

“ANÁLISIS MEDIANTE CFD DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEJA CERÁMICA CON ESTRUCTURA CELULAR”

¹ Zapata Lobo, M.A.*; ² González Cortina, M.

¹ Arquitecto Técnico / Ingeniero de Edificación. Máster en Técnicas y Sistemas de Edificación.

² Doctor Arquitecto y Arquitecto Técnico.

Departamento de construcciones arquitectónicas y su control – Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica - Universidad Politécnica de Madrid (España)
Avda. Juan de Herrera, 6 - 28040 Madrid
e-mail: mazapatal@hotmail.com

RESUMEN

Se analiza el comportamiento del producto comercializado como «TEDUR 5», y que denominaremos «TEC», acrónimo de “Teja de Estructura Celular” frente a distintas alternativas de caracterización física mediante la aplicación de CFD.

El sistema consta de tres principios de trabajo para que el calor no llegue a la base de la teja y se transmita al soporte:

- Gran superficie de contacto con el aire.
- Gran volumen de aire en su interior.
- Gran capacidad de flujo de aire.

El fabricante expone, que con idéntica incidencia solar en dos sistemas constructivos iguales, con dos productos distintos (teja cerámica mixta y TEC), mientras el elemento superficial llega a los 70° C en ambos casos, la temperatura que se transmite al soporte de cubierta presenta un diferencial de 15° C a favor del TEC.

AITEMIN realizó un ensayo comparativo del comportamiento térmico entre la teja cerámica mixta y TEC, donde se observó ciertas circunstancias que nos hace plantearnos el verdadero comportamiento del sistema al poner de manifiesto, que la cámara de ventilación enfría la superficie inferior de la teja, mejorando el comportamiento en climas extremos, sin embargo, no mejora sustancialmente la parte de edificio bajo cubierta, debido probablemente a la transmisión a través de los nervios de la teja y no llegando a las expectativas manifestadas por el fabricante.

Se plantea el diseño de un modelo mediante software CFD que reproduce el ensayo de los módulos de experimentación. Los resultados arrojados por este modelo en su simulación los utilizamos para validar el modelo matemático frente al ensayo de AITEMIN. Comprobada la validez del modelo, analizamos los resultados obtenidos, el comportamiento del sistema y estudiamos los puntos conflictivos que consideramos susceptibles de mejora para proponer alternativas, que se elaboran igualmente mediante software CFD, incorporando las variantes en la caracterización física al modelo inicial con parámetros y condiciones idénticas al primero para su posterior contraste.

Finalmente analizamos los resultados de las simulaciones de los nuevos modelos comparando su comportamiento con el modelo de referencia.

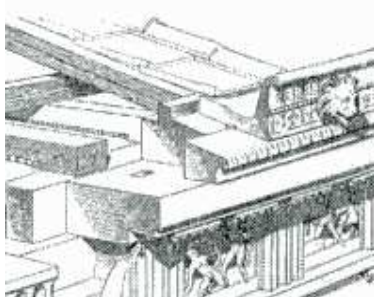
1.- Planteamiento y objetivo. Se plantea analizar el comportamiento del producto de CERATRES comercializado bajo el nombre «TEDUR 5», denominado “Teja cerámica con Estructura Celular” y al que nos referiremos con su acrónimo «TEC».

Como punto de partida, tomamos un ensayo comparativo del comportamiento térmico entre el bloque TEC y una teja mixta convencional, realizado por el centro tecnológico “AITEMIN” (Asociación para la Investigación y Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales) durante los meses de junio y julio de 2004 que utilizaremos como referencia.

Como objetivo, se pretende analizar el comportamiento del flujo convectivo del bloque TEC con distintas caracterizaciones de puesta en obra y cómo afecta a su comportamiento térmico.

Para este análisis, acudimos a programas de simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) que nos permiten una gran versatilidad para estudiar diversas alternativas, sin la necesidad de instalar módulos de experimentación, ni tener que esperar tiempos de ensayo. Estos programas están suficientemente testados como para considerarlos válidos para este tipo de trabajos.

2.- Evolución de la teja como elemento constructivo. La evolución del elemento constructivo para la cubrición ha sido patente en la historia. Desde sus orígenes como tal elemento, con grandes piezas de piedra en los templos griegos (fig. 1),



(fig. 1 “Cubrición con piezas pétreas de un templo griego”)

que evolucionaron por su gran coste y peso a elementos más económicos y livianos, dando lugar a las primeras piezas cerámicas de cubrición presumiblemente de origen romano (fig. 2),



(fig. 2 “Piezas cerámicas de origen romano”)

hasta llegar a una de las más extendidas en la actualidad, la teja denominada árabe (fig. 3) que recuerda los antiguos tejados orientales de bambú (fig. 4).



(fig. 3 “Teja árabe”)



(fig. 4 “Tejado de bambú”)

La evolución de este elemento constructivo no ha incorporado grandes novedades en su morfología. Los sistemas constructivos y su puesta en obra mediante los elementos de soporte, son los que han aportado alguna novedad o cambio para mejorar el comportamiento de la cubierta, por eso, consideramos que el bloque TEC (fig. 5) supone una notable modificación del elemento constructivo con suficiente relevancia como para considerarlo una evolución del elemento.



