



***“La cubierta metálica en el clima cálido húmedo:
análisis del comportamiento térmico del techo de zinc
de la vivienda vernácula dominicana”***

Osttuhen Díaz

2012

Universidad Politécnica de Cataluña
Master en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente

Departamento de Construcciones arquitectónicas I
Curso 2011-2012

***“La cubierta metálica en el clima cálido húmedo:
análisis del comportamiento térmico y efecto en el
confort del techo de zinc de la vivienda vernácula
dominicana”***

Osttuhen Díaz
Tutores: Anna Pagès
Antonio Isalgue

Barcelona. Septiembre 2012

Resumen

Los techos metálicos son una solución de cubierta muy expandida entre las viviendas de la zona tropical por reunir indiscutibles ventajas constructivas y económicas, pero tratándose de transferencia de calor y por sus propiedades físicas de excelentes conductoras no son justamente las más idóneas de las coberturas. Intentando corregir la debilidad de esta tipología de cubiertas se integran una diversidad de estrategias de protección térmica complementarias como la cámara ventilada y la aislación. Este trabajo estudia de una manera comparativa el comportamiento térmico de la cubierta de acero galvanizado y algunas de las soluciones más utilizadas para reducir la transmisión de calor y por tanto, el efecto de discomfort térmico que perciben los usuarios.

Palabras claves: Cubierta metálica, zinc, transferencia de calor, confort, cálido húmedo.

CONTENIDO

Resumen

Índice

Capítulo I:

1.1	Introducción.....
1.2	Objetivo general y específicos.....
1.3	Metodología.....
1.4	Marco Conceptual.....

Capítulo II:

2.1	El techo de zinc en la vivienda vernácula dominicana
2.2	Definición y características constructivas de la cubierta simple de chapas galvanizada.....
2.3	Estrategias de protección térmica complementarias de la cubierta de zinc.....
2.3.1	Falsos techos o cielorrasos.....
2.3.2	La cubierta ventilada.....
2.3.3	Barreras radiantes.....
2.3.4	Recubrimientos exteriores.....
2.3.5	Techos fríos.....
2.3.6	Aislantes.....
2.3.7	Ángulo de inclinación.....

Capítulo III:

3.1 Comportamiento térmico de los cerramientos.....

3.1.2 Procesos de transferencia de calor a través de la cubierta

3.1.2 Conducción.....

3.1.3 convección.....

3.1.4 transmisión.....

3.2 Transferencia de calor a través de la cubierta metálica.....

Capítulo IV:

4.1 Descripción del estudio.....

4.1.2 Ubicación geográfica.....

4.1.3 Datos climáticos.....

4.1.4 Orientación y descripción de la cubierta.....

4.2 Metodología de cálculo.....

4.3 Casos de estudio y sus características térmicas.....

4.4 Presentación de los resultados.....

Conclusiones

Referencias bibliográficas

Capítulo I

1.1 INTRODUCCIÓN

Las tierras comprendidas entre el Trópico de Cáncer y el de Capricornio fueron llamadas en la antigüedad como la zona tórrida porque se considero que quedarían en su mayor parte deshabitadas debido al excesivo calor provocado por la perpendicularidad de los rayos solares, aunque esto no es del todo cierto ya que existen otras latitudes más adversas donde se registran las mayores temperaturas del planeta. De cualquier manera, contar todo el año con días de alrededor de 12 horas de sol (13 en el solsticio de verano), es una buena razón para que el hombre en su necesidad de proyectar sombra sobre su cabeza haya convertido la cubierta en la protagonista principal de la arquitectura tropical.

Evitar que el calor en forma de radiación, directa o indirectamente, ingrese en las edificaciones siempre ha sido de primordial interés para garantizar el confort interior de una manera pasiva y por tanto, el ahorro energético. Este ultimo objetivo de manera especial en los últimos tiempos.

Desde las tribus primitivas, a quienes les bastaba con una techumbre que consistía en ramas y hojas de arboles, los conocimientos y técnicas vernaculares se fueron transmitiendo siempre optando por los materiales orgánicos y locales como los techos vegetales de palma cana, que han probado ser excelentes favoreciendo el confort interior (Guimarães, 2008). Pero estos materiales tradicionales han quedado excluidos de las zonas urbanizadas debido a su corta vida y a su inflamabilidad y los materiales fabricados que pueden sustituirlos son escasos, caros o de pobre rendimiento desde el punto de vista térmico.

Una de estas alternativas más utilizadas son las cubiertas metálicas de chapas de acero galvanizado, porque además de su durabilidad, también gozan de las ventajas de su fácil construcción y bajos costos.

En la realidad de la vivienda dominicana se revela que al rededor del 60% de las viviendas poseen estas cubiertas galvanizadas, (ONE, 2010) o “techos de zinc” como usualmente se les llama. Esta solución tan popularmente expandido lo compone una sencilla estructura de soporte en madera y planchas onduladas de acero galvanizado. Pero sabemos que los metales

tienen una excelente propiedad física para conducir el calor, lo que no las hace justamente la más idónea de las coberturas. Es donde por necesidad han surgido una diversidad de estrategias como las capas aislantes y las barreras radiantes intentando corregir en lo posible esta debilidad de esta tipología de cubiertas. Mientras las personas que no pueden optar por los sistemas fabricados de aislación, recurren a la incorporación de la carama ventilada con su tradicional cielorraso de madera ligera como única estrategia para amortiguar el paso del calor hacia el interior de las viviendas. Pero los techos pueden representar un considerable porcentaje del total de las ganancias del calor envolvente en las viviendas, más aun si son de metal, entonces surge la pregunta: ¿Cuanto ayuda la cámara ventilada y que impacto tiene el material del cielorraso en el desempeño térmico de este tipo de cubiertas?

El propósito de esta investigación es analizar la eficiencia en términos de transmisión de calor de la cubierta ventilada en las viviendas dominicanas con techos de zinc y realizar una evaluación comparativa de diferentes materiales usualmente utilizados en el cielorraso a fin de recomendar los más eficientes reduciendo el flujo de calor.

Para la consecución de este objetivo, se parte del análisis de la cubierta sencilla de chapa de zinc, su introducción en la arquitectura dominicana y de su relevante presencia en el patrimonio edificado. Se continúa con la comprensión de la dinámica térmica a través de los cerramientos, así como de la influencia que tienen las propiedades térmicas de sus materiales. Se utilizara un modelo de cálculo en estado estacionario que permita determinar las temperaturas superficiales de los componentes constructivos y por tanto obtener una aproximación de la situación térmica debajo de esta cubierta. Todo esto enmarcado en el contexto climático del cálido húmedo. Finalmente se ofrecerán los cuadros comparativos de los resultados perseguidos.

1.2 Objetivo general y objetivos específicos

Identificar entre las estrategias complementarias de la cubierta de acero galvanizado utilizadas para en el amortiguamiento de la transmisión de calor, aquellas que ofrecen más beneficios al confort térmico interior, a fin de recomendar tanto en la rehabilitación de la cubierta en la vivienda dominicana con techo de zinc, como para el clima cálido húmedo en general.

Específicos:

- Estudiar la introducción en la arquitectura dominicana de la cubierta sencilla de zinc y sus características constructivas.
- Analizar el comportamiento térmico de la cámara ventilada y su aislación.
- Determinar el efecto térmico de la inclinación de las chapas respecto a la horizontal y el efecto del estado superficial de la cubierta en función de su índice de absortividad ante la radiación solar.
- Realizar una evaluación comparativa de diferentes materiales usualmente utilizados en el elemento constructivo del cielorraso a fin de identificar y quizás recomendar aquellos más eficientes en la reducción de calor.
- Comparar el confort térmico que ofrecen cada una de las estrategias de estudiadas.

1.3 Metodología de investigación

Para llevar a cabo esta investigación primero se ha planteado un tema factible de ser estudiado, la cantidad de información científica que puede proporcionar, así como también las limitaciones. A partir de esto se organizan las acciones investigativas de la siguiente manera:

- Consulta y análisis de una amplia recopilación bibliográfica de investigaciones hechas en el campo de la transferencia de calor a través de los cerramientos y de las mejoras del comportamiento térmico de los mismo, poniendo especial atención en los modelos físicos de calculo.
- Partiendo del material disponible, se definen los objetos de estudio (las estrategias de aislación y protección térmica a comparar).
- Adecuación del modelo de cálculo apropiado para este estudio, recopilación de datos e información necesaria y complementaria y análisis de casos.
- Composición del cuadro comparativo.
- Conclusiones

1.4 Marco Conceptual

La transferencia de calor, en física, proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se transfiere mediante convección, radiación, conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. Por ejemplo, el calor se transmite a través de los cerramientos de una edificación fundamentalmente por conducción.

La conducción es el modo de transferencia térmica a través de los sólidos. En el que el calor se mueve o viaja desde una capa de temperatura elevada del cerramiento a otra capa de inferior temperatura debido al contacto directo de las moléculas del material.

La conductividad térmica es la propiedad de los materiales que dice cuán fácil es la conducción de calor a través de ellos. Es elevada en metales y en general en cuerpos continuos, y baja en los gases y en algunos materiales especiales como la fibra de vidrio, que se denominan por eso aislantes térmicos. La inversa de la conductividad térmica es la resistencia térmica.

Resistencia térmica: capacidad de los materiales de oponerse al paso del calor.

Equilibrio térmico: Es el estado en el que se igualan las temperaturas de dos cuerpos en cuyas condiciones iniciales tenían diferentes temperaturas. Al igualarse las temperaturas se suspenden el flujo de calor y el sistema formado por esos cuerpos llega a su equilibrio térmico.

Inercia térmica: El concepto de masa térmica o inercia térmica de una edificación se refiere a la característica que tiene la edificación en su conjunto de amortiguar el calor que incide sobre ella y transmitirlo al interior con retardo.

Absortividad (α): representa la fracción de radiación incidente que es absorbida por un material, con valores que van de 0.0 a 1.0 (aunque también se puede expresar en términos de porcentaje, de 0% a 100%). La absortividad, en ocasiones denominada absorción superficial, depende fundamentalmente del color y el acabado de los materiales.

Emisividad (ϵ): de un material representa la proporción entre la energía radiada por dicho material y la energía que radiaría un cuerpo negro ideal, dada la misma temperatura y la misma superficie. En ese sentido se trata de una medida de la capacidad de un material para absorber y radiar energía. Si asignamos al cuerpo negro ideal un valor de 1.0, entonces cualquier objeto real tiene una emisividad mayor a 0.0 y menor a 1.0.

Reflectividad: Representa la fracción de la radiación incidente que es reflejada por una superficie. En términos generales la reflectividad se considera una propiedad direccional, ya que además de la longitud de onda, depende de la dirección de la radiación incidente y de la dirección de la radiación reflejada.

Radiación de onda corta: radiación electromagnética proveniente del sol, denominada ultravioleta (UV) y que se concentra mayormente en la franja visible del espectro, rango entre los 290-360 nm.

Radiación de onda larga: radiación electromagnética emitida por la superficie de la Tierra y por la atmosfera. Se ubica en la porción infrarroja del espectro entre los rangos 760-3000 nm, se denominan infrarroja (IR). Es percibida como calor por los vertebrados.

Capítulo I

2.1 El techo de zinc en la vivienda vernácula dominicana

La presencia de los techos de metal se remonta tan atrás en la historia como 950 a.c. Pero para ubicar los comienzos de la tipología particular que nos concierne en esta investigación necesariamente hay que esperar hasta la aparición de la chapa ondulada en la década de 1860, hecho que fue posible solo gracias a los avances de la industrialización.

Para principios del siglo XX las chapas de metal ya eran populares como material de cubiertas en el viejo continente. Paralelamente las colonias europeas establecidas en el archipiélago de las Antillas requerían de viviendas adecuadas para los administradores de sus territorios coloniales, así que adaptaron o importaron, tal cual, sus conocimientos constructivos a la franja "cálida" del planeta. Aparece de esta manera el estilo anglo-antillano y con ello las cubiertas de chapas de zinc como una de sus características más distintivas.

En la arquitectura dominicana en particular la introducción del techo de zinc coincide con la llegada de un contingente de inmigrantes burgueses atraídos por la bonanza experimentada por la industria azucarera a todo lo largo del siglo XX. Hecho que sin dudas fue también favorecido en gran medida por la ocupación norteamericana de 1916-1924 y la importación de su "estilo americano" como llamarían los locales a las edificaciones de largas galerías perimetrales y techos de chapas metálicas.



Fig.1- Viviendas de estilo anglo-antillano en la ciudad de Puerto Plata.

La principal característica de las nuevas edificaciones era que incluían una amplia serie de elementos productos de la industrialización como la madera machihembrada, pavimentos de cemento, celosías en las ventanas, y por supuesto, las cubiertas que se volvieron más

complejas, integrando sistemas de desagües pluviales, juego de varias pendientes, cámaras interior ventiladas, buhardillas y cielorraso. Además de los elementos decorativos como las cresterías caladas en los aleros, producto de la influencia del victoriano (Fig.1).

Entre las razones de la rápida aceptación de la chapa de zinc podemos mencionar: la ligereza del material y su resistencia para resistir los terremotos y los fuertes vientos huracanados, además de ser incombustible ante fuego y de presentar un buen aspecto visual. Claramente en el momento de su introducción no era todavía un material económico y por esta razón su uso quedó por un buen tiempo limitado a las clases acomodadas. Mas tarde finalmente se extiende del nivel urbano a lo rural. De esa manera fueron siendo desplazadas las cubiertas vegetales bajo la noción de que eran “primitivas”.

La cubierta del nuevo estilo antillano, tenía claras influencias inglesa fácilmente verificables en la adaptación constructiva del estilo bungalow. Aunque el influjo francés también se dejó notar (Entre otros elementos) en el uso de tejas “francesas”, pero estas, por sus costos estaban reservadas a estratos sociales más prominentes, dejando a las mas accesibles chapas de zinc como el material popular por excelencia, hasta que poco después hiciera su aparición el hormigón armado.

Así como una vez las cubiertas de zinc desplazaron de las zonas urbanas a los techos de palma cana (Fig.2), estas a su vez fueron desplazadas por las losas de hormigón. Concentrándose mayormente en las zonas rurales, sin embargo, todavía hoy representan una importante proporción dentro del total de viviendas dominicanas.



Fig.2- Ejemplo de viviendas con techos de palma y techos de zinc.

