

Energy-efficient urban buildings. Thermo-physical characteristics of traditional and recycled roofing technologies

Sustentabilidad energética urbano-edilicia. Características termo-físicas de tecnologías de techo tradicionales y recicladas

N. Alchapar^{1*}, M. Sánchez Amono^{**}, E. Correa^{*}, R. Gaggino^{**}, M. Positieri^{***}

* Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE-CONICET) – Mendoza, ARGENTINA

** Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE-CONICET) Córdoba, ARGENTINA

*** Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC-UTN) – Córdoba, ARGENTINA

Fecha de Recepción: 08/11/2019

Fecha de Aceptación: 01/03/2020

PAG 73-83

Abstract

In Latin America, the number of new materials in the construction industry has increased in the past decade. However, the information regarding their optical properties remains quite limited. The general objective of this paper is to categorize different roofing materials, according to their capacity to reduce urban temperatures by calculating the Solar Reflectance Index (SRI), in accordance with the standard ASTM E1980-11. The classification considered 31 types of roof materials of the most frequently used traditional technology in the domestic market, compared with the behavior of one tile made with rubber recycling technology. The roofing materials were classified according to morpho-material characteristics – composition, color, shape, finish. The material with the most efficient behavior is the white polyurethane liquid membrane M11 (SRI=100%) and the most inefficient is the green geotextile asphalt membrane M07 (SRI=28%), while the tile with recycled technology, black French T17, reached an SRI of 51%. Given the intrinsic characteristics of the recycled material, the tiles have great possibilities of enhancing their optothermal behavior by incorporating reflective materials in its composition.

Keywords: Optothermal properties; roofing materials; traditional technologies; recycling; morpho-material characteristics

Resumen

En Latinoamérica, la afluencia de nuevos materiales en la industria de la construcción ha aumentado en la última década. Sin embargo, la información de sus propiedades ópticas es muy limitada. El objetivo general de este trabajo es categorizar los distintos materiales de cubiertas de techo de acuerdo a su habilidad para disminuir las temperaturas urbanas, mediante el cálculo del Índice de Reflectancia Solar (SRI) de acuerdo a la norma ASTM E1980-11. Se clasificaron 31 tipos de materiales de techos de tecnología tradicional de mayor frecuencia de uso en el mercado nacional, en contraste con el comportamiento de 1 teja con tecnología reciclada, compuesta por residuos de caucho. Los materiales de techo fueron clasificados según características morfo-materiales -composición, color, forma, terminación-. El material que posee el comportamiento más eficiente es la membrana líquida poliuretánica blanca-M11- (SRI = 100%) y el más ineficiente es la membrana asfáltica geotextil verde -M07- (SRI = 28%). Mientras que la teja de tecnología reciclada, francesa negra-T17- alcanzó un SRI=51%. Dadas las características intrínsecas del material reciclado, las tejas presentan amplias posibilidades de mejorar su comportamiento opto-térmico mediante la incorporación de materiales reflectivos a su composición.

Palabras clave: Propiedades opto-térmicas; materiales de techo; tecnologías tradicionales; reciclado; características morfo-materiales

1. Introducción

La presencia de las urbes eleva la temperatura de aire, debido a la modificación del balance energético natural y al incrementan las emisiones de CO². El comportamiento térmico y rendimiento energético de las ciudades, en gran medida, está influenciado por su diseño morfológico y características materiales. (Araújo y Laurencó, 2005); (Alchapar et al., 2017). La reducción de las temperaturas superficiales de pavimentos, techos y envolventes verticales, por convección del calor, contribuye en la disminución de las temperaturas ambientales. Estos descensos tienen impactos significativos sobre los consumos energéticos para refrigeración.

Para la consecución de ciudades más sustentables, en términos ambientales, resulta determinante desarrollar y seleccionar aquellos materiales de construcción con tecnologías que permitan un modelo urbano energéticamente eficiente y una economía de bajo carbono durante todo el ciclo de vida del material. En la construcción tradicional, tanto los materiales empleados, como los modos de producción, ocasionan un fuerte impacto medioambiental, estos implican la extracción de materias primas las cuales, en su mayoría, son recursos no renovables.

¹ Autor de correspondencia:

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE-CONICET) – Mendoza, ARGENTINA
E-mail: nalchapar@mendoza-conicet.gob.ar



Según la Dirección Nacional de Gestión Integral de Residuos (DNGIR), dependiente del MAyDS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable) la Argentina se ubica entre los países de rango medio en generación per cápita diaria de residuos sólidos urbanos (RSU), basura proveniente del ámbito residencial, comercial, sanitario o industrial. El promedio diario de desechos por habitante es de 1.03 kilos, equivalente a casi 45,000 toneladas diarias para el total de la población (una tonelada cada dos segundos) y alrededor de 16.5 millones cada año (Devicenzi, 2018).

