

Waste production on terraces with PVC sheets and study of their CO₂ emissions

Producción de residuos en azoteas con láminas de PVC y estudio de sus emisiones de CO₂

MANUEL J. CARRETERO-AYUSO

University of Extremadura
carreteroayuso@yahoo.es

JUSTO GARCÍA-SANZ-CALCEDO

University of Extremadura
jgsanz@unex.es

GONZALO SÁNCHEZ-BARROSO

University of Extremadura
gsanchezmoreno@gmail.com

MIGUEL GÓMEZ-CHAPARRO

HM Hospitals
mgomezchaparro@hnhospitales.com

The objective of the analysis presented is to compare the environmental impact of different solutions of roofs according to the CO₂ emissions they release into the atmosphere (in kg/m²), as well as the generation of waste (in kg/m²), from the nature of their different constituent layers. For this purpose, waste has been grouped under two criteria: waste per placement and waste per packaging. The analysed roofs are all with a slope of less than 5% (i.e. flat roofs); in order to be more specific, the typologies that were inverted type have been chosen (which means that the insulation was arranged over the waterproofing), given that they are the most commonly used. In addition, only variants with the waterproofing layer consisting of a PVC membrane and three different types of roofs were compared: non-trafficable flat roof finished with gravel (Type A), garden flat roof (Type B) and walkable flat roof with fixed tile flooring (Type C). To make this comparison, the BEDEC database of Instituto de Tecnología de la Construcción (ITEC) has been used and the characterisation of the constituent layers has been carried out according with the LER codes (European Waste List). In addition, life cycle analysis techniques have been used according to the UNE-EN-ISO-14040:2006 and UNE-EN-ISO-14044:2006 standards. It was verified that the least efficient roof with the highest environmental impact values corresponds to Type C.

Sustainable design; Maintenance; Life cycle assessment; Building projects; Inverted roof

El análisis que se presenta tiene como finalidad comparar el impacto ambiental de diferentes soluciones de cubiertas según las emisiones de CO₂ que vierten a la atmósfera (en kg/m²), así como de la generación de residuos (en kg/m²) a partir de la naturaleza de sus distintas capas constituyentes; esta generación de residuos se ha agrupado bajo dos criterios: residuos por colocación y residuos por embalaje. Las cubiertas analizadas son todas de unidades constructivas con una pendiente inferior al 5% (es decir, cubiertas planas); para concretar más, se han escogido las tipologías que fueran de tipo invertido (lo que conlleva que el aislamiento estuviera dispuesto sobre la impermeabilización), dado que son las más utilizadas. Además, solo se compararon las variantes que tuvieran la capa impermeabilizante constituida por una membrana de PVC y en tres modalidades diferentes de cobertura: cubierta plana no transitada acabada en grava (Tipo A), cubierta plana ajardinada (Tipo B) y cubierta plana transitada con solado fijo de baldosas (Tipo C). Para hacer esta comparativa se ha utilizado la base de datos BEDEC del Instituto de Tecnología de la Construcción (ITEC) y la caracterización de las capas constituyentes se ha realizado según los códigos LER (Lista Europea de Residuos); de igual modo, se han utilizado las técnicas del análisis del ciclo de vida según las normas UNE-EN-ISO-14040:2006 y UNE-EN-ISO-14044:2006. De manera global, la cubierta menos eficiente y con mayores valores de impacto ambiental, corresponde con la Tipo C.

Diseño sostenible; Mantenimiento; Análisis ciclo de vida; Proyectos de edificios; Cubierta invertida

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de sostenibilidad en la construcción permiten mejoras medioambientales y económicas, permitiendo alcanzar los objetivos tradicionales del desarrollo sostenible como son la reducción del uso de las materias primas, el consumo del agua o la utilización de materias primas.

La energía total que se consume durante los procesos de construcción de los edificios implica un importante impacto ambiental y la modificación del entorno [1]. La industria de la construcción es justamente uno de los que mayor incidencia tiene en las emisiones de CO₂ a la atmósfera debido al propio proceso de fabricación de los materiales y de su puesta en obra [2]. La envergadura de consumo llega a tal nivel de importancia que el sector de la construcción llega a

consumir el 40% del total materiales producidos en Europa [3].