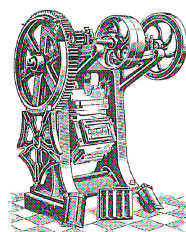
(fig. 5 “Bloque TEC”)

3.- Evolución del proceso de fabricación de la teja cerámica. La evolución en el proceso de fabricación ha sido mucho más relevante. El sistema artesanal (fig. 6) con herramientas como la gradilla y el galápago, con las que se conformaba la arcilla en las mesas de trabajo y largas jornadas de cocción, sufrió un salto exponencial a



(fig. 6 “herramientas y sistemas de la fabricación artesanal”)

principios del siglo XIX, con la revolución industrial, lo que supuso el comienzo de su producción en serie, con elementos como la prensa revolver (fig. 7) y que significó un relevante aumento, tanto del número de unidades de fabricación, como la calidad del producto final, lo que hizo de catalizador para su gran expansión.



(fig. 7 “Prensa revolver”)

Los procesos actuales de fabricación están completamente robotizados (fig. 8) y son controlados por sistemas informáticos que permiten una notable optimización en los procesos globales, haciendo grandes aportaciones en campos como el ahorro energético o el control de calidad (fig. 9) del producto final.



(fig. 8 “Proceso de fabricación robotizado”)

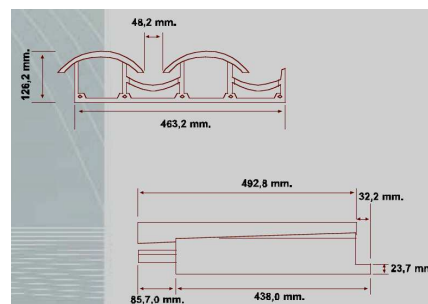


(fig. 9 “Control de calidad por laser”)

4.- (Antecedentes) Investigaciones afines. Diversos estudios abordan el comportamiento de las cubiertas, tanto desde el punto de vista higrotérmico [1], como del confort térmico [2], pero no se dispone de estudios que analicen el flujo convectivo entre las tejas cerámicas, y especialmente en el bloque TEC. Este aspecto es la aportación novedosa de este estudio. Igualmente se ha constatado el uso habitual del software CFD [3] como herramienta de análisis del comportamiento energético y medioambiental de los edificios [4].

El informe elaborado por AITEMIN [5], es el único documento que contiene datos específicos del comportamiento térmico del bloque TEC. Este informe ha sido analizado en detalle, tanto en su alcance y contenido, como en los resultados obtenidos, y ha servido de base para establecer las hipótesis de partida, validar el modelo teórico simulado y contrastar los resultados obtenidos.

5.- El bloque TEC y su filosofía de funcionamiento. El bloque presenta un formato (fig. 10) concebido para ser instalado mediante solapamientos longitudinales y transversales que consiguen una completa estanqueidad del faldón.



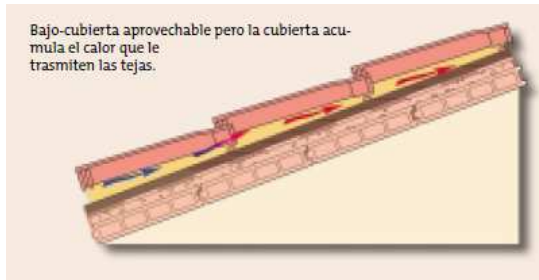
(fig. 10 “Formato del bloque TEC”)

El sistema consta de tres principios de trabajo, que buscan que el calor no llegue a la base de la teja:

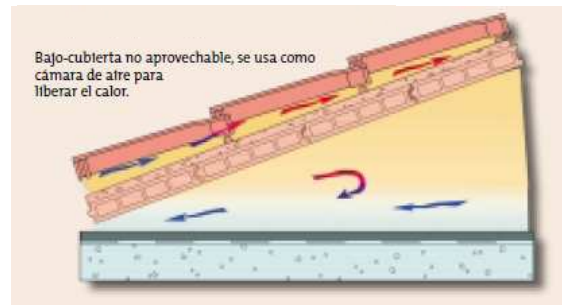
1. Gran superficie de contacto con el aire, hasta 6 m² de superficie por cada m² de tejado, gracias a los conductos internos de ventilación. (Una cubierta de teja cerámica curva convencional dispone de unos 2 m² de superficie por cada m²)
2. Gran volumen de aire en su interior, 2,5 m³ de sección por cada 100m² de tejado.
3. Gran capacidad de flujo de aire, que permite evacuar ese calor liberado.

“ANÁLISIS MEDIANTE CFD DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEJA CERÁMICA CON ESTRUCTURA CELULAR”

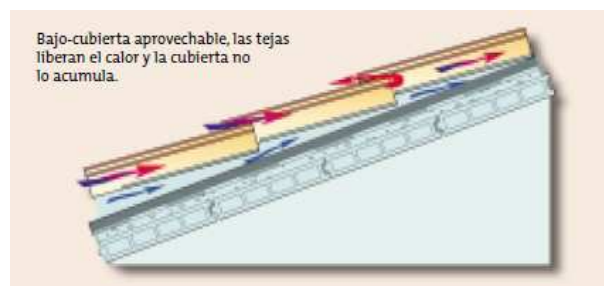
Con estas premisas se pretende obtener un sistema de cubrición que nos permita, que la morfología de una cubierta caliente (fig. 11) tenga el comportamiento de una cubierta fría (fig. 12) si necesidad de una cámara bajo cubierta, haciendo que los conductos bajo teja cumplan la función de esa cámara (fig. 13).



