo hormigón que para la losa maciza, y para los paneles, un hormigón de dosificación 1: 2.0: 2.0: 0.50. La viga de cerramiento tendrá las mismas características que la del sistema convencional, así como el refuerzo de la viga zapata, pero esta última con una sección transversal de 250 x 300mm.

Cantidad de materiales.

En la Tabla 1 se resume la cantidad de materiales necesarios para construir la estructura de la vivienda unifamiliar mediante el empleo de las soluciones estructurales anteriores: Sistema SERMAP – PRFV, sistema convencional, vigueta y bovedillas de hormigón simple (VB (H)) y de poliestireno expandido (VB (PE)) y el sistema Sandino

Tabla 1. Resumen de materiales para construir la vivienda unifamiliar.

Material	U/M	Solución de cubierta				Solución de viga zapata, pared y viga de cerramiento		
		SERMAP - PRFV	Losa maciza	VB(H)	VB(PE)	SERMAP - PRFV	Convencional	Sandino
Acero	kg	-	297	91	101	-	421	595
Fibras de vidrio	kg	22	-	-	-	48	-	-
Resina epóxica	kg	7	-	-	-	16	-	-
Cemento	kg	972	2470	2488	1081	2592	3945	4795
Hormigón	m3	1.62	5.20	4.39	1.96	4.32	9.71	9.38
Agua fresca	kg	437	988	951	433	1166	1522	2104
Arena ordinaria	kg	2916	3705	5058	1622	7776	12000	8120
Árido grueso	kg	-	4940	2984	2007	-	7220	9590
Poliestireno expandido	kg	-	-	-	154	-	-	-

A partir de los resultados obtenidos en la Tabla 1 se confirma que, de forma general, el sistema SERMAP - PRFV consume menor cantidad de materiales que el resto de las soluciones analizadas. El hormigón necesario para construir la cubierta con el sistema SERMAP – PRFV representa aproximadamente el 31% del necesario mediante la vía “in situ”. En el caso de los elementos viga zapata, pared y viga de cerramiento, el hormigón consumido representa el 44% del necesario para la solución tradicional.

2.3. Análisis del ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida (ACV) es una herramienta aprobada por la Organización Internacional de la Estandarización (ISO 14040) [24] para estimar el impacto ambiental de un producto, material o proceso. Se decidió usar en este trabajo el indicador de demanda de energía acumulada (DEA), influencia en el calentamiento global según la metodología del punto medio de Recipe [25] y la herramienta Ecolizer 2.0 [26] para calcular la carga medioambiental. La metodología de aplicación del ACV comprende cuatro pasos fundamentales: definir inicio, flujo y final del ciclo (Figura 9); definir el impacto que genera cada proceso, calcular el impacto total por etapa; y realizar el análisis de los resultados finales.