Las cubiertas son una de las partes de mayor importancia en los edificios, especialmente en lo relativo a su envolvente, junto con las fachadas. Dentro de ellas, la tipología de cubiertas planas suelen contener una serie de materiales muy elaborados como son los aislamientos y las impermeabilizaciones [4]. Algunas investigaciones han estudiado diferentes tipos de cubiertas [5-8]; por ejemplo, Correia et al. [9] evaluó las mismas desde un enfoque económico durante el ciclo de vida, concluyendo que los costes de los materiales (tanto de adquisición como de ejecución) eran los más determinantes.

Como se sabe, el tipo de cubierta plana que es 'invertida', debe incluir un tipo de aislante que no absorba el agua, y que además dicho agua no merme su capacidad aislante [10]. Toda la colocación de materiales y capas que se incluyen en este tipo de cobertura debe ser compatible, tanto constructivamente como químicamente.

En este sentido, el aislante, normalmente poliestireno extruido (material de célula cerrada y con absorción de agua prácticamente nula) tiene problemas de compatibilidad con los productos de PVC, pues en contacto ambos se produce la migración de los compuestos plastificantes. Para ello, es necesario colocar una capa separadora que los independice [11]. Estas precauciones son fundamentales, pues a diferencia de las cubiertas inclinadas, en las cubiertas planas la estanqueidad reside en el buen funcionamiento de la capa impermeable [12], y no en los materiales de cobertura [13], dada la poca pendiente que tienen.

De esta manera, el estudio que aquí se presenta, se ha llevado a cabo sobre dicha parte de la envolvente de los edificios: la cubierta. Dentro de ellas, solo aquellas unidades constructivas que no posean una pendiente superior al 5% (es decir, las cubiertas planas) se han incluido en la investigación. Para concretar más, se han escogido las tipologías que fueran de tipo invertido (que el aislamiento estuviera dispuesto sobre la impermeabilización) dado que son las más utilizadas en el 95% de las ocasiones [14-15], y además, solo se compararon las variantes que tuvieran la capa impermeabilizante constituida por una membrana de PVC (este tipo de membranas están fabricadas por extrusión y son resistentes a la putrefacción y el envejecimiento, ofreciendo al mismo tiempo un elevado nivel de estanqueidad).

En el análisis que aquí se presenta, tiene como finalidad comparar el impacto ambiental de diferentes soluciones de cubiertas planas según las emisiones de CO₂ que vierten a la atmósfera, así como de la generación de residuos, a partir de la naturaleza de sus distintas capas constituyentes.

2. PROCESO METODOLÓGICO

En la realización de esta investigación se han utilizado técnicas basadas en el Análisis del Ciclo de Vida, para lo cual se han considerado las normas UNE-EN-15804:2012+A1:2014 sobre sostenibilidad de obras de construcción [16], UNE-EN15978:2012 sobre evaluación de desempeño ambiental de edificios [17], UNE-EN-ISO-14040:2006 sobre el marco de referencia en la gestión ambiental en los análisis del ciclo de vida [18] y UNE-EN-ISO-14044:2006 sobre los requisitos y directrices en la gestión ambiental en los análisis del ciclo de vida [19]. Como se sabe, el análisis de ciclo de vida es un proceso metodológico que caracteriza y cuantifica los impactos medioambientales potenciales, asociados a cada etapa de la vida útil de un producto.

Por esta razón, para determinar la influencia de la composición de las cubiertas a partir de la naturaleza de sus distintas capas constituyentes. Se han analizado tres soluciones constructivas, según se indica en la Tabla 1.

Cód.	Tipología de cubierta plana	
	Identificación	Característica general del acabado
A	Cubierta no transitable acabada en grava	Capa de protección de canto rodado de río
B	Cubierta ajardinada	Panel drenante y capa de tierra vegetal.
C	Cubierta transitable con solado fijo de baldosas	Regularización de mortero de cemento y pavimento de baldosa cerámica

Tabla 1: Tipologías de cubiertas planas analizadas en esta investigación

Para determinar los diferentes parámetros, se ha considerado una vivienda situada en Mérida, con una zona climática tipo C4 según CTE [20]. Para el consumo de materiales se ha estimado una vida media útil de 50 años, según indica también esta misma normativa. Para la evaluación del transporte de materiales hasta la localización de la obra se ha considerado un recorrido de 100km, así como una distancia de 15km para el traslado y depósito de los residuos producidos (recorrido hasta un vertedero autorizado).