Una alternativa para disminuir los costos energéticos y ambientales, asociados a su fabricación, es el desarrollo de materiales elaborados con compuestos de residuos reciclados. En este marco el objetivo del trabajo, es dar continuidad a investigaciones desarrolladas por el Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE-CONICET) que evalúan la eficiencia energética de diversos materiales de la envolvente urbano edilicia (Alchapar et al., 2014); (Alchapar y Correa, 2016) y profundizar desarrollos específicos que buscan reducir los impactos energéticos de fabricación, llevadas adelante en el Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE-CONICET). En este sentido, se visualiza un cambio en la concepción de la cultura de la construcción y el surgimiento de los llamados “nuevos materiales”. Como aspectos que limitan su uso, se debe subrayar la falta de mentalización entre los usuarios y el escaso conocimiento que de estos materiales se tiene (Sánchez Amono, 2018).

En la actualidad, toneladas de neumáticos son eliminados provisoriamente en vertederos de basura al aire libre, sin encontrarse aún una solución efectiva en nuestro país. Un neumático fuera de uso (NFU) es aquel que, por su estado, con relación a las normas de seguridad vigentes no es apto para su uso sin aplicar técnicas que prolonguen su vida útil. Según lo informado por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), se estima que en nuestro país la generación de neumáticos fuera de uso supera las 100,000 toneladas anuales (INTI, 2015). Según la empresa Regomax, hoy en día ésta cifra asciende a 150,000 toneladas anuales. Otro material que se encuentra en abundancia es el plástico. Constituyen el 13.3% del total de los residuos sólidos urbanos (en peso) lo que equivale al 30% del total (en volumen) en la Argentina. Dentro de los plásticos se destaca por su cantidad el polietileno de baja densidad, ya que se generan 787,296 Toneladas de polietileno anuales (Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, 2017). Se usa principalmente en bolsas, bidones, caños, etc. Es un material que se produce a partir de combustibles fósiles y tarda más de 150 años en degradarse, a la intemperie. Al investigar características físicas y mecánicas tanto del caucho como del polietileno (PEBD), y su gran disponibilidad, se resolvió utilizar estos dos tipos de residuos con el objetivo desarrollar un nuevo material para aplicar a una tecnología constructiva de cubierta de tejas.

Otra opción para promover la eficiencia ambiental mediante un uso racional de la energía, desde el enfoque de la etapa de uso del material, es la aplicación extendida de materiales con alto albedo y alta emitancia térmica en la envolvente urbano-edilicia. Estos materiales se denominan en la bibliografía internacional como *cool material* (Santamouris et al., 2011), ellos se mantienen más frescos expuestos a la radiación solar y tienen mayor habilidad para entregar durante la noche el calor en forma de radiación de onda larga, reduciendo así la demanda energética para refrescar edificios y mejorando el confort interior de los edificios sin aire acondicionado.

En particular, los techos son las superficies opacas horizontales más expuestas a la radiación solar, y, por lo tanto, son los que absorben la mayor carga térmica de una estructura edilicia (Givoni, 1994). Numerosos estudios han descripto los beneficios de los techos con alto albedo como un eficaz estrategia pasiva para el enfriamiento (Santamouris et al., 1998); (Niachou et al., 2008), cuantificando la energía ahorrada en diferentes tipos de edificios y climas (Simpson, 1997); (Zinzi, 2012).

En este marco, la hipótesis que sustenta la investigación indica que, para alcanzar un desarrollo urbano-edilicio sustentable es necesario efectuar una caracterización precisa de propiedades físicas de materiales regionales, de acuerdo a tecnologías endógenas, nuevos desarrollos y de producción local. Es por ello, que el objetivo del presente trabajo propone caracterizar el comportamiento opto-térmico y mecánico de 32 tipos de materiales de techo, de tecnología tradicional y reciclada, de acuerdo a su habilidad para disminuir las temperaturas urbanas. La evaluación se realizó mediante el cálculo del Índice de Reflectancia Solar (SRI) de acuerdo a la norma ASTM E1980-11.

2. Material y Método

2.1 Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de tejas con material reciclado se realiza mediante una máquina extrusora para plásticos estándar (Figura 1) con especificaciones técnicas que optimizan el proceso de elaboración de las tejas. La fabricación de la teja se lleva a cabo mediante un proceso combinado de extrusión y moldeo por compresión. En primer lugar, se dosifica cada uno de los materiales por separado y luego se mezclan de forma manual. La mezcla de caucho y polietileno de baja densidad (PEBD) necesaria para hacer una teja se vuelca en la tolva y la pasta se extrude. La máquina cuenta con tres zonas de calentamiento (entre 270 y 280 °C).



La pasta caliente (Figura 2) que sale de la extrusora se vuelca sobre el molde inferior de la teja. Una vez extruida la cantidad de mezcla necesaria para llenar el molde, este se coloca en el carril de la prensa y se ubica en la posición correcta para que el molde superior esté alineado, y finalmente se acciona la prensa neumática y el molde superior desciende aplicando fuerza sobre la pasta. El moldeo se realiza durante cinco minutos, tiempo en el cual la pasta se endurece manteniendo así la forma deseada. La teja recién moldeada debe ser colocada en un bastidor para que en su proceso de enfriamiento no se deforme. Luego se recortan las rebabas de material sobrante.