Según datos estadísticos (tabla 1), al rededor del 62% de las viviendas dominicanas para el año 2010 tenían cubiertas metálicas de zinc, mientras que los techos de losas de hormigón armado representaban un 36%. La misma tabla muestra un decrecimiento del uso de techos de zinc de poco más de un 3% entre 2002 y 2010, siguiendo esta tendencia se puede casi asegurar que para la fecha actual, el zinc todavía es el material más común de encontrar en los techos de la vivienda dominicana por más de un 60%.

Material de construcción en techo	CENSO 2002	ENHOGAR 2005	ENHOGAR 2006	ENIGH 2007	ENHOGAR 2008-2010
Total	100	100	100	100	100
Hormigón	31.23	32.78	34.37	34.05	35.60
Zinc	65.61	66.08	64.41	63.97	62.40
Asbesto cemento	1.27	0.45	0.47	0.85	1.00
Yagua	0.63	0.19	0.26	0.25	0.20
Cana	0.97	0.32	0.38	0.51	0.30
Otro	0.29	0.17	0.10	0.37	0.30

Fuente: Censo Nacional de Población y Vivienda 2002
Encuesta en Hogar de Propósitos Múltiples 2005-2006, 2009-2010
Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2007

La permanencia de este sistema de cubierta esta muy ligada a la realidad socioeconómico de Rep. Dominicana. Estas cubierta simple de chapa de zinc son muy económica y de fácil construcción, lo que puede explicar de manera esencial su fuerte presencia en el patrimonio construido y aunque, por si sola, y tratándose de confort térmico, no represente una mejora en relación con los techos de fibras vegetales, si existen diferentes mecanismos para amortiguar el paso del calor, como expondremos mas adelante.



Vivienda dominicana del libro Arquitectura Vernácula y popular de Esteban Prieto.

2.2 Definición y características constructivas

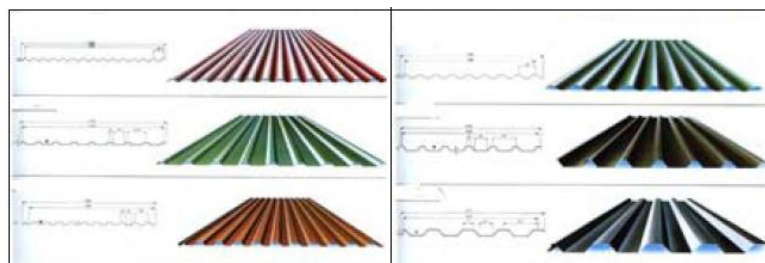
Dentro de las tipologías de techos metálicos se denomina cubierta simple de acero galvanizada a la cobertura constituida por chapas de este material nervadas y fijadas sobre la estructura de soporte que puede ser metálica o de madera. Este material de construcción generalmente utilizado en techos comúnmente se encuentra denominado como chapa de zinc, chapa de acero galvanizada o simplemente chapa galvanizada.

Es muy común encontrar estas cubiertas en edificios industriales, instalaciones deportivas, de agricultura, etc., en ocasiones a manera temporal en ampliaciones y rehabilitaciones, pero también de manera permanente en viviendas, todo por su simplicidad, bajos costos de manufactura y fácil mantenimiento, ya que las reparaciones no resultan complicada y las chapas dañadas se pueden cambiar fácilmente, así como los elementos de sujeción (pernos, clavos...).

Las chapas de acero son revestidas con una capa de zinc en el proceso siderúrgico conocido como galvanizado. El propósito es que zinc forme una capa protectora que alargue la vida de la chapa gracias a su relativamente buena resistencia ante la oxidación. El método de galvanizado más utilizado es en caliente donde las piezas son sometidas a un baño de zinc fundido.

En su fabricación la chapa lisa se pasa por un rodillo formando láminas que simulan el cartón corrugado. Se presentan en una amplia gama de productos que incluyen variedad de colores, texturas y de forma. Se pueden distinguir tres tipos de chapas simples:

- Chapas onduladas
- Chapas acanaladas
- Chapas trapezoidales



Tipos de chapas galvanizadas según su perfil

Los acabados podrán ser de cincalum (aleación de aluminio y zinc), galvanizados, prelacados o prepintado, y se pueden incluir o no chapas plásticas translúcidas. Las dimensiones y espesores de las láminas o chapas varían según el fabricante, pero por lo general tienen un espesor muy delgado entre 1 y 2 milímetros y las dimensiones más comunes de 2 x 0.70 metros.

Para evitar que este tipo de cubiertas filtren el agua entre las juntas de las chapas es necesario que siempre tengan una pendiente mínima que algunos especialistas fijan en no menos del 10%, para una buena evacuación de las aguas. En República Dominicana son usuales las inclinaciones de 15° y 30°.

Otra de las razones importante por las que se elige un techo de metal sobre otro tipo de materiales tiene ver mucho con su durabilidad. La mayoría de los techos de metal tendrá una vida útil de 30 o más años. Mientras que uno, por ejemplo, de tejas asfálticas puede necesitar ser remplazado después de 20 años, y los de madera entre 8 y 25 años.

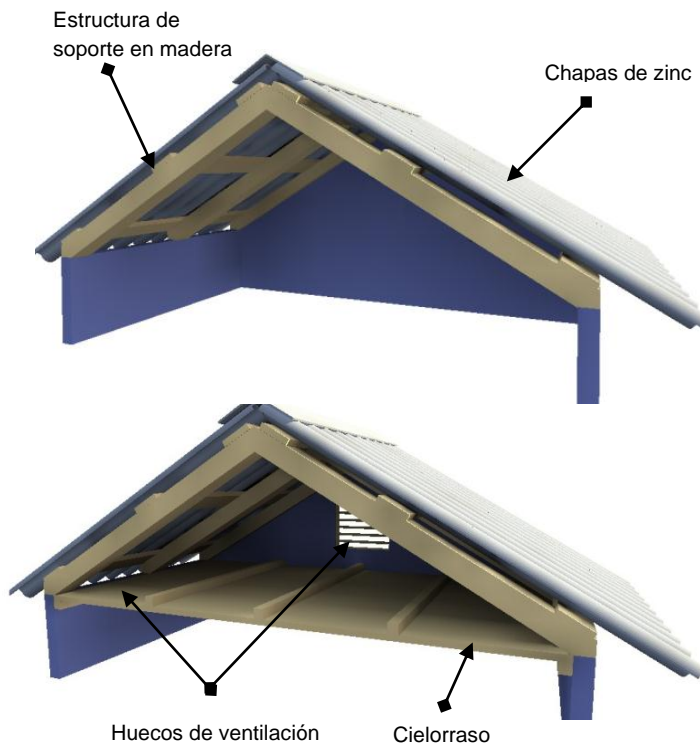


Fig.3- Representación de la cubierta sencilla de chapas de zinc sin cámara y con cámara ventilada.

Muchas de las viviendas dominicanas solo pueden disponer de la cubierta de chapas de zinc, sin ninguna otra protección como cámaras o aislantes. Es la solución más económica y más común de encontrar. Pero ya sea por razones estéticas o por la necesidad consiente de bloquear el calor, a esta cubiertas se les adapta una cámara de aire que puede ser no ventilada o ventilada como se muestra en la figura 3. En todo caso, resulta un área vacía, no transitable, entre la sección del cielorraso y la cúspide de la cubierta, de tal manera que el aire en el espacio interior funciona como un disipador del calor que es irradiado por el metal y que debe atravesarlo por llevar un flujo descendente.

En las cámaras muy ventiladas, el aire es renovado gracias a las aberturas laterales de la estructura y por ventanillas, en algunas cubiertas más complejas están provista de un respiradero en la parte superior. En sección, la distancia común entre el cielorraso hasta la cumbrera por lo regular supera el metro de altura.

2.3 Estrategias de protección térmica complementarias de la cubierta de zinc recomendadas para climas cálidos húmedos.

El tejado ideal del clima cálido (o en situación de verano en climas templados), debe absorber la menor cantidad posible de calor y ofrecer una resistencia casi total a la corriente calórica. Pero precisamente esta es la principal debilidad de las cubiertas metálicas de zinc, puesto que propician todo lo contrario al conducir rápidamente el calor hacia el interior.

En la medida que proliferaban estos techos fueron varios los recursos utilizados para conciliar sus ventajas con este inconveniente de sus propiedades físicas. A continuación expondremos algunas de las soluciones más habituales recomendadas para las latitudes cálidas y cuales de estas estrategias se utilizan o podrían ser viables de adoptarse para la cubierta de zinc de la vivienda vernácula dominicana a fin continuar con el análisis de esta investigación.

2.3.1 Falsos techos o cielorrasos:

Es un forjado horizontal, también llamado “falso techo” o cielorraso. Es una estructura ligera que se coloca a cierta distancia debajo del techo propiamente dicho. Se utiliza ya sea para disminuir la altura de una habitación o disimular la cubierta original. También sirve para ocultar instalaciones técnicas. Estas pueden ser de diversos materiales, generalmente prefabricados (Fig.4).

La técnica del cielorraso es usualmente utilizada en los interiores de las edificaciones sin importar el clima. Se coloca tanto para techos horizontales como inclinados y según sus materiales y acabados puede ser costoso, tanto más si también son especializados como los acústicos.



Fig.4- Colocación de un cielorraso o falso

En las viviendas dominicanas con techo de zinc, el cielorraso toma una dimensión muy importante ya que según estudios realizados se ha demostrado que con los materiales para tejados comúnmente disponibles en los trópicos, no es posible obtener un resultado de óptimo aislamiento ante el flujo de calor si no se añade además un cielorraso (Koenigsberger y Lyon).

La madera es el material tradicional empleado en este recurso complementario, en la específicamente los paneles de madera contrachapada, también aunque menos frecuente, es posible encontrar de paneles de fibra mineral. Amen de estos, es poca la variedad de opciones con las que cuenta el usuario de una vivienda rural dominicana y que reúnan en un mismo producto un buen aislamiento del calor y bajos costos.

Sin embargo, la inquietud de encontrar soluciones sustentables y económicas promueve investigaciones en el campo de la sustentabilidad tecnológica en toda Latinoamérica. Una de estas realizada por el Centro de la Vivienda Experimental (CEVE) en Argentina se centro en el reciclaje para desarrollar un diseños experimental de paneles de cielorraso con materiales bioclimáticos como la cáscara de maní ligadas con resinas de poliéster, (Fig.5). (Argüello y Gatani 2009).

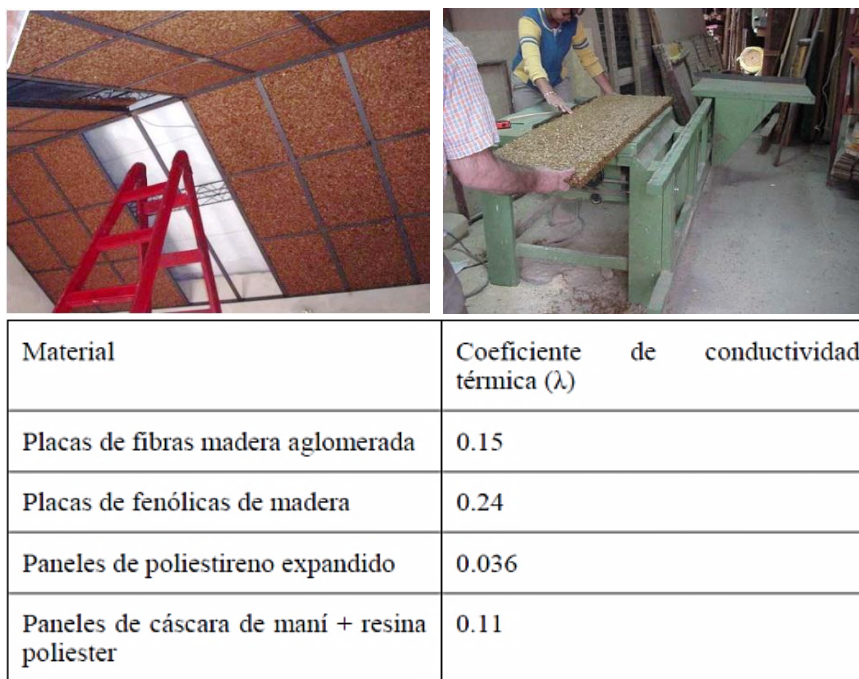


Fig.5- Corte, colocación de paneles de maní y tabla con la comparación de los coeficientes térmicos. Estudio experimental con paneles de cascara de maní, en Argentina. (Argüello y Gatani 2009).

Como parte de los resultados mostraron el coeficiente de conductividad térmica (Ver capítulo 3) en comparación con otros materiales de similar aplicación para cielorrasos, para concluir que son una buena alternativa para paneles de cielorraso por su buena capacidad de aislante térmico en techos de alta radiación, como los de chapas galvanizadas, entre otras consideraciones como la buena apariencia y fácil procedimiento de fabricación.

Valdría la pena explorar esta solución o similares en el propósito de mejorar la variedad de opciones para el cielorraso u otras aplicaciones aislantes del calor para las cubiertas dominicanas.

Siguiendo la misma línea del aprovechar sustentablemente de recursos abundantes y económicos, la fibra de coco (Fig.6) podría ajustarse como otra solución de cielorraso, de hecho este material, dentro de la gama de aislantes ecológicos, ya ha sido tratado para convertirlo en madera contrachapada para acabados y recubrimientos. Pero al menos en dominicana no se conoce su uso como panel de cielorraso.



Fig.6- Fabricación, embalaje de la fibra de coco y algunos productos comunes.
Procesadora de fibras vegetales, Santo Domingo.

La fibra de coco se extrae del fruto de la palmera la cual puede producir hasta los 80 años. Pertenece a la familia de las fibras duras, tales como el "sisal" y el "hanequen" . Es una fibra

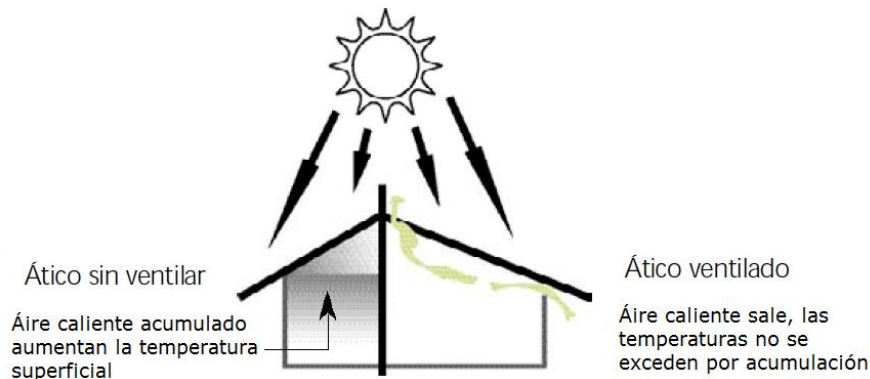
multicelular que tiene como principales componentes la celulosa y el leño, lo que le confiere elevados índices de rigidez y dureza.