Por su parte, para determinar las emisiones medioambientales de CO₂ y la energía invertida en la construcción (MJ), se ha manejado la base de datos BEDEC del Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña [21]. En relación a los residuos generados durante el proceso de construcción, los materiales se han caracterizado según los códigos LER -Lista Europea de Residuos- [22], dividiendo éstos en dos grandes grupos: 'residuos de colocación' y 'residuos de embalaje'. La clasificación de los 'residuos de colocación' fueron: materiales de origen cementoso -mortero y hormigón- (17.01.01), material cerámico proveniente de ladrillos (17.01.02), material proveniente de tejas y otros materiales cerámicos (17.01.03), plásticos (17.02.03), materiales aislantes

(17.06.04), materiales pétreos -grava o roca- (01.04.08), tierra (17.05.04), mezclas bituminosas (17.03.02) y residuos mezclados (17.01.07). La clasificación de los 'residuos de embalaje' fue: papel y cartón (15.01.01), plásticos (15.01.02), madera (15.01.03) y envases que contienen restos de sustancias peligrosas o que están contaminados por ellas (15.01.10).

En el desarrollo del trabajo, se seleccionaron las cubiertas antes indicadas, considerando que la definición de cada cubierta viene dada según sus capas constituyentes. A su vez, las capas constituyentes están formadas por uno o varios materiales que se disponen según el sistema constructivo del que se trate.

Las capas constituyentes comunes a los tres tipos de cubierta analizados son los que se indican en la Tabla 2

Por su parte, las capas constituyentes específicas, que se aplicarán a una tipología u otra de cubierta, son los que se indican en la Tabla 3

De esta manera, la relación total de todas y cada una de las capas que constituyen de las cubiertas analizadas, es la que se relaciona en la Tabla 4

3. RESULTADOS

3.1. EMISIONES DE CO₂

Sumando cada una de las capas constituyentes que tiene cada tipología de cubierta, se obtienen los valores que se indican en la Tabla 5. En base a lo indicado previamente, la diferencia vendrá determinada por la suma de las emisiones de CO₂ producidas por las capas específicas, dado que las 4 capas comunes están presentes en todas ellas.

3.2. ENERGÍA INVERTIDA

El esfuerzo energético que es necesario para transformar la materia prima en un producto constructivo es un buen indicador medioambiental. La energía invertida en cada una, queda expresada en la Tabla 6, medida por unidad de superficie. Para calcularlo, se ha verificado la energía invertida (medida en mega julios por metro cuadrado) según los valores individuales de las capas constituyentes de cada cubierta.

Cód.	Nombre de la capa	Definición de la capa
Cc1	Formación de pendientes	Formación de pendiente formada por: hilada con ladrillo hueco doble de 240x115x100mm, colocada en limahoyas, limatesas y cumbresas; hormigón celular sin árido, de densidad 300kg/m ³ , de 15cm de espesor medio, con acabado fratasado; terminación con 2cm de mortero de cemento portland con caliza y arena con 250kg/m ³ de cemento, con una proporción en volumen 1:6 y 5N/mm ² de resistencia a compresión.
Cc2	Lámina impermeabilizante	Lámina de 1,2mm de PVC flexible, con armadura de malla de fibra de vidrio, fusionada en los solapes con soldadura de aire caliente, colocada sin adherir al soporte.
Cc3	Geotextil 300	Geotextil de densidad alta (300g/m ²) formado por fieltro micropunzonado de poliéster no tejido, conformado mecánicamente.
Cc4	Aislamiento	Aislamiento de plancha de poliestireno extruido (XPS) de 80mm de espesor (con resistencia a compresión de 300kPa)