Figura 1. Proceso de fabricación de teja reciclada. (a) Vista general de la maquina extrusora, (b) mezcla caliente dispuesta sobre matriz; (c) bastidor de secado; (d) muestra terminada

2.1.1 Características físicas y mecánicas de tejas con compuestos reciclados

Luego de la fabricación, las tejas con compuestos reciclados, fueron sometidas a ensayos para determinar sus características físico-mecánicas según normas de referencia. En (Tabla 1) se enumeran sus resultados en comparación con tejas de tecnología tradicional.

2.2. Índice de Reflectancia Solar (SRI) de materiales de techo

2.2.1 Unidad muestral

Con el objetivo de comparar el desempeño termo-físicas de diversos materiales de techo, se calificaron 32 tipos de materiales de techo: 16 tejas de tecnología tradicional, 1 teja con compuestos reciclados, 7 membranas asfálticas y 8 membranas líquidas de mayor frecuencia de uso en el mercado nacional (Figura 2). Como criterio de análisis los materiales de techo fueron categorizados según composición y características morfológicas - color, forma, terminación-. Para evitar las pérdidas adiabáticas se ubicaron a las muestras sobre una base de poliestireno expandido de 10 cm. El ensayo fue realizado en el predio del Centro Regional de Investigaciones Científicas y Técnicas (32 ° 53'45 "de latitud sur y 68 ° 52'28" de longitud oeste).

Tabla 1. Propiedades físico mecánicas de tejas con compuestos reciclados

Ensayos	Norma	Laboratorio	Resultados de las tejas recicladas	Comparativa con otras tecnologías
Características geométricas	IRAM 12528.1 Tejas cerámicas de encastre. Parte 1: Definiciones y requisitos	CINTEMAC, UTN Córdoba	Dimensiones: largo 408,80 mm; ancho 230.45 mm y un espesor promedio de 15 mm.	Dimensiones: Teja hormigón: largo 420.6 mm; ancho 331.3 mm. Teja cerámica: largo 427.3 mm; ancho 224.7 mm
Masa	IRAM 12528.1 Tejas cerámicas de encastre. Parte 1: Definiciones y requisitos	CINTEMAC, UTN Córdoba	1.290 kg.	98% menor que la chapa de zinc, 74% menor que la de la teja de hormigón y 52% menor que la de la teja cerámica
Peso específico	IRAM 12528.1 Tejas cerámicas de encastre. Parte 1: Definiciones y requisitos	CINTEMAC, UTN Córdoba	925 kg/m ³	87% menor que el de la chapa de zinc, 57% menor que el de la teja de hormigón, y 43% menor que el de la teja cerámica.
Permanencia al vapor de agua	Norma IRAM 11632.1. Tejas y accesorios de hormigón. Definiciones y requisitos.	CINTEMAC, UTN Córdoba.	No se desprenden gotas de agua en la parte inferior del material	
Permeabilidad al aire	Norma Suiza SIA 262/2003. Swiss Standard: "Concrete Construction", part of Swiss structural codes	CINTEMAC, UTN Córdoba.	0.0010 KT [·10.16m ²] (muy baja)	Baja
Resistencia a la heladicidad	Norma IRAM 11632.2. Tejas y accesorios de hormigón. Métodos de ensayo	Laboratorio de Estructuras de la FCEFyN de la UNC.	Satisfactorio: No se observan deterioros ni descascaramientos	Satisfactorio
Absorción de agua	Norma IRAM 12.528.02 Tejas cerámicas de encastre. Parte 2: Métodos de ensayo	Laboratorio de Estructuras de la FCEFyN de la UNC.	Absorbió menos del 15% de su masa	91% menor que el de la teja de hormigón y 97% menor que el de la teja cerámica, la chapa de zinc no es absorbente de agua.
Resistencia al impacto	Norma IRAM 12528.2. Tejas cerámicas de encastre. Parte 2: Métodos de ensayo	Laboratorio de Estructuras de la FCEFyN de la UNC	Satisfactorio: No se rompió ni presentó defectos superficiales.	Satisfactorio





Figura 2. Imágenes de los materiales de techos evaluados. Tejas tradicionales -cerámicas y cementicias- (T01 a T16) y con compuesto reciclado (T17); membranas asfálticas –aluminio y geotextil- (M01 a M07) y líquidas (M08 a M15)

2.3 Determinación de características termo-físicas

En este trabajo se cuantifica el calor que acumularía un material en relación a una superficie patrón blanco y una negra, bajo condiciones ambientales estándar, definido como Índice de Reflectancia Solar (SRI) según norma ASTM E1980-11.