Posee una baja conductividad al calor de $0.05 \text{ (W/m}^2\cdot\text{°C)}$. Otras de sus características son la buena resistencia al impacto, a las bacterias y al agua. La resistencia, durabilidad y resistencia, convierten a la fibra de coco en un material versátil y perfectamente indicado para los mercados del aislamiento tanto térmico como acústico.

La industria dominicana la utiliza en la fabricación de cuerdas, como relleno en asientos para vehículos, alfombras, tutores de plantas y en jardinería como cama para los sustratos (Fig.6). Entre otros usos, pero ninguno dirigido a la solución de aislantes térmicos en la construcción de viviendas económicas.

2.3.2 La cámara ventilada

El techo de zinc la vivienda vernácula dominicana puede incorporar en su diseño un importante factor que la ventilación. El aire es un buen disipador de las temperaturas, y siempre que pueda renovarse constantemente una cámara mantendrá temperaturas interiores cercanos o iguales a las exteriores por eliminar el excedente de flujo de calor que es irradiado desde el techo. Las cámaras no ventiladas no son tan efectivas como las ventiladas cuando sobrepasan ciertas dimensiones, ya que el intercambio de calor a causa de los procesos convectivos y radiativos aumentan, contribuyendo a la propagación del calor por todas las superficies, aumentando las temperaturas gradualmente al no poder ser expulsado fuera de la cámara, tal como se muestra en la siguiente figura:



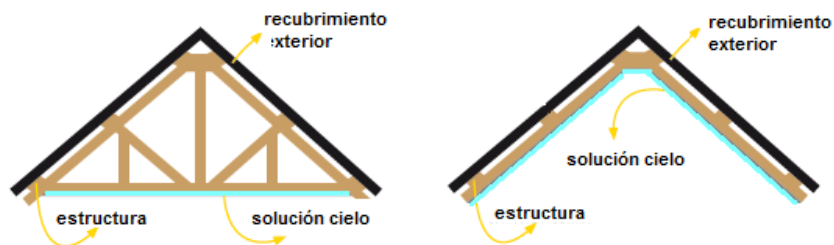
Fuente: Green Seal, Energy Star Home Project.

Para apoyar el efecto refrigerante de este tipo de cámara, sería recomendable el uso combinado de otras estrategias como integrar capas reflectivas al interior o capas de materiales aislantes, como mostraremos a continuación.

2.3.4 Barreras radiantes

El efecto de transmisión de calor por radiación dentro de las cámaras de aire se puede reducir aplicando sobre una o ambas caras materiales de bajo poder de emisión y de elevado poder reflector, como por ejemplo los metales, el aluminio entre ellos.

Las técnicas de barreras radiantes elimina en un 95% la ganancia de calor radiante del sol, (Sosa, Siem, 2004) por lo cual reduce la asimilación de calor del componente constructivo.



Dos métodos usuales de colocar la protección aislante o reflectiva, al interior de las cubiertas.

Su utilización debe ser evaluada técnica y económicamente, debido a que en pruebas de laboratorio los efectos han sido interesantes y efectivos, pero en ciertas condiciones los resultados son poco duraderos por la inevitable oxidación de la capa de metal en presencia de la húmeda del aire, además de que la deposición de polvo dentro de una cámara intransitable, al poco tiempo también contribuye a su pérdida de efectividad. En este sentido son diversos los autores que han dedicado sus estudios a eficientizar estas técnica. Por ejemplo, Frédéric Miranville y Harry Boyer (2003) presentaron un modelado con validación empírica de un sistema de techo térmico basado en barreras radiantes bajo condiciones climáticas tropicales que minimizan las deposiciones de polvo sobre la superficie reflectiva y por tanto conserva por más tiempo su eficiencia.

2.3.5 Aislantes

Cuando se utilizan materiales aislantes en el techo se pueden reducir sustancialmente las ganancias de calor a través de estos componentes (Fig.7). El aislante puede ser instalado en el material del techo por el lado exterior (que es lo más efectivo para el clima cálido) o como cielorraso internamente; también puede utilizarse la combinación de ambas técnicas. Diversos autores recomiendan 2 ó 3 cms de material aislante como espesor suficiente, aunque dependerá del tipo de material utilizado.

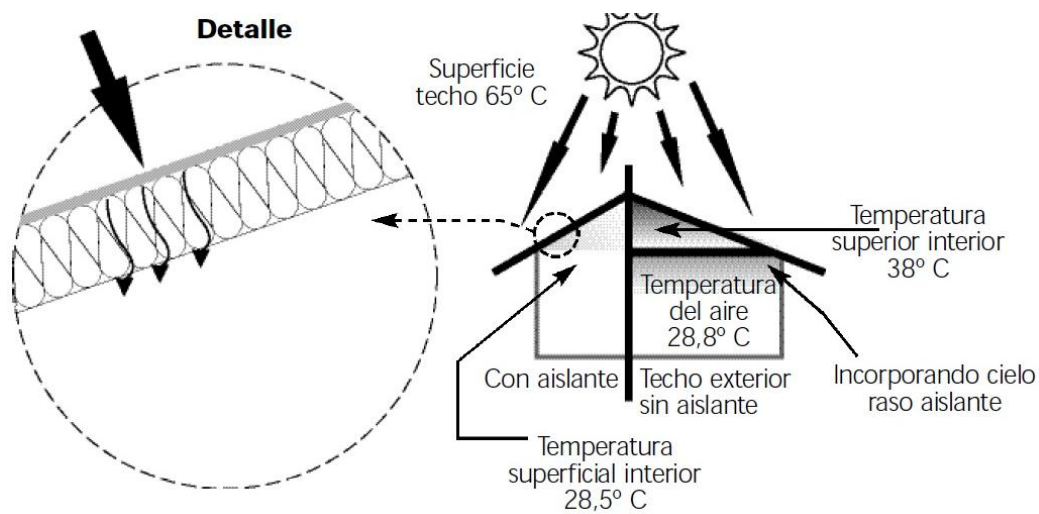


Fig.7- Comparación de aislante en techo. Fuente: Green Seal, Energy Star Home Project.

Además de unas buenas propiedades aislantes también es importante que el material no sea higroscópico, es decir, que no absorba humedad, lo cual disminuiría su propiedad de aislante con el paso del tiempo.

En general, se puede distinguir entre un grupo de aislantes más “ecológicos” y, por otro lado, un conjunto de productos que, pese a sus buenas propiedades aislantes, resultan cuestionables ambientalmente.

Entre los aislantes ecológicos tenemos: Corcho, madera, lana, celulosas, fibras de coco. Mientras que como aislantes sintéticos están: el poliestireno extruido, lana de roca, lana de vidrio, poliuretano, entre otros. Los aislantes sintéticos traen una enorme huella ecológica y la dificultad de reciclarse, pero además algunos incluyen componentes que pueden ser tóxicos para la salud, así que su elección debe ser cuidadosa.

El aprovechamiento de la alta inercia térmica de los materiales aislantes en los climas cálidos es tema de discusión entre los investigadores, pues es común encontrar malas soluciones que ocasionan estrés térmico en las edificaciones en lugar de mejorar el confort. En este sentido, el grupo como el de M. D'Orazio, C. Di Perna, E. Di Giuseppe (2010) analizaron como un aumento en el espesor del aislamiento reduce la eficacia de las estrategias tradicionales de enfriamiento pasivo, creando una disociación térmica entre el interior y las capas superiores de los techos metálicos. Igualmente, Chitrarekha Kabre, 2010 (ejemplos constructivos de India y Australia) determinó el desempeño de las cubiertas de chapas galvanizadas en función de un nuevo índice de rendimiento térmico, llegando a resultados donde demuestra claramente que los techos con la más alta resistencia térmica no son necesariamente las mejores soluciones.

2.3.3 Recubrimientos exteriores

Una posibilidad de rehabilitación térmica de una cubierta inclinada es la colocación de tejas acanaladas sobre una superficie también acanalada, este método además de boquear la radiación directa, permite el paso del aire por el espacio entre ambas superficies (Fig.8). Claramente los costos de este tipo de solución no serían viables para los usuarios de las modestas viviendas vernáculas, pero de igual modo la mostramos aquí.



Fig.8- Tejas sobre chapas onduladas.

2.3.4 Techos fríos

El término techo frío o techo blanco suele referirse a una cubierta con algún recubrimiento, como acrílicos de color blanco. Estos techos reflejan la luz solar y pueden ayudar a mejorar el confort interior, gracias a que los colores claros en el techo pueden reflejar entre 25% y 30% de la energía radiante del sol. Las superficies claras, lisas y brillantes suelen tener reflectancia elevada en relación a una superficie blanca teórica de perfecta reflectora, la cual absorbería 0% y refleja el 100% de la radiación.

El acabado original de las láminas de acero galvanizado reflejan muy bien la radiación, esto, mientras no envejeczan y se opaquen. Una vez que esto sucede la eficiencia del material se reduce drásticamente. La mejora del acabado blanco (Tabla 2) aun cuando no es muy significativa en relación a la chapa de zinc nueva, sin dudas es una buena recomendación para alargar las propiedades reflectivas de la cubierta una vez este se haya corroído (a menos que se pueda optar por chapas precaladas blancas en lugar de zinc tradicional). Lo importante para un techo galvanizado será mantener niveles de reflectancia alta y que así rechace un alto % de la radiación antes de que atraviese el material debido a que su reducido espesor de entre 1 y 2 mm es tan insignificante en términos de transmisión de calor que la temperatura en la cara exterior es prácticamente la misma a la de cara interior en poco menos de un minuto.

Material de techo	Reflectancia con acabado original %	Reflectancia con acabado blanco %
Capa de asfalto	5-15	31-35
Teja de arcilla	25-35	70-80
Teja de concreto	10-30	70-80
Capa o lámina de metal	70	70-80

Tabla 2. Reflectancia para diferentes materiales de techos. Fuente: Green Seal, Energy Star Home Project.

2.3.5 La inclinación y orientación de la cubierta

Hasta ahora hemos mencionado estrategias de protección térmica con la posibilidad de ser adaptadas a una cubierta de zinc ya construida. Sin embargo es tan importante el ángulo de

inclinación y la orientación que no puede quedar sin ser mencionadas sus implicaciones en el comportamiento térmico del techo del clima cálido húmedo, pues las ganancias de calor por radiación solar tienen su mayor impacto en los techos durante todo el año a causa de la perpendicularidad de los rayos del sol.

Las chapas acanaladas son excelentes desaguando rápidamente las aguas, por esto motivo permiten colocarse con pendientes mínimas de hasta solo el 8°. Esto supone costos menores de construcción pero en cuanto a las ganancias de calor es una medida desaconsejable, pues los techos planos o casi planos, son una negación a las

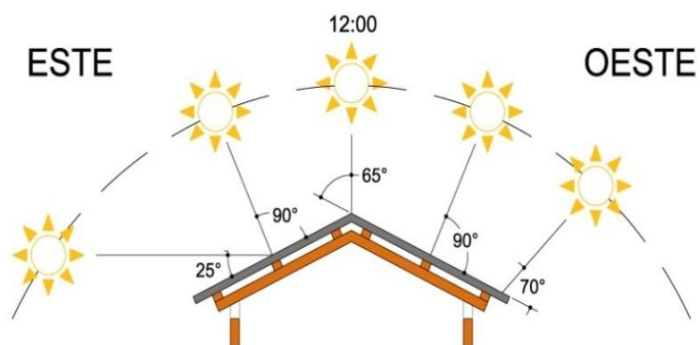


Fig-08 - Ángulos de incidencia solar sobre una cubierta inclinada 30° y orientada Este - Oeste

latitudes cálidas. Las superficies horizontales reciben la máxima intensidad solar, puesto que el ángulo horizontal de incidencia es muy cercano a la perpendicular de la superficie durante un gran número de horas al día, en relación con las horas de óptima captación en un plano inclinado, (Fig.08). Los techos planos pueden recibir hasta 50% más de calor que los techos inclinados (Green Seal, Energy Star Home Project, 2010).

Así mismo la orientación de la cubierta merece especial atención. Los techos de una sola agua deben inclinarse hacia el norte pues el sol incidirá con un ángulo muy pequeño en esta orientación la parte del año, mientras que con dos aguas deberá orientarse preferiblemente en dirección Norte-Sur. A cuatro aguas, las mayores superficies orientadas sur y norte y las menores Este-Oeste, como muestra la figura 09.

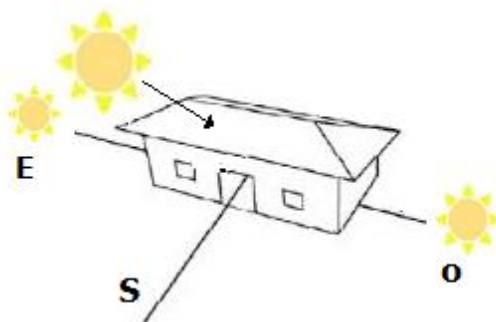


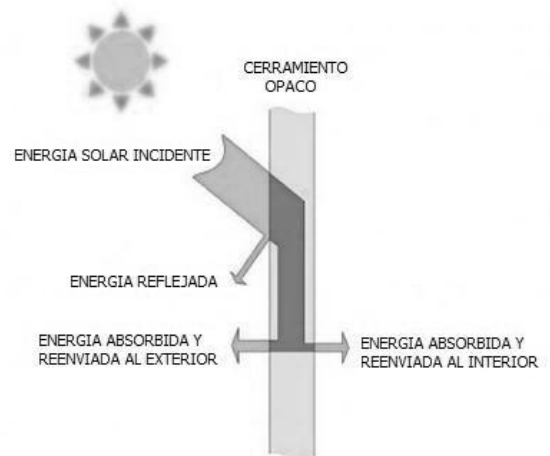
Fig. 09 - Orientación de un techo a 4 aguas con las mayores superficies orientadas sur y norte. Fuente, elaborada por el autor.

Capítulo III

3.1 El comportamiento térmico de los cerramientos

Para conocer la eficiencia térmica de un determinado sistema de cubierta primero es preciso comprender algunas importantes nociones sobre los cerramientos en general. Normalmente estos se componen de diversos materiales, según sea el sistema constructivo. El desempeño térmico global de los cerramientos, incluida nuestra cubierta, dependerá entonces de las características combinadas de estos materiales, del espesor de los mismos y de la forma en que están organizados, es decir, de la posición que guardan entre sí.