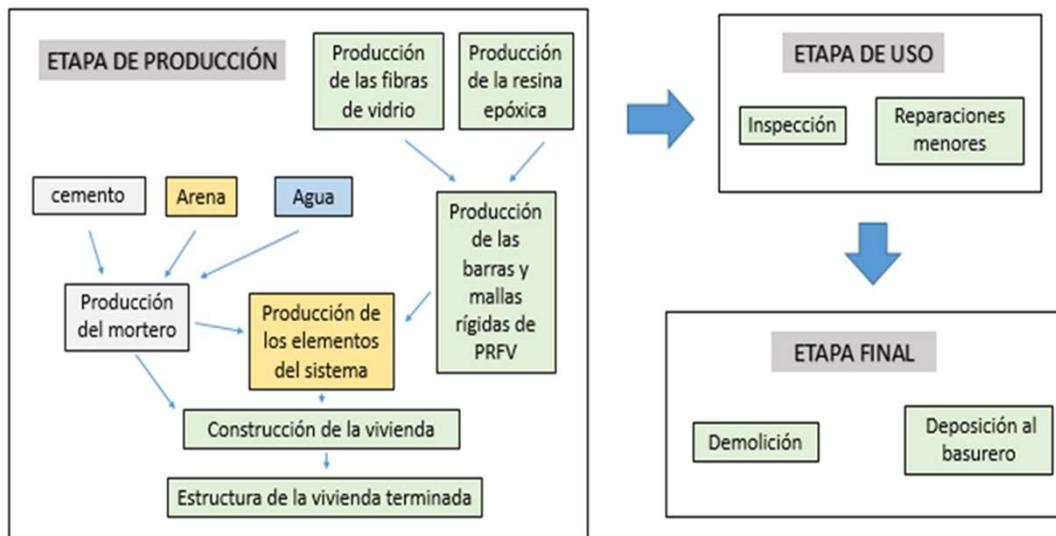


Figura 9. Diagrama del flujo del ciclo de vida de una vivienda construida con el sistema SERMAP - PRFV

La demanda de energía acumulada (DEA) indica la cantidad de energía primaria que consume un proceso determinado. Esta es generada principalmente a través del agotamiento de los combustibles fósiles. La influencia en el calentamiento global se mide a partir de los gases emitidos a la atmósfera. Cada gas tiene un factor de conversión o equivalencia a dióxido de carbono, con el objetivo de unificar la variable y facilitar la comparación. La herramienta Ecolizer 2.0 describe numéricamente la carga medioambiental generada por un proceso o por un material en su ciclo de vida, a través de la variable ecopoints, expresada en milipoints (mPts).

Para calcular la DEA y la emisión de gases que genera el procesamiento de la fibra de vidrio y la resina epóxica, y la producción del refuerzo de PRFV, se adoptaron los datos resumidos en la investigación de J.R. Dufflou, Y.Deng, K.V. Acker y W. Dewulf [27]. Se asumió que las barras rectas de PRFV se producen mediante el proceso de pultrusión, ya que este es el más utilizado debido a su alta relación productividad/ costo, y las mallas tridimensionales de PRFV a través del proceso de devanado de filamentos (filament winding). Se asumió que el acero se produce mediante la ruta primaria por caldera caliente y se escogió la media de los valores indicados en la investigación de J. Morfeldt, W. Nijs y S. Silveira [28]. En la producción del cemento se estimó que se emite 0.50kg de CO₂ por cada kg de cemento producido [29] y se consume 3.35 MJ/kg [30]. Para la extracción de los áridos gruesos y finos se consume 0.120 y 0.020 MJ/kg respectivamente [15]. En el mezclado de materiales para la elaboración del hormigón se valoró un consumo de 33 MJ/m³ [31]. La máquina vibro compactadora para conformar los elementos del sistema SERMAP consume 0.03MJ/m. Para la adquisición de los materiales del poliestireno expandido y su elaboración se asumieron los datos de la investigación de K. Biswasa, S. S. Shresthaa, M. S. Bhandarib, y A. O. Desjarlaisa [32]. En la tabla 2 se resumen estos valores.

Tabla 2. Resumen de los valores de cada indicador para cada material o proceso en la etapa de producción y construcción.

Material	DEA	Gases (kgCO ₂ /kg)	Ecopts (mPt/kg)
Barras de PRFV	124.1 (MJ/kg)	9	1009
Mallas rígidas de PRFV	123.7 (MJ/kg)		1007
Acero	25.5 (MJ/kg)	1.6	86
Cemento	3.35 (MJ/kg)	0.5	49
Hormigón	33 (MJ/m ³)	*	17659
Paneles	0.03 (MJ/m)		*
Arena ordinaria	0.02 (MJ/kg)		0.6
grava o gravilla	0.12 (MJ/kg)		
Poliestireno expandido	100.87 (MJ/kg)	4.18	384

*Valor nulo o despreciable.

No se consideró en el análisis el impacto de la transportación de los materiales a la planta de producción o a la obra, pero se señala que el sistema SERMAP - PRFV tiene ventaja en este aspecto con respecto a los otros sistemas, debido al menor consumo de materiales. De manera similar ocurre en la etapa de servicio. Es significativa la carga ambiental generada por la producción de los materiales para realizar las reparaciones por problemas de corrosión en el caso de los elementos de hormigón armado con acero, sin embargo, los datos en la literatura son insuficientes para realizar un estimado acorde.