(fig. 11 “Sección de una cubierta caliente”)



(fig. 12 “Sección de una cubierta fría”)



(fig. 13 “Sección de una cubierta con bloque TEC”)

6.- Análisis del estudio comparativo de AITEMIN. Se comparó el bloque TEC frente a una teja mixta (fig. 14) ambos de material cerámico similar. Se construyeron unos módulos de experimentación (fig.15) de iguales dimensiones, con igual orientación y próximos entre sí, evitando la proyección de sobra de unos sobre otros, y se instaló en cada uno de ellos un faldón completo con cada uno de los dos materiales descritos, donde se instalaron termopares en distintas partes de cada uno de los módulos y se monitorizaron sus lecturas (fig. 16).

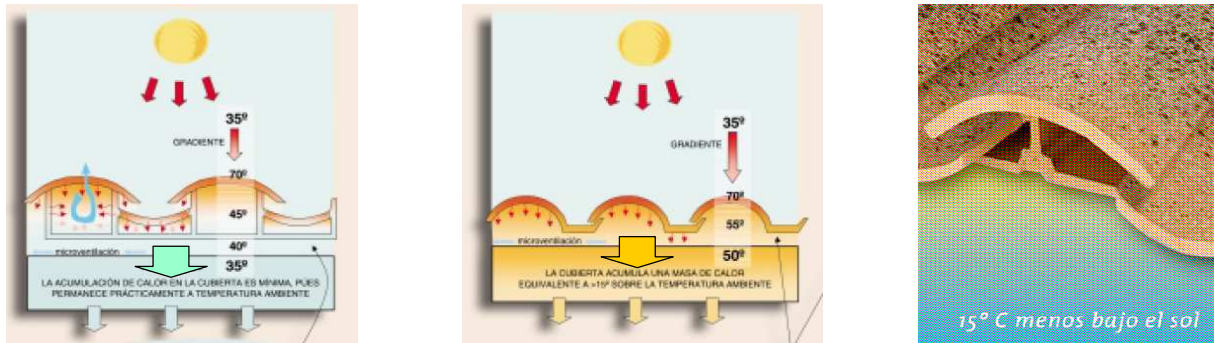


(fig.14 “TEC y teja mixta”) (fig.15 “Módulos de experimentación”) (fig.16 “Monitorización”)

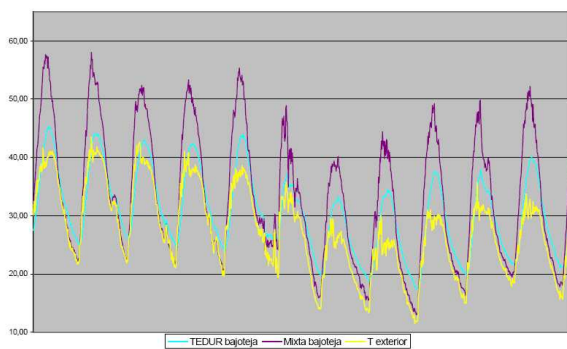
El ensayo se llevó a cabo en las instalaciones de AITEMIN (Toledo) durante el mes de junio de 2004, y como conclusiones más relevantes cabe destacar las siguientes:

1. En la superficie externa no hay diferencia de temperaturas.
2. En la cara inferior de la teja, se obtienen de 10 y 16° C menos en el bloque TEC.
3. En el interior de los módulos de experimentación, la temperatura ambiente es de 3 a 4° C inferior el que dispone del bloque TEC.

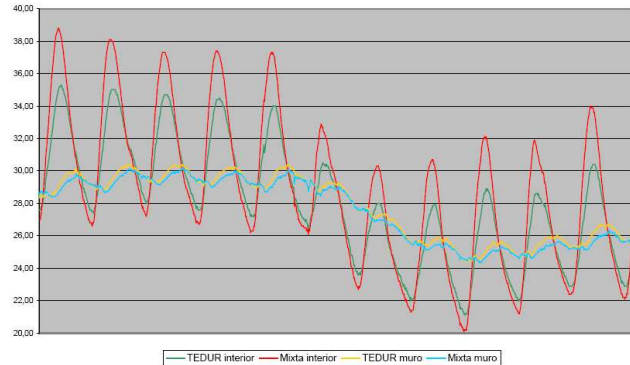
7.- Estudio del comportamiento térmico del bloque TEC. Conseguir una disminución de temperatura en el interior del módulo de experimentación con un elemento que no es un aislante térmico propiamente dicho, es un resultado notable, pero no es coherente con el comportamiento térmico teórico (fig. 17), ya que la temperatura que se obtiene en la cara inferior de la teja, como se observa en los ensayos realizados por AITEMIN, entre 10 y 16°C (fig. 18) sólo supone una disminución, entre 3 y 4°C en el interior de los módulos (fig. 19).



(fig. 17 “Información del catálogo TEDUR-5”)

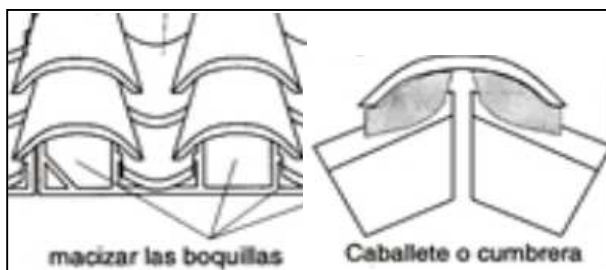


(fig. 18 “Comparativa de temperaturas bajo teja”)



(fig. 19 “Comparativa de temperaturas en el interior de los módulos”)

Esta diferencia del comportamiento térmico entre el esperado y el obtenido, hace que nos planteemos cual puede ser el motivo de este hecho. Por un lado, la cartilla de puesta en obra del fabricante (fig. 20), aconseja obturar la bocateja y la cumbre. Esto significa supeditar la ventilación de toda la cubierta a las separaciones intermedias entre tejas (fig. 21), lo que podría ser insuficiente.