El indicador se define mediante la utilización de una superficie estándar o patrón negro con un albedo de 0,05 y una emitancia de 0.90 equivalente a un SRI de 0%; y una superficie patrón blanco con un albedo de 0.80 y una emitancia de 0.90, equivalente a 100 % de SRI. Se expresa como un porcentaje entre 0 % a 100 %. El método se aplica para superficies opacas, de baja pendiente (<9.5°) expuestas al sol, con emisividades superiores a 0.01 y temperaturas superficiales inferiores a 150°C. El SRI permite una comparación directa entre materiales con diferentes propiedades ópticas y está condicionado principalmente por dos factores: la composición del material y la textura superficial.

Se calcula utilizando ecuaciones basadas en datos de reflectancia solar o albedo ($\hat{\alpha}$), emisividad (ϵ), y temperatura superficial en estado estacionario (T_s) previamente definidos y medidos. Para determinar la temperatura superficial de cada material se utiliza una cámara infrarroja tipo IR Fluke Ti 55 (Doulos et al., 2004) y paralelamente se contrastan las temperaturas superficiales de cada material con termocuplas tipo T incorporadas a data loggers tipo LASCAR EL-USB-TC, censando cada minuto, para disminuir los posibles errores arrojados durante las mediciones de campo y para verificar aquellos materiales que pudieran comportar como selectivos (Alchapar et al., 2014); (Alchapar y Correa, 2016); (Flores y Hongn, 2014). La reflectancia solar o albedo se obtuvo

con el método variante de la de la Norma ASTM E1918-06: Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field, desarrollado por (Akbari et al., 2008), utilizando un albedómetro tipo Kipp & Zonen CMA11 (rango espectral de 285 a 2800 μm). La emisividad térmica se obtuvo mediante el método ASTM E1993-14: Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometer, para su evaluación se utiliza un termómetro tipo IR Fluke 568 con ajuste de emisividad, y una termocupla T incorporada a data loggers tipo LASCAR EL-USB-TC. La (Figura 3) grafica la distribución de temperatura superficial de la teja con compuestos reciclados (T17) sensada con una cámara infrarroja tipo IR Fluke Ti 55, bajo condiciones ambientales estándares de acuerdo a la norma ASTM E1980-11.

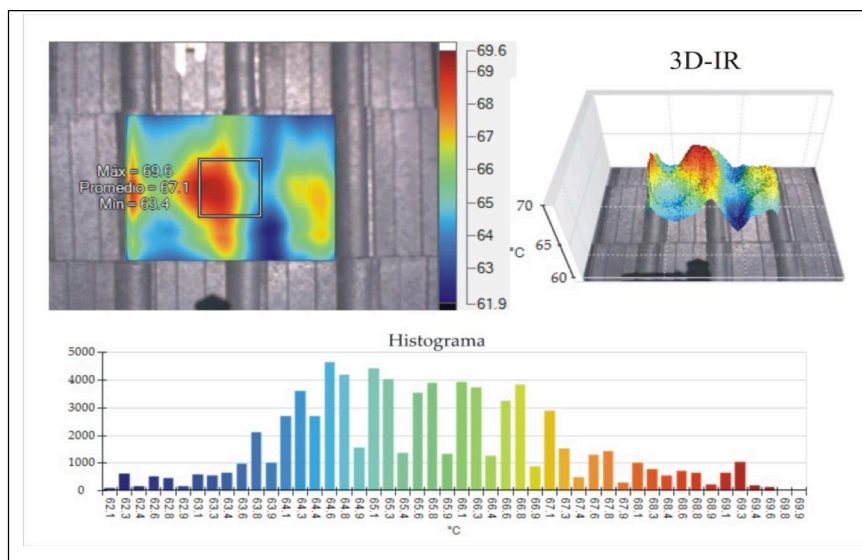


Figura 3. Imagen infrarroja de teja con compuestos reciclados -T17-. Planta, axonometría y distribución de frecuencias de temperatura superficial

3. Resultados

Luego de realizar los ensayos bajo condiciones controladas, la (Tabla 2) describe las propiedades optotérmicas obtenidas según las características morfológicas y de composición de cada material. Los resultados son expuestos según el siguiente criterio de clasificación:

-Niveles de SRI mayor o igual que 75% se consideran materiales eficientes; SRI entre 74% y 50% presentan moderada eficiencia; SRI entre 49% y 25% son materiales ineficientes en orden de disminuir las temperaturas superficiales y urbanas.

3.1. SRI de casos extremos

- **Material más eficiente:** Al contrastar los comportamientos registrados en el total de las muestras se observa que el material con el comportamiento más eficiente es la *Membrana líquida poliuretánica mate blanca-M10-*, registra niveles de SRI = 100%, albedo = 0.78 y emisividad térmica = 0.95 (Tabla 2).