En la etapa final o fin de la vida útil, se consideró que la energía necesaria para la demolición del hormigón es de 0,007MJ/kg [31] y su deposición al vertedero, 0,017MJ/kg [18]. Los cuatro métodos principales para reciclar el PRF son: reciclado mecánico, pirólisis, procesamiento en lecho fluidizado y mediante tratamiento químico [27]. Para este trabajo se asumió que las barras de PRFV se depositarán directamente al vertedero, lo cual consume 0,09 MJ/kg [27]. Lo mismo se asumió para las barras de acero, pero en este caso la energía consumida es despreciable [27]. La deposición al vertedero del poliestireno expandido consume 0.07MJ/kg y emite 0.03kg de CO₂ por cada kg del material.

3. Resultados

Una vez fijado a cada material o proceso el valor correspondiente de los indicadores en cuestión durante el ciclo de vida, se calcularon los valores totales para cada solución estructural (Tabla 3). En la figura 10 se muestran las relaciones porcentuales entre los valores de DEA, gases emitidos y ecopoints obtenidos para cada solución de cubierta. En la figura 11 se establecieron dichas relaciones para las soluciones de viga zapata, pared y viga de cerramiento, y en la figura 12 se analizaron posibles variantes de combinaciones entre soluciones para la construcción total de la estructura de la vivienda. Se tomó como referencia 100% al sistema convencional muros de bloques y losa maciza de hormigón armado con acero en todo caso.

Tabla 3. Total de demanda de energía acumulada (DEA), gases emitidos y ecopoints durante el ciclo de vida de la vivienda.

Indicador	U/M	Solución de cubierta				Solución de viga zapata, pared y viga de cerramiento		
		SERMAP - PRFV	Losa maciza	VB(H)	VB(PE)	SERMAP - PRFV	Convencional	Sandino
DEA	MJ	5105	17327	11502	22193	12793	25938	33399
Gases emitidos	kg CO2	590	1710	1389	1351	1523	2646	3350
Ecopoints	mPt	89467	243750	212052	157589	232931	412583	462392

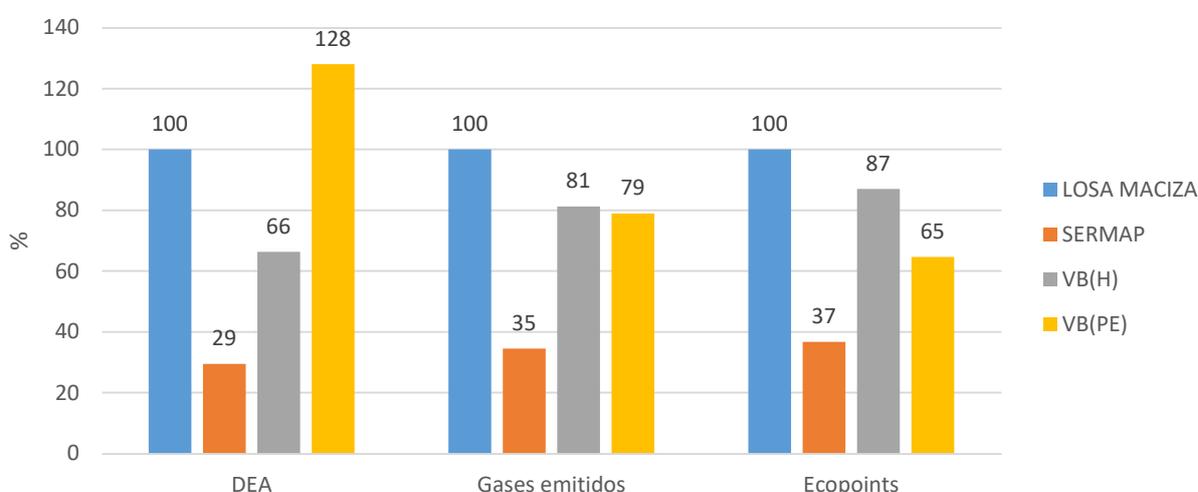


Figura 10. Relación porcentual entre los resultados obtenidos para las soluciones de cubiertas: Losa maciza, losa SERMAP, y viguetas y bovedillas.