En la dinámica energética entre el exterior y el interior, cuando la energía radiante se encuentra con una superficie, una parte de ella es absorbida por el material y otra parte es reflejada. De un modo simultáneo, un material refleja, absorbe y emite (por re-radiación) calor a sus inmediaciones. Como mencionamos anteriormente, las características de los materiales y específicamente las características superficiales determinan la cantidad de energía calórica que es reflejada, absorbida y emitida.



Repartición de la energía en un cerramiento opaco.

El tránsito del calor a través de un cerramiento está directamente relacionado a la diferencia de temperatura, al espesor del material, la resistencia del material y su capacidad térmica, es decir, su capacidad para absorber calor antes de registrar un aumento de temperatura. La resistencia y la capacidad están directamente relacionadas con la densidad: los materiales ligeros tienen alta resistencia y baja capacidad térmica, mientras que los materiales macizos ofrecen poca resistencia, pero tienen una alta capacidad térmica.

El desempeño térmico de los cerramientos ante situaciones reales es un fenómeno bastante complejo, ya que la temperatura del aire, la incidencia de radiación solar y las condiciones del

viento, entre otros factores ambientales, pueden variar significativamente a lo largo del día. Para conocer el desempeño térmico de los cerramientos, considerando las variaciones en uno o más de esos factores, es necesario recurrir a sistema de cálculo dinámico, los cuales suelen requerir el uso de programas de software avanzado, dada la complejidad de las operaciones requeridas.

Sin embargo existe una aproximación simplificada al análisis del desempeño térmico de los cerramientos, conocida generalmente como cálculo en régimen estacionario. En este método se emplean las características térmicas básicas de los materiales y se asume que la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior es constante, es decir, que éstas no varían. Si bien los resultados obtenidos con este método no explican el comportamiento de los cerramientos ante situaciones climáticas reales, tratándose de un estudio comparativo si nos pueden brindar un conocimiento aproximado sobre sus cualidades o deficiencias térmicas.

Para comprender la dinámica del intercambio de calor entre el ambiente exterior y el interior a través de cualquier cerramiento, primero debemos saber que este proceso esta ligado al estado de “excitación” de sus componentes más elementales (moléculas, átomos, electrones libres, etc.) que tengan una cierta libertad de movimiento.

El elemento puede intercambiar la energía por tres mecanismos diferentes:

- Por interacción con las partículas vecinas (colisiones): **Conducción**
- Por interacción con las partículas de un fluido líquido o gaseoso que se encuentran a una temperatura diferente: **Convección**
- Por la absorción o emisión de radiaciones electromagnéticas: **Radiación**

En la interacción entre el edificio, el ocupante y el exterior entran en juego de manera simultánea estos tres mecanismos. Aunque se deben analizar de manera individual cada uno para comprender el proceso, ya que los tres fenómenos tienen un importante rol en la modificación del ambiente interior.

3.1.1 Radiación

Se caracteriza porque la energía se transporta de una superficie a otra en forma de ondas electromagnéticas, por tanto no requieren de un medio físico para transmitirse y se desplazan por el aire independiente de la temperatura del mismo. Las ganancias de calor por radiación pueden deberse a la absorción de la radiación de onda corta, ya sea procedente del sol o del alumbrado, y la de onda larga, procedentes de las superficies del entorno, incluso en el caso de recintos cerrados existirían radiaciones infrarrojas emitidas por los cerramiento, además de las reflejadas por el resto de los paramento.

Siendo que la energía por radiación que recibe la cubierta es considerablemente mayor que la que llega a través de los cerramientos laterales, se entiende la particular importancia de este fenómeno en el análisis de la transferencia de calor.

Todos los cuerpos con temperatura superior a 0K emiten radiación electromagnética, siendo su intensidad dependiente no solo de la temperatura de la superficie radiante, sino también de su emisividad (ϵ).

Tabla - 3

Absortancia solar y emisividad de algunas superficies constructivas		
Material (superficie)	Absortancia	Emisividad
Hoja de aluminio brillante	0.05 - 0.10	0.05 - 0.10
Lámina de aluminio con pátina de oxidación	0.30 - 0.50	0.20 - 0.50
Pintura de aluminio	0.40 - 0.55	0.40 - 0.55
Hierro galvanizado con pátina normal	0.30 - 0.50	0.20 - 0.40
Encalado reciente	0.12	0.90
Madera	0.40	0.90
Ladrillo, teja, piedra	0.70	0.90
Concreto aparente	0.45 - 0.60	0.90
Pintura de aceite blanca	0.20	0.90
Pintura verde o gris, clara	0.40	0.90
Pintura verde o gris, oscura	0.70	0.90
Pintura negra, asfalto	0.85	0.90

Fuentes: M. Evans (1980) y B. Givoni (1976)

La emisividad es la capacidad del material de liberar el calor absorbido en forma de energía infrarroja. Cuando más caliente es un objeto, más energía infrarroja emitirá. La emisividad puede tener un valor de 0 (espejo brillante, reflector perfecto) a 1,0 (cuerpo negro, emisor perfecto). La mayoría de las superficies orgánicas, pintadas tienen valores de emisividad cercanos a 0,90 (que representa un 90% del máximo teórico) como se observan en los

materiales de construcción más comunes (Tabla 3). No tanto así los metales que son conocidos por su poca capacidad de liberar calor. La emitancia de los metales van de 0 a 0.30, y mientras mas pulida es una superficie, menor emitancia.

Otro importante factor dentro de la radiación, es la absorbancia térmica de los materiales. Este parámetro representa la cantidad de la radiación incidente de onda larga que es absorbida por un material y depende del color de la superficie receptora. Los valores van de 0 a 1, donde 1 representa las condiciones de un cuerpo negro ideal, el cual absorbería (y emitiría) toda la radiación de onda larga incidente. Del otro lado se encuentran las superficies claras que refleja bien las ondas visibles cortas (luz), pero absorbe las radiaciones de onda larga (calor), o sea refleja la radiación solar y absorbe las radiaciones emitidas por los cuerpos en el ambiente.

Pero la absorción de algunos materiales puede cambiar ligera o significativamente con el tiempo de exposición a la radiación de onda corta (ultravioleta) pues este tipo de radiación puede decolorar las superficies. En el caso de los metales la oxidación también afecta su absorptividad, como se aprecia en la siguiente tabla con el ejemplo del zinc. (Tabla 4)

<i>METALES</i>	<i>Estado superficial</i>	<i>Absortividad</i>
<i>Cinc</i>	<i>pulido</i>	<i>0,55</i>
<i>Cinc</i>	<i>muy pulido</i>	<i>0,34</i>
<i>Cinc</i>	<i>oxidado</i>	<i>0,74</i>

Fuente: IFA-CSIC, Madrid.

Tabla 4 -. Absortividad de la chapa de zinc según su estado superficial.

La energía en forma de radiación solar que no es absorbida por el material de un techo, es porque es reflejada antes de atravesarlo. La reflectividad es otra importante propiedad radiante de especial interés en nuestro caso de estudio. Por ejemplo, superficies pulidas como en los metales tienen una alta reflectividad, típicamente del orden de 0.9 a 0.95. Es decir entre el 90 y el 95%. Pero estos valores también disminuyen en función de la agresividad del medio y la corrosión. Cuando una chapa de zinc se oxida puede reducir su reflectividad en más de un 80%. (Sosa, Siem, 2004).

La transferencia de calor por radiación hacia una superficie, o desde ésta, rodeada por un gas como el aire, ocurre paralela a la convección entre la superficie y el gas. El intercambio de calor combinado ocurre entre nuestra cubierta y el forjado horizontal o cielorraso que están separados por la cámara de aire. La transferencia total de calor se determina al sumar las contribuciones de los dos mecanismos de transferencia. Veamos a continuación nociones generales de la convección.

3.1.2 Convección

Como ya mencionamos, la convección se realiza entre dos cuerpos en contacto si uno de ellos es fluido (agua o aire). La convección puede ser:

Libre o natural, donde el movimiento del aire es generado por la diferencia de temperatura (ΔT). Como en las cámaras de aire sin ventilación, en vidrios, paredes y techos dobles. Este es el caso más elemental de convección donde la única fuerza actuante sobre el aire es la propiciada por la gravedad sobre la diferencia de densidad del aire, debido a la variación de temperatura. En este tipo de convección se considera la influencia de la dirección del flujo, el efecto no lineal de la diferencia de temperatura y consideraciones acerca del movimiento del aire, si es turbulento, laminar, etc.

Forzada, es otro caso donde el aire tiene velocidad propia, como en el caso de nuestra cubierta ventilada. En la convección forzada el proceso de transferencia de calor se incrementa notablemente y tienen influencia no solo la velocidad del aire, también la rugosidad de la superficie.

En un cerramiento en contacto con el aire, la transferencia del calor absorbido atraviesa el material por conducción y cuando enfrenta el cambio de temperatura en la capa límite superficial, el flujo de calor adquiere movimiento que puede ser ascendente si la temperatura aumenta y descendente si la temperatura disminuye. Esto queda indicado por las componentes convectivas en forma de resistencias térmicas superficiales del material exterior e interior, (R_{se} y R_{si}). Su unidad ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) y sus valores están dados según sea la situación del cerramiento y el sentido del flujo de calor, como se muestra en la tabla 5.

Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor	Situación del cerramiento			
	Separa con el exterior		Separa con espacio no habitable	
	R_{se}	R_{si}	R_{se}	R_{si}
Cerramientos verticales con pendiente con la horizontal $> 60^\circ$ y flujo horizontal	0,06	0,13	0,13	0,13
Cerramientos horizontales o con pendiente $\leq 60^\circ$ con la horizontal y flujo ascendente	0,05	0,10	0,10	0,10
Cerramientos horizontales y flujo descendente	0,05	0,17	0,17	0,17

Tabla 5 - Valores de resistencia térmica superficial. Fuente: Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79.

3.1.3 Conducción

La conducción es el tipo de transmisión de calor que se realiza por contacto entre las moléculas de los cuerpos, es decir, por propagación del movimiento molecular. Esta propagación del movimiento molecular varía con los diferentes materiales y constituye otra de las propiedades del material. En las formulas se expresa con la letra λ (lambda). La conductividad térmica varía desde 0,03 W/m°C para materiales aislantes, hasta 400 W/m°C para los metales que son excelentes conductores (Tabla 6).

Tabla 6 -. Fuente: Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79.)

Material	Conductividad térmica [W/(m·K)]
Metales	35 (plomo) 381 (cobre)
Hormigón	1,63 - 2,74
Agua	0,60 (líquida) - 2,50 (hielo)
Mortero de cemento	0,35 - 1,40
Ladrillo macizo	0,72 - 0,90
Bloques de hormigón	0,35 - 0,79
Ladrillo hueco	0,49 - 0,76
Enlucidos de yeso	0,26 - 0,30
Ladrillo multialveolar	0,20 - 0,30
Maderas, tableros	0,10 - 0,21
Hormigón celular	0,09 - 0,18
Aislamientos	0,026 - 0,050
Aires (sin convección)	0,026

En resumen, la conductividad no es más que la cantidad de calor que pasa por un metro de superficie por cada grado de diferencia de temperatura. Por tanto, la velocidad a la que viaja el flujo calorífico será mayor mientras mas grande sea la diferencia entre la zona fría y la zona caliente.

Frecuentemente la densidad es un indicador de la conductividad. Normalmente materiales de alta densidad tienen una alta conductividad. La relación es debido al hecho de que el aire tiene baja conductividad, $0,026 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ y los materiales ligeros tienen poros que contienen aire por lo que su conductividad tiende a ser menor.

La propiedad inversa a la conductividad térmica recibe el nombre resistencia térmica ($\text{W/m}^2.\text{}^\circ\text{C}$), que no es más que la capacidad de un material para oponerse al paso del calor y esta oposición es la suma de las resistencias térmicas superficiales exterior e interior ($R_s = 1/h$) y las resistencias térmicas de la capa del elemento constructivo (en caso de ser un cerramiento compuesto se suma la R de cada capa), esta resistencia del material está dada por su espesor (e) sobre su conductancia (λ):

$$R_t = \frac{1}{h_{ext}} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{int}}$$

Cuanto mayor es el valor de Resistencia Térmica mejor aislante térmico es el material.

El inverso a la Resistencia Térmica se denomina Transmitancia Térmica (U). Su unidad es ($\text{W/m}^2.\text{}^\circ\text{C}$) y se verifica como: $U = 1 / R_t$. Este coeficiente de transmisión de calor es la cantidad de energía que atraviesa, una unidad de superficie de un elemento constructivo y se realiza por unidad de tiempo y por grados de diferencia de temperaturas entre sus caras interior y exterior ($\text{W/m}^2.\text{}^\circ\text{C}$).

Cuanto menor es el valor de la Transmitancia Térmica menos es la transmisión de calor por conducción y por tanto mejor aislada está la estructura.

3.2 Proceso de transferencia de calor a través de la cubierta metálica

Nuestro caso de estudio, la cubierta simple de acero galvanizado, es un caso típico de transmisión de calor combinado entre radiación y convección.

Cuando la radiación solar incide sobre la cubierta, dependiendo de las propiedades superficiales de la superficie de la chapa (reflectancia, absorptividad, emisividad) una parte de esta energía en forma de radiación solar (onda corta) será reflejada y otra parte será absorbida.

Parte de esta energía acumulada tras la absorción es irradiada nuevamente hacia al exterior (onda larga) y otra parte continua su paso a través del sólido hasta el interior. Pero este tipo de cerramiento tiene la particularidad de ser muy delgado (entre 1 y 3 mm de espesor) así que al carecer de masa apreciable no puede acumular el calor debiendo cederlo casi de manera directa nuevamente al ambiente. Este fenómeno todavía es conducción, pero con un efecto muy insignificante en relación a los procesos convectivos y radiativos.

En la transmisión de calor por conducción es necesario que exista una diferencia de temperatura entre el exterior y el interior, pero si la edificación esta bien diseñada, abiertas al exterior como demandan estos climas para garantizar la ventilación, por lo general la temperatura del aire interior es la misma que la exterior, (Fig. 9) perdiendo aún más importancia la conducción.

El calor que reemite la chapa galvanizada viaja a través del aire por radiación, pues como explicáramos en el apartado 3.1.1 este tipo de transmisión de calor se realiza indistintamente de si existe o no diferencia de temperaturas. Pero antes de que este calor sea absorbido o reemitido, se realiza en la superficie del material el intercambio de energía entre el sólido y el aire, este intercambio depende de la componente convectiva superficial (h) que a su vez depende de si el aire es movido por fuerzas gravitatorias o son impulsados por agentes externos, o por una combinación de ambos. El fenómeno convectivo influye tanto en la resistencia que enfrentara la radiación para ser absorbida, como en la facilidad para luego ser reemitida.