- **Material ineficiente:** El material de techo que más eleva su temperatura superficial y por lo tanto tiene menor nivel de SRI es la *Membrana asfáltica geotextil mate verde -M07-*, con un SRI = 28 %, albedo = 0.40 y emisividad térmica = 0.98. Al analizar en particular el elemento teja, se evidencia que esta tipología de revestimiento muestra un desempeño intermedio, en relación a las membranas, con niveles de SRI que oscilan entre 90% y 47% (Tabla 2).

3.2. SRI según características morfo-materiales

En el siguiente análisis, para evaluar el grado de dependencia del SRI respecto una variable (composición, forma, terminación y color) se mantienen constantes las restantes, en cada tipología de techo. En la (Figura 2) se graficó la distribución de frecuencias de niveles de SRI de acuerdo a características morfológicas de membranas y tejas.



Tabla 2. Caracterización de propiedades opto-térmicas, y morfológicas y de composición para cada tipo de material de techo evaluado: teja (T) y membrana (M)

COD.	COMPOSICIÓN	CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS			PROPIEDADES OPTO-TÉRMICAS				
		Forma	Terminación	Color	\hat{a}	a	e	Ts	SRI
T01	Cerámica	colonial	natural	terracota	0.71	0.29	0.90	43.00	90
T02	Cerámica	francesa	natural	terracota	0.62	0.38	0.90	48.00	80
T03	Cerámica	francesa	esmaltada	terracota	0.64	0.36	0.90	47.00	81
T04	Cerámica	francesa	esmaltada bicocción	negro	0.47	0.53	0.95	56.00	64
T05	Cerámica	francesa	esmaltada monococción	negro	0.41	0.59	0.98	58.00	59
T06	Cerámica	francesa	mate bicocción	negro	0.41	0.59	0.98	58.00	58
T07	Cerámica	francesa	mate monococción	negro	0.43	0.57	0.95	57.00	60
T08	Cerámica	romana	esmaltada	terracota	0.71	0.29	0.95	42.00	90
T09	Cerámica	romana	natural	terracota	0.67	0.33	0.90	45.00	85
T10	Cerámica	romana	envejecida	terracota	0.55	0.45	0.95	51.00	72
T11	Cementicia	colonial	natural	terracota	0.47	0.53	0.95	55.00	64
T12	Cementicia	francesa	mate	negro	0.31	0.69	0.95	64.00	47
T13	Cementicia	francesa	esmaltada/acrílica	negro	0.37	0.63	0.95	61.00	53
T14	Cementicia	francesa	natural	gris	0.65	0.35	0.90	46.00	82
T15	Cementicia	colonial	mate	negro	0.46	0.54	0.95	56.00	63
T16	Cementicia	francesa	mate	terracota	0.46	0.54	0.95	56.00	63
T17	Compuestos reciclados	francesa	mate	negro	0.32	0.68	0.86	67.00	51
M1	Asfáltica aluminio	n/a	brillante	sin pintar	0.84	0.16	0,05*	54.50	69
M2	Asfáltica aluminio	n/a	mate	blanco	0.71	0.29	0.90	45.50	85
M3	Asfáltica aluminio	n/a	mate	rojo	0.43	0.57	0.98	75.00	32
M4	Asfáltica aluminio	n/a	mate	verde	0.39	0.61	0.98	77.00	29
M5	Asfáltica geotextil	n/a	mate	blanco	0.70	0.30	0.90	48.00	81
M6	Asfáltica geotextil	n/a	mate	rojo	0.44	0.56	0.98	76.00	30
M7	Asfáltica geotextil	n/a	mate	verde	0.40	0.60	0.98	77.50	28
M8	Líquida eco 4000	n/a	mate	blanco	0.69	0.31	0.85	44.00	87
M9	Líquida premium	n/a	mate	blanco	0.66	0.34	0.94	45.00	86
M10	Líquida poliuretánica 4000	n/a	mate	blanco	0.78	0.22	0.95	36.50	100
M11	Líquida econo	n/a	mate	blanco	0.65	0.35	0.95	45.50	85
M12	Líquida acrílica	n/a	mate	blanco	0.79	0.21	0.95	36	100
M13	Líquida poliuretánica 5000	n/a	mate	blanco	0.72	0.28	0.95	41.00	94
M14	Líquida fibrada	n/a	satinada	blanco	0.83	0.17	0.90	43.00	89
M15	Líquida fibrada	n/a	satinada	rojo	0.61	0.39	0.95	59.50	58