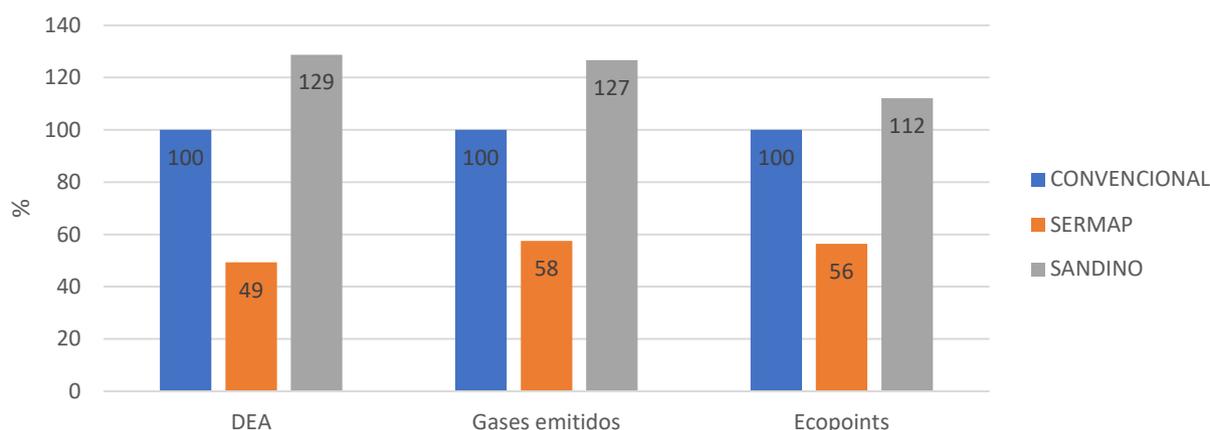


Figura 11. Relación porcentual entre los resultados obtenidos para las soluciones de viga zapata, pared y viga de cerramiento: Sistema convencional, sistema SERMAP y sistema Sandino.

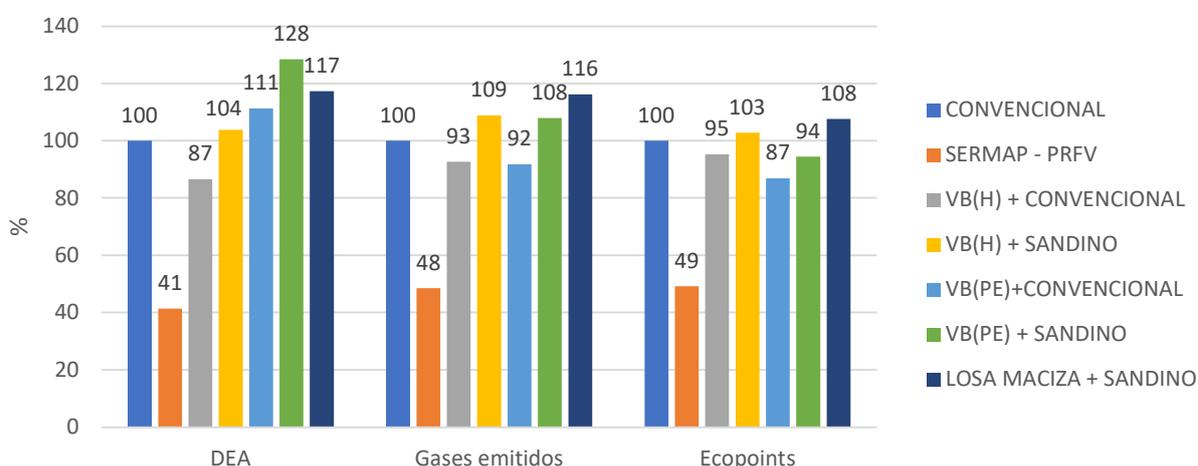


Figura 12. Relación porcentual entre los resultados obtenidos por el sistema SERMAP y las posibles variantes de combinaciones entre las soluciones analizadas.

El sistema SERMAP - PRFV resultó ser el de menor demanda de energía acumulada, el que menos gases dañinos emite a la atmósfera y el que menor carga ambiental genera, con una diferencia significativa apreciable en los gráficos comparativos, tanto como solución de cubierta de forma independiente, como solución de viga de zapata, paredes, y viga de cerramiento. La reducción del valor de los indicadores de DEA, gases emitidos y ecopoints con respecto a los sistemas de menores resultados después del SERMAP - PRFV es del 52%, 47% y el 43%, respectivamente.