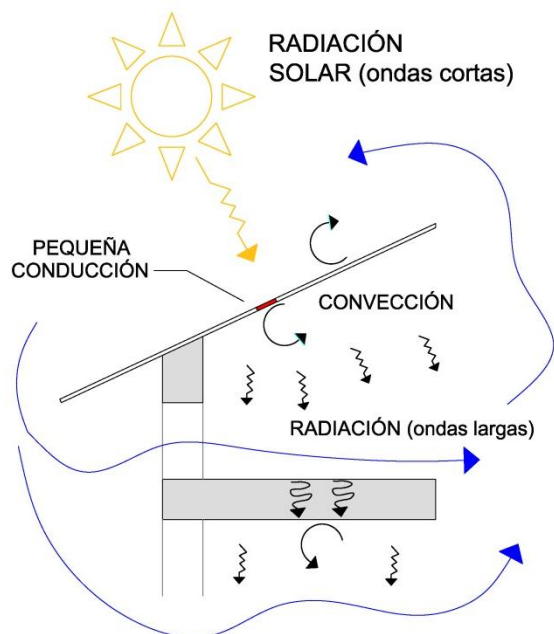


Fig. 9 - Tránsito de calor por la cubierta ventilada.
Fuente: elaborada por el autor.

En nuestro estudio, puede darse el caso de existir una cámara no ventilada donde no hay posibilidad de renovación del fluido favoreciendo la acumulación del calor dentro de la cámara y facilitándose así una diferencia de temperatura con el exterior o con el interior de la vivienda. El calor que ha viajado por radiación al llegar a otras partes sólidas con mayor espesor y mejor resistencia térmica que la chapa de metal, digamos el forjado horizontal o cielorraso, pasara

por conducción pero de una manera más significativa y nuevamente combinado con la convección y la radiación.

Es importante resaltar que por muy buena que sea la solución el diseño pasivo, la temperatura interior no será inferior a la temperatura ambiente, sin embargo, la temperatura superficial que llegar a alcanzar el techo de una vivienda con la cubierta expuesta a las radiaciones directas puede superar la del aire, más aún si se trata de un metal con su excelente propiedad para conducir el calor, afectando por consiguiente la temperatura de sensación en el interior y con esto el confort de los habitantes.

Como podemos apreciar son muchas las variables que interfieren en el proceso de la transferencia de calor, haciendo el fenómeno mas o menos complejo en función del sistema constructivo que se analice.

Capítulo IV

4.1 Descripción general del estudio

A continuación, estudiaremos de manera comparativa el efecto que tiene en el comportamiento térmico de una cubierta a dos aguas de chapas de zinc, la incorporación de la cámara de aire ventilada o no ventilada, así como el aislamiento, los materiales elegidos para el cielorraso entre otras estrategias para reducir la transferencia de calor. Para tal fin, se consideran dos diferentes inclinaciones de la cubierta, 15° y 30° respecto a la horizontal, por ser las más habituales, así como la situación climatológica de un día típico con temperaturas medias por hora. Se analizará además el desempeño térmico de la cubierta en función de la absorptividad de su superficie: muy pulida, oxidada y pintada de óxido rojo.

Más adelante abordaremos en detalle cada uno de los casos a estudiar. De momento se hace necesario definir algunos parámetros para reducir el cálculo a un mínimo de variables y consecuentemente alcanzar resultados lo más satisfactorios posibles, tales como:

4.1.2 Ubicación geográfica

Nuestra cubierta está emplazada en la localidad de Baní, Rep. Dominicana. Sus coordenadas geográficas son:

Latitud: $18^\circ 2'$,
Longitud: $-70^\circ 3'$
y Altitud: 167 m s.n.m.

Esta zona presenta una temperatura media anual de 27°C y una humedad relativa de 76%. La localidad se encuentra en una llanura costera dentro de la franja Seca Tropical. (Fig.10).

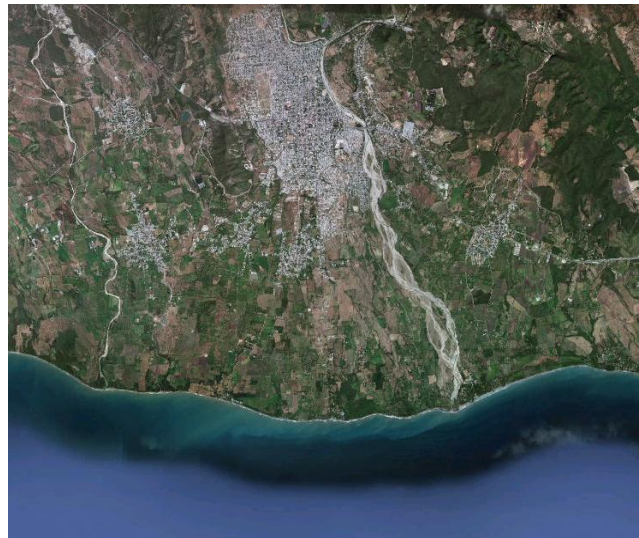


Fig.10 – Vista aérea ciudad de Baní, Rep. Dominicana.

4.1.3 Datos climáticos:

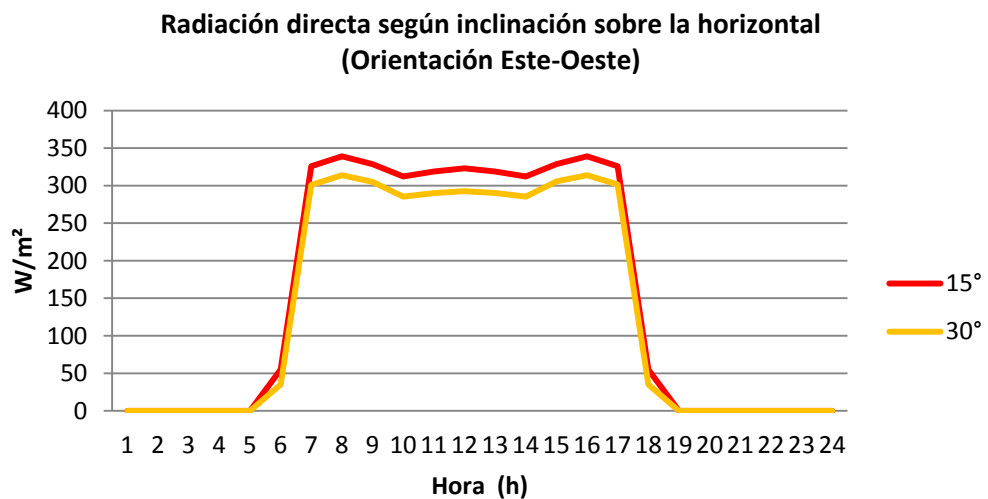
Los datos meteorológicos de temperatura y humedad presentados a continuación fueron colectados de la Oficina Nacional de Meteorología ONAMET, y de la Red de estaciones de los ingenios privados. Presentan una media de siete años, comprendidos entre 2004 y 2011.

Día promedio (valores medios)																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Promedio
T Media (°C)	23.2	22.4	21.9	21.5	21.3	20.6	20.3	20.7	24.1	27.2	27.9	27.9	28.1	28.5	27.8	27	27.6	27.9	25.8	25	25.2	24.9	24.8	24.1	25 (°C)
Humedad (%)	81	80	79	80	83	89	89	88	78	75	75	77	76	76	77	77	78	76	78	77	76	76	77	79	79 (%)

Tabla7 – Valores medios de temperatura y humedad por hora de Baní, Rep. Dominicana

De acuerdo con la tabla 7, la temperatura promedio es de 25 °C y la amplitud térmica diaria esta alrededor de 8 °C, es decir, que posee poca variación de temperatura entre el día y la noche, algo característico de este clima. En tanto que la humedad relativa para la ciudad se considera elevada, con valores medios diario de 79%.

Las horas de insolación promedio al día en esta latitud es de 12 horas como muestra el grafico (01) también donde también se presentan valores teóricos de radiación directa medidos en el plano inclinado a 15° y 30°. Los datos de radiación son del programa Heliodon para la latitud considerada en el estudio.



Graf. 01 – Datos promedios de radiación solar directa según inclinación del plano.

4.1.4 Descripción y orientación de la cubierta:

Se trata de una cubierta a dos aguas que en su base mide 3 x 4 mt, para un área de cobertura de 12 m². En sección la altura entre el forjado horizontal y la cumbrera es de 1.30 mt, como se muestra en la figura 11. El falso techo tendrá un espesor variable según sea el tipo de material utilizado. Los huecos de ventilación lo componen dos ventanillas de 0.45 x 0.55 mt y aberturas en la base de la cubierta de 0.15 cm de altura y ancho igual al perímetro de la cubierta, es decir, un área de ventilación de la cámara de 2.59 m²

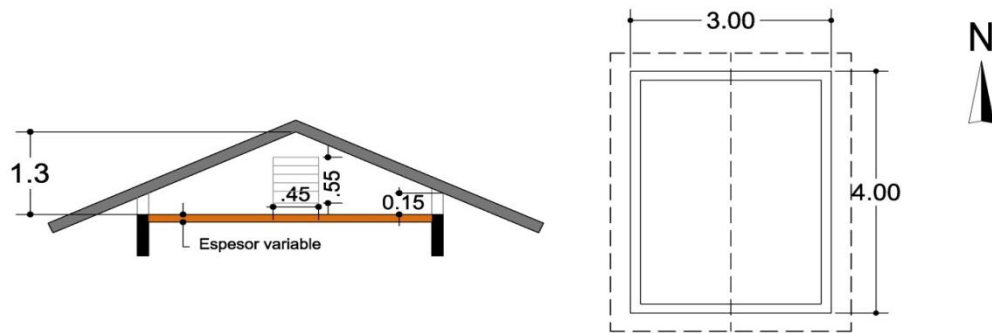
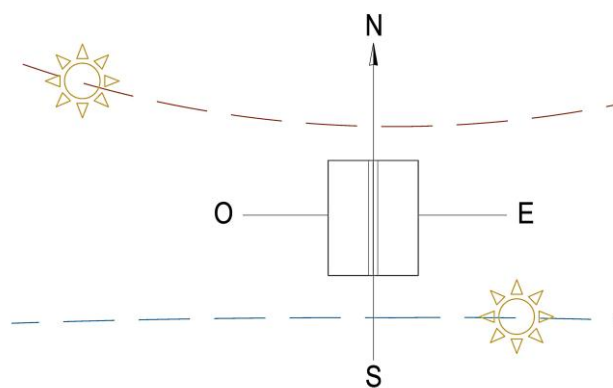


Fig. 11 - Planta y sección de la cubierta ventilada.

Hora	E-O	
	15°	30°
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	55	35
7	326	302
8	339	314
9	329	305
10	312	285
11	319	290
12	323	293
13	319	290
14	312	285
15	329	305
16	339	314
17	326	302
18	55	35
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

Tabla -9 Radiación directa (W/m²) incidente según orientación e inclinación.

Se toman la orientación de implantación de la cubierta alineando el eje de su cumbrera con el eje Norte-Sur. De esta manera para verificar la eficiencia de la cubierta cuando sus planos se enfrentan uno al Este o el otro al Oeste, las orientaciones más desfavorables para las edificaciones en estos climas.

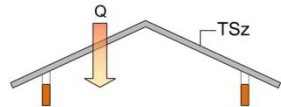


Esquema de orientación de la cubierta.

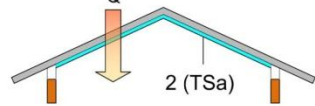
4.2 Casos de estudio y sus características térmicas:

Partiendo de que la radiación de calor esta directamente relacionada a la temperatura de las superficies de los objetos, compararemos el comportamiento térmico de la cubierta de metal en función de las temperaturas que alcanzan sus diferentes componentes dispuestos para oponerse al flujo de calor.

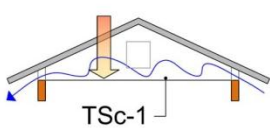
En primera instancia se busca la temperatura superficial de la chapa de zinc (TSz), como único componente de la solución constructiva más simple: la que no implica ningún otro tipo de protección ni aislamiento y que llamemos Caso 1:

CASO 1 TRANSMISIÓN DE CALOR DIRECTA CUBIERTA DE ZINC SIN CAMARA INTERIOR  (TSz Temperatura Superficial de la chapa de zinc)	TIPO DE CUBIERTA CHAPAS DE ACERO GALVANIZADAS (Se considera un galvanizado en caliente) - ACERO - ZINC	CARACTERISTICAS TÉRMICAS				
		MATERIAL				CUBIERTA
		Superficie (mt)	Espesor (mm)	Absortividad α	Conductividad λ (W/m.°C)	Transmitancia U (W/m ² .°C)
		12	1.4968	--	60	6.06
		12	0.0032	0.74	110	
				Se considera una superficie oxidada		

Luego de establecido el primer caso, se incorpora una capa aislante debajo de la chapa metálica para determinar la temperatura superficial resultante que alcanza en la cara de la capa de aislante expuesta al interior de la vivienda (TSa).

CASO 2 TRANSMISIÓN DE CALOR CON AISLANTE BAJO CUBIERTA  (TSa Temperatura Superficial del aislante en la cara en contacto con la habitación)	COMPONENTES DE LA CUBIERTA 1- ACERO GALVANIZADO 2- CAPA DE LANA MINERAL	CARACTERISTICAS TÉRMICAS			
		MATERIAL			CUBIERTA
		Superficie (mt)	Espesor (m)	Conductividad λ (W/m.°C)	Transmitancia U (W/m ² .°C)
		12	0.0015	60 - 110	6.06
		12	0.030	0.06	1.40

A continuación se evaluará la solución de agregar ventilación bajo techo, es decir, cuando existe una cámara ventilada comprendida debajo de las pendientes de la cubierta (sin aislante) y el forjado horizontal inferior o cielorraso en contraposición al caso de tener una cámara no ventilada. En ambas situaciones (ventilada – no ventilada), determinaremos la temperatura superficial sobre el cielorraso (TSc-1).