Tabla 2: Características de las capas constituyentes comunes

Cód.	Nombre de la capa	Definición de la capa
Ce1	Geotextil 100	Geotextil de densidad media (100g/m ²) formado por velo de fibras de polipropileno no tejido, ligado mecánicamente.
Ce2	Panel drenante	Panel drenante y retenedora nodular de poliestireno, con dos geotextiles de polipropileno adheridos en ambas caras, con nódulos de 11mm de altura y una resistencia a la compresión de 710kN/m ² , con rebosaderos en la parte superior, colocada sin adherir.
Ce3	Tendido de mortero	Capa in situ de regularización, mejora y soporte para pavimento, realizado con mortero de cemento en proporción 1:6 y de 4cm de espesor.
Ce4	Grava de río	Capa de protección de 5cm de espesor, compuesta de canto rodado (piedra de río suelta) de 16 a 32mm de diámetro, colocada sin adherir.
Ce5	Tierra vegetal	Capa de 40cm de espesor, compuesta por tierra vegetal de jardinería (de categoría alta), suministrada en sacos.
Ce6	Baldosa cerámica	Pavimento exterior de baldosa cerámica de elaboración mecánica, de 30x30cm de dimensión, colocada con adhesivo tipo cemento-cola y rematada en sus encuentros entre juntas con pasta líquida de cemento aditivado.

Tabla 3: Características de las capas constituyentes específicas

Cód.	Identificación	Relación de las capas constituyentes
A	Cubierta no transitable acabada en grava	Cc1 + Cc2 + Cc3 + Cc4 + Ce1 + Ce4
B	Cubierta ajardinada	Cc1 + Cc2 + Cc3 + Cc4 + Ce2 + Ce5
C	Cubierta transitable con solado fijo de baldosas	Cc1 + Cc2 + Cc3 + Cc4 + Ce1 + Ce3 + Ce6

Tabla 4: Composición de las cubiertas según la naturaleza de sus capas constituyentes

Cód.	Identificación	CO ₂
A	Cubierta no transitable acabada en grava	127,70
B	Cubierta ajardinada	143,15
C	Cubierta transitable con solado fijo de baldosas	163,64

Tabla 5: Emisiones de CO₂ según el tipo de cubierta (kg/m²)

3.3. RESIDUOS

3.3.1 RESIDUOS POR COLOCACIÓN

Se manejaron los siguientes tipos de residuos, para medir los kilogramos de residuos por colocación: materiales de origen cementoso, materiales cerámicos, plásticos, materiales aislantes, materiales pétreos, tierra, mezclas bituminosas y residuos mezclados. Una vez cuantificados y sumados, los valores obtenidos quedan indicados en la Tabla 7.

3.3.2 RESIDUOS POR EMBALAJE

Los residuos de embalaje se tipificaron en los siguientes grupos: papel y cartón, plásticos, madera y envases que contienen restos de sustancias peligrosas o que están contaminados por ellas. La suma de estos valores en conjunto y por tipología de cubierta quedan expresados en la Tabla 8.

3.3.3 RESIDUOS TOTALES

Finalmente, se ha procedido a cuantificar el valor general de los residuos generados, sumando los valores obtenidos por cada cubierta en la Tabla 7 y en la Tabla 8. El resultado de esta adición queda mostrado en la Tabla 9.

4. DISCUSIÓN

La fase de diseño es crucial para hacer posible la reducción de todos estos tipos de impactos ambientales. La supervisión de los proyectos –antes de que estos empiecen a ser construidos– [23] o del control de las problemáticas de construcción [24] permitiría mejorar la calidad de la construcción de las cubiertas. En este sentido, es importante la elección de alternativas constructivas que permitan escoger soluciones de menor impacto ambiental, como forma de

contribuir a la concienciación del sector inmobiliario y dotarlo de un valor añadido. La metodología basada en el análisis del ciclo de vida condicionará positivamente el impacto de las cubiertas para el resto de tiempo de su vida útil; por esta razón, las normativas europeas, ya exigen que las obras de construcción se realicen con un uso sostenible de los materiales [25].