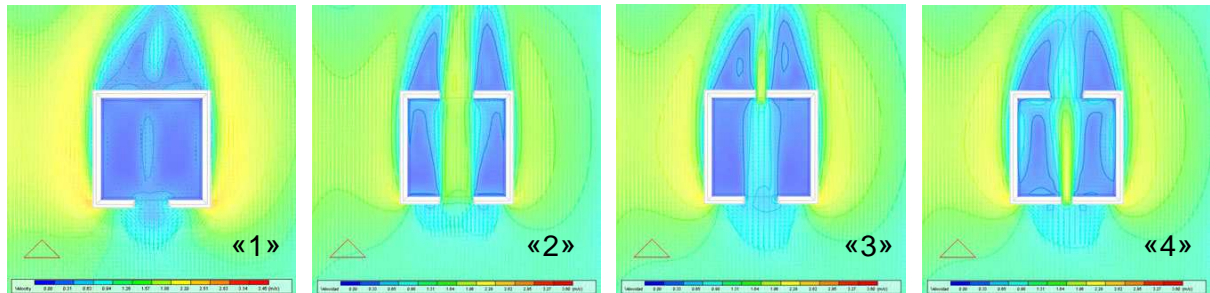
(fig. 20 “Cartilla de puesta en obra”)



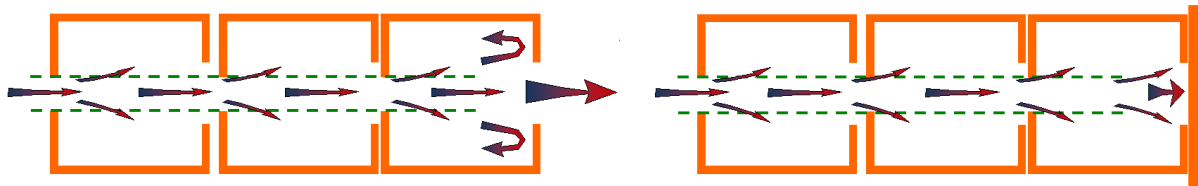
(fig. 21 “Separación entre elementos”)

Por otro lado, podemos intuir la diferencia del comportamiento del flujo convectivo en los conductos de ventilación, dependiendo de si la bocateja y/o cumbre están abiertas o cerradas, pero desconocemos su comportamiento real.

Cabe pensar, que puede mejorarse el flujo convectivo de los canales de ventilación si se condiciona la dimensión relativa entre la entrada y la salida de cada módulo, provocando un reflujo que refresca los elementos laterales (fig. 22 «4»), lo que se observa al analizar el trabajo sobre ventilación cruzada del portal “sol-arq” [6], pero al instalarse las piezas en línea, el resultado es un conducto continuo que sólo mejoraría en la última pieza de cumbre, donde precisamente hay menos posibilidades de disponer de una salida amplia (fig. 23).



(fig. 22 “Comportamiento del flujo según distintas configuraciones de entrada-salida”)



(fig. 23 “Resultado de instalar bloque con la caracterización óptima «4»”)

8.- Planteamiento del análisis. El estudio anterior nos orienta a examinar del flujo convectivo en el plano vertical (fig. 24).

Para ello realizamos los modelos simulando las dimensiones de los módulos de experimentación, de los que haremos tres variantes:

Modelo 1. Cumbre y bocateja cerrada (experimentación de AITEMIN)

Modelo 2. Bocateja abierta y cumbre cerrada

Modelo 3. Bocateja y cumbre abierta.

Se estudiará cada uno de los tres modelos en dos situaciones:

1. Convección natural “velocidad del viento 0 m/s”

2. Viento de 10 m/s (velocidad media de las rachas máximas) [7]

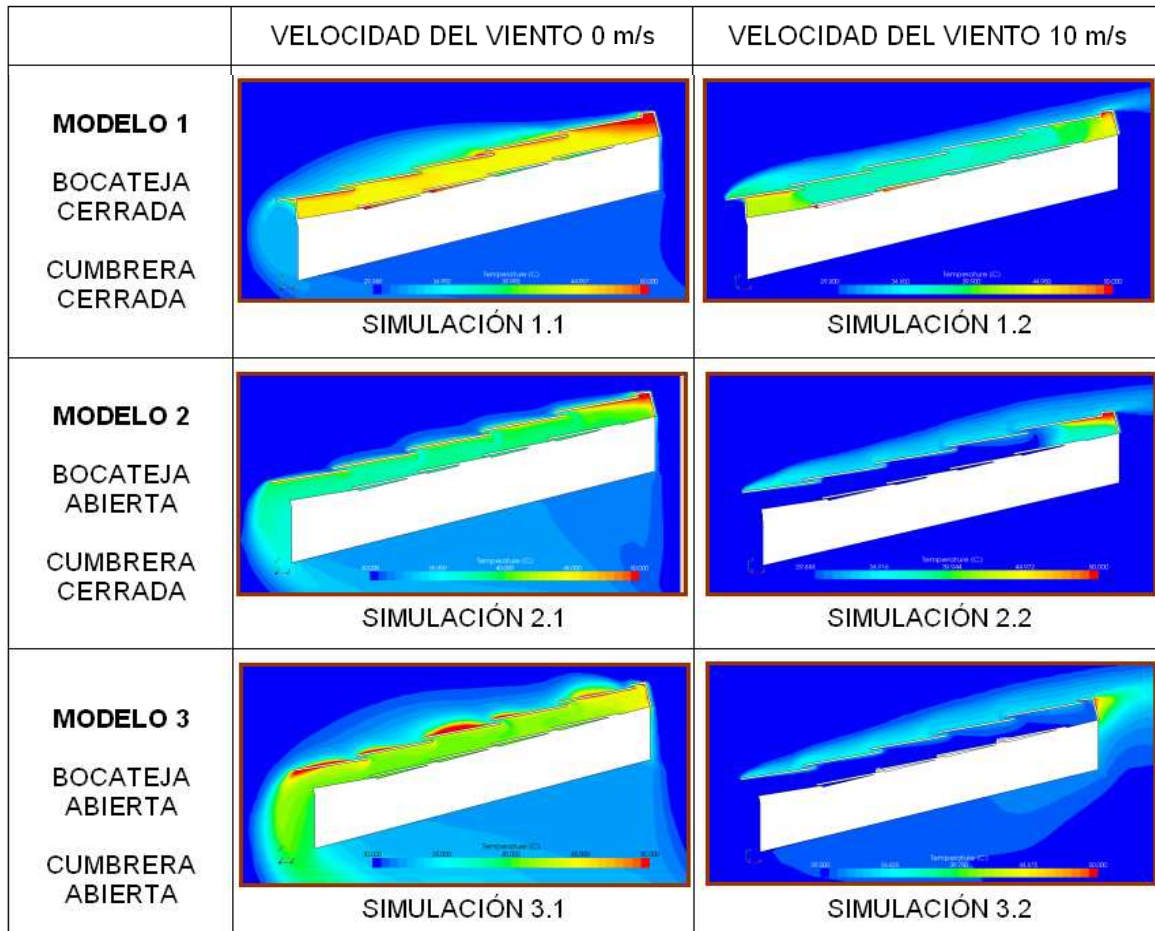


(fig. 24 “Plano vertical de estudio”)

Las condiciones de contorno se han establecido en base a la temperatura ambiente media (30 °C) y el valor medio de la temperatura en la superficie exterior (50 °C) que le corresponde en los gráficos de temperaturas del ensayo de AITEMIN. Con todos estos datos, y los de cada variante y situación, establecemos los valores de partida que introduciremos en las distintas simulaciones. El software utilizado es de la casa CD-adapco. Star-Design 4.06.001 y Star-CCM+ 4.06.011.

9.- Análisis de resultados.

9.1.- Gráficos de gradiente de temperaturas (fig. 25).



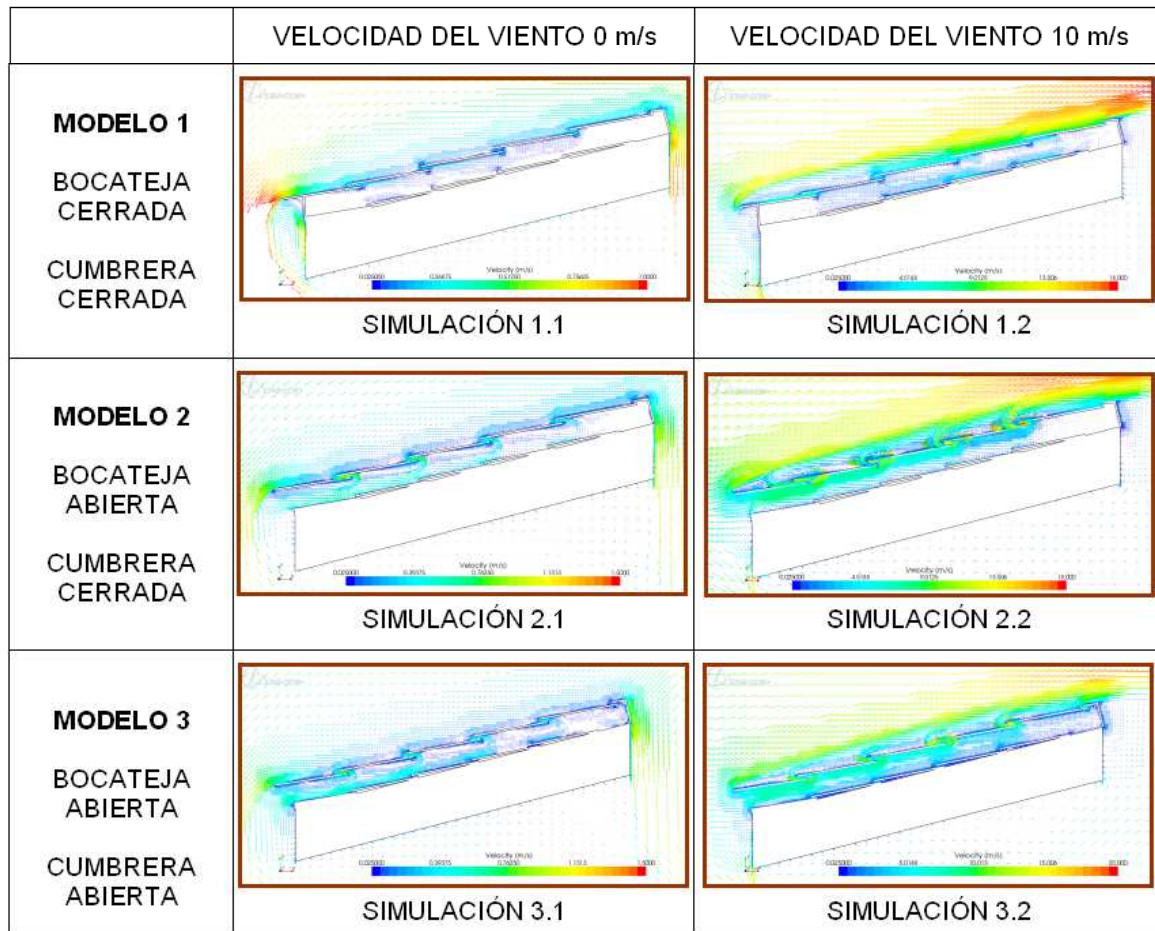
(fig. 25 “Comparativa de los gráficos de gradiente de temperatura de los modelos”)