CASO 3 TRANSMISIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE CÁMARA DE AIRE	COMPONENTES DE LA CUBIERTA	CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS			
		MATERIAL			CUBIERTA
		Superficie (mt)	Espesor (m)	Conductividad λ (W/m.°C)	Transmitancia U (W/m ² .°C)
 <p>1 - NO VENTILADA</p> <p>TSc-1</p>	ACERO GALVANIZADO	12	0.0015	60 - 110	6.06
	1 - CÁMARA NO VENTILADA	Resistencia térmica de la cámara no ventilada en situación horizontal con flujo descendente, para espesores mayores de 150 mm: 0.24 m ² .°C/W. (NBT-CT-79)			
 <p>2 - VENTILADA</p> <p>TSc-1</p> <p>(TSc-1 Temperatura Superficial sobre del cielorraso)</p>	2 - CÁMARA VENTILADA	La resistencia total del cerramiento se obtendrá despreciando la resistencia térmica de la cámara de aire y de los demás cerramientos entre la cámara y el exterior e incluyendo una resistencia superficial exterior (he) correspondiente al aire en calma, igual a la resistencia superficial interior (hi).			

Finalmente, luego que el flujo de calor atraviesa el forjado horizontal, se compararan las temperaturas superficiales resultantes en la cara del material en contacto con la habitación (TSc-2), esto según diferentes opciones de materiales en este componente de la cámara, la cual supondremos que se encuentra ventilada. Para esto, nos concentraremos en cuatro soluciones. El panel de madera ligera por ser el más tradicional y extendido, los paneles de cartón yeso como segunda opción popular y los paneles de fibra de coco y de cascara de maní como opciones experimentales.

CASO 4 TRANSMISIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE LA CÁMARA Y CIELORRASO	COMPONENTES DE LA CUBIERTA	CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS			
		MATERIAL			CUBIERTA
		Superficie (mt)	Espesor (m)	Conductividad λ (W/m.°C)	Transmitancia U (W/m ² .°C)
 <p>TSc-2</p> <p>(TSc-2 Temperatura Superficial del cielorraso en la cara en contacto con la habitación)</p>	ACERO GALVANIZADO	12	0.0015	60 - 110	6.06
	2 - MADERA LIGERA	12	0.025	0.14	2.51
	2.1 - CARTÓN YESO	12	0.020	0.16	2.30
	2.3 - FIBRA DE COCO	12	0.045	0.10	1.27
	2.4 - CASCARA DE MANÍ	12	0.045	0.11	1.33

4.3 Metodología de cálculo

El método consiste en calcular el valor medio de la temperatura superficial interior debajo de la cubierta metálica para unas condiciones determinadas de clima exterior y de la propia cubierta como su orientación, inclinación, suponiendo que todas las acciones son constantes en el tiempo, y con esto verificar la eficiencia térmica de las diferentes estrategias para moderar el calor en función del efecto que tienen sobre el confort interior de las viviendas. Como mencionamos anteriormente, escogemos las siguientes condicionantes para nuestra simulación:

- En todos los casos que analizaremos, salvo el que exceptuemos, la temperatura en el interior de la habitación así como al interior de la cámara, es igual que la temperatura exterior considerando que el espacio se encuentra bien ventilado.
- El escenario climático es el de un día típico, con temperaturas, radiación y humedad relativa medias por hora.
- Dos diferentes inclinaciones de la cubierta (15° y 30°).
- Diferentes estados superficiales cubierta en función de la absortividad de su superficie: muy pulida (chapa nueva), oxidada (chapa envejecida) y chapa recubierta con pintura de anti-oxido color rojo y color blanco brillante.

Para verificar los casos de transmisión de calor, partimos de la ley de conservación de energía que nos dice, que el flujo de calor que ingresa en forma de radiación solar a través de la cubierta, ha de ser igual al flujo de calor que será reemitido por el material hacia el ambiente.

CASO 1: Se trata de una transmisión de calor a través de una capa de metal de alta conductividad térmica y con un espesor muy delgado (ver tabla caso-1 apartado 4.5) donde además no tenemos diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior. Por tanto, pierde relevancia el fenómeno conductivo para pasar a ser un caso de transferencia de calor combinado casi enteramente entre convección y radiación.

Como explicamos, siendo que la chapa de metal tiene tan poca masa y por ende tan poca inercia térmica, la cantidad de calor que puede retener es muy pequeña en comparación con la energía que ingresa en forma de radiación solar. Por tanto, esta energía calórica es rápidamente reemitida al ambiente al no encontrar una resistencia importante por parte del material. Una parte de esta energía será conducida nuevamente al exterior, en mayor o menor medida, por un coeficiente convectivo superficiales exterior (h_e). Al tiempo que otra parte del calor es conducida hacia la vivienda por un coeficiente convectivo superficiales interior (h_i), (ver tabla 5, capítulo III).

Estos conceptos podemos expresarlos en la siguiente ecuación:

$$\underbrace{S \cdot I \cdot \alpha}_{\text{Flujo de calor absorbido}} = \underbrace{S \cdot h_e (T_1 - T_a)}_{\text{Flujo de calor hacia el exterior}} + \underbrace{S \cdot h_i (T_1 - T_a)}_{\text{Flujo de calor hacia el interior}} \quad (1)$$

Donde:

S = Superficie en metros

I = Radiación solar (W/m^2)

α = absorptividad de la superficie, un numero adimensional.

h_e = coeficiente de convección superficial exterior ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

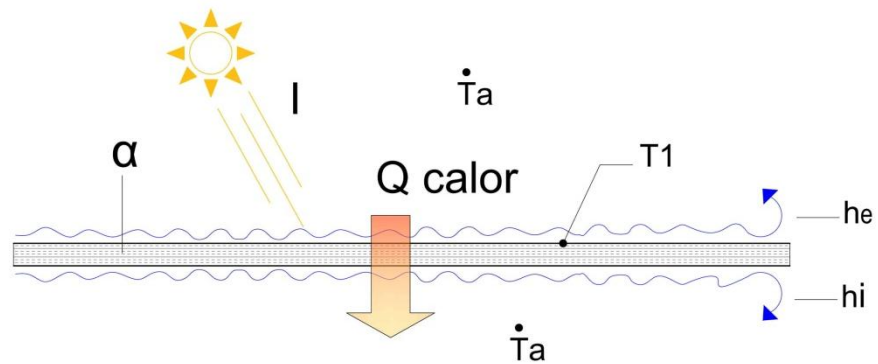
h_i = coeficiente de convección superficial interior ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

$(T_1 - T_a)$ = diferencia de temperatura entre la superficie de cubierta y la temperatura del ambiente.

La temperatura de la cubierta de chapa de metal al tener tan poca inercia térmica, o poca masa donde acumular el calor se suponemos igual en todas sus superficies.

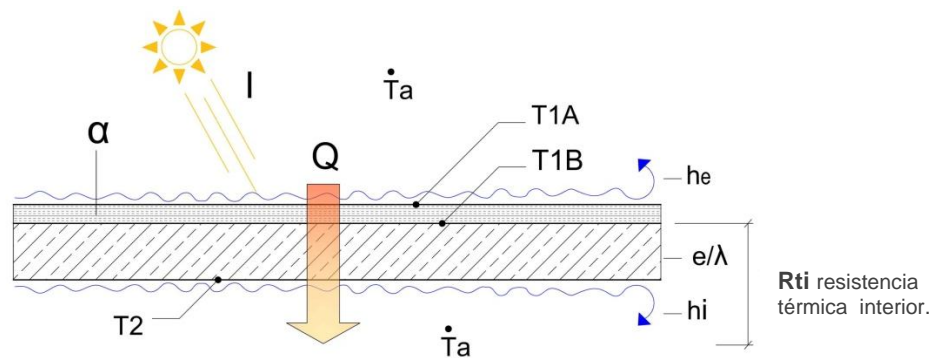
Como explicáramos en el capítulo II, la absorptividad es una característica de la superficie y su valor para este caso ha sido fijado en 0.74, considerando una cubierta oxidada (ver tabla 3).

Los coeficientes de convección expresan la oposición del aire sobre la superficie, estos datos se encuentran especificados en tablas para simplificar los cálculos, pues resulta compleja su obtención ya que dependen de una gran cantidad de variables. (Ver tabla 5).



De esta manera obtenemos la diferencia de temperaturas entre $T1$ y Ta , que sumada a (Ta) será la temperatura superficial de la cubierta, que por ser muy delgada (1.5 mm) es casi despreciable la diferencia entre T superficial exterior y T superficial interior y por tanto se considera como una única temperatura.

CASO 2: Hasta ahora hemos calculado la temperatura superficial en elementos con espesores despreciables donde el paso del calor se realiza prácticamente de manera directa. Pero en el caso de colocar una capa aislante debajo de la chapa metálica, el flujo de calor absorbido por la chapa de zinc deberá enfrentar en su paso hasta el interior de la vivienda la resistencia térmica interior (R_{ti}), que es igual a la resistencia del material aislante (e/λ), más la resistencia superficial de la capa convectiva interior ($1/h_i$), esta última no es más que la inversa de (h_i), la cual representaba en el caso anterior lo contrario, la cantidad de calor por unidad de superficie que el sólido entrega al aire por la diferencia de temperatura.



$$S \cdot I \cdot \alpha = 1/R_{ti} \cdot (T1B - Ta) + S \cdot h_e (T1B - Ta) \quad (2)$$

$$R_{ti} = R_{t_{material}} + r_{si} = \frac{e}{\lambda \cdot S} + \frac{1}{h_{i \cdot S}}$$

Donde:

R_{ti} = resistencia térmica ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

r_{si} = resistencia superficial interior ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

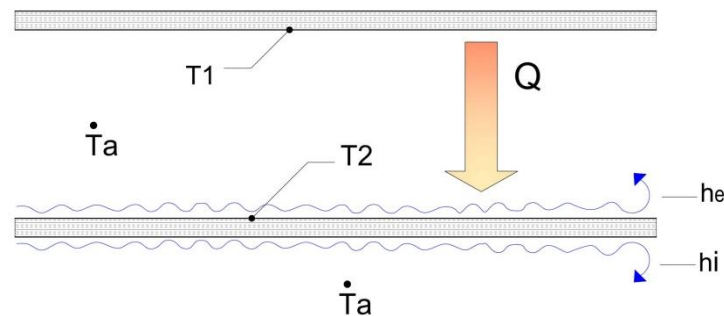
e = espesor del cerramiento (m)

λ = Conductividad del material ($W/m \cdot ^\circ C$)

Determinada la incógnita ($T_{1B} - T_a$), se puede encontrar T_2 de la siguiente manera:

$$(T_2 - T_a) * \frac{1}{h_{i \cdot S}} = \frac{1}{R_t} * (T_{1B} - T_a) \quad (3)$$

CASO 3: En otro caso de transmisión de calor, conociendo la temperatura de la cubierta (T_1), se procede a determinar cuanto de su calor es irradiado a través de la cámara hasta el forjado horizontal o cielorraso, hasta elevar la temperatura de su superficie, (T_2).



Se trata de una transmisión de calor combinada entre convección y radiación, que es típica en el interior de una cámara de aire que se supone ventilada y el aire en su interior es igual a T_a . Donde la energía calórica que viaja por radiación desde la cubierta con una temperatura superficial T_1 , supone la ganancia de calor dentro de este sistema y las componentes convectivas ($h_e + h_i$) determinan cuanta de este calor es disipado por el aire.

Este caso se puede establecer a partir de la ecuación de transmisión calor por radiación entre dos cuerpos.

$$Q = \sigma \cdot S (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

Donde σ es la constante de Stefan Boltzmann y es igual a $5.67 \cdot 10^{-8}$ (W/(m².K⁴)).

Si T1 es cercana a T2, la expresión anterior puede aproximarse por:

$$Q = \sigma \cdot S \cdot 4 \cdot T^3 (T_1 - T_2) \quad (5)$$

Siendo T la temperatura media entre T1 y T2 (en grados K) y que desconocemos, pero que podemos aproximar para tener menos incógnitas, tomando la temperatura conocida (T1 que ya hemos encontrado) y restándole tres grados (si T2 es inferior), o sumándole (si T2 es superior). A continuación con esta T (elevada al cubo en la ecuación) se despeja la otra temperatura.

Es importante aclarar que si la diferencia de temperaturas entre T1 y T2 fuera muy grande, esta aproximación no sería aplicable.

En esta ecuación se reemplaza la radiación solar sustituyendo (1) en (5) y tenemos:

$$T_2 \text{ ventilada} = \sigma \cdot S \cdot 4 \cdot T^3 (T_1 - T_2) = S \cdot h_e (T_2 - T_a) + S \cdot h_i (T_2 - T_a) \quad (6)$$

Donde, $[\sigma \cdot S \cdot 4 \cdot T^3 (T_1 - T_2)]$ es la ganancia de calor por radiación.

Y las pérdidas a cargo de las componentes convectivas: $[S \cdot h_e (T_2 - T_a) + S \cdot h_i (T_2 - T_a)]$

De esta manera queda determinar la temperatura superficial sobre el forjado horizontal (T2) cuando la cámara está muy ventilada.

En una situación donde la cámara sea estanca o débilmente ventilada el aire está en reposo y determinamos la transferencia de calor considerando toda la cubierta, es decir, la chapa de zinc y la propia cámara de aire estanca (no importa su temperatura) como un único elemento con

una resistencia térmica al flujo de calor. Este caso lo podemos resolver de la misma manera que el caso 2:

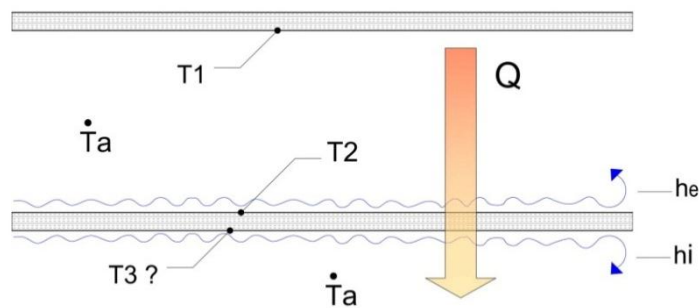
$$T2 \text{ sin ventilar} = S \cdot I \cdot \alpha = 1/Rt (T2 - Ta) + S \cdot he (T2 - Ta) \quad (2)$$

$$Rt = Rt_{\text{cámara}} + \frac{e}{\lambda \cdot S} + rsi$$

Donde,

$Rt_{\text{cámara}} = 0.24 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C/W)}$ según tablas para resistencias térmicas de cámaras de la Norma Básica de Edificaciones CT-79

CASO 4: Llegado a este punto, necesitaríamos conocer la temperatura superficial en la cara del cielorraso en contacto con la habitación ($T3$), que también hemos llamado (TSc):



Siendo que la capa del cielorraso posee un espesor determinante para el cálculo, su resistencia interna debe quedar contenida en la ecuación de la siguiente manera. Sustituyendo (3) en (7) tenemos:

$$\sigma \cdot S \cdot 4 \cdot T^3 (T2 - T3) = 1/Rti \cdot (T3 - Ta) + S \cdot he (T3 - Ta) \quad (7)$$

En este último ejercicio esperamos determinar la influencia de la resistencia térmica de la capa del cielorraso como última barrera al paso del calor a través de una cámara ventilada.