La mantenibilidad de las cubiertas es un parámetro importante que también debe tenerse en cuenta en la fase de diseño, aspecto que actualmente es poco habitual implementarlo en los proyectos. Sin embargo, las consecuencias de un mal mantenimiento generan en muchos casos patologías importantes y muy costosas en las cubiertas. La selección de la tipología de cubierta más adecuada para un edificio, debe además tener en cuenta factores estéticos, ambientales y sociales. La elección de productos naturales como material de cobertura, es una estrategia adecuada y un recurso para disminuir el impacto ambiental del edificio.

5. Conclusiones

Se han analizado tres tipologías de cubiertas planas con impermeabilización de PVC: Cubierta no transitable acabada en grava, cubierta ajardinada y cubierta transitable con solado fijo de baldosas. Para preceder a su comparación se han tipificado cada una de sus capas constituyentes, tanto las que son comunes como las que son específicas para cada una de ellas. Las capas comunes son: formación de pendientes, lámina impermeabilizante, geotextil 300 y aislamiento. Las capas específicas son: geotextil 100, panel drenante, tendido de mortero, grava de río, tierra vegetal y baldosa cerámica.

Se han evaluado cuatro parámetros que tienen incidencia e impacto ambiental: emisiones de CO₂ a la atmósfera, energía invertida que es necesaria para la transformar la materia

Cód.	Identificación	MJ/m ²
A	Cubierta no transitable acabada en grava	778,33
B	Cubierta ajardinada	905,04
C	Cubierta transitable con solado fijo de baldosas	1056,06

Tabla 6: Energía invertida según el tipo de cubierta (MJ/m²)

Cód.	Identificación	Residuos por colocación (kg/m ²)
A	Cubierta no transitable acabada en grava	1,31
B	Cubierta ajardinada	3,45
C	Cubierta transitable con solado fijo de baldosas	3,01

Tabla 7: Residuos por colocación según el tipo de cubierta (kg/m²)

Cód.	Identificación	Residuos por embalaje (kg/m ²)
A	Cubierta no transitable acabada en grava	1,06
B	Cubierta ajardinada	1,34
C	Cubierta transitable con solado fijo de baldosas	1,82

Tabla 8: Residuos por embalaje según el tipo de cubierta (kg/m²)

Cód.	Identificación	Residuos totales (kg/m ²)
A	Cubierta no transitable acabada en grava	2,37
B	Cubierta ajardinada	4,79
C	Cubierta transitable con solado fijo de baldosas	4,83

Tabla 9: Residuos totales según el tipo de cubierta (kg/m²)

prima en un producto constructivo, residuos generados por la colocación de materiales y sistemas, así como residuos generados por el embalaje de los mismos.

Dentro de estos cuatro parámetros, en tres de ellos la cubierta transitable con solado fijo de baldosas ha sido la que peor impacto ambiental provocaba, excepto en la determinación de los residuos por colocación que lo obtuvo la cubierta ajardinada. En relación a estos mismos cuatro parámetros, la cubierta que ha conseguido una mejor posición ha sido la cubierta no transitable acabada en grava, dado que los valores de la misma son los más bajos en todos los aspectos analizados.

Esta investigación refuerza alguno de los criterios que se deberían considerar en los edificios residenciales durante su etapa de diseño, teniendo en cuenta el impacto ambiental de los materiales que se van a emplear y la utilización eficiente de la energía. Con esta base, se podrán elegir más conscientemente las capas constituyentes y las variantes constructivas más adecuadas, minimizando el impacto y consiguiendo un parque de edificios más sostenibles.

Estos resultados pueden ayudar a los técnicos a la toma de decisiones para seleccionar la cubierta más adecuada en función de su impacto ambiental.