Observamos que en el modelo 1, que reproduce la caracterización de puesta en obra y los valores de entorno del ensayo de AITEMIN, las temperaturas del conducto de ventilación en las dos variantes (convección natural y viento de 10m/s), son más elevadas que en los de los modelos 2 y 3 que incorporan la caracterización de bocateja abierta / cumbrera cerrada y bocateja abierta / cumbrera abierta respectivamente.

También observamos, que la acción del viento reduce notablemente la temperatura del conducto, lo que era de esperar. Otro aspecto que podía adelantar y que se ratifica, es el embolsamiento de aire caliente en la parte de superior y que desaparece casi por completo cuando se abre la zona de cumbrera.

Todos estos comportamientos van del lado de la lógica, pero se observa que en convección natural, con sólo la bocateja abierta, la temperatura del conducto es menor que con bocateja y cumbrera abierta, por una peor disipación del calor en el elemento cerámico, que puede apreciarse en la simulación 3.1 respecto de la simulación 2.1. Este suceso tendrá su explicación analizando la vectorización del viento.

9.2.- Gráficos de vectorización del viento (fig. 26).



(fig. 26 “Comparativa de los gráficos de vectorización del viento de los modelos”)

Estos gráficos nos permiten corroborar las observaciones de los gráficos de gradiente de temperaturas, ya que se puede comprobar, que el flujo de aire aumenta de forma relevante al abrir la bocateja y/o cumbrera, tal como se esperaba.

La acción del viento, hace trabajar a todo el conducto de ventilación, disipando calor de todo el elemento cerámico, aunque se concentra mayormente en la zona media-alta del conducto.

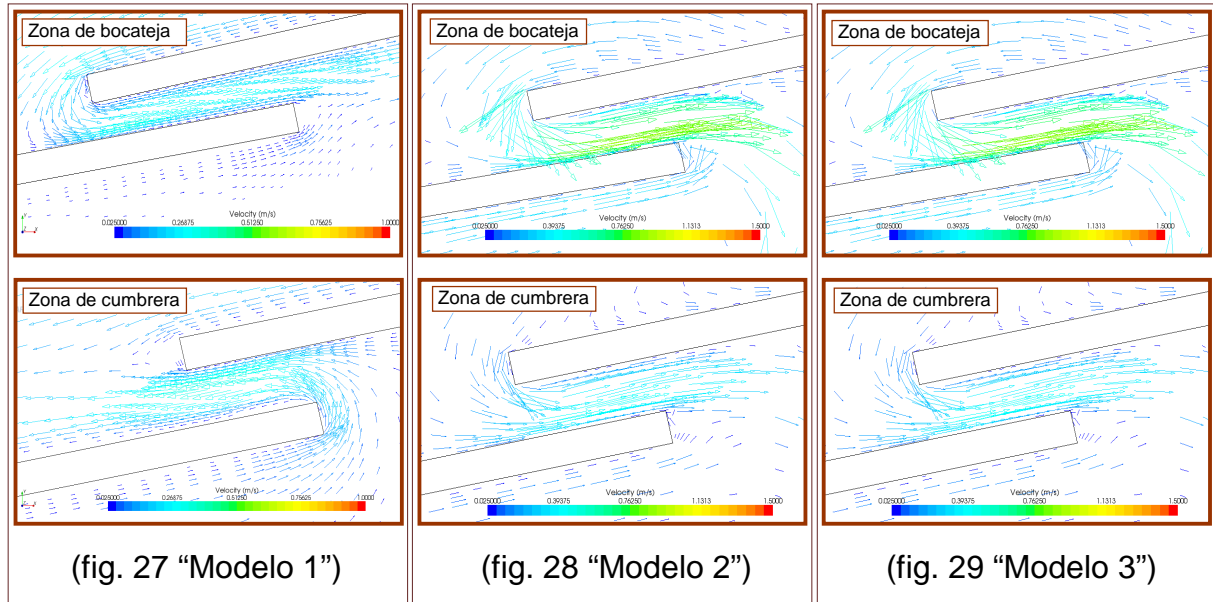
En convección natural, el flujo convectivo tiende a circular por la parte media-baja del conducto, lo que hace que la disipación de calor superficial sea menor, pero vemos, que esa concentración del flujo es mayor en la simulación 3.1, con cumbrera abierta, que en la 2.1 con cumbrera cerrada, de ahí que al circular el aire más pegado a la base y separándose de la parte superior del conducto en las simulación 3.1, la disipación sea menor y se manifieste la concentración de calor superficial que veíamos en los gráficos de gradiente de temperaturas.

Se puede observar en el modelo 1, que reproduce la caracterización del ensayo de AITEMIN, que en convección natural, las separaciones entre elementos más cercanos a la bocateja, funcionan como entrada de aire, mientras que los más cercanos a cumbrera funcionan como salida (fig. 27).