Teniendo finalmente las temperaturas superficiales del cielorraso en contacto con la habitación ($TSc-2$), podemos proceder a determinar como afectan estas temperaturas al confort térmico según la Temperatura de sensación resultante.

VERIFICACIÓN DEL CONFORT: La temperatura de sensación o temperatura equivalente, es la sensación térmica aparente que experimentan las personas en función de parámetros como, la humedad relativa, la velocidad del aire, además de la temperatura de las superficies. Estos parámetros, se combinan para determinar las condiciones higrotérmicas del ambiente en el que se encuentran.

La siguiente fórmula de temperatura de sensación es la utilizada por el programa "Archisun" desarrollada para la Unión Europea y latitudes entre 35 y 60°N, pero adaptada para clima cálido húmedo.

$$T_{sen} = 0.6T_a + 0.4T_r + 2.85 \ln(v + 1) \cdot th\left(\frac{T_a - 37.5}{5}\right) + 2Sgn(0.75 - HR) \cdot th\left(\frac{24 - T_a}{4}\right) th\left(\frac{HR - 0.75}{0.20}\right)$$

Donde:

T_{sen} = Temperatura de sensación

T_a = Temperatura del aire

T_r = Temperatura radiante (temperatura superficial media de las superficies por m²)

v = velocidad del aire (m/s)

HR = Humedad relativa

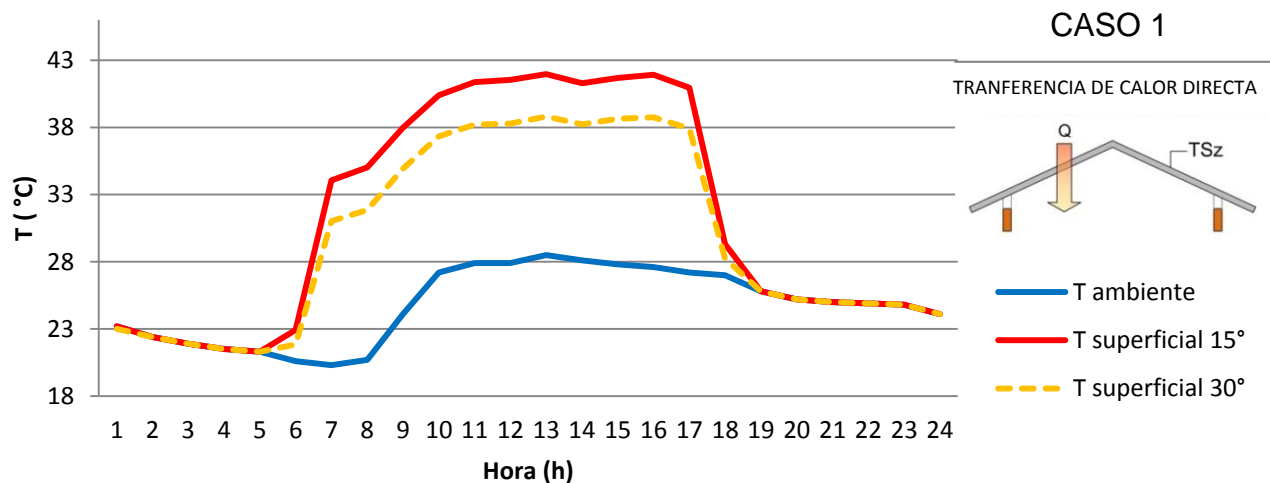
En esta fórmula, así como en muchas otras fórmulas de temperatura "equivalente", el promedio habitual se realiza entre temperatura del aire (T_a), que tiene una influencia próxima al 60% y entre la T_r con una influencia próxima al 40%.

El efecto en el confort térmico de nuestra cubierta lo determinaremos para unas condiciones interiores muy específicas, donde:

- La velocidad del aire es de 1 m/s.
- La temperatura radiante ha resultado de la media de las temperaturas superficiales de los cuatro cerramientos verticales y el suelo, multiplicado por el área de estos cerramientos, (ver Graf). Hemos asumido que estas temperaturas se encuentran ha temperatura ambiente, por tanto, solo la temperatura superficial del cielorraso en contacto con la habitación ha sido calculado previamente.

4.4 Presentación de resultados

En el gráfico 02 se muestran las temperaturas superficiales internas (TSz) de la cubierta orientada Este-Oeste, para un estado superficial oxidado y para cuando esta desprovista de la cámara ventilada y de cualquier tipo de material aislante (CASO 1). Recordando, que siendo la chapa de metal tan delgada (1.5 mm) estas temperaturas se consideran la misma para las capas exterior e interior.



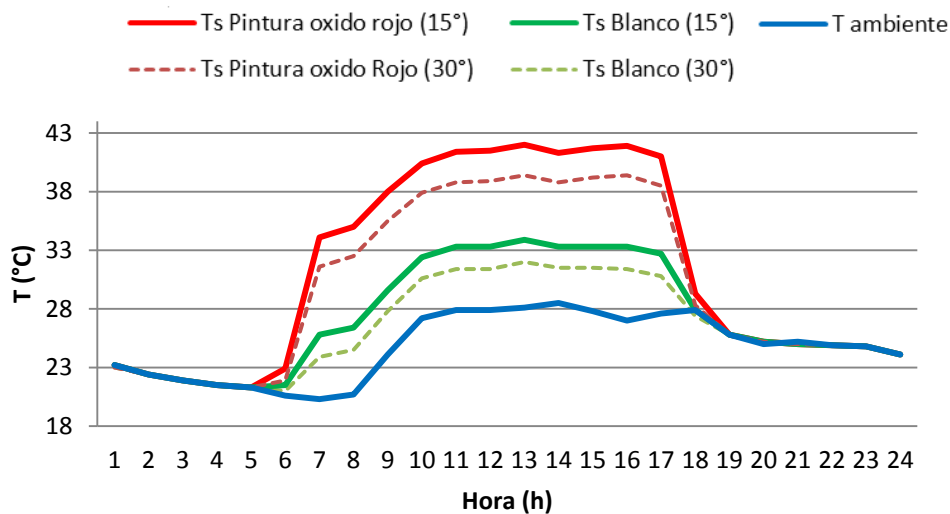
Graf. 02. Curva de temperaturas superficiales de la cubierta a ángulos de 15° y 30° respecto de la horizontal.

Se puede apreciar que la temperatura superficial del metal (TSz) alcanza la temperatura máxima de 42 °C en la hora más caliente del día, las 13:00 PM cuando se encuentra en la inclinación evidentemente mas desfavorable de 15° , en este mismo momento del día cuando la cubierta se encuentra inclinada a 30° la máxima temperatura superficial es de 38.8 °C. Esto representa una mejora de hasta 3 grados, quedando demostrado que la captación extra, producto de doblar el ángulo de inclinación tiene un impacto en el comportamiento térmico del material y es de suponer que seria mayor mientras más cerca de la horizontal se encuentre.

A continuación analizamos otra importante relación entre las propiedades de la superficie con la transmisión de calor. Esta vez la absorptividad de la cubierta.

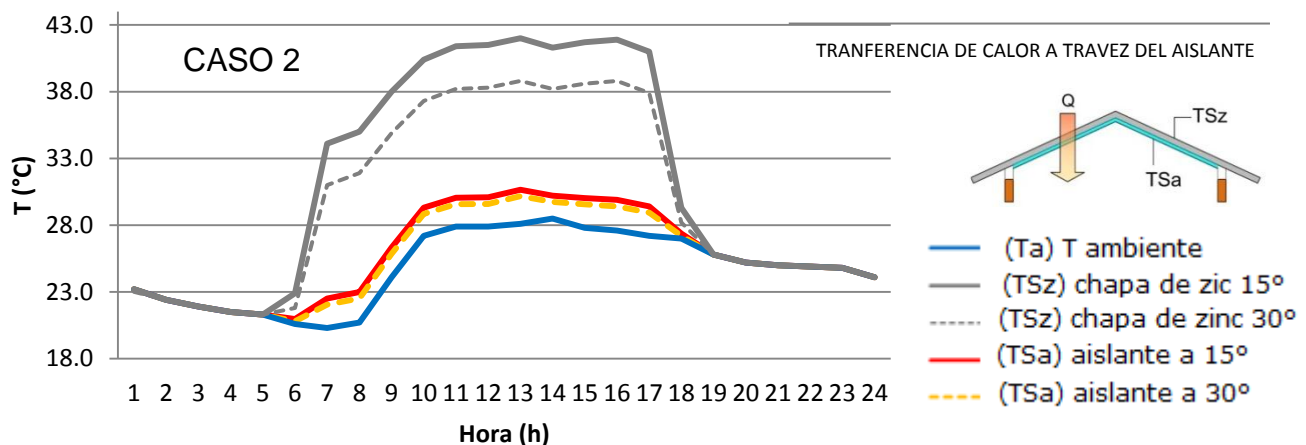
Como explicáramos en el capítulo III, al envejecer y oxidarse la chapa de zinc aumenta su absorción del calor desmejorando su desempeño térmico (ver tabla 10, Cap. III). Comúnmente

para evitar la corrosión los techos de zinc dominicanos son revestidos con pintura de óxido rojo que tiene una absorptividad de 0.78 (tablas de IFA, CSIC). En el siguiente gráfico se aprecia como esta medida no representa una mejora en términos de transmisión de calor en relación la opción de un recubrimiento con pintura anti óxido blanco brillante que tiene una absorptividad 0.25 y que si sería la mejor manera de alargar la vida útil de las chapas.



Graf. 03. Relación de temperaturas superficiales según estado de la cubierta.

Verificada la ineficiencia de las chapas de zinc por si sola en la oposición del calor, aun haciendo uso del mejor estado superficial blanco brillante, se procede a presentar los resultados para cuando se puede proveer de una capa aislante debajo de las chapas.

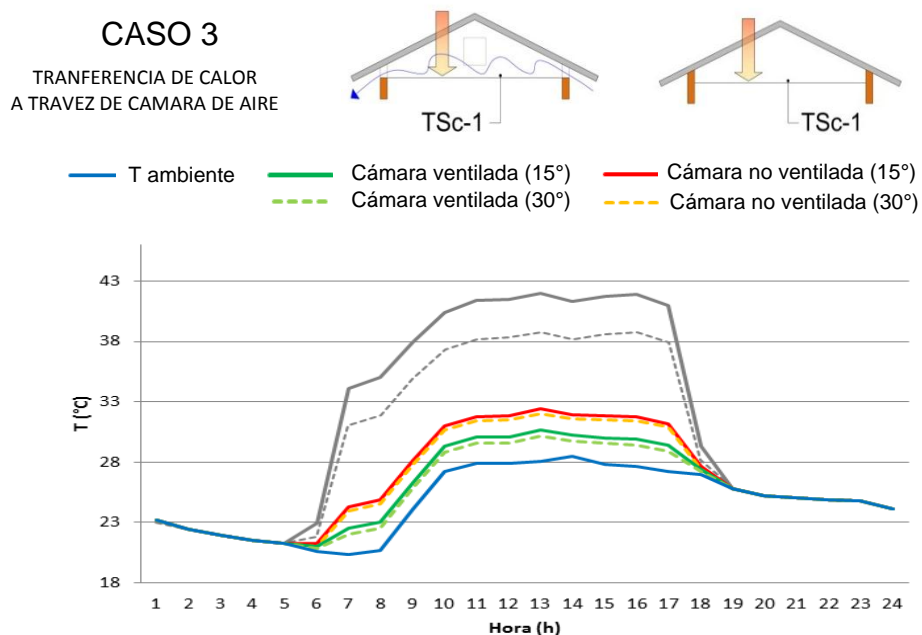


Graf. 04. Temperaturas superficiales de la cubierta con y sin capa aislante.

Al colocar una capa de 3 cm de lana mineral se puede pasar de temperaturas superficiales de más de 40 °C en la chapa de zinc (TSz), a temperaturas superficiales después de atravesar el aislante (TSa) de 29 °C (Graf.03). En este caso la transmisión por conducción a través del aislante significa una reducción de casi un 30% la temperatura superficial interior de la cubierta. Nótese además que la diferencia en TSa en relación con la inclinación de la cubierta ya no es tan pronunciada (1 grado) debido a la inercia del material.

Una de las desventajas de colocar aislante justo debajo de las chapas, es la estética. Los usuarios no recurrirán a esta estrategia si no se acompaña de un falso techo o cielorraso para cubrir de la vista el material apretado contra las chapas. Por los costes que supone la implementación de ambas soluciones, esto es muy poco común de encontrar en una vivienda rural dominicana. Es más usual la elección de solo el cielorraso.

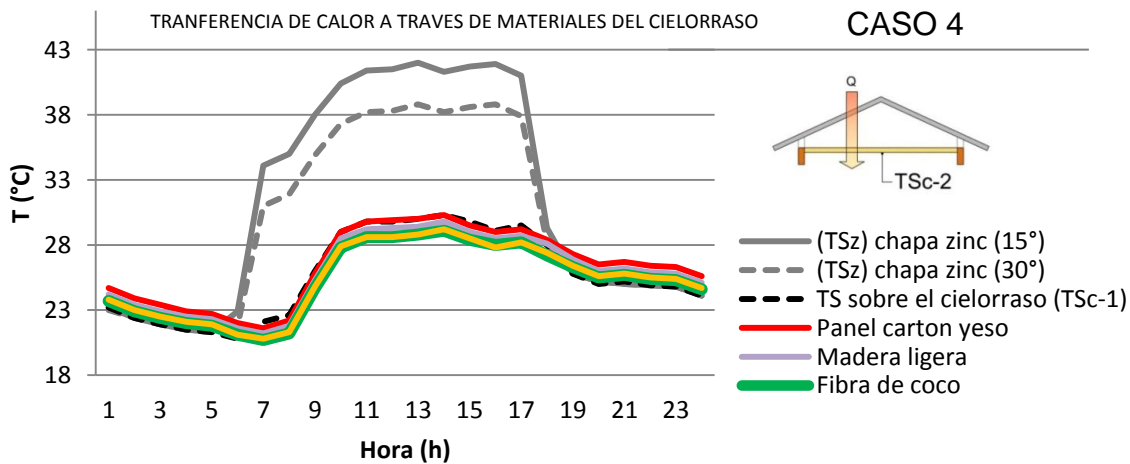
A continuación analizaremos el caso de incorpora una carama de aire y que efecto tiene que esta sea ventilada o no ventilada. Para esto compararemos la temperatura superficial resultante sobre el cielorraso en contacto con la cámara (TSc1), sola para verificar el efecto de la ventilación en la reducción de calor antes de que este atravesiese el material del cielorraso.