Estos resultados se debieron fundamentalmente a que el sistema SERMAP - PRFV consume menor cantidad de hormigón y cemento que el resto de los sistemas analizados. Con respecto al sistema de viguetas y bovedillas de poliestireno expandido (VB (PE)), en cuyo caso se requirió una cantidad similar de hormigón y cemento, la diferencia se debió precisamente a los valores de los indicadores del poliestireno expandido, destacándose el relativo alto consumo de energía para la adquisición de los materiales necesarios en su elaboración.

4. Conclusiones

Se obtuvo el impacto ambiental que genera el sistema SERMAP – PRFV en el ciclo de vida de la estructura, a través de los indicadores de demanda de energía acumulada, influencia en el calentamiento global por los gases dañinos emitidos y el valor que cuantifica la carga ambiental de un producto o proceso: ecopoint. Así mismo se evaluaron estos indicadores para el sistema convencional o tradicional de muros de bloques de hormigón y losa maciza de hormigón armado con acero, el sistema de viguetas y bovedillas, y la solución constructiva Sandino.

A partir de los resultados obtenidos se demuestra que el sistema SERMAP – PRFV es una alternativa para la construcción de viviendas que genera menor impacto ambiental que los sistemas más utilizados en Cuba y es, por lo tanto, un sistema más ecológico. En zonas de muy alta agresividad, el daño ocasionado al medio ambiente puede reducirse a un valor cercano a la mitad si se emplea este sistema en lugar de otro de los analizados en este trabajo.

En otro sentido, la demanda de energía acumulada es un indicador que influye directamente en la economía, ya que la energía primaria es obtenida fundamentalmente a través de los combustibles fósiles como se mencionaba anteriormente. Esto significa que una reducción significativa de la DEA implica una disminución de los costos generales cuando se analiza el marco global, por lo cual se propone incluir este aspecto en un análisis económico del sistema SERMAP – PRFV debido a que se logra una disminución importante de este indicador.