“ANÁLISIS MEDIANTE CFD DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEJA CERÁMICA CON ESTRUCTURA CELULAR”

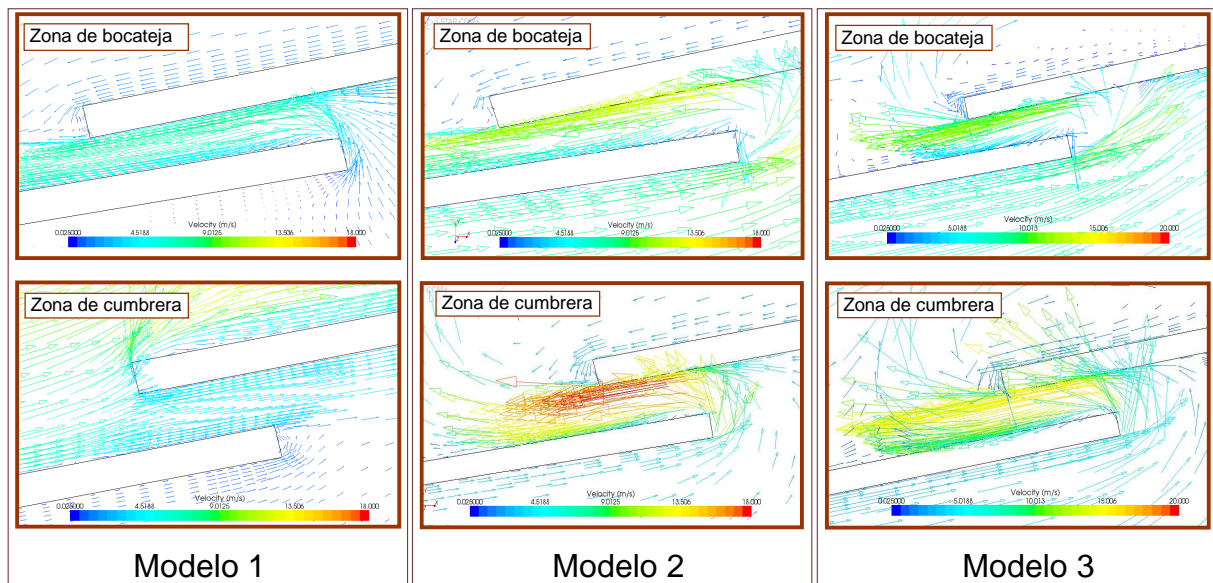
Cuando sólo abrimos la bocateja y dejamos la cumbre cerrada, modelo 2 (fig. 28), y al abrir la bocateja y la cumbre, modelo 3 (fig. 29), en ambos casos en convección natural, todas las separaciones entre elementos funcionan como entrada.

Convección natural



Este criterio de entrada-salida del viento por la separación entre los elementos de cubrición, cambia con la aparición de la acción del viento, es decir, que las separaciones que en convección natural funcionan como entrada de aire, con la incorporación de la acción del viento, se convierten en salida, y viceversa, independientemente del modelo y del criterio que en convección natural adopte (fig. 30).

Viento 10 m/s



(fig. 30 "Comparativa de los gráficos de vectorización del viento de los modelos")

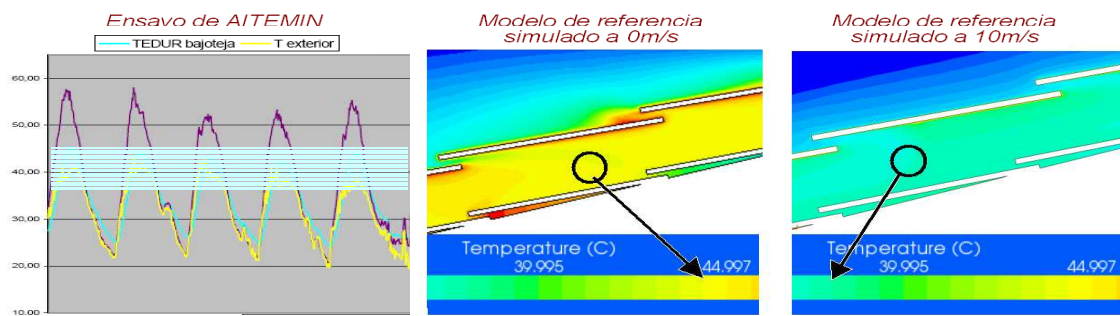
9.3.- Validación del modelo.

El modelo estacionario de simulación elegido implica que no se consideran los ciclos día-noche de la experimentación, en consecuencia, las condiciones de entorno que analizamos son las de un momento puntual, que en nuestro caso es durante el día.

Ese momento puntual de toma de datos es orientativo donde se estiman los datos más representativos de todo el ensayo para la simulación, que son los ya expuestos:

- Temperatura ambiente: 30 °C .
- Temperatura superficial de la teja: 50 °C
- Velocidad del viento: 0 m/s (convección natural) y 10 m/s como alternativa
- Aceleración gravedad: 9,8 m/s²

Al introducir los datos en las dos variantes con la configuración de los ensayos de AITEMIN, en convección natural, la temperatura en el conducto obtenida es de unos 45 °C (fig. 32), mientras que con la acción del viento es de unos 39 °C (fig. 33). En el ensayo se pone de manifiesto, que la franja de temperaturas en el conducto oscila entre 25 y 45 °C (fig. 31) y más concretamente para una temperatura ambiente de 30 °C, los valores se encuentran entre los 35 y 45 °C (fig. 31), dentro del rango de nuestros resultados, los que nos permite validar el modelo y dar por buenos los resultados obtenidos del análisis.