Graf. 05 -. Influencia de una cámara ventilada en la transmisión de calor.

En el gráfico 5 se observan la comparación de las curvas de temperaturas superficiales sobre el cielorraso (Tsc-1), cuando la cubierta tiene una cámara estanca y una cámara ventilada. La diferencia de las temperaturas promedio entre ambas situaciones de hasta más de 2 grados, haciéndose evidente que el solo hecho de poder incorporar la cámara significa una gran mejora al evitar que las temperaturas superficiales aumenten y por consiguiente la transmisión de calor sea mas elevada que en el caso de carecer de ella. Se observa además, que al igual que el caso 2, donde teníamos una capa aislante debajo de las chapas, la diferencia de temperaturas entre tener una inclinación a 15° y 30°, ya no es tan marcada como en el caso de no tener ninguna capa aislante. Aquí la capa de aire, estanca o en movimiento, regula esta diferencia según la inclinación de la misma manera.

El tipo de forjado horizontal es otra componente que debe tener algún efecto según sean las características terminas de su material y su espesor, intentemos analizar esto en el siguiente análisis tomando en cuenta que la cámara esta muy ventilada.



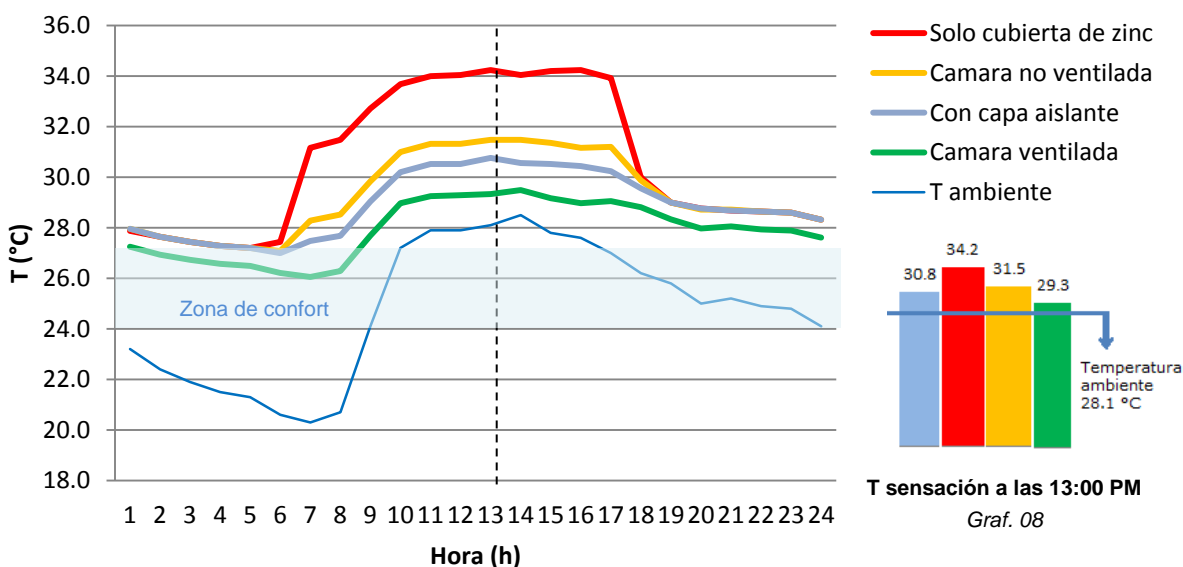
Graf. 06 -. Comparación temperaturas superficiales de los diferentes cielorrasos. (Cubierta inclinada 30°)

Cuando simulamos las temperaturas superficiales debajo del cielorraso (TSc-2) dentro de una cámara muy ventilada, se aprecia como las diferentes opciones se mantienen por debajo de los 30°C. Las cuatro opciones tienen buenas resistencias al paso de calor, pero es evidente que las soluciones de fibras vegetales son un poco más efectivas, probablemente por contener más aire incorporado en su masa por ser más porosa que los paneles delgados de madera contrachapada y los paneles de yeso perforado. Sin embargo cabe resaltar que estas ligeras mejoras en función de los materiales del forjado horizontal son casi despreciables en

comparación con el caso anterior de incluir una cámara ventilada. En este sentido, siempre que se pueda contar con la ventilación, la decisión de seleccionar alguna de estas opciones recaerá más que nada en consideraciones económicas y/o ambientales.

4.5 Afecto en el confort térmico de los diferentes casos analizados

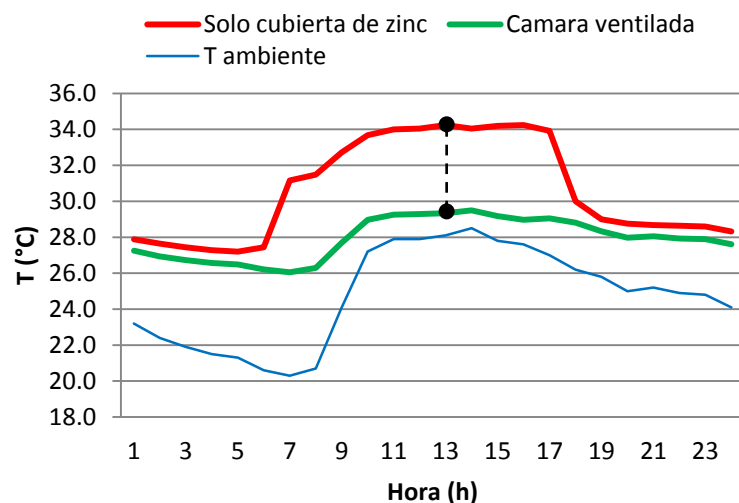
A continuación estudiaremos como afecta la temperatura de sensación del usuario las diferentes temperaturas superficiales de cada caso. Recordando que se trata de una cubierta con un estado superficial envejecido y oxidado, para simular una situación desfavorable y habitual en las viviendas con techo de zinc dominicana. La inclinación asumida es de 30° sobre la horizontal.



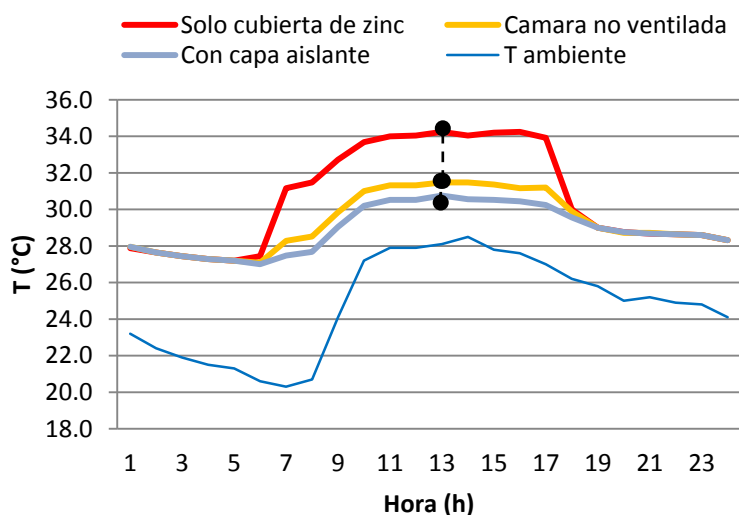
Graf. 07 -. Comparación temperaturas de sensación resultantes (cubierta inclinada 30°)

En primera lectura se destaca que sin importar la estrategia utilizada para mitigar el paso de calor, la temperatura de sensación que experimenta el usuario nunca es menor que la temperatura ambiente. Como era de esperarse la situación de tener la cubierta de metal radiando calor directamente sobre la cabeza del usuario presenta los peores niveles de disconfort, llegando a propiciar temperaturas de sensación de hasta 34 grados a la hora de máximo calor, las 13 horas, (Graf. 08).

Si establecemos la zona de temperatura de confort para el clima entre 24 y 27°C pensando en el grado adaptativo de los usuarios, se observa como difícilmente la estrategia con mejor comportamiento térmico, la de la cámara muy ventilada, entra en esta zona más allá de las 8 AM. Sin embargo y considerando las elevadas temperaturas superficiales que puede alcanzar la chapa de zinc, son notorias de manera general las mejoras en términos de amortiguamiento del calor. Es interesante notar como la solución de aislar la cubierta con una capa de lana mineral colocada debajo de las chapas, acerca las temperaturas de sensación a las experimentadas si se tiene una cámara de aire estanca, sin ventilación y sin aislante. Sin embargo, ambas soluciones no son más eficientes térmicamente que el simple acto de ventilar mucho debajo de la cubierta.



Graf. 08 -. Relación confort con cámara ventilada. (30°)



Graf. 09 -. Relación confort entre cámara no ventilada y aislante. (30°)

En el grafico 8, se muestran la comparación de las temperaturas de sensación de la solución más desfavorable de tener solo la cubierta de zinc y la solución de poder contar con una cámara bien ventilada, le reporta al usuario una mejora de 5 grados en confort térmico a las 13:00 horas.

En tanto que la cámara no ventilada reduce la sensación de calor un poco menos de 3 grados. Entre tener una cámara no ventilada y un buen aislamiento de la cubierta con un material como la lana mineral, este último representa una ligera mejora en la temperatura de sensación de casi un grado, siempre y cuando la vivienda este bien diseñada para favorecer la ventilación cruzada.

Las mejoras de los materiales que analizamos en el cielorraso resultan marginales en comparación con las soluciones anteriores. Será más importante que el propio cielorraso este bien construido para que no permita filtraciones hacia la vivienda del aire caliente que esta conteniendo.

4.6 Conclusiones

Luego de realizado este estudio se enfatiza la necesidad de las estrategias de sub-cubiertas o cámaras de aire, cielorrasos o aislamientos térmicos para reducir la carga térmica entre el exterior y el interior de las edificaciones con cubiertas de chapas de acero galvanizado en los climas cálido húmedo.

Terminar afirmando que la solución de incorporar una cámara ventilada es la más efectiva para evitar que la temperatura superficial del cielorraso se eleve demasiado afectando así la temperatura de sensación que experimentarían los usuarios al interior de la vivienda. Las cámaras de aire pueden ser ventiladas o no ventiladas; las que funcionan mejor son las ventiladas, debido a que eliminan por convección las ganancias de calor rápidamente hacia el exterior.

La utilización de materiales aislantes contribuirán bastante a reducir el calor que ingresara a la cámara, pero esta medida resulta mas costosa que solo ventilar la cámara, por tanto es solo otra manera de justificar su aplicación. Si no es posible ventilar la cubierta o solo ventilarla pobremente, las capas aislantes entonces serian una solución casi obligada.

Entre otras varias conclusiones, los resultados indicaron que los valores obtenidos para cuando la cubierta esta desprovista de la cámara de aire (ventilada o no ventilada) así como de cualquier tipo de material aislante, presentaron, en la mayor parte del día, temperaturas superficiales internas (TSz) se encuentran por encima de los 40°C, lo que se traduce en estrés térmico por acción del calor.

Como primera medida para contrarrestar esta desventaja de la rápida conducción del calor de las chapas metálicas, será importante mantener coeficientes de absorción (α) bajos en la

superficie de la chapas. Superficies muy reflectivas como las pulidas y blancas rechazan mas radiación solar evitando que sea absorbida antes de ser transmitida al interior. La medida de proteger el techo con pintura de oxido rojo no representa ninguna mejora en este sentido, muy por el contrario es contraproducente. Por consiguiente se recomienda, una vez envejecida la chapa remplazarla o utilizar un recubrimiento de pintura anti oxido color blanco.

La inclinación de la cubierta también prueba ser un factor importante. Ángulos de 30° son más eficiente para evadir la incidencia de la radiación solar directa durante más horas al día que un plano inclinado a 15° por estar este ultimo más cerca de la horizontal. Sin embargo, se requeriría de un estudio más especializado en la geometría, que incluya además de la temperatura superficial de la cubierta, el factor visión de usuario y ángulos solidos, para obtener resultados más completos.

El tipo de cielorraso también contribuye según sea el tipo de material con que se construya. Los materiales orgánicos de buena resistencia térmica son una excelente alternativa no solo por su baja conductancia térmica, sino además por razones ecológicas. Sin embargo, más que los materiales del cielorraso, se comprueba que la cámara de aire en si misma es más importante, sobre todo si esta muy ventilada.

4.7 Referencias bibliográficas

Argüello Ricardo y Gatani, Mariana (2009) "Placas de cielorraso realizadas con cascara de mani"
http://www.ave.org.ar/placas_de_cielorraso.pdf

Barrios G., Elias P., Huelz G., Rojas J. (2010) "Selección de los materiales de muros y techos para mejorar el confort térmico en edificaciones no climatizadas". Estudios Sobre Arquitectura y Urbanismo del Desierto. Volumen III. Numero 3. Octubre 2010.

Guimarães Merçon, Mariana, (2008) "Confort Térmico y Tipología Arquitectónica en Clima Cálido-Húmedo: Análisis térmico de la cubierta ventilada." Tesina Master Arquitectura, Energía y Medio Ambiente, UPC, Barcelona, 2011.

Koenigsberger, Otto y Lyon, Robert. (1965) *Roofs in the Warm Humid Tropics*, London: The Architectural Association.

Martin Monroy, Manuel. (1995) "Comportamiento térmico de los cerramientos soleados" Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas, Gran Canaria.

Krabe Chitrekha, (2010) "A new thermal performance index for dwelling roofs in the warm humid tropics", *Energy and Buildings* 45: 727–738.

ONE (2010), "Panorama Estadístico". Boletín informativo, AÑO 3, N°32. Oficina Nacional de Estadísticas. Santo Domingo, República Dominicana.

Prieto, Esteban, (2010) "Arquitectura vernácula y popular dominicana", Ediciones Banco Popular. Santo Domingo, República Dominicana.

M. D’Orazio, Di Perna, E. Di Giuseppe, (2010), "Bringing simulation to implementation: presentation of a global approach in the design of passive solar buildings under humid tropical climates" *Energy and Buildings* Volume 42, Issue 10.

Sosa, Maria E. y Siem, Geovanni, (2004), "Manual de diseño para edificaciones energéticamente eficientes en el trópico", IDE, Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción. Caracas, Venezuela.

Stagno, B. (2007), "La creatividad en el techo bioclimático tropical". Instituto de Arquitectura Tropical, Fundación Príncipe Claus para la cultura y desarrollo. San José, Costa Rica.