5. REFERENCIAS

- [1] Martínez de Salazar, E.; García Sanz-Calcedo, J. Study on the influence of maintenance operations on energy consumption and emissions in healthcare centres by fuzzy cognitive maps *Journal of Building Performance Simulation*. 2019, 12 (4), 420-432.
- [2] Baño-Nieva A, Vigil-Escalera del Pozo A. Guía de la construcción sostenible. Madrid: ISTAS, 2005.
- [3] García-Sanz-Calcedo, J.; López-Rodríguez, F. Analysis on the Performance of a High Efficiency Administrative Building in Spain.. *International Journal of Green Energy*. 2017, 14(1), 55-62.
- [4] Graus R. La cubierta plana, un paseo por su historia. 2005.
- [5] Conceição, J.; Poça, B.; de Brito, J.; Flores-Colen, I.; Castelo, A. Inspection, Diagnosis, and Rehabilitation System for Flat Roofs. *J. Perform. Constr. Facil*. 2017, 31, 04017100.
- [6] Al-Homoud, M.S. The effectiveness of thermal insulation in different types of buildings in hot climates. *J. Therm. Envel. Build. Sci*. 2004, 27, 235–247.
- [7] Morgado, J.; Flores-Colen, I.; de Brito, J.; Silva, A. Maintenance programmes for flat roofs in existing buildings. *Prop. Manag*. 2017, 35, 339–362.
- [8] Hamkhiyan, T. Thermal, Hygrothermal and Environmental Comparative Analysis of the Different Roof Construction Solutions in the Mediterranean Climate. Ph.D. Thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Spain, 2016.
- [9] Correia Marrana T, Silvestre JD, Brito J, Gomes R. Lifecycle cost analysis of flat roofs of buildings. *J Constr Eng Manage* 2017, 04017014.
- [10] Zhukov A, Matveev A, Aristov D, Pyataev E. Extruded polystyrene foam in flay roofs. *Construction: Science & Education* 2014;3:17-31.
- [11] Carretero-Ayuso MJ. Documentos de orientación técnica en cubiertas. 1ª Ed. Madrid: Fundación-Musaat, 2017.
- [12] Bludau C, Schunck E. Flat roof construction. In: *Anonymous Flat Roof Construction Manual: Materials, Design, Applications*, Munich: Institut für internationale Architektur-Dokumentation; 2010, p. 98-117.
- [13] Carretero-Ayuso MJ, Brito J. Mutiparameter evaluation of the deficiencies in tiled pitched roofs. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 2016: DOI: 10.1061/(ASCE)FC.1943-5509.0000962, 04016097.
- [14] M.J. Carretero-Ayuso, Justo García-Sanz-Calcedo. Analytical study on design deficiencies in the envelope projects of healthcare buildings in Spain *Sustainable Cities and Society*, 2018, 42, 139-147.
- [15] López, F.; Cuadros, F.; Segador, C.; Ruiz, A.; García Sanz-Calcedo, J. et al. Peter Building: An example of bioclimatic building and integration of renewable energies into the edification. *Dyna Ingeniería e Industria*. 2011. 86(2), 212-221.
- [16] AENOR. (2014). Norma UNE-EN-15804:2012+A1:2014. Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción. Madrid.
- [17] AENOR. (2012). Norma UNE-EN-15978:2012. Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo. Madrid.
- [18] AENOR. (2006a). Norma UNE-EN-ISO-14040:2006. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. (ISO 14040:2006). Madrid.
- [19] AENOR. (2006b). Norma UNE-EN-ISO-14044:2006. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. (ISO 14044:2006). Madrid.
- [20] Ministerio de la Vivienda. Código Técnico de la Edificación: CTE — Real Decreto 314/06. Madrid. 2006.
- [21] ITEC (Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña). Base de datos estructurada de elementos de construcción -BEDEC-. 2017.
- [22] Ministerio de Medioambiente. Orden MAM/304/2002, sobre operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos (LER). 2002.
- [23] Carretero-Ayuso MJ, García-Sanz-Calcedo J, Reyes-Rodríguez AM. Qualitative and Quantitative Analyses on Project Deficiencies in Flat-Roof Design in Extremadura, Spain. *Journal of Construction Engineering and Management* 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001176.
- [24] Carretero-Ayuso MJ, Moreno-Cansado A, de Brito J. Study of the prevalence of critical and conflict-prone points in facades. *Engineering Failure Analysis* 2017, 75,15-25.
- [25] European Parliament. Regulation 305/2001, of 9 March, which establishes the harmonised conditions for the commercialization of construction products, and repeals Directive 89/106/CEE. 2011.

WHAT DO YOU THINK?

To discuss this paper, please submit up to 500 words to the editor at bm.edificacion@upm.es. Your contribution will be forwarded to the author(s) for a reply and, if considered appropriate by the editorial panel, will be published as a discussion in a future issue of the journal.