(fig. 31 “Ensayo de AITEMIN”) (fig. 32 “Modelo a 0 m/s”) (fig. 33 “Modelo a 10 m/s”)

Para una visión más amplia de los resultados obtenidos, se incorpora una tabla de datos comparativos entre todas las simulaciones realizadas (Tabla 1).

		(1) Valor de validación del modelo	MODELO DE REFERENCIA AITEMIN	MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3	
				SIMULACIÓN 1.1	SIMULACIÓN 1.2	SIMULACIÓN 2.1	SIMULACIÓN 2.2	SIMULACIÓN 3.1	SIMULACIÓN 3.2
DATOS	Temperatura ambiente (°C)	30	30	30	30	30	30	30	30
	Temperatura teja (°C)	50	50	50	50	50	50	50	50
	Velocidad Viento (m/s)	--	0	10	0	10	0	10	
RESULTADOS	Temperatura (°C)	Bocateja	45 - 35	45	45	40	30	45	30
		Conducto		45 (1)	38 (1)	37	30	40	30
		Cumbrera		50	45	50	50	45	35
	Viento	Velocidad bocateja	--	0,25	5,0	1,0	10,0	1,0	12,0
		Dirección bocateja	--	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
		Velocidad cumbrera	--	0,25	4,5	0,5	18,0	0,4	15,0
		Dirección cumbrera	--	Salida	Entrada	Entrada	Salida	Entrada	Salida

(Tabla 1 “Comparativa de resultados de las distintas simulaciones).

10.- Conclusiones.

1. Mediante CFD se ha conseguido reproducir un modelo matemático validado por contraste con un ensayo físico.
2. Con bocateja y cumbre cerrada. (modelo de referencia) El bloque TEC, mejora el comportamiento térmico de la cubierta frente a la cubrición tradicional.
3. Las caracterizaciones físicas propuestas en este estudio (bocateja abierta y cumbre cerrada / bocateja y cumbre abierta), suponen una mejora del comportamiento térmico del conducto de ventilación respecto al modelo de referencia.
4. Con la incorporación del viento, todos los modelos mejoran el comportamiento térmico del conducto de ventilación, siendo superior en los modelos de nuestras propuestas que en el de referencia
5. En convección natural, el flujo convectivo tiende a circular por la parte media-baja del conducto, siendo más concentrado con sólo la bocateja abierta. Con la acción del viento, el flujo tiende a circular por la parte media-alta del conducto.
6. Los flujos de entrada y salida entre los elementos se invierten con la aparición de la acción de viento, independientemente del criterio que el modelo adopte en convección natural.

REFERENCIAS:

- [1] Estudio comparativo del comportamiento higrotérmico de cubiertas ventiladas y no ventiladas, para las condiciones climáticas de la región NEA. Pilar de Zalazar, C. A.; Jacobo, G.J. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, T-014 (2003). Universidad Nacional del Nordeste (Argentina). Instituto Tecnológico para el Diseño Ambiental del Hábitat Humano. Facultad de Arquitectura y Urbanismo-UNNE.
- [2] Confort Térmico y Tipología Arquitectónica en Clima Cálido-Húmedo: Análisis térmico de la cubierta ventilada. Guimarães Merçon, M. Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Construcciones Arquitectónicas I. (Barcelona). Tesina. Máster Oficial Arquitectura Energía y Medio Ambiente. Septiembre 2008.
- [3] La calidad en el software. Validación de “CFD” (Computational Fluid Dynamics). Pérez Rojas, L.; et al. ETSI Navales (UPM). Noviembre 1997.
- [4] Software y arquitectura Herramientas de análisis del comportamiento energético y medioambiental de los edificios. Infodomus. Tecnologías de la Información para Arquitectura y Construcción. Junio 2007 pp 101-114.
- [5] Ensayo comparativo de comportamiento térmico de cubiertas con tejas “TEDUR 5”. Centro tecnológico de la asociación para la investigación y desarrollo. AITEMIN. Informe: CT-04-002. Julio de 2004.
- [6] Módulo CFD. DesignBuilder. Sol-arq: Soluciones arquitectónicas sustentables - Ventilación cruzada. <http://sol-arq.com/index.php/ventilacion-natural/ventilacion-cruzada>.
- [7] Datos obtenidos durante el mes de febrero de 2010 de la estación automática de meteorología de la DGT que está instalada en el P.K. 49.2 de la A-1. <http://infogar.dgt.es>.

Agradecimientos:

Al Doctor en Ciencias Físicas, D. JUAN CARLOS LOSADA GONZÁLEZ, su interés y apoyo en la fase de desarrollo teórico de este trabajo.

A la Doctora en Ciencias Físicas, D^a CARMEN MATILDE VIÑAS ARREBOLA su disposición a colaborar en el conocimiento del programa de simulación de CFD «Star CCM+».

Al Arquitecto, D. RICARDO TENDERO CABALLERO su implicación al hacer posible la visita a las instalaciones de AITEMIN y orientarme sobre la viabilidad de este estudio.

A responsable técnico de AITEMIN, D. ROBERTO DÍAZ RUBIO su atención al permitir la visita a los módulos de experimentación del «TEC» facilitando toda la información sobre el ensayo comparativo que ha servido como base de referencia para este estudio.

Al director de Producción de CERATRES D. JUAN CARLOS JEREZ ALONSO, quien ha facilitado toda la información requerida y dirigió la visita a la planta de fabricación.

Al Ingeniero Técnico Industrial D. ALBERTO SÁNCHEZ GONZÁLEZ sus consejos y orientación para la aplicación particular del programa «CFD» a este estudio.