n/a: no aplica; (*) dato de bibliografía



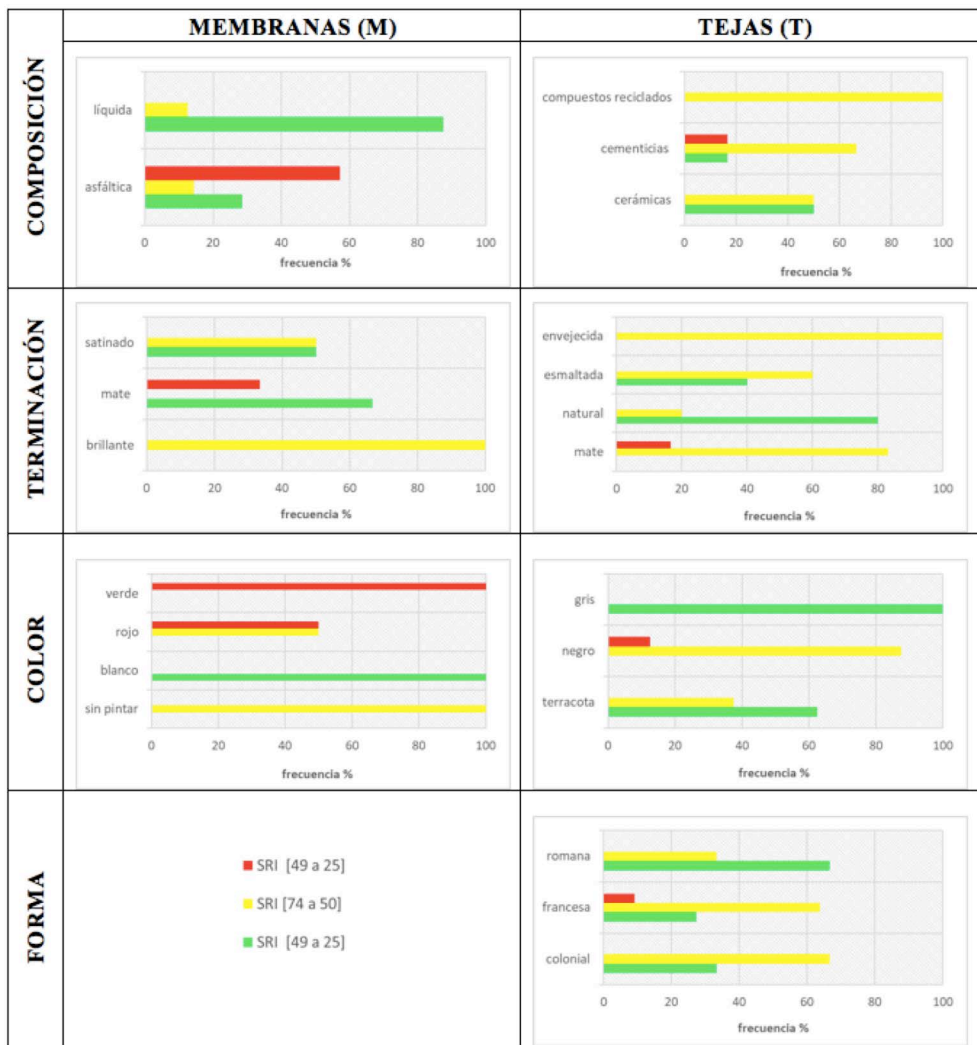


Figura 4. Diagrama de frecuencias de niveles de SRI, según características morfológicas (composición, terminación, color, y forma) de membranas y tejas

3.3 SRI según composición:

- **Membranas -asfálticas versus líquidas-**: La composición que registra mayor eficiencia para disminuir las temperaturas urbanas es la líquida. El 87.5% de las membranas evaluadas con mencionada composición registran niveles de SRI superiores al 75% y el 12.5% restante presenta un desempeño moderado. La composición asfáltica tiene comportamientos más extremos, donde el 57% muestra bajos niveles de SRI y el 28.6% resultan más eficientes. En particular las membranas asfálticas de aluminio son más frías que las membranas asfálticas geotextiles (ver M2, 3, 4, versus M5, 6 y 7 en (Tabla 2) y (Figura 4).

- **Tejas -cerámicas, versus cementicias y con compuestos reciclados-**: Manteniendo constante el color, terminación, y forma, el mejor desempeño en términos de temperatura superficial y SRI lo alcanza la composición cerámica. Del total de las tejas evaluadas el 50% mostraron niveles de SRI superiores al 75% y el 50% restante alcanzaron una moderada eficiencia. El 83.3% de las tejas de composición cementicia tienen una moderada eficiencia. Excepto la teja T12 de color negro, que tiene el comportamiento más eficiente, con niveles de SRI= 47%. Resulta importante destacar que los colores claros mejoran notablemente el comportamiento térmico de las tejas cementicias, ver T12 vs. T14 en (Tabla 2). Respecto a la composición de tejas con materiales reciclados, la muestra testeada presentó una moderada eficiencia, con un SRI= 51%. Esto se debe a que la teja ensayada es de color negro y por lo tanto tiene bajos niveles de albedo = 0.32, sumado a su relativamente baja emisividad térmica, ver T17 en (Tabla 2) y (Figura 4).



3.4 SRI según terminación

- **Membranas -mate, versus satinada y brillante-**: El 67% de las membranas con terminación mate y el 50% de las membranas con terminación satinada tiene altos niveles de albedo. Mientras que la terminación brillante tiene una eficiencia moderada. Cabe señalar que, del total de las muestras ensayadas, los únicos dos materiales que tienen niveles de SRI=100% tienen terminación mate, ver M10 y M12 en (Tabla 2) y (Figura 4).