Referencias Bibliográficas

- [1] D. V. Vala and M. G. Stewart, "Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments," *Structural safety* 2003.
- [2] A. Younis, U. Ebead, and S. Judd, "Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement," *Construction and Building Materials*, 2018.
- [3] F. Aydın, "Experimental Study on the Flexural Behaviour of a Novel Concrete Filled Hybrid Beams Reinforced with GFRP and Steel Bars," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 23, no. 11, p. 8, 2019.
- [4] E. Pournamazian, A. Vatani, M. Houshmand, P. Shoaee, and T. Ozbakkaloglu, "The tensile performance of FRP bars embedded in concrete under elevated temperatures," *Construction and Building Materials* p. 15, 2019.
- [5] M. K. Dhahir and W. Nadir, "A compression field based model to assess the shear strength of concrete beams reinforced with longitudinal FRP bars," *Construction and Building Materials*, p. 16, 2018.
- [6] H. Huang, Y. Yuan, W. Zhang, R. Hao, and J. Zeng, "Bond properties between GFRP bars and hybrid fiber-reinforced concrete containing three types of artificial fibers," *Construction and Building Materials*, p. 18, 2020.
- [7] A. Rolland, P. Argoul, K. Benzarti, M. Quiertant, S. Chataigner, and A. Khadour, "Analytical and numerical modeling of the bond behavior between FRP reinforcing bars and concrete," *Construction and Building Materials*, p. 14, 2020.
- [8] R. Salih and Z. Fangyuan, "Numerical Investigation of the Behavior of Reinforced Concrete Beam Reinforced with FRP Bars," *Civil Engineering Journal*, vol. 5, no. 11, p. 13, 2019.
- [9] M. Khatibmasjedi and A. Nanni, "Durability of GFRP reinforcement in seawater concrete," *Construction and Building Materials*, 2021.
- [10] S. Khatibmasjedi, F. D. Caso, and A. Nanni, "SEACON: Redefining Sustainable Concrete," presented at the SCMT4, Las Vegas, USA, 2016.
- [11] O. A. Mohamed, W. A. Hawat, and M. Keshawarz, "Durability and Mechanical Properties of Concrete Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer (BFRP) Bars: Towards Sustainable Infrastructure," *Polymers* 2021.
- [12] H. R. Wainshtok R, J. A. Hernández C., and I. Díaz P., *Calidad y Durabilidad de las Construcciones. El Uso de los PRF como Refuerzo del Hormigón Armado y el Ferrocemento*. Cuba, 2017, p. 206.
- [13] S. Reichenbach, P. Preinstorfer, M. Hammerl, and B. Kromoser, "A review on embedded fibre-reinforced polymer reinforcement in structural concrete in Europe," *Construction and Building Materials*, 2021.
- [14] V. M. Suryawanshi and G.D.Awchat, "Comparative assessment and cost estimation of GFRP-RC and STEEL-RC composite (box multi-cell type) bridge using Staadpro," *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, vol. 6, no. 2, 2021.
- [15] S. Dong, C. Li, and G. Xian, "Environmental Impacts of Glass- and Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Bar-Reinforced Seawater and Sea Sand Concrete Beams Used in Marine Environments: An LCA Case Study," *Polymers*, vol. 13, no. 154, 2021.
- [16] A. Katz, "Environmental Impact of Steel and Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Pavements," *Journal of Composites for Construction*, vol. 8, no. 6, 2004.
- [17] N. Garg and S. Shrivastava, "Environmental and economic comparison of FRP reinforcements and steel reinforcements in concrete beams based on design strength parameter," presented at the UKIERI Concrete Congress, 2019.
- [18] T. Ding, J. Xiao, and V. W. Y. Tam, "A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China," *Waste Management*, 2016.
- [19] A. C. Valdés, R. M. Águila, O. M. Abad, C. V. Clemente, and J. J. H. Albear, "Aporte económico en estudios de corrosión atmosférica y deterioro de materiales en zonas estratégicas del clima tropical costero de Cuba," 2020.
- [20] S. M. Osorio and L. P. Quiñones, "Joint Simulation With Shear Key And Wedge Effect For Lightweight Precast Slabs," *Revista Ciencia y Construcción*, vol. 2, no. 4, 2021.
- [21] NC-207. "Requisitos generales para el diseño y construcción de estructuras de hormigón", ed. Cuba: Oficina Nacional de Normalización (NC), 2019.
- [22] G. M. Licea, I. D. Pérez, and H. W. Rivas, "Diseño De Elementos De Hormigón Armado Con Barras De PRF Para Secciones Hiporreforzadas," *Revista Ciencia y Construcción*, vol. 2, no. 4, 2021.

Referencias Bibliográficas

- [23] ACI-440.1R. "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars", ed. Farmington Hill EUA: American Concrete Institute (ACI), 2015.
- [24] ISO 14040 "Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework", Ed. Geneva. Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2006.
- [25] ReCiPe 2016 v1.1 "A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization", Ed. The Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment, 2016.
- [26] Ecolizer 2.0 (Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij, Mechelen, Belgium, 2003–2011).
- [27] J. R. Duflou, Y. Deng, K. V. Acker, and W. Dewulf, "Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study," *Transportation Composites*, vol. 37, 2012.
- [28] J. Morfeldt, W. Nijs, and S. Silveira, "The impact of climate targets on future steel production e an analysis based on a global energy system model," *Journal of Cleaner Production*, 2014.
- [29] R. M. Andrew, "Global CO2 emissions from cement production, 1928–2018," *Earth System Science Data*, 2019.
- [30] E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, and L. O. Meida, "Carbon dioxide emissions from the global cement industry," *Annual Review of Energy and the Environment* 2001.
- [31] J. Sjunnesson, "Life Cycle Assessment of Concrete," Master thesis, Department of Technology and Society Environmental and Energy Systems Studies Gerdagatan LUND UNIVERSITY, 2005.
- [32] K. Biswasa, S. S. Shresthaa, M. S. Bhandarib, and A. O. Desjarlaisa, "Insulation materials for commercial buildings in North America: An assessment of lifetime energy and environmental impacts.," *Energy and Buildings*, p. 14, 2015.