- **Tejas -mate, versus natural, esmaltada, y envejecida-**: Por el contrario, a lo relevado en las membranas, la terminación de teja más eficiente es la natural y la esmaltada, con una frecuencia del 80 y 40% respectivamente. Las tejas en tonalidades oscura mejoran notablemente su desempeño con la terminación esmaltada, se relevaron diferencias en los niveles de SRI =11.5%, ver T4 versus T12 en (Tabla 4). Las terminaciones mates y envejecidas presentaron un moderada o ineficiente desempeño, con SRI inferiores al 50%.

3.5 SRI según color

- **Membranas -blanco versus terracota, rojo, verde y sin pintar-**: En general en todas las composiciones, y terminaciones los colores blancos tienen una mejor capacidad. Ellos alcanzan un SRI promedio de 90%. Luego se ubican la membrana sin pintar con 68% de SRI y en tercer lugar el color rojo. Específicamente la membrana color rojo -M15- consigue un buen desempeño con SRI de 58%. En cambio, el color verde siempre presenta niveles de reflectividad bajos (SRI inferiores a 29%). Es decir que entre colores se relevaron diferencias de SRI \geq 71%, ver M4 y 7 vs. M2, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13, y 14 en (Tabla 2) y (Figura 4).

- **Tejas -terracota versus negra y gris-**: El mayor porcentaje de tejas registra un buen comportamiento, con SRI \leq 50. Los colores terracota son lo que consiguen menores temperaturas superficiales, con un promedio de SRI=78%. Sin embargo, el color negro muestra desempeños eficientes en las composiciones cerámicas y con compuestos reciclados. Se registraron niveles de SRI promedio en tejas color negro de 60% en composición cerámica y de 51% con compuestos reciclados, ver T4, 5, 6,7 y T17 en (Tabla 2) y (Figura 4).

3.6 SRI según forma

- **Tejas -francesa, romana, colonial-**: De acuerdo a la clasificación por forma, las tejas romanas con diferentes composiciones, colores y terminaciones alcanzan niveles de SRI promedio de 82%. En segundo lugar, de eficiencia se encuentra la forma colonial, el 33.3% de las muestras testeadas registra niveles de SRI superiores al 75%. En particular, en las tejas de color negro la forma francesa muestra el mejor desempeño en términos de temperatura superficial y SRI= 63.5%, ver T04 en (Tabla 2) y (Figura 4).

4. Conclusiones

La afluencia de nuevos materiales en la industria de la construcción ha aumentado en la última década a escala regional. Sin embargo, la información de sus propiedades ópticas es muy limitada y, al mismo tiempo, la caracterización del material de construcción recientemente desarrollado tampoco es de dominio público. Para mejorar tanto la eficiencia energética de materiales, como el aprovechamiento y uso racional de la energía derivado de la selección adecuada de los mismos, es esencial que dicho conocimiento se genere y se difunda entre todas las partes interesadas -industria, comercio, usuarios, gobierno, sistema científico.

Este trabajo permitió la generación de una base de datos de propiedades térmicas y físicas de tecnologías de materiales de techos tradicionales y reciclados de acuerdo a características morfológicas. Este conocimiento mejora la predicción y el análisis de precisión del comportamiento energético de materiales a escala edilicia y urbana.

La comparativa del comportamiento físico-mecánico de tejas con compuestos reciclados en relación a materiales tradicionales de techo, arribó a los siguientes resultados:

- En los aspectos técnicos, las principales ventajas de las tejas con compuestos reciclados es su menor densidad y absorción de agua, mayor resistencia al impacto duro (granizo) y a la flexión.

- En los aspectos ecológicos, las principales ventajas es que contribuyen a la descontaminación del medio ambiente, por estar íntegramente constituidas por materiales de desecho reciclados, en lugar de utilizar materias primas no renovables.

El análisis comparativo opto-térmico que ofrece cada uno de los materiales de techo determina que:

- Entre las carteristas morfológicas más eficientes en membranas, la composición líquida, el color blanco y la terminación mate, son las variables más eficientes. Las membranas con registros máximos en los niveles de SRI (100%) son las membranas líquidas M10 y M15.

- Respecto a la tecnología de teja, la composición romana, el color terracota, la terminación natural o



esmaltada y la forma romana, son las características que presentan un comportamiento más eficiente en orden de disminuir las temperaturas superficiales de los techos. Las tejas que alcanzan los mayores niveles de SRI (90%) son las tejas cerámicas T01 y T08.

Al evaluar de forma particular a la teja con compuestos reciclados, esta demostró una moderada eficiencia, con niveles de SRI=51%. Cabe rescatar que la evaluación se ha llevado a cabo sólo en una teja de color negro, que a priori presentan menores niveles de albedo. Sin embargo, dadas las características intrínsecas del material reciclado, las tejas presentan amplias posibilidades de mejorar su comportamiento opto-térmico mediante la incorporación de materiales reflectivos a su composición, en forma de micro esferas o con polvos agregados de dióxido de titanio (TiO₂), además de trabajar para elevar los niveles de emisividad. En trabajos futuros se propone evaluar tipologías de tejas con compuestos reciclados en diferentes colores, formas, texturas.

5. Agradecimientos

PICT2017-3248: “Valoración energética y ambiental de los espacios urbanos en ciudades de zonas áridas. Generación de herramientas de calificación y evaluación predictiva”. Directora: Érica N. Correa. Año: 2017-2021. PIP 112201 501003 18CO: “Tecnologías de envolventes eficientes en ciudades de zonas áridas. Evaluación energética, ambiental y económica”. Directora: María Alicia Cantón y Codirectora: Érica N. Correa. Año: 2016-2019.

Proyecto PIO Residuos Sólidos 2010, financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología del Gobierno de la Provincia de Córdoba. Directora: Rosana Gaggino.

6. Referencias

- Akbari, H., Levinson, R., Stern, S. (2008).** Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. *Solar Energy*, 82 (7):648-655, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.01.001>
- Alchapar, N., Correa E. (2016).** Aging of roof coatings. Solar reflectance stability according to their morphological characteristics. *Construction and building materials*, 102: 297-297, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.005.
- Alchapar, N., Correa, E., Cantón, M. (2014).** Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones. *Energy Building*, 69: 22–32, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.10.012.
- Alchapar, N., Pezzuto, C., Correa, E., Chebel, L. (2017).** The impact of different cooling strategies on urban air temperatures: The cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1-2):35-50, doi:10.1007/s00704-016-1851-5.
- Araújo, P., Laureno, F. (2005).** Measurement of albedo and analysis of influence the surface temperature of building roof materials, *Energy Building*, 37: 295-300, doi: 10.1016/j.enbuild.2004.03.009.
- ASTM E1933-14(2018),** Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org, doi: 10.1520/E1933-14R18.
- ASTM E1980-11, (2019),** Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org, doi: 10.1520/E1980-11R19.
- ASTM E1918-97/06, (2001)** Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001, www.astm.org, doi: 10.1520/E1918-06.
- Devicenzi, A. (2018)** Producción de basura, cual es la realidad en Argentina y que se podría hacer. Buenos Aires. Diario El Cronista. Fecha: 4 de marzo de 2018. Recuperado de: <https://www.cronista.com/responsabilidad/Produccion-de-basura-cual-es-la-realidad-en-Argentina-y-que-se-podria-hacer-20180302-0075.html>.
- Doulos, L., Santamouris, M., Livada, I. (2004).** Passive cooling of outdoor urban spaces: The role of materials. *Solar Energy*, 77 (2): 231-249, doi:10.1016/j.solener.2004.04.005.
- Flores Larsen, S., Hongn, M. (2014).** Determining the infrared reflectance of specular surfaces by using thermographic analysis. *Renewable Energy*, 64: 306-313, doi: 10.1016/j.renene.2013.11.049.
- Givoni, B. (1994).** *Passive and Low Energy Cooling of Building*, International Thomson Publishing Inc., NY, Wiley, pp 1–36, 81–130.
- Gobierno de la Provincia de Buenos Aires (2017).** Publicaciones periódicas CEAMSE. Publicación digital de la Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado. Buenos Aires, Argentina.
- INTI (2015).** Argentina comienza a reciclar neumáticos fuera de uso. Noticiero Tecnológico Semanal N° 218. Publicación digital del 26 de julio de 2010. <http://fundacionhuellaecologica.org/comenzo-el-reciclado-de-neumaticos-en-argentina/>
- Niachou K., Livada L., Santamouris M. (2008).** Experimental study of temperature and airflow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions. -Part I: air and surface temperatures, *Building Environment*, 43: 1383-1392, doi: 10.1016/j.buildenv.2007.01.040.
- Sánchez Amono, M. (2018).** Estudio de la viabilidad de aplicación de polietileno y caucho reciclados para un sistema constructivo de cubierta. Tesis de Doctorado en Ingeniería. Mención Materiales. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba.
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Georgakis, C. (1998).** Square, Athens, Greece, Internal Report, Group Building Environmental Studies, Physics Department, University of Athens, Athens, Greece.
- Santamouris, M., Synnefa, A., Karlessi, T. (2011).** Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions, *Solar Energy*, 85: 3085-3102, doi: 10.1016/j.solener.2010.12.023.



SPANISH VERSION.....

- Simpson, J., McPherson, E. (1997).** The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona, *Energy Building*, 25:127-137, doi: 10.1016/S0378-7788(96)01002-X.
- Zinzi, M., Agnoli, S. (2012).** Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region, *Energy Building*, 55: 66-76, doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.024.

